TA/TL/2026/2167

JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Efektivitas Penggunaan *Eco enzyme* Terhadap Penurunan Parameter Kromium (Cr) Pada Limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan

Lalu Naufal Abqori
22513116

Dosen Pembimbing:
Prof.Ir.Eko Siswoyo, S.T.,M.Sc.ES.,Ph.D.,I.P.U

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana
Fakultas Teknik Desain Inovasi
Universitas Islam Indonesia
2026

DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Lalu Naufal Abqori
22513116

Supervisor:
Prof.Ir.Eko Siswoyo, S.T.,M.Sc.ES.,Ph.D.,I.P.U

Environmental Engineering Bachelor Program
Faculty of Engineering, Design, and Innovation
Universitas Islam Indonesia
2026

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Efektivitas Penggunaan *Eco enzyme* Terhadap Penurunan Parameter Kromium (Cr) Pada Limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan

Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Lalu Naufal Abqori

22513116

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 16 September 2026 dan disetujui oleh:

Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., I.P.U **(Pembimbing 1)**

17-9-2026

Dr. Eng. Ir. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng., I.P.M. **(Penguji 1)**

Nelly Marlina, S.T., M.T., Ph.D. **(Penguji 2)**

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK DESAIN INOVASI
YOGYAKARTA

Supriyanto, S.T., M.Sc., M.Eng., Ph.D.

PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia, maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan, dan studi saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Perangkat lunak atau program komputer yang digunakan dalam tugas akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Tidak ada penggunaan kecerdasan buatan *(artificial intelligence*, AI) dalam penyusunan karya tugas akhir ini kecuali:
   a. untuk membantu dalam kadar yang wajar (seperti membantu mengoreksi, mencari ide, dan mencari referensi), dan
   b. tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini.

   Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab saya sepenuhnya.
6. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 16 September 2026

Yang membuat pernyataan,



Lalu Naufal Abqori

22513116

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Efektivitas Penggunaan *Eco Enzyme* dengan Variasi Dosis terhadap Penurunan Kadar Kromium (Cr) pada Limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia." Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Selama proses penyusunan skripsi ini, saya memperoleh banyak bantuan, bimbingan, doa, dukungan, serta motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini saya ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah Swt. yang senantiasa melimpahkan rahmat, kesehatan, kekuatan, serta kemudahan sehingga saya dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., I.P.U., selaku dosen pembimbing, yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan arahan, bimbingan, masukan, serta motivasi selama proses penyusunan skripsi ini.
3. Kedua orang tua tercinta, Bapak Lalu Rahmat Marzoan dan Ibu Muhaeriah, yang selalu memberikan kasih sayang, doa, dukungan, pengorbanan, serta motivasi yang tiada henti sehingga saya dapat menyelesaikan pendidikan dan skripsi ini.
4. Kakak saya, yang senantiasa memberikan doa, perhatian, semangat, dan dukungan selama saya menjalani proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi.
5. Mahsa Aurellia, yang selalu memberikan semangat, doa, dukungan, motivasi, serta menjadi tempat berbagi cerita dan penyemangat selama proses penyusunan skripsi ini.
6. M. Rozy Saputra, yang telah memberikan bantuan, dukungan, motivasi, serta berbagai masukan selama proses penyelesaian skripsi.

7. Teman-teman Program Studi Teknik Lingkungan Angkatan 2022 yang telah memberikan semangat, kebersamaan, bantuan, serta pengalaman yang berharga selama masa perkuliahan.
8. Seluruh dosen, tenaga kependidikan, dan laboran Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan ilmu, bimbingan, pelayanan, serta bantuan selama saya menempuh pendidikan.
9. Semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu yang telah memberikan doa, bantuan, dan dukungan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Saya menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan dan belum sepenuhnya sempurna. Oleh karena itu, saya mengharapkan kritik dan saran yang membangun sebagai bahan perbaikan dan penyempurnaan di masa mendatang.

Akhir kata, saya berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat serta menambah wawasan dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang Teknik Lingkungan. Selain itu, saya berharap hasil penelitian ini dapat menjadi salah satu referensi bagi penelitian selanjutnya, terutama yang berkaitan dengan pemanfaatan *eco enzyme* sebagai alternatif pengolahan limbah laboratorium yang ramah lingkungan.

Sleman, 16 September 2026

Lalu Naufal Abqori

Efektivitas Penggunaan *Eco enzyme* Terhadap Penurunan Parameter Kromium (Cr) Pada Limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan

Mahasiswa : Lalu Naufal Abqori
NIM : 22513116
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., I.P.U

Abstrak

Limbah cair laboratorium berpotensi mengandung logam berat kromium (Cr) yang dapat mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Salah satu alternatif pengolahan yang dapat digunakan adalah *eco enzyme*, yaitu cairan hasil fermentasi bahan organik yang mengandung berbagai senyawa dan gugus fungsi yang berpotensi berinteraksi dengan logam berat. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas penggunaan *eco enzyme* dengan variasi dosis serta pengaruh waktu kontak terhadap penurunan kadar kromium (Cr) pada limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia. Penelitian dilakukan menggunakan metode eksperimen dengan variasi dosis *eco enzyme* sebesar 10%, 20%, dan 25%, serta waktu kontak H+1 jam, hari ke-3, hari ke-6, hari ke-9, hari ke-12, dan hari ke-15. Analisis kadar kromium dilakukan menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) atau *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar awal kromium pada limbah laboratorium sebesar 26,40 mg/L. Seluruh variasi dosis *eco enzyme* menunjukkan kemampuan dalam menurunkan kadar kromium selama waktu pengamatan, meskipun persentase penyisihan mengalami fluktuasi. *Eco enzyme* dengan dosis 25% menghasilkan *removal efficiency* tertinggi sebesar 30% pada hari ke-6, sedangkan dosis 10% dan 20% masing-masing menghasilkan *removal efficiency* tertinggi sebesar 22% pada hari ke-6 dan hari ke-15. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *eco enzyme* berpotensi digunakan sebagai salah satu alternatif pengolahan awal limbah laboratorium untuk membantu menurunkan kadar kromium (Cr), meskipun diperlukan pengolahan lanjutan untuk meningkatkan penyisihan kromium.

Kata kunci: *eco enzyme*, kromium (Cr), limbah laboratorium, efektivitas, *removal efficiency*.

Effectiveness of Eco Enzyme in Reducing Chromium (Cr) Concentration in Laboratory Wastewater of the Environmental Quality Laboratory

Student : Lalu Naufal Abqori
Student Number : 22513116
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., I.P.U

Abstract

Laboratory wastewater has the potential to contain heavy metals such as chromium (Cr), which may cause environmental pollution if not properly managed. One alternative treatment approach is the use of eco enzyme, a fermented organic liquid containing various compounds and functional groups that may interact with heavy metals. This study aimed to determine the effectiveness of eco enzyme at different dosages and the effect of contact time on chromium (Cr) reduction in wastewater from the Environmental Quality Laboratory, Department of Environmental Engineering, Universitas Islam Indonesia. An experimental method was applied using eco enzyme dosages of 10%, 20%, and 25%, with contact times of H+1 hour, 3 days, 6 days, 9 days, 12 days, and 15 days. Chromium concentration was analyzed using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). The results showed that the initial chromium concentration in the laboratory wastewater was 26.40 mg/L. All eco enzyme dosages demonstrated the ability to reduce chromium concentration during the observation period, although the removal efficiency fluctuated over time. The 25% eco enzyme dosage achieved the highest removal efficiency of 30% on day 6, while the 10% and 20% dosages achieved maximum removal efficiencies of 22% on day 6 and day 15, respectively. These results indicate that eco enzyme has potential as an alternative preliminary treatment for laboratory wastewater to help reduce chromium (Cr) concentration, although further treatment is still required to improve chromium removal.

Keywords: eco enzyme, chromium (Cr), laboratory wastewater, effectiveness, removal efficiency.

DAFTAR ISI

PRAKATA i

Abstrak iii

DAFTAR ISI vii

DAFTAR TABEL ix

DAFTAR GAMBAR x

DAFTAR LAMPIRAN xi

BAB I PENDAHULUAN. 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Perumusan Masalah 1

1.3 Tujuan Penelitian 3

1.4 Manfaat Penelitian 4

1.5 Ruang Lingkup 4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6

2.1 Limbah Laboratorium 6

2.2 Logam Berat 7

2.3 Kromium (Cr) 9

2.4 Eco enzyme 10

2.5 Faktor Yang Mempengaruhi Efektivitas Penurunan Kromium 12

2.6 Penelitian Terdahulu 13

BAB III METODE PENELITIAN 18

3.1 Waktu dan Lokasi 18

3.2 Alat dan bahan 19

3.3 Tahapan Penelitian 20

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 29

4.1 Gambaran Umum Penelitian 29

4.3 Hasil Pengujian Kadar Kromium (Cr) Setelah Perlakuan *Eco enzyme* 40

4.4 Perbandingan Penurunan Kadar Kromium (Cr) Antar Variasi Dosis *Eco enzyme* 49

4.5 Efektivitas Penurunan Kadar Kromium (Cr) 52

4.6 Kandungan Senyawa Aktif *Eco enzyme* dan Mekanisme Penurunan Kadar Kromium (Cr) 56

BAB V PENUTUP 58
5.1 Kesimpulan 58
5.2 Saran 59
DAFTAR PUSTAKA 60
LAMPIRAN 63

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Daftar Alat 19
Tabel 3. 2 Daftar Bahan 20
Tabel 4. 1 Kadar Awal Kromium (Cr) 30
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Kadar Kromium 10% 40
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kadar Kromium 20% 43
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Kadar Kromium 25% 46
Tabel 4. 5 rata-rata kadar kromium 49
Tabel 4. 6 Tabel Perbandingan Persentase Removal dari rata-rata kadar Kromium (Cr) Pada Air Limbah Berdasarkan Variasi Konsentrasi *Eco enzyme* dan Waktu Kontak 53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Lokasi Pengambilan Sampel 19
Gambar 3. 2 Tahapan Penelitian 21
Gambar 3. 3 Pembuatan *Eco enzyme* 23
Gambar 3. 4 Pengambilan Sampel Air Limbah Laboratorium 23
Gambar 3. 5 Pencampuran *Eco enzyme* Terhadap Air Limbah Laboratorium 24
Gambar 3. 6 Destruksi Sampel 25
Gambar 3. 7 Sampel Filtrat 25
Gambar 3. 8 Pengenceran 0,1ml 26
Gambar 3. 9 Analisis Kadar Cr Menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom 27
Gambar 4. 1 Grafik Perubahan Rata-rata Kadar Kromium (Cr) pada Perlakuan *Eco enzyme* Dosis 10% 41
Gambar 4. 2 Grafik Perubahan Rata-rata Kadar Kromium (Cr) pada Perlakuan *Eco enzyme* Dosis 20% 44
Gambar 4. 3 Grafik Perubahan Rata-rata Kadar Kromium (Cr) pada Perlakuan *Eco enzyme* Dosis 25% 47
Gambar 4. 4 Grafik Efektivitas Penurunan Kadar Kromium (Cr) pada Berbagai Variasi Dosis *Eco enzyme* 54

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Alat dan Bahan Pembuatan *Eco enzyme* 63
Lampiran 2 Progres Fermentasi *Eco enzyme* di hari ke – 7 dan hari ke - 14 63
Lampiran 3 Pengambilan Sampel Air Limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan..... 63
Lampiran 4 Pencampuran *Eco enzyme* terhadap Sampel Air Limbah hari..... 64
Lampiran 5 Pengecekan Ph Eco Enzyme..... 64

BAB I
PENDAHULUAN.

1.1 Latar Belakang

Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia digunakan untuk berbagai kegiatan praktikum, penelitian, dan pengujian yang menggunakan bahan serta reagen kimia. Berbagai kegiatan tersebut menghasilkan limbah, salah satunya berupa limbah cair yang dapat mengandung sisa reagen, larutan hasil analisis, dan bahan kimia lainnya. Karakteristik limbah cair laboratorium dapat berbeda-beda bergantung pada jenis kegiatan dan bahan yang digunakan. Keberadaan logam berat dalam limbah laboratorium perlu diperhatikan karena apabila tidak dikelola dengan baik dapat berpotensi mencemari lingkungan.

Logam berat yang terdapat pada limbah yang digunakan dalam penelitian ini adalah kromium (Cr). Keberadaan Cr pada limbah tersebut salah satunya berasal dari kegiatan praktikum Pengujian *Chemical Oxygen Demand* (COD). Pengujian COD secara konvensional menggunakan kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) sebagai oksidator untuk mengoksidasi bahan organik dalam sampel. Penggunaan reagen berbasis dikromat menyebabkan sisa larutan hasil pengujian dapat menjadi sumber kromium dalam limbah. Ngo dan Tran (2021) menunjukkan bahwa limbah yang dihasilkan dari prosedur analisis COD mengandung H_2SO_4, Hg^{2+}, dan $Cr_2O_7^{2-}$.

Oleh karena itu kondisi tersebut sesuai dengan limbah yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu limbah cair Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia. Salah satu sumber utama Cr pada limbah tersebut berasal dari kegiatan praktikum Pengujian COD. Oleh karena itu, keberadaan Cr pada limbah laboratorium perlu diperhatikan dan diperlukan pengolahan untuk mengurangi kandungannya sebelum limbah dibuang ke lingkungan. Berbagai metode telah dikembangkan untuk menurunkan kadar kromium dalam air limbah, antara lain adsorpsi, presipitasi, proses elektrokimia, pertukaran ion, dan proses biologis. Pada limbah hasil analisis COD, Ngo dan Tran (2021) menggunakan

proses elektrolisis dengan elektroda grafit dan memperoleh efisiensi penyisihan Cr sebesar 50,76%. Namun, setelah proses pengolahan, konsentrasi Cr masih mencapai 56,3 mg/L sehingga diperlukan pengolahan lanjutan. Sementara itu, Lai et al. (2023) menggunakan nanokomposit zirkonium oksida yang dilapisi asam humat untuk mengolah limbah COD dan mampu menurunkan Cr^{3+} dari sekitar 270 mg/L menjadi 0,28 mg/L.

Dengan demikian, bahan berbasis organik yang berpotensi digunakan adalah Eco enzyme. Eco enzyme merupakan cairan hasil fermentasi bahan organik, gula, dan air. Pemanfaatan Eco enzyme menarik untuk dikaji karena bahan bakunya dapat berasal dari limbah organik sehingga dapat mendukung pemanfaatan kembali bahan organik menjadi produk yang memiliki nilai guna. Selain itu, proses fermentasi menghasilkan berbagai senyawa organik yang dapat memberikan karakteristik tertentu pada Eco enzyme dan berpotensi berinteraksi dengan ion logam.

Eco enzyme merupakan produk hasil fermentasi bahan organik yang menghasilkan berbagai senyawa organik dan gugus fungsi yang berpotensi berinteraksi dengan logam berat. Pemanfaatan *Eco enzyme* sebagai bahan pengolahan logam berat telah diteliti pada beberapa jenis pencemar. Sondang et al. (2023) melaporkan bahwa penggunaan *Eco enzyme* pada air lindi TPA Sumompo mampu menurunkan kadar kadmium (Cd), dengan efektivitas rata-rata sebesar 67% pada penambahan *Eco enzyme* 10%. Penelitian Zainudin dan Kesumaningwati (2022) juga menunjukkan bahwa aplikasi *Eco enzyme* dapat memengaruhi kandungan beberapa logam berat pada media tanah bekas tambang batubara. Pada limbah laboratorium, Chandra (2024) melaporkan bahwa *Eco enzyme* berbahan kulit jeruk dan kulit nanas mampu menurunkan kadar timbal (Pb) pada limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan Universitas Islam Indonesia. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *Eco enzyme* memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan alternatif dalam penyisihan logam berat, meskipun efektivitasnya dapat berbeda bergantung pada jenis logam dan karakteristik limbah.

Namun, penelitian yang secara khusus menguji penggunaan Eco enzyme secara langsung untuk menurunkan kromium total pada limbah cair Laboratorium Kualitas Lingkungan belum ditemukan dalam sumber yang ditelusuri. Dengan demikian,

penelitian ini diarahkan untuk menguji kemampuan Eco enzyme dalam menurunkan kromium total pada limbah cair laboratorium dengan karakteristik limbah yang berbeda dari penelitian sebelumnya. Kondisi tersebut menjadi dasar untuk mengetahui efektivitas Eco enzyme dalam menurunkan kadar Cr pada limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian "Efektivitas Penggunaan Eco enzyme untuk Menurunkan Kadar Kromium (Cr) dalam Limbah Laboratorium" dilakukan untuk mengetahui kemampuan Eco enzyme dalam menurunkan kadar kromium total pada limbah cair Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan volume Eco enzyme dan waktu kontak terhadap penurunan kadar kromium total serta menentukan perlakuan yang memberikan hasil penurunan Cr paling efektif. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai potensi Eco enzyme sebagai salah satu alternatif pengolahan limbah laboratorium berbasis bahan organik.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, berikut merupakan rumusan masalah pada penelitian ini **:**

1. Bagaimana efektivitas penggunaan *eco enzyme* dengan variasi konsentrasi 10%, 20%, dan 25% dalam menurunkan kadar kromium (Cr) pada limbah laboratorium?
2. Bagaimana pengaruh variasi waktu kontak terhadap penurunan kadar kromium (Cr) menggunakan *eco enzyme*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis efektivitas penggunaan *eco enzyme* dengan variasi konsentrasi 10%, 20%, dan 25% dalam menurunkan kadar kromium (Cr) pada limbah laboratorium.

2. Menganalisis pengaruh variasi waktu kontak terhadap penurunan kadar kromium (Cr) menggunakan *eco enzyme*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan, pengetahuan, dan pengalaman peneliti dalam melakukan penelitian mengenai pengolahan limbah laboratorium, khususnya terkait pemanfaatan *eco enzyme* sebagai alternatif pengolahan untuk menurunkan kadar kromium (Cr).
2. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan masukan dan referensi dalam pengembangan pengelolaan limbah laboratorium, khususnya sebagai alternatif metode pengolahan limbah cair yang mengandung kromium (Cr) dengan memanfaatkan Eco enzyme yang ramah lingkungan dan ekonomis.

1.5 Ruang Lingkup

Batasan pembahasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Penelitian ini menggunakan limbah cair yang berasal dari Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia sebagai objek penelitian dengan parameter utama yang dianalisis adalah kadar kromium (Cr).
2. *Eco enzyme* yang digunakan dalam penelitian ini dibuat dari limbah organik berupa kulit jeruk dan kulit nanas dengan perbandingan molase, bahan organik, dan air sebesar 1:3:10, kemudian difermentasi selama 90 hari hingga menghasilkan larutan *eco enzyme* yang siap digunakan sebagai media pengolahan limbah.
3. Aplikasi *eco enzyme* dilakukan pada limbah cair laboratorium menggunakan variasi konsentrasi 0%, 10%, 20%, dan 25% untuk menganalisis efektivitasnya dalam menurunkan kadar kromium (Cr).
4. Variasi waktu kontak yang digunakan dalam penelitian ini meliputi H+1 jam, hari ke-3, hari ke-6, hari ke-9, hari ke-12, dan hari ke-15 untuk menganalisis pengaruh waktu kontak terhadap penurunan kadar kromium (Cr).
5. Analisis kadar kromium (Cr) dilakukan terhadap sampel limbah cair sebelum

perlakuan (blanko) dan setelah perlakuan menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)/*Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) sesuai dengan metode standar yang berlaku untuk mengetahui efektivitas penggunaan *eco enzyme* dalam menurunkan kadar kromium (Cr).

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Laboratorium

2.1.1 Pengertian Limbah Laboratorium

Laboratorium merupakan fasilitas yang digunakan untuk menunjang kegiatan pendidikan, penelitian, pengujian, maupun pelayanan jasa analisis dengan memanfaatkan berbagai bahan kimia, reagen, dan peralatan laboratorium. Aktivitas tersebut menghasilkan limbah dalam bentuk padat, cair, maupun gas yang berpotensi mengandung bahan berbahaya dan beracun (B3). Dibandingkan dengan limbah domestik, limbah laboratorium memiliki karakteristik yang lebih kompleks karena mengandung campuran berbagai senyawa kimia dengan konsentrasi yang bervariasi sehingga memerlukan penanganan khusus sebelum dibuang ke lingkungan (Dhenkula et al., 2024).

Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, limbah yang mengandung bahan berbahaya dan beracun harus dikelola sesuai dengan karakteristiknya agar tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, setiap laboratorium perlu menerapkan sistem pengelolaan limbah yang mencakup pengurangan limbah pada sumbernya, pemilahan, penyimpanan sementara, pengolahan, hingga pembuangan sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

2.1.2 Karakteristik Limbah Laboratorium

Karakteristik limbah laboratorium dipengaruhi oleh jenis kegiatan, bahan kimia, serta metode analisis yang digunakan. Limbah laboratorium umumnya memiliki sifat korosif, reaktif, mudah terbakar, toksik, dan dapat mengandung logam berat maupun senyawa organik yang sulit terdegradasi secara alami. Limbah cair laboratorium umumnya memiliki parameter pencemar seperti pH ekstrem, *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solids* (TSS), serta kandungan logam berat seperti kromium (Cr), timbal (Pb), kadmium (Cd), tembaga (Cu), nikel (Ni), dan seng

(Zn). Kandungan tersebut menyebabkan limbah laboratorium memerlukan pengolahan sebelum dibuang ke lingkungan agar tidak menimbulkan pencemaran (Dhenkula et al., 2024).

2.1.3 Sumber Limbah Laboratorium

Limbah laboratorium berasal dari berbagai aktivitas operasional, seperti kegiatan praktikum mahasiswa, penelitian, pengujian sampel lingkungan, kalibrasi alat, pencucian peralatan laboratorium, serta sisa reagen yang tidak terpakai. Pada laboratorium kualitas lingkungan, limbah cair juga dihasilkan dari analisis parameter kualitas air, air limbah, tanah, maupun limbah B3 yang menggunakan berbagai pereaksi kimia selama proses analisis (Dhenkula et al., 2024).

2.1.4 Dampak Limbah Laboratorium Terhadap Lingkungan

Pembuangan limbah laboratorium tanpa melalui proses pengolahan dapat menurunkan kualitas lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia. Kandungan logam berat bersifat persisten, tidak dapat terurai secara biologis, serta dapat terakumulasi pada sedimen maupun jaringan organisme. Akumulasi tersebut dapat menyebabkan gangguan terhadap ekosistem perairan dan meningkatkan risiko paparan terhadap manusia melalui rantai makanan (Qasem et al., 2021).

2.2 Logam Berat

2.2.1 Pengertian Logam Berat

Logam berat merupakan kelompok unsur logam yang memiliki massa jenis relatif tinggi, umumnya lebih besar dari 5 g/cm^3, serta bersifat persisten di lingkungan karena tidak dapat terdegradasi secara biologis. Keberadaan logam berat di lingkungan berasal dari proses alami, seperti pelapukan batuan dan aktivitas vulkanik, maupun aktivitas antropogenik, seperti pertambangan, industri, laboratorium, pertanian, dan kegiatan domestik. Logam berat menjadi salah satu pencemar yang mendapat perhatian karena memiliki sifat toksik, mudah terakumulasi dalam organisme, serta dapat mengalami biomagnifikasi melalui rantai makanan (Qasem et al., 2021; Balali-Mood et al., 2021).

Beberapa logam yang sering ditemukan sebagai pencemar lingkungan antara lain kromium (Cr), timbal (Pb), kadmium (Cd), merkuri (Hg), arsen (As), nikel (Ni), tembaga (Cu), dan seng (Zn). Meskipun beberapa logam seperti tembaga dan seng dibutuhkan oleh organisme dalam jumlah kecil sebagai unsur esensial, keberadaannya dalam konsentrasi yang melebihi ambang batas dapat menyebabkan efek toksik terhadap manusia maupun organisme lainnya (Renu et al., 2021).

2.2.2 Karakteristik Logam Berat

Logam berat memiliki karakteristik yang berbeda dengan pencemar organik. Salah satu sifat utama logam berat adalah tidak dapat mengalami biodegradasi sehingga cenderung bertahan dalam waktu yang lama di lingkungan. Selain itu, logam berat memiliki kemampuan berikatan dengan partikel tanah, sedimen, maupun bahan organik sehingga dapat terakumulasi dalam ekosistem perairan. Akumulasi tersebut meningkatkan risiko paparan terhadap organisme akuatik maupun manusia melalui konsumsi air dan biota yang telah terkontaminasi (Qasem et al., 2021).

2.2.3 Sumber Logam Berat

Pencemaran logam berat berasal dari berbagai sumber, baik alami maupun aktivitas manusia. Sumber alami meliputi pelapukan batuan, erosi, dan aktivitas vulkanik. Sementara itu, sumber antropogenik meliputi kegiatan industri penyamakan kulit, pelapisan logam (*electroplating*), pertambangan, industri tekstil, laboratorium, rumah sakit, serta penggunaan pupuk dan pestisida dalam sektor pertanian (Samuel et al., 2021).

2.2.4 Dampak Logam Berat terhadap Lingkungan dan Kesehatan

Logam berat merupakan salah satu kelompok pencemar yang memiliki tingkat toksisitas tinggi. Paparan logam berat secara terus-menerus dapat menyebabkan gangguan pada berbagai organ tubuh, seperti hati, ginjal, sistem saraf, sistem reproduksi, dan sistem pernapasan. Selain itu, beberapa logam berat, seperti kromium heksavalen (Cr(VI)), kadmium (Cd), dan arsen (As), diketahui memiliki sifat mutagenik maupun karsinogenik sehingga berpotensi meningkatkan risiko terjadinya kanker (Balali-Mood et al., 2021).

2.3 Kromium (Cr)

2.3.1 Pengertian Kromium

Kromium (Cr) merupakan logam transisi yang banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor industri dan laboratorium, seperti industri pelapisan logam, penyamakan kulit, tekstil, pembuatan pigmen, serta sebagai reagen dalam analisis laboratorium. Intensitas penggunaan kromium yang tinggi menyebabkan logam ini menjadi salah satu pencemar prioritas pada air limbah karena bersifat persisten dan berpotensi terakumulasi di lingkungan (Singh et al., 2022).

2.3.2 Bentuk Kromium di Lingkungan

Di lingkungan perairan, kromium umumnya berada dalam dua bentuk valensi, yaitu kromium trivalen (Cr(III)) dan kromium heksavalen (Cr(VI)). Cr(III) relatif lebih stabil dan memiliki toksisitas yang lebih rendah, sedangkan Cr(VI) bersifat sangat toksik, mudah larut, memiliki mobilitas tinggi, serta lebih mudah memasuki sel sehingga menjadi bentuk kromium yang paling berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia (Rajapaksha et al., 2022).

2.3.3 Dampak Kromium terhadap Lingkungan dan Kesehatan

Paparan kromium dalam jangka panjang dapat menyebabkan gangguan kesehatan, seperti iritasi kulit, kerusakan ginjal, gangguan hati, gangguan sistem pernapasan, hingga meningkatkan risiko kanker. Selain itu, kromium yang terakumulasi di badan air dapat mengalami bioakumulasi pada organisme akuatik dan berpotensi mengalami biomagnifikasi melalui rantai makanan (Singh et al., 2022).

2.3.4 Sumber Kromium

aktivitas manusia. Sumber alami meliputi pelapukan batuan ultrabasa dan aktivitas vulkanik, sedangkan sumber antropogenik meliputi industri penyamakan kulit, pelapisan logam (*electroplating*), industri tekstil, industri pigmen, pertambangan, serta kegiatan laboratorium yang menggunakan senyawa kromium sebagai reagen analisis (Samuel et al., 2021).

Pada Laboratorium Kualitas Lingkungan, kromium dapat berasal dari penggunaan larutan standar maupun reagen yang mengandung senyawa kromium selama proses analisis kualitas air dan air limbah. Limbah hasil analisis tersebut berpotensi mengandung kromium sehingga memerlukan pengolahan sebelum dibuang agar tidak mencemari lingkungan.

2.3.5 Baku Mutu Kromium

Baku mutu merupakan batas maksimum kadar suatu parameter pencemar yang diperbolehkan berada di dalam media lingkungan. Keberadaan kromium dalam air limbah harus memenuhi baku mutu sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan agar tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Di Indonesia, baku mutu air limbah diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 beserta peraturan pelaksana yang berlaku sesuai jenis kegiatan usaha. Nilai baku mutu kromium yang digunakan dalam penelitian ini akan dijadikan acuan untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan *Eco enzyme* dalam menurunkan kadar kromium pada limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia.

Selain mengacu pada baku mutu, analisis kadar kromium dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA/AAS) sesuai SNI 6989.17:2009, sehingga hasil pengujian dapat dibandingkan dengan ketentuan baku mutu yang berlaku.

2.4 Eco enzyme

2.4.1 Pengertian *Eco enzyme*

Eco enzyme merupakan cairan hasil fermentasi limbah organik, terutama limbah buah dan sayuran, yang dicampurkan dengan gula merah atau molase dan air dalam perbandingan tertentu. Produk fermentasi ini pertama kali diperkenalkan oleh Rosukon Poompanvong dari Thailand sebagai salah satu upaya pemanfaatan limbah organik menjadi produk yang bernilai guna serta ramah lingkungan. Proses fermentasi menghasilkan berbagai senyawa aktif, seperti asam organik, alkohol, enzim, dan

metabolit sekunder yang berpotensi dimanfaatkan dalam berbagai bidang, termasuk pengolahan limbah, pertanian, maupun sanitasi lingkungan (Gumilar et al., 2023).

Eco enzyme menjadi salah satu inovasi dalam pengelolaan limbah organik karena mampu mengurangi jumlah sampah yang dibuang ke tempat pemrosesan akhir sekaligus menghasilkan produk yang memiliki berbagai manfaat. Selain dimanfaatkan sebagai pupuk organik cair, pembersih alami, dan pengendali bau, *Eco enzyme* juga mulai banyak diteliti sebagai biosorben untuk menurunkan kandungan logam berat pada air limbah karena mengandung senyawa aktif yang mampu berinteraksi dengan ion logam (Putri et al., 2024).

2.4.2 Bahan Penyusun *Eco enzyme*

Eco enzyme dibuat melalui fermentasi limbah organik berupa kulit buah atau sayuran dengan penambahan gula merah atau molase sebagai sumber karbon dan air sebagai media fermentasi. Rasio yang paling banyak digunakan adalah 1 : 3 : 10, yaitu satu bagian gula, tiga bagian limbah organik, dan sepuluh bagian air. Perbandingan tersebut dinilai mampu menghasilkan proses fermentasi yang optimal serta menghasilkan *Eco enzyme* dengan karakteristik yang stabil (Gumilar et al., 2023).

Pada penelitian ini, bahan organik yang digunakan adalah kulit jeruk dan kulit nanas. Kulit jeruk diketahui mengandung senyawa flavonoid, limonene, pektin, serta asam sitrat, sedangkan kulit nanas mengandung enzim bromelain, selulosa, hemiselulosa, dan berbagai senyawa fenolik. Kandungan tersebut berpotensi menghasilkan senyawa aktif selama proses fermentasi yang dapat meningkatkan kemampuan *Eco enzyme* dalam mengadsorpsi logam berat (Ismail, A. Y., et al., 2024).

2.4.3 Proses Pembuatan *Eco enzyme*

Pembuatan *Eco enzyme* dilakukan melalui proses fermentasi anaerob menggunakan campuran limbah organik, gula merah atau molase, dan air di dalam wadah tertutup. Selama proses fermentasi, mikroorganisme menguraikan senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana sehingga terbentuk berbagai metabolit, seperti asam asetat, alkohol, enzim, dan senyawa bioaktif lainnya. Umumnya proses fermentasi berlangsung selama tiga bulan agar diperoleh *Eco enzyme* dengan karakteristik fisik dan kimia yang stabil (Gumilar et al., 2023).

Selama fermentasi terjadi perubahan warna larutan menjadi cokelat tua, penurunan nilai pH hingga berada pada kisaran asam, serta terbentuk aroma khas hasil fermentasi. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa aktivitas mikroorganisme berlangsung dengan baik dan menghasilkan berbagai senyawa organik yang berpotensi dimanfaatkan dalam pengolahan limbah (Permatasari et al., 2025).

2.4.4 Karakteristik dan Kandungan *Eco enzyme*

Karakteristik *Eco enzyme* dipengaruhi oleh jenis bahan baku, lama fermentasi, serta kondisi penyimpanan. *Eco enzyme* umumnya memiliki pH berkisar 3–4 akibat terbentuknya berbagai asam organik selama proses fermentasi. Selain itu, *Eco enzyme* mengandung gugus fungsi hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), karbonil (C = O), serta berbagai senyawa fenolik yang berpotensi berperan dalam proses adsorpsi logam berat (Ismail, A. Y., et al., 2024).

Hasil karakterisasi menggunakan spektroskopi FTIR pada berbagai penelitian menunjukkan bahwa gugus fungsi hidroksil dan karboksil merupakan gugus yang dominan pada *Eco enzyme*. Gugus fungsi tersebut memiliki kemampuan mengikat ion logam melalui mekanisme kompleksasi maupun adsorpsi sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai biosorben dalam pengolahan limbah yang mengandung logam berat (Permatasari et al., 2025).

2.5 Faktor Yang Mempengaruhi Efektivitas Penurunan Kromium

2.5.1 Pengaruh Dosis *Eco enzyme*

Dosis *Eco enzyme* menentukan jumlah gugus fungsi aktif yang tersedia untuk berinteraksi dengan ion kromium. Penambahan dosis *Eco enzyme* akan meningkatkan jumlah situs adsorpsi sehingga peluang terjadinya ikatan antara ion logam dan gugus aktif menjadi lebih besar. Akibatnya, efisiensi penyisihan kromium cenderung meningkat seiring bertambahnya dosis hingga mencapai kondisi optimum (Dawn & Vishwakarma, 2021).

Namun, penambahan dosis yang terlalu tinggi tidak selalu menghasilkan peningkatan efisiensi. Setelah seluruh ion kromium terikat, penambahan *Eco enzyme* lebih lanjut tidak memberikan pengaruh yang signifikan karena jumlah ion logam di

dalam larutan menjadi faktor pembatas. Oleh sebab itu, penentuan dosis optimum menjadi salah satu tujuan penting dalam penelitian ini (Putri et al., 2024).

2.5.2 Pengaruh Kontak

Waktu kontak merupakan lama interaksi antara *Eco enzyme* dan limbah yang mengandung kromium. Semakin lama waktu kontak, semakin besar kesempatan ion kromium untuk berinteraksi dengan gugus fungsi aktif sehingga proses adsorpsi dan kompleksasi berlangsung lebih maksimal. Pada awal proses, laju penyisihan biasanya berlangsung cepat karena masih banyak tersedia situs aktif pada *Eco enzyme* (Ayele & Godeto, 2021).

Setelah mencapai kondisi kesetimbangan, peningkatan waktu kontak tidak lagi memberikan peningkatan penyisihan yang signifikan. Hal ini disebabkan sebagian besar gugus aktif telah mengikat ion kromium sehingga kapasitas adsorpsi mulai mencapai titik jenuh. Oleh karena itu, penelitian mengenai waktu kontak diperlukan untuk menentukan waktu optimum yang menghasilkan efisiensi penyisihan tertinggi (Rajapaksha et al., 2022).

2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu menjadi salah satu acuan dalam penyusunan penelitian karena dapat memberikan gambaran mengenai hasil penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Melalui kajian ini, peneliti dapat memahami perkembangan penelitian yang berkaitan dengan pemanfaatan *Eco enzyme* dan penyisihan logam berat, khususnya kromium (Cr). Selain itu, penelitian terdahulu juga membantu dalam menemukan perbedaan serta kebaruan penelitian yang akan dilakukan.

Penelitian yang dilakukan oleh Putri et al. (2024) menunjukkan bahwa *Eco enzyme* yang dibuat dari limbah kulit buah mampu menurunkan kadar kromium total pada limbah industri penyamakan kulit. Penurunan tersebut terjadi karena adanya gugus fungsi aktif yang terbentuk selama proses fermentasi sehingga dapat mengikat ion logam. Penelitian ini membuktikan bahwa *Eco enzyme* memiliki potensi sebagai bahan alternatif dalam pengolahan limbah yang mengandung logam berat. Namun, objek penelitian yang digunakan masih berupa limbah industri sehingga karakteristiknya berbeda dengan limbah laboratorium.

Selanjutnya, Gumilar et al. (2023) menjelaskan bahwa *Eco enzyme* merupakan produk hasil fermentasi limbah organik yang memiliki berbagai kandungan senyawa aktif, seperti asam organik, enzim, dan alkohol. Senyawa-senyawa tersebut membuat *Eco enzyme* tidak hanya bermanfaat dalam pengelolaan sampah organik, tetapi juga berpotensi digunakan pada proses pengolahan limbah. Meskipun demikian, penelitian tersebut lebih berfokus pada karakteristik dan manfaat *Eco enzyme* secara umum serta belum menguji kemampuannya dalam menyisihkan logam kromium.

Rajapaksha et al. (2022) mengkaji berbagai jenis biosorben yang digunakan untuk mengurangi kadar kromium heksavalen (Cr(VI)) dalam air limbah. Hasil kajian menunjukkan bahwa proses adsorpsi merupakan salah satu metode yang efektif karena mampu mengikat ion logam pada permukaan adsorben. Efektivitas proses tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti pH, luas permukaan adsorben, konsentrasi awal logam, dan waktu kontak. Akan tetapi, penelitian tersebut tidak menggunakan *Eco enzyme* sebagai adsorben.

Penelitian lain oleh Singh et al. (2022) membahas mengenai keberadaan kromium di lingkungan, sumber pencemarannya, dampaknya terhadap kesehatan, serta berbagai teknologi yang dapat diterapkan untuk mengurangi pencemaran kromium. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa kromium, khususnya dalam bentuk Cr(VI), memiliki tingkat toksisitas yang tinggi sehingga perlu diolah sebelum limbah dibuang ke lingkungan. Akan tetapi, penelitian tersebut tidak menguji penggunaan *Eco enzyme* sebagai media pengolahan.

Ayele dan Godeto (2021) meneliti proses bioremediasi kromium menggunakan mikroorganisme. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikroorganisme mampu menurunkan kadar kromium melalui mekanisme biosorpsi, bioakumulasi, dan bioreduksi. Keberhasilan proses tersebut dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti pH, suhu, dan konsentrasi logam. Penelitian ini memberikan informasi mengenai mekanisme biologis penyisihan kromium, namun berbeda dengan penelitian yang dilakukan karena menggunakan mikroorganisme, bukan *Eco enzyme*.

Dawn dan Vishwakarma (2021) menjelaskan bahwa berbagai jenis biomassa dapat dimanfaatkan sebagai adsorben alami untuk mengurangi kadar logam berat dalam air limbah. Biomassa tersebut memiliki gugus fungsi aktif yang mampu

mengikat ion logam sehingga dapat digunakan sebagai alternatif pengolahan yang lebih ramah lingkungan. Namun demikian, penelitian tersebut tidak membahas penggunaan *Eco enzyme* hasil fermentasi limbah organik.

Qasem et al. (2021) melakukan kajian mengenai berbagai metode penyisihan logam berat dari air limbah, seperti presipitasi kimia, filtrasi membran, pertukaran ion, elektrokimia, dan adsorpsi. Dari berbagai metode tersebut, adsorpsi dinilai memiliki prospek yang baik karena prosesnya relatif sederhana, efisien, dan ekonomis. Walaupun demikian, penelitian tersebut hanya membahas metode pengolahan secara umum tanpa mengkaji penggunaan *Eco enzyme*.

Bayuo (2021) mengulas pemanfaatan berbagai biosorben alami untuk mengurangi kadar kromium pada air limbah. Hasil kajian menunjukkan bahwa limbah pertanian dan limbah organik mempunyai potensi sebagai adsorben karena mengandung gugus fungsi yang dapat mengikat ion logam. Akan tetapi, penelitian tersebut tidak menggunakan *Eco enzyme* sehingga mekanisme dan bahan yang digunakan berbeda dengan penelitian ini.

Berdasarkan hasil kajian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya, dapat diketahui bahwa *Eco enzyme* memiliki potensi yang cukup baik sebagai bahan alternatif dalam pengolahan limbah yang mengandung logam berat. Namun, sebagian besar penelitian masih dilakukan pada limbah industri atau hanya membahas karakteristik *Eco enzyme* tanpa mengaplikasikannya pada limbah laboratorium.

Penelitian ini memiliki perbedaan dibandingkan penelitian terdahulu karena menggunakan limbah dari Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia sebagai objek penelitian. Selain itu, penelitian ini berfokus pada pengaruh variasi dosis *Eco enzyme* dan waktu kontak terhadap penurunan kadar kromium (Cr). Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi baru mengenai pemanfaatan *Eco enzyme* sebagai alternatif pengolahan limbah laboratorium yang sederhana, ramah lingkungan, dan mudah diterapkan.

2.7 *Eco Enzyme* Sebagai Bahan Penyisihan Kromium Cr

2.7.1 Peran Gugus Karboksil dalam Penyisihan Kromium

Salah satu gugus fungsi yang berperan dalam penyisihan kromium oleh *Eco enzyme* adalah gugus karboksil (–COOH). Putri et al. (2024) melakukan analisis FTIR terhadap *Eco enzyme* berbahan kulit buah dan menemukan adanya gugus hidroksil (O–H) dan karboksil (–COOH), selain gugus C–O, C–C, C=C, dan C–H. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa seluruh formulasi *Eco enzyme* yang digunakan mampu menurunkan kadar kromium total pada limbah penyamakan kulit. Kadar Cr turun dari 0,9637 mg/L sebelum perlakuan menjadi 0,1493–0,2384 mg/L setelah perlakuan. Peneliti mengaitkan penurunan tersebut dengan keberadaan gugus karboksil pada *Eco enzyme*.

Menurut Putri et al. (2024), gugus karboksil dapat berperan dalam pengikatan kation logam yang terdapat dalam larutan. Secara kimia, gugus karboksil dapat mengalami pelepasan proton sehingga berubah menjadi bentuk karboksilat:

$$R - COOH \leftrightharpoons R - COO^- + H^+$$

Bentuk R–COO^- memiliki muatan negatif sehingga dapat berinteraksi dengan spesies logam bermuatan positif. Interaksi antara gugus karboksilat dengan logam tersebut dapat menyebabkan logam terikat pada komponen organik *Eco enzyme*, sehingga jumlah kromium yang berada dalam fase larutan dapat berkurang. Putri et al. (2024) secara khusus menghubungkan keberadaan gugus karboksil dengan kemampuan *Eco enzyme* dalam menurunkan kromium pada limbah penyamakan kulit.

2.7.3 Peran Gugus Hidroksil (O–H)

Selain gugus karboksil, Putri et al. (2024) juga mengidentifikasi gugus hidroksil (O–H) pada seluruh formulasi *Eco enzyme*. Gugus hidroksil merupakan salah satu gugus fungsi yang berasal dari senyawa organik dalam bahan buah dan hasil proses fermentasi. Atom oksigen pada gugus hidroksil memiliki pasangan elektron yang secara kimia memungkinkan terjadinya interaksi dengan spesies logam.

Dengan demikian, keberadaan gugus O–H bersama dengan –COOH dapat mendukung kemampuan *Eco enzyme* dalam berinteraksi dengan kromium. Namun, karena penelitian Anda tidak melakukan analisis FTIR setelah proses pengolahan,

perubahan gugus fungsi akibat interaksi dengan Cr tidak dapat dibuktikan secara langsung. Oleh karena itu, gugus tersebut sebaiknya disebut sebagai gugus fungsi yang berpotensi berperan dalam interaksi dengan Cr, bukan sebagai gugus yang telah terbukti secara langsung mengikat Cr pada penelitian Anda.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Kualitas Lingkungan, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP), Universitas Islam Indonesia (UII), yang berlokasi di Gedung Mohammad Natsir, Kampus Terpadu UII, Jalan Kaliurang Km. 14,5, Kalurahan Umbulmartani, Kapanewon Ngemplak, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Laboratorium ini merupakan fasilitas pendidikan dan penelitian yang mendukung kegiatan praktikum, penelitian, serta pengujian kualitas lingkungan di lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan FTSP UII.

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini berupa air limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan yang dihasilkan dari kegiatan praktikum dan analisis laboratorium. Sampel tersebut digunakan untuk mengevaluasi efektivitas *Eco enzyme* dalam menurunkan kadar kromium (Cr) melalui variasi dosis *Eco enzyme* dan waktu kontak. Pengujian kadar kromium dilakukan menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA/AAS) sesuai dengan SNI 6989.17:2009, kemudian hasil pengujian dianalisis untuk mengetahui efektivitas *Eco enzyme* dalam menurunkan kadar kromium pada limbah laboratorium.



Gambar 3. 1 Lokasi Pengambilan Sampel

3.2 Alat dan bahan

3.2.1 Alat

Adapun alat - alat yang digunakan pada penelitian ini tercantum pada tabel 3.1 sebagai berikut

Tabel 3. 1 Daftar Alat

No	Nama Alat	Keterangan
1	Gunting	Untuk pemotongan kulit buah
2	Baskom	Untuk wadah kulit buah dan tempat pencampuran bahan *Eco enzyme*
3	Timbangan Digital	Untuk menimbang kulit buah dan bahan baku *Eco enzyme*
4	Corong	Untuk mensterilisasi alat laboratorium
5	Wadah plastik 15 L	Untuk wadah fermentasi *Eco enzyme*
6	Labu ukur (10 mL dan 50 mL)	Untuk mengukur volume larutan dan sampel pada saat pengenceran
7	Corong kaca	Untuk membantu proses pemindahan dan penyaringan larutan
8	Gelas beker (50 mL)	Untuk wadah penampung dan pencampuran sampel yang di destruksi
9	Corong kaca	Untuk meletakan kertas saring saat menyaring sampel hasil destruksi
10	Kertas saring Whatman No. 42	Untuk menyaring sampel yang telah di destruksi
11	Pipet volumetrik	Untuk mengambil larutan dengan volume yang presisi
12	pH meter	Untuk mengukur nilai pH *Eco enzyme* dan sampel
13	Hot plate	Untuk memanaskan sampel pada tahap destruksi
14	Lemari asam	Untuk tempat preparasi sampel menggunakan asam
15	Botol semprot akuades	Untuk membilas peralatan gelas
16	Spektrofotometer Serapan Atom (AAS)	Untuk menganalisis kadar kromium (Cr) pada sampel

3.2.2 Bahan

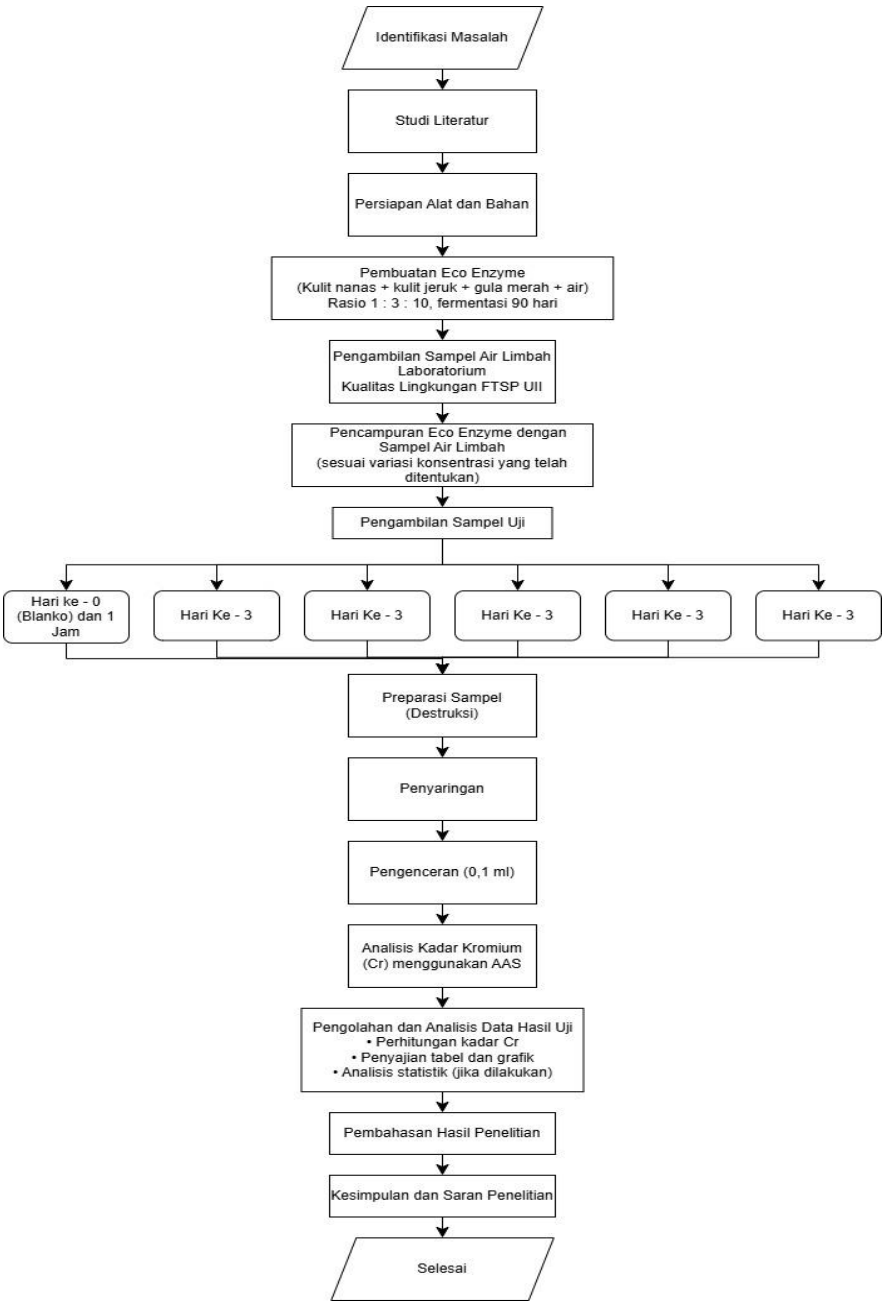
Adapun bahan - bahan yang digunakan pada penelitian ini tercantum pada tabel 3.2 sebagai berikut

Tabel 3. 2 Daftar Bahan

No	Nama Bahan	Kegunaan
1	Air limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan FTSP UII	Untuk sampel penelitian yang digunakan sebagai objek pengujian
2	Kulit nanas	Bahan baku pembuatan *Eco enzyme*
3	Kulit jeruk	Bahan baku pembuatan *Eco enzyme*
4	Molase	Sumber karbon dalam proses fermentasi *Eco enzyme*
5	Asam nitrat (HNO_3) pekat	Pereaksi untuk preparasi dan pengawetan sampel sebelum analisis Cr
6	Akuades (Aquades)	Pelarut, pencucian alat, dan pembuatan larutan
7	Larutan blanko	Blanko pada proses analisis kadar Cr menggunakan AAS

3.3 Tahapan Penelitian

Pada penelitian ini pengumpulan data dilakukan melalui dua jenis sumber, yaitu dengan data sekunder dan data primer. Data sekunder dikumpulkan melalui studi literatur, seperti situs resmi, jurnal ilmiah, dan berbagai referensi yang masih relevan sebagai acuan penelitian, sedangkan data primer didapat melalui pengamatan langsung di lapangan serta analisis laboratorium. Berikut pada Gambar 3.2 adalah tahapan penelitian yang dirangkum dalam bentuk *flowchart.*



Gambar 3. 2 Tahapan Penelitian

3.3.1 *Pembuatan Eco enzyme*

Pembuatan *Eco enzyme* dalam penelitian ini menggunakan bahan organik berupa kulit jeruk dan kulit nanas, gula merah, serta air. Bahan organik terlebih dahulu dipotong menjadi bagian-bagian kecil untuk memperbesar luas permukaan kontak selama proses fermentasi. Selanjutnya, bahan dimasukkan ke dalam wadah fermentasi

dengan perbandingan 1:3:10, yaitu 1 bagian gula merah, 3 bagian limbah organik, dan 10 bagian air. Komposisi yang digunakan terdiri atas 900 gram gula merah, 2,7 kg kulit buah, dan 9 liter air, dengan kulit jeruk dan kulit nanas masing-masing sebanyak 1,35 kg. Seluruh bahan kemudian dicampurkan dalam galon berkapasitas 15 liter dan diaduk hingga gula merah larut secara merata.

Setelah seluruh bahan tercampur, wadah ditutup dan difermentasikan selama kurang lebih tiga bulan (90 hari) pada suhu ruang. Wadah tidak diisi hingga penuh untuk menyediakan ruang bagi gas yang terbentuk selama proses fermentasi. Pada tahap awal fermentasi, wadah dibuka secara berkala untuk mengeluarkan gas yang terakumulasi di dalam wadah. Setelah proses fermentasi selesai, *Eco enzyme* disaring untuk memisahkan cairan hasil fermentasi dari sisa bahan organik. Cairan hasil penyaringan kemudian digunakan sebagai bahan perlakuan dalam penelitian.

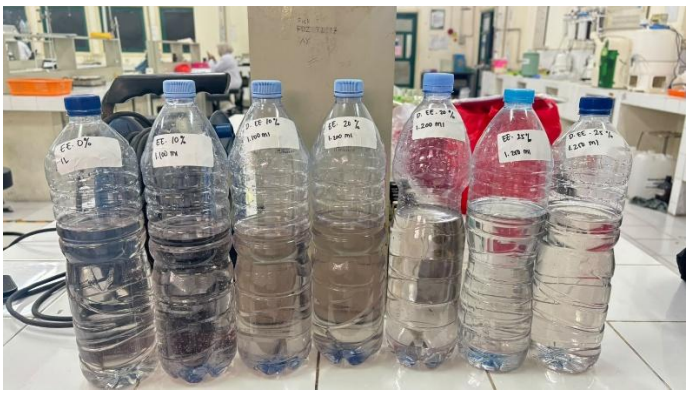
Karakterisasi awal *Eco enzyme* dilakukan dengan mengukur nilai pH setelah proses fermentasi selesai. Pengukuran pH dilakukan untuk mengetahui tingkat keasaman *Eco enzyme* yang dihasilkan sebagai salah satu karakteristik hasil fermentasi. Nilai pH yang diperoleh juga digunakan sebagai data awal untuk menggambarkan kondisi *Eco enzyme* sebelum diaplikasikan pada limbah laboratorium. Pada penelitian ini, *Eco enzyme* hasil fermentasi selama 90 hari memiliki nilai pH sebesar 3, sehingga menunjukkan karakteristik asam. Kondisi tersebut selanjutnya menjadi salah satu karakteristik awal *Eco enzyme* yang digunakan dalam proses pengolahan limbah untuk menurunkan kadar kromium (Cr).



Gambar 3. 3 Pembuatan *Eco enzyme*

3.3.2 Pengambilan Sampel Air Limbah Laboratorium

Sampel air limbah yang diperoleh dari Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan FTSP UII dibagi ke dalam tujuh botol plastik berkapasitas 1.000 mL yang telah dibersihkan sebelumnya. Tujuh botol tersebut terdiri atas satu botol kontrol (blanko) yang hanya berisi sampel air limbah tanpa penambahan *Eco enzyme* , dua botol perlakuan dengan konsentrasi *Eco enzyme* 10%, dua botol dengan konsentrasi 20%, dan dua botol dengan konsentrasi 25%, masing-masing dibuat secara duplo. Seluruh botol diberi label sesuai dengan jenis perlakuannya dan digunakan sebagai reaktor selama proses penelitian berlangsung.



Gambar 3. 4 Sampel Air Limbah Laboratorium Sebelum Dicampurkan Eco Enzyme Dengan Masing-Masing Volume 1000ml

3.3.3 Pencampuran *Eco enzyme* dengan Sampel Air Limbah

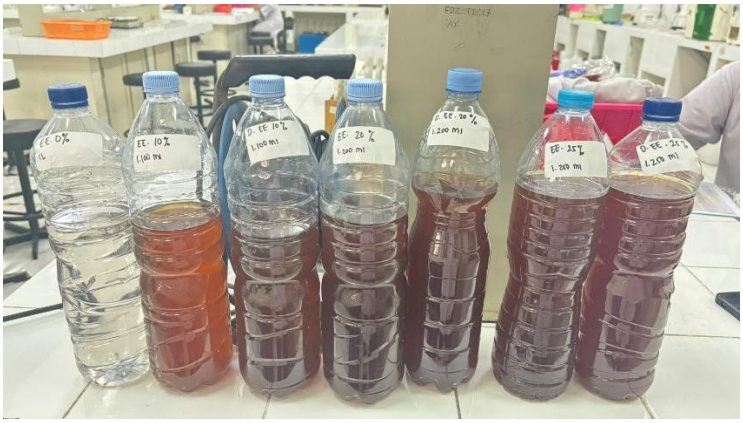
Sampel limbah sebanyak 1.000 mL dimasukkan ke dalam masing-masing reaktor. Selanjutnya, *Eco enzyme* ditambahkan dengan variasi volume sebesar 100 mL, 200 mL, dan 250 mL. Dengan demikian, volume akhir campuran pada masing-masing perlakuan menjadi berbeda karena setiap perlakuan menggunakan volume limbah awal yang sama, tetapi jumlah *Eco enzyme* yang ditambahkan berbeda. Rincian perlakuan dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3. 3 Variasi Konsentrasi dam Volume *Eco Enzyme* Dalam Perlakuan

Perlakuan	Volume Limbah	Volume *Eco Enzyme*	Volume Akhir

0	1000 mL	-	1000 mL
10%	1000 mL	100 mL	1100 mL
20%	1000 mL	200 mL	1200 mL
25%	1000 mL	250 mL	1250 mL

Dokumentasi pencampuran *Eco enzyme* dengan limbah cair Laboratorium Kualitas Lingkungan pada masing-masing perlakuan ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Tahap Awal Setelah Pencampuran *Eco enzyme* Terhadap Masing-Masing Dosis Pada Air Limbah Laboratorium

3.3.4 Preparasi Sampel

Sebelum dilakukan analisis, sampel air limbah dipreparasi melalui proses destruksi menggunakan asam nitrat (HNO_3) pekat sesuai dengan prosedur analisis logam berat. Tahap destruksi bertujuan untuk menguraikan senyawa organik yang terdapat dalam sampel sehingga kromium (Cr) berada dalam bentuk terlarut dan dapat dianalisis secara optimal. Setelah proses destruksi selesai, sampel didinginkan hingga mencapai suhu ruang, kemudian diencerkan menggunakan akuades sampai volume yang ditentukan sebelum dilakukan pengukuran kadar kromium menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA/AAS).



Gambar 3. 6 Destruksi Sampel

Setelah proses destruksi selesai, sampel didinginkan hingga mencapai suhu ruang, kemudian disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 42 untuk memisahkan partikel atau endapan yang masih tersisa. Filtrat yang diperoleh selanjutnya diencerkan menggunakan akuades hingga mencapai volume yang telah ditentukan sebelum dilakukan analisis kadar kromium (Cr) menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA/AAS).



Gambar 3. 7 Sampel Filtrat

3.3.5 Pengenceran Sampel

Filtrat hasil destruksi dan penyaringan selanjutnya diencerkan sebanyak 100 kali sebelum dilakukan pengukuran menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA/AAS). Pengenceran dilakukan dengan mengambil 0,1 mL filtrat menggunakan mikropipet, kemudian memasukkannya ke dalam labu ukur berkapasitas 10 mL dan menambahkan akuades hingga mencapai tanda batas. Larutan dihomogenkan secara perlahan sehingga diperoleh sampel dengan faktor pengenceran 100 kali yang siap dianalisis menggunakan SSA/AAS.



Gambar 3. 8 Pengenceran 0,1ml

3.3.6 Analisis Kadar Kromium (Cr) Menggunakan AAS

Analisis kadar kromium (Cr) dilakukan menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA/AAS) sesuai dengan SNI 6989.17:2009. Sebelum pengukuran sampel, alat terlebih dahulu dikalibrasi menggunakan larutan standar kromium dengan beberapa variasi konsentrasi untuk menghasilkan kurva kalibrasi. Selanjutnya, sampel yang telah melalui tahap preparasi diukur absorbansinya menggunakan SSA/AAS. Konsentrasi kromium dalam sampel ditentukan berdasarkan kurva kalibrasi yang diperoleh, kemudian hasil pengukuran dikoreksi dengan faktor pengenceran dan digunakan untuk menghitung persentase penurunan kadar kromium setelah perlakuan *Eco enzyme*.



Gambar 3. 9 Analisis Kadar Kromium (Cr) Menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom

3.3.7 Analisis Data

Data hasil pengujian kadar kromium (Cr) menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) atau Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan penyajian serta interpretasi hasil penelitian. Data dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan konsentrasi Cr pada setiap variasi volume penambahan Eco Enzyme, yaitu 100 mL, 200 mL, dan 250 mL, serta pada waktu pengamatan h+1 jam, hari ke-3, 6, 9, 12, dan 15. Penambahan Eco Enzyme ke dalam limbah cair menyebabkan peningkatan volume total sampel sehingga terjadi pengenceran terhadap konsentrasi Cr. Oleh karena itu, hasil pengujian kadar Cr perlu dikoreksi berdasarkan perubahan volume akibat penambahan Eco Enzyme untuk memperoleh konsentrasi Cr setelah memperhitungkan faktor pengenceran. Koreksi konsentrasi Cr dilakukan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$C_2 = C_1 X \frac{V_1}{V_2}$$

Keterangan :

C_1 = Kadar Cr awal air limbah (mg/L)

V_1 = Volume air limbah awal (mL)

C_2 = Kadar Cr setelah pengenceran (mg/L)

V_2 = Volume total setelah penambahan *Eco Enzyme* (mL)

Pada penelitian ini digunakan faktor pengenceran sebesar 100 kali, sehingga setiap hasil pembacaan SSA/AAS dikalikan dengan faktor pengenceran tersebut untuk memperoleh konsentrasi kromium yang sebenarnya dalam sampel.

Selanjutnya, untuk mengetahui efektivitas *Eco Enzyme* dalam menurunkan kadar Kromium (Cr), digunakan perhitungan efisiensi penyisihan dengan persamaan sebagai beriukut:

$$E = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \; x \; 100\%$$

Keterangan :

E = Efisiensi penurunan kadar Cr (%)

C_0 = Konsentrasi awal Cr setelah perlakuan pada waktu tertentu (mg/L)

C_0 = Konsentrasi Cr setelah perlakuan pada waktu tertentu (mg/L)

Selanjutnya, data kadar kromium disajikan dalam bentuk tabel dan grafik, kemudian dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan konsentrasi kromium sebelum dan sesudah perlakuan pada setiap variasi dosis *Eco enzyme* (10%, 20%, dan 25%) serta waktu kontak (H+1 Jam, 3, 6, 9, 12,dan 15 hari). Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi efektivitas *Eco enzyme* dalam menurunkan kadar kromium pada limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan FTSP UII.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum Penelitian

Pencampuran limbah cair laboratorium dengan *Eco Enzyme* dilakukan dengan menggunakan 1.000 mL limbah sebagai volume awal pada setiap reaktor. *Eco Enzyme* kemudian ditambahkan berdasarkan variasi perlakuan sebesar 10%, 20%, dan 25% dari volume limbah awal. Pada perlakuan 10%, ditambahkan 100 mL *Eco Enzyme* ke dalam 1.000 mL limbah sehingga volume akhir campuran menjadi 1.100 mL. Perlakuan 20% dilakukan dengan menambahkan 200 mL *Eco Enzyme* ke dalam 1.000 mL limbah dengan volume akhir sebesar 1.200 mL, sedangkan pada perlakuan 25% ditambahkan 250 mL *Eco Enzyme* sehingga volume akhir campuran menjadi 1.250 mL. Dengan demikian, seluruh perlakuan menggunakan volume awal limbah yang sama, sedangkan volume *Eco Enzyme* yang ditambahkan berbeda sesuai dengan variasi perlakuan.

Setelah pencampuran, seluruh reaktor diinkubasi pada suhu ruang selama 15 hari. Pengambilan sampel dilakukan pada H+1 jam, hari ke-3, hari ke-6, hari ke-9, hari ke-12, dan hari ke-15 untuk mengetahui perubahan kadar kromium (Cr) selama proses pengolahan. Sampel yang telah diambil kemudian dipreparasi menggunakan metode destruksi asam dan selanjutnya dianalisis menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) atau *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS). Hasil pengujian digunakan untuk memperoleh konsentrasi Cr pada setiap variasi perlakuan dan waktu kontak.

Hasil pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengetahui efektivitas penggunaan *eco enzyme* dengan variasi konsentrasi 10%, 20%, dan 25% dalam menurunkan kadar kromium (Cr), serta menganalisis pengaruh variasi waktu kontak terhadap penurunan kadar kromium (Cr).

4.2 Karakteristik Awal

4.2.1 Karakteristik Awal Air Limbah

Tahap awal penelitian diawali dengan pengujian karakteristik awal limbah cair yang berasal dari Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia. Karakterisasi awal dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sampel sebelum diberikan perlakuan menggunakan *eco enzyme*. Parameter yang dianalisis meliputi karakteristik fisik, nilai pH, serta kadar kromium (Cr). Pengujian kadar kromium (Cr) dilakukan menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) atau *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) sesuai dengan SNI 6989.17:2009, sedangkan pengukuran pH dilakukan menggunakan *pH meter*. Hasil pengujian karakteristik awal limbah disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Kadar Awal Kromium (Cr)

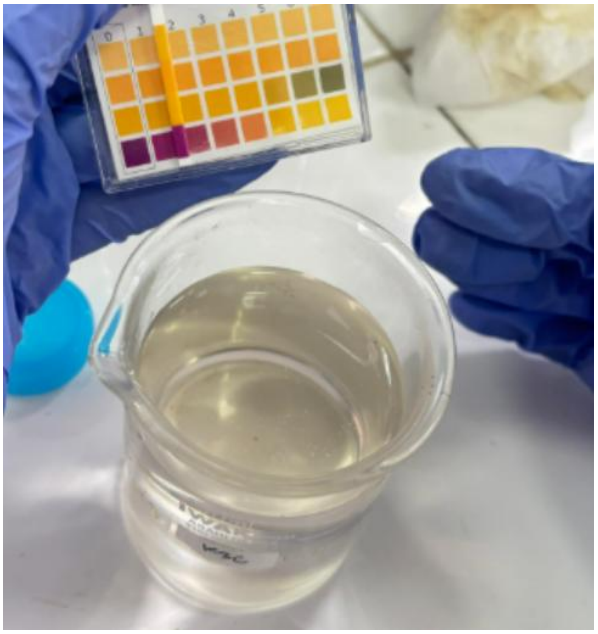
Parameter	Satuan	Hasil Pengujian
Ph	-	1
Kromium	Mg/L	26,40

Berdasarkan Tabel 4.1, limbah cair laboratorium memiliki nilai pH sebesar 1, yang menunjukkan bahwa limbah bersifat sangat asam. Kondisi tersebut diduga dipengaruhi oleh sisa penggunaan berbagai reagen kimia yang bersifat asam selama kegiatan praktikum maupun analisis laboratorium, seperti asam nitrat (HNO_3), asam sulfat (H_2SO_4), maupun reagen lainnya. Nilai pH yang rendah dapat meningkatkan kelarutan logam berat sehingga ion kromium lebih mudah berada dalam bentuk terlarut di dalam limbah cair.

Hasil analisis kadar kromium menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) atau *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) menunjukkan bahwa konsentrasi kromium awal pada limbah laboratorium sebesar 26,40 mg/L. Nilai tersebut menunjukkan bahwa limbah laboratorium masih mengandung kromium dalam konsentrasi yang cukup tinggi sehingga memerlukan proses pengolahan sebelum dibuang ke lingkungan. Nilai kadar kromium awal ini selanjutnya digunakan sebagai data acuan (*baseline*) untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan *eco enzyme* pada variasi konsentrasi 10%, 20%, dan 25%, serta untuk menganalisis pengaruh variasi waktu kontak terhadap penurunan kadar kromium (Cr).

Selanjutnya, sebelum dilakukan proses pengolahan, sampel limbah laboratorium juga diamati secara visual untuk mengetahui karakteristik fisiknya. Pengamatan

dilakukan terhadap warna, bau, dan keberadaan endapan sebagai gambaran kondisi awal limbah sebelum diberikan perlakuan menggunakan *eco enzyme*. Hasil pengamatan karakteristik fisik limbah laboratorium sebelum perlakuan ditunjukkan pada Gambar 4.1.

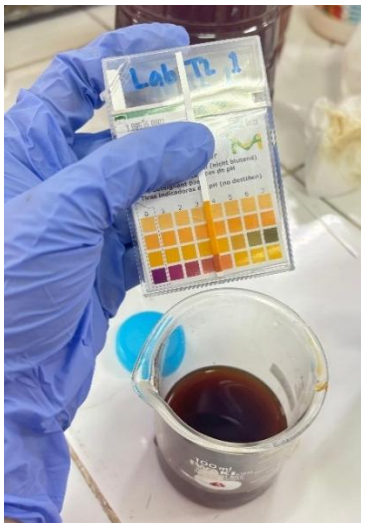


Gambar 4. 1 Ph Sampel Awal Limbah Laboratorium

Gambar 4.1 menunjukkan hasil pengukuran pH sampel awal limbah laboratorium menggunakan kertas indikator pH universal sebelum dilakukan perlakuan dengan *eco enzyme*. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sampel limbah memiliki pH sebesar 1, yang mengindikasikan bahwa limbah bersifat sangat asam. Kondisi ini menunjukkan adanya kandungan senyawa kimia asam yang cukup tinggi dalam limbah laboratorium. Nilai pH awal tersebut digunakan sebagai data acuan dalam penelitian untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan *eco enzyme* terhadap penurunan kadar kromium (Cr) selama variasi waktu kontak dan dosis perlakuan. Selain itu, kondisi limbah yang sangat asam juga dapat memengaruhi bentuk spesiasi ion kromium serta mekanisme interaksi antara ion logam dengan gugus fungsi aktif yang terdapat pada *eco enzyme.*

4.2.2 Karakteristik Awal *Eco Enzyme*

Eco enzyme yang digunakan dalam penelitian ini merupakan produk hasil fermentasi limbah organik yang berasal dari kulit nanas (*Ananas comosus*) dan kulit jeruk (*Citrus* sp.) sebagai bahan utama. Proses pembuatan *eco enzyme* dilakukan dengan mencampurkan limbah organik tersebut dengan gula merah dan air menggunakan perbandingan 1:3:10 (gula merah : limbah organik : air). Campuran kemudian difermentasikan dalam wadah tertutup selama 90 hari pada suhu ruang hingga proses fermentasi berlangsung secara optimal. Selama proses fermentasi, mikroorganisme menguraikan bahan organik sehingga menghasilkan berbagai senyawa, seperti asam organik, enzim, dan metabolit lain yang berpotensi berperan dalam proses pengolahan limbah. Setelah masa fermentasi selesai, *eco enzyme* yang dihasilkan memiliki karakteristik yang menunjukkan bahwa proses fermentasi telah berlangsung dengan baik dan selanjutnya digunakan sebagai bahan perlakuan dalam penelitian untuk menurunkan kadar kromium (Cr) pada limbah laboratorium. Sebelum diaplikasikan, *eco enzyme* terlebih dahulu dikarakterisasi melalui pengukuran nilai pH untuk mengetahui tingkat keasamannya sebagai salah satu indikator kualitas hasil fermentasi. Hasil pengukuran pH *eco enzyme* disajikan pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Karakteristik Awal Ph *Eco Enzyme*

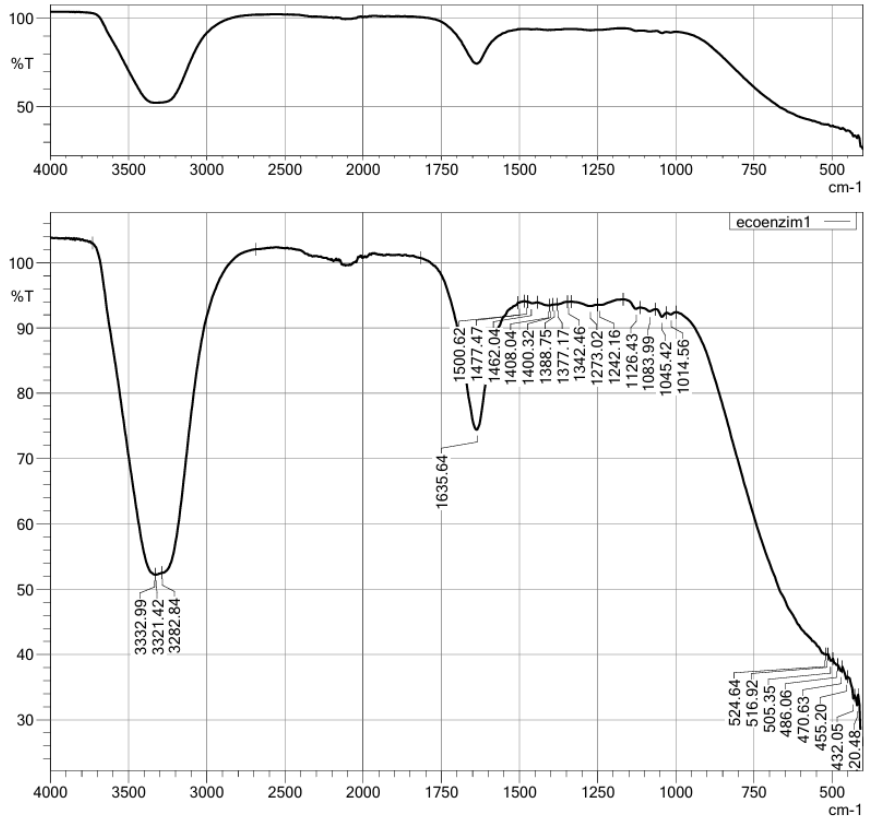
Berdasarkan hasil pengukuran yang ditunjukkan pada Gambar 4.2, *eco enzyme* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki nilai pH sebesar 3, sehingga termasuk dalam kategori bersifat asam. Nilai pH tersebut menunjukkan bahwa proses fermentasi selama 90 hari telah berlangsung dengan baik. Selama proses fermentasi,

mikroorganisme menguraikan bahan organik yang berasal dari kulit nanas (*Ananas comosus*) dan kulit jeruk (*Citrus* sp.) sehingga menghasilkan berbagai senyawa organik, terutama asam-asam organik seperti asam asetat, asam sitrat, dan asam laktat. Terbentuknya senyawa-senyawa tersebut menyebabkan nilai pH *eco enzyme* menurun dan menjadi salah satu indikator bahwa proses fermentasi telah menghasilkan produk yang matang serta siap digunakan sebagai bahan perlakuan dalam penelitian. Nilai pH yang rendah juga menunjukkan bahwa *eco enzyme* memiliki karakteristik yang sesuai untuk diaplikasikan dalam proses pengolahan limbah, karena kondisi asam dapat mendukung keberadaan gugus fungsi aktif yang berperan dalam proses pengikatan ion logam berat.

Berdasarkan hasil karakterisasi yang diperoleh, keberhasilan pembuatan *Eco enzyme* dalam penelitian ini dievaluasi berdasarkan beberapa karakteristik, meliputi warna, aroma, kondisi fisik, keberadaan jamur atau endapan yang berlebihan, serta nilai pH. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa *Eco enzyme* memiliki nilai pH sebesar 3, yang sama dengan nilai pH pada *Eco enzyme* pembanding. Kesamaan tersebut menunjukkan bahwa tingkat keasaman produk hasil fermentasi dalam penelitian ini memiliki karakteristik yang serupa dengan *Eco enzyme* pembanding. Selain itu, warna cokelat tua dan aroma khas hasil fermentasi menunjukkan karakteristik fisik yang sesuai dengan produk fermentasi bahan organik. Berdasarkan karakteristik tersebut, *Eco enzyme* yang dihasilkan melalui proses fermentasi selama 90 hari dinilai telah memenuhi karakteristik awal dan dapat digunakan untuk tahap penelitian selanjutnya. Meskipun demikian, kesesuaian karakteristik fisik dan nilai pH belum cukup untuk menggambarkan komposisi kimia *Eco enzyme* secara menyeluruh. Oleh karena itu, dilakukan karakterisasi lebih lanjut menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat dalam *Eco enzyme*.

Analisis FTIR dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai karakteristik kimia *Eco enzyme* berdasarkan pola serapan pada bilangan gelombang tertentu. Spektrum yang dihasilkan digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat dalam *Eco enzyme* hasil fermentasi selama 90 hari. Identifikasi gugus fungsi ini penting untuk memberikan gambaran mengenai senyawa atau kelompok fungsi

yang terdapat dalam *Eco enzyme* dan potensinya dalam berinteraksi dengan kromium (Cr) selama proses pengolahan limbah. Hasil spektrum FTIR, identifikasi puncak (*peak*), serta hasil pencocokan spektrum dengan basis data (*hitlist*) selanjutnya disajikan pada Gambar dan Tabel berikut.



Gambar 4. 3 Spektrum FTIR *Eco Enzyme*

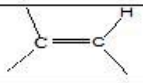
Hasil identifikasi puncak spektrum FTIR *Eco Enzyme* disajikan pada Tabel 4.2 untuk menunjukkan bilangan gelombang dan intensitas puncak yang teridentifikasi.

Tabel 4. 2 Hasil Identifikasi Peak FTIR *Eco Enzyme*

	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	420.48	32.22	1.60	428.20	416.62	773.706	7.646	
2	432.05	33.25	0.98	451.34	428.20	1498.170	-2.140	
3	455.20	36.27	0.72	466.77	451.34	971.235	4.713	
4	470.63	37.42	0.78	482.20	466.77	958.988	6.538	
5	486.06	38.37	0.28	497.63	482.20	946.568	3.598	
6	505.35	39.05	0.66	513.07	497.63	935.996	5.613	
7	516.92	39.93	0.14	520.78	513.07	462.932	0.555	
8	524.64	40.05	0.45	999.13	520.78	16796.837	653.279	
9	1014.56	92.07	0.29	1029.99	999.13	239.360	3.828	
10	1045.42	91.70	0.87	1064.71	1029.99	268.903	11.919	
11	1083.99	92.54	0.43	1114.86	1064.71	358.977	8.010	
12	1126.43	92.94	0.45	1168.86	1114.86	341.182	3.737	
13	1242.16	93.51	0.12	1249.87	1168.86	488.805	0.470	
14	1273.02	93.35	0.34	1334.74	1249.87	537.996	11.887	
15	1342.46	94.00	0.02	1346.31	1334.74	69.280	0.153	
16	1377.17	93.59	0.06	1381.03	1346.31	214.941	0.038	
17	1388.75	93.57	0.01	1392.61	1381.03	74.193	0.034	
18	1400.32	93.47	0.04	1404.18	1392.61	75.044	0.135	
19	1408.04	93.45	0.07	1442.75	1404.18	245.462	2.778	
20	1462.04	93.79	0.20	1473.62	1442.75	189.143	3.393	
21	1477.47	94.01	0.03	1485.19	1473.62	68.839	0.065	
22	1500.62	93.86	0.07	1504.48	1485.19	116.069	0.247	
23	1635.64	74.42	22.35	1816.94	1504.48	3122.402	2287.765	
24	3282.84	52.51	0.32	3286.70	2684.91	9104.916	-4560.155	
25	3321.42	52.24	0.06	3329.14	3286.70	2022.099	1.467	
26	3332.99	52.25	0.49	3730.33	3329.14	9646.448	671.309	

	Score	Library	Name	Comment
1	733	37 - T-Organic2	HumicAcid	HumicAcid Transmission
2	687	23 - T-Organic2	EthyleneGlycol	EthyleneGlycol Transmission
3	669	39 - T-Organic2	T_Algin	Alginic Acid, Sodium Salt Transmission(Microscope)
4	646	25 - T-Organic2	PropyleneGlycol	PropyleneGlycol Transmission
5	635	33 - T-Organic2	Fe Lactate	Fe(II) Lactate 3H2O Transmission
6	623	35 - T-Organic2	UREA	UREA Transmission
7	621	26 - T-Organic2	DipropyleneGlycol	DipropyleneGlycol(mixture of isomars) Transmission
8	598	34 - T-Organic2	Ca Lactate	Ca DL-Lactate 5H2O Transmissio
9	596	2 - T-Organic2	Sucrose	Sucrose Transmission
10	590	24 - T-Organic2	DiethyleneGlycol	DiethyleneGlycol Transmission
11	583	8 - T-Organic2	Oleamide	Oleamide Tramsmission
12	570	1 - T-Organic2	Lactose Monohydrate	Lactose Monohydrate Transmission
13	568	36 - T-Organic2	Bisphenol A	Bisphenol A Transmission
14	563	9 - T-Organic2	EthylenebisStearamide	N,N-EthylenebisStearamide Tramsmission
15	556	16 - T-Organic2	Ethyl Heptanoate	Ethyl n-Heptanoate Transmission
16	554	55 - T-Organic2	T_Y-83 Dis Azo Yellow	Dis Azo Yellow/C34H32CL4N6O8, Transmission(Microscope), Pig No. Y-83, CAS No. 05567-15-7 SEIKAFAST YELLOW M
17	552	48 - T-Organic2	T_R-53_1 Lake Red C	Lake Red C/C17H13CLN2O4S-1/2Ba, Transmission(Microscope), Pig No. R-53:1, CAS No. 05160-02-1 ZA665 RED C
18	550	51 - T-Organic2	T_Y-13 Dis Azo Yellow	Dis Azo Yellow/C36H34CL2N6O4, Trasmission(Microscope), Pig No. Y-13, CAS No. 05102-83-0 SEIKAFAST YELLOW 2600
19	547	43 - T-Organic2	T_butter	butter Transmission(Microscope)
20	546	41 - T-Organic2	T_sesame oil	sesame oil Transmission(Microscope)
21	544	7 - T-Organic2	Stearamide	Stearamide Tramsmission
22	543	50 - T-Organic2	T_Y-12 Dis Azo Yellow	Dis Azo Yellow/C32H26CL2N6O4, Transmission(Microscope), Pig No. Y-12, CAS No.06358-85-6 SEIKAFAST YELLOW 2300
23	543	40 - T-Organic2	T_olive oil	olive oil Transmission(Microscope)
24	542	54 - T-Organic2	T_Y-55 Dis Azo Yellow	Dis Azo Yellow/C34H30CL2N6O4, Transmission(Microscope), Pig No. Y-55, CAS No. 06358-37-8 SEIKAFAST YELLOW 2500
25	540	17 - T-Organic2	DiethylAdipate	DiethylAdipate Transmission
26	539	63 - T-Organic2	T_G-36 Phthalocyanine Green	Phthalocyanine Green/C32Br6CL10CuN8, Transmission(Microscope), Pig No. G-36, CAS No. 14302-13-7 CHROMOFINE GREEN 5370
27	539	44 - T-Organic2	T_margarine	margarine Transmission(Microscope)
28	530	62 - T-Organic2	T_G-7 Phthalocyanine Green	Phthalocyanine Green/C32HCL15CuN8, Transmission(Microscope), Pig No. G-7, CAS No. 01328-53-6 CHROMOFINE GREEN 2GO
29	530	42 - T-Organic2	T_cooking oil-Diacylglycerol	cooking oil(Diacylglycerol) Transmission(Microscope)

Interpretasi gugus fungsi pada spektrum FTIR dilakukan dengan membandingkan bilangan gelombang hasil pengujian dengan daerah frekuensi karakteristik masing-masing ikatan. Acuan identifikasi gugus fungsi yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 4.4, yang memuat hubungan antara jenis ikatan, tipe senyawa, daerah frekuensi, dan karakteristik intensitas serapan.

Ikatan	Tipe Senyawa	Daerah frekuensi (cm^{-1})	Intensitas
C - H	Alkana	2850 – 2970 1340 - 1470	Kuat Kuat
C - H	 Alkena	3010 – 3095 675 - 995	Sedang Kuat
C - H	Alkuna 	3300	Kuat
C - H	Cincin Aromatik	3010 – 3100 690 – 900	Sedang Kuat
O - H	Fenol, monomer alkohol, alkohol ikatan hidrogen, fenol monomer asam karboksilat, ikatan hidrogen asam karboksilat	3590 – 3650 3200 – 3600 3500 – 3650 2500 - 2700	Berubah-ubah Berubah-ubah, terkadang melebar Sedang Melebar
N - H	Amina, Amida	3300 – 3500	Sedang
C=C	Alkena	1610 – 1680	Berubah-ubah
C=C	Cincin Aromatik	1500 – 1600	Berubah-ubah
C≡C	Alkuna	2100 – 2260	Berubah-ubah
C - N	Amina, Amida	1180 – 1360	Kuat
C≡N	Nitril	2210 – 2280	Kuat
C – O	Alkohol, Eter, Asam Karborsilat, Ester	1050 – 1300	Kuat
C=O	Aldehid, Keton, Asam Karboksilat, Ester	1690 – 1760	Kuat
NO_2	Senyawa Nitro	1500 – 1570 1300 - 1370	Kuat Kuat

Sumber : *Principle of Instrumental Analysis*, Skoog, Holler, Nieman, 1998.

Gambar 4. 4 Daerah Frekuensi Karakteristik Gugus Fungsi pada Analisis FTIR

Berdasarkan acuan tersebut, hasil karakterisasi FTIR *Eco Enzyme* selanjutnya dibandingkan dengan daerah frekuensi karakteristik untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada sampel. Hasil identifikasi berdasarkan bilangan gelombang yang diperoleh dari spektrum FTIR disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Identifikasi Gugus Fungsi *Eco Enzyme* Berdasarkan Hasil FTIR

Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Daerah acuan (cm^{-1})	Gugus fungsi	Tipe/ kelas senyawa yang mungkin	Intensitas relatif
3332,99	3200–3600	O-H	Alkohol, fenol, senyawa organik berhidroksil	Berubah-ubah, terkadang melebar
3321,42	3200–3600	O-H	Alkohol, fenol, senyawa	Berubah-ubah,

			organik berhidroksil	terkadang melebar
3282,84	3200–3600	O-H	Alkohol, fenol, senyawa organik berhidroksil	Berubah-ubah, terkadang melebar
1635,64	1610–1680	C=C	Alkena	Berubah-ubah
1500,62	1500–1600	C=C	Senyawa aromatik	Berubah-ubah
1462,04	1340–1470	C-H	Alkana	Kuat
1408,04	1340–1470	C-H	Alkana	Kuat
1400,32	1340–1470	C-H	Alkana	Kuat
1388,75	1340–1470	C-H	Alkana	Kuat
1377,17	1340–1470	C-H	Alkana	Kuat
1342,46	1340–1470	C-H	Alkana	Kuat
1273,02	1050–1300	C-O	Alkohol, eter, asam karboksilat, ester	Kuat
1242,16	1050–1300	C-O	Alkohol, eter, asam karboksilat, ester	Kuat
1126,43	1050–1300	C-O	Alkohol, eter, asam karboksilat, ester	Kuat
1083,99	1050–1300	C-O	Alkohol, eter, asam karboksilat, ester	Kuat

Berdasarkan hasil karakterisasi FTIR, *Eco Enzyme* penelitian ini menunjukkan keberadaan beberapa gugus fungsi yang terdapat pada senyawa organik, terutama gugus hidroksil (O–H) dan C–O. Gugus hidroksil teridentifikasi pada bilangan gelombang 3332,99; 3321,42; dan 3282,84 cm^{-1}, sedangkan gugus

C–O teridentifikasi pada beberapa pita di daerah 1273,02–1045,42 cm^{-1}. Selain itu, pita pada **1635,64 cm^{-1}** dapat dikaitkan dengan ikatan C=C, sedangkan pita pada **1500,62 cm^{-1}** menunjukkan karakteristik C=C aromatik berdasarkan acuan daerah frekuensi yang digunakan. Keberadaan beberapa gugus fungsi tersebut menunjukkan bahwa *Eco Enzyme* memiliki komponen organik dengan struktur kimia yang beragam.

Hasil karakterisasi tersebut menunjukkan kesesuaian dengan penelitian terdahulu mengenai *Eco Enzyme* berbahan dasar kulit buah. Putri et al. (2024) melaporkan bahwa hasil karakterisasi FTIR *Eco Enzyme* menunjukkan keberadaan beberapa gugus fungsi, antara lain O–H, C–O, C=C, dan C–H. Gugus fungsi tersebut juga ditemukan pada *Eco Enzyme* penelitian ini, terutama O–H, C–O, dan C=C. Kesamaan tersebut menunjukkan bahwa *Eco Enzyme* hasil fermentasi dalam penelitian ini memiliki karakteristik gugus fungsi yang sejalan dengan karakteristik *Eco Enzyme* berbahan organik yang telah dilaporkan pada penelitian sebelumnya. Perbedaan posisi atau intensitas pita serapan dapat terjadi karena perbedaan jenis dan komposisi bahan organik yang digunakan serta kondisi selama proses fermentasi.

Keberadaan gugus fungsi yang mengandung oksigen, terutama O–H dan kemungkinan C–O, menunjukkan bahwa *Eco Enzyme* memiliki komponen organik dengan struktur kimia yang beragam. Gugus yang mengandung oksigen tersebut secara teoritis dapat berperan sebagai bagian dari situs interaksi dengan ion logam. Namun, berdasarkan hasil FTIR pada penelitian ini, keberadaan gugus –COOH belum dapat dinyatakan secara spesifik hanya berdasarkan pita O–H pada 3282,84–3332,99 cm^{-1}, karena karakteristik O–H pada asam karboksilat berada pada daerah yang lebih rendah, yaitu sekitar 2500–2700 cm^{-1}, sedangkan gugus C=O berada pada 1690–1760 cm^{-1}. Oleh karena itu, interpretasi FTIR dalam penelitian ini difokuskan pada gugus fungsi yang benar-benar didukung oleh posisi pita hasil pengujian.

4.3 Efektivitas Penggunaan *Eco Enzyme* terhadap Penurunan Kadar Kromium (Cr)

4.3.1 Variasi Konsentrasi 10%

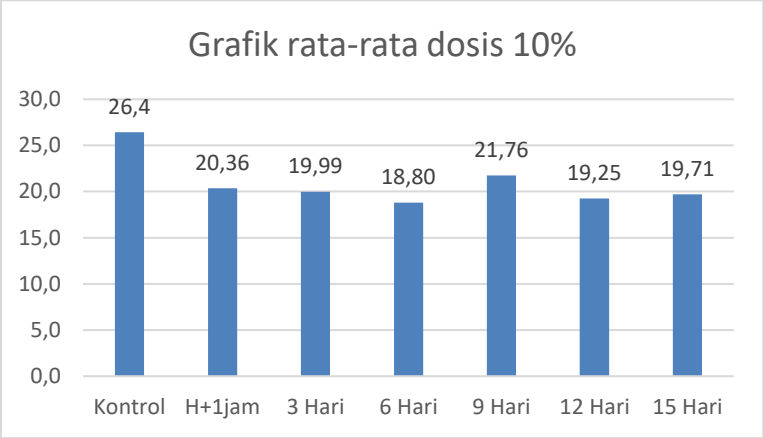
Perlakuan *Eco enzyme* dengan konsentrasi 10% dilakukan untuk mengetahui kemampuan *Eco enzyme* dalam menurunkan kadar kromium (Cr) pada limbah cair Laboratorium Kualitas Lingkungan selama waktu kontak 15 hari. Pengamatan dilakukan pada H+1 jam, hari ke-3, hari ke-6, hari ke-9, hari ke-12, dan hari ke-15. Pengujian kadar Cr dilakukan menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) atau *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Setiap pengujian dilakukan secara duplo untuk memperoleh nilai rata-rata kadar Cr pada masing-masing waktu pengamatan. Hasil pengujian kadar Cr pada perlakuan *Eco enzyme* konsentrasi 10% disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Kadar Kromium 10%

Rata Rata Variasi 10%	
Kontrol	26,4
H+1jam	20,36
3 Hari	19,99
6 Hari	18,80
9 Hari	21,76
12 Hari	19,25
15 Hari	19,71

Berdasarkan Tabel 4.3, kadar Cr pada kondisi awal atau kontrol sebesar 26,40 mg/L. Setelah penambahan *Eco enzyme* 10%, kadar Cr pada H+1 jam sebesar 20,36 mg/L. Nilai tersebut merupakan hasil yang telah dikoreksi terhadap faktor pengenceran akibat penambahan *Eco enzyme*, karena penambahan *Eco enzyme* menyebabkan perubahan volume total campuran. Selanjutnya, kadar Cr pada hari ke-3 sebesar 19,99 mg/L, hari ke-6 sebesar 18,80 mg/L, hari ke-9 sebesar 21,76 mg/L, hari ke-12 sebesar 19,25 mg/L, dan hari ke-15 sebesar 19,71 mg/L.

Perubahan rata-rata kadar Cr selama waktu kontak pada perlakuan *Eco enzyme* 10% kemudian disajikan dalam bentuk grafik untuk memperlihatkan pola perubahan konsentrasi Cr selama proses pengolahan.



Gambar 4. 5 Grafik Perubahan Rata-rata Kadar Kromium (Cr) pada Perlakuan *Eco enzyme* Dosis 10%

Berdasarkan Tabel 4.3 dan Gambar 4.4, kadar Cr menunjukkan kecenderungan menurun pada awal waktu kontak. Setelah nilai H+1 jam yang telah dikoreksi terhadap faktor pengenceran, kadar Cr menurun dari 20,36 mg/L menjadi 19,99 mg/L pada hari ke-3, kemudian kembali menurun menjadi 18,80 mg/L pada hari ke-6. Nilai terendah diperoleh pada hari ke-6, yaitu sebesar 18,80 mg/L, yang menunjukkan bahwa pada perlakuan *Eco enzyme* 10% penyisihan Cr paling tinggi terjadi pada waktu tersebut.

Penurunan kadar Cr setelah hari ke-3 dapat dikaitkan dengan proses interaksi antara komponen hasil fermentasi *Eco enzyme* dengan logam yang terdapat dalam limbah. Penelitian Sondang et al. (2023) menunjukkan bahwa *Eco enzyme* memiliki potensi dalam menurunkan kandungan logam berat pada air lindi, salah satunya kadmium (Cd). Hasil tersebut menunjukkan bahwa *Eco enzyme* dapat dimanfaatkan sebagai salah satu bahan alternatif dalam proses penyisihan logam berat, meskipun efektivitasnya dapat dipengaruhi oleh karakteristik limbah dan kondisi perlakuan.

Potensi *Eco enzyme* dalam penyisihan kromium secara khusus juga dilaporkan oleh Putri et al. (2024). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa *Eco enzyme* berbahan kulit buah mampu menurunkan kadar kromium total pada limbah industri penyamakan kulit. Berdasarkan analisis FTIR, *Eco enzyme* memiliki beberapa gugus fungsi, termasuk gugus hidroksil (O–H) dan karboksil (–COOH), yang berpotensi berinteraksi

dengan ion logam. Interaksi tersebut dapat mendukung proses pengikatan kromium sehingga konsentrasinya dalam fase cair berkurang.

Jika dibandingkan dengan kondisi awal sebesar 26,40 mg/L, kadar Cr pada hari ke-6 sebesar 18,80 mg/L menunjukkan penurunan sebesar 7,60 mg/L atau 28,79%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan *Eco enzyme* 10% memberikan penyisihan Cr selama proses kontak, dengan hasil paling besar pada hari ke-6. Namun, setelah hari ke-6 terjadi peningkatan kadar Cr menjadi 21,76 mg/L pada hari ke-9. Konsentrasi kemudian kembali menurun menjadi 19,25 mg/L pada hari ke-12, sebelum sedikit meningkat menjadi 19,71 mg/L pada hari ke-15.

Fluktuasi kadar Cr tersebut menunjukkan bahwa proses penyisihan selama waktu kontak tidak berlangsung secara konstan. Perubahan konsentrasi setelah hari ke-6 dapat dipengaruhi oleh dinamika interaksi antara komponen *Eco enzyme* dan kromium selama proses pengolahan. Kondisi tersebut dapat berkaitan dengan perubahan keseimbangan antara proses pengikatan dan pelepasan kembali logam dalam sistem. Oleh karena itu, peningkatan kadar Cr pada hari ke-9 tidak secara langsung menunjukkan bahwa *Eco enzyme* tidak lagi bekerja, tetapi menunjukkan adanya perubahan konsentrasi selama proses kontak.

Pada akhir pengamatan, kadar Cr sebesar 19,71 mg/L, sehingga masih lebih rendah dibandingkan kadar awal sebesar 26,40 mg/L. Secara keseluruhan, perlakuan *Eco enzyme* 10% menunjukkan kemampuan dalam menurunkan kadar Cr, dengan kadar terendah diperoleh pada hari ke-6 sebesar 18,80 mg/L. Hasil ini menunjukkan bahwa pada variasi 10%, waktu kontak enam hari memberikan hasil penyisihan Cr paling tinggi sebelum konsentrasi kembali mengalami fluktuasi pada waktu pengamatan berikutnya.

4.3.2 Varias Konsentrasi 20%

Untuk mengetahui efektivitas penggunaan *eco enzyme* pada konsentrasi 20%, dilakukan pengujian kadar kromium (Cr) pada setiap variasi waktu kontak, yaitu H+1 jam, hari ke-3, hari ke-6, hari ke-9, hari ke-12, dan hari ke-15. Analisis kadar kromium dilakukan menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) atau *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) sesuai dengan SNI 6989.17:2009. Setiap

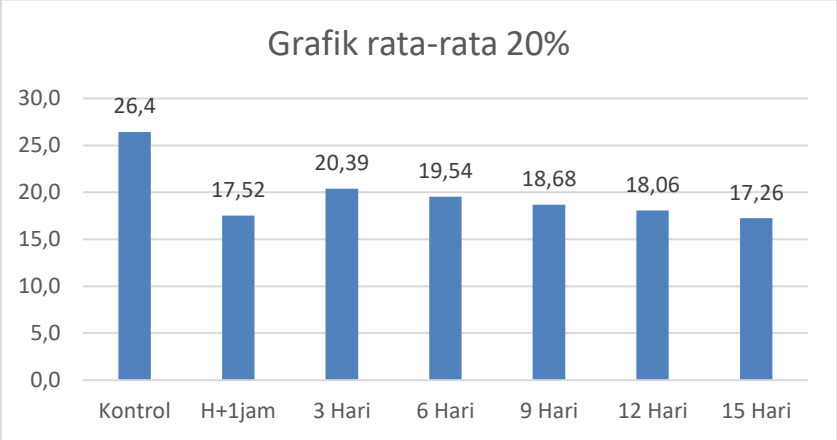
perlakuan dilakukan sebanyak dua kali pengulangan (*duplo*) untuk meningkatkan keandalan hasil pengujian. Nilai rata-rata hasil pengujian kadar kromium pada variasi konsentrasi *eco enzyme* 20% disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Kadar Kromium 20%

Rata rata Variasi 20%	
Kontrol	26,4
H+1jam	17,52
3 Hari	20,39
6 Hari	19,54
9 Hari	18,68
12 Hari	18,06
15 Hari	17,26

Berdasarkan Tabel 4.4, kadar Cr pada kondisi awal atau kontrol sebesar 26,40 mg/L. Setelah penambahan *Eco enzyme* dengan konsentrasi 20%, kadar Cr pada H+1 jam diperoleh sebesar 17,52 mg/L. Nilai tersebut merupakan hasil yang telah dikoreksi terhadap faktor pengenceran akibat penambahan *Eco enzyme*. Penambahan *Eco enzyme* menyebabkan perubahan volume total campuran sehingga konsentrasi Cr pada tahap awal pencampuran perlu diperhitungkan terhadap perubahan volume tersebut. Selanjutnya, kadar Cr pada hari ke-3 sebesar 20,39 mg/L, hari ke-6 sebesar 19,54 mg/L, hari ke-9 sebesar 18,68 mg/L, hari ke-12 sebesar 18,06 mg/L, dan hari ke-15 sebesar 17,26 mg/L.

Perubahan rata-rata kadar Cr selama waktu kontak pada perlakuan *Eco enzyme* 20% kemudian disajikan dalam bentuk grafik untuk memperlihatkan kecenderungan perubahan konsentrasi Cr selama proses pengolahan.



Gambar 4. 6 Grafik Perubahan Rata-rata Kadar Kromium (Cr) pada Perlakuan *Eco enzyme* Dosis 20%

Berdasarkan Tabel 4.4 dan Gambar 4.5, kadar Cr pada H+1 jam sebesar 17,52 mg/L merupakan kondisi setelah pencampuran *Eco enzyme* dengan limbah dan telah memperhitungkan faktor pengenceran. Oleh karena itu, nilai tersebut tidak digunakan sebagai dasar untuk menyatakan bahwa seluruh penurunan pada tahap awal merupakan hasil reaksi *Eco enzyme*. Perubahan kadar Cr pada hari ke-3 hingga hari ke-15 digunakan untuk melihat kecenderungan penyisihan selama berlangsungnya waktu kontak.

Pada hari ke-3, kadar Cr mengalami peningkatan dari 17,52 mg/L menjadi 20,39 mg/L. Setelah itu, kadar Cr kembali mengalami penurunan secara bertahap, yaitu menjadi 19,54 mg/L pada hari ke-6, 18,68 mg/L pada hari ke-9, 18,06 mg/L pada hari ke-12, dan mencapai 17,26 mg/L pada hari ke-15. Pola tersebut menunjukkan bahwa setelah mengalami peningkatan pada hari ke-3, kadar Cr kemudian menunjukkan kecenderungan menurun hingga akhir pengamatan.

Penurunan kadar Cr selama waktu kontak dapat berkaitan dengan interaksi antara komponen hasil fermentasi *Eco enzyme* dengan logam yang terdapat dalam limbah. Penelitian Sondang et al. (2023) menunjukkan bahwa *Eco enzyme* memiliki potensi dalam menurunkan kandungan logam berat pada air lindi. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *Eco enzyme* dapat digunakan sebagai salah satu alternatif dalam pengolahan limbah yang mengandung logam berat, meskipun efektivitas penyisihannya dapat dipengaruhi oleh karakteristik limbah dan kondisi perlakuan.

Potensi *Eco enzyme* dalam penyisihan kromium secara lebih spesifik juga dilaporkan oleh Putri et al. (2024). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa *Eco enzyme* berbahan kulit buah mampu menurunkan kadar kromium total pada limbah industri penyamakan kulit. Berdasarkan hasil analisis FTIR, *Eco enzyme* memiliki gugus fungsi seperti hidroksil (O–H) dan karboksil (–COOH). Gugus fungsi tersebut berpotensi berinteraksi dengan ion logam melalui proses pengikatan atau pembentukan kompleks, sehingga dapat mendukung berkurangnya konsentrasi kromium dalam larutan.

Pada perlakuan *Eco enzyme* 20%, kadar Cr terendah diperoleh pada hari ke-15, yaitu sebesar 17,26 mg/L. Jika dibandingkan dengan kadar awal sebesar 26,40 mg/L, terjadi penurunan sebesar 9,14 mg/L, atau sekitar 34,62%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses kontak yang lebih lama pada konsentrasi *Eco enzyme* 20% memberikan kecenderungan penyisihan Cr yang lebih baik hingga akhir pengamatan.

Peningkatan kadar Cr yang terjadi pada hari ke-3 menunjukkan bahwa perubahan konsentrasi tidak berlangsung secara langsung dan konstan. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh dinamika interaksi antara komponen *Eco enzyme* dan Cr selama proses pengolahan. Setelah peningkatan pada hari ke-3, konsentrasi Cr kembali menurun secara bertahap sampai hari ke-15. Pola ini menunjukkan bahwa proses penyisihan masih berlangsung selama waktu kontak dan belum menunjukkan peningkatan kembali hingga akhir periode pengamatan.

Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa penambahan *Eco enzyme* tidak selalu menghasilkan penurunan kadar Cr secara langsung pada setiap waktu pengamatan. Efektivitas penyisihan dapat dipengaruhi oleh konsentrasi bahan pengolah, waktu kontak, karakteristik limbah, serta kondisi kimia selama proses pengolahan. Hal ini sejalan dengan penelitian Sondang et al. (2023) yang menunjukkan bahwa efektivitas *Eco enzyme* terhadap logam berat dapat berbeda bergantung pada kondisi perlakuan dan karakteristik limbah.

Secara keseluruhan, perlakuan *Eco enzyme* 20% menunjukkan kecenderungan penurunan kadar Cr setelah terjadi peningkatan pada hari ke-3. Kadar Cr turun dari 20,39 mg/L pada hari ke-3 menjadi 17,26 mg/L pada hari ke-15. Konsentrasi terendah selama pengamatan diperoleh pada hari ke-15 sebesar 17,26 mg/L, dengan penurunan

sebesar 34,62% dibandingkan konsentrasi awal 26,40 mg/L. Dengan demikian, pada variasi *Eco enzyme* 20%, waktu kontak hingga hari ke-15 memberikan hasil penyisihan Cr paling tinggi dalam rangkaian pengamatan perlakuan tersebut.

4.3.3 Variasi Konsentrasi 25%

Untuk mengetahui efektivitas penggunaan *eco enzyme* pada konsentrasi 25%, dilakukan pengujian kadar kromium (Cr) pada setiap variasi waktu kontak, yaitu H+1 jam, hari ke-3, hari ke-6, hari ke-9, hari ke-12, dan hari ke-15. Analisis kadar kromium dilakukan menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) atau *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) sesuai dengan SNI 6989.17:2009. Setiap perlakuan dilakukan sebanyak dua kali pengulangan (*duplo*) untuk meningkatkan keandalan hasil pengujian. Nilai rata-rata hasil pengujian kadar kromium pada variasi konsentrasi *eco enzyme* 25% disajikan pada Tabel 4.5.

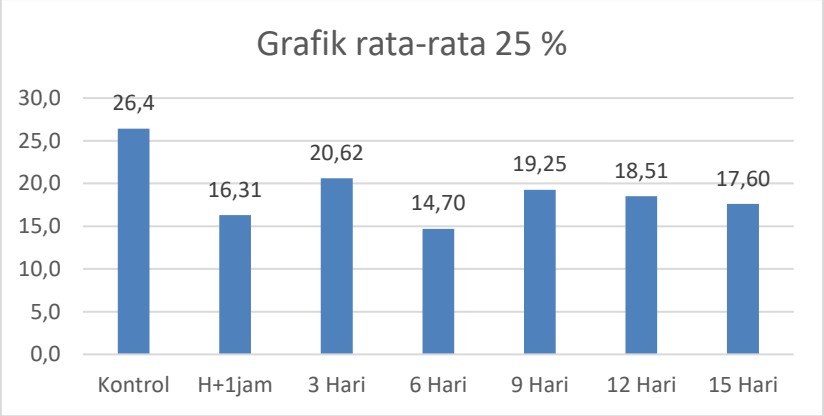
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Kadar Kromium 25%

Rata rata variasi 25%	
Kontrol	26,4
H+1jam	16,31
3 Hari	20,62
6 Hari	14,70
9 Hari	19,25
12 Hari	18,51
15 Hari	17,60

Berdasarkan Tabel 4.5, kadar Cr pada kondisi awal atau kontrol sebesar 26,40 mg/L. Setelah penambahan *Eco enzyme* 25%, kadar Cr pada H+1 jam sebesar 16,31 mg/L. Nilai H+1 jam tersebut merupakan hasil yang telah dikoreksi terhadap faktor pengenceran akibat penambahan *Eco enzyme*. Oleh karena itu, penurunan kadar Cr pada tahap H+1 jam tidak secara langsung digunakan untuk menunjukkan efektivitas reaksi *Eco enzyme*, karena pada tahap tersebut masih terdapat pengaruh pencampuran dan perubahan volume total sampel.

Selanjutnya, kadar Cr pada hari ke-3 sebesar 20,62 mg/L, hari ke-6 sebesar 14,70 mg/L, hari ke-9 sebesar 19,25 mg/L, hari ke-12 sebesar 18,51 mg/L, dan hari ke-15

sebesar 17,60 mg/L. Data tersebut kemudian disajikan dalam bentuk grafik untuk memperlihatkan pola perubahan kadar Cr selama waktu kontak.



Gambar 4. 7 Grafik Perubahan Rata-rata Kadar Kromium (Cr) pada Perlakuan *Eco enzyme* Dosis 25%

Berdasarkan Tabel 4.5 dan Gambar 4.6, kadar Cr mengalami perubahan yang cukup fluktuatif selama waktu pengamatan. Setelah nilai H+1 jam sebesar 16,31 mg/L, kadar Cr meningkat menjadi 20,62 mg/L pada hari ke-3. Selanjutnya, kadar Cr mengalami penurunan yang cukup besar pada hari ke-6 hingga mencapai 14,70 mg/L. Nilai tersebut merupakan kadar Cr terendah yang diperoleh pada perlakuan *Eco enzyme* 25%.

Jika dibandingkan dengan konsentrasi awal sebesar 26,40 mg/L, kadar Cr pada hari ke-6 sebesar 14,70 mg/L menunjukkan penurunan sebesar 11,70 mg/L atau sekitar 44,32%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada perlakuan *Eco enzyme* 25%, waktu kontak hingga hari ke-6 memberikan hasil penyisihan Cr paling tinggi selama periode pengamatan.

Penurunan kadar Cr setelah proses kontak dapat berkaitan dengan interaksi antara komponen hasil fermentasi *Eco enzyme* dengan logam yang terdapat dalam limbah. Penelitian Sondang et al. (2023) yang telah digunakan dalam laporan sebelumnya menunjukkan bahwa *Eco enzyme* memiliki potensi dalam menurunkan kandungan logam berat pada air lindi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *Eco enzyme* dapat digunakan sebagai salah satu alternatif bahan pengolahan limbah yang

mengandung logam berat, meskipun efektivitasnya dapat dipengaruhi oleh kondisi perlakuan dan karakteristik limbah.

Selain itu, penelitian Putri et al. (2024) mengenai penggunaan *Eco enzyme* pada limbah yang mengandung kromium menunjukkan bahwa *Eco enzyme* berbahan kulit buah memiliki potensi dalam menurunkan kadar kromium total. Berdasarkan analisis FTIR yang dilaporkan dalam penelitian tersebut, *Eco enzyme* memiliki beberapa gugus fungsi, termasuk hidroksil (O–H) dan karboksil (–COOH). Gugus fungsi tersebut berpotensi berinteraksi dengan ion logam melalui proses pengikatan atau pembentukan kompleks, sehingga dapat mendukung terjadinya penurunan konsentrasi kromium dalam larutan.

Setelah mencapai nilai terendah pada hari ke-6, kadar Cr kembali meningkat menjadi 19,25 mg/L pada hari ke-9. Pada hari ke-12, kadar Cr sedikit menurun menjadi 18,51 mg/L, kemudian kembali menurun menjadi 17,60 mg/L pada hari ke-15. Pola tersebut menunjukkan bahwa proses penyisihan Cr pada perlakuan 25% tidak berlangsung secara konstan, melainkan mengalami fluktuasi selama waktu kontak.

Fluktuasi tersebut dapat berkaitan dengan dinamika interaksi antara komponen *Eco enzyme* dan Cr selama proses pengolahan. Perubahan kadar Cr dapat dipengaruhi oleh keseimbangan antara proses pengikatan dan pelepasan kembali logam dalam sistem. Dengan demikian, peningkatan kadar Cr pada hari ke-9 tidak langsung menunjukkan bahwa *Eco enzyme* tidak lagi memberikan pengaruh, tetapi menunjukkan adanya perubahan konsentrasi selama proses kontak.

Pada akhir pengamatan, kadar Cr sebesar 17,60 mg/L, masih lebih rendah dibandingkan konsentrasi awal sebesar 26,40 mg/L. Penurunan tersebut sebesar 8,80 mg/L atau 33,33%. Meskipun nilai akhir tidak serendah kadar Cr pada hari ke-6, hasil tersebut menunjukkan bahwa perlakuan *Eco enzyme* 25% tetap menghasilkan kadar Cr yang lebih rendah dibandingkan kondisi awal.

Secara keseluruhan, perlakuan *Eco enzyme* 25% menunjukkan pola perubahan kadar Cr yang fluktuatif selama waktu kontak. Kadar Cr terendah diperoleh pada hari ke-6 sebesar 14,70 mg/L dengan penurunan sebesar 44,32% dari konsentrasi awal 26,40 mg/L. Setelah hari ke-6, kadar Cr mengalami peningkatan pada hari ke-9 dan kemudian kembali menurun hingga hari ke-15. Dengan demikian, pada variasi *Eco*

enzyme 25%, hari ke-6 merupakan waktu pengamatan dengan hasil penyisihan Cr paling tinggi.

4.4 Perbandingan Penurunan Kadar Kromium (Cr) Antar Variasi Dosis *Eco enzyme*

Setelah dilakukan pengujian pada masing-masing variasi dosis *eco enzyme*, selanjutnya dilakukan perbandingan hasil penurunan kadar kromium (Cr) untuk mengetahui perbedaan kinerja setiap dosis selama waktu pengamatan. Perbandingan ini dilakukan berdasarkan nilai rata-rata kadar kromium pada setiap variasi waktu kontak, sehingga dapat diketahui kecenderungan penurunan kadar kromium pada dosis 10%, 20%, dan 25%. Hasil perbandingan kadar kromium tersebut disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 7 rata-rata kadar kromium

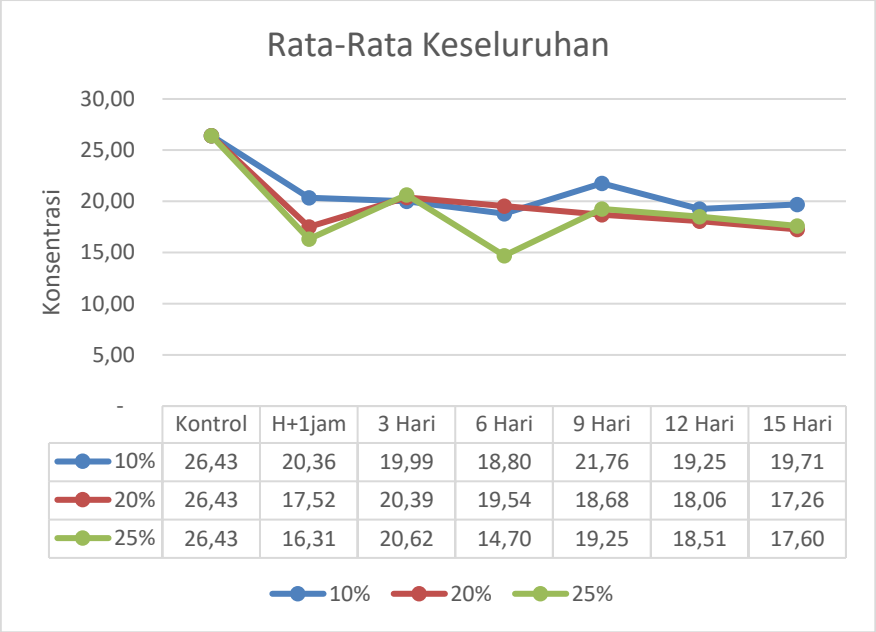
Variasi waktu	10% (mg/L)	20% (mg/L)	25% (mg/L)
Kontrol	26,43	26,43	26,43
H+1jam	20,36	17,52	16,31
3 Hari	19,99	20,39	20,62
6 Hari	18,80	19,54	14,70
9 Hari	21,76	18,68	19,25
12 Hari	19,25	18,06	18,51
15 Hari	19,71	17,26	17,60

Berdasarkan Tabel 4.5, ketiga variasi *Eco enzyme* menunjukkan perubahan kadar Cr selama waktu pengamatan. Pada H+1 jam, kadar Cr terendah diperoleh pada variasi 25% sebesar 16,31 mg/L, diikuti variasi 20% sebesar 17,52 mg/L dan variasi 10% sebesar 20,36 mg/L. Pada hari ke-3, kadar Cr pada ketiga variasi mengalami peningkatan, dengan nilai sebesar 19,99 mg/L pada dosis 10%, 20,39 mg/L pada dosis 20%, dan 20,62 mg/L pada dosis 25%. Pada hari ke-6, variasi 25% menunjukkan penurunan paling besar hingga mencapai 14,70 mg/L, sedangkan variasi 10% dan 20% masing-masing sebesar 18,80 mg/L dan 19,54 mg/L.

Pada hari ke-9, kadar Cr pada variasi 10% mengalami peningkatan menjadi 21,76 mg/L, sedangkan variasi 20% dan 25% masing-masing sebesar 18,68 mg/L dan 19,25 mg/L. Selanjutnya, pada hari ke-12 kadar Cr masing-masing variasi sebesar

19,25 mg/L, 18,06 mg/L, dan 18,51 mg/L. Pada hari ke-15, kadar Cr terendah diperoleh pada variasi 20%, yaitu 17,26 mg/L, diikuti variasi 25% sebesar 17,60 mg/L dan variasi 10% sebesar 19,71 mg/L.

Untuk memperlihatkan perbedaan pola perubahan kadar Cr secara lebih jelas pada masing-masing variasi dosis, data tersebut disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Penurunan Kadar Kromium (Cr) Berdasarkan Variasi Dosis *Eco Enzyme*

Berdasarkan Tabel 4.6 dan Gambar 4.7, terlihat bahwa ketiga variasi *Eco enzyme* memiliki pola perubahan kadar Cr yang berbeda selama waktu pengamatan. Pada tahap awal, yaitu H+1 jam, semakin tinggi dosis *Eco enzyme* menghasilkan kadar Cr yang semakin rendah. Kadar Cr pada dosis 10%, 20%, dan 25% berturut-turut sebesar 20,36 mg/L, 17,52 mg/L, dan 16,31 mg/L. Namun, nilai H+1 jam merupakan kondisi setelah pencampuran yang telah dikoreksi terhadap faktor pengenceran akibat penambahan *Eco enzyme*. Oleh karena itu, perbedaan nilai pada H+1 jam tidak digunakan sebagai satu-satunya dasar untuk menentukan dosis yang paling efektif.

Setelah H+1 jam, pola ketiga perlakuan mengalami perubahan. Pada hari ke-3, kadar Cr justru meningkat pada seluruh variasi, yaitu menjadi 19,99 mg/L pada dosis

10%, 20,39 mg/L pada dosis 20%, dan 20,62 mg/L pada dosis 25%. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan dosis *Eco enzyme* tidak selalu menghasilkan penurunan kadar Cr yang lebih besar pada setiap waktu pengamatan. Perubahan tersebut menunjukkan adanya pengaruh waktu kontak dan kondisi proses pengolahan terhadap perubahan kadar Cr.

Perbedaan paling jelas terlihat pada hari ke-6. Perlakuan 25% menghasilkan kadar Cr paling rendah, yaitu 14,70 mg/L, sedangkan dosis 10% dan 20% masing-masing sebesar 18,80 mg/L dan 19,54 mg/L. Jika dibandingkan dengan konsentrasi awal 26,43 mg/L, penurunan pada dosis 25% mencapai sekitar 44,38%. Nilai tersebut merupakan penurunan terbesar yang diperoleh dari ketiga variasi selama penelitian. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada hari ke-6, penambahan *Eco enzyme* 25% memberikan kondisi penyisihan Cr paling tinggi.

Potensi *Eco enzyme* dalam membantu penyisihan logam berat juga didukung oleh penelitian Sondang et al. (2023) yang melaporkan kemampuan *Eco enzyme* dalam menurunkan kadar logam berat pada air lindi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *Eco enzyme* dapat berpotensi digunakan sebagai bahan alternatif dalam proses pengolahan logam berat, meskipun efektivitasnya dapat berbeda berdasarkan karakteristik limbah dan kondisi perlakuan.

Sementara itu, penelitian Putri et al. (2024) secara khusus menunjukkan bahwa *Eco enzyme* berbahan kulit buah dapat digunakan untuk menurunkan kadar kromium total pada limbah industri penyamakan kulit. Hasil analisis FTIR pada penelitian tersebut menunjukkan keberadaan beberapa gugus fungsi, termasuk gugus hidroksil (O–H) dan karboksil (–COOH), yang berpotensi berinteraksi dengan ion logam. Keberadaan gugus fungsi tersebut dapat mendukung proses pengikatan kromium selama kontak antara *Eco enzyme* dan limbah.

Setelah mencapai nilai terendah pada hari ke-6, kadar Cr pada dosis 25% meningkat menjadi 19,25 mg/L pada hari ke-9. Pada waktu yang sama, dosis 20% menghasilkan kadar Cr paling rendah, yaitu 18,68 mg/L, sedangkan dosis 10% menghasilkan kadar tertinggi sebesar 21,76 mg/L. Perubahan tersebut menunjukkan adanya fluktuasi kadar Cr selama proses pengolahan. Fluktuasi dapat berkaitan dengan

perubahan kondisi sistem selama waktu kontak, termasuk kemungkinan adanya dinamika antara proses pengikatan dan pelepasan kembali logam.

Pada hari ke-12, dosis 20% kembali menghasilkan kadar Cr terendah sebesar 18,06 mg/L, sedangkan dosis 25% sebesar 18,51 mg/L dan dosis 10% sebesar 19,25 mg/L. Pola tersebut berlanjut hingga hari ke-15, ketika dosis 20% menghasilkan kadar Cr terendah sebesar 17,26 mg/L, diikuti dosis 25% sebesar 17,60 mg/L, dan dosis 10% sebesar 19,71 mg/L.

Berdasarkan pola grafik, dapat dilihat bahwa dosis 25% memberikan penurunan paling besar pada hari ke-6, tetapi konsentrasinya kembali meningkat setelah waktu tersebut. Sebaliknya, dosis 20% menunjukkan penurunan yang lebih bertahap setelah hari ke-3 dan menghasilkan kadar Cr paling rendah pada akhir pengamatan. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas *Eco enzyme* tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya dosis, tetapi juga oleh waktu kontak dan kondisi proses selama pengolahan.

Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa dosis 25% memberikan kondisi penyisihan Cr terbaik pada hari ke-6 dengan kadar 14,70 mg/L, sedangkan dosis 20% memberikan kadar Cr terendah pada akhir pengamatan hari ke-15 sebesar 17,26 mg/L. Sementara itu, dosis 10% menunjukkan kadar Cr akhir paling tinggi dibandingkan dua variasi lainnya, yaitu 19,71 mg/L. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan dosis *Eco enzyme* tidak secara otomatis menghasilkan penurunan Cr yang lebih rendah pada seluruh waktu kontak, sehingga dosis dan waktu kontak perlu dipertimbangkan secara bersamaan dalam menentukan kondisi pengolahan yang paling efektif.

4.5 Efektivitas Penyisihan (*Removal Efficiency*) Kromium (Cr)

Untuk mengetahui efektivitas penggunaan *eco enzyme* dalam menurunkan kadar kromium (Cr), hasil pengujian kadar kromium pada setiap variasi dosis dan waktu kontak dihitung dalam bentuk persentase penyisihan (*removal efficiency*). Nilai *removal efficiency* diperoleh dengan membandingkan kadar kromium awal sebelum perlakuan dengan kadar kromium setelah perlakuan menggunakan Persamaan (3.1). Semakin besar nilai *removal efficiency*, maka semakin tinggi kemampuan *eco enzyme*

dalam menurunkan kadar kromium pada limbah laboratorium. Hasil perhitungan *removal efficiency* disajikan pada Tabel 4.7.

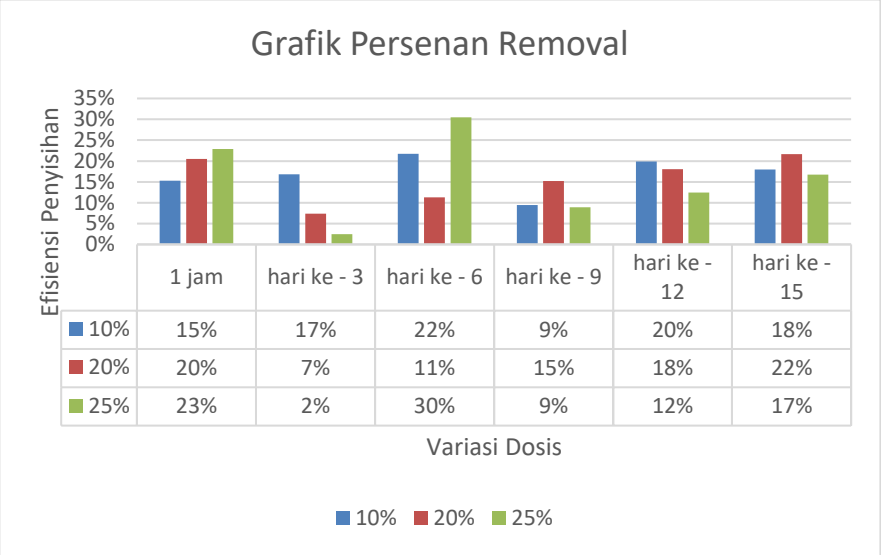
Tabel 4. 8 Tabel Perbandingan Persentase Removal dari rata-rata kadar Kromium (Cr) Pada Air Limbah Berdasarkan Variasi Konsentrasi *Eco enzyme* dan Waktu Kontak

Persenan Removal			
Variasi Waktu	Variasi Dosis		
	10%	20%	25%
1 jam	15%	20%	23%
hari ke - 3	17%	7%	2%
hari ke - 6	22%	11%	30%
hari ke - 9	9%	15%	9%
hari ke -12	20%	18%	12%
hari ke -15	18%	22%	17%

Berdasarkan Tabel 4.7, seluruh variasi dosis *Eco enzyme* menunjukkan kemampuan dalam menyisihkan Cr, tetapi besar persentase penyisihan berbeda pada setiap waktu pengamatan. Pada H+1 jam, persentase *removal* sebesar 15% pada dosis 10%, 20% pada dosis 20%, dan 23% pada dosis 25%. Nilai tersebut merupakan kondisi awal setelah pencampuran *Eco enzyme* dengan limbah yang telah memperhitungkan faktor pengenceran pada tahap H+1 jam.

Pada hari ke-3, persentase *removal* pada dosis 10% meningkat menjadi 17%, sedangkan dosis 20% dan 25% masing-masing sebesar 7% dan 2%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan dosis *Eco enzyme* tidak selalu menghasilkan persentase penyisihan yang lebih tinggi pada setiap waktu pengamatan. Pada hari ke-6, dosis 10% menghasilkan *removal* sebesar 22%, dosis 20% sebesar 11%, sedangkan dosis 25% mencapai 30%. Nilai 30% pada dosis 25% merupakan persentase *removal* tertinggi yang diperoleh pada periode pengamatan berdasarkan data terbaru.

Untuk memperjelas perbedaan efektivitas penyisihan Cr pada setiap variasi dosis dan waktu kontak, persentase *removal* tersebut disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 9 Grafik Efektivitas Penurunan Kadar Kromium (Cr) pada Berbagai Variasi Dosis *Eco enzyme*

Berdasarkan Tabel 4.7 dan Gambar 4.8, terlihat bahwa pola efektivitas penyisihan Cr pada ketiga dosis mengalami fluktuasi selama waktu kontak. Pada dosis 10%, persentase *removal* meningkat dari 15% pada H+1 jam menjadi 17% pada hari ke-3, kemudian meningkat menjadi 22% pada hari ke-6. Setelah itu, nilai *removal* menurun menjadi 9% pada hari ke-9, meningkat kembali menjadi 20% pada hari ke-12, dan sedikit menurun menjadi 18% pada hari ke-15. Pola tersebut menunjukkan bahwa penyisihan Cr pada dosis 10% belum berlangsung secara stabil selama periode pengamatan.

Pada dosis 20%, persentase *removal* sebesar 20% pada H+1 jam mengalami penurunan menjadi 7% pada hari ke-3 dan 11% pada hari ke-6. Selanjutnya, persentase *removal* meningkat menjadi 15% pada hari ke-9, 18% pada hari ke-12, dan mencapai 22% pada hari ke-15. Pola tersebut menunjukkan bahwa setelah mengalami penurunan pada awal waktu kontak, efektivitas dosis 20% cenderung meningkat hingga akhir pengamatan.

Sementara itu, dosis 25% menghasilkan *removal* sebesar 23% pada H+1 jam, kemudian turun cukup besar menjadi 2% pada hari ke-3. Pada hari ke-6, efektivitas meningkat menjadi 30%, yang merupakan nilai *removal* tertinggi pada seluruh variasi

dan waktu pengamatan. Setelah itu, nilai *removal* kembali turun menjadi 9% pada hari ke-9, kemudian 12% pada hari ke-12 dan 17% pada hari ke-15.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa dosis 25% memberikan efektivitas penyisihan paling tinggi pada hari ke-6, sedangkan dosis 20% memberikan nilai *removal* tertinggi pada hari ke-15. Dengan demikian, dosis yang menghasilkan penyisihan maksimum tidak selalu sama dengan dosis yang menghasilkan penyisihan tertinggi pada akhir waktu pengamatan.

Kemampuan *Eco enzyme* dalam menyisihkan logam berat telah dilaporkan dalam penelitian terdahulu. Sondang et al. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan *Eco enzyme* dapat menurunkan kandungan logam berat pada air lindi, sehingga *Eco enzyme* berpotensi digunakan sebagai salah satu bahan alternatif dalam pengolahan limbah yang mengandung logam berat. Sementara itu, Putri et al. (2024) secara khusus melaporkan kemampuan *Eco enzyme* berbahan kulit buah dalam menurunkan kromium total pada limbah industri penyamakan kulit. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *Eco enzyme* memiliki gugus fungsi seperti hidroksil (O–H) dan karboksil (–COOH) yang berpotensi berinteraksi dengan logam.

Fluktuasi persentase *removal* pada penelitian ini menunjukkan bahwa efektivitas penyisihan Cr tidak hanya dipengaruhi oleh dosis *Eco enzyme*, tetapi juga oleh waktu kontak dan kondisi sistem selama proses pengolahan. Pada dosis 25%, misalnya, persentase *removal* meningkat dari 2% pada hari ke-3 menjadi 30% pada hari ke-6, kemudian kembali menurun pada hari ke-9. Kondisi tersebut memperlihatkan bahwa peningkatan waktu kontak tidak selalu menghasilkan peningkatan penyisihan secara terus-menerus.

Secara keseluruhan, berdasarkan data persentase *removal* terbaru, nilai penyisihan Cr tertinggi diperoleh pada dosis *Eco enzyme* 25% dengan waktu kontak 6 hari, yaitu sebesar 30%. Sementara itu, pada akhir pengamatan hari ke-15, dosis 20% menghasilkan persentase *removal* tertinggi sebesar 22%, diikuti dosis 10% sebesar 18% dan dosis 25% sebesar 17%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa dosis 25% memberikan efektivitas penyisihan maksimum selama penelitian, sedangkan dosis 20% memberikan efektivitas tertinggi pada akhir periode pengamatan

4.6 Kandungan Senyawa Aktif *Eco Enzyme* dan Mekanisme Penurunan Kadar Kromium (Cr)

Eco enzyme merupakan cairan hasil fermentasi limbah organik, gula merah, dan air yang mengandung berbagai senyawa aktif hasil metabolisme mikroorganisme. Selama proses fermentasi, terbentuk asam-asam organik seperti asam asetat, asam sitrat, dan asam laktat, serta gugus fungsi hidroksil (–OH) dan karboksil (–COOH). Gugus fungsi tersebut memiliki atom oksigen yang kaya akan pasangan elektron bebas sehingga mampu berinteraksi dengan ion logam, termasuk kromium (Cr), melalui mekanisme adsorpsi dan pembentukan kompleks (*chelation*) (Low et al., 2021).

Hasil penelitian Putri et al. (2024) menunjukkan bahwa *eco enzyme* berbahan limbah kulit buah mengandung gugus hidroksil (–OH), karboksil (–COOH), C–O, C=C, C–C, dan C–H berdasarkan hasil analisis FTIR. Di antara gugus fungsi tersebut, gugus hidroksil dan karboksil berperan sebagai sisi aktif yang mampu mengikat ion kromium. Proses pengikatan ini menyebabkan ion kromium berpindah dari fase cair ke permukaan senyawa organik pada *eco enzyme*, sehingga konsentrasi kromium terlarut di dalam limbah menjadi berkurang.

Pada penelitian ini, mekanisme penurunan kadar kromium diduga berlangsung melalui proses adsorpsi. Ion kromium yang terdapat di dalam limbah laboratorium berinteraksi dengan gugus hidroksil dan karboksil yang terdapat pada *eco enzyme*, kemudian membentuk ikatan yang relatif stabil sehingga jumlah ion kromium bebas di dalam larutan menurun. Selain dipengaruhi oleh keberadaan gugus fungsi aktif, proses penurunan kromium juga dipengaruhi oleh dosis *eco enzyme* dan lamanya waktu kontak. Semakin banyak gugus aktif yang tersedia dan semakin lama waktu interaksi, maka peluang ion kromium untuk terikat pada permukaan *eco enzyme* menjadi semakin besar.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi dosis *Eco enzyme* memberikan efektivitas penyisihan kromium (Cr) yang berbeda pada setiap waktu kontak. Dosis 25% menghasilkan nilai *removal efficiency* tertinggi, yaitu 30% pada hari ke-6. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi tersebut proses penyisihan Cr berlangsung paling besar dibandingkan perlakuan lainnya. Namun, setelah mencapai nilai tersebut, efektivitas dosis 25% menurun menjadi 9% pada hari ke-9, kemudian meningkat

menjadi 12% pada hari ke-12 dan 17% pada hari ke-15. Penurunan efektivitas setelah hari ke-6 menunjukkan bahwa proses penyisihan Cr tidak berlangsung secara terus-menerus seiring bertambahnya waktu kontak. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh dinamika interaksi antara komponen *Eco enzyme* dan kromium selama proses pengolahan, termasuk kemungkinan terjadinya pengikatan dan pelepasan kembali kromium dalam sistem. Sementara itu, dosis 20% menunjukkan pola yang berbeda, yaitu nilai *removal efficiency* meningkat setelah hari ke-3 dan mencapai 22% pada hari ke-15. Pola tersebut menunjukkan bahwa waktu kontak yang lebih lama pada dosis 20% cenderung memberikan penyisihan yang lebih baik hingga akhir pengamatan.

Secara keseluruhan, kemampuan *Eco enzyme* dalam menurunkan kadar kromium tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya dosis yang diberikan, tetapi juga oleh waktu kontak dan kondisi proses selama pengolahan. Pada penelitian ini, dosis 25% memberikan *removal efficiency* maksimum sebesar 30% pada hari ke-6, sedangkan dosis 10% dan 20% masing-masing mencapai nilai tertinggi sebesar 22% pada hari ke-6 dan hari ke-15. Perbedaan pola tersebut menunjukkan bahwa penambahan dosis *Eco enzyme* yang lebih tinggi tidak selalu menghasilkan efektivitas penyisihan yang lebih tinggi pada seluruh waktu pengamatan. Keberadaan senyawa aktif hasil fermentasi, termasuk gugus hidroksil (–OH) dan karboksil (–COOH), diduga turut mendukung interaksi dengan kromium, sebagaimana dilaporkan oleh Putri et al. (2024) pada penelitian penyisihan kromium menggunakan *Eco enzyme* berbahan kulit buah. Dengan demikian, efektivitas penyisihan Cr pada penelitian ini merupakan hasil interaksi antara dosis *Eco enzyme*, waktu kontak, dan kondisi proses pengolahan.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai efektivitas penggunaan *eco enzyme* dalam menurunkan kadar kromium (Cr) pada limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia, dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Penggunaan *eco enzyme* pada seluruh variasi dosis, yaitu 10%, 20%, dan 25%, menunjukkan kemampuan dalam menurunkan kadar kromium (Cr) pada limbah laboratorium. Berdasarkan nilai *removal efficiency*, dosis 25% menghasilkan efektivitas penyisihan tertinggi sebesar 30% pada hari ke-6. Sementara itu, dosis 10% menghasilkan *removal efficiency* tertinggi sebesar 22% pada hari ke-6, dan dosis 20% sebesar 22% pada hari ke-15. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan dosis *eco enzyme* tidak selalu menghasilkan efektivitas penyisihan yang lebih tinggi pada setiap waktu pengamatan.
2. Variasi waktu kontak menunjukkan adanya perubahan efektivitas penyisihan kromium (Cr) pada setiap dosis *eco enzyme*. Pada dosis 10%, nilai *removal efficiency* tertinggi sebesar 22% terjadi pada hari ke-6, sedangkan pada dosis 20% nilai tertinggi sebesar 22% diperoleh pada hari ke-15. Pada dosis 25%, nilai *removal efficiency* tertinggi sebesar 30% dicapai pada hari ke-6, kemudian mengalami penurunan pada waktu pengamatan berikutnya. Pola tersebut menunjukkan bahwa efektivitas penyisihan Cr mengalami fluktuasi selama waktu kontak, sehingga waktu kontak yang lebih lama tidak selalu menghasilkan penyisihan yang lebih tinggi. Secara keseluruhan, kombinasi dosis 25% dan waktu kontak 6 hari memberikan nilai *removal efficiency* tertinggi dalam penelitian ini.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan variasi dosis *eco enzyme* dan waktu kontak yang lebih beragam untuk memperoleh kondisi pengolahan yang lebih optimal dalam menurunkan kadar kromium (Cr), terutama karena pada penelitian ini nilai *removal efficiency* masih mengalami fluktuasi selama waktu pengamatan.
2. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengukuran pH pada setiap waktu pengamatan setelah pencampuran *eco enzyme* dengan limbah, sehingga perubahan kondisi pH selama proses pengolahan dapat diketahui dan digunakan sebagai bahan pendukung dalam menjelaskan perubahan kadar kromium (Cr).
3. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan karakterisasi *eco enzyme* menggunakan analisis FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat dalam *eco enzyme* serta memperkuat dugaan mekanisme interaksi antara komponen *eco enzyme* dan kromium selama proses pengolahan.
4. Penelitian berikutnya dapat mengkaji karakteristik limbah sebelum dan selama proses pengolahan, termasuk spesiasi kromium seperti Cr(III) dan Cr(VI), untuk memperoleh informasi yang lebih mendalam mengenai proses penyisihan kromium.
5. Berdasarkan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa *eco enzyme* mampu menurunkan kadar Cr tetapi efektivitas penyisihannya masih terbatas, pemanfaatan *eco enzyme* sebaiknya dipertimbangkan sebagai salah satu tahap atau alternatif awal pengolahan, bukan sebagai satu-satunya metode pengolahan limbah laboratorium. Pengolahan lanjutan masih diperlukan untuk meningkatkan penyisihan kromium hingga mencapai baku mutu yang dipersyaratkan.

DAFTAR PUSTAKA

Apriliana, Y. D., Kasmiyati, S., & Meitiniarti, V. I. (2026). *Efektivitas kombinasi Lemna minor dan eco-enzyme dalam menurunkan kromium heksavalen dalam air*. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(1), 211–221.

A Comprehensive Review of the Current Progress of Chromium Removal Methods from Aqueous Solution. (2023). Water, Air, & Soil Pollution.

Ayele, A., & Godeto, Y. G. (2021). *Bioremediation of chromium by microorganisms and its mechanisms*. Journal of Chemistry, 2021, 7694157.

Badan Standardisasi Nasional. (2009). *SNI 6989.17:2009 Air dan air limbah – Bagian 17: Cara uji krom total (Cr-T) secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA).*

Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. (2021). *Toxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic*. Frontiers in Pharmacology, 12, 643972.

Bayuo, J. (2021). *An extensive review on chromium (VI) removal using natural and agricultural wastes materials as alternative biosorbents*. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 19, 1747–1773.

Chandra, F. K. (2024). *Pengaplikasian Eco-enzyme untuk Menurunkan Kadar Pb dalam Pengolahan Air Limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan UII.* Universitas Islam Indonesia.

Dhenkula, S. P., Shende, A. D., Deshpande, L., & Pophali, G. R. (2024). *An overview of heavy metals treatment & management for laboratory waste liquid (LWL).* Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(4), 113165.

Gumilar, G. G., Kadarohman, A., & Nahadi. (2023). *Eco enzyme Production, Characteristics and Applications: A Review*. Jurnal Kartika Kimia, 6(1).

Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). *Insights into the modeling of adsorption isotherm systems*. Chemical Engineering Journal, 156(1), 2–10.

Ismail, A. Y., Nainggolan, M. F., Aminudin, S., Siahaan, R. Y., Dzulfannazhir, F., & Sofyan, H. N. (2024). Characterization of chemical composition of eco-enzyme derived from banana, orange, and pineapple pineapple peels. *Brazilian Journal of Biology*, *84*, e286961.

Lai, Y., Hao, L., Dong, L., Yu, S., & Liu, J. (2023). Coating zirconium oxide-nanocomposite with humic acid for recovery of mercury and chromium in

hazardous waste of chemical oxygen demand test. *Journal of Environmental Sciences, 126*, 40–47.

Liu, B., Xin, Y. N., Zou, J., Khoso, F. M., Liu, Y. P., Jiang, X. Y., ... & Yu, J. G. (2023). Removal of chromium species by adsorption: fundamental principles, newly developed adsorbents and future perspectives. *Molecules*, *28*(2), 639.

Low, C. W., Ling, R. L. Z., & Teo, S. (2021). *Effective Microorganisms in Producing Eco-Enzyme from Food Waste for Wastewater Treatment*. Applied Microbiology: Theory & Technology, 2(1), 28–36.

Ngo, T. T. D., & Tran, M. T. (2021). Removal of heavy metals derived from COD analysis wastewater by electrolysis using graphite electrode. *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering, 63*(3), 85–91.

Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.*

Permatasari, D., Rukmana, R., & Hafsan. (2025). *Karakterisasi Eco-enzyme Berbasis Sampah Organik Berdasarkan Masa Inkubasi*. Jurnal Biotek.

Putri, C. R. R., Jati, A. W. N., & Yulianti, L. I. M. (2024). *Effectiveness of fruit peels Eco enzyme in reducing total chromium from Yogyakarta tanning industry waste*. Jurnal Biodjati, 9(2), 218–227.

Qasem, N. A. A., Mohammed, R. H., & Lawal, D. U. (2021). *Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review.* npj Clean Water, 4, 36.

Rajapaksha, A. U., Selvasembian, R., Ashiq, A., Gunarathne, V., Ekanayake, A., Perera, V. O., ... & Ok, Y. S. (2022). A systematic review on adsorptive removal of hexavalent chromium from aqueous solutions: Recent advances. *Science of the Total Environment*, *809*, 152055.

Renu, K., Chakraborty, R., Myakala, H., Koti, R., Famurewa, A. C., Madhyastha, H., ... & Gopalakrishnan, A. V. (2021). Molecular mechanism of heavy metals (Lead, Chromium, Arsenic, Mercury, Nickel and Cadmium)-induced hepatotoxicity–A review. *Chemosphere*, *271*, 129735.

Rizal, R., Wahyuni, F., Julian, J., Nasruddin, & Yulia, F. (2024). Optimal design and modelling of sustainable bio-catalytic enzyme for wastewater treatment using response surface methodology and artificial neural network. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *46*(1), 5254-5273.

Samuel, M. S., Selvarajan, E., Chidambaram, R., Patel, H., & Brindhadevi, K. (2021). *Clean approach for chromium removal in aqueous environments and role of nanomaterials in bioremediation: Present research and future perspective*. Chemosphere, 284, 131368.

Singh, S., Naik, T. S. K., Chauhan, V., Shehata, N., Kaur, H., Dhanjal, D. S., ... & Ramamurthy, P. C. (2022). Ecological effects, remediation, distribution, and sensing techniques of chromium. *Chemosphere*, *307*, 135804.

Vama, L., & Cherekar, M. N. (2020). *Production, Extraction and Uses of Eco-Enzyme Using Citrus Fruit Waste: Wealth from Waste*. Asian Journal of Microbiology, Biotechnology & Environmental Sciences, 22(2), 346–351.

Zainudin, Z., & Kesumaningwati, R. (2022). Pengaruh eco enzyme terhadap kandungan logam berat lahan bekas tambang batubara. *Ziraa'ah Majalah Ilmiah Pertanian*, *47*(2), 154-161.

LAMPIRAN

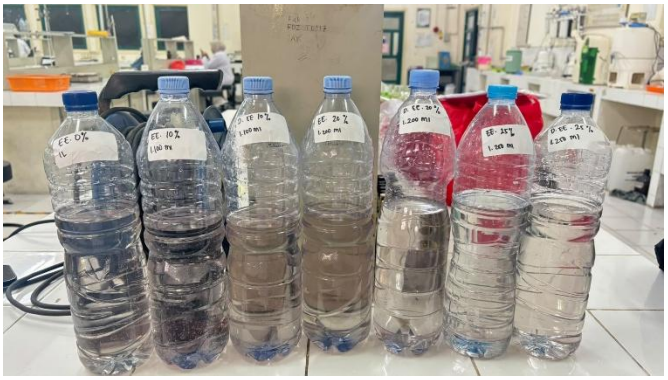
Lampiran 1 Alat dan Bahan Pembuatan *Eco enzyme*



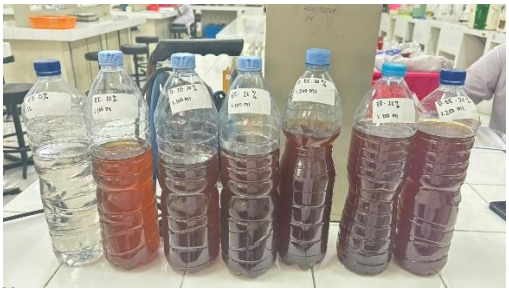
Lampiran 2 Progres Fermentasi *Eco enzyme* di hari ke – 7 dan hari ke - 14

	
Hari ke - 3	Hari ke-14

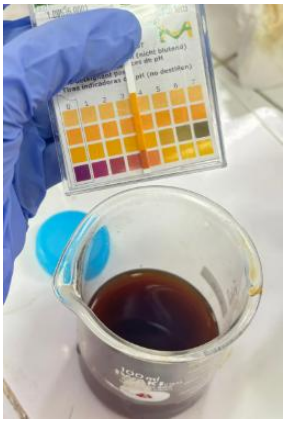
Lampiran 3 Pengambilan Sampel Air Limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan



Lampiran 4 Pencampuran *Eco enzyme* terhadap Sampel Air Limbah hari

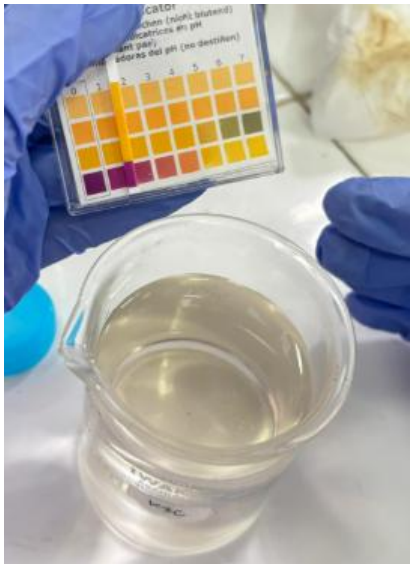
	
Hari ke - 0	Hari ke - 3
	
Hari ke - 6	Hari ke - 9
	
Hari ke - 12	Hari ke - 15

Lampiran 5 Pengecekan Ph Eco Enzyme



(Ph 3 : asam)

Lampiran 6 Pengecekan Ph Sampel Limbah



(pH 1 : asam)

RIWAYAT HIDUP



Saya Lalu Naufal Abqori, lahir pada 1 Juli 2003, merupakan anak kedua dari tiga bersaudara, dari pasangan Lalu Rahmat Marzoan dan Muhaeriah.

Saya menempuh pendidikan menengah di SMA Muhammadiyah 1 Yogyakarta dan menyelesaikan pendidikan pada tahun 2022. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia (UII), Yogyakarta melalui jalur seleksi mandiri.

Selama menempuh pendidikan di Universitas Islam Indonesia, saya aktif mengikuti berbagai kegiatan akademik yang mendukung pengembangan kompetensi di bidang Teknik Lingkungan, baik melalui perkuliahan, praktikum, maupun kegiatan nonakademik, seperti mengikuti organisasi kemahasiswaan di lingkungan kampus. Berbagai kegiatan tersebut memberikan pengalaman yang berharga serta meningkatkan kemampuan saya dalam bekerja sama, berkomunikasi, berpikir kritis, dan menyelesaikan berbagai permasalahan di bidang teknik lingkungan.

Sebagai salah satu bentuk penerapan ilmu yang saya peroleh selama masa perkuliahan, saya melaksanakan penelitian tugas akhir yang berjudul "Efektivitas Penggunaan *Eco Enzyme* dengan Variasi Dosis terhadap Penurunan Kadar Kromium (Cr) pada Limbah Laboratorium Kualitas Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia." Penelitian tersebut memberikan pengalaman yang sangat berharga bagi saya, khususnya dalam melakukan pengambilan sampel limbah laboratorium, pengoperasian dan analisis menggunakan instrumen *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS), pengolahan serta interpretasi data hasil penelitian, hingga penyusunan karya ilmiah sesuai dengan kaidah penulisan akademik.

Demikian riwayat hidup ini saya buat dengan sebenar-benarnya sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.