



JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Analisis Efisiensi Karbon Aktif Berbasis Kompos untuk Penyisihan Logam Berat (Cr, Cu, Pb) pada Air Lindi TPA Piyungan

Rania Alisha
19513033

Dosen Pembimbing:
Ir. Fajri Mulya Iresha, S.T., M.T., Ph.D.

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia
2025



DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Analysis of the Efficiency of Compost-Based Activated Carbon for the Removal of Heavy Metals (Cr, Cu, Pb) in Leachate from the Piyungan Landfill

Rania Alsha

19513033

Supervisor:

Ir. Fajri Mulya Iresha, S.T., M.T., Ph.D.

Environmental Engineering Bachelor Program

Faculty of Civil Engineering and Planning

Universitas Islam Indonesia

2025

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Analisis Efisiensi Karbon Aktif Berbasis Kompos untuk Penyisihan Logam Berat (Cr, Cu, Pb) pada Air Lindi TPA Piyungan

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.

Rania Alisha

19513033

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 9 Juli 2025 dan disetujui oleh:



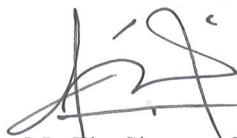
Ir. Fajri Mulya Iresha, S.T., M.T., Ph.D.

(Pembimbing 1)



Yebi Yuriandala, S.T., M.Eng.

(Pembimbing 2)



Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., I.PU.

(Penguji)

Mengetahui,

Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana



Any Juliani, S.T., M.Sc.(Res.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, 25 Juli 2025

Yang membuat pernyataan,



Rania Alisha
19513033

PRAKATA

Segala puji saya panjatkan kepada Allah SWT, Tuhan Semesta Alam yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang. Hanya dengan izin dan kehendak-Nya, saya dapat melalui proses panjang ini hingga akhirnya menyelesaikan tugas akhir. Skripsi ini saya susun sebagai bagian dari pemenuhan salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik Lingkungan di Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Selain tanpa izin-Nya, skripsi ini tidak akan mungkin dapat terselesaikan dengan semestinya apabila tidak mendapat uluran tangan dan berbagai sumbangsih dari berbagai pihak. Maka dari itu, saya dengan segenap raga, pikiran, dan jiwa mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT atas segala nikmat dan karunia yang tak terhitung jumlahnya. Hanya dengan ridho-Nya, saya dapat melewati setiap proses hingga akhirnya menyelesaikan tugas akhir ini dengan sebaik-baiknya.
2. Kedua orang tua saya, Priyo Agung W. dan Reny Puspita, karena telah membesarkan saya dengan penuh kasih sayang, membimbing saya menjadi pribadi yang kuat dan bahagia. Terima kasih juga atas segala pengorbanan, kesabaran, waktu, dan tenaga yang selalu kalian curahkan demi masa depan dan kebahagiaan saya. Segala pencapaian ini tak lepas dari peran dan doa orang tua saya.
3. Bapak Ir. Fajri Mulya Iresha, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing, yang telah meluangkan waktu untuk berdiskusi, memberikan bimbingan, arahan, dan ilmu yang sangat berharga sepanjang proses ini.
4. Bapak Yebi Yuriandala, S.T., M. Eng. yang tidak hanya menjadi dosen pembimbing akademik, tetapi juga turut membimbing tugas akhir ini. Terima kasih atas waktu, masukan, dan ilmu yang Bapak bagikan, semuanya sangat membantu saya dalam menyusun dan menyempurnakan tugas akhir ini.

5. Bapak Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., I.P.U., selaku penguji yang telah menyediakan waktunya untuk memberikan saran, kritik, dan ilmu yang membangun sehingga tugas akhir ini menjadi lebih baik.
6. Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan Daerah Istimewa Yogyakarta & TPA Piyungan, atas izin yang diberikan dan keterbukaannya dalam mendukung proses penelitian ini. Sehingga saya bisa melakukan pengambilan data dan sampel di lapangan dengan lancar.
7. Laboratorium Kualitas Lingkungan FTSP UII beserta laboran yang telah menyediakan keperluan dan alat penelitian yang berkualitas, juga laboran yang telah memberikan arahan yang bermanfaat untuk penelitian ini.
8. Wahyuni Vita Sari, selaku rekan tugas akhir yang telah berjuang sejak melaksanakan Kuliah Praktik hingga tugas akhir ini. Terima kasih atas semua perjuangan, bantuan, dan semangat yang selalu kita bagi satu sama lain.
9. Alya, Annisa, Nazhifah, Fitriani, dan Faizah selaku teman dekat saya selama menjalani kuliah, yang tak henti-hentinya memberikan motivasi, membantu secara langsung dan menemani di masa-masa penyusunan tugas akhir.

Semoga segala bentuk dukungan dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang setimpal dari Allah SWT. Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu masukan dan kritik yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan ke depannya. Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat serta menjadi kontribusi yang positif bagi pengembangan ilmu di bidang Teknik Lingkungan.

Sleman, 25 Juli 2025

Rania Alisha

Analisis Efisiensi Karbon Aktif Berbasis Kompos untuk Penyisihan Logam Berat (Cr, Cu, Pb) pada Air Lindi TPA Piyungan

Mahasiswa : Rania Alisha
NIM : 19513033
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Ir. Fajri Mulya Iresha S.T., M.T., Ph.D.

Abstrak

Lindi yang dihasilkan dari lokasi tempat pemrosesan akhir (TPA) umumnya mengandung kadar logam berat yang tinggi seperti kromium (Cr), tembaga (Cu), dan timbal (Pb), yang menimbulkan kekhawatiran serius terhadap lingkungan. Penelitian ini mengkaji kinerja adsorpsi karbon aktif berbasis dasar kompos (CBAC) dalam menurunkan kandungan logam berat pada lindi yang berasal dari TPA Piyungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan pendekatan pengolahan lindi yang berkelanjutan dan layak secara ekonomi melalui pemanfaatan limbah organik sebagai material yang efisien dan ramah lingkungan.

Studi ini juga mengidentifikasi celah penelitian dalam keterbatasan penerapan karbon aktif berbasis kompos untuk penghilangan logam berat. Metodologi penelitian meliputi percobaan adsorpsi secara batch dengan variasi dosis adsorben, pH, waktu kontak, dan konsentrasi awal logam berat. Efisiensi adsorpsi dievaluasi menggunakan spektrofotometri serapan atom (AAS).

Hasil penelitian menunjukkan efisiensi adsorpsi maksimum sebesar 85,6% untuk Cr, 78,3% untuk Cu, dan 91,2% untuk Pb, yang mengonfirmasi bahwa CBAC merupakan adsorben yang potensial. Temuan ini menyoroti potensi CBAC dalam meningkatkan nilai guna limbah serta perlindungan lingkungan. Penelitian ini memberikan implikasi terhadap pengelolaan lindi TPA, dengan mendorong pemanfaatan limbah organik sebagai solusi pengendalian pencemaran dan pengolahan air yang berkelanjutan.

Kata kunci: Karbon Aktif, Kompos, Adsorpsi, Logam Berat, Air Lindi, Kromium, Tembaga, Timbal, Pengolahan Limbah.

***Analysis of the Efficiency of Compost-Based Activated Carbon
for the Removal of Heavy Metals (Cr, Cu, Pb) in Leachate from
the Piyungan Landfill***

Student : Rania Alisha
Student Number : 19513033
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Ir. Fajri Mulya Iresha S.T., M.T., Ph.D.

Abstract

Leachate generated from landfill sites often contains elevated levels of heavy metals such as chromium (Cr), copper (Cu), and lead (Pb), which present serious environmental concerns. This study investigates the adsorption performance of compost-based activated carbon (CBAC) in reducing heavy metal content in leachate sourced from the Piyungan landfill site. This research aims to develop a sustainable and economically viable approach to leachate treatment through the utilization of organic waste as a resource-efficient material.

The study identifies a research gap in the limited application of compost-derived activated carbon for heavy metal removal. The research methodology includes batch adsorption experiments conducted under different conditions, including variations in adsorbent dosage, pH, contact time, and initial concentrations of heavy metals. The adsorption efficiency was evaluated using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS).

The results indicate maximum adsorption efficiencies of 85.6% for Cr, 78.3% for Cu, and 91.2% for Pb, confirming CBAC as a viable adsorbent. The findings highlight the potential of CBAC in waste valorization and environmental protection. The study has implications for landfill leachate management, promoting the use of organic waste for pollution control and sustainable water treatment solutions.

Key words: Activated Carbon, Compost, Adsorption, Heavy Metals, Leachate, Chromium, Copper, Lead, Waste Treatment.

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
Abstrak.....	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN	i
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Ruang Lingkup.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Tempat Pemrosesan Akhir (<i>Landfill</i>).....	7
2.2 Air Lindi.....	8
2.2.1 Karakteristik Air Lindi.....	9
2.2.2 Baku Mutu Air Lindi	10
2.2.3 Penanganan Air Lindi	11
2.3 Logam Berat.....	14
2.3.1 Logam Kromium.....	14
2.3.2 Logam Tembaga	16
2.3.3 Logam Timbal.....	17
2.4 Kompos	19
2.4.1 Kandungan dan Karakteristik Kompos.....	19
2.4.2 Pemanfaatan Kompos	22
2.5 Karbon Aktif	23
2.5.1 Bahan Baku Karbon Aktif	24
2.5.2 Pembuatan Karbon Aktif	25
2.5.3 Penggunaan Karbon Aktif	28
2.6 Adsorpsi	30

2.6.1 Mekanisme Adsorpsi	30
2.6.2 Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi	32
2.7 Spektrofotometer Serapan Atom.....	35
BAB III METODE PENELITIAN	1
3.1 Kerangka Penelitian	1
3.2 Persiapan Penelitian	2
3.2.1 Pengambilan Sampel.....	2
3.2.2 Pembuatan CBAC.....	3
3.3 Pengumpulan Data	5
3.4 Analisis Data	6
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	7
4.1 Kandungan Logam Berat pada Air Lindi TPA Piyungan.....	7
4.2 Uji Adsorpsi	9
4.2.1 Logam Kromium.....	9
4.2.2 Logam Tembaga	13
4.2.3 Logam Timbal.....	17
4.2.4 Perbandingan Efisiensi Penyisihan 3 Logam.....	20
4.3 Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi	21
4.3.1 Dosis CBAC (<i>Compost Based Activated Carbon</i>).....	21
4.3.2 Karakteristik Adsorben	24
4.3.3 Kecepatan Pengadukan	25
4.3.4 Konsentrasi Awal Logam Berat.....	27
4.3.5 pH Larutan	28
4.3.6 Waktu Kontak	30
4.3.7 Struktur Molekul Adsorbat	31
4.3.8 Aktivasi Kimia	33
4.4 Performa Kompos sebagai Karbon Aktif.....	35
4.4.1 Efisiensi Adsorpsi Berdasarkan Logam Berat	35
4.4.2 Konsistensi dan Stabilitas CBAC	36
4.4.3 Karakteristik Kompos sebagai Adsorben	37
4.4.4 Kelebihan dan Kekurangan Kompos	38
4.5 Implikasi dan Aplikasi Hasil.....	39
4.5.1 Implikasi.....	39

4.5.2 Aplikasi	40
BAB V PENUTUP	42
5.1 Kesimpulan	42
5.2 Saran	42
DAFTAR PUSTAKA	43
LAMPIRAN	50
Lampiran.....	50
RIWAYAT HIDUP	1

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Baku Mutu Air Lindi	11
Tabel 2.2 Baku Mutu Air Nasional Kelas 3	11
Tabel 2.3 Baku Mutu Air Limbah Golongan II.....	11
Tabel 2.4 Unsur Makronutrien	19
Tabel 2.5 Unsur Mikronutrien	20
Tabel 2.6 Parameter Kualitas Kompos	21
Tabel 2.7 Potensi Pemanfaatan Kompos sebagai Karbon Aktif.....	23
Tabel 2.8 Kelebihan dan Kekurangan Aktivasi Fisika	27
Tabel 2.9 Kelebihan dan Kekurangan Aktivasi Kimia.....	28
Tabel 2.10 Pengaruh Grup Substituen pada Kapasitas Adsorpsi	33
Tabel 3.1 Alat dan Bahan untuk Pengambilan Sampel	3
Tabel 3.2 Alat dan Bahan untuk Pembuatan CBAC	4
Tabel 3.3 Alat dan Bahan untuk Uji Adsorpsi.....	5
Tabel 4.1 Kandungan Logam Berat dan Baku Mutu Air Lindi.....	8
Tabel 4.2 Data Percobaan Uji Adsorpsi Logam Kromium (Cr).....	9
Tabel 4.3 Efisiensi Penyisihan Uji Adsorpsi Logam Kromium (Cr).....	9
Tabel 4.4 Data Percobaan Uji Adsorpsi Logam Tembaga (Cu).....	13
Tabel 4.5 Efisiensi Penyisihan Uji Adsorpsi Logam Tembaga (Cu).....	13
Tabel 4.6 Data Percobaan Uji Adsorpsi Logam Timbal (Pb).....	17
Tabel 4.7 Efisiensi Penyisihan Uji Adsorpsi Logam Timbal (Pb)	17
Tabel 4.8 Konsentrasi Awal Logam Berat pada Air Lindi TPA Piyungan.....	27
Tabel 4.9 Struktur Molekul Logam Berat	31
Tabel 4.10 Performa CBAC dalam Penyisihan Logam Berat	35
Tabel 4.11 Kelebihan dan Kekurangan Kompos sebagai Karbon Aktif	38

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Logam Kromium.....	14
Gambar 2.2 Logam Tembaga	16
Gambar 2.3 Logam Timbal.....	17
Gambar 2.4 Komponen Dasar Spektrofotometer Serapan Atom	35
Gambar 3.1 Kerangka Penelitian.....	1
Gambar 3.2 Diagram Alir Pengambilan Sampel	2
Gambar 3.3 Diagram Alir Pembuatan CBAC	4
Gambar 3.4 Diagram Alir Uji Adsorpsi	5
Gambar 4.1 Sampel Air Lindi TPA Piyungan.....	7
Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Waktu Kontak terhadap Konsentrasi Cr.....	10
Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efisiensi Penyisihan Cr	11
Gambar 4.4 Diagram Batang Efisiensi Penyisihan Cr per Selang Waktu 40 Menit.....	12
Gambar 4.5 Grafik Pengaruh Waktu Kontak terhadap Konsentrasi Cu.....	14
Gambar 4.6 Grafik Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efisiensi Penyisihan Cu.....	15
Gambar 4.7 Diagram Batang Efisiensi Penyisihan Cu per Selang Waktu 40 menit	16
Gambar 4.8 Grafik Pengaruh Waktu Kontak terhadap Konsentrasi Pb	18
Gambar 4.9 Grafik Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efisiensi Penyisihan Pb	18
Gambar 4.10 Diagram Batang Efisiensi Penyisihan Pb per Selang Waktu 40 menit	19
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Tren Efisiensi Penyisihan Logam Cr, Cu, Pb	20

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Pembacaan SSA Kandungan Kromium pada Sampel	50
Lampiran 2 Hasil Pembacaan SSA Kandungan Tembaga pada Sampel	51
Lampiran 3 Hasil Pembacaan SSA Kandungan Timbal pada Sampel	52
Lampiran 4 Contoh Perhitungan Efisiensi Penyisihan Logam Berat	53
Lampiran 5 Dokumentasi Penelitian	54

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut data yang diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Manusia Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, total produksi sampah di wilayah tersebut pada tahun 2021 mencapai 1.134 ton per hari. Selanjutnya pada tahun 2022, angka tersebut mengalami peningkatan dan berada pada angka 1232 ton/hari. Hal ini membawa kita pada fakta bahwa ada tercatat peningkatan volume produksi sampah pada tahun 2022 jika kita bandingkan dengan tahun 2021. Dengan semakin menggunungnya volume sampah yang diproduksi, dapat diambil kesimpulan bahwa akan tercipta permasalahan yang berkaitan dengan lingkungan yang dampaknya dapat merugikan masyarakat.

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan bagian dari upaya pengelolaan dan pengendalian sampah secara sistematis. TPA berperan sebagai fasilitas fisik yang digunakan untuk penanganan dan pemrosesan akhir dari sampah yang tidak lagi dapat dimanfaatkan. TPA Piyungan dilengkapi dengan area penimbunan sampah yang mencakup zona khusus untuk air lindi, di mana cairan lindi tersebut mengandung berbagai unsur terlarut maupun tersuspensi. Lindi yang dihasilkan dari TPA mengandung konsentrasi tinggi berbagai senyawa, termasuk amonia, nitrogen organik, serta logam-logam seperti besi (Fe), mangan (Mn), kalsium (Ca), magnesium (Mg), natrium (Na), kalium (K), klorida (Cl), dan sejumlah logam berat lainnya (Ali 2011).

Logam berat secara umum diklasifikasikan ke dalam dua jenis, yaitu logam berat esensial dan logam berat non-esensial. Logam berat esensial seperti tembaga (Cu), selenium (Se), besi (Fe), dan seng (Zn) merupakan unsur yang dibutuhkan oleh organisme untuk menjalankan fungsi biologis tertentu. Namun, apabila berada dalam konsentrasi yang berlebihan, logam tersebut dapat bersifat toksik dan membahayakan kesehatan. Logam berat non-esensial seperti timbal (Pb), merkuri (Hg), kromium (Cr), dan kadmium (Cd) keberadaannya dalam tubuh organisme bersifat sangat beracun, sehingga dapat menimbulkan gangguan kesehatan serius (Palar 1994).

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa air lindi dari berbagai lokasi TPA di Indonesia mengandung logam berat dalam konsentrasi yang cukup tinggi dan berpotensi mencemari lingkungan. Penelitian di TPA Pasuruhan, Magelang melaporkan bahwa konsentrasi timbal (Pb) pada saluran inlet mencapai 0,83 mg/L (Puspitarini et al. 2023). Sementara itu, air lindi yang berasal dari TPA Tlekung, Kota Batu mengandung logam kromium (Cr) sebesar 0,121 mg/L pada pengambilan sampel pertama dan kedua, serta 0,114 mg/L pada pengambilan sampel ketiga (Larasati, Susnawati & Suharto 2015). Selain itu, kandungan tembaga (Cu) dalam air lindi juga menunjukkan variasi konsentrasi di beberapa lokasi, yaitu sebesar 4,35 ppm di TPA Dau, 2,70 mg/L di TPA Dadaprejo, dan 3,85 mg/L di TPA Supit Urang (Karamina, Murti & Mujoko 2021). Temuan-temuan tersebut mengindikasikan perlunya upaya pengelolaan air lindi yang efektif, terutama dalam hal reduksi kandungan logam berat yang bersifat toksik bagi lingkungan dan kesehatan makhluk hidup. Logam berat berat timbal, kromium, dan tembaga banyak digunakan dalam kegiatan industri maupun kegiatan rumah tangga. Dan apabila jumlahnya berlebihan di lingkungan akan mencemari lingkungan dan apabila jumlahnya nya banyak pada manusia akan bersifat toksik.

Logam berat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu logam berat esensial seperti tembaga (Cu), selenium (Se), besi (Fe), dan zink (Zn) adalah logam yang dibutuhkan oleh setiap organisme, namun jika berlebihan akan menimbulkan efek racun. Dan logam berat tidak esensial seperti timbal (Pb), merkuri (Hg), kromium (Cr), dan kadmium (Cd) keberadaannya di dalam tubuh organisme hidup bersifat sangat berbahaya sehingga dapat menyebabkan keracunan (toksik) pada organisme hidup (Palar 1994). Salah satu kandungan dalam limbah B3 yang berbahaya bagi lingkungan adalah kandungan logam berat Kromium (Cr) dan Tembaga (Cu)

Salah satu unsur bahan berbahaya dan beracun (B3) yang memerlukan penanganan dan perhatian khusus adalah kromium. Kromium (Cr) merupakan salah satu jenis logam berat yang keberadaannya banyak ditemukan di lingkungan sebagai akibat dari aktivitas antropogenik. Sumber utama pencemaran Cr berasal dari berbagai kegiatan industri, seperti produksi semen, baterai, cat, pelapisan logam berbasis Cr, galvanisasi seng (Zn), serta proses

fotografi. Selain itu, pembakaran bahan bakar fosil turut berperan dalam menyebarkan Cr ke lingkungan. Paparan Cr dalam konsentrasi tinggi diketahui dapat menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia, terutama pada organ paru-paru dan sistem pencernaan, seperti usus besar. Cr termasuk logam berat dengan tingkat toksisitas yang tinggi, sehingga dapat menyebabkan keracunan akut maupun kronis pada organisme yang terpapar (Palar 1994).

Seperti halnya kromium, tembaga juga banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari karena memiliki manfaat yang beragam. Namun tembaga juga dapat menimbulkan bahaya, tidak hanya berbahaya bagi manusia namun juga bagi lingkungan. Efek racun yang ditimbulkan tembaga bagi manusia biasanya adalah kerusakan pada selaput lendir yang ada di hidung. Temuan lain menunjukkan bahwa tembaga juga merupakan korosif yang sangat beracun dan dapat bersifat mengendap di paru-paru dan merusak paru-paru dan bahkan kanker (Patimah 2016). Logam timbal juga banyak digunakan dalam baterai (khususnya baterai timbal-asam), cat, pipa air, dan bensin bertimbal (meski penggunaannya kini sudah dibatasi di banyak negara). Timbal juga ditemukan dalam beberapa bahan kosmetik dan mainan anak-anak. Dalam beberapa sektor industri, timbal digunakan untuk pelapisan logam dan pembuatan kaca (WHO 2023). Logam timbal dapat mencemari tanah, air, dan udara, terutama melalui aktivitas industri, limbah elektronik, dan produk yang mengandung timbal.

Paparan timbal (Pb) diketahui dapat menimbulkan dampak serius terhadap sistem saraf, terutama pada anak-anak, di mana hal tersebut dapat berkontribusi terhadap penurunan tingkat kecerdasan (IQ). Sementara itu, pada individu dewasa, paparan timbal dapat menyebabkan peningkatan tekanan darah (hipertensi), gangguan fungsi ginjal, serta penurunan kualitas fungsi reproduksi (Sharma et al. 2011).

Tembaga (Cu) termasuk ke dalam kategori logam berat yang berpotensi mencemari lingkungan, terutama apabila keberadaannya melebihi batas konsentrasi yang diperbolehkan. Logam ini banyak dihasilkan dari berbagai aktivitas antropogenik, antara lain kegiatan industri, pertanian, serta limbah domestik rumah tangga (Elawati et al. 2019). Tembaga (Cu) merupakan logam esensial yang diperlukan tubuh dalam jumlah terbatas untuk mendukung fungsi metabolisme.

Namun demikian, apabila terakumulasi dalam konsentrasi yang berlebih, unsur ini dapat bersifat toksik dan menimbulkan dampak negatif bagi kesehatan.

Apabila air lindi yang mengandung logam berat timbal, kromium, dan tembaga berlebih tersebut mengalir maka akan mencemari tanah dan sungai yang akan berdampak pada menurunnya kualitas air di sekitar wilayah tersebut. Oleh karena itu, diperlukan penerapan teknologi pengolahan yang sesuai guna menurunkan konsentrasi logam berat seperti timbal (Pb), kromium (Cr), dan tembaga (Cu) dalam air lindi, sehingga dapat memenuhi standar baku mutu sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan di Tempat Pemrosesan Akhir Sampah.

Adsorpsi merupakan salah satu metode pengolahan air yang digunakan untuk memisahkan kontaminan dari air melalui mekanisme penyerapan pada permukaan zat tertentu. Proses ini memerlukan material penyerap yang disebut adsorben, yang berfungsi untuk menangkap kandungan logam berat dalam limbah cair. Pada penelitian ini, limbah cair yang dimaksud adalah air lindi yang berasal dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Piyungan. Limbah organik dapat digunakan menjadi media adsorben. Limbah organik dalam bentuk bio-adsorben atau arang aktif terbukti dapat digunakan sebagai bahan untuk mengurangi pencemaran logam berat pada air limbah (Pridyanti et al. 2018).

Arang aktif dapat dibuat dari kompos sebagai media adsorben. Kompos memiliki kemampuan sebagai bahan karbon untuk dijadikan kompos chars untuk memproduksi karbon aktif.

Penelitian ini menggunakan metode adsorpsi untuk mengeliminasi logam berat timbal (Pb), kromium (Cr) dan tembaga (Cu) yang terkandung dalam air lindi dari TPA Piyungan, dengan memanfaatkan karbon aktif berbahan dasar kompos sebagai media adsorben. Kompos akan diproses menjadi karbon aktif atau disebut dengan *Compost Based Activated Carbon* (CBAC). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besaran kandungan logam berat timbal dan kromium heksavalen dan tingkat efisiensi karbon aktif dari kompos untuk penyisihan logam berat timbal, kromium, dan tembaga pada air lindi TPA Piyungan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji konsentrasi logam

berat timbal (Pb), kromium (Cr) dan tembaga (Cu) dalam air lindi TPA Piyungan, serta mengevaluasi efisiensi karbon aktif berbasis kompos dalam proses penyisihan logam berat timbal (Pb), kromium (Cr), dan tembaga (Cu).

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa konsentrasi logam berat timbal (Pb), kromium (Cr), dan tembaga (Cu) yang terdapat dalam air lindi di TPA Piyungan?
2. Bagaimana efisiensi karbon aktif berbahan dasar kompos dalam mengadsorpsi logam berat timbal (Pb), kromium (Cr), dan tembaga (Cu) dari air lindi di TPA Piyungan?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk:

1. Mengidentifikasi konsentrasi logam berat timbal (Pb), kromium (Cr), dan tembaga (Cu) yang terkandung dalam air lindi di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Piyungan.
2. Menganalisis tingkat efisiensi karbon aktif berbahan dasar kompos dalam proses penyisihan logam berat timbal (Pb), kromium (Cr), dan tembaga (Cu) dari air lindi yang berasal dari TPA Piyungan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini

1. Memberikan informasi ilmiah mengenai potensi kompos sebagai bahan baku dalam pembuatan karbon aktif untuk keperluan pengolahan limbah.
2. Menyediakan data mengenai efektivitas karbon aktif berbasis kompos dalam mengadsorpsi logam berat timbal (Pb), kromium (Cr), dan tembaga (Cu) dari air lindi.
3. Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dalam mengembangkan pemanfaatan kompos atau bahan organik sejenis sebagai alternatif ramah lingkungan dalam penanganan pencemaran air.

1.5 Ruang Lingkup

1. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Kualitas Air, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, sebagai tempat pelaksanaan seluruh rangkaian kegiatan analisis laboratorium yang mendukung proses penelitian.
2. Air lindi berasal dari TPA Piyungan yang berlokasi di Dusun Ngablak, Desa Sitimulyo, Kecamatan Piyungan, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Sampling air lindi dilakukan pada inlet instalasi pengolahan untuk memperoleh data kualitas air lindi asli, yang mencerminkan kondisi awal sebelum proses pengolahan. Lokasi ini memungkinkan penilaian yang lebih akurat mengenai beban pencemar yang masuk, serta efektivitas proses pengolahan dalam menurunkan kadar kontaminan. Sampling di unit lain bisa dipengaruhi oleh perubahan yang terjadi selama pengolahan, sehingga tidak merepresentasikan kondisi awal limbah.
3. Kompos yang digunakan sebagai bahan pembuatan karbon aktif adalah kompos yang berasal dari TPS 3R karena untuk memanfaatkan limbah organik menjadi produk bernilai tambah, sekaligus mengurangi dampak lingkungan.
4. Aktivator yang digunakan untuk mengaktivasi yaitu HCl 32%, Penggunaan HCl 32% sebagai aktivator dalam pembuatan karbon aktif berbasis kompos (CBAC) efektif karena dapat meningkatkan keasaman permukaan kompos, memperbesar permukaan aktif karbon untuk adsorpsi kontaminan, dan menghasilkan karbon aktif dengan kemampuan adsorpsi yang tinggi. Selain itu, HCl 32% lebih efisien secara biaya dibandingkan aktivator lain seperti KOH atau ZnCl₂ dan mudah diakses di pasaran, menjadikannya pilihan praktis dalam proses pembuatan CBAC.
5. Parameter yang diuji adalah logam kromium (Cr), logam tembaga (Cu) dan logam Timbal (Pb).
6. Sistem pengolahan secara *batch* dengan skala laboratorium.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tempat Pemrosesan Akhir (*Landfill*)

Menurut Kreith dan Tchobanoglous (2002), *Landfill* merupakan fasilitas yang digunakan untuk membuang limbah padat di permukaan tanah. *Landfill* menjadi metode pengelolaan sampah padat yang ekonomis dan banyak digunakan. Namun *landfill* adalah praktik yang paling merusak lingkungan dalam pengelolaan banyak reaksi yang terjadi dalamnya, limbah padat yang dibuang pada sistem sanitary landfill akan mengalami berbagai transformasi secara biologis, kimiawi, dan fisik yang berlangsung secara simultan serta saling berinteraksi satu sama lain.

Reaksi biologis yang terjadi adalah konversi bahan organik pada limbah padat, yang mengarah pada pembentukan gas landfill dan air lindi. Berbagai reaksi kimia signifikan terjadi di dalam tempat pemrosesan akhir (TPA), antara lain pelarutan dan suspensi material sampah serta hasil konversi biologis ke dalam cairan yang meresap melalui timbunan limbah (lindi), proses penguapan serta perubahan fase senyawa kimia dan air menjadi gas landfill, penyerapan senyawa organik volatil maupun semivolatil oleh material padat dalam timbunan, dehalogenasi serta dekomposisi senyawa organik kompleks, hingga reaksi oksidasi-reduksi yang memengaruhi spesiasi logam dan kelarutan garam logam. Proses-proses tersebut saling berinteraksi dan memainkan peran penting dalam menentukan karakteristik akhir dari limbah dan dampaknya terhadap lingkungan. Salah satu perubahan fisik yang paling menonjol yang terjadi di tempat pemrosesan akhir (TPA) adalah terjadinya penurunan volume timbunan, yang disebabkan oleh proses konsolidasi dan dekomposisi material sampah yang tertimbun.

Menurut Kreith dan Tchobanoglous (2002), Pengoperasian tempat pemrosesan akhir (TPA) dengan metode landfill dapat menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan apabila tidak dikelola dengan baik, antara lain:

1. Terjadinya emisi gas landfill yang tidak terkontrol, yang berpotensi menyebar ke luar area TPA dan menimbulkan gangguan bau maupun risiko keselamatan lainnya

2. Kontribusi gas landfill yang tidak dikelola terhadap peningkatan efek rumah kaca di atmosfer
3. Pelepasan air lindi yang tidak terkontrol yang dapat meresap ke dalam air tanah atau mencemari aliran air permukaan di sekitarnya
4. Pertumbuhan dan berkembangnya vektor penyakit akibat pengelolaan TPA yang kurang optimal
5. Dampak kesehatan dan lingkungan akibat pelepasan senyawa gas dalam jumlah kecil yang berasal dari bahan berbahaya yang pernah dibuang ke TPA di masa lalu.

2.2 Air Lindi

Menurut Kreith dan Tchobanoglous (2002), Lindi merupakan cairan yang terbentuk setelah melalui proses peresapan melewati timbunan limbah padat, yang membawa serta berbagai zat terlarut maupun tersuspensi di dalamnya. Pada umumnya, komposisi lindi di tempat pemrosesan akhir (TPA) berasal dari kombinasi antara air yang berasal dari luar sistem, seperti limpasan permukaan dan air hujan, serta cairan yang dihasilkan dari proses dekomposisi material sampah di dalam TPA, apabila proses penguraian tersebut berlangsung. Lindi berpotensi menyebabkan pencemaran air yang serius jika tidak dikelola dengan baik. Air tanah dan air permukaan dapat terkontaminasi oleh lindi yang tidak diolah dari lokasi TPA. Air permukaan juga dapat terpengaruh oleh sedimen atau kontaminan dalam aliran air hujan yang tidak terkendali.

Timbunan sampah di tempat pemrosesan akhir (TPA) umumnya mengandung senyawa organik, yang apabila terpapar air hujan akan menghasilkan air lindi dengan konsentrasi mineral dan bahan organik yang tinggi. Apabila aliran air lindi ini tidak dikelola secara tepat dan dibiarkan mengalir ke permukaan tanah, maka dapat menimbulkan risiko bagi kesehatan manusia serta mencemari lingkungan di sekitarnya. Perubahan fisik dan kimiawi, proses biologi, dan produksi air lindi dan gas menyebabkan material sampah menjadi lebih buruk.

Ada 3 fase utama dari aktivitas biologis yang terjadi dan merupakan satu rangkaian yaitu :

1. Dekomposisi aerobik dengan menggunakan oksigen yang tersedia di dalam *landfill*.

2. Dekomposisi anaerobic dengan organisme anaerob dan fakultatif, menghasilkan komponen yang lebih sederhana yang dapat larut.
3. Bakteri Methanogenic mulai mengkonsumsi komponen yang lebih sederhana, menghasilkan metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂).

2.2.1 Karakteristik Air Lindi

Lindi dapat mengalir ke sungai atau meresap ke dalam tanah, maka akan mencemari tanah dan sungai yang akan berdampak pada menurunnya kualitas air di sekitar wilayah tersebut. Air lindi mengandung berbagai senyawa organik hasil dekomposisi serta unsur logam berat seperti kromium (Cr), merkuri (Hg), tembaga (Cu), besi (Fe), timbal (Pb), mangan (Mn), klorin (Cl), dan seng (Zn) (Irhamni 2017). Bahan yang terkandung dalam lindi:

a. Komposisi Kimia

Mengandung konsentrasi tinggi senyawa organik dalam bentuk *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) (Christensen et al. 2001). Hasil penguraian limbah organik, termasuk asam lemak volatil (*volatile fatty acids*) dan senyawa humik. Parameter yang relevan adalah BOD dan COD (Christensen et al. 2001).

b. Logam Berat

Mengandung logam berat seperti Pb, Cu, Zn, Cd, Hg, dan Cr yang berasal dari material limbah (Kjeldsen et al. 2002).

c. pH

Lindi muda cenderung asam dengan pH 4–6 karena adanya asam organik hasil dekomposisi anaerobik. Lindi tua mendekati netral (pH 7–8) akibat produksi amonia dan penurunan bahan organik mudah terurai (Christensen et al. 2001).

d. Warna dan Bau

Berwarna coklat hingga hitam karena kandungan bahan organik dan logam berat. Bau menyengat berasal dari penguraian senyawa organik, terutama sulfur (Renou et al. 2008).

e. *Total Dissolved Solids (TDS)*

Mengandung zat terlarut tinggi (klorida, nitrat, ion logam), yang mempengaruhi daya hantar listrik. Zat terlarut, termasuk ion logam, senyawa organik kecil, dan koloid, dengan diameter partikel kecil ($<10^{-3}$ mm) (Kjeldsen et al. 2002).

f. Nutrien

Nitrogen (terutama dalam bentuk amonium), fosfor, dan kalium berasal dari limbah organik dan limbah makanan (Renou et al. 2008).

g. Senyawa Anorganik

Ion seperti klorida, sulfat, dan nitrat yang berasal dari proses pelarutan bahan anorganik (Christensen et al. 2001).

2.2.2 Baku Mutu Air Lindi

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah menetapkan standar kualitas air lindi, yang menjadi acuan untuk menentukan tingkat dan jumlah pencemar yang masih dapat diterima dalam lindi sebelum dibuang ke badan air sebagai hasil dari kegiatan TPA. Selain itu, penentuan parameter logam berat dalam upaya pengelolaan air lindi juga merujuk pada ketentuan yang tercantum dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, serta Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 mengenai Baku Mutu Air Limbah. Adapun nilai baku mutu yang ditetapkan dalam masing-masing regulasi tersebut disajikan sebagai berikut.

Tabel 2. 1 Baku Mutu Air Lindi

Parameter	Kadar Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
pH	6 - 9	
BOD	150	mg/L
COD	300	mg/L
TSS	100	mg/L
N Total	60	mg/L
Merkuri	5	mg/L
Kadmium	0,1	mg/L

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah

Tabel 2. 2 Baku Mutu Air Nasional Kelas 3

Parameter	Nilai	Satuan
Total Kromium	0.05	mg/L
Tembaga	0.02	mg/L
Timbal	0.03	mg/L

Sumber: Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

Tabel 2. 3 Baku Mutu Air Limbah Golongan II

Parameter	Nilai	Satuan
Total Kromium	1	mg/L
Tembaga	3	mg/L
Timbal	1	mg/L

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah

2.2.3 Penanganan Air Lindi

Maka dari itu, diperlukan pengelolaan air lindi untuk menghilangkan potensi untuk mencemari lingkungan. Menurut Kreith dan Tchobanoglous (2002) ada beberapa metode yang digunakan untuk mengelola air lindi, yaitu:

a. Daur Ulang Air Lindi (*Leachate Recycling*)

Meresirkulasikan lindi melalui TPA adalah metode yang efektif untuk pengolahan lindi yang dapat mempercepat proses

dekomposisi. Peningkatan laju peredaran lindi membantu melarutkan limbah segar dan lebih cepat menciptakan kondisi metanogenik. Namun, hal ini perlu diimbangi dengan keterbatasan hidrolis dan sifat TPA yang tidak homogen, yang memerlukan perancangan yang hati-hati. Faktor-faktor penting meliputi permeabilitas sampah, lapisan tanah, serta pengelolaan infiltrasi dan penyimpanan air. Proses ini juga mengurangi komponen berbahaya seperti padatan terlarut, BOD, COD, dan logam berat. Selain itu, resirkulasi lindi meningkatkan produksi metana, yang dapat dimanfaatkan untuk energi. Untuk mencegah pelepasan gas yang tidak terkendali, sistem pemulihan gas diperlukan. TPA besar mungkin memerlukan fasilitas penyimpanan lindi.

b. Penguapan Air Lindi (*Leachate Evaporation*)

Evaporasi lindi melibatkan penggunaan kolam yang dilapisi untuk mengelola lindi, di mana cairan ini akan menguap atau disemprotkan pada area tempat sampah yang sudah selesai. Di daerah dengan curah hujan tinggi, kolam lindi ditutup dengan geomembran selama musim dingin untuk mencegah hujan masuk. Pada bulan-bulan yang lebih hangat, lindi yang terkumpul diuapkan atau disemprotkan ke permukaan tempat sampah, sementara gas berbau yang mungkin terkumpul di bawah penutup permukaan akan dialirkan melalui kompos atau filter tanah. Untuk kolam yang lebih kecil, penutupan sepanjang tahun bisa menjadi pilihan. Metode lain melibatkan perlakuan biologis pada lindi, penyimpanan selama musim dingin, dan penyemprotan air yang telah diolah ke tanah terdekat pada musim panas, bahkan saat hujan, jika cukup lahan tersedia.

c. Pengolahan Air Lindi (*Leachate Treatment*)

Pengolahan lindi diperlukan ketika daur ulang dan evaporasi lindi tidak memungkinkan, atau jika pembuangan langsung ke fasilitas pengolahan tidak dapat dilakukan. Proses pengolahan ini bergantung pada karakteristik lindi yang sangat bervariasi, termasuk TDS, COD, SO₄²⁻, logam berat, dan bahan toksik lainnya. Beberapa metode

pengolahan biologis dan fisik/kimia telah digunakan, seperti yang dijelaskan dalam tabel dan gambar referensi. Pemilihan proses tergantung pada jenis kontaminan yang harus dihilangkan, serta lokasi geografis dan fisik tempat sampah. Lindi dengan konsentrasi TDS yang sangat tinggi atau kadar COD yang tinggi cenderung lebih sulit diolah secara biologis, sementara pengolahan anaerobik lebih cocok untuk COD tinggi. Logam berat dapat mengganggu banyak proses biologis. Kapasitas fasilitas pengolahan juga dipengaruhi oleh ukuran tempat sampah dan masa pakainya. Lindi dari tempat sampah tua sering mengandung bahan toksik yang lebih beragam.

d. Pengolahan Lahan Basah (*Wetland Treatment*)

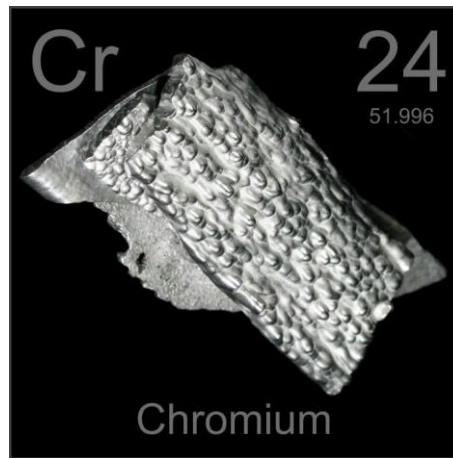
Wetland buatan yang dibangun memanfaatkan proses alami untuk mengurangi konsentrasi polutan dalam lindi. Materi organik paling efektif dihilangkan, sementara unsur lainnya terdegradasi atau tertahan dalam *wetland* dengan tingkat yang lebih rendah. Parameter desain untuk sistem tertentu harus didasarkan pada data eksperimen yang mempertimbangkan baik karakteristik lindi maupun kondisi tanah (Mulamootil et al. 1999).

e. Pembuangan ke Instalasi Pengolahan Air Limbah (*Discharge to Wastewater Treatment Plant*)

Pembuangan lindi ke instalasi pengolahan air limbah dapat dilakukan jika tempat sampah berada dekat dengan sistem saluran air limbah. Dalam hal ini, lindi akan dialirkan ke sistem saluran tersebut. Namun demikian, pada umumnya diperlukan tahap pra-perawatan atau proses resirkulasi terhadap air lindi guna menurunkan kandungan senyawa organik sebelum dialirkan ke sistem saluran. Apabila sistem saluran air limbah tidak tersedia, dan metode penguapan atau penyemprotan tidak memungkinkan untuk diterapkan, maka pengolahan secara menyeluruh yang dilanjutkan dengan pembuangan ke badan permukaan air dapat menjadi alternatif yang perlu dipertimbangkan.

2.3 Logam Berat

2.3.1 Logam Kromium



Gambar 2. 1 Logam Kromium

Sumber: <https://periodictable.com/Elements/024/index.html>

Beberapa senyawa kromium, khususnya yang berada dalam bentuk kromium valensi enam (Cr(VI)), seperti kalsium kromat, seng kromat, stronsium kromat, dan timbal kromat, diketahui memiliki sifat sangat toksik serta secara alami bersifat karsinogenik. Dibandingkan dengan senyawa kromium trivalen, kromium heksavalen lebih mudah diserap oleh tubuh melalui sistem pernapasan dan pencernaan. Kromium dimanfaatkan secara luas dalam berbagai sektor industri, antara lain sebagai pelapis logam untuk perlindungan, komponen dalam paduan logam, bahan pada pita magnetik, pigmen dalam cat, serta dalam produksi karet, semen, dan kertas. Selain itu, kromium juga digunakan sebagai pengawet kayu, dalam proses penyamakan kulit, dan untuk keperluan pelapisan logam (Martin & Griswold 2009).

Pencemaran kromium umumnya bersumber dari limbah hasil kegiatan berbagai sektor industri, antara lain industri pelapisan krom, tekstil, cat, penyamakan kulit, tinta, serta proses pengilangan minyak. Sumber utama pencemaran ini adalah natrium kromat dan natrium dikromat, yang merupakan bentuk kromium (VI) bersifat toksik dan digunakan sebagai bahan dasar dalam produksi berbagai senyawa kromium. Senyawa ini digunakan dalam pewarna krom, garam krom untuk penyamakan kulit, pengawetan kayu, serta sebagai bahan anti korosi pada peralatan otomotif, ketel, dan

pengeboran minyak. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk mengurangi sifat toksik kromium (VI), misalnya dengan metode adsorpsi atau degradasi. Berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor Kep 03/MENKLH/11/1991, konsentrasi maksimum yang diperbolehkan untuk kandungan kromium total dalam badan air adalah sebesar 0,1 ppm, sedangkan untuk kromium heksavalen (Cr(VI)) dibatasi hingga 0,05 ppm (Adhani & Husaini 2017).

Paparan kromium dalam konsentrasi tinggi pada manusia berpotensi menimbulkan berbagai dampak merugikan terhadap kesehatan. Kadar kromium yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan pada sistem pernapasan, kulit, pembuluh darah, serta ginjal. Dalam sistem pernapasan, kromium diketahui dapat meningkatkan risiko terjadinya kanker paru-paru serta menimbulkan ulkus kronis maupun perforasi pada septum hidung. Dampak pada kulit ditandai dengan munculnya ulkus kronis, sedangkan pada sistem pembuluh darah, kromium diduga berkontribusi terhadap pembentukan plak yang dapat menyebabkan penebalan pada dinding aorta. Sementara itu, pada organ ginjal, paparan kromium dalam jumlah tinggi dapat menyebabkan kerusakan berupa nekrosis pada tubulus ginjal (Adhani & Husaini 2017).

2.3.2 Logam Tembaga



Gambar 2. 2 Logam Tembaga

Sumber: <https://periodictable.com/Elements/029/index.html>

Tembaga secara alami terdapat di lingkungan, namun keberadaannya juga dapat disebabkan oleh aktivitas manusia, terutama melalui limbah industri yang menggunakan tembaga dalam proses produksinya, seperti pada industri galangan kapal, pengolahan kayu, dan limbah rumah tangga. Beberapa sektor industri yang berpotensi menghasilkan limbah tembaga antara lain industri galangan kapal, pengolahan kayu, serta limbah domestik. Paparan tembaga dalam jumlah berlebihan dapat menimbulkan efek toksik, baik dalam bentuk keracunan akut maupun kronis. Keracunan akut umumnya ditandai dengan gejala seperti mual, muntah, nyeri perut, hemolisis, neutrofilia, kejang, hingga kematian. Sementara itu, paparan jangka panjang dapat menyebabkan akumulasi tembaga di organ hati, yang berujung pada terjadinya hemolisis. Proses hemolisis ini dipicu oleh penumpukan senyawa H_2O_2 dalam sel darah merah, yang mengakibatkan oksidasi membran sel dan akhirnya menyebabkan pecahnya sel darah merah. Kondisi ini berisiko menimbulkan anemia serta menghambat pertumbuhan (Darmono 1995).

2.3.3 Logam Timbal



Gambar 2. 3 Logam Timbal

Sumber: <https://periodictable.com/Elements/082/index.html>

Timbal merupakan salah satu logam berat yang secara alami tersebar di lingkungan dalam jumlah yang sangat kecil, yaitu hanya sekitar 0,0002% dari total komposisi kerak bumi (Palar 2008). Logam ini dapat ditemukan dalam bentuk unsur murni maupun dalam bentuk senyawa anorganik dan organik. Seluruh bentuk timbal tersebut memiliki tingkat toksisitas yang serupa terhadap kesehatan manusia (Adhani & Husaini 2017). Seiring dengan meningkatnya aktivitas manusia, seperti kegiatan pertambangan, proses peleburan, penggunaan bahan bakar minyak, serta pemanfaatan timbal dalam berbagai sektor komersial, telah terjadi peningkatan penyebaran timbal ke lingkungan, sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran dan risiko kesehatan. Timbal dapat mencemari tubuh melalui udara yang terkontaminasi, partikel timbal yang terhirup, kontak dengan kulit, makanan dan minuman yang terkontaminasi, serta benda-benda yang mengandung timbal yang tertelan (Kadirvelu, Thamaraiselvi & Namasivayam 2001).

Paparan timbal (Pb) yang bersifat toksik terhadap tubuh manusia dapat menimbulkan berbagai gangguan pada beberapa sistem organ tubuh (O'Neill 1994), antara lain sebagai berikut:

a. Gangguan pada sistem neurologi

Paparan timbal dapat menyebabkan gangguan neurologis seperti ensefalopati, ataksia, stupor, hingga koma. Pada anak-anak, kondisi ini dapat memicu kejang dan neuropati perifer, yang berdampak pada perkembangan sistem saraf.

b. Gangguan terhadap fungsi ginjal.

Timbal berpotensi merusak fungsi ginjal, yang ditandai dengan munculnya aminoasiduria dan glukosuria. Jika paparan berlangsung dalam jangka panjang, dapat berkembang menjadi nefritis kronis.

c. Gangguan terhadap sistem reproduksi.

Paparan timbal juga berdampak buruk pada sistem reproduksi, seperti peningkatan risiko keguguran, kelainan kehamilan, hingga kematian janin.

d. Gangguan terhadap sistem hemopoitik

Timbal dapat menghambat sintesis globin, yang menyebabkan terjadinya anemia. Anemia yang ditimbulkan umumnya bersifat ringan dan disertai peningkatan kadar kadar *Amino Levulinic Acid* (ALA) dalam urin.

e. Gangguan terhadap sistem saraf

Paparan timbal secara kronis dapat menimbulkan *lead encephalopathy*. Gejala yang muncul meliputi gangguan koordinasi motorik, mudah tersinggung, serta penurunan kemampuan dalam membentuk dan memahami konsep.

2.4 Kompos

Pengomposan merupakan suatu proses biologis yang melibatkan aktivitas mikroorganisme dalam mendegradasi bahan organik, seperti kotoran, lumpur, dedaunan, kertas, serta limbah makanan, menjadi suatu material yang menyerupai tanah dan dikenal sebagai kompos. Ini adalah proses yang sama dengan pembusukan daun dan sampah organik lainnya di alam. Pengomposan hanya mengontrol kondisi sehingga bahan membusuk lebih cepat (Rynk 1992).

2.4.1 Kandungan dan Karakteristik Kompos

a. Unsur Makronutrien

Makronutrien seperti Karbon (C), nitrogen (N), fosfor (P) dan kalium (K) merupakan unsur hara utama yang dibutuhkan oleh mikroorganisme yang terlibat dalam pengomposan. Sehingga konsentrasi unsur hara juga mempengaruhi nilai kompos. Banyak bahan organik mengandung nutrisi dalam jumlah yang cukup untuk pengomposan.

Tabel 2. 4 Unsur Makronutrien

Unsur	Simbol	Peran	Sumber
Karbon	C	unsur yang dioksidasi untuk memproduksi energi dan dimetabolismekan untuk menghasilkan konstituen seluler	(Diaz, Savage & Golueke 2002)
Nitrogen	N	unsur penting dalam protoplasma, protein, dan asam amino agar organisme dapat tumbuh atau berkembang biak.	(Diaz, Savage & Golueke 2002)
Fosfor	P	unsur yang berperan dalam penyimpanan energi dan membentuk protoplasma	(Epstein 1997)
Kalium	K	unsur yang mendukung dekomposisi selama pengomposan	(Irshad et al. 2011)

b. Unsur Mikronutrien

Kompos juga mengandung unsur mikro seperti logam berat. Kandungan ini penting, namun harus dalam kadar yang aman. Berdasarkan SNI 19-7030-2004 kandungan mikronutrien atau unsur mikro kompos meliputi unsur logam seperti Arsen (Ar), Kadmium (Cd), Kobalt (Co), Kromium (Cr), Tembaga (Cu), Merkuri (Hg), Nikel (Ni), Timbal (Pb), Selenium (Se), dan Seng (Zn), yang seluruhnya ditetapkan dalam satuan mg/kg.

Tabel 2. 5 Unsur Mikronutrien

Unsur	Kadar Maksimum	Satuan
Arsen	13	mg/kg
Kadmium	3	mg/kg
Kobalt	34	mg/kg
Kromium	210	mg/kg
Merkuri	0,8	mg/kg
Nikel	62	mg/kg
Selenium	2	mg/kg
Seng	500	mg/kg
Tembaga	100	mg/kg
Timbal	150	mg/kg

c. Rasio C/N

Rasio karbon yang tersedia terhadap nitrogen yang tersedia (C/N) merupakan faktor nutrisi yang paling penting, karena pengalaman menunjukkan bahwa sebagian besar sampah organik mengandung nutrisi lain dalam jumlah dan rasio yang diperlukan untuk pengomposan.

Rasio C/N adalah faktor penting yang memengaruhi keseimbangan nutrisi selama pengomposan:

- Rasio Ideal: 20-25:1 untuk pengomposan optimal.
- Rasio Tinggi (>30:1): Mengurangi kecepatan dekomposisi karena kurangnya nitrogen untuk mendukung metabolisme mikroba.

- Rasio Rendah (<15:1): Menyebabkan hilangnya nitrogen dalam bentuk gas amonia, mengurangi efisiensi pengomposan (Diaz, Savage & Golueke, 2002).

Penyesuaian C/N dapat dilakukan dengan:

- Penurunan C/N (menambahkan nitrogen): Rumput, tumbuhan hijau, atau lumpur limbah.
- Peningkatan C/N (menambahkan karbon): Jerami, daun kering, atau potongan kayu (Diaz, Savage & Golueke, 2002).

Kompos dengan kualitas yang baik dibuat dengan dengan menyediakan lingkungan yang tepat untuk mikroba, ini sangat penting untuk keberhasilan proses pengomposan. Adapun tiga faktor untuk menunjang pembuatan kompos dengan kualitas yang baik :

- a. Susunan kimia bahan baku: Kandungan nutrisi bahan organik.
- b. Ukuran fisik bahan baku: Partikel yang sesuai meningkatkan aerasi dan porositas.
- c. Populasi mikroorganisme: Mikroorganisme yang aktif mendukung proses dekomposisi.

Tabel 2. 6 Parameter Kualitas Kompos

Parameter	Nilai	
	Yang Dapat Diterima	Ideal
Rasio C:N	20-40:1	25-35:1
Kadar air	40-65%	40-65% dari berat
Konsentrasi oksigen yang tersedia	>5%	>10% atau lebih
Ukuran partikel bahan baku	<1 inch	Bervariasi
Bulk density	593,276 kg/m ³	593,276 kg/m ³
pH	5,5 - 9	6,5 - 8
Suhu	43-66°C	54-60°C

Sumber: Rynk, 1992

2.4.2 Pemanfaatan Kompos

Produk kompos memiliki berbagai manfaat di berbagai aspek seperti lingkungan, tanah, dan tanaman. Dalam hal lingkungan, kompos dapat mengurangi polusi udara yang disebabkan oleh pembakaran limbah serta pelepasan gas metana dari sampah organik yang membusuk akibat bakteri metanogen di tempat pemrosesan sampah, serta mengurangi kebutuhan lahan untuk penimbunan sampah. Penggunaan pupuk kompos meningkatkan kualitas hasil tanaman, di mana sayuran yang dipupuk dengan kompos cenderung memiliki rasa dan tekstur lebih baik dibandingkan dengan pupuk kimia. Selain itu, kompos memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kesuburannya secara berkelanjutan, dan merangsang aktivitas mikroorganisme yang bermanfaat. Penggunaannya juga berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca, karena proses dekomposisinya lebih lambat dibandingkan pembakaran bahan bakar fosil, sehingga mendukung produktivitas pertanian sekaligus menjaga keseimbangan lingkungan (Runtuboy & Yarmalinda 2024).

Kompos dengan karakteristik carbonaceous, yang kaya karbon, sangat sesuai untuk pembuatan karbon aktif. Dalam proses pirolisis dan aktivasi karbon, kandungan karbon ini menjadi elemen dasar yang diubah menjadi struktur berpori. Struktur berpori pada karbon aktif memungkinkan daya serap tinggi terhadap polutan seperti logam berat dan senyawa organik.

Menurut Tsui dan Roy (2007), kompos memiliki potensi besar sebagai bahan baku karbon aktif. Potensi ini dipengaruhi oleh jenis sampah organik yang digunakan sebagai bahan dasar serta durasi proses termal selama pengomposan. Proses tersebut meningkatkan stabilitas termal kompos dan membantu membentuk mikroporositas yang berkembang secara alami.

Ukuran partikel kompos berperan penting dalam proses aktivasi menjadi karbon aktif, karena mempengaruhi efisiensi konversi dan karakteristik akhir produk. Kompos dengan ukuran partikel lebih kecil ($\leq 1,27$ cm) lebih mudah diubah menjadi karbon aktif dalam bentuk granular atau bubuk. Hal ini disebabkan oleh kesesuaian ukuran butiran kompos dengan standar saringan 0,5 inci ($\frac{1}{2}$ ") atau $\leq 1,27$ cm, yang memungkinkan distribusi

partikel yang lebih seragam selama proses pirolisis dan aktivasi. Sebaliknya, partikel dengan ukuran <500 mikron umumnya dihindari dalam kompos organik karena menandakan kandungan organik yang rendah dan dapat menyebabkan kesulitan dalam pengemasan (Darlington 2015).

Tabel 2. 7 Potensi Pemanfaatan Kompos sebagai Karbon Aktif

Aspek	Potensi
Kandungan Karbon	Kompos sebagai bahan yang kaya karbon (carbonaceous) yang kandungan karbonnya diubah melalui pirolisis dan aktivasi menjadi struktur berpori yang efektif menyerap polutan seperti logam berat dan senyawa organik.
Stabilitas Termal	Kompos yang terdekomposisi dengan baik memiliki stabilitas termal tinggi, memastikan efisiensi pembentukan karbon aktif dengan struktur stabil dan porositas optimal selama pirolisis dan aktivasi.
Mikroporositas	Pori-pori yang disebabkan oleh proses pengomposan yang, setelah aktivasi, meningkatkan kemampuan kompos sebagai karbon aktif untuk menyerap logam berat dan kontaminan.
Ukuran Partikel	Ukuran partikel kecil ($\leq 1,27$ cm) mempermudah kompos diubah menjadi karbon aktif granular atau bubuk.

2.5 Karbon Aktif

Menurut Gale (2021) *Activated Carbon* adalah struktur berpori dengan luas permukaan tinggi yang terbuat dari berbagai sumber karbon menggunakan proses satu langkah atau dua langkah langsung yang memerlukan prekursor karbon awal sebelum aktivasi. *Activated Carbon* memiliki beberapa kegunaan, terutama sebagai adsorben untuk pengolahan air limbah. Instalasi pengolahan air limbah memanfaatkan *Activated Carbon* untuk menghilangkan polutan, seperti pewarna, obat-obatan, logam berat, dan kontaminan organik.

Tergantung pada bahan sumbernya, dan metode pengolahan yang digunakan untuk menghasilkan bahan aktif karbon, sifat fisik dan kimia produk akhir dapat berbeda, menurut Brown (2018) secara signifikan ada tiga jenis utama karbon aktif yang dihasilkan, yaitu

1. *Extruded Activated Carbon (EAC)*

Bubuk karbon aktif yang dicampur dengan bahan pengikat kemudian diekstrusi menjadi blok karbon aktif berbentuk silinder dengan diameter antara 0,8 hingga 130 mm. Produk ini umumnya digunakan untuk aplikasi fase gas karena memiliki penurunan tekanan yang rendah, kekuatan mekanik yang tinggi, dan kandungan debu yang minim.

2. *Granular Activated Carbon (GAC)*

Karbon aktif dengan sebagian besar partikel yang lebih besar dari ukuran tertentu, seperti saringan 50 mesh (0,297 mm) menurut AWWA (1992) atau saringan 80 mesh (0,177 mm) menurut ASTM dan ukuran yang lebih besar. Karbon aktif granular memiliki partikel yang lebih besar dibandingkan dengan karbon aktif bubuk, sehingga permukaan luarnya lebih kecil. Karbon jenis ini digunakan dalam pengolahan air, penghilangan bau, pemisahan komponen dalam sistem aliran, serta dalam bak campuran cepat.

3. *Powdered Activated Carbon (PAC)*

Karbon aktif dengan partikel yang sebagian besar berukuran lebih kecil dari 100 mesh. Mayoritas partikel biasanya <325 mesh. PAC umumnya ditambahkan langsung ke unit proses lainnya, seperti pemasukan air baku, bak campuran cepat, penjernih, dan filter gravitasi.

2.5.1 Bahan Baku Karbon Aktif

Karbon aktif dapat diproduksi dari bahan-bahan yang mengandung unsur karbon baik organik maupun anorganik dan memiliki struktur berpori. Menurut Brown (2018) karbon aktif diproduksi dari bahan sumber karbon seperti kulit kacang, tempurung kelapa, sabut (serat tempurung kelapa), gambut, kayu, lignit, batu bara bitumen, dan pitch minyak bumi.

Alternatif lain yaitu dengan menggunakan produk kompos sebagai bahan baku karbon aktif. Penggunaan kompos sebagai bahan baku karbon aktif diharapkan mampu mengurangi daur hidup emisi gas rumah kaca yang berpotensi timbul di daerah yang masih menerapkan metode TPA (*open dumping*). Dan produksi kompos yang melimpah diharapkan kompos tidak

hanya dimanfaatkan sebagai bahan penyubur tanah tetapi bisa dimanfaatkan untuk hal lain, misalnya dengan memanfaatkan kompos yang memiliki distribusi butiran yang berukuran lebih besar untuk peruntukan lain

Potensi kompos menjadi bahan baku karbon aktif dibuktikan oleh Tsui & Roy (2007) yang menyatakan bahwa kompos merupakan material yang relatif stabil terhadap suhu untuk memproduksi arang, sehingga memiliki potensi yang besar untuk dijadikan sebagai feed stock untuk membuat karbon aktif dengan kualitas yang tinggi. Karena merupakan bahan material yang mengandung bahan kayu dan sampah tanaman dengan kadar selulosa dan hemiselulosa yang tinggi dan teksturnya yang lunak, maka arang yang dihasilkan adalah arang yang ber-berat jenis rendah sehingga lebih secuai untuk tujuan penyerapan kontaminan yang terkandung di cairan (Sudrajat & Pari 2011), maka dari itu karbon aktif dari kompos cocok digunakan sebagai pengolah dan penghilang kadar kontaminan atau pencemar yang dikandung oleh air limbah. Menurut studi yang dilakukan, karbon aktif yang dihasilkan dari kompos akan memiliki afinitas penyerapan yang baik bagi polutan air karena struktur mikropori yang dimiliki oleh kompos (Tsui & Roy 2007).

2.5.2 Pembuatan Karbon Aktif

Pembuatan karbon aktif terdiri dari dua proses utama, yaitu pengarangan untuk bahan baku mentah, dan aktivasi kimia.

a. Pengarangan

Arang merupakan residu berwarna hitam hasil pembakaran pada keadaan tanpa oksigen yang mengandung karbon yang berbentuk padat dan berpori, seperti kayu atau bahan biomaterial lainnya. Arang tersusun atas beberapa komponen utama, yaitu karbon terikat (*fixed carbon*), abu, air, nitrogen, dan sulfur (Fauziah 2009). Arang itu sendiri merupakan produk antara yang berperan penting dalam proses produksi arang aktif. Kualitas arang aktif yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh tingkat kesempurnaan dalam tahap pengarangan. Pengarangan termasuk ke dalam proses termokimia, yaitu suatu metode konversi biomassa menjadi arang melalui

pemanasan dalam kondisi terbatas oksigen (Worasuwannark et al. 2004).

Proses pengarangan melibatkan tahap pirolisis, yaitu proses dekomposisi termal terhadap material organik yang berlangsung dalam kondisi tanpa kehadiran oksigen. Pirolisis ini terjadi melalui dua tahapan utama, yakni pirolisis primer dan pirolisis sekunder.

Produk utama yang dihasilkan dari proses pirolisis meliputi gas non-kondensabel seperti karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), dan karbon dioksida (CO₂); hidrokarbon ringan seperti metana (CH₄) dan etilena (C₂H₄); senyawa volatil yang dapat dikondensasi (tar); residu padat berupa arang (char); serta abu mineral (Basu, 2010). Ketika produk pirolisis primer mengalami waktu tinggal yang lebih lama disertai dengan peningkatan suhu, maka akan terjadi pirolisis sekunder. Dalam tahap pirolisis sekunder ini, tar primer dapat terdekomposisi menjadi gas-gas ringan atau mengalami reaksi polimerisasi yang menghasilkan hidrokarbon dengan struktur molekul yang lebih kompleks (Aini et al. 2022).

Proses pirolisis umumnya berlangsung pada suhu reaktor antara 300 hingga 900 °C, namun kisaran temperatur 500–550 °C sering digunakan untuk memaksimalkan produksi fraksi cair sebagai hasil utama. Secara umum, perlakuan panas terhadap material pada suhu menengah (200–300 °C) cenderung menghasilkan produk padat sebagai komponen dominan. Sementara itu, pemanasan pada suhu tinggi (400–600 °C) menghasilkan proporsi produk cair yang lebih besar, dan pada suhu yang sangat tinggi (>800 °C), produk utama yang terbentuk adalah dalam bentuk gas (Riduan et al. 2020).

b. Aktivasi

Berdasarkan pendapat Cooney (1980), proses aktivasi merupakan tahapan untuk menghilangkan senyawa hidrokarbon yang masih melekat pada permukaan arang, sehingga struktur pori arang dapat mengalami peningkatan. Proses aktivasi terhadap karbon aktif dapat

dilakukan melalui dua metode, yaitu aktivasi secara fisika dan aktivasi secara kimia.

- Aktivasi Fisika

Aktivasi fisik ini melibatkan dua langkah, yaitu pertama adalah karbonisasi bahan baku, langkah kedua adalah aktivasi arang berkarbonisasi pada suhu tinggi dengan adanya uap zat oksidasi, karbon dioksida, dan udara. Karbonisasi terjadi pada kisaran 400-800°C, dan suhu aktivasi berkisar antara 800-1000°C. Bahan pengaktif fisik yang digunakan dalam produksi karbon aktif, yaitu uap, CO₂, dan panas (Bubanale & Shivashankar 2017). Adapun kelebihan dan kekurangan dari aktivasi fisika menurut Bergna et al, yaitu:

Tabel 2. 8 Kelebihan dan Kekurangan Aktivasi Fisika

Kelebihan	Tidak ada residu kimia – Produk akhir bebas dari kontaminasi bahan kimia.
	Lebih ramah lingkungan – Tidak menggunakan bahan kimia tambahan.
Kekurangan	Konsumsi energi tinggi – Membutuhkan suhu tinggi yang menyebabkan biaya energi lebih besar.
	Hasil lebih rendah – Banyak massa bahan yang hilang selama proses aktivasi
	Kontrol pori lebih sulit – Struktur pori yang dihasilkan kurang seragam dibanding aktivasi kimia.

- Aktivasi Kimia

Pembuatan arang aktif secara kimiawi dilakukan dengan merendam arang dalam agen pengaktif untuk melarutkan kotoran yang ada pada pori-pori arang aktif, sehingga ukuran pori dan luas permukaannya dapat diperbesar. Beberapa jenis zat pengaktif seperti asam (H₃PO₄, HNO₃, H₂SO₄, HCl), netral (K₂CO₃, ZnCl₂, FeCl₃, CaCl₂, MgCl₂) dan basa (NaOH, KOH). Adapun kelebihan dan kekurangan dari aktivasi kimia menurut Bergna et al, yaitu:

Tabel 2. 9 Kelebihan dan Kekurangan Aktivasi Kimia

Kelebihan	Suhu aktivasi lebih rendah – Tidak memerlukan suhu setinggi aktivasi fisika.
	Hasil lebih tinggi – Lebih banyak karbon aktif yang dihasilkan karena lebih sedikit kehilangan massa.
	Struktur pori lebih terkontrol – Dapat menghasilkan luas permukaan yang lebih besar dan distribusi pori yang lebih seragam
Kekurangan	Residu kimia – Karbon aktif harus dicuci secara intensif untuk menghilangkan sisa bahan kimia
	Dampak lingkungan dan keamanan – Penggunaan bahan kimia dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik.

2.5.3 Penggunaan Karbon Aktif

a. Penggunaan Karbon Aktif menurut jenisnya, yaitu

- *Extruded Activated Carbon*

Karbon aktif yang diekstrusi terutama digunakan untuk pengolahan air dan aplikasi fase gas karena penurunan tekanannya yang rendah, kekuatan mekanik yang tinggi dan kandungan debu yang rendah. Aplikasi yang umum adalah pada filter kartrid yang langsung digunakan

- *Granular Activated Carbon*

Karbon aktif granular adalah media pilihan untuk sistem *fixed bed water treatment*, karena menunjukkan campuran terbaik antara luas permukaan (misalnya, ukuran partikel) dan penurunan tekanan.

- *Powdered Activated Carbon*

Karbon aktif bubuk biasanya digunakan sebagai "bahan" dalam tangki reaksi, di mana karbon aktif dimasukkan sebagai bubuk atau bubur, untuk bereaksi dengan kontaminan dalam fluida proses. Karbon aktif juga digunakan untuk mengolah udara, seperti pada masker gas dan aplikasi serupa

b. Penggunaan Karbon Aktif pada beberapa bidang, yaitu

- Pengolahan Air

Karbon aktif banyak diaplikasikan dalam proses pemurnian dan pengolahan air, baik untuk kebutuhan air minum maupun air limbah. Penggunaannya meliputi sistem pengolahan air di tingkat kota, instalasi pengolahan air limbah, kolam renang, akuarium, hingga sistem filtrasi rumah tangga.

- Pemurnian Udara

Dalam bidang pemurnian udara, karbon aktif berfungsi untuk mengeliminasi bau tidak sedap maupun senyawa berbahaya yang berpotensi mencemari lingkungan. Aplikasinya mencakup rumah tinggal, fasilitas industri, hingga ruangan medis seperti ruang operasi.

- Pangan

Di sektor makanan dan minuman, karbon aktif digunakan dalam berbagai tahapan pemrosesan, seperti dekolorisasi gula, pemurnian senyawa organik, penghilangan klorin, pemurnian karbon dioksida, dekafeinasi, serta proses pemurnian lainnya.

- Industri

Karbon aktif juga digunakan sebagai katalis dalam berbagai industri, termasuk pengolahan dan penyimpanan gas, pemulihan logam seperti emas, pemurnian produk farmasi, dan sejumlah aplikasi industri lainnya.

- Medis

Dalam dunia medis, karbon aktif digunakan secara luas, antara lain sebagai agen penawar racun, bahan pengontrol bau, media penyaring, komponen masker pernapasan, hingga sebagai material dalam pembalut luka.

2.6 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan salah satu metode dalam pengolahan air limbah yang memanfaatkan bahan adsorben untuk menyerap dan menghilangkan zat-zat tertentu yang terdapat dalam suatu larutan. Metode ini termasuk dalam teknik yang sederhana, dapat didaur ulang, dan memiliki biaya yang relatif rendah (Perwitasari 2021). Fenomena adsorpsi diharapkan dapat dimanfaatkan secara efektif dalam penghilangan selektif molekul atau ion tertentu dari campuran. Banyak proses telah dikembangkan atau sedang dikembangkan untuk tujuan perlindungan lingkungan. Penerapan teknologi adsorpsi harus diupayakan berkaitan dengan penghilangan unsur dari air limbah dan penjernihan air minum (LeVan 2012).

2.6.1 Mekanisme Adsorpsi

Ketika suatu permukaan padatan bersinggungan dengan fase cair, konsentrasi zat terlarut cenderung lebih tinggi pada permukaan padat dibandingkan dengan di dalam larutan secara keseluruhan. Proses terbentuknya kelebihan konsentrasi pada permukaan ini dikenal sebagai adsorpsi. Adsorpsi berperan dalam mengembalikan keseimbangan gaya antar molekul melalui penyerapan komponen cair oleh permukaan padatan. Zat yang diserap pada permukaan disebut sebagai adsorbat, sedangkan material yang menjadi tempat melekatnya zat tersebut disebut adsorben (Bansal & Goyal, 2005).

Selama proses adsorpsi, zat terlarut diangkut ke dalam butiran adsorben padat berpori melalui difusi dan kemudian diadsorpsi ke permukaan bagian dalam adsorben yang luas (Crittenden et al. 2012). Menurut Cecen dan Aktas (2011) ada 4 tahap mekanisme adsorpsi, yaitu:

1. Transportasi dalam Larutan (*Bulk Solution Transport*)

Tahap awal proses adsorpsi dimulai dari perpindahan molekul adsorbat dari larutan menuju lapisan batas cairan (*liquid film*) yang menyelimuti partikel karbon aktif. Dalam kondisi cairan yang stabil dan karbon aktif berada dalam keadaan tersuspensi, perpindahan ini umumnya terjadi melalui mekanisme difusi.

2. Difusi External (*External Diffusion*)

Pada tahap ini, perpindahan massa adsorbat dari fase cair menuju permukaan luar adsorben mengalami hambatan tambahan yang

disebabkan oleh adanya lapisan film cair (external liquid film) yang mengelilingi partikel adsorben. Perpindahan massa melalui lapisan ini berlangsung melalui difusi molekuler, dengan perbedaan konsentrasi sebagai gaya penggerakannya.

3. Difusi Intrapartikel (*Intraparticle or Internal Diffusion*)

Selanjutnya, adsorbat yang telah mencapai permukaan partikel akan mengalami perpindahan ke dalam struktur pori partikel adsorben. Proses ini sangat bergantung pada ukuran dan struktur pori dari adsorben tersebut. Difusi intrapartikel dapat terjadi melalui dua mekanisme, yaitu difusi pori (pore diffusion), di mana adsorbat berdifusi dalam cairan di dalam pori-pori, dan difusi permukaan (surface diffusion), di mana molekul bergerak sepanjang permukaan dalam partikel setelah teradsorpsi. Difusi permukaan umumnya terjadi jika gaya tarik antara permukaan adsorben dan molekul tidak cukup kuat untuk menahan mobilitas molekul tersebut, dan biasanya ditemukan pada adsorben berpori dengan luas permukaan tinggi serta ukuran pori yang kecil.

4. Proses Adsorpsi (*Adsorption*)

Tahap akhir adalah terjadinya ikatan antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Dalam adsorpsi fisik, pembentukan ikatan berlangsung dengan cepat. Oleh karena itu, tahapan difusi sebelumnya, baik berupa adveksi, difusi eksternal, maupun difusi internal, dapat menjadi faktor pembatas utama yang menentukan laju keseluruhan proses adsorpsi. Namun, apabila adsorpsi melibatkan reaksi kimia yang mengubah struktur molekul adsorbat, maka reaksi tersebut bisa menjadi tahap penentu dalam laju penghilangan zat dari larutan.

Zat terlarut dapat terakumulasi di permukaan padat melalui reaksi kimia (kemisorpsi) atau interaksi fisik (adsorpsi fisik) dengan permukaan tersebut. Berdasarkan jenis interaksi molekuler yang terjadi antara permukaan adsorben dan molekul adsorbat, proses adsorpsi dapat diklasifikasikan menjadi dua tipe utama (Bansal & Goyal 2005).

a. Adsorpsi Fisik

Adsorbat terikat ke permukaan oleh gaya Van der Waals yang relatif lemah identik dengan gaya kohesi molekuler yang terlibat dalam kondensasi uap menjadi cairan. Dalam adsorpsi fisik panas adsorpsi sama dengan panas kondensasi dan biasanya tidak melebihi 10-20 kJ per mol. Adsorpsi fisik tidak memerlukan energi aktivasi sehingga laju adsorpsi sangat tinggi, bahkan pada suhu rendah. Adsorpsi fisik dalam adsorben mikropori mungkin sangat terhambat oleh difusi lambat dari adsorbat ke dalam pori-pori halus dan mungkin memerlukan energi aktivasi. Adsorpsi fisik tidak spesifik dan terjadi antara sistem adsorbat-adsorben manapun. Ketebalan fase teradsorpsi dalam adsorpsi fisik adalah multimolekul.

b. Adsorpsi Kimiawi

Proses ini melibatkan transfer atau pembagian elektron antara molekul adsorbat dan permukaan adsorben, yang mengarah pada terjadinya reaksi kimia. Ikatan yang terbentuk antara adsorbat dan adsorben bersifat ikatan kimia, sehingga lebih kuat dibandingkan dengan ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi fisik. Dalam adsorpsi kimia panas adsorpsi biasanya 40-400 kJ per mol. Adsorpsi kimia membutuhkan energi aktivasi, laju adsorpsi rendah dan tergantung pada suhu adsorpsi. Namun, ketika permukaan adsorben sangat reaktif, seperti dalam kasus permukaan karbon ultraclean, laju adsorpsi kimia bisa sangat tinggi, bahkan pada suhu rendah. Adsorpsi kimia adalah sistem adsorbat-adsorben spesifik. Dan ketebalan fase teradsorpsi dalam adsorpsi kimia adalah monomolekul.

2.6.2 Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi

Beberapa faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi antara lain adalah:

a. Luas Permukaan

Tingkat adsorpsi berbanding lurus dengan luas permukaan spesifik, yaitu bagian permukaan yang tersedia untuk adsorpsi. Adsorben yang lebih halus dan berpori meningkatkan adsorpsi per satuan berat.

Permukaan dapat bersifat eksternal dengan rongga lebih lebar dari dalamnya atau internal dengan pori lebih dalam dari lebarnya (Cecen & Aktas 2011).

b. Jenis Adsorben

Jenis adsorben memengaruhi kapasitas adsorpsi, terutama dalam hal polaritas. Adsorben dengan polaritas tinggi lebih efektif mengadsorpsi adsorbat polar (Yang 2003).

c. Struktur Molekul Adsorbat

Daya adsorpsi meningkat dengan bertambahnya ukuran molekul dan jumlah gugus fungsional, tetapi berkurang jika kelarutan tinggi. Adsorpsi juga dipengaruhi oleh polaritas, ionisasi, posisi gugus substituen, serta struktur molekul, di mana senyawa aromatik dan rantai bercabang lebih mudah diadsorpsi. (Cecen & Aktas 2011).

Tabel 2. 10 Pengaruh Grup Substituen pada Kapasitas Adsorpsi

Grup Substituen	Pengaruh
Hidroksil	Umumnya mengurangi daya adsorpsi
Amino	Umumnya mengurangi daya adsorpsi
Karbonil	Efek bervariasi tergantung pada molekul induk
Ikatan rangkap	Efek bervariasi tergantung pada molekul induk
Halogen	Efek bervariasi tergantung pada molekul induk
Sulfonat	Umumnya mengurangi daya adsorpsi
Nitro	Umumnya meningkatkan daya adsorpsi

d. Konsentrasi Adsorbat

Seiring dengan peningkatan konsentrasi awal adsorbat, kapasitas adsorpsi total meningkat karena lebih banyak molekul adsorbat yang berikatan dengan permukaan adsorben. Namun, persentase penghilangan (% removal) justru menurun karena jumlah situs aktif pada adsorben terbatas, sehingga tidak semua adsorbat dapat teradsorpsi secara efisien pada konsentrasi tinggi. Akibatnya, meskipun total adsorbat yang terikat lebih banyak, efisiensi penghilangan relatif berkurang dibandingkan dengan konsentrasi yang lebih rendah (Vasu et al. 2023).

e. Dosis Adsorben

Kapasitas adsorpsi dihitung sebagai massa adsorbat yang terhapus per massa adsorben. Laju adsorpsi meningkat seiring dengan peningkatan dosis adsorben, karena lebih banyaknya situs sorpsi pada permukaan adsorben (Vasu et al. 2023).

f. Temperatur

Proses pemanasan dapat meningkatkan daya serap adsorben dengan membuka pori-pori adsorben lebih luas. Namun, pemanasan yang berlebihan dapat merusak adsorben dan mengurangi kinerjanya, serta mempengaruhi pH larutan (Ruthven 1984). Suhu memengaruhi proses adsorpsi berdasarkan sifat ikatan yang terbentuk antara situs adsorbat dan adsorben serta kelarutan adsorbat dalam media. Pada suhu rendah, adsorpsi akibat ikatan kuat dan lemah meningkat, sedangkan pada suhu tinggi, adsorpsi akibat ikatan kuat meningkat, tetapi menurun untuk gaya ikatan lemah (Li et al. 2012).

g. pH

Parameter pH sangat penting karena mengontrol tingkat muatan elektrostatik dari adsorbat yang terionisasi. Akibatnya, laju adsorpsi bervariasi dengan pH medium tanpa pola tertentu. Pada pH rendah, kapasitas adsorpsi untuk molekul anionik umumnya meningkat, sedangkan untuk molekul kationik cenderung menurun (Alongamo et al. 2021).

h. Kecepatan Pengadukan

Kecepatan pengadukan berpengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi, di mana peningkatan kecepatan hingga tingkat optimal dapat meningkatkan perpindahan ion sorbat ke permukaan sorben melalui interaksi yang lebih efektif. Namun, jika kecepatan terlalu tinggi, turbulensi yang berlebihan dapat mengganggu interaksi Van der Waals antara sorben dan ion logam, sehingga menurunkan efisiensi adsorpsi. Dengan demikian, pengaturan kecepatan pengadukan yang tepat sangat penting untuk memaksimalkan proses adsorpsi (Vasu et al. 2023).

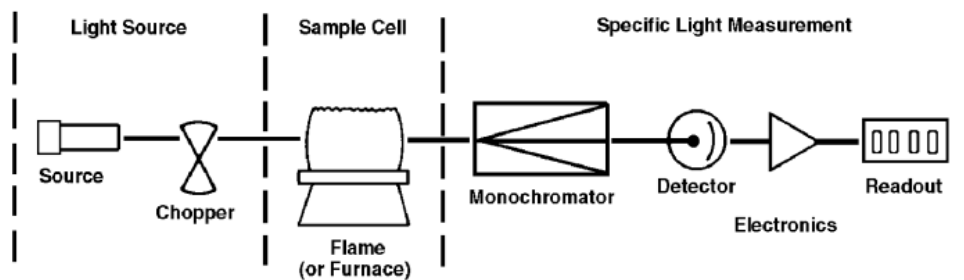
i. Waktu Kontak

Waktu kontak adsorpsi menentukan kapan kesetimbangan tercapai, yaitu saat jumlah adsorbat yang menempel pada adsorben tidak lagi bertambah. Setelah titik ini, peningkatan waktu kontak tidak meningkatkan adsorpsi karena semua situs aktif sudah jenuh atau terjadi keseimbangan antara adsorpsi dan desorpsi (Vasu et al. 2023).

2.7 Spektrofotometer Serapan Atom

Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) merupakan teknik yang digunakan untuk mengukur konsentrasi unsur kimia dalam sampel lingkungan dengan mengamati radiasi yang diserap oleh unsur tersebut. Proses ini dilakukan dengan menganalisis spektrum yang dihasilkan ketika sampel tereksitasi oleh radiasi. Metode ini mengukur jumlah energi dalam bentuk foton cahaya yang diserap oleh sampel.

Detektor mengukur panjang gelombang cahaya yang ditransmisikan melalui sampel dan membandingkannya dengan panjang gelombang yang sebelumnya melewati sampel. Pemroses sinyal kemudian mengintegrasikan perubahan panjang gelombang yang diserap, yang muncul dalam pembacaan sebagai puncak penyerapan energi pada panjang gelombang tertentu. Setiap atom memiliki pola panjang gelombang yang berbeda dalam menyerap energi, tergantung pada konfigurasi elektron unik di kulit terluarnya. Hal ini memungkinkan dilakukan analisis kualitatif terhadap sampel.



Gambar 2. 4 Komponen Dasar Spektrofotometer Serapan Atom

Sumber: Beaty & Kerber, 1993

Konsentrasi dihitung berdasarkan prinsip hukum Beer-Lambert, yang menyatakan bahwa absorbansi memiliki hubungan langsung dengan konsentrasi analit yang diserap dalam kondisi tertentu. Penentuan konsentrasi umumnya dilakukan dengan menggunakan kurva kalibrasi yang diperoleh dari standar dengan konsentrasi yang sudah diketahui. Dalam bidang kimia analitik, SSA merupakan teknik yang paling umum digunakan untuk mengukur konsentrasi unsur logam tertentu dalam sampel. Teknik ini dapat digunakan untuk menganalisis lebih dari 62 jenis unsur logam yang berbeda dalam larutan. SSA tetap menjadi instrumen penting karena penerapannya yang luas dan sederhana untuk analisis logam (Garcia & Baez 2011).

Menurut Levinson Spektrometri serapan atom memiliki banyak kegunaan dalam berbagai bidang kimia:

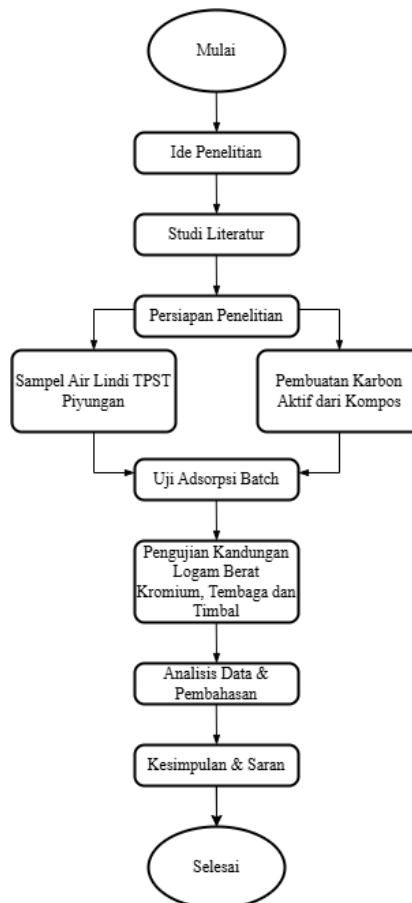
- a. Analisis klinis. Digunakan untuk menganalisis logam dalam cairan biologis seperti darah dan urin.
- b. Analisa lingkungan. Memantau kualitas lingkungan, misalnya mengukur kadar berbagai unsur dalam air sungai, air laut, air minum, udara, serta dalam bensin dan minuman seperti anggur, bir, dan minuman buah.
- c. Farmasi. Dalam beberapa proses manufaktur farmasi, SSA digunakan untuk menentukan jumlah katalis (biasanya logam) yang mungkin ada dalam produk akhir.
- d. Industri. SSA digunakan secara luas untuk memeriksa bahan mentah dan memastikan kadar unsur utama serta kandungan pengotor beracun, seperti pada beton yang mengandung kalsium sebagai unsur utama, di mana kadar timbal harus dijaga agar tetap rendah karena sifatnya yang beracun.
- e. Pertambangan. SSA digunakan untuk menentukan jumlah logam, seperti emas, dalam batuan, untuk menilai kelayakan batuan tersebut dalam proses ekstraksi emas.

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian laboratorium (eksperimen laboratorium), yang dilakukan melalui percobaan dalam waktu terbatas untuk menguji kandungan Cr, Cu, dan Pb. Objek penelitian ini adalah Cr dan Cu yang berasal dari Tempat Pemrosesan Sampah Terpadu Piyungan Yogyakarta. Metode penelitian yang digunakan terdiri dari dua tahap, yaitu pengumpulan data dan pengolahan data. Data dikumpulkan melalui pengujian laboratorium menggunakan alat Spektrofotometer Serapan Atom sesuai dengan SNI 6989.17: 2009.

3.1 Kerangka Penelitian



Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian

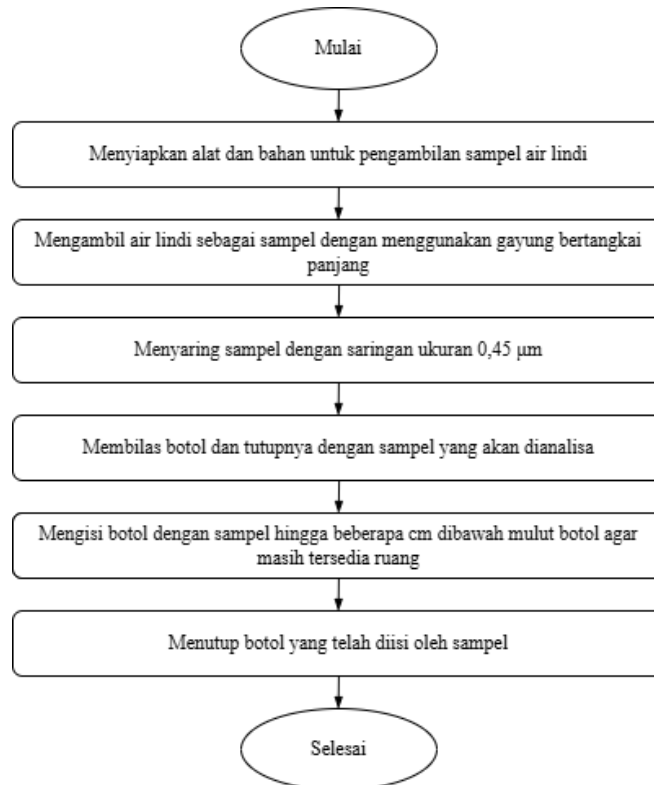
Penelitian ini dilakukan selama enam bulan, mencakup tahap persiapan, pengambilan sampel air lindi di TPA Piyungan, pembuatan *Compost Based Activated Carbon* (CBAC), pengujian sampel di laboratorium, pengolahan data, dan penyusunan laporan akhir. Penelitian ini dilaksanakan di beberapa lokasi, yaitu:

- Pengambilan sampel air lindi dilakukan di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Piyungan yang terletak di Dusun Ngablak, Desa Sitimulyo, Kecamatan Piyungan, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta.
- Uji dan analisis sampel air lindi dilakukan di Laboratorium Kualitas Air, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

3.2 Persiapan Penelitian

3.2.1 Pengambilan Sampel

Proses pengambilan dan pengawetan sampel mengacu pada SNI 6989.59:2008. Proses pengambilan sampel menggunakan metode *grab sampling*. Proses sampling dilakukan pada unit inlet di Instalasi Pengolahan Air Lindi TPA Piyungan.



Gambar 3. 2 Diagram Alir Pengambilan Sampel

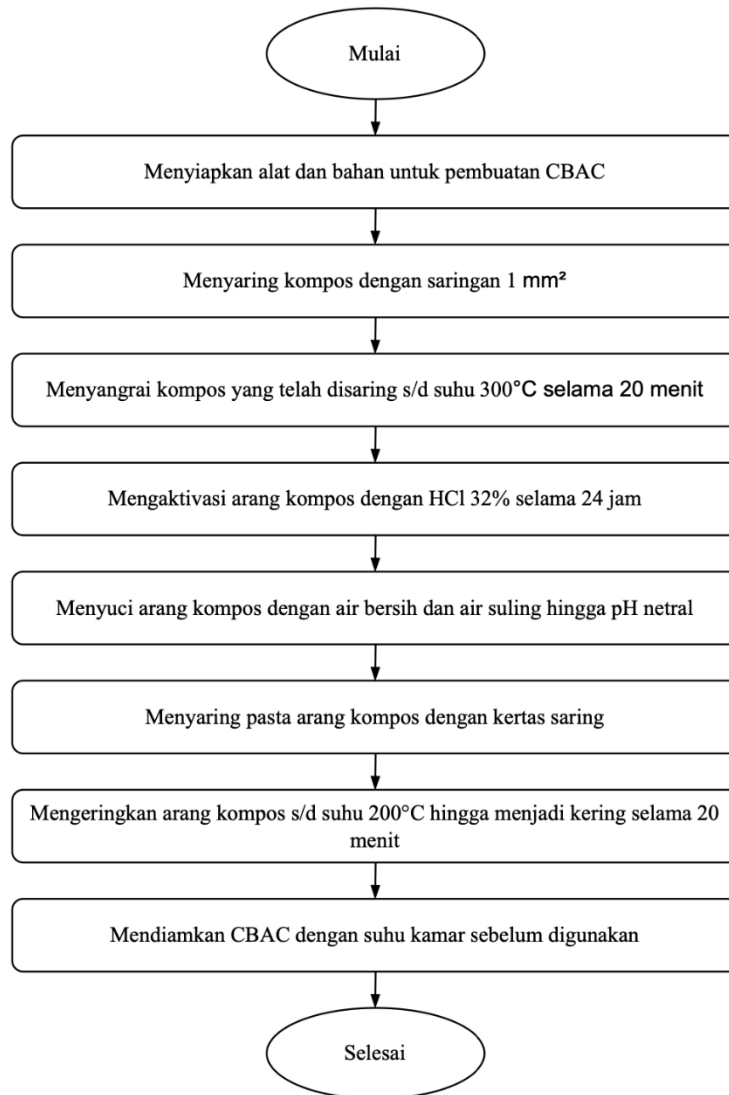
Dalam penelitian ini, berbagai alat dan bahan digunakan untuk mendukung proses pengambilan sampel air lindi di TPA Piyungan.

Tabel 3. 1 Alat dan Bahan untuk Pengambilan Sampel

Alat	Corong
	Gayung tangkai panjang
	Wadah sampel
	Indikator pH
Bahan	Air lindi TPA Piyungan

3.2.2 Pembuatan CBAC

Pembuatan CBAC menggunakan metode CCC (*char, chemical, cook*) (Liang, 2003). Kompos yang menjadi bahan utama pembuatan CBAC ini merupakan kompos organik diperoleh dari TPS 3R. Kompos organik dari TPS 3R ini dibuat dari limbah sisa makanan dan pekarangan (dedaunan, ranting, dll) yang memiliki kandungan C/N yang baik untuk diaktifkan dan menghasilkan karbon aktif (Iresha et al. 2016). Pembuatan CBAC menggunakan kompos yang telah disaring dan di sangrai, setelah itu diaktivasi menggunakan proses aktivasi kimia. Kompos dicampur dengan larutan HCl sebagai aktivator, penggunaan HCl, sebagai zat aktivator kimia, bersifat higroskopis dan dapat mengurangi kadar air pada arang aktif yang dihasilkan. Arang aktif yang diaktivasi dengan HCl memiliki daya serap iodin yang lebih tinggi karena HCl lebih efektif dalam melarutkan pengotor, sehingga pori-pori terbentuk lebih banyak dan proses penyerapan adsorbat menjadi lebih optimal (Alfiany, Bahri & Nurakhirawati, 2013). Setelah itu, dikeringkan dengan menggunakan oven selama 20 menit.



Gambar 3. 3 Diagram Alir Pembuatan CBAC

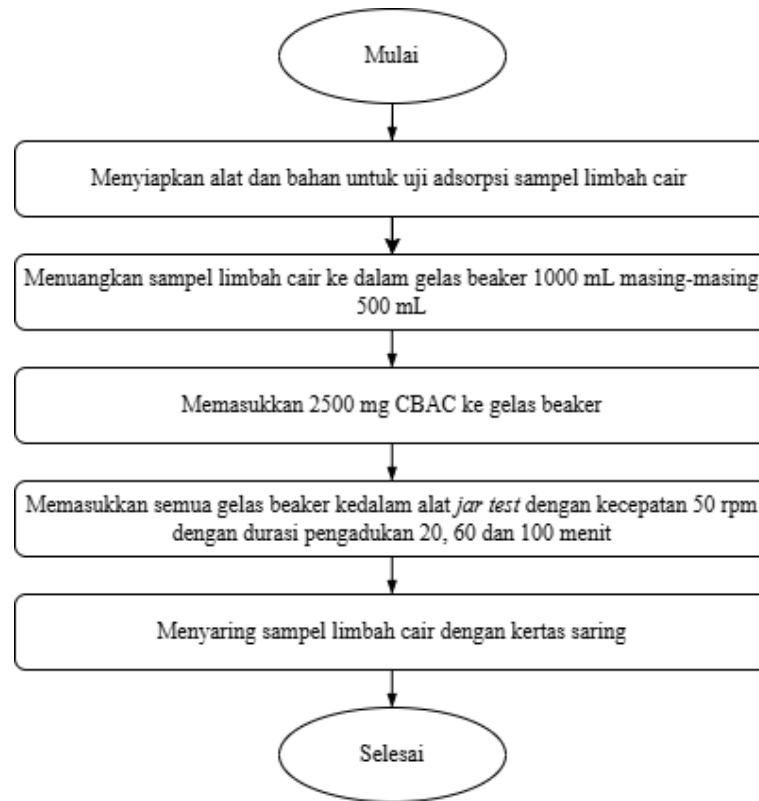
Dalam penelitian ini, berbagai alat dan bahan digunakan untuk mendukung proses pembuatan CBAC.

Tabel 3. 2 Alat dan Bahan untuk Pembuatan CBAC

Alat	1 Kertas saring
	Kompur
	Saringan
	Spatula
Bahan	HCl 32%
	Air keran
	Aquades
	Kompos Organik

3.3 Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan proses adsorpsi dengan model *batch*, dengan memasukkan CBAC ke dalam sampel air lindi, lalu diaduk dengan menggunakan *jar test* dengan kecepatan 50 rpm dalam waktu 100 menit. Setelah itu menghitung absorbansi dengan menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom.



Gambar 3. 4 Diagram Alir Uji Adsorpsi

Dalam penelitian ini, berbagai alat dan bahan digunakan untuk mendukung proses uji adsorpsi.

Tabel 3. 3 Alat dan Bahan untuk Uji Adsorpsi

Alat	Corong kaca
	Gelas beaker
	Erlenmeyer
	Kertas saring
	Spatula
	Jar test
	Neraca analitik
Bahan	Aquades
	CBAC
	Sampel Air Lindi
Instrumen	Spektrofotometer Serapan Atom

3.4 Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis untuk menarik kesimpulan mengenai fenomena yang terjadi, sehingga dapat menjawab tujuan penelitian yang dilakukan. Dari hasil uji adsorpsi, perhitungan dilakukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$Q = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100\%$$

Keterangan:

Q = Removal (%)

C_o = Konsentrasi Awal Larutan (mg/L)

C_e = Konsentrasi Akhir Larutan (mg/L)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kandungan Logam Berat pada Air Lindi TPA Piyungan

Air lindi yang dihasilkan dari tempat pemrosesan akhir (TPA) sampah mengandung berbagai jenis kontaminan, termasuk logam berat yang dapat berdampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan jika tidak dikelola dengan baik. Logam berat seperti kromium (Cr), tembaga (Cu), dan timbal (Pb) sering kali terdeteksi dalam air lindi akibat proses pelarutan bahan-bahan anorganik yang terdapat di dalam sampah. Pada subbab ini, akan dibahas kandungan logam berat pada air lindi dari TPA yang menjadi objek penelitian. Analisis ini bertujuan untuk memahami tingkat konsentrasi logam berat dalam air lindi dan potensi dampaknya terhadap kualitas lingkungan, sekaligus menjadi dasar dalam mengevaluasi efektivitas metode pengolahan yang diterapkan.



Gambar 4. 1 Sampel Air Lindi TPA Piyungan

Berikut kandungan logam berat pada air lindi TPA Piyungan yang dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Kandungan Logam Berat dan Baku Mutu Air Lindi

Parameter	Konsentrasi	Baku Mutu		Satuan
		Permen LH No. 5 Tahun 2014	PP No. 22 Tahun 2021	
Kromium	0.3090	1	0.05	mg/L
Tembaga	0.0210	3	0.02	mg/L
Timbal	0.1762	1	0.03	mg/L

Berdasarkan Permen LH No. 5 Tahun 2014, air lindi TPA Piyungan dapat dianggap aman untuk dilepaskan ke lingkungan. Namun, peraturan ini lebih berfokus pada pembuangan air limbah, bukan pada penggunaannya kembali oleh manusia atau lingkungan. Namun, jika mengacu pada **PP No. 22 Tahun 2021** untuk air kelas 2 atau kelas 3, konsentrasi logam berat ini **tidak memenuhi standar baku mutu**. Artinya, air lindi ini:

- a. Tidak aman untuk kegiatan manusia dan pemanfaatan lingkungan seperti budi daya ikan air tawar, rekreasi air, atau pengairan tanaman.
- b. Berpotensi mencemari sumber daya air yang lebih luas, karena kandungan logam berat dapat terakumulasi di lingkungan dan membahayakan ekosistem serta kesehatan manusia dalam jangka panjang.

Kandungan logam berat yang melebihi standar PP No. 22 Tahun 2021 menunjukkan bahwa air lindi TPA Piyungan dapat memberikan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia jika tidak diolah dengan benar. Dampak ini meliputi:

- a. Ekosistem Perairan: Logam berat seperti Pb dan Cr dapat mengendap di dasar perairan dan mengakibatkan toksisitas bagi organisme akuatik.
- b. Kesehatan Manusia: Logam berat dapat terakumulasi dalam rantai makanan dan akhirnya memengaruhi kesehatan manusia melalui konsumsi ikan, tanaman, atau air yang terkontaminasi.

Air lindi TPA Piyungan memerlukan pengolahan lebih lanjut agar memenuhi baku mutu untuk kelas 2 atau 3 sesuai PP No. 22 Tahun 2021. Hal ini penting untuk melindungi kualitas air permukaan dan tanah dari kontaminasi logam berat,

meningkatkan keamanan lingkungan bagi manusia dan organisme lainnya, mendukung upaya pemanfaatan air lindi yang lebih aman dan berkelanjutan.

Pemenuhan standar Permen LH No. 5 Tahun 2014 tidak cukup untuk memastikan keamanan air lindi TPA Piyungan bagi lingkungan dan manusia. Untuk melindungi ekosistem air, kesehatan manusia, dan memenuhi standar PP No. 22 Tahun 2021, pengolahan lanjutan menggunakan metode seperti adsorpsi CBAC menjadi sangat mendesak. Hal ini penting untuk memastikan air lindi yang dihasilkan tidak hanya aman untuk dilepas ke lingkungan tetapi juga memenuhi kualitas yang dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan.

4.2 Uji Adsorpsi

4.2.1 Logam Kromium

Pada bagian ini membahas uji adsorpsi batch yang dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi penyisihan logam kromium (Cr) dari air lindi menggunakan adsorben CBAC. Data percobaan mencakup konsentrasi awal dan konsentrasi akhir kromium dalam larutan, serta penghitungan persentase efisiensi penyisihan pada berbagai durasi kontak.

Tabel 4. 2 Data Percobaan Uji Adsorpsi Logam Kromium (Cr)

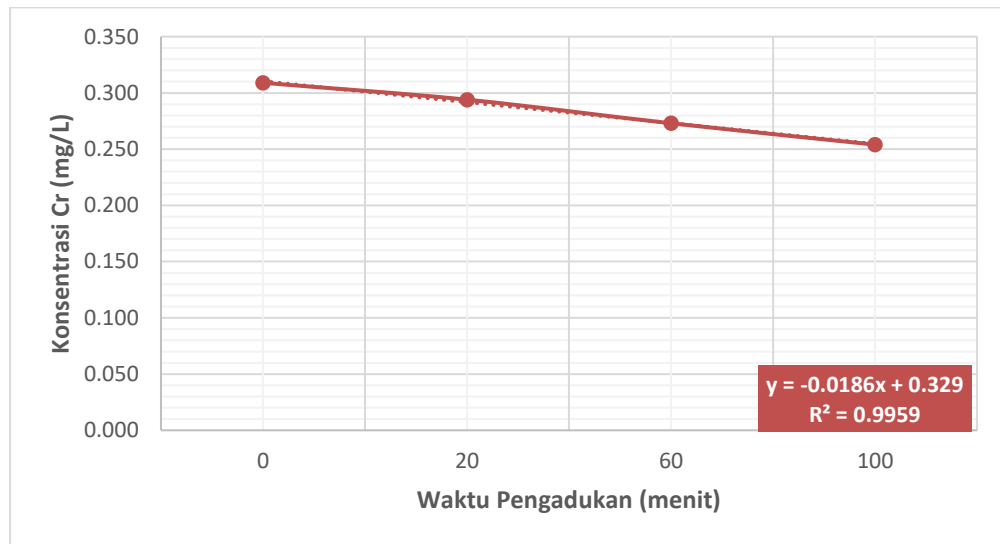
No	Waktu	Dosis CBAC	Volume Air Lindi	Konsentrasi Cr
	(menit)	(mg)	(mL)	(mg/L)
1	0	0	500	0.3090
2	20	2500	500	0.2940
3	60	2500	500	0.2730
4	100	2500	500	0.2540

Berdasarkan hasil pengujian, efisiensi penyisihan kromium menunjukkan peningkatan seiring waktu, yaitu sebesar 4,85% pada menit ke-20, meningkat menjadi 11,65% pada menit ke-60, dan mencapai 17,80% pada menit ke-100.

Tabel 4. 3 Efisiensi Penyisihan Uji Adsorpsi Logam Kromium (Cr)

No	Waktu (menit)	Dosis CBAC (mg/L)	Konsentrasi Cr (mg/L)		Efisiensi Penyisihan (%)
			Awal	Akhir	
1	0	2500	0.309	0.309	0.00
2	20	2500	0.309	0.294	4.85
3	60	2500	0.309	0.273	11.65
4	100	2500	0.309	0.254	17.80

Analisis grafik dan data ini memberikan gambaran mengenai hubungan antara durasi kontak, efisiensi penyisihan, dan kapasitas adsorpsi CBAC.

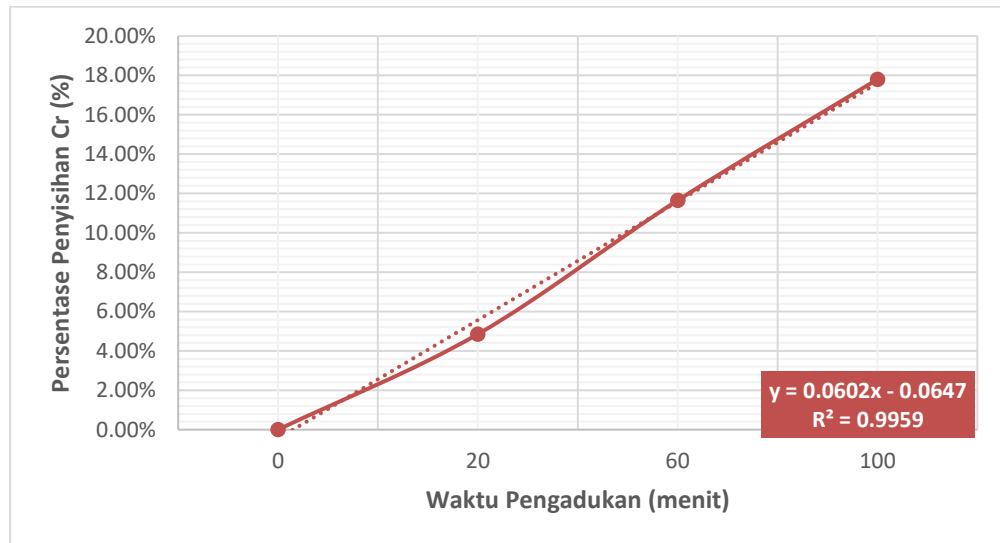


Gambar 4. 2 Grafik Pengaruh Waktu Pengadukan dengan Konsentrasi Cr

Hubungan antara waktu pengadukan dan konsentrasi logam kromium (Cr) dalam larutan digambarkan secara linear, dengan sumbu y mewakili konsentrasi Cr dalam mg/L dan sumbu x mewakili waktu pengadukan dalam menit. Selama 100 menit pengadukan, konsentrasi Cr menurun secara bertahap dari 0,3090 mg/L menjadi 0,254 mg/L, dengan total penurunan sebesar 0,055 mg/L.

Persamaan regresi yang dihasilkan, yaitu $y = -0.0186x + 0.329$, menunjukkan bahwa koefisien $-0,0186$ merepresentasikan laju penurunan konsentrasi Cr yang stabil dan signifikan seiring waktu pengadukan. Nilai $R^2 = 0.9959$ menunjukkan korelasi linear yang sangat kuat antara waktu pengadukan dan penurunan konsentrasi Cr, mengindikasikan bahwa model regresi ini akurat dalam menjelaskan hubungan tersebut.

Penurunan konsentrasi Cr selama pengadukan menunjukkan bahwa karbon aktif berbasis kompos (CBAC) secara bertahap mengadsorpsi Cr dari larutan. Meskipun efisiensi penyisihan masih tergolong moderat, hasil ini menunjukkan potensi CBAC dalam mengurangi kadar Cr secara efektif dalam kondisi eksperimental ini.



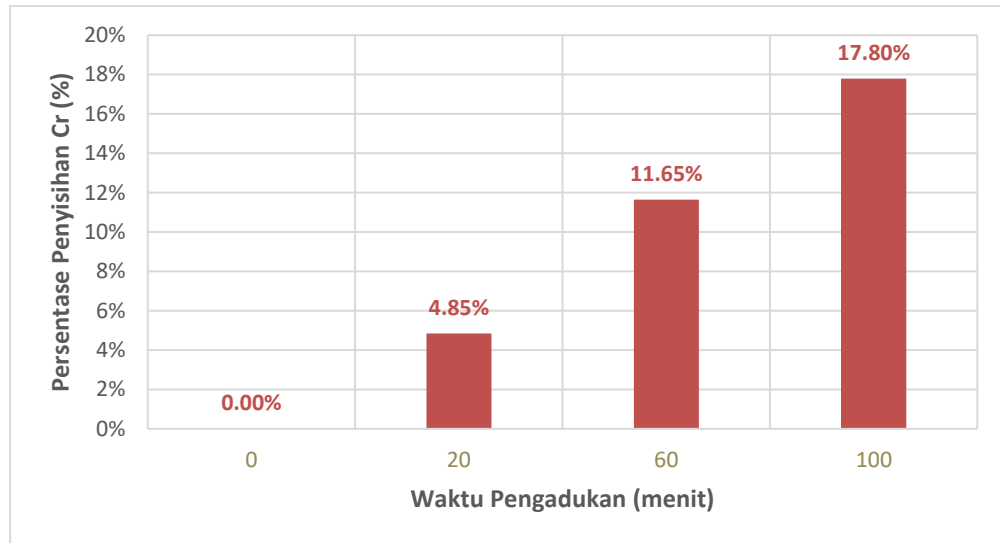
Gambar 4. 3 Grafik Pengaruh Waktu Pengadukan dengan Efisiensi Penyisihan Cr

Hubungan antara waktu pengadukan dan persentase penyisihan kromium (Cr) ditampilkan secara linear, dengan sumbu y merepresentasikan persentase penyisihan Cr dan sumbu x menunjukkan waktu pengadukan dalam menit.

Persentase penyisihan Cr meningkat secara bertahap dari 0% pada waktu 0 menit menjadi 17,80% setelah 100 menit pengadukan.

Persamaan regresi $y = 0.0602x - 0.0647$ menunjukkan bahwa koefisien 0,0602 merepresentasikan peningkatan efisiensi penyisihan Cr yang signifikan seiring bertambahnya waktu pengadukan. Nilai $R^2 = 0.9959$ menunjukkan hubungan linear yang sangat kuat antara waktu pengadukan dan persentase penyisihan Cr, sehingga model regresi ini sangat akurat dalam menggambarkan pola penyisihan.

Hasil ini mengindikasikan bahwa karbon aktif berbasis kompos (CBAC) memiliki kemampuan yang konsisten dan efisien dalam menyerap Cr selama proses pengadukan berlangsung. Waktu kontak yang lebih lama memungkinkan Cr untuk lebih banyak teradsorpsi pada permukaan CBAC, memperkuat potensi adsorben ini dalam mengurangi kandungan Cr dalam larutan.



Gambar 4. 4 Diagram Batang Efisiensi Penyisihan Cr per Selang Waktu 40 Menit

Grafik menunjukkan peningkatan linear pada persentase penyisihan kromium (Cr) seiring bertambahnya waktu pengadukan, dengan efisiensi maksimum mencapai 17,80% pada menit ke-100. Pola ini menandakan bahwa waktu pengadukan yang lebih lama memberikan peluang lebih besar bagi karbon aktif berbasis kompos (CBAC) untuk berinteraksi dengan Cr dalam larutan, sehingga meningkatkan jumlah Cr yang teradsorpsi. Tidak ada indikasi desorpsi atau saturasi adsorben dalam durasi 100 menit, yang menunjukkan proses adsorpsi berjalan stabil.

Stabilitas adsorpsi ini mencerminkan afinitas yang cukup tinggi antara permukaan CBAC dan Cr. Nilai R^2 yang tinggi menunjukkan hubungan linear yang sangat signifikan antara waktu pengadukan dan efisiensi penyisihan Cr, mengindikasikan konsistensi kinerja CBAC dalam menyerap logam berat ini. Meski demikian, efisiensi penyisihan sebesar 17,80% mengungkapkan bahwa kinerja CBAC masih tergolong rendah jika dibandingkan dengan karbon aktif komersial.

Sebagai alternatif, CBAC memiliki potensi yang baik sebagai adsorben untuk mengurangi kandungan Cr pada air lindi Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Piyungan. Dengan peningkatan efisiensi yang konsisten terhadap waktu kontak.

4.2.2 Logam Tembaga

Pada bagian ini membahas uji adsorpsi batch yang dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi penyisihan logam kromium (Cr) dari air lindi menggunakan adsorben CBAC. Data percobaan mencakup konsentrasi awal dan konsentrasi akhir kromium dalam larutan, serta penghitungan persentase efisiensi penyisihan pada berbagai durasi kontak.

Tabel 4. 4 Data Percobaan Uji Adsorpsi Logam Tembaga (Cu)

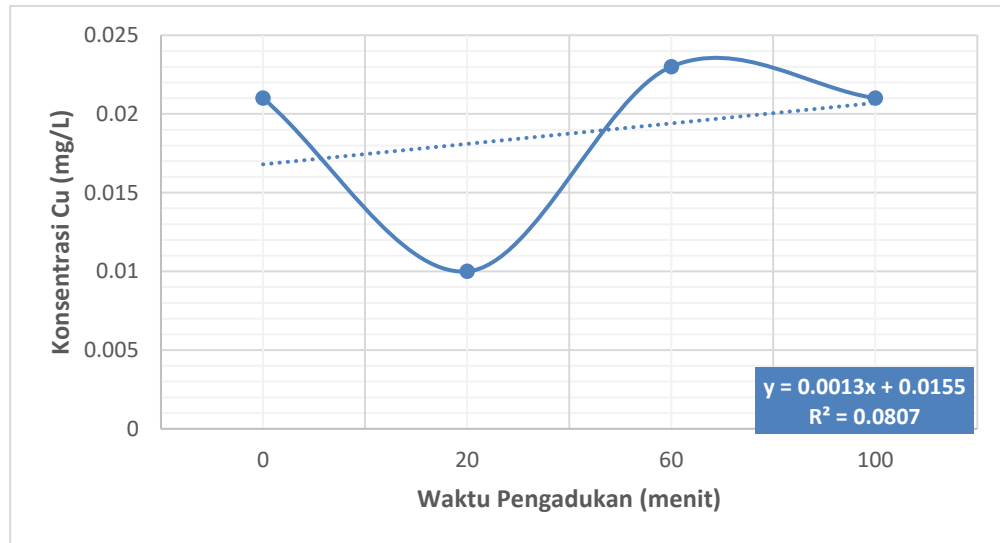
No	Waktu	Dosis CBAC	Volume Air Lindi	Konsentrasi Cu
	(menit)	(mg)	(mL)	(mg/L)
1	0	0	500	0.021
2	20	2500	500	0.010
3	60	2500	500	0.023
4	100	2500	500	0.021

Hasil pengujian menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan Cu mencapai 52.38% pada menit ke-20, tetapi menurun drastis pada menit ke-60 (-9.52%) dan akhirnya menjadi 0% pada menit ke-100.

Tabel 4. 5 Efisiensi Penyisihan Uji Adsorpsi Logam Tembaga (Cu)

No	Waktu	Dosis CBAC	Konsentrasi Cu (mg/L)		Efisiensi Penyisihan
	(menit)	(mg/L)	Awal	Akhir	(%)
1	0	2500	0.021	0.021	0.00
2	20	2500	0.021	0.010	52.38
3	60	2500	0.021	0.023	-9.52
4	100	2500	0.021	0.021	0.00

Analisis grafik dan data ini memberikan gambaran mengenai hubungan antara durasi kontak, efisiensi penyisihan, dan kapasitas adsorpsi CBAC.

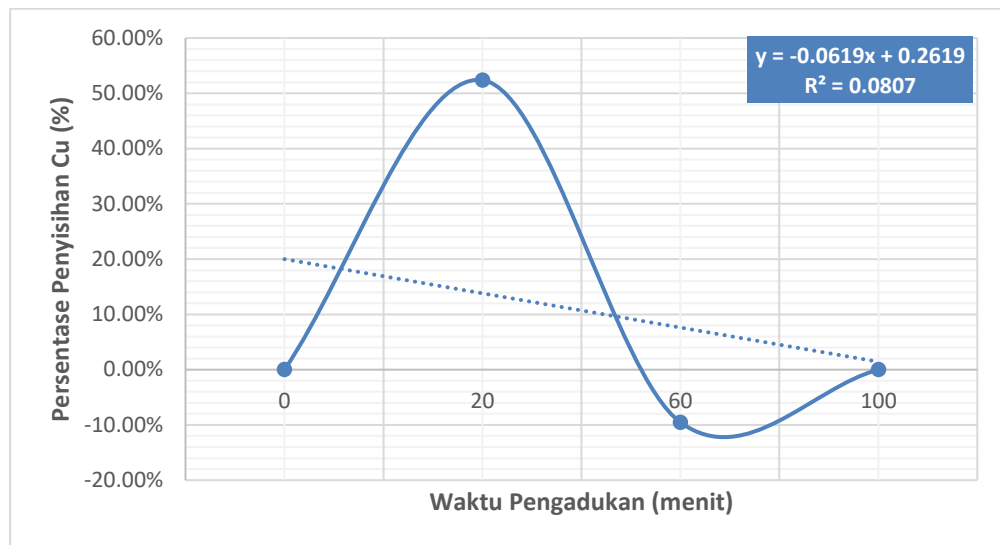


Gambar 4. 5 Grafik Pengaruh Waktu Pengadukan terhadap Konsentrasi Cu

Pada grafik, sumbu y menunjukkan konsentrasi logam tembaga (Cu) dalam satuan mg/L, sedangkan sumbu x menunjukkan waktu pengadukan dalam menit. Grafik ini menggambarkan fluktuasi konsentrasi Cu selama proses pengadukan. Pada menit ke-20, konsentrasi Cu menurun signifikan dari 0.021 mg/L menjadi 0.010 mg/L, menunjukkan bahwa CBAC berhasil mengadsorpsi Cu secara efektif pada tahap awal. Namun, kenaikan konsentrasi Cu setelah menit ke-20 (hingga menit ke-60) mengindikasikan desorpsi atau pelepasan kembali Cu ke dalam larutan. Konsentrasi Cu yang cenderung stabil pada menit ke-100 mengindikasikan bahwa proses adsorpsi mencapai kesetimbangan, tetapi efisiensinya rendah.

Persamaan regresi linier $y = 0.0013x + 0.0155$ dengan koefisien 0.0013 menunjukkan bahwa terdapat peningkatan konsentrasi Cu yang sangat kecil seiring waktu pengadukan. Nilai R^2 sebesar 0.0807 menunjukkan bahwa hubungan antara waktu pengadukan dan konsentrasi Cu sangat lemah, sehingga waktu pengadukan memiliki pengaruh yang rendah terhadap perubahan konsentrasi Cu.

Peningkatan konsentrasi Cu setelah waktu tertentu dapat disebabkan oleh proses desorpsi, yaitu pelepasan Cu yang sebelumnya terserap oleh karbon aktif kembali ke dalam larutan. Hal ini mengindikasikan bahwa kemampuan karbon aktif untuk menahan Cu tidak sepenuhnya stabil dalam durasi waktu yang lebih lama.

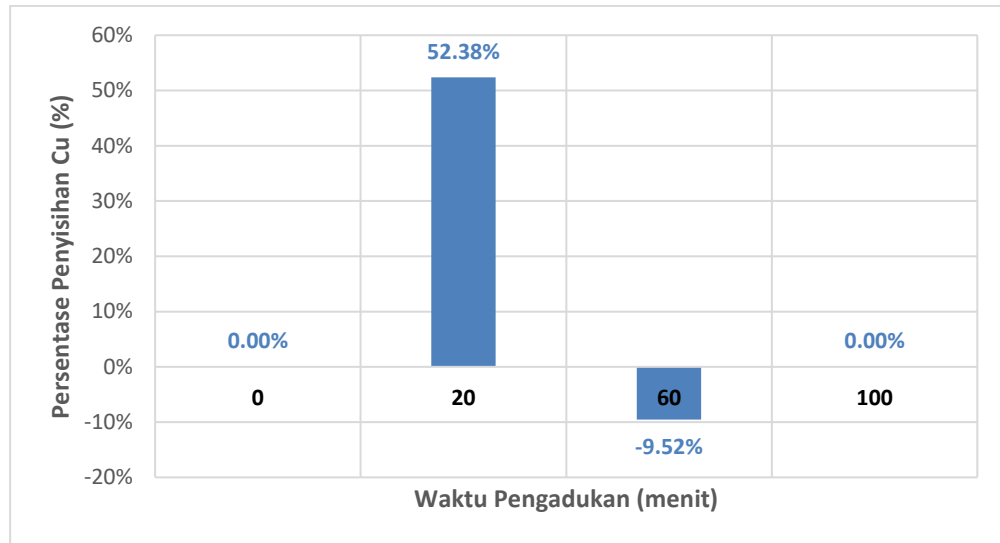


Gambar 4. 6 Grafik Pengaruh Waktu Pengadukan terhadap Efisiensi Penyisihan Cu

Pada grafik, sumbu y menunjukkan persentase penyisihan logam tembaga (Cu), sedangkan sumbu x menunjukkan waktu pengadukan dalam menit. Grafik ini memperlihatkan pola fluktuasi yang drastis. Persentase penyisihan Cu mencapai nilai maksimum pada menit ke-20 dengan efisiensi sekitar 52.38%. Namun, setelah itu, terjadi penurunan drastis hingga mencapai nilai negatif (-9.52%) pada menit ke-60, sebelum mendekati 0% pada menit ke-100.

Persamaan regresi linier $y = -0.0619x + 0.2619$ dengan koefisien -0.0619 menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan Cu cenderung menurun seiring bertambahnya waktu pengadukan. Nilai R^2 sebesar 0.0807 mengindikasikan hubungan linier yang sangat lemah antara waktu pengadukan dan persentase penyisihan Cu.

Tren ini menunjukkan bahwa waktu pengadukan yang lebih lama justru cenderung menurunkan efisiensi penyisihan Cu. Hal ini menunjukkan bahwa CBAC memiliki keterbatasan dalam mempertahankan Cu pada durasi pengadukan yang lebih panjang.



Gambar 4. 7 Diagram Batang Efisiensi Penyisihan Cu per Selang Waktu 40 menit

Grafik menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan Cu mencapai puncaknya pada menit ke-20 dengan 52,38%, namun kemudian turun drastis menjadi negatif (-9,52%) pada menit ke-60, yang mengindikasikan desorpsi signifikan, di mana jumlah Cu yang terlepas lebih banyak dari yang teradsorpsi. Pada menit ke-100, persentase penyisihan mendekati 0%, menunjukkan bahwa CBAC tidak dapat mempertahankan efektivitas adsorpsinya dalam jangka waktu panjang.

Meskipun CBAC menunjukkan potensi adsorpsi yang baik pada awalnya, desorpsi yang terjadi kemudian mengurangi efektivitas keseluruhan. Penurunan konsentrasi Cu pada menit ke-20 mengindikasikan adsorpsi yang efektif di awal, tetapi peningkatan konsentrasi selanjutnya disebabkan oleh desorpsi Cu, yang menunjukkan bahwa karbon aktif tidak mampu menahan ion tersebut dalam durasi lebih lama. Fluktuasi efisiensi dan konsentrasi ini, bersama dengan nilai R^2 yang rendah, menunjukkan bahwa hubungan antara waktu pengadukan dan penyisihan Cu tidak linier, melainkan dipengaruhi oleh faktor-faktor non-linear seperti desorpsi atau kapasitas maksimum adsorpsi karbon aktif.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa kinerjanya tidak konsisten, dengan fluktuasi efisiensi yang dipengaruhi oleh desorpsi, kompetisi antar ion logam, dan keterbatasan sifat fisik dan kimia CBAC.

4.2.3 Logam Timbal

Pada bagian ini membahas uji adsorpsi batch yang dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi penyisihan logam kromium (Cr) dari air lindi menggunakan adsorben CBAC. Data percobaan mencakup konsentrasi awal dan konsentrasi akhir kromium dalam larutan, serta penghitungan persentase efisiensi penyisihan pada berbagai durasi kontak.

Tabel 4. 6 Data Percobaan Uji Adsorpsi Logam Timbal (Pb)

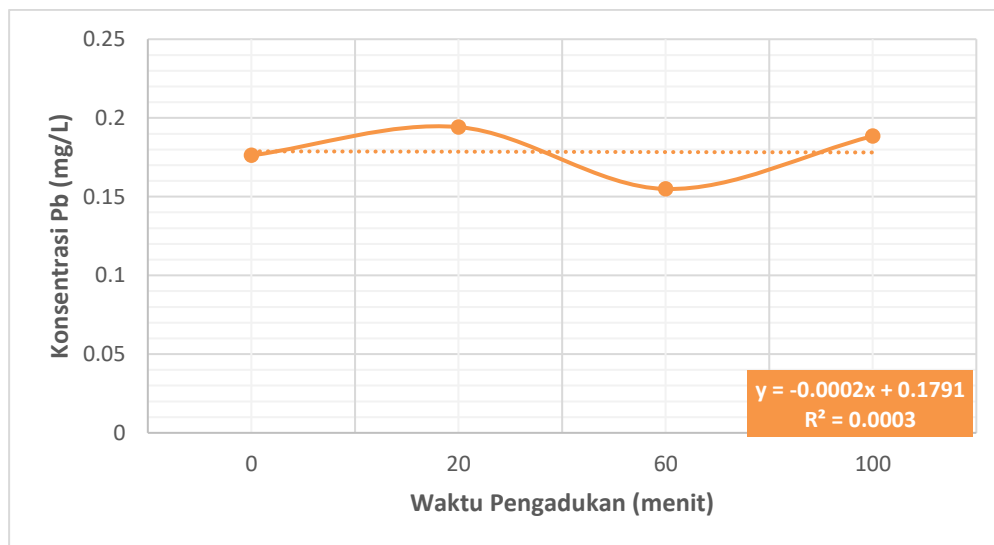
No	Waktu (menit)	Dosis CBAC (mg)	Volume Air Lindi (mL)	Konsentrasi Pb (mg/L)
1	0	0	500	0.1762
2	20	2500	500	0.1942
3	60	2500	500	0.1549
4	100	2500	500	0.1885

Hasil pengujian menunjukkan pola efisiensi adsorpsi yang fluktuatif. Pada menit ke-20, terjadi penurunan efisiensi penyisihan sebesar -10.22%. Efisiensi kemudian meningkat signifikan hingga mencapai 12.09% pada menit ke-60. Namun, pada menit ke-100, efisiensi kembali menurun menjadi 6.98%.

Tabel 4. 7 Efisiensi Penyisihan Uji Adsorpsi Logam Timbal (Pb)

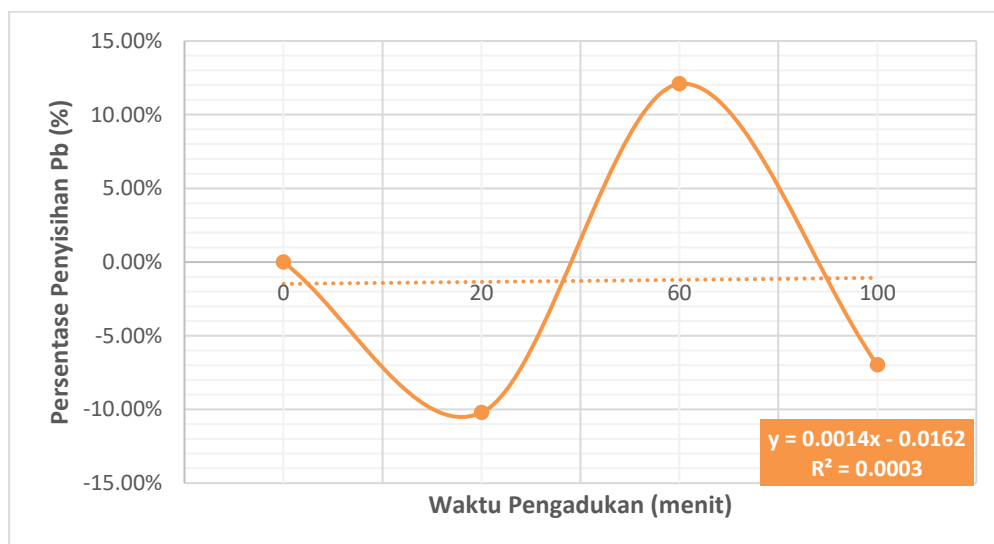
No	Waktu (menit)	Dosis CBAC (mg/L)	Konsentrasi Pb (mg/L)		Efisiensi Penyisihan (%)
			Awal	Akhir	
1	0	2500	0.1762	0.1762	0.00
2	20	2500	0.1762	0.1942	-10.22
3	60	2500	0.1762	0.1549	12.09
4	100	2500	0.1762	0.1885	-6.98

Analisis grafik dan data ini memberikan gambaran mengenai hubungan antara durasi kontak, efisiensi penyisihan, dan kapasitas adsorpsi CBAC.



Gambar 4. 8 Grafik Pengaruh Waktu Pengadukan terhadap Konsentrasi Pb

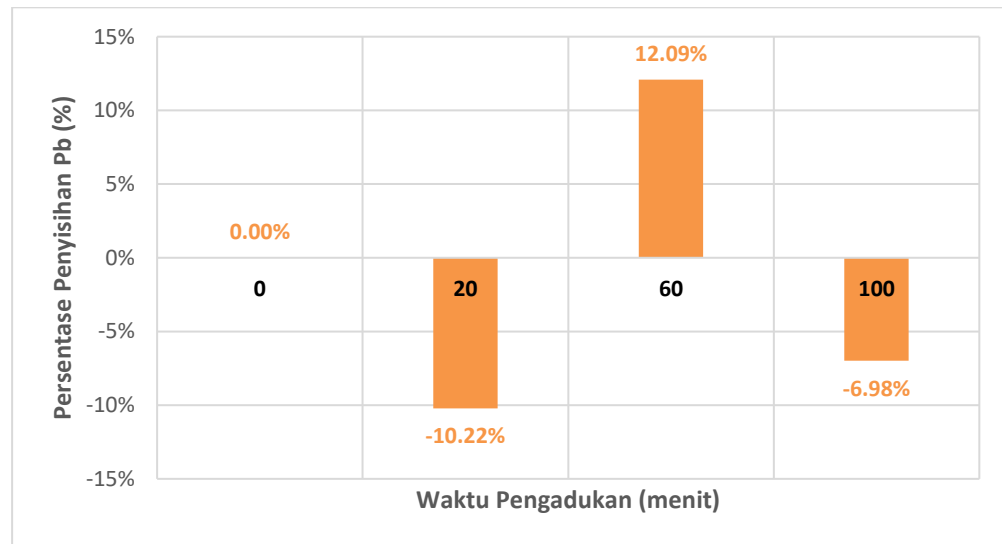
Koefisien -0.0002 menunjukkan bahwa secara teoritis terdapat penurunan konsentrasi Pb yang sangat kecil seiring bertambahnya waktu pengadukan. Namun, nilai $R^2 = 0.0003$ menunjukkan bahwa hubungan antara waktu pengadukan dan konsentrasi Pb sangat lemah (hampir tidak ada korelasi linear). Fluktuasi konsentrasi Pb lebih didominasi oleh faktor-faktor lain, seperti desorpsi Pb akibat kelebihan waktu pengadukan.



Gambar 4. 9 Grafik Pengaruh Waktu Pengadukan terhadap Efisiensi Penyisihan Pb

Koefisien -0.0014 menunjukkan adanya penurunan efisiensi penyisihan Pb yang sangat kecil terhadap waktu pengadukan. Namun, nilai $R^2 = 0.0003$

kembali menunjukkan bahwa hubungan ini hampir tidak signifikan secara linear. Hasil ini mengindikasikan bahwa proses adsorpsi Pb dipengaruhi oleh interaksi non-linear antara permukaan karbon aktif dan ion Pb.



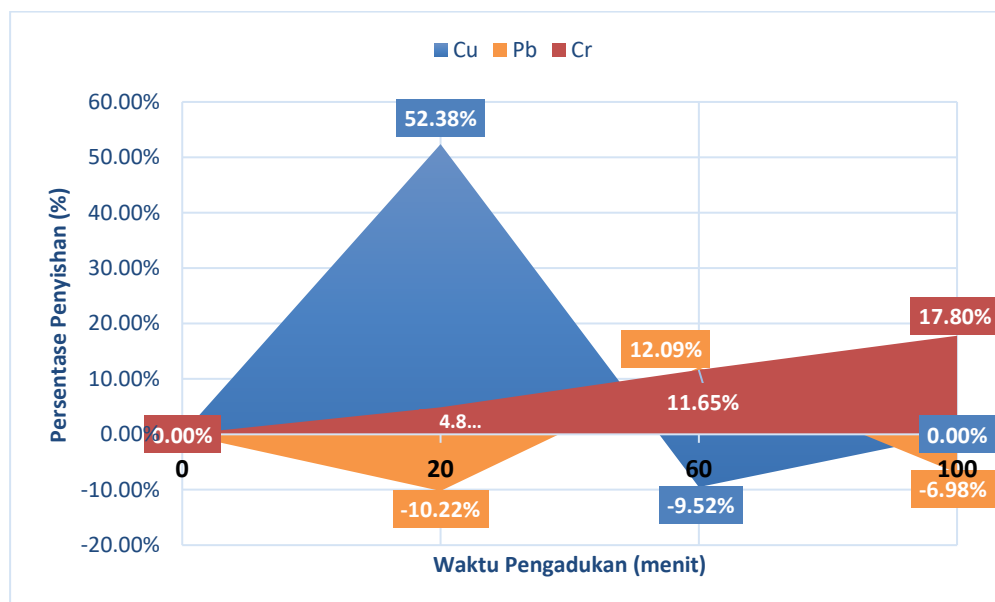
Gambar 4. 10 Diagram Batang Efisiensi Penyisihan Pb per Selang Waktu 40 menit

Grafik menunjukkan perubahan efisiensi penyisihan Pb yang juga fluktuatif. Persentase penyisihan tertinggi dicapai pada menit ke-60, yaitu sekitar 12%, sedangkan pada menit ke-20 dan ke-100 persentase penyisihan menjadi negatif, yang menunjukkan adanya pelepasan Pb kembali ke larutan. Fluktuasi ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi karbon aktif berbasis kompos (CBAC) terhadap Pb kurang stabil pada durasi pengadukan tertentu. Hal ini dapat disebabkan oleh kemungkinan desorpsi Pb ke dalam larutan setelah mencapai kapasitas maksimum adsorpsi pada waktu tertentu.

Adsorpsi optimal terjadi pada menit ke-60, namun setelahnya terjadi penurunan efisiensi yang mengindikasikan bahwa waktu pengadukan yang terlalu lama dapat menyebabkan desorpsi atau persaingan antar ion di permukaan karbon aktif. Untuk logam berat Pb nilai R^2 yang rendah menunjukkan bahwa hubungan antara waktu pengadukan dan penyisihan logam ini tidak signifikan secara linear. Fluktuasi konsentrasi dan efisiensi penyisihan lebih disebabkan oleh faktor-faktor non-linear seperti desorpsi atau kapasitas adsorpsi maksimum karbon aktif.

4.2.4 Perbandingan Efisiensi Penyisihan 3 Logam

Berdasarkan grafik efisiensi penyisihan, berikut adalah perbandingan efektivitas penyisihan logam berat (Cu, Pb, Cr) pada air lindi TPA Piyungan dengan variasi waktu pengadukan:



Gambar 4. 11 Grafik Perbandingan Tren Efisiensi Penyisihan Logam Cr, Cu, Pb

Grafik menunjukkan konsentrasi Cr menurun secara konsisten dari awal hingga menit ke-100, dengan efisiensi penyisihan stabil dan tanpa indikasi desorpsi. Hal ini menunjukkan bahwa CBAC memiliki performa terbaik untuk Cr, dengan mekanisme adsorpsi yang efektif dan kemampuan mempertahankan efisiensi penyisihan dalam jangka waktu yang lama. Konsentrasi Cu menurun drastis pada menit ke-20, mencapai efisiensi awal tertinggi (52,38%). Namun, pada menit ke-60 dan ke-100, terjadi peningkatan konsentrasi yang mengindikasikan desorpsi. Desorpsi ini dapat disebabkan oleh faktor lingkungan seperti kompetisi ion atau keterbatasan daya serap CBAC. Hal ini menunjukkan bahwa CBAC memiliki performa yang baik di awal, tetapi tidak mampu mempertahankan efisiensinya. Konsentrasi Pb menunjukkan fluktuasi signifikan, dengan peningkatan konsentrasi pada menit ke-20, penurunan pada menit ke-60, dan peningkatan kembali pada menit ke-100. Fluktuasi ini mengindikasikan performa CBAC yang kurang

stabil untuk Pb, kemungkinan akibat interaksi yang lemah antara Pb dan permukaan adsorben, kompetisi dengan ion lain, atau saturasi adsorben. Maka, CBAC paling efektif untuk Cr, dengan tren penyisihan yang stabil dan efisiensi yang terus meningkat. Cu menunjukkan efisiensi awal tertinggi, tetapi performanya tidak stabil akibat desorpsi. Dan logam paling sulit disisihkan, yaitu Pb menjadi tantangan terbesar, dengan efisiensi awal negatif dan fluktuasi signifikan sepanjang proses. CBAC memiliki efektivitas tertinggi untuk penyisihan Cr dibandingkan Cu dan Pb. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami mekanisme interaksi CBAC dengan Cu dan Pb serta mengatasi desorpsi pada kedua logam tersebut guna meningkatkan efisiensi adsorpsi secara keseluruhan.

4.3 Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi

4.3.1 Dosis CBAC (*Compost Based Activated Carbon*)

Dosis karbon aktif berbasis kompos (CBAC) merupakan salah satu faktor utama yang menentukan efisiensi penyisihan logam berat dalam proses adsorpsi. Pada penelitian ini, digunakan dosis CBAC sebesar 2500 mg dalam 500 mL air lindi, yang setara dengan 5 g/L. Berdasarkan data hasil adsorpsi untuk Cr, Cu, dan Pb, berikut adalah analisis faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi berdasarkan dosis CBAC.

a. Efek Dosis CBAC terhadap Penyisihan Logam Berat

- Logam Kromium (Cr)

Adsorpsi Cr meningkat secara bertahap, menunjukkan bahwa CBAC memiliki cukup situs aktif untuk menyerap ion Cr^{3+} dalam jumlah yang signifikan. Namun, efisiensi penyisihan masih relatif rendah (hanya 17.80% pada 100 menit), yang mungkin disebabkan oleh kompetisi ion logam lainnya atau kapasitas CBAC yang belum optimal untuk Cr. Dosis 5 g/L masih efektif untuk penyisihan Cr, tetapi mungkin perlu ditingkatkan untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi.

- Logam Tembaga (Cu)
 Adsorpsi Cu sangat cepat dalam 20 menit pertama, menunjukkan bahwa Cu^{2+} memiliki afinitas tinggi terhadap CBAC pada dosis ini. Namun, terjadi desorpsi setelah 20 menit, yang bisa disebabkan oleh saturasi situs aktif, spesiasi Cu pada pH 8 (membentuk $\text{Cu}(\text{OH})_2$ yang tidak larut), atau interaksi kompetitif dengan ion lain. Dosis CBAC sebesar 5 g/L tampaknya tidak cukup stabil untuk Cu, karena setelah 100 menit efisiensi penyisihan turun menjadi 0%.
 - Logam Timbal (Pb)
 Pada dosis 5 g/L, adsorpsi Pb^{2+} tidak langsung efektif dan mengalami desorpsi awal, kemungkinan karena kompetisi dengan ion lain. Setelah 60 menit, adsorpsi mulai meningkat, tetapi kemudian menurun kembali pada 100 menit, menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi mungkin sudah mendekati jenuh. Efisiensi penyisihan Pb tidak terlalu tinggi, yang bisa disebabkan oleh keterbatasan situs aktif CBAC untuk Pb pada dosis ini.
- b. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi Berdasarkan Dosis CBAC
- Ketersediaan Situs Aktif pada CBAC
 Dengan dosis 2500 mg/500 mL (5 g/L), jumlah situs aktif CBAC cukup untuk Cr dan Cu dalam waktu singkat, tetapi tidak optimal untuk Pb. Jika dosis lebih rendah, efisiensi penyisihan kemungkinan akan lebih rendah karena jumlah situs aktif semakin sedikit. Jika dosis lebih tinggi, efisiensi adsorpsi bisa meningkat, tetapi ada kemungkinan terjadi peningkatan biaya tanpa peningkatan signifikan dalam penyisihan.
 - Kompetisi Antar Ion Logam
 Pada pH 8, terjadi kompetisi antara Cr^{3+} , Cu^{2+} , dan Pb^{2+} dalam mendapatkan situs aktif pada CBAC. Cr memiliki peningkatan penyisihan yang stabil, menandakan bahwa ia lebih kompetitif

dalam menempel pada situs aktif CBAC dibanding Cu dan Pb. Cu dan Pb mengalami desorpsi setelah beberapa waktu, yang bisa disebabkan oleh perubahan spesiasi logam atau karena Cr lebih dominan dalam proses adsorpsi.

- Spesiasi Logam pada pH 8

Cr tetap dalam bentuk ion larut (Cr^{3+}), sehingga lebih mudah di adsorpsi. Cu mulai membentuk $\text{Cu}(\text{OH})_2$, yang mengurangi efektivitas adsorpsi setelah 20 menit. Pb juga dapat membentuk $\text{Pb}(\text{OH})_2$, yang menyebabkan fluktuasi dalam penyisihan.

- Kapasitas Adsorpsi CBAC

Dosis 5 g/L mungkin cukup untuk Cr tetapi kurang efektif untuk Cu dan Pb, terutama pada waktu kontak yang lebih lama. Jika dosis CBAC ditingkatkan, kemungkinan penyisihan Cu dan Pb akan lebih stabil karena lebih banyak situs aktif tersedia. Namun, ada batas jenuh bahwa meningkatkan dosis secara berlebihan tidak selalu meningkatkan efisiensi adsorpsi secara proporsional.

Dosis 2500 mg CBAC pada 500 ml larutan atau dosis 5 g/L memberikan keseimbangan yang baik antara kapasitas dan efisiensi adsorpsi, serta kecepatan penyisihan logam seperti Cr. Untuk Cu dan Pb, meskipun dosis ini dapat meningkatkan efisiensi adsorpsi, kompetisi ion atau desorpsi setelah waktu tertentu dapat menurunkan efisiensi. Dosis yang lebih tinggi memungkinkan lebih banyak ion logam teradsorpsi, tetapi setelah titik jenuh, peningkatan dosis tidak selalu berpengaruh signifikan dan dapat menyebabkan pemborosan adsorben. Oleh karena itu, pengaturan dosis yang optimal penting untuk mencapai efektivitas yang berkelanjutan tanpa pemborosan.

4.3.2 Karakteristik Adsorben

Compost-Based Activated Carbon (CBAC) memiliki keunggulan dan tantangan dalam proses adsorpsi logam berat. Efisiensi penyisihan logam seperti kromium (Cr), tembaga (Cu), dan timbal (Pb) sangat dipengaruhi oleh karakteristik CBAC. Berikut adalah faktor-faktor utama yang menentukan kinerja adsorben ini:

a. Struktur Pori dan Luas Permukaan

CBAC memiliki struktur berpori yang terdiri dari makropori dan mesopori, tetapi luas permukaannya lebih rendah dibanding karbon aktif berbasis batu bara atau tempurung kelapa. Cr menunjukkan penyisihan yang stabil, menandakan bahwa ion Cr^{3+} dapat terserap dengan baik dalam pori CBAC. Namun, Cu dan Pb mengalami fluktuasi penyisihan, kemungkinan karena keterbatasan situs aktif yang spesifik untuk ion-ion tersebut.

b. Kelimpahan Gugus Fungsional Aktif

CBAC mengandung berbagai gugus fungsional seperti karboksil (-COOH) dan hidroksil (-OH) dan yang dapat berinteraksi dengan ion logam berat. Gugus-gugus ini berperan dalam mekanisme pertukaran ion dan kompleksasi dengan logam berat. Pada pH 8, sebagian gugus ini terionisasi, yang meningkatkan afinitas terhadap logam seperti Cr^{3+} tetapi mungkin tidak stabil untuk Cu^{2+} dan Pb^{2+} , yang mengalami desorpsi setelah beberapa waktu.

c. Kapasitas Tukar Ion

Adsorpsi logam berat pada CBAC melibatkan mekanisme pertukaran ion, di mana ion logam bertukar dengan ion H^+ atau ion lain yang terdapat pada permukaan adsorben. Cr^{3+} menunjukkan adsorpsi stabil karena memiliki afinitas tinggi terhadap permukaan bermuatan negatif. Cu^{2+} mengalami desorpsi setelah 20 menit, kemungkinan akibat persaingan dengan Cr^{3+} atau spesiasi Cu pada pH 8. Pb^{2+} memiliki fluktuasi penyisihan, kemungkinan akibat pertukaran ion yang tidak optimal atau pembentukan $\text{Pb}(\text{OH})_2$ yang tidak larut.

4.3.3 Kecepatan Pengadukan

Pengadukan dalam proses adsorpsi berperan penting dalam meningkatkan interaksi antara adsorben dan adsorbat (logam berat). Dalam penelitian ini, kecepatan pengadukan 50 rpm digunakan dalam jar test, yang dapat mempengaruhi efisiensi penyisihan logam berat (Cr, Cu, Pb). Berikut adalah faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi berdasarkan kecepatan pengadukan yang digunakan.

a. Difusi dan Transfer Massa

- Cr menunjukkan tren adsorpsi meningkat secara bertahap (efisiensi 17.80% pada menit ke-100), menandakan bahwa pengadukan membantu transfer ion Cr^{3+} ke permukaan CBAC.
- Cu mengalami fluktuasi dalam adsorpsi (penyisihan tertinggi 52.38% pada menit ke-20, kemudian menurun), yang bisa jadi karena pengadukan kurang optimal untuk mempertahankan ion Cu^{2+} di situs adsorpsi.
- Pb juga mengalami fluktuasi (penyisihan -10.22% pada menit ke-20, meningkat ke 12.09% pada menit ke-60, lalu menurun ke 6.98%), yang menunjukkan bahwa keseimbangan adsorpsi-desorpsi dipengaruhi oleh kondisi pengadukan.

b. Dampak Pengadukan terhadap Kompetisi Ion dalam Larutan

- Cr^{3+} berhasil teradsorpsi lebih stabil dibanding Cu^{2+} dan Pb^{2+} , menunjukkan bahwa Cr memiliki afinitas lebih tinggi terhadap CBAC pada kecepatan pengadukan ini.
- Cu^{2+} cenderung mengalami desorpsi setelah 20 menit, yang bisa jadi karena adanya kompetisi dari Cr^{3+} atau karena Cu membentuk kompleks yang kurang stabil di permukaan adsorben.
- Pb^{2+} menunjukkan penyisihan negatif pada menit ke-20 (-10.22%), yang bisa menandakan adanya reaksi re-adsorpsi atau perubahan spesiasi Pb dalam larutan akibat pengadukan.

c. Efek Pengadukan terhadap Desorpsi Ion Logam

- Cu^{2+} mengalami desorpsi pada menit ke-60 (-9.52%) dan tetap tidak terserap dengan baik pada menit ke-100 (0% penyisihan).
- Pb^{2+} juga mengalami penurunan penyisihan setelah menit ke-60, menandakan bahwa pengadukan 50 rpm mungkin tidak cukup stabil untuk mempertahankan Pb dalam pori-pori CBAC.

Dalam penelitian ini, kecepatan pengadukan yang digunakan adalah 50 rpm menggunakan metode *Jar Test*. Berikut adalah analisis faktor-faktor yang dipengaruhi oleh kecepatan pengadukan ini:

a. Logam Kromium (Cr)

Efisiensi penyisihan meningkat dari 4.85% (menit ke-20) menjadi 17.80% (menit ke-100), menunjukkan bahwa Cr memiliki interaksi yang cukup baik dengan CBAC pada kecepatan 50 rpm. Pada kecepatan 50 rpm, penyisihan Cr menunjukkan peningkatan seiring waktu, menunjukkan bahwa kecepatan ini cukup efektif dalam memberikan kontak yang optimal antara Cr dengan CBAC.

b. Logam Tembaga (Cu)

Penyisihan awal sangat tinggi di menit ke-20, tetapi mengalami fluktuasi di menit ke-60 dan menit ke-100, menunjukkan kemungkinan adanya desorpsi atau kompetisi ion dalam larutan. Fluktuasi menunjukkan kemungkinan adanya kompetisi ionik atau desorpsi akibat gaya gesek akibat pengadukan. Kecepatan 50 rpm mungkin kurang optimal untuk Cu, karena peningkatan turbulensi dapat mengganggu stabilitas interaksi antara Cu dan CBAC.

c. Logam Timbal (Pb)

Penyisihan cenderung fluktuatif, dengan nilai negatif (-10.22% di menit ke-20), kemudian meningkat (12.09% di menit ke-60) tetapi kembali turun (6.98% di menit ke-100). Ini mengindikasikan bahwa Pb kurang stabil dalam proses adsorpsi pada kondisi kecepatan pengadukan ini. Ketidakstabilan interaksi Pb dengan adsorben, mungkin akibat pengaruh kompetisi ion atau perubahan keseimbangan dalam larutan.

4.3.4 Konsentrasi Awal Logam Berat

Konsentrasi awal logam berat dalam larutan merupakan salah satu faktor kunci yang mempengaruhi efisiensi adsorpsi. Dalam penelitian ini, konsentrasi awal logam berat dalam air lindi adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 8 Konsentrasi Awal Logam Berat pada Air Lindi TPA Piyungan

Parameter	Konsentrasi Awal	Satuan
Kromium	0.3090	mg/L
Tembaga	0.0210	mg/L
Timbal	0.1762	mg/L

Efisiensi penyisihan logam dalam proses adsorpsi menggunakan *Compost-Based Activated Carbon* (CBAC) menunjukkan variasi yang berbeda-beda untuk masing-masing logam berat. Berikut adalah analisis faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi berdasarkan konsentrasi awal logam berat.

a. Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Laju Adsorpsi

- Cr (0.3090 mg/L) menunjukkan peningkatan penyisihan secara bertahap (hingga 17.80% pada menit ke-100). Ini menunjukkan bahwa CBAC memiliki kapasitas cukup untuk menyerap Cr, meskipun tidak terlalu tinggi.
- Cu (0.0210 mg/L) mengalami fluktuasi signifikan, dengan efisiensi tertinggi di menit ke-20 (52.38%) tetapi menurun hingga 0% di menit ke-100. Ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi awal yang rendah, Cu^{2+} lebih mudah mengalami desorpsi kembali ke larutan.
- Pb (0.1762 mg/L) mengalami penyisihan negatif pada menit ke-20 (-10.22%), meningkat ke 12.09% di menit ke-60, lalu turun lagi ke 6.98% di menit ke-100. Ini menunjukkan adanya mekanisme kompetisi antar-ion logam dan kemungkinan reaksi desorpsi.

b. Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Kapasitas Adsorpsi

- Cr menunjukkan tren penyisihan yang meningkat seiring waktu, yang mengindikasikan bahwa pada konsentrasi awal 0.3090

mg/L, masih ada cukup banyak ion Cr^{3+} untuk di adsorpsi secara bertahap.

- Cu mengalami penyisihan yang sangat tinggi pada menit ke-20 tetapi turun drastis setelahnya. Hal ini kemungkinan karena jumlah ion Cu^{2+} dalam larutan sangat sedikit, sehingga setelah sebagian besar terserap, tidak ada cukup ion tersisa untuk mempertahankan laju adsorpsi.
- Pb mengalami fluktuasi penyisihan, menandakan bahwa laju adsorpsi Pb dipengaruhi oleh faktor lain, seperti kompetisi ion atau perubahan spesiasi dalam larutan.

4.3.5 pH Larutan

pH larutan merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi efisiensi adsorpsi logam berat dalam larutan. Dalam penelitian ini, proses adsorpsi menggunakan *Compost-Based Activated Carbon* (CBAC) dilakukan pada pH 8.

a. Pengaruh pH terhadap Spesiasi dan Kestabilan Ion Logam dalam Larutan

- Cr^{3+} masih cukup larut dalam pH 8, sehingga adsorpsi tetap terjadi dengan efisiensi penyisihan 17.80%.
- Cu^{2+} tidak mengalami penyisihan setelah menit ke-100, kemungkinan karena pembentukan kompleks hidroksida yang mengurangi interaksi dengan adsorben.
- Pb^{2+} mengalami fluktuasi efisiensi penyisihan, yang mungkin disebabkan oleh kompetisi antara adsorpsi dan presipitasi $\text{Pb}(\text{OH})_2$ pada pH ini.

b. Pengaruh pH terhadap Muatan Permukaan Adsorben

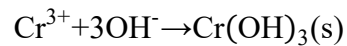
- Cr^{3+} masih dapat diadsorpsi karena pada pH 8, spesiasi Cr dalam larutan masih mendukung adsorpsi.
- Cu^{2+} mengalami desorpsi, kemungkinan karena pada pH ini, sebagian Cu berubah menjadi $\text{Cu}(\text{OH})_2$ yang tidak dapat diadsorpsi.

- Pb^{2+} mengalami fluktuasi penyisihan karena kompetisi antara adsorpsi dan presipitasi $Pb(OH)_2$.

c. Pengaruh pH terhadap Reaksi Kimia dalam Larutan

- Logam Kromium

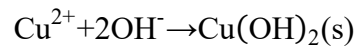
Cr^{3+} masih cukup stabil dalam larutan pada pH 8, tetapi mulai membentuk $Cr(OH)_3$ pada pH yang lebih tinggi. Reaksi yang mungkin terjadi:



Namun, karena Cr masih cukup larut pada pH 8, adsorpsi masih terjadi dengan efisiensi 17.80%.

- Logam Tembaga

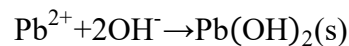
Pada pH 8, Cu^{2+} mulai membentuk $Cu(OH)_2$ yang sulit diadsorpsi. Reaksi yang terjadi:



Inilah yang menyebabkan penyisihan Cu turun drastis hingga 0% pada menit ke-100.

- Logam Timbal

Pb^{2+} juga cenderung mengalami presipitasi pada pH 8. Reaksi yang terjadi:



Inilah alasan mengapa penyisihan Pb tidak stabil dan mengalami fluktuasi.

Pada pH 8, Cr^{3+} tetap stabil dan dapat teradsorpsi dengan baik oleh CBAC. Namun, Cu^{2+} mengalami presipitasi menjadi $Cu(OH)_2$, sehingga tidak dapat diserap secara efektif. Pb^{2+} mengalami presipitasi sebagian, menyebabkan fluktuasi dalam efisiensi penyisihan akibat kompetisi antara mekanisme adsorpsi dan pembentukan $Pb(OH)_2$. Secara keseluruhan, pH 8 cukup optimal untuk adsorpsi Cr^{3+} tetapi kurang efektif untuk Cu^{2+} dan Pb^{2+} karena dominasi proses presipitasi.

4.3.6 Waktu Kontak

Durasi kontak antara adsorben dan larutan mempengaruhi efisiensi adsorpsi logam berat (Cu, Pb, dan Cr) pada air lindi TPA Piyungan. Berdasarkan grafik efisiensi penyisihan logam berat, waktu pengadukan menunjukkan pengaruh signifikan terhadap proses adsorpsi. Berikut adalah analisis efisiensi adsorpsi pada waktu pengadukan yang berbeda (20, 60, dan 100 menit):

a. Pada Menit ke-20

- Logam Cr memiliki efisiensi relatif rendah (4.85%) karena proses adsorpsi baru dimulai dan situs aktif masih banyak tersedia.
- Logam Cu memiliki efisiensi sangat tinggi (52.38%) karena konsentrasi awal rendah, memungkinkan ion Cu teradsorpsi dengan cepat.
- Logam Pb memiliki efisiensi yang menurun (-10.22%) karena kemungkinan desorpsi atau interaksi ion yang tidak efektif pada awal pengadukan.

b. Pada Menit ke-60

- Logam Cr mengalami peningkatan efisiensi menjadi 11.65%, karena sebagian besar ion Cr sudah teradsorpsi.
- Logam Cu mengalami penurunan efisiensi (-9.52%) akibat desorpsi atau penurunan kapasitas adsorpsi setelah mencapai titik tertentu.
- Logam Pb peningkatan efisiensi menjadi 12.09%, menunjukkan bahwa adsorpsi Pb semakin efisien dengan waktu lebih lama.

c. Pada Menit ke-100

- Logam Cr mengalami peningkatan efisiensi mencapai 17.80%, menunjukkan bahwa waktu pengadukan lebih lama memungkinkan lebih banyak ion Cr teradsorpsi meskipun situs aktif mulai jenuh.
- Logam Cu mengalami penurunan efisiensi menjadi 0%, yang menunjukkan bahwa CBAC telah jenuh atau ion Cu terdesorpsi kembali ke larutan.

- Logam Pb mengalami penurunan efisiensi menjadi 6.98%, mungkin akibat kompetisi ion dalam larutan atau pengaruh faktor lain seperti pH yang memengaruhi adsorpsi Pb.

Secara keseluruhan, durasi pengadukan yang lebih lama meningkatkan efisiensi adsorpsi pada sebagian besar logam, terutama Cr. Namun, untuk logam seperti Cu dan Pb, pengaturan waktu pengadukan yang tepat sangat penting untuk mencegah desorpsi dan memastikan efisiensi adsorpsi yang stabil.

4.3.7 Struktur Molekul Adsorbat

Adsorpsi logam berat pada karbon aktif berbasis kompos (CBAC) dipengaruhi oleh struktur molekul dan sifat kimiawi logam berat (adsorbat). Berdasarkan data hasil adsorpsi Cr^{3+} , Cu^{2+} , dan Pb^{2+} , dapat dianalisis bagaimana perbedaan spesiasi, ukuran ion, muatan, dan kecenderungan pembentukan kompleks hidroksida mempengaruhi efisiensi penyisihan.

Tabel 4. 9 Struktur Molekul Logam Berat

Logam Berat	Nomor Atom	Jari-Jari Ion (pm)	Muatan Ion	Potensial Reduksi (V)	Bentuk dalam Larutan pada pH 8
Cr	24	62	+3	-0.74	$\text{Cr}(\text{OH})_3$ (endapan), CrO_4^{2-} (larutan)
Cu	29	73	+2	+0.34	Cu^{2+} (larutan), $\text{Cu}(\text{OH})_2$ (endapan)
Pb	82	119	+2	-0.13	Pb^{2+} (larutan), $\text{Pb}(\text{OH})_2$ (endapan)

a. Muatan Ion dan Interaksi Elektrostatik

- Cr^{3+} memiliki muatan +3, yang berarti memiliki daya tarik elektrostatik yang lebih kuat terhadap situs aktif negatif di CBAC dibandingkan Cu^{2+} dan Pb^{2+} .
- Pb^{2+} dan Cu^{2+} memiliki muatan +2, yang cenderung lebih lemah dalam berinteraksi dengan adsorben dibandingkan Cr^{3+} .

b. Ukuran Ion dan Aksesibilitas ke Situs Adsorpsi

- Jari-jari ion Pb^{2+} (119 pm) paling besar, diikuti oleh Cu^{2+} (73 pm) dan Cr^{3+} (62 pm).
- Ion yang lebih kecil lebih mudah masuk ke dalam pori-pori adsorben, sedangkan ion yang lebih besar mungkin hanya terserap di permukaan.

c. Kelarutan dan Pembentukan Hidroksida pada pH 8

- Cr^{3+} membentuk $\text{Cr}(\text{OH})_3$ yang tidak larut, sehingga lebih sedikit Cr^{3+} dalam larutan untuk teradsorpsi.
- Cu^{2+} membentuk $\text{Cu}(\text{OH})_2$ yang tidak larut, sehingga pada waktu kontak lebih lama, terjadi desorpsi karena keseimbangan $\text{Cu}^{2+} \leftrightarrow \text{Cu}(\text{OH})_2$.
- Pb^{2+} membentuk $\text{Pb}(\text{OH})_2$, tetapi kelarutannya lebih tinggi dibandingkan $\text{Cu}(\text{OH})_2$, sehingga Pb^{2+} masih ada dalam larutan untuk proses adsorpsi

d. Afinitas terhadap Adsorben

- Cr^{3+} memiliki afinitas tinggi terhadap karbon aktif, sehingga penyisihannya meningkat seiring waktu.
- Cu^{2+} memiliki interaksi yang lebih rendah dan mudah mengalami desorpsi, yang menyebabkan efisiensinya menurun setelah waktu tertentu.
- Pb^{2+} memiliki interaksi sedang tetapi ukuran besar, yang membatasi kemampuan masuk ke dalam pori CBAC.

Cr^{3+} memiliki potensi adsorpsi lebih baik dibandingkan Cu^{2+} dan Pb^{2+} karena muatannya lebih tinggi dan ukurannya lebih kecil, memungkinkan interaksi lebih kuat dengan CBAC. Pb^{2+} memiliki efisiensi lebih rendah dibandingkan Cr^{3+} karena ukurannya besar dan lebih sulit masuk ke dalam pori-pori karbon aktif. Cu^{2+} mengalami desorpsi setelah waktu tertentu, kemungkinan akibat terbentuknya $\text{Cu}(\text{OH})_2$ yang mengurangi efektivitas adsorpsi. Adsorpsi logam berat pada CBAC dipengaruhi oleh ukuran ion, muatan, kelarutan pada pH 8, dan kecenderungan pembentukan hidroksida.

4.3.8 Aktivasi Kimia

Aktivasi kimia adalah salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi karbon aktif. Dalam penelitian ini, karbon aktif berbahan dasar kompos (CBAC) diaktifkan menggunakan HCl 32%. Aktivasi dengan HCl bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan spesifik, porositas, dan afinitas terhadap ion logam berat (Cr, Cu, Pb). Berikut adalah faktor-faktor yang dipengaruhi oleh aktivasi kimia menggunakan HCl 32% dalam proses adsorpsi:

a. Pengaruh Aktivasi HCl 32% terhadap Karakteristik CBAC

- Peningkatan Luas Permukaan dan Porositas

HCl 32% membantu meningkatkan luas permukaan spesifik karbon aktif berbahan kompos. Dengan meningkatnya luas permukaan, kapasitas adsorpsi terhadap logam berat juga meningkat, karena lebih banyak ion logam yang dapat terikat pada pori-pori adsorben.

- Modifikasi Gugus Fungsional pada Permukaan CBAC

HCl dapat meningkatkan jumlah gugus fungsional bermuatan negatif seperti karboksil ($-\text{COO}^-$) dan hidroksil ($-\text{OH}$) yang berperan dalam mengikat ion logam berat yang bermuatan positif (Cr^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+}).

b. Pengaruh Aktivasi HCl 32% terhadap Penyisihan Logam Berat (Cr, Cu, Pb)

- Logam Kromium

Efisiensi penyisihan Cr meningkat seiring waktu, dari 4.85% (menit ke-20) menjadi 17.80% (menit ke-100). Aktivasi dengan HCl membantu meningkatkan jumlah situs aktif untuk menjerap Cr^{3+} .

- Logam Tembaga

Cu mengalami penyisihan tinggi pada menit ke-20 (52.38%), tetapi kemudian fluktuatif (-9.52% di menit ke-60, dan 0% di menit ke-100). Aktivasi HCl meningkatkan gugus fungsional yang dapat berinteraksi dengan Cu^{2+} , tetapi kemungkinan

kompetisi ion dengan logam lain atau desorpsi menyebabkan fluktuasi ini.

- Logam Timbal

Efisiensi penyisihan Pb cenderung fluktuatif (-10.22% di menit ke-20, 12.09% di menit ke-60, dan turun menjadi 6.98% di menit ke-100). Aktivasi HCl dapat meningkatkan daya adsorpsi Pb, tetapi ion Pb^{2+} yang lebih besar mungkin mengalami kesulitan masuk ke dalam pori-pori adsorben, terutama jika terjadi penyumbatan pada pori-pori akibat kompetisi ionik dalam larutan.

c. Tantangan dan Faktor Pembatas Aktivasi HCl 32%

- Optimasi Konsentrasi HCl: Jika HCl terlalu pekat, dapat menyebabkan pengikisan struktur karbon aktif, sehingga mengurangi stabilitas adsorben dalam jangka panjang.
- Pelepasan Ion H^+ ke Larutan: Aktivasi dengan HCl dapat meningkatkan keasaman larutan, yang bisa mempengaruhi spesiasi logam berat dan menyebabkan kompetisi ion antara H^+ dengan ion logam dalam adsorpsi.
- Potensi Desorpsi: Jika interaksi antara logam dan permukaan adsorben tidak cukup kuat, maka terjadi desorpsi seperti yang terlihat pada Cu dan Pb dalam hasil penelitian ini.

Aktivasi HCl 32% berhasil meningkatkan luas permukaan dan gugus fungsional CBAC, meningkatkan kemampuannya dalam menyerap Cr secara signifikan. Untuk Cu dan Pb, meskipun terjadi adsorpsi awal, fluktuasi efisiensi menunjukkan kemungkinan kompetisi ion, desorpsi, atau keterbatasan kapasitas adsorben. Secara keseluruhan, aktivasi HCl 32% meningkatkan potensi CBAC dalam proses adsorpsi, tetapi perlu optimasi lebih lanjut untuk mencegah desorpsi dan kompetisi ion dalam larutan.

4.4 Performa Kompos sebagai Karbon Aktif

CBAC yang digunakan dalam eksperimen ini berasal dari compost yang telah diaktivasi menjadi karbon aktif. *Compost* memiliki keunggulan sebagai bahan dasar karbon aktif karena mengandung lignin dan selulosa yang dapat menghasilkan porositas tinggi saat proses aktivasi.

Dari hasil grafik efisiensi penyisihan logam berat (Cu, Pb, Cr), performa compost-based activated carbon (CBAC) sebagai adsorben dapat dianalisis berdasarkan tingkat efisiensinya dalam menyisihkan logam berat dari air lindi TPA Piyungan:

4.4.1 Efisiensi Adsorpsi Berdasarkan Logam Berat

Berdasarkan hasil penelitian, performa CBAC dalam menyisihkan logam berat dari air lindi TPA Piyungan dapat dijelaskan sebagai berikut:

Tabel 4. 10 Performa CBAC dalam Penyisihan Logam Berat

Logam Berat	Konsentrasi Awal (mg/L)	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Efisiensi (%)
Kromium	0.3090	0.254 (menit ke-100)	17.80%
Tembaga	0.0210	0.021 (menit ke-100)	0% (fluktuatif)
Timbal	0.1762	0.1885 (menit ke-100)	6.98% (fluktuatif)

- Cr menunjukkan adsorpsi yang meningkat seiring waktu, mencapai efisiensi penyisihan 17.80% dalam 100 menit, yang menunjukkan kemampuan CBAC untuk menangkap ion Cr^{3+} secara bertahap. menunjukkan bahwa CBAC memiliki potensi dalam mengadsorpsi kromium.
- Cu menunjukkan menunjukkan fluktuasi dengan efisiensi tertinggi pada menit ke-20 (52.38%), tetapi mengalami desorpsi setelahnya, yang mengindikasikan adsorpsi yang tidak stabil dan kemungkinan adanya kompetisi ion.
- Pb mengalami fluktuasi dalam penyisihan (-10.22% hingga 12.09%), yang menunjukkan bahwa adsorpsi Pb tidak stabil, kemungkinan karena interaksi spesifik antara Pb^{2+} dengan CBAC atau faktor lingkungan lainnya. menandakan bahwa CBAC kurang efektif dalam menyerap timbal.

4.4.2 Konsistensi dan Stabilitas CBAC

Konsistensi dan stabilitas CBAC dalam proses adsorpsi sangat bergantung pada berbagai faktor seperti struktur adsorben, waktu kontak, pH, dosis, serta interaksi spesifik antara logam berat dengan permukaan CBAC. Stabilitas CBAC dalam menyisihkan logam berat menentukan efektivitas jangka panjang dan keandalan dalam aplikasi pengolahan air lindi.

a. Konsistensi CBAC dalam Penyisihan Logam Berat (Cr, Cu, Pb)

- Logam Kromium (Cr): Adsorpsi stabil dan menunjukkan peningkatan efisiensi seiring waktu, dengan efisiensi 4.85% pada menit ke-20 meningkat menjadi 17.80% pada menit ke-100.
- Logam Tembaga (Cu): Penyisihan tidak konsisten, dengan efisiensi tertinggi 52.38% pada menit ke-20, tetapi terjadi desorpsi pada menit ke-60 dan ke-100 (efisiensi -9.52% dan 0%).
- Logam Timbal (Pb): Penyisihan fluktuatif, dengan efisiensi -10.22% pada menit ke-20, kemudian meningkat menjadi 12.09% pada menit ke-60, tetapi kembali turun menjadi 6.98% pada menit ke-100.

b. Stabilitas CBAC dalam Adsorpsi Logam Berat (Cr, Cu, Pb)

- Struktur CBAC. Pori-pori CBAC dapat menyerap Cr dengan baik, tetapi tidak optimal untuk Cu dan Pb.
- pH Larutan (pH = 8). Cr^{3+} lebih stabil pada pH ini, tetapi Cu^{2+} dan Pb^{2+} cenderung mengalami desorpsi pada pH tinggi.
- Waktu Kontak. Cr menunjukkan peningkatan adsorpsi dalam 100 menit, sementara Cu dan Pb mengalami pelepasan setelah waktu tertentu.
- Kecepatan Pengadukan (50 rpm). Membantu penyebaran adsorben, tetapi tidak cukup untuk mempertahankan Cu dan Pb tetap teradsorpsi.
- Interaksi Spesifik dengan Logam Berat → Cr^{3+} lebih stabil diikat oleh CBAC dibanding Cu^{2+} dan Pb^{2+} .

4.4.3 Karakteristik Kompos sebagai Adsorben

Compost-Based Activated Carbon (CBAC) adalah karbon aktif yang berasal dari kompos, diaktivasi secara kimia untuk meningkatkan daya adsorpsinya. Karakteristik CBAC sebagai adsorben sangat menentukan efektivitasnya dalam menyisihkan logam berat seperti Cr, Cu, dan Pb dalam proses adsorpsi. Berikut adalah karakteristik utama CBAC:

a. Sifat Kimia

Kompos memiliki senyawa organik seperti asam humat dan fulvat yang dapat berperan dalam menarik ion logam. Senyawa-senyawa ini memiliki kemampuan untuk berinteraksi dengan logam berat melalui proses ion exchange, sehingga meningkatkan performa adsorpsi.

b. Struktur Pori dan Luas Permukaan

Struktur mesopori dan makropori, CBAC memiliki kombinasi pori-pori besar dan sedang yang mempengaruhi daya serapnya terhadap ion logam. Luas permukaan relatif lebih kecil dibanding karbon aktif komersial, tetapi masih cukup efektif dalam adsorpsi logam berat. Luas permukaan dapat ditingkatkan dengan proses aktivasi menggunakan zat seperti asam atau gas panas untuk membuka pori-pori lebih banyak. Pori-pori yang cukup besar memungkinkan masuknya ion logam berat.

c. Komposisi Kimia dan Gugus Fungsional

Mengandung gugus fungsional seperti -COOH (karboksil) dan -OH (hidroksil) dan yang berperan dalam interaksi dengan logam berat. Gugus fungsional ini berperan dalam pertukaran ion dan kompleksasi logam berat sehingga meningkatkan daya adsorpsi. Kandungan karbon tinggi (~40-60%) mendukung sifat adsorben.

d. Aktivasi Kimia

CBAC dapat diaktivasi secara kimia menggunakan HCl 32%, NaOH, atau H_3PO_4 untuk meningkatkan luas permukaan dan memperbanyak gugus fungsional. Aktivasi meningkatkan kapasitas adsorpsi dan stabilitas adsorben dalam menahan ion logam berat.

- e. Kapasitas dan Selektivitas Adsorpsi terhadap Logam Berat
 Cr^{3+} lebih mudah teradsorpsi oleh CBAC karena interaksinya dengan gugus fungsional lebih kuat. Cu^{2+} dan Pb^{2+} menunjukkan fluktuasi adsorpsi, akibat persaingan ionik dan desorpsi pada pH tertentu.

4.4.4 Kelebihan dan Kekurangan Kompos

Compost-Based Activated Carbon (CBAC), yang berasal dari kompos, telah menjadi alternatif ramah lingkungan dalam proses adsorpsi logam berat. Namun, penggunaannya memiliki kelebihan dan kekurangan yang perlu dipertimbangkan.

Tabel 4. 11 Kelebihan dan Kekurangan Kompos sebagai Karbon Aktif

Aspek	Kelebihan	Kekurangan
Lingkungan dan Keberlanjutan	<i>Ramah Lingkungan</i> – Bahan baku dari limbah organik, lebih sustainable dibanding karbon aktif konvensional.	<i>Kualitas yang Bervariasi</i> – Komposisi limbah organik sebagai bahan baku bisa bervariasi, mempengaruhi kualitas CBAC.
	<i>Pengelolaan Limbah Organik</i> – Mendukung daur ulang dan pengelolaan limbah berkelanjutan.	
Ekonomi dan Produksi	<i>Biaya Lebih Rendah</i> – Produksi lebih murah dibanding karbon aktif berbasis batubara.	<i>Keterbatasan Aktivasi</i> – Aktivasi menggunakan HCl belum optimal untuk peningkatan daya adsorpsi.
	<i>Kemandirian Lokal</i> – Dapat diproduksi dengan bahan lokal, mengurangi impor.	
Kinerja Adsorpsi	<i>Daya Adsorpsi untuk Cr</i> – Menunjukkan potensi baik dalam menangkap Cr^{3+} .	<i>Efektivitas Berbeda untuk Setiap Logam</i> – Kurang stabil untuk Cu dan Pb.
	<i>Aplikasi Beragam</i> – Efektif untuk logam berat, senyawa organik, dan zat warna.	<i>Kemungkinan Desorpsi</i> – Ion logam dapat terlepas kembali dalam kondisi tertentu. <i>Persaingan Ion dalam Air Lindi</i> – Kehadiran ion lain bisa mengganggu efektivitas adsorpsi.

4.5 Implikasi dan Aplikasi Hasil

Hasil penelitian mengenai penggunaan CBAC (Compost-Based Activated Carbon) dalam proses adsorpsi logam berat memberikan berbagai implikasi dan potensi aplikasi dalam bidang pengolahan air limbah serta keberlanjutan lingkungan. Berikut adalah pembahasan terkait implikasi dan aplikasi hasil penelitian ini.

4.5.1 Implikasi

a. Implikasi Lingkungan

- Pengurangan Limbah Organik: CBAC berasal dari limbah kompos, sehingga dapat mengurangi akumulasi limbah organik di tempat pemrosesan akhir (TPA) dan mendukung prinsip *zero waste*.
- Alternatif Ramah Lingkungan: Dibandingkan karbon aktif komersial yang berbasis batubara atau kayu keras, CBAC lebih berkelanjutan karena memanfaatkan bahan daur ulang.
- Reduksi Kontaminan dalam Air Limbah: CBAC efektif dalam menyerap logam berat seperti Cr^{3+} , sehingga membantu meningkatkan kualitas air dan mengurangi pencemaran ekosistem perairan.

b. Implikasi Ekonomi

- Biaya Produksi Lebih Rendah: CBAC dapat diproduksi dengan biaya yang lebih murah dibandingkan karbon aktif berbasis batubara atau kayu, menjadikannya alternatif ekonomis bagi industri kecil dan menengah.
- Peningkatan Nilai Tambah Kompos: Limbah kompos yang umumnya hanya digunakan untuk pupuk dapat memiliki nilai tambah lebih tinggi ketika diolah menjadi karbon aktif, membuka peluang usaha baru dalam sektor pengolahan limbah.

c. Implikasi Teknologi dan Efisiensi Adsorpsi

- Efisiensi Penyisihan Logam Berat: Berdasarkan hasil penelitian, CBAC menunjukkan efisiensi tertinggi dalam penyisihan Cr^{3+} (17,80%), sementara Cu^{2+} dan Pb^{2+} mengalami fluktuasi signifikan.

- Potensi Kombinasi dengan Metode Lain: CBAC dapat dikombinasikan dengan metode seperti koagulasi-flokulasi, filtrasi membran, atau pertukaran ion untuk meningkatkan efisiensi penyisihan logam berat dalam skala industri.

d. Implikasi Sosial

- Peningkatan Kualitas Hidup: Dengan meningkatkan kualitas air dan tanah menggunakan kompos sebagai adsorben, masyarakat dapat merasakan manfaat langsung berupa akses air bersih, tanah yang lebih sehat, dan lingkungan yang lebih bersih.
- Pemberdayaan Masyarakat: Penggunaan kompos dalam aplikasi pengolahan air dan limbah dapat memperdayakan masyarakat, terutama yang tinggal di daerah dengan akses terbatas ke teknologi pengolahan air modern, untuk mengolah air dan limbah secara lebih efisien dengan biaya yang lebih rendah.

4.5.2 Aplikasi

a. Pengolahan Air Limbah

- Pengolahan Air Limbah Skala Industri

Industri Elektroplating dan Logam Berat: CBAC dapat digunakan dalam sistem adsorpsi untuk menghilangkan Cr^{3+} , Cu^{2+} , dan Pb^{2+} dari air limbah industri elektroplating dan manufaktur logam. Industri Tekstil: Limbah industri tekstil sering mengandung zat pewarna dan logam berat. CBAC dapat digunakan sebagai media filtrasi sebelum air limbah dibuang ke lingkungan.

- Pengolahan Air Lindi

Reduksi Polutan dalam Air Lindi: TPA menghasilkan air lindi yang kaya akan kontaminan organik dan anorganik. CBAC dapat membantu mengurangi kandungan logam berat sebelum air lindi dibuang atau diolah lebih lanjut.

Sistem Filtrasi Berbasis Adsorpsi: CBAC dapat digunakan sebagai bagian dari sistem filtrasi bertingkat untuk meningkatkan efektivitas penyisihan polutan dari air lindi.

- b. Sistem Penyaringan Air Skala Rumah Tangga dan Komunitas
- Filter Air Portabel: CBAC dapat digunakan dalam penyaring air portabel untuk daerah dengan masalah kualitas air akibat kontaminasi logam berat.
 - Pengolahan Air di Daerah Terpencil: CBAC dapat menjadi solusi penyaringan air murah dan berkelanjutan di daerah yang memiliki keterbatasan akses terhadap air bersih.

c. Pemanfaatan Limbah Organik

CBAC berbasis kompos mendukung konsep ekonomi sirkular, memanfaatkan limbah organik untuk menghasilkan adsorben aktif. Hal ini sejalan dengan prinsip pengelolaan limbah yang berkelanjutan dan dapat diterapkan di berbagai daerah untuk mengurangi limbah TPA.

Hasil ini menunjukkan potensi penggunaan CBAC dalam pengolahan limbah industri yang mengandung logam berat. Efektivitas tertinggi ditemukan pada Cr, menunjukkan bahwa CBAC cocok digunakan untuk pengolahan limbah kromium. Untuk Cu dan Pb, diperlukan optimasi lebih lanjut. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi variasi dosis, waktu, dan kombinasi adsorben.

CBAC (*Compost-Based Activated Carbon*) menawarkan solusi ramah lingkungan dalam pengelolaan limbah logam berat dengan mendukung pelestarian lingkungan dan mengurangi polusi industri. Pemanfaatan kompos sebagai bahan dasar karbon aktif tidak hanya membantu mengolah limbah organik, tetapi juga meningkatkan efektivitas adsorpsi logam berat, menjadikannya alternatif yang potensial dalam pengolahan limbah industri. Meskipun CBAC menunjukkan efektivitas tinggi dalam penyisihan Kromium (Cr^{3+}), performanya terhadap Tembaga (Cu^{2+}) dan Timbal (Pb^{2+}) masih perlu ditingkatkan melalui optimasi parameter operasional dan modifikasi material. Dibandingkan dengan karbon aktif komersial, CBAC memiliki biaya produksi yang lebih rendah, namun mungkin memerlukan metode aktivasi tambahan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut diperlukan dalam hal peningkatan performa, pengujian skalabilitas, serta regulasi dan standarisasi.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan pada penelitian mengenai pengaruh adsorpsi CBAC terhadap efisiensi penyisihan kadar Cr, Cu, dan Pb pada air lindi TPA Piyungan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Kandungan logam berat dalam air lindi TPA Piyungan tercatat sebesar 0,3090 mg/L untuk Cr, 0,0210 mg/L untuk Cu, dan 0,1762 mg/L untuk Pb. Nilai ini masih di bawah baku mutu Permen LHK No. 5 Tahun 2014, sehingga tergolong aman. Namun, untuk memenuhi standar yang lebih ketat seperti PP No. 22 Tahun 2021 (kelas air 2 dan 3), air lindi tetap perlu diolah agar tidak mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan.
2. Hasil uji batch menunjukkan CBAC efektif menyerap Cr, dengan efisiensi meningkat dari 4,85% (menit ke-20) menjadi 17,80% (menit ke-100), menurunkan konsentrasi Cr dari 0,309 mg/L menjadi 0,254 mg/L. Sebaliknya, penyisihan Cu tidak stabil, efisiensi tertinggi 52,38% (menit ke-20) menurun drastis hingga 0% (menit ke-100), menandakan interaksi yang lemah. Untuk Pb, efisiensi tertinggi 12,09% (menit ke-60) turun menjadi 6,98% (menit ke-100), kemungkinan karena desorpsi. Secara umum, CBAC memiliki potensi sebagai adsorben ramah lingkungan, terutama untuk Cr, namun perlu optimasi lebih lanjut untuk Cu dan Pb.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, saran yang dapat diberikan terkait hasil yang didapat adalah

1. Optimasi parameter seperti dosis CBAC, pH larutan, dan waktu kontak untuk meningkatkan efisiensi penyisihan logam berat, terutama untuk logam tembaga dan timbal.
2. Agar *Compost-Based Activated Carbon* (CBAC) memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dan lebih efektif dalam menyisihkan logam berat (Cr, Cu, Pb), diperlukan optimasi metode aktivasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aini, N. A., Jamilatun, S., & Pitoyo, J. (2022). Pirolisis Biomassa: Review. *Agroindustrial Technology Journal*. 6. 1. 89–101. <https://doi.org/10.21111/atj.v6i1.7559>.
- Adhani, R. & Husaini. (2017). *Logam Berat Sekitar Manusia*. Banjarmasin: Universitas Lambung Mangkurat Press.
- Ali, Munawar. (2011). *Rembesan Air Lindi (Leachate) Dampak pada Tanaman Pangan dan Kesehatan*. Surabaya: UPN Veteran Jawa Timur Press.
- Bansal, R. C., Goyal, M. (2005). *Activated Carbon Adsorption*. New York: CRC Press.
- Basu, P. (2010). *Biomassa Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*. Amsterdam: Elsevier Inc.
- Alongamo, Brice & Dodo Lydie, Ajifack & Ghogomu, Julius & Nsami, Ndi & Ketcha, Joseph. (2021). Activated Carbon from the Peelings of Cassava Tubers (*Manihot esculenta*) for the Removal of Nickel(II) Ions from Aqueous Solution. *Journal of Chemistry*. 2021. 10.1155/2021/5545110.
- Beaty, R.D., & Kerber, J.D. (1997). *Concepts , Instrumentation and Techniques in Atomic Absorption Spectrophotometry*. Norwalk: The Perkin-Elmer Corporation.
- Bergna, D., Varila, T., Romar, H., & Lassi, U. (2018). Comparison of the Properties of Activated Carbons Produced in One-Stage and Two-Stage Processes. *C. 4*. 41. <https://doi.org/10.3390/c4030041>.
- Brown, Craig. (2018). *Activated Carbon. The Official Journal of the PFI High Purity Water Conference & Seminar Series*.

- Bubanale, A. A., & Shivashankar, A. R. (2017). A Comparative Study of Physical and Chemical Activation Processes for Activated Carbon. *Journal of Materials Science Applications*. 5. 2. 89–95.
- Cecen, F. & Aktas, Ö (2011). Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment: Integration of Adsorption and Biological Treatment. Germany: Wiley-VCH.
- Christensen, T.H., Kjeldsen, P., Bjerg, P.L., Jensen, D.L., Christensen, J.B., Baun, A., Albrechtsen, H.J. and Heron, G. (2001). Biogeochemistry of Landfill Leachate Plumes. *Applied Geochemistry*. 16. 7. 659-718. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(00\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00082-2)
- Crittenden, J. C., Trussel, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J. & Tchobanoglous, G. (2012). MWH's Water Treatment: Principles and Design. 3rd Edition. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Cooney, D. O. (1998). Adsorption Design for Wastewater Treatment. Florida: CRC Press.
- Darlington, J. (2015). Compost – A Guide for Evaluating and Using Compost Materials as Soil Amendments. Soil & Plant Laboratory.
- Darmono (1995). Logam Dalam Sistem Biologi Makhluk Hidup. Jakarta: UI Press.
- Diaz, L. F., Savage, G. M., & Golueke, C. G. (2002). Handbook of Solid Waste Management 2nd Edition. United States: McGraw-Hill Companies.
- Elawati, Kandowanko NY, Lamondo D dan Gintulangi SO, 2019. Efisiensi Penyerapan Logam Berat Tembaga (Cu) Oleh Tumbuhan Kangkung Air (*Ipomoea aquatica* Forks) dengan Waktu Kontak yang Berbeda. *Jurnal Radial-Jurnal Peradaban Sains, Rekayasa dan Teknologi*; 6(2): 162-166.
- Epstein, E. (1997). *The Science of Composting*. Basel: Technomic Publishing.

- Gale, Mark and Nguyen, Tu and Moreno, Marissa and Gilliard-AbdulAziz, Kandis Leslie. (2021). Physiochemical Properties of Biochar and Activated Carbon from Biomass Residue: Influence of Process Conditions to Adsorbent Properties. *ACS Omega*. 6. 15. 10224-10233. DOI: 10.1021/acsomega.1c00530.
- Garcia, R & Baez, A. P. (2011). Atomic Absorption Spectroscopy. Croatia: InTech.
- Irhamni, Pandia, S., Purba, E., & Hasan, W. (2017). Kandungan Logam Berat pada Air Lindi Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sampah Kota Banda Aceh. *Prosiding Seminar Nasional Pascasarjana (SNP) Unsyiah*. 19–22.
- Irhamni, Pandia, S., Purba, E., & Hasan, W. (2017). Serapan Logam Berat Esensial dan Non Esensial pada Air Lindi TPA Kota Banda Aceh dalam Mewujudkan Pembangunan Berkelanjutan. *Serambi Engineering*. 2. 3. 134–140.
- Irshad, M., Inoue, M., & Ashraf, M. (2011). Nutrient Composition of Compost and its Applications. *Soil Science Society Journal*. 45. 3. 221-230.
- Kadirvelu, K., Thamaraiselvi, K. & Namasivayam, C. (2001). Removal of Heavy Metal from Industrial Wastewaters by Adsorption onto Activated Carbon Prepared from an Agricultural Solid Waste. *Bioresource Technology*. 76. 1. 63-65.
- Karamina, H., Murti, A., & Mujoko, T (2021). Kandungan Logam Berat Fe, Cu, Zn, Pb, Co, Br pada Air Lindi di Tiga Lokasi Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Dadaprejo, Kota Batu, Dau dan Supit Urang, Kabupaten Malang. *Jurnal Ilmiah Hijau Cendekia*. 6. 2. 51-57.
- Kementerian Negara Lingkungan Hidup. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Jakarta.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah. Jakarta

Kirana, G. C. ., Khairuddin, K. and Yamin, M. . (2022) “Analys of Heavy Metal Content of Copper (Cu) in Cork Fish From Rawa Taliwang Lake, West Sumbawa Regency 2021”, *Jurnal Biologi Tropis*, 22(3), pp. 1033–1039. doi: 10.29303/jbt.v22i3.3957.

Kreith, F & Tchobanoglous, G. (2002). *Handbook of Solid Waste Management* 2nd Edition. United States: McGraw-Hill Companies.

Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T. H. (2002). Present and Long-term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 32. 4. 297-336.

Larasati, A. I., Susnawati, L. D., & Suharto, B. (2015). Efektivitas Adsorpsi Logam Berat pada Air Lindi Menggunakan Media Karbon Aktif, Zeolit, dan Silika Gel di TPA Tlekung, Batu. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. 2. 1. 44-48.

LeVan, M. Douglas. (2012). *Fundamentals of Adsorption: Proceedings of the Fifth International Conference on Fundamentals of Adsorption*. United States: Springer US.

Levinson, R. (2001). *More Modern Chemical Techniques*. London: Royal Society of Chemsitry.

Liang, Mark. (2013). *Creating Activated Carbon from Food Waste (CCC Carbon Method)*. [Online]. Available from: <http://www.instructables.com/id/Creating-Activated-Carbon-FromFood-Waste-CCC-Car/?ALLSTEPS>.

- Martin, S & Griswold, W (2009). Human Health Effects of Heavy Metals. *Environmental Science and Technology Briefs for Citizens*. Issue 15. 1-6.
- Mulamoottil, G., E. A. McBean, and F. Rovers. (1999). *Constructed Wetlands for The Treatment of Landfill Leachates*. Florida: Lewis Publishers.
- Nailul, Fauziah. (2009). *Pembuatan Arang Aktif Secara Langsung Dari Kulit Acacia mangium Wild Dengan Aktivasi Fisika Dan Aplikasinya Sebagai Adsorben*. Insitut Pertanian Bogor.
- O'Neill, P. (1994). *Environmental Chemistry 2nd Edition*. London: Chapman & Hall.
- Pridyanti, D. D., Moelyaningrum, A. D., & Ningrum, P. T. (2018). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kupang (*Corbula Faba*) Teraktivasi Termal sebagai Adsorben Logam Kromium (Cr⁶⁺) pada Limbah Cair Batik. *Seri Ilmu-Ilmu Alam dan Kesehatan*. 2. 2. 78-883.
- Palar, H. (1994). *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Jakarta: PT. Rineka Cipta.
- Palar, H. (2008). *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Jakarta: PT. Rineka Cipta.
- Patimah, F. (2016). *Studi Optimasi Penurunan Kadar Tembaga pada Limbah Cair Laboratorium Menggunakan Metode Elektrokoagulasi*. UIN Sunan Gunung Djati.
- Presiden Republik Indonesia. *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Jakarta
- Perwitasari, Dyah S. (2021). *Teknologi Penurunan Kadar Ion Logam pada Limbah Cair Industri*. Surabaya: CV. Mitra Abisatya.

- Puspitarini, R., Ismawati, R., Mizana, M.W., Nuryono. (2023) Studi Analisis Logam Berat Timbal dan Kadmium Air Lindi dan Air Sumur di TPA Pasuruhan Kabupaten Magelang. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*. 15. 2. 134-145.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity. *Journal of Hazardous Materials*. 150. 3. 468-493.
- Riduan, Kemas., Mafruddin, & Rasyid, A. A. (2020). Optimasi Pembakaran Menyeluruh pada Reaktor Pirolisis dalam Menghasilkan Bioarang dan Asap Cair. *TURBO: Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro*. 9. 1. 114-123. <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v9i1.1220>.
- Runtuboy, J. I., Yarmalinda, Dwi. (2024). Studi Literatur Perbandingan Pupuk Kompos Dan Pupuk Kimiawi Terhadap Tanaman Hortikultura. *Prosiding Ilmu Kependidikan*. 1. 2. 26-32.
- Ruthven, D. M. (1984). *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. New York: Wiley-Interscience.
- Rynk, R. (1992). *On-Farm Composting Handbook*. New York: Northeast Regional Agricultural Engineering Service.
- Sharma, S., Sharma V., Paliwal R., & Pracheta. (2011). Lead Toxicity, Oxidative Damage and Health Implications: A Review. *International Journal for Biotechnology and Molecular Biology Research*. 2. 13. 215-221.
- Sudrajat, R., & Pari, G. (2011). *Arang Aktif: Teknologi Pengolahan dan Masa Depan*. Jakarta: Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan.
- Tsui, L., & Roy, W. R. (2007). The Potential Applications of Using Compost Chars for Removing the Hydrophobic Herbicide Atrazine from Solution. *Bioresource Technology*. 99. 13. 5673-5678.

Li, Wang & Mo, Weiming & Kang, Caiyan & Zhang, Minjun & Meng, Mianwu & Chen, Menglin. (2012). Adsorption of Nitrate from Aqueous Solution onto Modified Cassava (*Manihot Esculenta*) Straw. *Ecological Chemistry and Engineering S* . 19. 4. 629–638. DOI:10.2478/v10216-011-0045-4.

World Health Organization. (2023). Exposure to Lead: A Major Public Health Concern. Geneva: World Health Organization.

Worasuwannarak, Nakorn. (2004). Carbonization Characteristics of Thai Agricultural Residues.

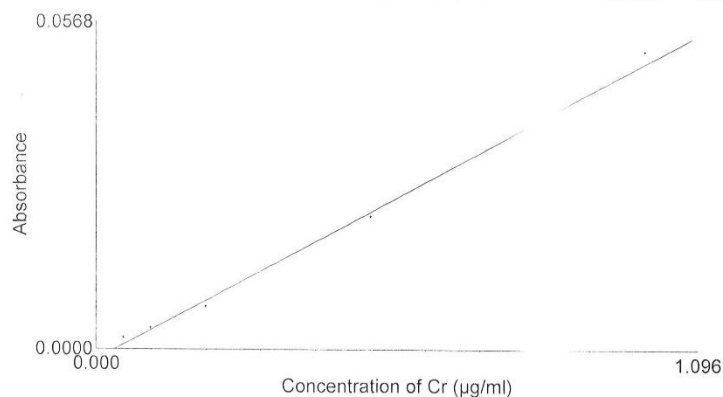
Yang, R. T. (2003). *Adsorption: Principles and Practice*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Pembacaan Spektrofotometer Serapan Atom Kandungan Logam Kromium (Cr) pada Sampel Air Lindi TPA Piyungan

Results File D:\GBC AAS\2024\Sampel 24\NPA 137-143 cr 1.res
 Analysis
 Filename C:\Program Files\GBC Avanta Ver 2.02\Analysis1.anl
 Element Cr,
 Date Mon Apr 07 22:49:20 2003
 Full Calibration
 Calibration Mode Linear Least Squares Max Error : 0.0436 R² : 0.9937 R : 0.9968
 Conc = 0.0373 + 19.4910 * Abs

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates		
Cal Blank	-----	HIGH	-0.0032	-0.0024	-0.0030	-0.0042
standar 1	0.050	17.65	0.0019	0.0021	0.0021	0.0015
Standard 2	0.100	6.22	0.0036	0.0037	0.0038	0.0033
Standard 3	0.200	9.35	0.0074	0.0074	0.0081	0.0067
Standard 4	0.500	4.39	0.0231	0.0224	0.0242	0.0226
Standard 5	0.800	2.21	0.0369	0.0371	0.0376	0.0360
Standard 6	1.000	1.49	0.0516	0.0511	0.0525	0.0512

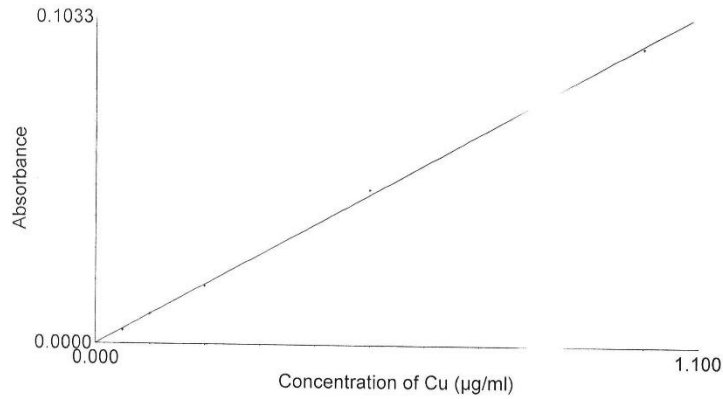


Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates		
Sample Blank	-----	11.80	-0.0062	-0.0056	-0.0061	-0.0070
Asli	0.309	3.97	0.0139	0.0146	0.0135	0.0137
20	0.294	5.06	0.0132	0.0138	0.0133	0.0124
60	0.273	1.24	0.0121	0.0119	0.0122	0.0121
100	0.254	7.08	0.0111	0.0119	0.0110	0.0103

Lampiran 2 Hasil Pembacaan Spektrofotometer Serapan Atom Kandungan Logam Tembaga (Cu) pada Sampel Air Lindi TPA Piyungan

Results File D:\GBC AAS\2024\Sampel 24\PA 137-143 Cu 1.res
 Analysis
 Filename C:\Program Files\GBC Avanta Ver 2.02\Analysis1.anl
 Element Cu,
 Date Mon Apr 07 21:54:38 2003
 Full Calibration
 Calibration Mode Linear Least Squares Max Error : 0.0165 R² : 0.9994 R : 0.9997
 Conc = 0.0027 + 10.5264 * Abs

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.
Cal Blank	----	HIGH	0.0000
Standard 1	0.050	11.96	0.0040
Standard 2	0.100	6.22	0.0094
Standard 3	0.200	0.35	0.0182
Standard 4	0.500	0.89	0.0488
Standard 5	0.800	0.95	0.0760
Standard 6	1.000	0.94	0.0939

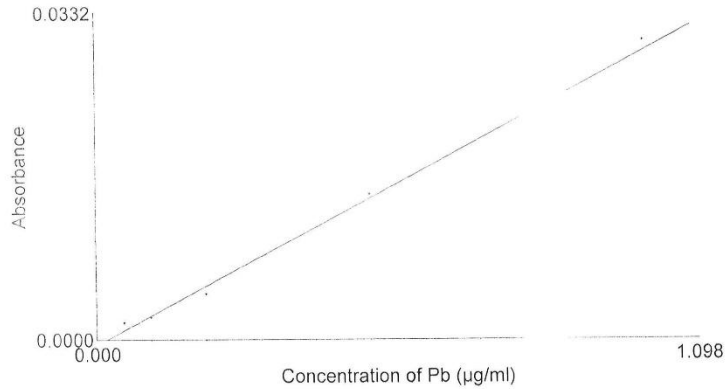


Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.
Sample Blank	----	HIGH	-0.0011
Std	0.408	0.84	0.0385
Asli	0.021	HIGH	0.0017
20	0.010	HIGH	0.0007
60	0.023	HIGH	0.0020
100	0.021	HIGH	0.0018

Lampiran 3 Hasil Pembacaan Spektrofotometer Serapan Atom Kandungan Logam Timbal (Pb) pada Sampel Air Lindi TPA Piyungan

Results File D:\GBC AAS\2024\Sampel 2\APA 137-143 PB.res
 Analysis
 Filename C:\Program Files\GBC Avanta Ver 2.02\Analysis1.anl
 Element Pb,
 Date Mon Apr 07 23:10:22 2003
 Full Calibration
 Calibration Mode Linear Least Squares Max Error : 0.0506 R² : 0.9929 R : 0.9964
 Conc = 0.0214 + 33.6501 * Abs

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates		
Cal Blank	----	HIGH	0.0117	0.0152	0.0092	0.0108
Standard 1	0.0500	HIGH	0.0017	0.0023	0.0026	0.0002
Standard 2	0.1000	HIGH	0.0022	0.0030	0.0015	0.0022
Standard 3	0.2000	HIGH	0.0046	0.0050	0.0035	0.0053
Standard 4	0.5000	12.93	0.0147	0.0166	0.0128	0.0148
Standard 5	0.8000	HIGH	0.0216	0.0193	0.0268	0.0189
Standard 6	1.0000	3.46	0.0302	0.0295	0.0314	0.0297



Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates		
Sample Blank	----	14.89	0.0105	0.0113	0.0115	0.0087
Asli	0.1762	HIGH	0.0046	0.0062	0.0030	0.0046
20	0.1942	HIGH	0.0051	0.0043	0.0072	0.0039
60	0.1549	HIGH	0.0040	0.0032	0.0027	0.0060
100	0.1885	HIGH	0.0050	0.0041	0.0025	0.0093

Lampiran 4 Contoh Perhitungan Efisiensi Penyisihan Logam Berat

No	Waktu (menit)	Dosis CBAC (mg/L)	Konsentrasi Cr (mg/L)		Efisiensi Penyisihan (%)
			Awal	Akhir	
1	0	2500	0.309	0.309	0.00
2	20	2500	0.309	0.294	4.85
3	60	2500	0.309	0.273	11.65
4	100	2500	0.309	0.254	17.80

Rumus :

$$Q = \frac{C_o - C_i}{C_o} \times 100\%$$

Misal :

Diketahui :

$$C_o = 0.309 \text{ mg/L}$$

$$C_i = 0.294 \text{ mg/L}$$

Ditanya : Q..?

Penyelesaian:

$$Q = \frac{C_o - C_i}{C_o} \times 100\%$$

$$Q = \frac{0.309 - 0.294}{0.309} \times 100\%$$

$$Q = 0.0485 \times 100\%$$

$$Q = 4.85\%$$

Lampiran 5 Dokumentasi Penelitian

Pembuatan CBAC



Penyaringan ukuran butiran kompos dengan ayakan 1 mm²



Kompos yang sudah disaring, lalu disangrai s/d suhu 300 °C selama 20 menit hingga menjadi arang kompos



Proses aktivasi dengan aktivator HCl 32% selama 24 jam

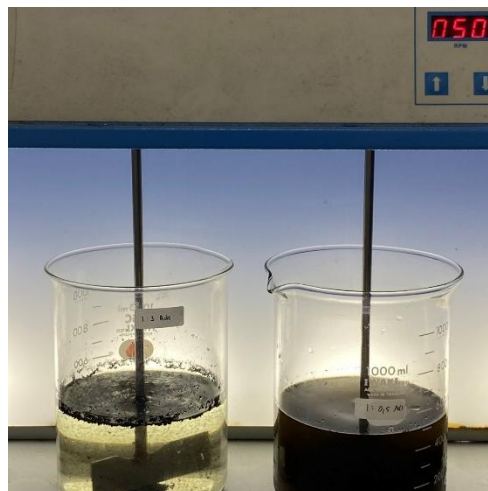


Penyucian arang kompos dengan air bersih dan aquades hingga pH arang kompos menjadi netral



Pengeringan arang kompos s/d suhu 200°C selama 20 menit hingga menjadi kering, lalu arang kompos didiamkan hingga suhu ruang.

Uji Batch



Menyiapkan gelas beaker 1000 ml yang berisi 500 ml sampel, lalu dicampur dengan CBAC 2500 mg. Mengaduk sampel dengan menggunakan jar test selama 100 menit dengan kecepatan 50 rpm.

Pembacaan Sampel



Proses destruksi, yaitu dengan mencampurkan 5 ml larutan HNO_3 dengan 100 ml sampel lalu dipanaskan sampai menyisakan 20 ml sampel, lalu tuang ke labu ukur 100 ml dan campurkan aquades sampai tanda batas dan homogenkan



Pembacaan sampel dengan menggunakan instrumen Spektrofotometer Serapan Atom

RIWAYAT HIDUP



Rania Alisha lahir di Sleman pada tanggal 19 Desember 2000. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara, putri dari pasangan Priyo Agung Wicaksono dan Reny Puspita.

Pendidikan dasar ditempuh di SD Negeri Ungaran 1 Yogyakarta dan lulus pada tahun 2013. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 12 Yogyakarta dan lulus pada tahun 2016. Pendidikan menengah atas diselesaikan di SMA Negeri 1 Ngaglik dan lulus pada tahun 2019. Pada tahun yang sama, penulis diterima sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai kegiatan organisasi, kepanitiaan, dan kerja praktik. Pada tahun 2020, penulis terlibat dalam kepanitiaan Lintas Lingkungan dan Enviro Champions. Pada tahun yang sama, penulis menjadi anggota Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan periode 2020/2021. Kemudian pada tahun 2022, penulis melaksanakan kerja praktik di Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran (DPFK) – BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional).

Penulis menyelesaikan tugas akhir dengan judul “*Analisis Efisiensi Karbon Aktif berbasis Kompos untuk Penyisihan Logam Berat (Cr, Cu, Pb) pada Air Lindi TPA Piyungan*” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.).