TA/TL/2026/2131

PROGRAM STUDI
TEKNIK LINGKUNGAN

**TUGAS AKHIR**

# Efektivitas Adsorben dari Limbah Botol PET dalam Menyerap Ion Kadmium ($Cd^{2+}$) di Dalam Air

**Aisyah Intan Rizqi**
**22513132**

**Dosen Pembimbing:**
**Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.**

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

DEPARTMENT OF
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

**FINAL PROJECT**

# The Effectiveness of Adsorbent from PET Bottle Waste in Absorbing Cadmium (Cd2+) Ions in Water

**Aisyah Intan Rizqi**
**22513132**

**Advisor:**
**Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.**

**Environmental Engineering Program, Bachelor's Degree**
**Faculty of Engineering and Design Innovation**
**Islamic University of Indonesia**
**2026**

**LEMBAR PENGESAHAN**
**TUGAS AKHIR**

**Efektivitas Adsorben dari Limbah Botol PET dalam Menyerap Ion Kadmium ($Cd^{2+}$) di Dalam Air**

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.

**Aisyah Intan Rizqi**
**22513132**

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 21 Agustus 2026 dan disetujui oleh:

Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D. (Pembimbing)

Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. (Penguji 1)

Noviani Ima Wantoputri S.T., M.T. (Penguji 2)

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS
TEKNIK DESAIN INOVASI
YOGYAKARTA

Any Juliani, S.T., M.Sc. (Res.Eng.), Ph.D.

## PERNYATAAN

Penulis, 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 penulis 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 penulis. 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)

   b. Tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini. Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab penulis sepenuhnya.

6 Pernyataan ini penulis buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, penulis bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 21 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,




Aisyah Intan Rizqi

22513132

# PRAKATA

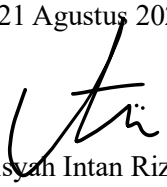
Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala Rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "Efektivitas Adsorben dari Limbah Botol PET dalam Menyerap Kandungan Ion Kadmium (Cd2+) di Dalam Air" dengan baik. Penyusunan Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada Program Studi Teknik
Lingkungan, Universitas Islam Indonesia.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan, bantuan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala kemudahan, kesehatan, dan kekuatan yang diberikan selama proses penyusunan Tugas Akhir.
2. Kedua orang tua dan keluarga yang senantiasa memberikan doa, dukungan, serta motivasi kepada penulis.
3. Bapak/Ibu dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberikan arahan, masukan, dan bimbingan selama proses penelitian hingga penyusunan laporan.
4. Seluruh dosen Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia atas ilmu dan pengalaman yang telah diberikan selama masa perkuliahan.
5. Seluruh Laboran yang juga turut serta membantu terjalannya pengujian yang dilakukan selama masa perkuliahan.
6. Teman-teman dan (developer GaG) semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan dukungan selama proses penyelesaian Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki keterbatasan dan belum sepenuhnya sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun guna perbaikan di masa mendatang. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat serta menjadi kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang kesehatan lingkungan dan pengelolaan kualitas udara.

Yogyakarta, 21 Agustus 2026



Aisyah Intan Rizqi

# Efektivitas Adsorben dari Limbah Botol PET dalam Menyerap Ion Cadmium (Cd2+) di Dalam Air

Mahasiswa : Aisyah Intan Rizqi
NIM : 22513132
Program Studi : Teknik Lingkungan
Pembimbing : Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

## ABSTRAK

Tingginya volume limbah botol Polyethylene Terephthalate (PET) di Indonesia yang mencapai 1,2 juta ton per tahun namun hanya didaur ulang sekitar 5%, mendorong perlunya pemanfaatan limbah tersebut menjadi adsorben logam berat guna mendukung ekonomi sirkular sekaligus mengatasi pencemaran kadmium ($Cd^{2+}$) di dalam air. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi karakteristik adsorben dari limbah PET sebelum dan sesudah aktivasi menggunakan KOH, serta mengkaji tingkat efektivitasnya dalam mengadsorbsi kadmium ($Cd^{2+}$). Pengujian menggunakan metode isoterm Langmuir dan Freundlich sebagai acuan penentuan kapasitas maksimum kadmium teradsorbsi per gram adsorben (g/g), dengan nilai regresi linear ($R^2$) mendekati angka 1. Pada tiap variasi yang diuji diperoleh efisiensi removal optimal yang berbeda-beda: variasi massa 75,29%, variasi konsentrasi 83,11%, variasi pH 97,99%, dan variasi waktu 92,51%.

Kata kunci: *Adsorben; $Cd^{2+}$; Efektivitas; Adsorbsi; Optimal*

# *The Effectiveness of Adsorbent from PET Bottle Waste in Absorbing Cadmium (Cd2+) Ions in Water*

*Student : Aisyah Intan Rizqi*
*Student ID : 22513132*
*Program : Environmental Engineering*
*Advisor : Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.*

***ABSTRACT***

*The high volume of Polyethylene Terephthalate (PET) bottle waste in Indonesia—which reaches 1.2 million metric tons per year, yet only about 5% of which is recycled—highlights the need to utilize this waste as a heavy metal adsorbent to support the circular economy while addressing cadmium (Cd2+) pollution in water. This study aims to evaluate the characteristics of the PET waste adsorbent before and after activation using KOH, as well as to assess its effectiveness in adsorbing cadmium ($Cd^{2+}$). Tests were conducted using the Langmuir and Freundlich isotherm methods as a reference for determining the maximum capacity of adsorbed cadmium per gram of adsorbent (g/g), with linear regression values ($R^2$) approaching 1. For each tested variable, different optimal removal efficiencies were obtained: mass variation 75.29%, concentration variation 83.11%, pH variation 97.99%, and time variation 92.51%.*

*Keywords: Adsorbent; Cd2+; Effectiveness; Adsorption; Optimal*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR ..... i
PERNYATAAN ..... ii
PRAKATA ..... iii
ABSTRAK ..... iv
DAFTAR ISI ..... vi
DAFTAR TABEL ..... viii
DAFTAR GAMBAR ..... ix
DAFTAR LAMPIRAN ..... 10
BAB 1 PENDAHULUAN ..... 1
1.1 Latar Belakang ..... 1
1.2 Rumusan Masalah ..... 3
1.3 Tujuan ..... 4
1.4 Manfaat ..... 4
1.5 Ruang Lingkup ..... 4
1.6 Kerangka Berpikir ..... 5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA ..... 6
2.1 Limbah Botol PET ..... 6
2.2 Adsorben dan Aplikasinya ..... 6
2.3 Logam Berat Kadmium ($Cd^{2+}$) ..... 7
2.4 Adsorbsi Logam Berat dengan Adsorben ..... 8
2.5 Pirolisis ..... 9
2.6 Aktivasi Adsorben ..... 10
2.7 Referensi Pustaka ..... 11
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN ..... 14
3.1 Kerangka Penelitian ..... 14
3.2 Pengumpulan Data ..... 15
3.2.1 Data dan Variabel ..... 15
3.2.2 Alat dan Bahan ..... 16
3.3 Proses dan Tahapan Metode Pengujian ..... 18

3.3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian ..... 22
3.4 Analisis Data ..... 22
3.4.1 Isoterm Langmuir ..... 23
3.4.2 Isoterm Freundlich ..... 24
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN ..... 25
4.1 Hasil Tahapan Pembentukan Adsorben ..... 25
4.1.1 Tahapan Pirolisis, *Furnace*, dan Aktivasi Adsorben ..... 25
4.2 Karakterisasi Adsorben dari Limbah PET ..... 27
4.2.1 *Scanning Electron Microscopy* (SEM) ..... 27
4.2.2 *Fourier transform infrared spectroscopy* (FTIR) ..... 30
4.3 Hasil dan Pembahasan Pengujian Efektivitas Adsorbsi Adsorben ..... 33
4.3.1 Hasil Pengujian Massa Optimal ..... 33
4.3.2 Hasil Pengujian pH Optimal ..... 35
4.3.3 Hasil Pengujian Konsentrasi Optimal ..... 36
4.3.4 Hasil Pengujian Waktu Optimal ..... 39
4.4 Pembahasan Hasil Optimal Pengujian Adsorben ..... 40
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN ..... 42
5.1. Kesimpulan ..... 42
5.2. Saran ..... 42
DAFTAR PUSTAKA ..... 43
LAMPIRAN ..... 49

# DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Referensi Penelitian Terdahulu .....11

Tabel 3.1 Gambar dan Merek dari Instrumen dan Bahan .....17

Tabel 4.1 Tabel Pembacaan Hasil Grafik FTIR Adsorben.....32
Tabel 4.2 Perhitungan Efektivitas Adsorbsi Tiap Konsentrasi pada Variasi Massa.....33
Tabel 4.3 Perhitungan Efektivitas Adsorbsi Tiap Konsentrasi pada Variasi pH.....35
Tabel 4.4 Perhitungan Efektivitas Adsorbsi Tiap Konsentrasi pada Variasi Konsentrasi.37
Tabel 4.5 Tabel Isoterm Langmuir dan Isoterm Freundlich .....38
Tabel 4.6 Perhitungan Efektivitas Adsorbsi Tiap Konsentrasi pada Variasi Waktu.....39

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Diagram Alir Kerangka Penelitian.....14
Gambar 3.2 Diagram Alir Pembuatan Adsorben dan Karakterisasi .....18
Gambar 3.3 Diagram Alir Proses Furnace.....19
Gambar 3.4 Diagram Alir Pembuatan Larutan Artificial Kadmium .....19
Gambar 3.5 Diagram Alir Variasi pH .....20
Gambar 3.6 Diagram Alir Variasi Waktu.....20
Gambar 3.7 Diagram Alir Variasi Kadmium .....21
Gambar 3.8 Diagram Alir Variasi Massa Adsorben.....21

Gambar 4.1 Proses Pirolisis.....25
Gambar 4.2 Proses *Furnace* .....26
Gambar 4.3 Proses Aktivasi Adsorben .....27
Gambar 4.4 Pembacaan Adsorben Sebelum dan Sesudah Aktivasi dengan Citra SEM...27
Gambar 4.5 Pembacaan Grafik dengan FTIR *Raw* PET .....30
Gambar 4.6 Pembacaan Grafik dengan FTIR Sebelum *Furnace*.....30
Gambar 4.7 Pembacaan Grafik dengan FTIR Sesudah *Furnace*.....31
Gambar 4.8 Pembacaan Grafik dengan FTIR Adsorben KOH .....31
Gambar 4.9 Grafik Persentase Removal Variasi Massa .....34
Gambar 4.10 Grafik Persentase Removal Variasi pH.....35
Gambar 4.11 Grafik Persentase Removal Variasi Konsentrasi.....37
Gambar 4.12 Grafik Perhitungan Isoterm Langmuir.....38
Gambar 4.13 Grafik Perhitungan Isoterm Freundlich.....38
Gambar 4.14 Grafik Persentase Removal Variasi Waktu .....40

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel Perhitungan Variasi Massa ..... 49
Lampiran 2 Tabel Perhitungan Variasi Konsentrasi ..... 49
Lampiran 3 Tabel Perhitungan Variasi pH ..... 50
Lampiran 4 Tabel Perhitungan Variasi Waktu ..... 50
Lampiran 5 Tabel Gugus Fungsional Puncak IR 1 ..... 51
Lampiran 6 Tabel Gugus Fungsional Puncak IR 2 ..... 54
Lampiran 7 Tabel Gugus Fungsional Puncak IR 3 ..... 56
Lampiran 8 Gambar SEM Raw PET ..... 57
Lampiran 8 Gambar SEM Karbon Aktif (Aktivator KOH) ..... 58
Lampiran 9 Tabel Pembacaan Grafik dengan FTIR Raw PET ..... 59
Lampiran 10 Tabel Pembacaan Grafik dengan FTIR Sebelum *Furnace* ..... 59
Lampiran 11 Tabel Pembacaan Grafik dengan FTIR Sesudah *Furnace* ..... 59
Lampiran 12 Tabel Pembacaan Grafik dengan FTIR Karbon Aktif KOH ..... 59

# BAB 1
# PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Air merupakan salah satu kebutuhan dasar manusia yang sangat penting untuk menunjang kehidupan sehari-hari. Kualitas air yang baik menjadi salah satu faktor utama dalam menjaga kesehatan masyarakat merupakan isu kompleks yang terus dihadapi oleh setiap kabupaten/kota di Indonesia khususnya di daerah padat akan penduduk (Desti & Ula, 2021 & Limuris, 2021). Tingginya angka kepadatan penduduk juga menjadi salah satu faktor yang menyebabkan volume dan beban pencemar air limbah yang dihasilkan turut meningkat setiap tahunnya. (Maizunati, et al., 2017 & Kustanto, 2020). Jika, air limbah yang dihasilkan dibuang tanpa adanya pengolahan yang memadai, kandungan polutan di dalamnya khususnya yang dibahas pada penelitian ini yaitu, kandungan $Cd^{2+}$ dapat mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan makhluk hidup yang tinggal dan bergantung dari badan air tersebut. Maka dari itu, pemerintah Indonesia dalam menanggulangi permasalahan tersebut menetapkan baku mutu air limbah melalui PP No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup serta Permen LH No. 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah, yang mengatur nilai ambang batas maksimum jenis konsentrasi dari berbagai parameter pencemar, termasuk salah satunya yaitu, logam berat $Cd^{2+}$, Sebelum air limbah boleh untuk dibuang ke badan air (JDIH BPK RI, 2014 & JDIH BPK RI, 2021). Meskipun regulasi tersebut telah ditetapkan, tidak dapat dipungkiri pencemaran air limbah yang tidak memenuhi baku mutu masih menjadi permasalahan yang berkelanjutan, sehingga diperlukan teknologi pengolahan air limbah yang efektif untuk menyisihkan zat pencemar yang dibawa oleh air limbah.

Penelitian ini secara khusus memilih ion kadmium sebagai model pencemar logam berat yang diuji sebab terdapat beberapa pertimbangan utama. Pertama, logam $Cd^{2+}$ merupakan logam berat non-esensial yang menandakan bahwa kadmium merupakan zat yang tidak memiliki peran biologis apapun bagi makhluk hidup, meskipun dengan jumlah yang sangat sedikit, $Cd^{2+}$ adalah bentuk ionik dari kadmium (Cd), logam transisi berwarna putih perak, lunak, dan liat, kadmium memiliki nomor atom 48 dan berat atom 112,41 u (Genchi, et al., 2020; Dasharathy, et al., 2022; Li, et al., 2023). Kadmium sendiri telah

diklasifikasikan sebagai karsinogen kelompok 1 (IARC group 1) dan teratogen (sangat toksik), zat kadmium dengan klasifikasi karsinogen menandakan bahwa zat tersebut dapat memicu kanker pada makhluk hidup, adapun klasifikasi kadmium sebagai zat teratogen juga menandakan bahwa kadmium dapat menyebabkan kecacatan lahir, kerusakan fungsi organ, kematian janin, serta malformasi fisik bagi makhluk hidup (Geng & Wang, 2019; Genchi, et al., 2020; Dasharathy, et al., 2022; Li, et al., 2023). Risiko yang ditimbulkan sangat tinggi dibandingkan beberapa logam berat lainnya seperti Fe maupun Zn. Kadmium memiliki kelarutan dan mobilitas yang tinggi di dalam air, sehingga mudah berpindah dan mencari sumber-sumber air serta terakumulasi secara biologis dalam rantai makanan yang menandakan bahwa kadmium juga merupakan salah satu polutan lingkungan yang paling berbahaya bagi kesehatan manusia maupun ekosistem (Hadiyanto, 2022; Pulungan & Wahyuni, 2021; Girikallo, et al., 2022; Farias et al., 2024). Alasan representatif inilah yang menjadikan kadmium sebagai model pencemar yang digunakan selama penelitian dalam mengkaji efektivitas adsorben berbasis limbah botol PET oleh peneliti.

Pada penelitian ini bahan baku yang digunakan dalam membuat adsorben berasal dari limbah botol PET, penggunaan botol PET pada penelitian ini melihat dari beberapa keunggulan yang sesuai dengan sistem lingkungan yang berkelanjutan karena adanya masalah sampah PET yang tidak terkelola secara optimal di Indonesia (Sutalhis et al., 2024). Adsorben (karbon aktif) sendiri ialah, material karbon yang telah melalui proses aktivasi secara fisika atau kimia sehingga memiliki struktur berpori, luas permukaan yang besar, dan daya adsorbsi yang tinggi (Lubis et al., 2020; Afriyie et al., 2025). Adsorben (karbon aktif) secara umum ialah “arang” yang “diaktifkan” hingga mampu menjerap zat pencemar (Lubis et al., 2020). Adsorben (karbon aktif) yang berasal dari limbah botol PET (Polyethylene Terephthalate) memiliki beberapa keunggulan dibandingkan adsorben yang dibuat dari bahan baku lain, terutama dari segi ketersediaan bahan, nilai ekonomis, dan pemanfaatan limbah (De Castro et al., 2018; Hendrasarie & Prihantini, 2020; Gelaw et al., 2024). Limbah PET merupakan salah satu jenis sampah plastik yang jumlahnya terus meningkat sehingga mudah diperoleh dan berpotensi dimanfaatkan kembali sebagai bahan bernilai guna (Manimekalai et al., 2015 & Sutalhis et al., 2024). Dibandingkan dengan bahan baku konvensional seperti tempurung kelapa, kayu, atau batubara yang ketersediaannya dapat dipengaruhi oleh musim, lokasi, maupun proses eksploitasi sumber daya alam, limbah PET cenderung lebih stabil dan melimpah di lingkungan perkotaan (Adibfar et al., 2014 & Ahangar et al., 2021).

Selain itu, pemanfaatan limbah PET sebagai bahan baku adsorben tidak hanya menghasilkan adsorben yang berpotensi memiliki struktur pori dan luas permukaan yang baik, tetapi juga mendukung upaya pengurangan pencemaran plastik melalui konsep daur ulang dan ekonomi sirkular. Oleh karena itu, adsorben berbahan dasar PET menjadi alternatif adsorben yang menjanjikan untuk aplikasi pengolahan air, khususnya dalam penyisihan ion logam berat seperti Cadmium ($Cd^{2+}$). Penggunaan adsorben dari limbah botol plastik polyethylene terephthalate (PET) menjadi alternatif yang ramah lingkungan dan ekonomis karena memanfaatkan sampah plastik yang melimpah dan berpotensi menjadi pencemar lingkungan jika tidak dikelola dengan baik (De Castro et al., 2018; Hendrasarie & Prihantini, 2020; Gelaw et al., 2024). Botol PET yang diolah menjadi adsorben melalui proses aktivasi kimia atau fisika mampu menghasilkan permukaan pori yang besar dan daya serap tinggi sehingga efektif menyerap logam berat seperti kadmium ($Cd^{2+}$) dari air limbah ( De Castro et al., 2018; Oko, et al., 2021; Deri et al., 2024; & Park et al., 2024).

Aktivasi karbon dari botol PET biasanya melibatkan penggunaan agen aktivator seperti KOH (Kalium Hidroksida) untuk membuka pori-pori karbon dan menghilangkan zat pengotor sehingga menghasilkan adsorben yang memiliki kadar air dan abu rendah serta kapasitas adsorbsi yang optimal (Oko, et al., 2021; Deri et al., 2024; Efimov et al., 2024; & Khotimah, et al., 2024). Penelitian secara signifikan dengan efisiensi penyisihan logam berat dapat mencapai lebih dari 90% pada kondisi pH tertentu. KOH bertindak sebagai basa kuat sehingga dapat membuka pori-pori karbon dengan lebih efektif serta menghilangkan zat pengotor seperti zat volatil dan tar dari arang hasil proses pirolisis (Gómez-Serrano, et al., 2021). Penelitian menunjukkan bahwa aktivasi menggunakan KOH dengan konsentrasi dan waktu yang untuk menghasilkan adsorben dengan luas permukaan yang sangat besar dan yang sangat baik untuk kapasitas adsorbsi (Oko, et al., 2021; Deri et al., 2024; Efimov et al., 2024; & Khotimah, et al., 2024).

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1) Bagaimana karakteristik adsorben yang berasal dari limbah PET sebelum dan sesudah aktivasi menggunakan KOH?
2) Bagaimana efektivitas adsorben limbah PET dalam mengadsorbsi kandungan $Cd^{2+}$ di dalam air?

## 1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1) Mengevaluasi karakteristik adsorben limbah PET sebelum dan sesudah aktivasi dengan menggunakan KOH.
2) Mengkaji tingkat efektivitas adsorben dalam mengadsobsi kandungan $Cd^{2+}$ pada air.

## 1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1) Mengembangkan dan menambah literatur ilmiah tentang penerapan konsep zero waste pada pengolahan limbah plastik menjadi produk baru.
2) Mendukung upaya me-minimalisir pencemaran lingkungan dari limbah plastik dan logam berat pada air untuk menciptakan peluang ekonomi baru.
3) Memastikan adsorben limbah PET efektif sebagai adsorben logam berat $Cd^{2+}$, sehingga dapat digunakan untuk pengolahan air limbah dengan kontaminasi $Cd^{2+}$.
4) Penelitian ini memberikan solusi murah dan efektif untuk mengurangi paparan logam berat $Cd^{2+}$ dalam air, sehingga meningkatkan kualitas air dan kesehatan masyarakat.
5) Hasil penelitian dapat menjadi bahan kebijakan pengolahan limbah plastik dan pengendali pencemaran logam berat pada air.

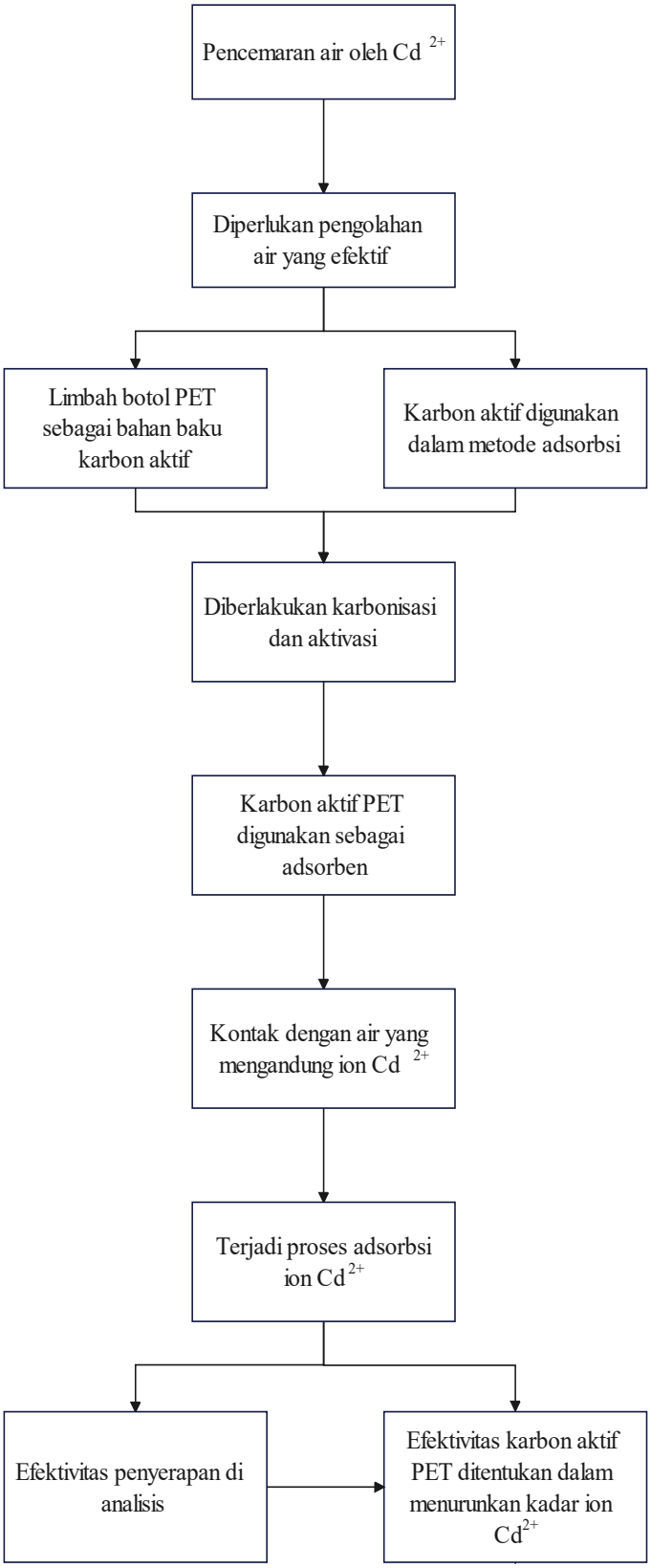
## 1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini mencakup aspek-aspek berikut:

1) Limbah botol PET dikonversi menjadi adsorben dengan adanya larutan KOH sebagai bahan *activated*, dan larutan buatan $Cd^{2+}$ sebagai model pencemar
2) Proses pirolisis dan aktivasi kimia untuk menghasilkan adsorben, serta adanya uji adsorbsi dengan kontrol (pH, waktu kontak, temperatur, dan konsentrasi KOH)
3) Adsorbsi ion $Cd^{2+}$ menggunakan adsorben PET dilakukan dalam larutan kadmium yang disiapkan sendiri.

## 1.6 Kerangka Berpikir

Berikut gambaran kerangka berpikir pada penelitian yang dilaksanakan:




*Gambar 1.1 Diagram Alir Kerangka Berpikir*

# BAB 2
# TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Limbah Botol PET

Botol PET merupakan jenis plastik yang banyak digunakan untuk kemasan minuman. Limbah botol PET juga menjadi salah satu sumber masalah plastik terbesar di dunia dengan jumlahnya yang mampu mencapai hingga bobot ber-ton (Manimekalai, et al., 2015). Limbah ini sulit terurai dan menjadi sumber pencemaran jika tidak dikelola dengan baik (Sutalhis et al., 2024). Namun, PET memiliki kandungan karbon tinggi yang potensial untuk dikonversi menjadi Adsorben (karbon aktif) aktif melalui pirolisis dan aktivasi kimia (Ahangar et al., 2021 &Adibfar et al., 2014). PET sendiri memiliki titik leleh pada rentang suhu 70−80°C ditandai dengan PET mulai melunak (*softening*) (Demirel et al., 2021).

Polyethylene terephthalate (PET) merupakan termoplastik poliester yang dominan digunakan untuk kemasan minuman ringan (*soft drink*), air mineral, maupun produk pangan cair lainnya karena sifatnya yang ringan, transparan, tahan terhadap $CO_2$ dan $O_2$, serta mampu menahan tekanan. Di Indonesia, penggunaan botol PET mencapai 1,2 juta ton per tahun, namun tingkat daur ulangnya hanya 5% (Sutalhis et al., 2024). Akibatnya, sekitar 95% botol bekas PET berujung di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), dibakar terbuka, atau mencemari sungai dan laut. Selain membutuhkan waktu 450–600 tahun untuk terdegradasi secara abiotik, fragmentasi PET menghasilkan mikroplastik (< 5 mm) yang terbukti menganggu rantai makanan akuatik dan manusia melalui jalur bioakumulasi (UNEP, 2020). Secara kimia, PET tersusun atas 62,5 % karbon, 33,3 % oksigen dan 4,2 % hidrogen, sehingga memenuhi syarat sebagai prekursor adsorben (Ahangar et al., 2021 &Adibfar et al., 2014).

## 2.2 Adsorben dan Aplikasinya

Adsorben (karbon aktif) adalah material berpori yang digunakan sebagai adsorben dalam berbagai aplikasi pengolahan air. Keefektifan adsorben dalam menangkap logam berat $Cd^{2+}$ adanya pengaktivasian karbon dengan larutan KOH, adsorben dapat dihasilkan dari berbagai bahan berbasis karbon seperti limbah botol PET (Afriyie et al., 2025). Adsorben merupakan material karbon amorf yang mengandung jaringan pori mikro (< 2 nm), meso (2–50 nm) dan makro (> 50 nm) sehingga memiliki luas permukaan spesifik (500–3 000 $m^2$ $g^{-1}$) dengan volume pori yang besar. Struktur adsorben berperan sebagai adsorben efisien

melalui mekanisme interaksi fisik (gaya van der Waals) maupun kimia (pembentukan kompleks) (Lubis et al., 2020). Pada pengolahan air limbah, adsorben secara umum digunakan untuk menghilangkan zat organik larut, warna, bau, serta logam berat seperti $Cd^{2+}$, $Pb^{2+}$, Cr(VI), dan $Hg^{2+}$ melalui dengan penyaringan dari pori-pori yang ada dari adsorben. Limbah botol PET bekas mudah serta fleksibilitas untuk didapatkan karena ketersediaannya kontinu dengan kandungan karbon tinggi pada proses konversi limbah PET menjadi karbon meliputi pirolisis diikuti aktivasi kimia menggunakan KOH (Oko et al., 2021). KOH berperan seperti, menghidrolisis rantai ester PET menjadi monomer, mengoksidasi karbon membentuk CO dan $CO_2$ yang meninggalkan pori, serta menyisipkan ion $K^+$ yang dapat dihilangkan dengan pencucian, sehingga memperluas struktur pori. Hasil adsorben PET (PAC-PET) menunjukkan luas permukaan BET, volume pori, dan kandungan gugus fungsional oksigenat yang meningkat (Gomez-Serano et al., 2021).

## 2.3 Logam Berat Kadmium ($Cd^{2+}$)

Kadmium merupakan logam berat yang sangat berbahaya, bahkan pada konsesntrasi rendah. Paparan $Cd^{2+}$ dapat menyebabkan kerusakan ginjal, kanker, dan gangguan sistem reproduksi. Oleh karena itu, penghilangan $Cd^{2+}$ dari air limbah sangat penting untuk dilakukan (Guo et al., 2022). Kadmium ($Cd^{2+}$) sendiri ialah logam transisi berat yang berwarna putih perak, lunak, dan tahan terhadap korosi. Di alam, $Cd^{2+}$ terdapat pada bijih seng (sphalerit), batubara, dan mineral fosfat; namun aktivitas antropogenik seperti penambangan, pemurnian logam, industri baterai Ni-Cd, cat, pigmen, serta pupuk fosfat menyebabkan pelepasan $Cd^{2+}$ ke perairan dengan konsentrasi yang sangat besar (Genchi et al., 2020). $Cd^{2+}$ dapat masuk ke tubuh manusia terutama melalui jalur ingestia (air & makanan) dan inhalasi (pernapasan). Karena waktu paruh biologiknya 10–30 tahun, $Cd^{2+}$ terakumulasi di ginjal dan hati; bila terjadi paparan kronik $Cd^{2+}$ dapat menyebabkan proteinuria, glomerulonefritis, hipertensi, keropos tulang (itai-itai), serta karsinogenik (IARC Grup 1) (Nuli et al., 2024; Guo et al., 2022; Genchi et al., 2020).

Sumber utama pencemaran kadmium ($Cd^{2+}$) pada air limbah umumnya berasal dari aktivitas antropogenik pada sektor industri dan pertanina. Kegiatan penambangan dan pemurnian bijih logam *non-ferro* seperti Zn dan Pb merupakan sumber pelepasan $Cd^{2+}$ ke badan air (Genchi, et al., 2020) . Kadmium secara alami hadir sebagai unsur pengotor pada kedua bijih tersebut, sehingga air limbah dari proses penambangan, pengolahan bijih, serta

limpasam air hujan (*run off*) di area tambang menjadi jalur utama $Cd^{2+}$ masuk ke badan air (Mashhadikhan, et al., 2022 & Jagaba et al., 2024). Selain itu, industri manufaktur baterai nikel-kadmium (Ni-Cd), industri pelapisan logam (*electroplating*), produksi pigmen dan pewarna cat, industri percetakan dan fotografi, serta pembuata pupuk fosfat dan pestisida juga menjadi banyaknya contoh industri penyumbang konsentrasi $Cd^{2+}$ pada air limbah industri. Pada sektor pertanina, penggunaan pupuk fosfat yang secara alami mengandung kadmium sebagai pengotor juga dapat terbawa oleh *run off* ke badan air yang berada di sekitarnya (Farias, et al., 2024 & Wang et al., 2024).

## 2.4 Adsorbsi Logam Berat dengan Adsorben

Adsorbsi adalah proses penyerapan ion logam oleh permukaan adsorben. Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi adsorbsi meliputi FTIR, SEM, dan BET; adapun faktor yang dapat mempengaruhi pH, konsentrasi awal logam, waktu kontak, dan suhu (Hassan et al., 2021 & Suo et al., 2020). Adsorben yang disintesis dari limbah botol PET melalui aktivasi KOH menunjukkan efisiensi tinggi dalam adsorbsi ion logam berat, termasuk $Cd^{2+}$, dengan kapasitas adsorbsi yang signifikan (Pereira et al., 2024). Proses aktivasi kimia menggunakan KOH pada suhu tinggi (600–800°C) efektif mengembangkan struktur pori adsorben dari limbah PET, sehingga meningkatkan kemampuan adsorbsi terhadap kadmium dalam larutan aqueous (Lin et al., 2025). Limbah botol PET yang dikonversi menjadi adsorben melalui aktivasi KOH menunjukkan kinerja adsorbsi yang kompetitif terhadap ion $Cd^{2+}$ dibandingkan adsorben komersial (Pereira et al., 2024). Hal ini disebabkan oleh aktivasi dengan KOH pada rasio impregnasi yang optimal yang menghasilkan adsorben dari PET dengan kelompok fungsional oksigen yang meningkat, yang berperan penting dalam adsorbsi kadmium melalui mekanisme kompleksasi kimia (Lin et al., 2025).

Adsorben bekerja seperti spons molekuler, di mana polutan atau gas terperangkap di permukaan pori-porinya melalui proses adsorbsi. Secara lebih mendetail, proses ini terjadi ketika molekul-molekul zat terlarut atau gas berdifusi ke dalam pori-pori adsorben dan menempel pada dinding pori akibat gaya tarik Van der Waals, membentuk lapisan film yang terikat secara fisik. Pada permukaan adsorben yang telah diaktivasi secara kimia, atom-atom kontaminan bahkan dapat membentuk ikatan kimia yang lebih kuat dengan gugus fungsi oksigen, menghasilkan proses kemosorpsi yang selektif dan ireversibel. Dengan cara ini, adsorben menjebak zat warna, logam berat, atau senyawa organik ke dalam ribuan pori-pori mikroskopisnya, sehingga membersihkan cairan atau udara yang melewatinya. Perlu

ditekankan pula bahwa berbeda dengan spons yang menyerap air ke dalam materialnya (absorpsi), adsorben mengadsorbsi polutan dengan cara menempelkannya hanya pada permukaan bagian dalam pori-porinya yang sangat luas (Baari, et al., 2025 & Rao, et al., 2006).

Proses adsorbsi pada adsorben dipengaruhi oleh empat kelompok faktor utama. Pertama, karakteristik karbon itu sendiri meliputi luas permukaan, distribusi ukuran pori, gugus fungsi permukaan, dan ukuran partikelnya. Kedua, sifat adsorbat (polutan) seperti ukuran molekul, polaritas, kelarutan, serta konsentrasi awalnya turut menentukan daya jerapnya. Ketiga, kondisi operasional seperti suhu (yang umumnya menurunkan adsorbsi fisika jika naik), pH (yang mempengaruhi muatan ion polutan), waktu kontak, dan kecepatan pengadukan juga sangat berpengaruh. Keempat, keberadaan zat lain dalam sistem dapat menyebabkan efek kompetisi antarpolutan atau fouling (penyumbatan pori). Memahami faktor-faktor ini sangat penting untuk mengoptimalkan efisiensi adsorbsi dalam aplikasi pemurnian air, udara, atau pengolahan limbah (Deventer, et al., 1991 & Rio, et al., 2005).

Dari beberapa penelitian yang ada menunjukkan bahwa adsorben dari limbah plastik memiliki kapasitas adsorbsi yang cukup tinggi terhadap $Cd^{2+}$**.** Efisiensi adsorbsi sangat bergantung pada parameter operasional. pH optimum umumnya berada pada 6–7 (Gelaw et al., 2024; Al-Malack & Dauda, 2017). Karakterisasi permukaan sangat penting untuk memahami mekanisme. Spektroskopi FTIR. SEM-EDX menunjukkan distribusi kristalit $Cd^{2+}$ pada pori karbon, sementara analisis BET memastikan luas permukaan menurun karena tersumbatnya pori oleh ion $Cd^{2+}$. Isoterm adsorbsi umumnya mengikuti model Langmuir dengan kapasitas maksimum menunjukkan monolayer homogen. PAC-PET (Lin, et al., 2025; Hassan et al., 2021 & Suo et al., 2020).

## 2.5 Pirolisis

Metode yang digunakan dalam penelitian ini termasuk pemanasan limbah plastik (pirolisis) menjadi produk baru (*activated carbon*). Proses ini melibatkan pemanasan plastik dengan suhu tinggi sampai membentuk arang dengan rentang suhu 400−800°C yang akan diaktivasi dengan larutan KOH hingga membentuk *activated carbon* yang dapat mengadsorbsi kandungan kadmium ($Cd^{2+}$) yang terdapat di dalam air (Pereira et al., 2024). Metode ini terbukti efektif dalam mengurangi limbah plastik dan menciptakan produk yang bermanfaat seperti, adanya sistem filtrasi pengolahan air limbah. Kelebihan dari pengolahan

limbah plastik menjadi adsorben adalah kemampuannya untuk mengurangi jumlah limbah yang dihasilkan dan menciptakan produk yang ramah lingkungan (Lin et al., 2025). Selain itu, produk yang dihasilkan dari limbah plastik dapat memiliki daya tahan yang baik dan dapat dipasarkan dengan harga yang kompetitif. Cara yang efisien dalam pengelolaan limbah plastik meliputi pemisahan limbah di sumbernya, penggunaan teknologi modern untuk daur ulang, dan peningkatan kesadaran masyarakat tentang pentingnya pengelolaan limbah. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat mengurangi dampak negatif dari limbah plastik terhadap lingkungan (Mishra, et al., 2024).

## 2.6 Aktivasi Adsorben

Proses aktivasi merupakan langkah krusial dalam produksi karbon aktif karena berperan dalam membuka dan memperluas struktur pori, menghilangkan kotoran, serta meningkatkan luas permukaan spesifik bahan tersebut, sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsinya. Secara umum, terdapat tiga metode yang dikenal untuk mengaktifkan karbon aktif:

1) Aktivasi fisik, yaitu proses aktivasi yang menggunakan zat pengoksidasi berbentuk gas seperti uap, karbon dioksida ($CO_2$), atau udara pada suhu tinggi (biasanya 800–1000°C). Metode ini bekerja dengan mengoksidasi atom karbon pada permukaan bahan baku untuk membentuk pori-pori baru; namun, metode ini umumnya membutuhkan energi yang cukup besar dan waktu pemrosesan yang lebih lama (Zhou et al., 2018 & Mai et al., 2021).
2) Aktivasi kimia, yaitu proses aktivasi dengan merendam atau mengimpregnasi bahan baku menggunakan senyawa kimia aktivator seperti KOH, NaOH, $ZnCl_2$, atau $H_3PO_4$ sebelum dilakukan proses karbonisasi/pirolisis pada suhu yang relatif lebih rendah dibandingkan aktivasi fisika. Senyawa aktivator ini berfungsi sebagai agen dehidrasi dan pembentuk pori yang mendegradasi struktur bahan baku, sehingga dihasilkan karbon dengan luas permukaan dan volume pori yang lebih besar (Lowden et al., 2026; Wei & Wang, 2026).
3) Aktivasi fisika-kimia (kombinasi), yaitu penggabungan dari kedua metode di atas, di mana bahan baku terlebih dahulu dengan proses aktivasi fisika (pemanasan/pirolisis pada suhu tinggi dengan bantuan gas inert atau oksidator) lalu dilakukan perendaman dengan agen kimia (seperti KOH) kemudian

dilanjutkan. Kombinasi ini bertujuan untuk mengoptimalkan pembentukan pori, karena aktivasi kimia berperan membuka struktur awal pori sementara aktivasi fisika menyempurnakan dan memperluas jaringan pori yang telah terbentuk, sehingga dihasilkan karbon aktif dengan luas permukaan, volume pori, dan kapasitas adsorpsi yang lebih optimal dibandingkan jika hanya menggunakan salah satu metode saja (Patel et al., 2023).

## 2.7 Referensi Pustaka

Guna memberikan gambaran yang lebih sistematis mengenai jenis aktivator, kapasitas adsorpsi, serta target polutan yang digunakan pada penelitian-penelitian sebelumnya, ringkasan kajian pustaka terkait aktivasi karbon aktif berbasis PET disajikan pada Tabel 2.1 berikut.

*Tabel 2.1 Referensi Penelitian Terdahulu*

| No. | Jenis Plastik | Aktivasi | Kapasitas adsorbsi | Hasil | Referensi |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | PET | KOH (kombinasi) | 219,7 mg/g | Removal $Pb^{2+}$, waktu kesetimbangan 15 menit, reusable >5 siklus | Conversion of PET bottles into carbonaceous adsorbents for Pb(II) removal from aqueous solutions via KOH activation - ScienceDirect |
| 2 | PET | KOH dan H2SO4 (kombinasi) | 5,85 mg/g | Removal $Cu^{2+}$ 99,30%, reusable >96% hingga 3 siklus | Sustainable Conversion of Waste PET into Porous Activated Carbon for Efficient Cu2+ Elimination from Aqueous Solution \| ACS Omega \| ACS Publications |
| 3 | PET | KOH (kombinasi) | 20,4 mg/g | Adsorbsi zat warna methylene blue | Application of Infrared Pyrolysis and Chemical Post-Activation in the Conversion of Polyethylene Terephthalate Waste into Porous Carbons for Water Purification |
| 4 | PET | KOH dan H2SO4 (kombinasi) | 75-100 mg | removal $Mn^{2+}$ 98%, Cr 69–87%, $Co^{2+}$ 70–88% | O. Alabi-Babalola, E. Aransiola, E. Asuquo, A. Garforth, C. D'Agostino, ChemPlusChem 2024, 89, e202300484. https://doi.org/10.1002/cplu.202300484 |

Beberapa penelitian terdahulu yang peneliti ambil sebagai referensi telah mengkaji pemanfaatan limbah plastik PET sebagai bahan baku adsorben melalui berbagai metode aktivasi. Penelitian mengenai konversi botol PET menjadi adsorben karbon melalui aktivasi kimia menggunakan KOH menunjukkan bahwa adsorben yang dihasilkan memiliki kapasitas adsorpsi sebesar 219,7 mg/g terhadap ion $Pb^{2+}$, dengan waktu kesetimbangan adsorbsi yang tergolong cepat, yaitu 15 menit. Selain kapasitas adsorbsinya yang tinggi, adsorben ini juga menunjukkan stabilitas dan *reusability* yang baik, mampu digunakan kembali lebih dari 5 siklus tanpa penurunan kinerja yang signifikan. Sehingga mengindikasikan bahwa aktivasi KOH efektif dalam membentuk struktur pori yang sesuai untuk penjerapan logam berat kation seperti $Pb^{2+}$ (nomor 1 pada tabel).

Pada penelitian lain (nomor 2 pada tabel), kombinasi aktivator KOH dan $H_2SO_4$ digunakan untuk mengonversi limbah PET menjadi karbon aktif berpori guna menyisihkan ion $Cu^{2+}$ dari larutan. Meskipun kapasitas adsorpsi yang diperoleh relatif kecil yaitu, hanya 5,85 mg/g, efisiensi removal $Cu^{2+}$ yang dicapai justru sangat tinggi, mencapai 99,30%, dengan *reusability* di atas 96% hingga 3 siklus pemakaian. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi aktivator asam dan basa dapat menghasilkan adsorben dengan efisiensi penjerapan yang sangat baik. Meskipun kapasitas totalnya tidak setinggi penelitian lainnya.

Selain itu, terdapat pula penelitian yang mengembangkan metode pirolisis inframerah yang dikombinasikan dengan aktivasi kimia pasca-pirolisis menggunakan KOH untuk mengubah limbah PET menjadi karbon berpori (nomor 3 pada table). Adsorben yang dihasilkan diuji kemampuannya dalam mengadsorpsi pewarna metilen biru dan menunjukkan kapasitas adsorpsi sebesar 20,4 mg/g. Pendekatan pirolisis inframerah ini menawarkan alternatif yang lebih hemat energi dibandingkan pirolisis konvensional. Namun, tetap menghasilkan produk karbon dengan kapasitas adsorbsi yang baik untuk pewarna organik.

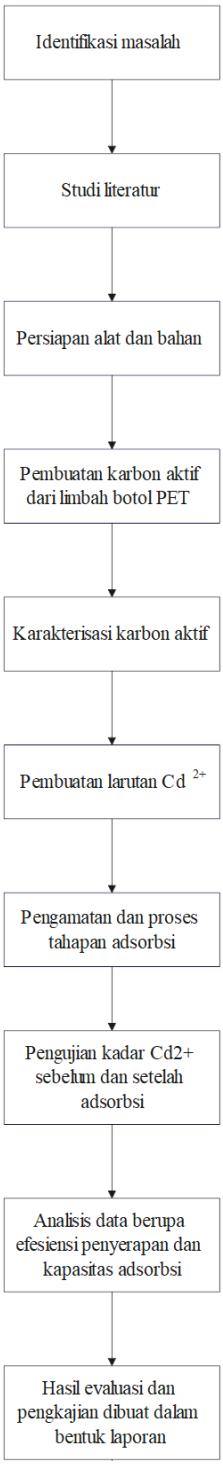
Adapun penelitian yang dilakukan oleh Alabi-Babalola, Aransiola, Asuquo, Garforth, dan D'Agostino, yang diterbitkan pada tahun 2024, memanfaatkan kombinasi KOH dan $H_2SO_4$ untuk mengubah limbah PET menjadi adsorben dengan kapasitas adsorpsi berkisar antara 75 hingga 100 mg/g (nomor 4 pada table). Adsorben tersebut diuji terhadap beberapa jenis logam berat secara bersamaan yaitu, $Mn^{2+}$, Cr, dan $Co^{2+}$ dengan efisiensi penghilangan masing-masing sebesar 98%, 69–87%, dan 70–88%. Hasil ini menunjukkan bahwa adsorben berbasis PET dengan aktivasi gabungan memiliki kemampuan adsorpsi multi-logam yang

cukup baik. Meskipun tingkat efisiensinya bervariasi tergantung pada jenis ion logam yang diadsorbsi. Secara keseluruhan, keempat penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah PET sebagai bahan baku arang aktif merupakan strategi yang menjanjikan untuk menghilangkan logam berat dan pewarna organik dari air limbah, dengan penggunaan KOH sebagai aktivator, baik secara tunggal maupun dikombinasikan dengan $H_2SO_4$ (aktivasi gabungan), telah terbukti meningkatkan kinerja adsorpsi arang aktif, sejalan dengan metode aktivasi fisiko-kimia gabungan yang digunakan dalam penelitian ini.

# BAB 3
# METODOLOGI PENELITIAN

## 3.1 Kerangka Penelitian

Berikut gambaran kerangka penelitian pada pengujian adsorben yang dilaksanakan:




*Gambar 3.1 Diagram Alir Kerangka Penelitian*

Perencanaan penelitian diawali dengan adanya penentuan topik yang dilanjut dengan menetukan permalasahan pada topik yang dibahas, selanjutnya menyelaraskan permasalahan yang dibahas dengan mencari data-data yang membahas permasalahan yang akan diteliti, selanjutnya data-data tersebut diolah dan dikembangkan sebagai landasan dasar penelitian dan membandingkan dengan data lainnya hingga dapat melakukan penelitian dan membuat laporan proposal menggunakan data yang telah didapatkan sebelumnya. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimen, dengan fokus pada analisis efektivitas adsorben dari limbah PET dalam menurunkan kadar $Cd^{2+}$ dalam air dan penggunaan larutan KOH sebagai bahan aktivasi karbon. Adapun dalam tahap prosesnya terdapat pengkarakterisasian dengan mengamati luas permukaan (BET), morfologinya (SEM), serta gugus fungsinya (FTIR).

## 3.2 Pengumpulan Data

### 3.2.1 Data dan Variabel

Dalam penelitian ini pengolahan data menggunakan dua metode yaitu, pengumpulan dan pengolahan data. Pengumpulan dan pengolahan data dilakukan dengan adanya studi literatur, sesudah mendapatkan data dilanjutkan dengan tahapan penelitian yang dilaksanakan di laboratorium pengujian kualitas air dengan menguji derajat keasaman (pH) optimum, waktu kontak optimum, massa adsorben, dan konsentrasi logam optimum. Data-data pengujian tersebut diolah dengan metode isoterm langmuir dan freundlich.

Variabel pada penelitian ini menggunakan variabel bebas dan tetap yang terdiri dari bahan dan parameter penelitian itu sendiri:

1) Variabel tetap
   - Limbah botol PET (*carbonized char*)
   - Larutan aktivasi KOH
2) Variabel bebas
   - Massa adsorben : 5, 10, 20, 40, 50 mg
   - Waktu kontak : 10 menit, 20 menit, 30 menit, 40 menit, 50 menit 1 jam, 1.5 jam, 2 jam, 3 jam. (diaduk 24 jam)
   - Derajat keasaman (pH) : 5, 6, 7, 8, 9
   - Konsentrasi variasi : 20,40, 60, 80, 100 ppm
3) Parameter
   - Konsentrasi kadar logam yang teradsorbsi

### 3.2.2 Alat dan Bahan

Berikut alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian limbah botol PET menjadi adsorben logam berat $Cd^{2+}$ di Laboratorium Kualitas Lingkungan FTDI UII, Sleman, Kaliurang, Daerah Istimewa Yogyakarta.

A. Alat:
   - Desikator
   - Erlenmeyer
   - Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR): Sebelum dan sesudah aktivasi serta sesudah adsorbsi (3 sampel)
   - Kertas saring
   - Labu ukur 100ml
   - Mesin Brunauer-Emmett-Teller (BET): Sebelum dan sesudah aktivasi serta sesudah adsorbsi (3 sampel)
   - Oven
   - Pipet 1000 ppm
   - Reaktor pirolisis
   - Scanning electron microscopy (SEM): Sebelum dan sesudah aktivasi serta sesudah adsorbsi (3 sampel)
   - Spektrofotometri serapan atom (AAS-GF): total 22 sampel pada sub-bab 3.3

B. Bahan:
   - Aktivator KOH 1M
   - Aquades
   - Larutan kadmium 100ml
   - Larutan $NaOH/HNO_3$
   - Limbah botol PET

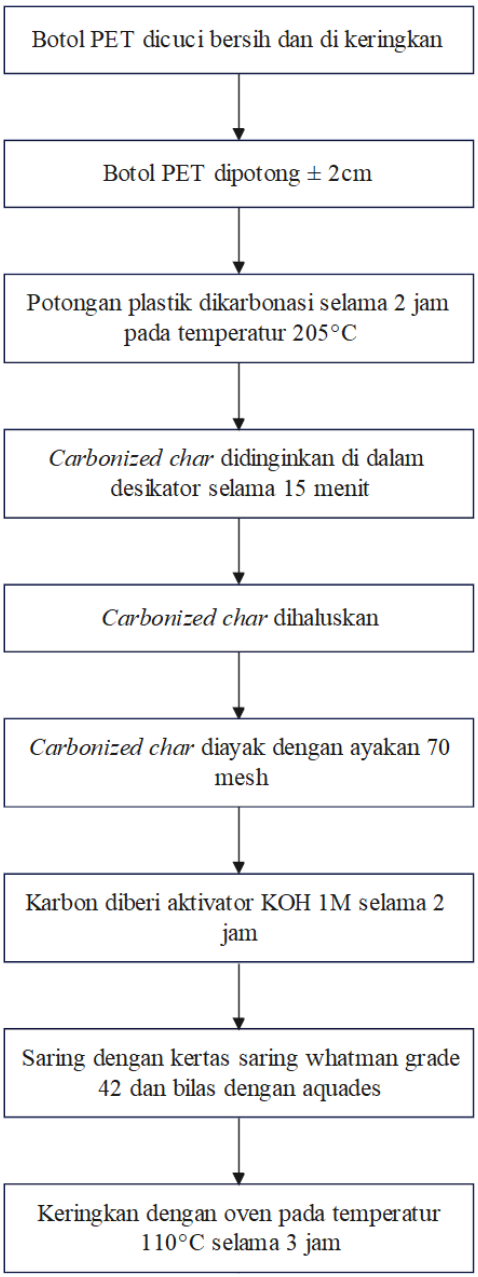
*Tabel 3.1 Gambar dan Merek dari Instrumen dan Bahan*

| No. | Nama dan Gambar | Merek Instrumen yang Digunakan |
|---|---|---|
| **Alat Instrumen** | | |
| 1 |  | AAS-GBC avanta Σ |
| 2 |  | FTIR, IRTracer-100 |
| 3 |  | SEM Phenom Desktop ProXL |
| 4 |  | Reaktor pirolisis WIPRO |
| **Bahan** | | |
| 1 |   | Botol PET Le Minerale |

## 3.3 Proses dan Tahapan Metode Pengujian

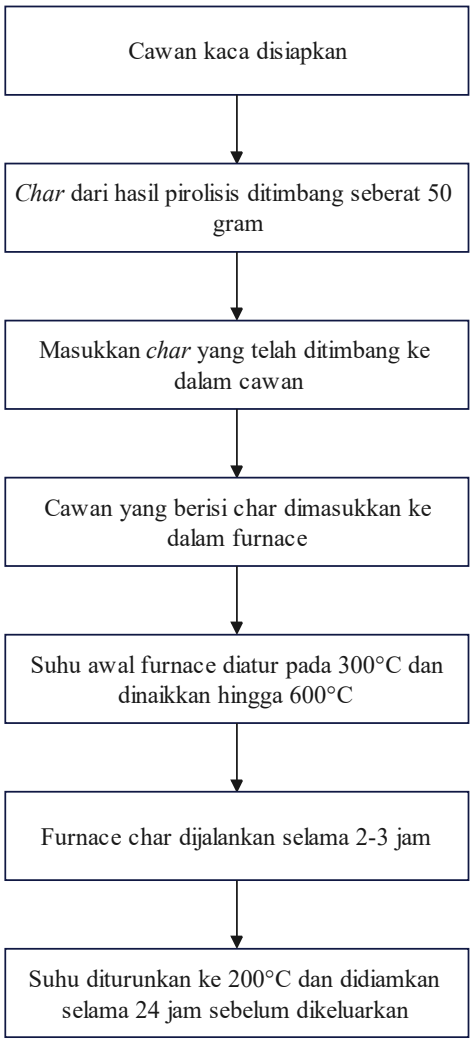
Pada tahapan awal botol PET dipirolisis hingga menjadi *carbonized char*. Selanjutnya dibuat larutan *artificial* kadmium, serta adanya proses adsorbsi dengan bermacam variasi. Variasi tersebut terdiri dari pH, waktu, konsentrasi kadmium, dan massa adsorben. Jumlah sampel variasi yang tertulis saat ini berjumlah 24. Namun, untuk saat ini pada rencana anggaran biaya tetap dituliskan dengan jumlah 30 sampel. Hal ini disebabkan karena alat pirolisis masih dalam tahapan uji percobaan untuk melihat apakah mampu mencapai suhu yang akan digunakan atau tidak. Berikut tiap tahapan proses pengujiannya:

1) Pembuatan adsorben (karbon aktif) dan karakterisasi



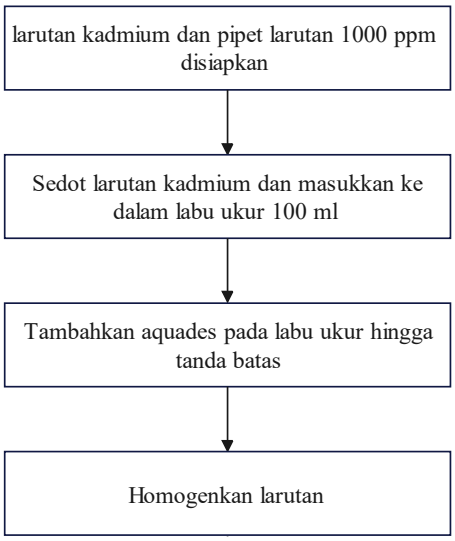

*Gambar 3.2 Diagram Alir Pembuatan Adsorben dan Karakterisasi*

2) Proses *furnace*




*Gambar 3.3 Diagram Alir Proses Furnace*

3) Pembuatan larutan *artificial* kadmium

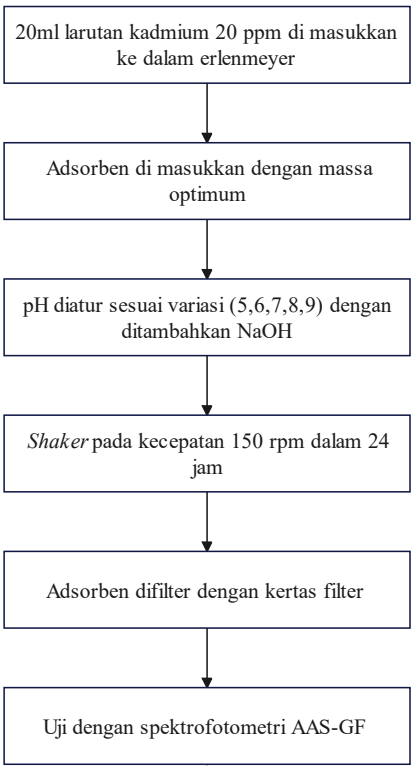



*Gambar 3.4 Diagram Alir Pembuatan Larutan Artificial Kadmium*

4) Proses adsorbsi

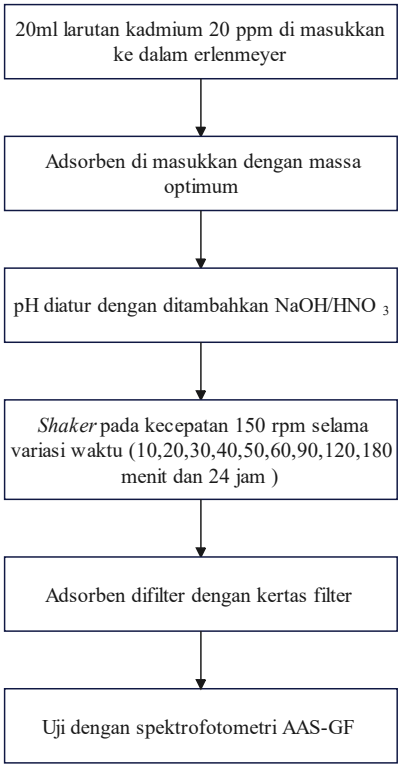
Terdapat empat macam variasi pada proses adsorbsi:

a) Variasi pH



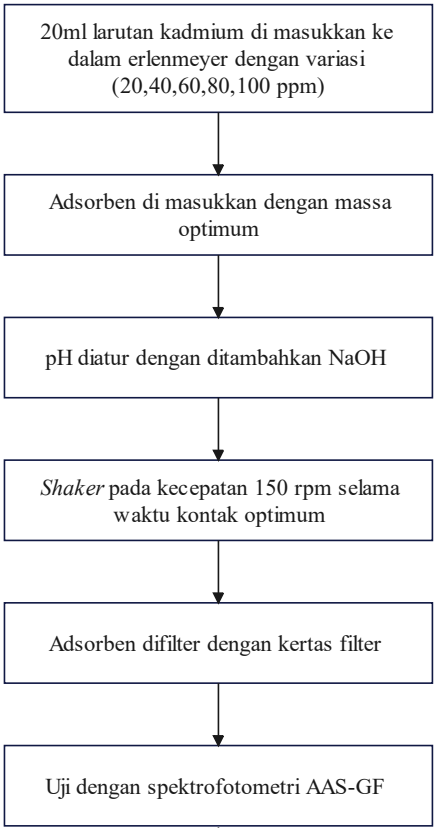

*Gambar 3.5 Diagram Alir Variasi pH*

b) Variasi waktu



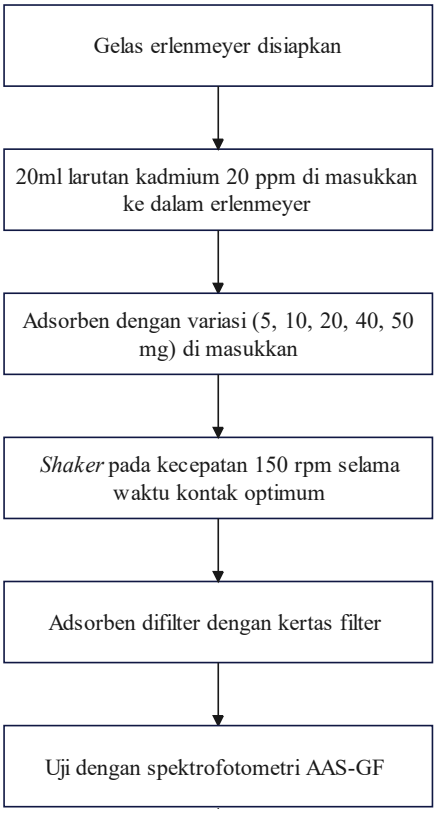

*Gambar 3.6 Diagram Alir Variasi Waktu*

c) Variasi konsentrasi kadmium




*Gambar 3.7 Diagram Alir Variasi Kadmium*

d) Variasi massa adsorben




*Gambar 3.8 Diagram Alir Variasi Massa Adsorben*

### 3.3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi pada penelitian ini dilakukan di wilayah Laboratorium Lingkungan Universitas Islam Indonesia, Sleman, Kaliurang, Daerah Istimewa Yogyakarta. Penelitian ini memiliki fokus dalam menganalisis efektivitas adsorben yang diproduksi dari limbah botol PET dalam menurunkan konsentrasi logam berat kadmium ($Cd^{2+}$) dalam air melalui pendekatan batch eksperimental, serta menentukan variasi penggunaan larutan KOH sebagai bahan pengaktivasi arang dapat membentuk pori yang mengendalikan proses pembentukan karbon yang terkarakterisasi BET, SEM, dan FTIR.

## 3.4 Analisis Data

Metode yang digunakan perhitugan isoterm langmuir dan freundlich untuk mendapatkan jumlah zat yang teradsorbsi dengan memperhatikan uji laboratorium dengan adanya uji sesuai waktu kontak, massa adsorben, optimasi dengan derajat kemasaman (pH), dan hasil konsentrasi kadmium ($Cd^{2+}$) yang teradsorbsi (Ariani & Masluhah, 2025). Berikut dua metode yang dilakukan dalam menganalisis data pada tahap penelitian ini:

1) Persamaan langmuir:

$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{q_{max} \times K_L \times C_e}{1 + K_L \times C_e}$$

Keterangan:

$q_e$ atau $^x/_m$ : kapasitas maksimum kadmium teradsorbsi pergram oleh adsorben ($^g/_g$)

$q_{max}$ : kapasitas maksimum adsorbsi monolayer ($^g/_g$)

$K_L$ : konstanta isoterm langmuir ($^L/_g$)

$C_e$ : konsentrasi kesetimbangan adsorbat ($^g/_L$)

2) Persamaan freundlich:

$$q_e = \frac{x}{m} = K_F \times {C_e}^{1/n}$$

Keterangan:

qe atau $^x/_m$ : kapasitas maksimum kadmium teradsorbsi pergram oleh adsorben ($^g/_g$)

$K_F$ : konstanta isoterm langmuir (g/g)

n : indeks intensitas adsorbsi

Ce : konsentrasi kesetimbangan adsorbat (g/L)

Adapun fokus penelitian melihat dari efesiensi penurunan kadar kadmium dengan adanya perhitungan:

$$\text{Removal\%} = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100$$

Keterangan:

$C_i$ : konsentrasi awal logam (mg/L)

$C_e$ : konsentrasi akhir logam (mg/L)

Serta terdapat perhitungan kapasitas adsorbsi untuk menghitung seberapa kuat penjerapan adsorben dengan larutan aktivasi KOH dapat menampung ion $Cd^{2+}$ didalamnya dengan menggunakan pergitungan:

$$q = \frac{(C_0 - C_1) \times V}{m}$$

Keterangan:

q : kapasitas adsorbsi (mg/g)

$C_0$ : konsentrasi awal adsorbat (mg/L)

$C_1$ : konsentrasi kesetimbangan adsorbat (mg/L)

V : volume larutan yang digunakan (Liter)

m : massa adsoban (gram)

### 3.4.1 Isoterm Langmuir

Teori isoterm Langmuir pertama kali dikemukakan oleh Irving Langmuir pada tahun 1918 dalam bukunya yang berjudul "*The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum"* yang dipublikasikan pada *Journal of the American Chemical Society*. Menurut Langmuir, proses adsorbsi terjadi melalui pembentukan lapisan tunggal (monolayer) molekul adsorbat pada permukaan adsorben yang bersifat homogen, dengan sejumlah situs aktif yang terbatas dan memiliki energi adsorbsi yang seragam pada setiap situsnya. Langmuir mendasarkan teorinya pada beberapa asumsi utama yaitu, setiap situs aktif pada permukaan adsorben hanya mampu mengikat satu molekul atau ion adsorbat, tidak terjadi interaksi antar molekul adsorbat yang telah teradsorbsi satu sama lain, energi adsorbsi bersifat konstan dan tidak bergantung pada tingkat kejenuhan permukaan, serta proses adsorbsi bersifat *reversible*, di mana pada kesetimbangan, laju adsorbsi sama dengan laju desorbsi molekul dari permukaan. Ketika seluruh situs aktif pada permukaan telah terisi oleh

molekul adsorbat, maka kapasitas adsorbsi akan mencapai titik jenuh maksimum ($q_{max}$), dan penambahan konsentrasi adsorbat selanjutnya tidak lagi meningkatkan jumlah zat yang teradsorbsi (Langmuir, 1918).

### 3.4.2 Isoterm Freundlich

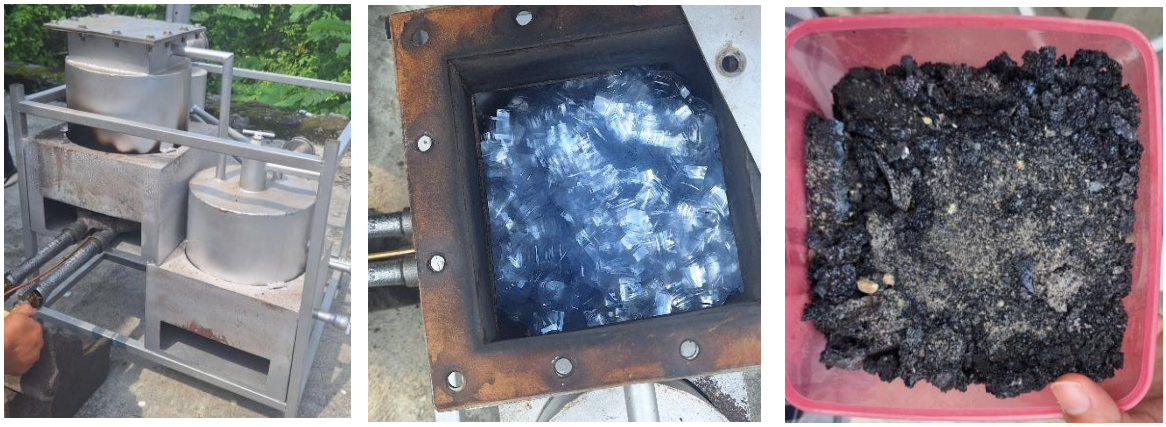
Teori isoterm Freundlich pertama kali dikemukakan oleh Herbert Max Finlay Freundlich pada tahun 1906 dalam bukunya yang berjudul "*Over the Adsorption in Solution"* yang dipublikasikan pada *The Journal of Physical Chemistry*. Di dalam bukunya Freundlich menjabarkan bahwa permukaan adsorben bersifat heterogen, yaitu memiliki situs-situs aktif dengan tingkat energi atau afinitas pengikatan yang bervariasi terhadap adsorbat, mulai dari situs yang berikatan sangat kuat hingga situs yang berikatan lemah. Teori isoterm Freundlich mengasumsikan tidak adanya batas kapasitas adsorbsi maksimum yang pasti sebagaimana pada Langmuir, sehingga dapat menggambarkan proses adsorbsi yang bersifat multilayer (berlapis) pada permukaan yang tidak seragam. Teori isoterm Freundlich bersifat empiris murni dan diturunkan langsung dari data eksperimen, bukan dari penurunan teoritis berdasarkan hukum-hukum termodinamika sebagaimana Langmuir (Freundlich, 1906).

# BAB 4
# HASIL DAN PEMBAHASAN

## 4.1 Hasil Tahapan Pembentukan Adsorben

### 4.1.1 Tahapan Pirolisis, *Furnace*, dan Aktivasi Adsorben

Tahapan pirolisis ini disebut juga sebagai proses karbonisasi. Tahap karbonisasi dilakukan dengan menggunakan 98 botol PET yang dipanaskan dan dialiri dengan gas $CO_2$ dengan keadaan ruang tungku kedap akan $O_2$ yang memaksimalkan pembakaran PET pada suhu puncaknya 205℃ dalam kurun waktu 25 menit hingga, memantau penurunan suhu stagnan pada suhu 135℃ dalam kurun waktu 20 menit sesudah suhu puncak. Total keseluruhan pirolisis memakan waktu 45 menit + 24 jam untuk masa pendinginan suhu untuk pengambilan karbon di-keesokan harinya. Sedangkan, pirolisis yang hanya mencapai suhu puncak 205℃ tersebut belum dapat merobah karbon menjadi arang yang sesuai. Umumnya, proses karbonisasi yang optimal memerlukan suhu berkisar 400–600 ℃ agar diperoleh arang dengan kandungan karbon terikat (fixed carbon) yang lebih tinggi.



*Gambar 4.1 Proses Pirolisis*

Sesudah hasil pembakaran PET (karbon) yang dibutuhkan telah didapatkan, karbon diberlakukan proses *furnace*. Proses *furnace* sendiri bertujuan guna karbon dapat menjadi arang yang sesuai. Proses *furnace* dilakukan dengan suhu yang lebih tinggi lagi yaitu dari suhu 300℃ yang dinaikkan hingga suhu 600℃. Terdapat perbedaan yang dihasilkan, pada saat karbon belum menjadi arang yang sesuai, teksturnya cenderung kasar dan ukurannya lebih besar. Sedangkan, ketika karbon telah menjadi arang yang sesuai teksturnya cenderung lebih halus dan mudah untuk ditumbuk (lebih getas).

Jika, dibandingkan dengan penelitian terdahulu, suhu puncak pirolisis yang dicapai penelitian ini (205°C) masih jauh lebih rendah dibandingkan suhu pirolisis yang umum digunakan pada konversi limbah PET menjadi adsorben. Pada penelitian yang dilakukan oleh Ahangar et al. (2021) karbonasi limbah botol PET pada suhu 450°C selama 4 jam dengan laju pemanasan 3°C/menit memperoleh karbon yang sangat cocok untuk dijadikan adsorben. Sejalan dengan penelitian ini, Efimov et al. (2024) juga menjelaskan bahwa proses pirolisis limbah PET dilakukan pada rentang suhu 400−800°C, yang dimana suhu 400°C sebagai batas suhu awal untuk mendapatkan karbon dengan luas permukaan yang memadai. Kedua penelitian tersebut menguatkan argumentasi bahwa pada penelitian yang dilakukan oleh peneliti masih belum cukup untuk mengubah PET menjadi karbon yang memiliki struktur pori yang optimal, sehingga memerlukan tahapan *furnace* sebagai tahapan lanjutan dengan adanya pemanasan berkisar 300−600°C.



*Gambar 4.2 Proses Furnace*

Pengaktivasian karbon melibatkan aktivasi kimia dan fisika untuk membuka pori-pori karbon dan meningkatkan luas permukaan, yang berperan untuk menyerap ion $Cd^{2+}$ dari air. Tujuan pengaktivasian karbon adalah untuk meningkatkan kemampuan adsorbsi dan porositas adsorben, sehingga lebih efektif dalam berbagai aplikasi pengolahan air. Aktivasi karbon menggunakan larutan Kalium Hidroksida (KOH), yang merupakan senyawa anorganik bersifat basa kuat (alkalin), dan higroskopis (mudah menyerap air, gampang terlarut). Pengaktivasian ini berguna agar karbon yang dihasilkan bermuatan negatif $OH^-$ sehingga dapat menarik ion $Cd^{2+}$ yang merupakan ion bermuatan positif.

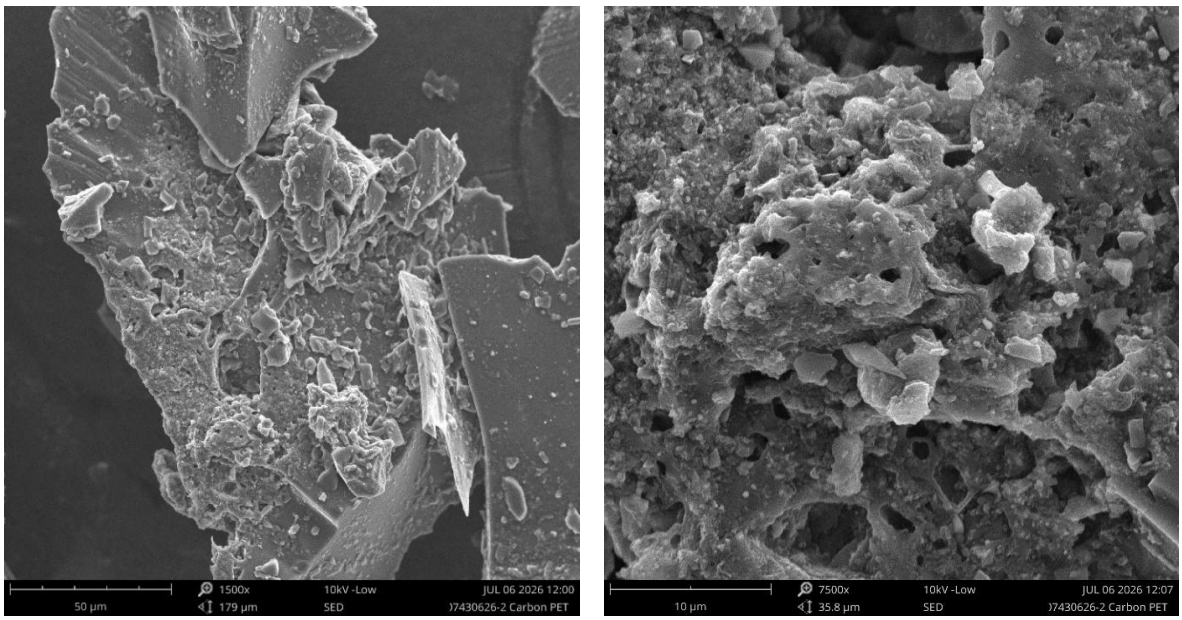



*Gambar 4.3 Proses Aktivasi Adsorben*

## 4.2 Karakterisasi Adsorben dari Limbah PET

### 4.2.1 *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Pembacaan *scanning electron microscopy* (SEM) dilakukan oleh peneliti sebagai tahapan karakterisasi karbon dari limbah PET yang terbentuk dari adanya karbonisasi pada tahapan pirolisis dan furnace. Pembacaan SEM guna melihat terbentuknya pori-pori pada permukaan karbon selama proses karbonisasi dan furnace terjadi. Pori-pori yang terbentuk dari kedua tahapan tersebut menjadi wadah bagi ion $Cd^{2+}$ menempel pada permukaan karbon. Berikut hasil citra SEM dari adanya pembacaan pori yang terbentuk pada karbon sebelum dan sesudah aktivasi:




*(a)* *(b)*

*Gambar 4.4* (a)Pembacaan Adsorben Sebelum Aktivasi dengan Citra SEM; (b)Pembacaan Adsorben Sesudah Aktivasi dengan Citra SEM

Berdasarkan citra SEM sampel karbon PET sebelum diaktivasi (*Carbon* PET) yang diperoleh pada perbesaran 1.500 kali dengan tegangan akselerasi 10 kV menggunakan mode Secondary Electron Detector (SED), terlihat morfologi permukaan yang masih didominasi oleh struktur padat dan masif dengan sedikit rongga yang tersebar tidak merata. Permukaan sampel tampak kasar dan bergerindil (irregular), dengan tekstur berbutir halus (fine granular texture) yang menyelimuti hampir seluruh area permukaan, mengindikasikan bahwa material masih dalam bentuk arang hasil karbonisasi awal yang belum mengalami pembentukan pori secara optimal. Beberapa lubang atau rongga kecil yang teramati pada citra kemungkinan besar merupakan pori bawaan dari struktur asli material PET atau hasil pelepasan gas volatil selama proses pirolisis. Ukuran skala 50 µm pada citra menunjukkan bahwa rongga-rongga yang tampak umumnya berdimensi mikrometer dengan distribusi yang tidak seragam serta jarak antarpori yang relatif jauh dan tidak saling terhubung. Struktur permukaan yang padat dan minim porositas ini secara umum mengindikasikan bahwa material *Carbon* PET pada tahap ini masih memiliki luas permukaan spesifik yang rendah sehingga belum optimal untuk digunakan sebagai adsorben.

Selanjutnya, dilakukan pembacaan *scanning electron microscopy* (SEM) oleh peneliti sebagai tahapan karakterisasi karbon dari limbah PET yang terbentuk dari adanya penambahan aktivator. Aktivator yang digunakan oleh peneliti merupakan larutan kalium hidroksida (KOH) dengan tingkat keasaman tinggi (basa kuat) menyentuh angka pH 10-13,5. Pada pembacaan pori dari adsorben (karbon aktif) yang digunakan peneliti, perlu adanya pengamatan dengan melihat hasil pembacaan terbentuknya struktur pori pada permukaan karbon. Pori-pori yang terbentuk berguna untuk menjerap kontaminan (ion $Cd^{2+}$) di dalam air yang hendak disisihkan. Dengan kata lain, pori-pori yang terbentuk berfungsi sebagai ruang menempelnya ion $Cd^{2+}$.

Selanjutnya, berdasarkan citra SEM yang diperoleh pada perbesaran 7.500 kali dengan tegangan akselerasi 10 kV menggunakan mode Secondary Electron Detector (SED), sampel adsorben hasil aktivasi KOH (*Carbon*-K) menunjukkan morfologi permukaan yang kasar, tidak beraturan, dan berpori. Struktur seperti gumpalan granular dengan permukaan bergelombang di bagian tengah citra menunjukkan area yang telah mengalami reaksi aktivasi lebih intensif oleh KOH. Reaksi antara KOH dan karbon pada suhu tinggi umumnya menghasilkan pembentukan pori melalui mekanisme interkalasi logam kalium ke dalam struktur karbon serta reaksi redoks yang melarutkan sebagian atom karbon, sehingga menghasilkan rongga-rongga baru pada permukaan material. Rongga gelap yang teramati

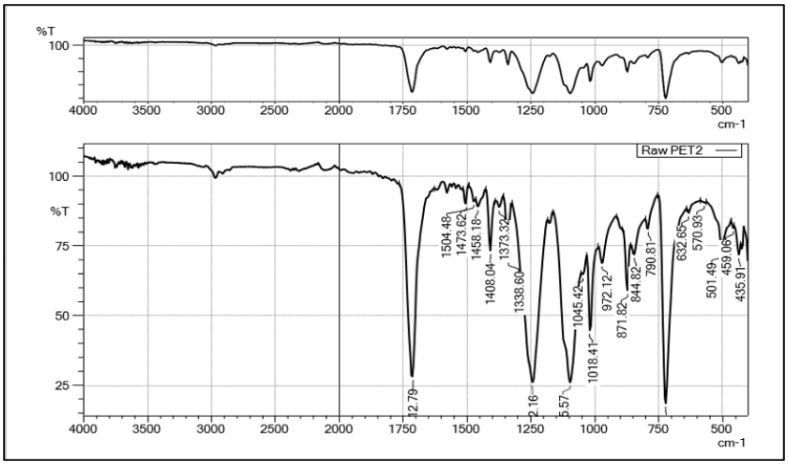
pada beberapa titik citra kemungkinan besar merupakan makropori atau mesopori hasil proses aktivasi tersebut, yang secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan luas permukaan spesifik material.

Struktur filamen atau serat halus yang tersebar di sekitar partikel utama diduga merupakan residu karbon amorf atau sisa produk aktivasi yang belum sepenuhnya larut ataupun tercuci pada tahap pemurnian (washing) pasca aktivasi. Keberadaan struktur ini, meskipun dalam jumlah kecil, dapat mempengaruhi kemurnian dan homogenitas permukaan adsorben yang dihasilkan. Secara umum, morfologi permukaan yang kasar, berongga, dan memiliki banyak celah antarpartikel ini merupakan ciri khas adsorben dengan luas permukaan tinggi, yang berkorelasi positif dengan kapasitas adsorbsi material terhadap molekul target, baik dalam aplikasi penyerapan gas, logam berat, maupun zat warna. Perbedaan tekstur antara area yang halus dan area yang sangat berpori pada satu citra yang sama juga mengindikasikan bahwa proses aktivasi KOH belum berlangsung secara seragam di seluruh permukaan sampel, sehingga masih terdapat variasi tingkat porositas antarpartikel.

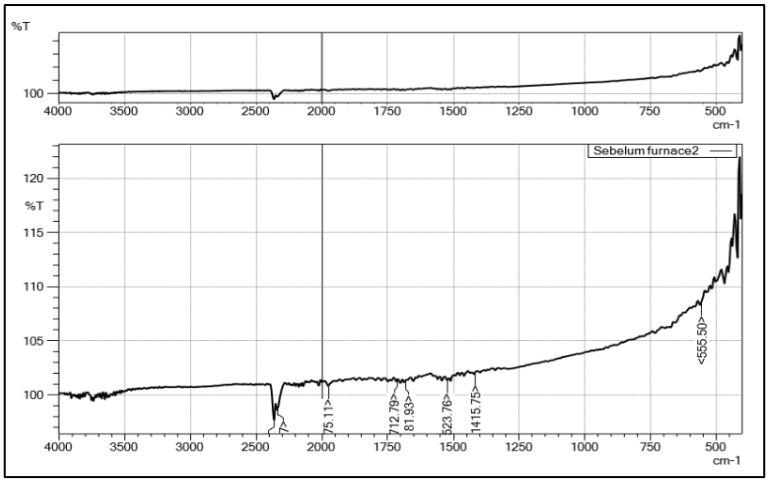
Jika dilakukan perbandingan dengan citra SEM *Carbon*-K yang telah mengalami proses aktivasi menggunakan larutan KOH, tampak perbedaan morfologi yang cukup signifikan antara kedua sampel tersebut. Permukaan *Carbon* PET (sebelum aktivasi) cenderung lebih padat, halus pada beberapa area, dan minim rongga yang saling terhubung, sedangkan permukaan *Carbon*-K menunjukkan struktur yang jauh lebih kasar, bergelombang, dan dipenuhi oleh gumpalan granular dengan banyak celah antarpartikel. Perbedaan ini menegaskan bahwa proses aktivasi kimia menggunakan KOH efektif dalam membentuk pori baru melalui mekanisme interkalasi logam kalium serta reaksi redoks yang melarutkan sebagian atom karbon pada permukaan material. Selain itu, rongga yang teramati pada *Carbon* PET umumnya berukuran lebih kecil dan terisolasi, sementara pada *Carbon*-K rongga yang terbentuk cenderung lebih besar dan tampak saling berhubungan membentuk jaringan pori yang lebih kompleks. Secara keseluruhan, perbandingan kedua citra ini memberikan bukti visual yang mendukung bahwa aktivasi KOH berperan penting dalam meningkatkan porositas dan luas permukaan karbon, sehingga material *Carbon*-K berpotensi memiliki kapasitas adsorbsi yang lebih baik dibandingkan *Carbon* PET yang belum diaktivasi.

### 4.2.2 *Fourier transform infrared spectroscopy* (FTIR)

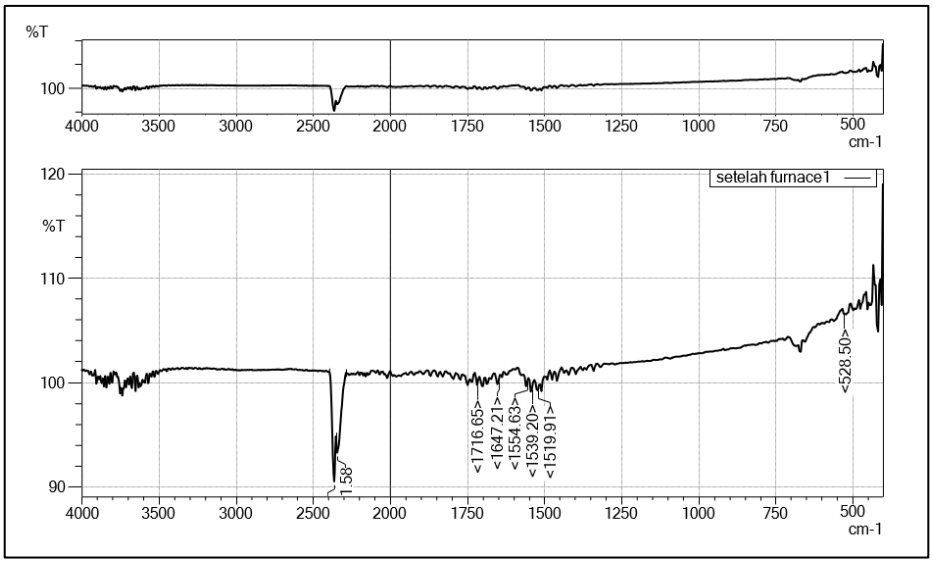
Pembacaan FTIR diambil dari sampel botol PET sebelum dipirolisis, arang sebelum *furnace*, arang sesudah *furnace*, dan arang setelah diberi aktivator KOH. Pembacaan FTIR dilakukan guna untuk melihat perbedaan gugus fungsi material PET sebelum di pirolisis, sebelum *furnace*, sesudah *furnace,* dan setelah diberi aktivator KOH. Perbedaan dilihat dengan mengamati dan menganalisis hasil pembacaan gelombang FTIR dengan panduan tabel pembacaan karakteristik gugus fungsional. Perbedaan yang didapat digunakan untuk melakukan perbandingan gugus fungsi pada tiap proses pembuatan adsorben. Hal ini juga dilakukan karena yang berperan penting dalam proses adsorbsi ialah, pori dan gugus fungsi, dengan hasil pembacaan sebagai berikut:



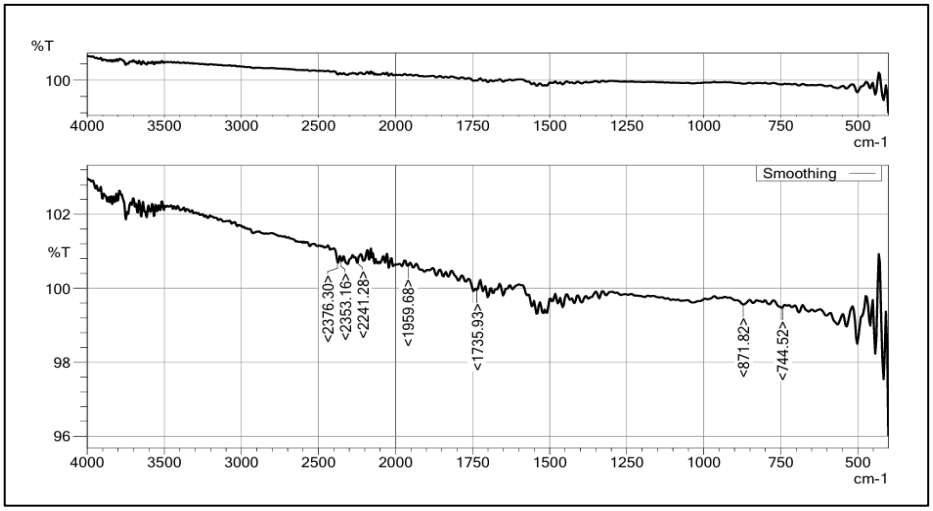

*Gambar 4.5 Pembacaan Grafik dengan FTIR Raw PET*




*Gambar 4.6 Pembacaan Grafik dengan FTIR Sebelum Furnace*




*Gambar 4.7 Pembacaan Grafik dengan FTIR Sesudah Furnace*




*Gambar 4.8 Pembacaan Grafik dengan FTIR Adsorben KOH*

Dilihat dari keempat tabel dan gambar yang telah dilampirkan dari hasil pembacaan FTIR terdapat perbedaan gelombang pada arang yang belum melewati proses *furnace* dengan arang yang telah melewati proses *furnace*. Namun, biasanya perbedaan gugus fungsi paling terlihat pada sampel yang telah diaktivasi dengan larutan pengaktivasi (KOH: Kalium Hidroksida). Berdasarkan hasil pembacaan FTIR pada sampel *raw* PET menunjukkan puncak serapan yang khas dan tajam pada berbagai bilangan gelombang, dengan beberapa puncak yang memiliki intensitas terkoreksi cukup tinggi, yaitu pada 721,38 $cm^{-1}$ (73,41), 1712,79 $cm^{-1}$ (68,70), 1242,16 $cm^{-1}$ (60,89), dan 1095,57 $cm^{-1}$ (47,95). Puncak pada bilangan gelombang 1712,79 $cm^{-1}$ mengindikasikan keberadaan gugus fungsi C=O (karbonil) yang berasal dari gugus ester pada rantai polimer PET, sedangkan puncak pada 1242,16 $cm^{-1}$ dan 1095,57 $cm^{-1}$ menunjukkan vibrasi ulur gugus C–O–C (eter/ester) yang

merupakan ciri khas struktur PET. Selain itu, puncak pada 721,38 $cm^{-1}$, 871,82 $cm^{-1}$, dan 1018,41 $cm^{-1}$ berasosiasi dengan vibrasi tekuk C–H aromatik di luar bidang (*out-of-plane bending*), yang berasal dari cincin benzena tersubstitusi *para* pada struktur PET. Kehadiran gugus fungsi ester dan aromatik yang lengkap ini membuktikan bahwa sampel *raw* PET masih memiliki struktur polimer yang utuh sebelum mengalami proses pirolisis.

*Tabel 4.1 Tabel Pembacaan Hasil Grafik FTIR Adsorben*

| **Bilangan gelombang ($cm^{-1}$)** | | | | **Gugus fungsi** |
|---|---|---|---|---|
| **Raw PET** | **Sebelum furnace** | **Setelah furnace** | **Setelah aktivasi KOH** | |
| 1712,79 | 1712,79 | 1716,65 | 1735,93 | C=O (karbonil) |
| 1242,16; 1095, 57 | - | - | - | C–O–C (eter/ester) |
| 1018,41 | - | 1647,21 | 744,52; 87,82 | C–H aromatik / C=C aromatik |

Setelah sampel diproses menjadi arang sebelum *furnace*, jumlah puncak serapan berkurang drastis dan hanya tersisa delapan titik dengan label "*Below*" yang menandakan intensitas serapan sangat lemah, berkisar antara 97,63–108,50 %T yang mendekati garis dasar (*baseline*). Puncak gugus karbonil pada 1712,79 $cm^{-1}$ masih terdeteksi, tetapi dengan intensitas yang jauh lebih lemah dibandingkan pada sampel *raw* PET, sedangkan puncak khas gugus ester C–O–C pada kisaran 1095–1242 $cm^{-1}$ sudah tidak lagi teramati secara jelas. Hal ini menunjukkan bahwa proses pirolisis awal telah menguraikan sebagian besar gugus fungsi organik pada rantai PET, sehingga struktur material mulai berubah menjadi kerangka karbon amorf. Perubahan ini merupakan indikasi awal terjadinya proses karbonisasi yang menghilangkan gugus-gugus polar dan menyisakan struktur karbon yang lebih sederhana.

Pada tahap arang sesudah *furnace* dan karbon teraktivasi KOH, pola serapan yang teramati semakin menyerupai hasil pada tahap sebelum *furnace*, yaitu berupa puncak-puncak lemah dengan nilai %T mendekati 100, seperti pada bilangan gelombang 528,50 $cm^{-1}$, 1519,91 $cm^{-1}$, 1647,21 $cm^{-1}$, dan 1716,65 $cm^{-1}$. Puncak pada 1716,65 $cm^{-1}$ yang mendekati posisi gugus karbonil pada sampel sebelumnya menunjukkan bahwa sisa gugus C=O masih ada, tetapi dengan intensitas yang semakin melemah, sementara puncak pada 1647,21 $cm^{-1}$ dapat dikaitkan dengan vibrasi ulur C=C aromatik atau cincin karbon terkondensasi. Hasil pembacaan pada Tabel 4.4 yang merupakan data hasil *smoothing* juga memperlihatkan pola

serupa dengan puncak-puncak lemah pada 744,52 $cm^{-1}$, 871,82 $cm^{-1}$, dan 1735,93 $cm^{-1}$, yang mengindikasikan sisa vibrasi C–H aromatik dan gugus karbonil dalam jumlah sangat kecil. Minimnya variasi dan intensitas puncak pada tahap ini menegaskan bahwa proses *furnace* telah menyempurnakan proses karbonisasi dengan menghilangkan hampir seluruh gugus fungsi polar yang sebelumnya ada pada material.

Secara keseluruhan, perbandingan pada Tabel 4.1 memperlihatkan tren penurunan jumlah dan intensitas gugus fungsi secara bertahap seiring dengan berjalannya proses pirolisis dan *furnace*. Sampel *raw* PET memiliki gugus fungsi yang lengkap dan intensitas serapan yang kuat, terutama gugus karbonil (C=O), eter/ester (C–O–C), dan aromatik (C–H), sedangkan pada tahap arang sebelum dan sesudah *furnace* gugus-gugus tersebut mengalami degradasi sehingga hanya menyisakan serapan lemah yang mendekati garis dasar. Penurunan ini mengindikasikan bahwa struktur polimer PET yang semula kompleks berubah menjadi struktur karbon yang lebih sederhana dan cenderung amorf akibat pelepasan senyawa volatil selama proses termal. Perubahan gugus fungsi ini menjadi dasar penting dalam analisis karakteristik pori material adsorben, karena berkurangnya gugus fungsi permukaan sejalan dengan terbentuknya struktur pori yang berperan dalam proses adsorbsi.

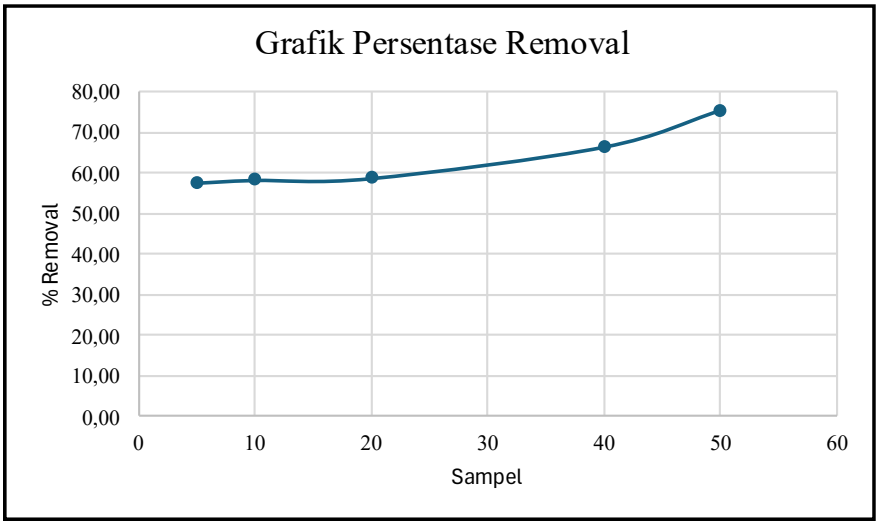
## 4.3 Hasil dan Pembahasan Pengujian Efektivitas Adsorbsi Adsorben

### 4.3.1 Hasil Pengujian Massa Optimal

Pada pengujian massa optimal, peneliti melakukan pengujian karbon dengan variasi massa yang hendak di uji yaitu, 5, 10, 20, 40, dan 50 gram. Larutan $Cd^{2+}$ *artificial* yang hendak diuji dilakukan pengenceran dengan faktor pengenceran 3,33 dengan tujuan agar terbaca oleh instrumen AAS pada skala 0,5-5 untuk ion $Cd^{2+}$. Hal ini guna melihat variasi massa karbon dengan nilai persenan *removal* paling efisien dalam mengadsorbsi ion $Cd^{2+}$. Pembacaan konsentrasi ion Cd2+ yang telah diadsorbsi dibantu dengan adanya instrumen AAS dan dilakukan perhitungan, kemudian data perhitungan dibuat ke dalam bentuk grafik:

*Tabel 4.2 Perhitungan Efektivitas Adsorbsi Tiap Konsentrasi pada Variasi Massa*

| VARIASI MASSA | | |
|---|---|---|
| **Massa Adsorben (mg)** | **Persenan Adsorbsi (%)** | **Kapasitas Adsorbsi (mg/g)** |
| 5mg | 57,46 | 42,15 |
| 10mg | 58,14 | 21,33 |
| 20mg | 58,57 | 10,74 |
| 40mg | 66,29 | 6,08 |
| 50mg | 75,29 | 5,52 |




*Gambar 4.9 Grafik Persentase Removal Variasi Massa*

Dari perhitungan di atas maka peneliti telah dapat menentukan hasil massa optimal dengan yang ditunjukkan dari hasil perhitungan persentase *removal* yang paling tinggi nilainya. Pada penentuan massa optimum dilakukan perhitungan yang meliputi penamaan sampel, konsentrasi sampel sesuai dengan pembacaan AAS, faktor pengenceran yang digunakan peneliti digunakan dalam menentukan takaran konsentrasi $Cd^{2+}$ agar terbaca pada instrumen AAS, massa adsorbsi, rata-rata massa adsorbsi, dan kapasitas adsorbsi. Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan oleh peneliti menunjukkan persentase *removal* paling besar senilai 75,29% pada 50 mg sampel adsorben yang digunakan sebagai adsorben. Peningkatan efisiensi adsorbsi terjadi sebab besar nilai sampel adsorben yang digunakan maka, semakin banyak pula permukaan aktif *active sites* yang mengikat ion $Cd^{2+}$.

Namun, terdapat penjelasan untuk setiap partikel adsorben sebab ia memiliki pori-pori dan gugus fungsi pada permukaannya yang berperan sebagai tempat berlangsungnya proses adsorbsi. Saat massa adsorben ditambah, jumlah partikel adsorben di dalam larutan juga meningkat sehingga jumlah situs aktif yang berinteraksi dengan ion $Cd^{2+}$ juga menjadi lebih banyak. Akibatnya, peluang ion $Cd^{2+}$ untuk bertumbukan dan terikat pada permukaan adsorben semakin besar, sehingga konsentrasi $Cd^{2+}$ yang tersisa di dalam larutan semakin berkurang dan persentase removal meningkat. Selain itu, penambahan massa adsorben juga meningkatkan total luas permukaan kontak antara adsorben dan larutan. Permukaan kontak yang meluas mengakibatkan banyak ion $Cd^{2+}$ yang berdifusi menuju pori-pori adsorben yang kemudian teradsorbsi dari gugus hidroksil ($-OH$) maupun gugus karbonil ($C=O$), oleh karena itu, kapasitas adsorben dalam menangkap ion logam $Cd^{2+}$ menjadi lebih besar dibandingkan ketika massa adsorben masih rendah. Secara singkat hasil perhitungan tersebut

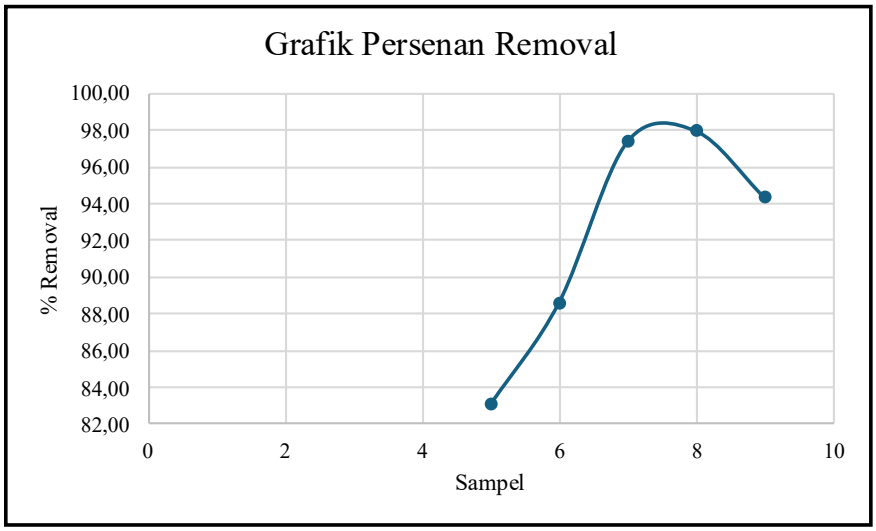
juga menunjukkan bahwa, massa optimal penggunaan adsorben seberat 50 mg menandakan semakin besar adsorben yang digunakan maka, semakin efektif juga mengadsorbsi ion $Cd^{2+}$ dalam air.

### 4.3.2 Hasil Pengujian pH Optimal

Pada pengujian konsentrasi optimal, peneliti melakukan pengujian karbon dengan variasi konsentrasi larutan $Cd^{2+}$ yang hendak di uji yaitu dengan tingkat keasaman, 5, 6, 7, 8, dan 9. Larutan Cd2+ *artificial* yang hendak diuji dilakukan pengenceran dengan faktor pengenceran 5 dengan tujuan agar terbaca oleh instrumen AAS pada skala 0,5-5 untuk ion Cd2+. Hal ini guna melihat variasi tingkat keasaman larutan $Cd^{2+}$ yang paling efisien teradsorbsi oleh adsorben. Pembacaan konsentrasi ion Cd2+ yang telah diadsorbsi dibantu dengan adanya instrumen AAS didapatkan hasil sebagai berikut:

*Tabel 4.3 Perhitungan Efektivitas Adsorbsi Tiap Konsentrasi pada Variasi pH*

| VARIASI pH | | |
|---|---|---|
| **Tingkat Keasamaan** | **Persenan Adsorbsi (%)** | **Kapasitas Adsorbsi (mg/g)** |
| 5 | 83,10 | 11,54 |
| 6 | 88,65 | 8,84 |
| 7 | 97,43 | 14,61 |
| 8 | 97,99 | 14,73 |
| 9 | 94,36 | 4,32 |




*Gambar 4.10 Grafik Persentase Removal Variasi pH*

Dari perhitungan di atas menjabarkan hasil pH optimal dengan adanya pengamatan pada kolom persentase *removal* yang menunjukkan nilai tertinggi. Pada penentuan pH optimum dilakukan perhitungan yang meliputi penamaan sampel, konsentrasi sampel sesuai dengan pembacaan AAS, faktor pengenceran yang digunakan oleh peneliti sebanyak 10 ×, massa adsorbsi, rata-rata massa adsorbsi, dan kapasitas adsorbsi. Dari hasil perhitungan yang

telah dilakukan oleh peneliti menunjukkan persentase *removal* paling besar senilai 97,99% dengan tingkat keasaman 8 pada sampel larutan $Cd^{2+}$. Pengaturan tingkat keasaman larutan terjadi karena, adanya penambahan larutan NaOH yang digunakan sebagai pengatur pH (pH *adjuster*) untuk menyesuaikan tingkat keasaman larutan $Cd^{2+}$ sehingga diperoleh variasi pH sesuai kondisi yang ditetapkan dalam penelitian, fokus penelitian ini juga berlandaskan dengan PP Ho. 22 Tahun 2021 dan Permen LH No. 5 Tahun 2014 pada Lampiran I yang menetapkan bahwa air limbah diperbolehkan untuk dibuang pada rentang tingkat kemasaman 6–9 (JDIH BPK RI, 2014 & JDIH BPK RI 2021). Dari hasil perhitungan tersebut jelas menunjukkan bahwa pH optimal berada pada larutan $Cd^{2+}$ dengan tingkat kemasaman 8 yang bersifat basa.

Nilai pH optimum yang diperoleh pada pH 8 dengan presentase removal mencapai 97,99% terjadi sebab, kondisi gugus fungsi karbonil (C=O) dan gugus fungsi aromatik (C–H) terjadi deprotonasi yang mengakibatkan permukaan adsorben menjadi bermuatan negatif dan dapat menarik ion $Cd^{2+}$ yang bermuatan positif (elektrostatik). Ion $H^{+}$ terjadi interaksi dengan $Cd^{2+}$ untuk menempati situs aktif pada permukaan adsorben (pada pH 8 ion $H^{+}$ tidak sebanyak ketika larutan keadaan pH lebih asam), bahkan pada pH yang lebih rendah gugus fungsi permukaan cenderung terprotonasi sehingga menimbulkan tolakan elektrostatik terhadap $Cd^{2+}$ dan menurunkan efisiensi adsorbsi. Sebaliknya, pada pH di atas 8 (pH 9), penurunan persentase removal disebabkan oleh mulai terbentuknya spesies hidroksida $Cd(OH)_2$ akibat kelebihan ion $OH^{-}$ dari penambahan NaOH, sehingga mekanisme yang terjadi bergeser dari adsorbsi murni ke arah presipitasi, di samping adanya kompetisi ion $Na^{+}$ yang turut menempati situs aktif adsorben. Dengan demikian, pH 8 menjadi titik keseimbangan terbaik antara ketersediaan situs aktif bermuatan negatif pada permukaan adsorben PET dan kestabilan ion $Cd^{2+}$ dalam bentuk terlarut, sehingga proses adsorbsi berlangsung paling efektif pada kondisi tersebut.

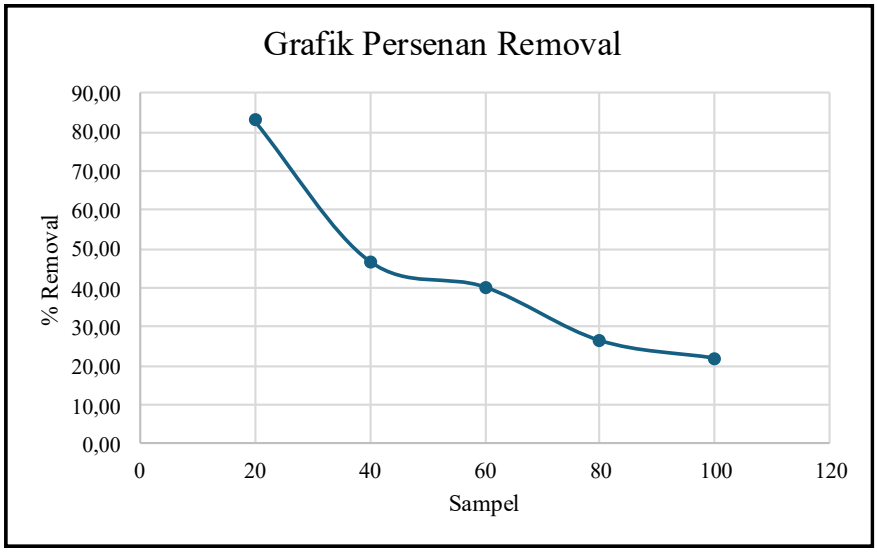
### 4.3.3 Hasil Pengujian Konsentrasi Optimal

Pada pengujian konsentrasi optimal, peneliti melakukan pengujian karbon dengan variasi konsentrasi larutan $Cd^{2+}$ yang hendak di uji yaitu, 20, 40, 60, 80, dan 100 ppm. Larutan $Cd^{2+}$ *artificial* yang hendak diuji dilakukan pengenceran dengan faktor pengenceran 5 dengan tujuan agar terbaca oleh instrumen AAS pada skala 0,5-5 untuk ion Cd2+. Hal ini guna melihat variasi konsentrasi larutan $Cd^{2+}$ dengan nilai persenan *removal* paling efisien

teradsorbsi oleh adsorben 50mg. Pembacaan konsentrasi ion $Cd^{2+}$ yang telah diadsorbsi dibantu dengan adanya instrumen AAS didapatkan hasil sebagai berikut:

*Tabel 4.4 Perhitungan Efektivitas Adsorbsi Tiap Konsentrasi pada Variasi Konsentrasi*

| VARIASI KONSENTRASI | | |
|---|---|---|
| **Kons. Larutan (ppm)** | **Persenan Adsorbsi (%)** | **Kapasitas Adsorbsi (mg/g)** |
| 20ppm | 83,11 | 2,74 |
| 40ppm | 46,80 | 4,18 |
| 60ppm | 40,15 | 7,77 |
| 80ppm | 26,31 | 10,93 |
| 100ppm | 21,76 | 8,77 |




*Gambar 4.11 Grafik Persentase Removal Variasi Konsentrasi*

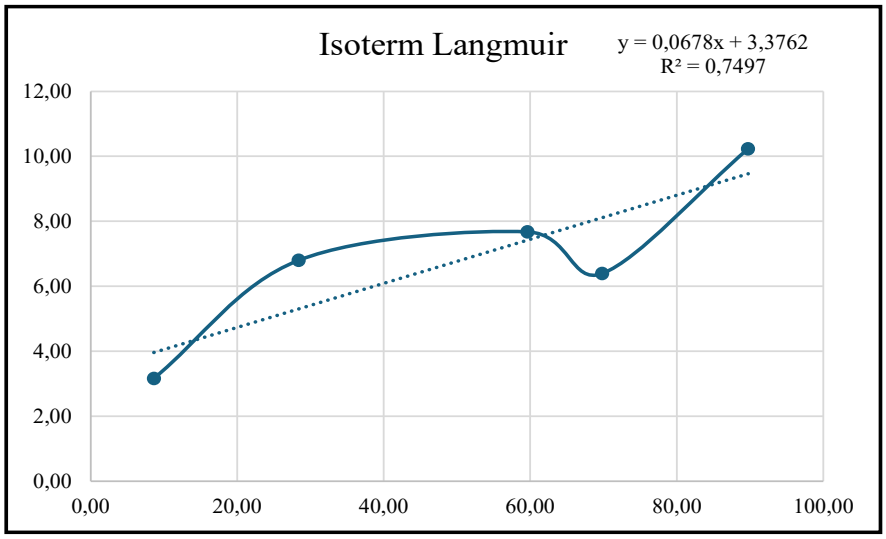
Dari perhitungan di atas menunjukkan hasil konsentrasi optimal dengan mengamati kolom persentase *removal* yang menunjukkan nilai tertinggi. Pada penentuan konsentrasi optimum dilakukan perhitungan yang meliputi penamaan sampel, konsentrasi sampel sesuai dengan pembacaan AAS, faktor pengenceran yang digunakan peneliti digunakan dalam menentukan takaran konsentrasi $Cd^{2+}$ agar terbaca pada instrumen AAS, massa adsorbsi, rata-rata massa adsorbsi, dan kapasitas adsorbsi. Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan oleh peneliti menunjukkan persentase *removal* paling besar senilai 83,11% pada 20 ppm sampel $Cd^{2+}$ yang terkandung di dalam air limbah *artificial*. Dari hasil perhitungan tersebut jelas menunjukkan bahwa semakin kecil konsentrasi ion $Cd^{2+}$ yang berada di dalam air maka, semakin efektif juga adsorben mengadsorbsi ion $Cd^{2+}$ yang terdapat di dalam air.

Selanjutnya terdapat perhitungan isoterm Langmuir dan Freundlich untuk mencari nilai $R^2$ yang paling sesuai dengan adanya penggambaran grafik isoterm. Besaran nilai $R^2$ yang paling sesuai ialah nilai $R^2$ yang mendekati angka 1. Perhitungan isoterm langmuir dan freudlich digunakan dalam mencari kapasitas maksimum kadmium teradsorbsi pergram oleh

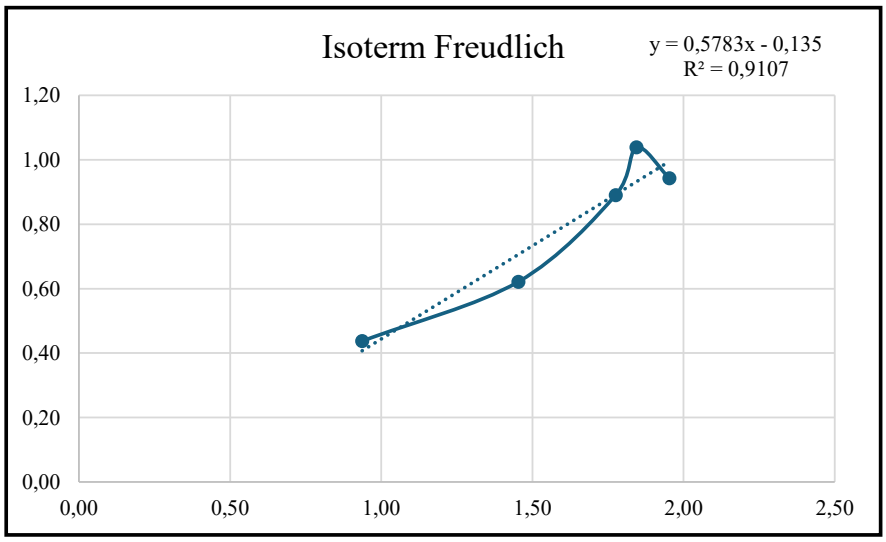
adsorben. Analisis isoterm Langmuir dan Freundlich memberikan gambaran yang lebih akurat terkait mekanisme dan efisiensi adsorbsi kadmium pada permukaan adsorben. Pada Perhitungan kedua isoterm dilakukan perbandingan dengan membaca besaran nilai regresi linearnya ($R^2$):

*Tabel 4.5 Tabel Isoterm Langmuir dan Isoterm Freundlich*

| Adsorben | Isoterm Langmuir | | | Isoterm Freundlich | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $q_{max}$ (mg $g^{-1}$) | $K_L$ | $R^2$ | n | $K_f$ | $R^2$ |
| KOH | 14,75 | 0,0201 | 0,7497 | 1,73 | 0,73 | 0,9107 |




*Gambar 4.12 Grafik Perhitungan Isoterm Langmuir*




*Gambar 4.13 Grafik Perhitungan Isoterm Freundlich*

Dari hasil perbandingan yang di dapatkan, model isoterm Freundlich memiliki tingkat kecocokan yang lebih tinggi dibandingkan dengan model isoterm Langmuir karena nilai $R^2$-

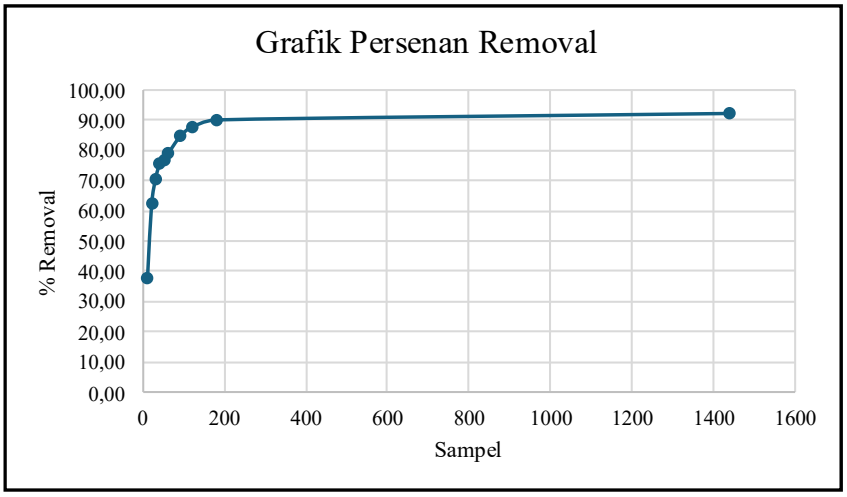
nya lebih besar, yaitu 0,9107. Ini berarti proses adsorbsi ion $Cd^{2+}$ pada adsorben yang digunakan dalam penelitian (adsorben limbah PET) sangat cocok dan dapat dijelaskan dengan menggunakan model isoterm Freundlich. Model Freundlich mengasumsikan bahwa permukaan adsorben dari limbah PET dengan aktivator KOH yang diuji peneliti memiliki banyak tempat penyerapan yang berbeda-beda kemampuannya. Ada tempat yang sangat kuat menyerap, ada yang biasa saja, dan ada yang lemah. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa model isoterm Freundlich merupakan model yang paling sesuai untuk menggambarkan mekanisme adsorbsi $Cd^{2+}$ pada adsorben yang digunakan dalam penelitian ini. Model ini memiliki nilai koefisien determinasi yang paling mendekati 1, yang mengindikasikan bahwa permukaan adsorben tidak rata atau tidak seragam, sehingga setiap bagian permukaannya memiliki kemampuan menyerap ion $Cd^{2+}$ yang berbeda. Oleh karena itu, model Freundlich memberikan representasi yang lebih akurat terhadap data hasil penelitian yang dilakukan peneliti saat ini dibandingkan dengan menggunakan model Langmuir.

### 4.3.4 Hasil Pengujian Waktu Optimal

Pada pengujian konsentrasi optimal, peneliti melakukan pengujian karbon dengan variasi konsentrasi larutan $Cd^{2+}$ yang hendak di uji yaitu dengan variasi waktu pengocokan (*shaker*) larutan $Cd^{2+}$, 10menit, 20menit, 30menit, 40menit, 50menit, 1jam, 1.5jam, 2jam, 3jam, dan, 24jam. Larutan $Cd^{2+}$ *artificial* yang hendak diuji dilakukan pengenceran dengan faktor pengenceran 5 dengan tujuan agar terbaca oleh instrumen AAS pada skala 0,5-5 untuk ion $Cd^{2+}$. Hal ini guna melihat variasi waktu dengan nilai persenan *removal* paling efisien dalam mengadsorbsi ion $Cd^{2+}$. Pembacaan konsentrasi ion Cd2+ yang telah diadsorbsi dibantu dengan adanya instrumen AAS didapatkan hasil sebagai berikut:

*Tabel 4.6 Perhitungan Efektivitas Adsorbsi Tiap Konsentrasi pada Variasi Waktu*

| **VARIASI WAKTU** | | |
|---|---|---|
| **Waktu (menit dan jam)** | **Persenan Adsorbsi (%)** | **Kapasitas Adsorbsi (mg/g)** |
| 10menit | 38,24 | 0,38 |
| 20menit | 62,43 | 0,62 |
| 30menit | 70,99 | 0,71 |
| 40menit | 75,86 | 0,76 |
| 50menit | 77,27 | 0,77 |
| 1jam | 79,07 | 0,79 |
| 1,5jam | 84,89 | 0,85 |
| 2jam | 88,03 | 0,88 |
| 3jam | 90,37 | 0,90 |
| 24jam | 92,51 | 0,92 |




*Gambar 4.14 Grafik Persentase Removal Variasi Waktu*

Dari perhitungan di atas menunjukkan hasil waktu paling optimal dengan mengamati hasil kolom persentase *removal* yang menunjukkan nilai tertinggi. Pada penentuan konsentrasi optimum dilakukan perhitungan yang meliputi penamaan sampel, konsentrasi sampel sesuai dengan pembacaan AAS, faktor pengenceran yang digunakan oleh peneliti sebanyak 20 ×, massa adsorbsi, rata-rata massa adsorbsi, dan kapasitas adsorbsi. Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan oleh peneliti menunjukkan persentase *removal* paling besar senilai 92,51% dalam kurun waktu 24 jam pada larutan $Cd^{2+}$ yang diberi adsorben selama pengocokan berlangsung. Hasil pada grafik menunjukkan semakin lama pengocokan berlangsung maka semakin bagus pula penjerapan ion $Cd^{2+}$ oleh adsorben hingga garis yang terbentuk menikuk tajam menuju konstan. Hal ini terjadi sebab, Peningkatan persentase removal $Cd^{2+}$ seiring bertambahnya waktu kontak terjadi karena ion $Cd^{2+}$ memiliki kesempatan yang lebih lama untuk berdifusi menuju permukaan adsorben dan berikatan dengan situs aktif yang tersedia. Pada awal proses adsorbsi, jumlah situs aktif masih banyak sehingga laju penjerapan berlangsung cepat. Seiring bertambahnya waktu, semakin banyak situs aktif yang telah ditempati oleh ion $Cd^{2+}$ sehingga laju adsorbsi menurun. Kondisi ini menyebabkan kurva awalnya meningkat tajam, kemudian melandai hingga mendekati konstan ketika sistem mencapai kesetimbangan adsorbsi atau kapasitas adsorbsi maksimum.

## 4.4 Pembahasan Hasil Optimal Pengujian Adsorben

Pada saat peneliti melakukan perbandingan dengan penelitian-penelitian terdahulu, hasil optimasi pada penelitian ini menunjukkan pola yang sejalan sekaligus beberapa perbedaan menarik. Pada variasi massa adsorben, penelitian ini memperoleh persentase removal tertinggi (75,29%) pada massa 50 mg, sejalan dengan temuan pada karbon aktif dari

biji alpukat yang melaporkan dosis optimum sebesar 500 mg untuk mencapai removal $Cd^{2+}$ hingga 99,5% (Chimdessa & Ejeta, 2022), maupun karbon aktif dari batang khat (Catha edulis) yang melaporkan dosis optimum lebih rendah, yaitu 0,125 g, untuk mencapai removal 89–90% (Gelaw et al., 2024). Perbedaan dosis optimum antar penelitian ini secara umum dipengaruhi oleh luas permukaan spesifik dan jumlah situs aktif yang dimiliki masing-masing jenis adsorben. Pada variasi pH, hasil penelitian ini yang menunjukkan pH optimum pada kondisi basa (pH 8) dengan removal 97,99% ternyata konsisten dengan temuan Kavand et al. (2020), yang melaporkan bahwa pH optimum untuk adsorbsi $Cd^{2+}$ pada karbon aktif komersial berada pada rentang 7–8, berbeda dengan $Pb^{2+}$ yang optimum pada pH lebih asam (5,5–6). Hal ini memperkuat argumen bahwa ion $Cd^{2+}$ memang cenderung teradsorbsi optimal pada kondisi mendekati netral hingga sedikit basa dibandingkan logam berat lain. Pada variasi konsentrasi, penelitian ini menunjukkan tren penurunan persentase removal seiring meningkatnya konsentrasi awal $Cd^{2+}$ (dari 83,11% pada 20 ppm menjadi 21,76% pada 100 ppm), pola yang juga konsisten dilaporkan oleh Gelaw et al. (2024) yang menemukan removal optimum justru pada konsentrasi awal terendah (20 mg/L) akibat terbatasnya jumlah situs aktif adsorben saat konsentrasi adsorbat meningkat. Pada variasi waktu kontak, penelitian ini memperoleh removal optimum sebesar 92,51% pada waktu kontak 24 jam, jauh lebih lama dibandingkan penelitian karbon aktif biji alpukat yang mencapai kesetimbangan hanya dalam 120 menit (Chimdessa & Ejeta, 2022), maupun karbon aktif sludge yang mencapai kesetimbangan pada 300 menit (Al-Malack & Dauda, 2017). Perbedaan waktu kesetimbangan yang signifikan ini mengindikasikan bahwa adsorben dari limbah PET pada penelitian ini memiliki laju difusi ion $Cd^{2+}$ menuju situs aktif yang relatif lebih lambat dibandingkan adsorben berbasis biomassa, kemungkinan disebabkan oleh perbedaan struktur pori dan luas permukaan spesifik antar jenis adsorben.

# BAB 5
# KESIMPULAN DAN SARAN

## 5.1. Kesimpulan

1) Hasil evaluasi karakteristik adsorben dari limbah PET sebelum dan sesudah aktivasi berdasarkan hasil pembacaan citra SEM dan infra FTIR menggambarkan bahwa, karakteristik limbah PET menunjukkan terbentuknya permukaan karbon sebelum adanya penambahan aktivator KOH cenderung menghasilkan permukaan karbon yang cenderung halus sedangkan, setelah aktivasi permukaan karbon yang berpori membentuk pori-pori baru dengan distribusi pori-pori lebih merata. Adapun perbandingan karbon PET sebelum dan sesudah adanya aktivasi dengan larutan KOH menunjukkan gugus fungsional pada PET menjadi terurai dan melemah. Namun, terdapat faktor lain yang turut serta membuat gugus fungsional menjadi terurai atau 'lemah' yaitu, adanya tahapan pirolisis dan *furnace*.
2) Pada tiap variasi yang diuji selama penelitian tingkat efektivitas adsorben dalam mengadsorbsi ion $Cd^{2+}$ menunjukkan hasil optimal yang berbeda-beda. Variasi massa menunjukkan persentase *removal* sebesar 75,29%, untuk variasi konsentrasi persentase *removal* optimal sebesar 83,11%, untuk variasi pH persentase *removal* paling optimal sebesar 97,99%, dan untuk variasi waktu persentase *removal* paling optimal sebesar 92,51%.

## 5.2. Saran

1) Pada penelitian selanjutnya peneliti menyarankan untuk menguji efektivitas adsorben dari limbah PET terhadap logam berat lainnya seperti, Cr6+, Cu2+, atau Hg2+ dengan menggunakan berbagai macam variasi yang diamati seperti, variasi suhu pirolisis dan kecepatan pengadukan yang berbeda-beda.
2) Penelitian selanjutnya dapat mengkaji kemampuan regenerasi dan penggunaan ulang karbon untuk mengetahui umur pakai dari adsorben serta efesiensi dari segi ekonomi dalam penerapannya pada skala industri.
3) Pada penelitian selanjutnya diharapkan dapat menggunakan limbah cair yang dihasilkan dari suatu industri, bukan hanya limbah buatan saja agar dapat efektivitas adsorbsi adsorben dapat dievaluasi sesuai kondisi lapangan.

## DAFTAR PUSTAKA


Adibfar, M., Kaghazchi, T., Asasian, N., & Soleimani, M. (2014). Conversion of Poly(Ethylene Terephthalate) Waste into Activated Carbon: Chemical Activation and Characterization. *Chemical Engineering and Technology*, *37*(6), 979–986. https://doi.org/10.1002/ceat.201200719

Afriyie, E., Arthur, E. K., Gikunoo, E., & Boateng, A. (2025). Bentonite-assisted carbonisation of waste polyethylene terephthalate bottles for the removal of heavy metals from polluted water. *Results in Surfaces and Interfaces*, *18*. https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100406

Ahangar, F. A., Rashid, U., Ahmad, J., Tsubota, T., & Alsalme, A. (2021). Conversion of waste polyethylene terephthalate (Pet) polymer into activated carbon and its feasibility to produce green fuel. *Polymers*, *13*(22). https://doi.org/10.3390/polym13223952

Alabi-Babalola, O., Aransiola, E., Asuquo, E., Garforth, A., & D'Agostino, C. (2024). Production of Highly Efficient Activated Carbons for Wastewater Treatment from Post-Consumer PET Plastic Bottle Waste. *ChemPlusChem*, 89(5), e202300484. https://doi.org/10.1002/cplu.202300484

Al-Malack, M. H., & Dauda, M. (2017). Competitive adsorption of cadmium and phenol on activated carbon produced from municipal sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 5*(3), 2718–2729. https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.027

Ariani, D. B., & Masluhah, V. S. (2025). *Analisis Komparatif Pemodelan Isoterm Langmuir, Freundlich, dan Sips pada Adsorpsi Asam Asetat oleh Karbon Aktif* (Vol. 10, Number 2).

Baari, M. J., Rudi, L., & Harimu, L. (2025). Adsorption isotherms, thermodynamics, and kinetics of activated carbon as adsorbent to water pollutants: a review. *Chimica Techno Acta*, 12(2). https://doi.org/10.15826/chimtech.2025.12.2.14

Chimdessa, M. A., & Ejeta, B. A. (2022). Removal of cadmium, copper and lead from aqueous solution using activated carbon prepared from avocado kernel. *Oriental Journal of Chemistry, 38*(1), 65–71. https://doi.org/10.13005/ojc/380107

Dasharathy, S., Arjunan, S., Basavaraju, A. M., Murugasen, V., Ramachandran, S., Keshav, R., & Murugan, R. (2022). Mutagenic, carcinogenic, and teratogenic effect of heavy metals. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2022, 8011953. https://doi.org/10.1155/2022/8011953

De Castro, C. S., Viau, L. N., Andrade, J. T., Mendonca T. A. P., & Goncalves, M. (2018). Mesoporous activated carbon from polyethyleneterephthalate (PET) waste: pollutant adsorption in aqueous solution. *New Journal Chemistry, 42(17),* 14612-14619. https://doi.org/10.1039/C8NJ02715C

Demirel, B., Yaraş, A., & Elçiçek, H. (2011). Crystallization Behavior of PET Materials. *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 26–35.

Deri, N. O., Muslim, A., Husin, H., & Zulfikar, Z. (2024). Adsorpsi Ion Logam Cd (II) Dengan Menggunakan Adsorben dari Kulit Pinang (Areca Catechu. L). *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, *13*(2), 149–169. https://doi.org/10.29103/jtku.v13i2.19432

Desti, I., & Ula, A. (2021). Analisis Sumber Daya Alam Air. Jurnal Sains Edukatika Indonesia (JSEI), 3(2), 17–24.

Deventer, van, Petersen, F. W., & Reuter, M. A. (1991). *Mechanisms of uptake of metal complexes and organics on carbon and resins: their modelling for the design of multi-component adsorption columns*.

Efimov, M., Vasilev, A., Muratov, D., Panin, A., Malozovskaya, M., & Karpacheva, G. (2024). Application of Infrared Pyrolysis and Chemical Post-Activation in the Conversion of Polyethylene Terephthalate Waste into Porous Carbons for Water Purification. *Polymers*, *16*(7), 891. https://doi.org/10.3390/polym16070891

Farias, J. P., Okeke, B. C., Demarco, C. F., Carlos, F. S., & da Silva, R. F. (2024). Cadmium contamination in aquatic environments: Detoxification mechanisms and phytoremediation approach. *Sustainability*, 16(22), 10072. https://doi.org/10.3390/su162210072

Freundlich, H. M. F. (1906). Over the adsorption in solution. *The Journal of Physical Chemistry*, 57, 385–471.

Gelaw, Y. B., Dagne, H., Adane, B., Yirdaw, G., Moges, M., Aneley, Z., Kumlachew, L., Aschale, A., Deml, Y. A., Tegegne, E., & Birhan, T. A. (2024). Adsorptive removal of cadmium (II) from wastewater using activated carbon synthesized from stem of Khat (Catha edulis). *Heliyon*, *10*(22). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40389

Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2020). The Effects of Cadmium Toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(11), 3782. https://doi.org/10.3390/ijerph17113782

Geng, H. X., & Wang, L. (2019). Cadmium: Toxic effects on placental and embryonic development. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 67, 102–107. https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.02.003

Girikallo, G. G., Joseph, W. B. S., & Maddusa, S. S. (2022). Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan Logam Berat Cadmium (Cd) pada Masyarakat Sekitar Sungai yang Mengonsumsi Ikan Nilem (Ostoechillus Vittatus) dari. In *Jurnal KESMAS* (Vol. 11, Number 2). https://share.google/IGqpyl0pOCEta4DSB

Gómez-Serrano, V., Adame-Pereira, M., Alexandre-Franco, M., & Fernández-González, C. (2021). Adsorption of bisphenol A by activated carbon developed from PET waste by KOH activation. *Environmental science and pollution research international*, *28*(19), 24342–24354. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08428-6

Guo, A. H., Kumar, S., & Lombard, D. B. (2022). Epigenetic mechanisms of cadmium-induced nephrotoxicity. *Current opinion in toxicology*, *32*, 100372. https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.100372

Hadiyanto, H., Hasim, H., & Juliana, J. (2022). Mercury, Lead, and Cadmium Heavy Metal Content in Water, Fish, and Sediment in Limboto Lake. *Jurnal Sumberdaya Akuatik Indopasifik*, *6*(1), 1-10.

Hassan, M., Liu, Y., Naidu, R., Du, J., Qi, F., Donne, S. W., & Islam, M. M. (2021). Mesoporous Biopolymer Architecture Enhanced the Adsorption and Selectivity of Aqueous Heavy-Metal Ions. *ACS Omega*, *6*(23), 15316–15331. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01642

Hendrasarie, N., & Prihantini, R. (2020). Utilization of activated carbon plastic waste to reduce iron and manganese dissolved in well water. *Jukung: Jurnal Teknik Lingkungan, 6*(2), 136–146. Retrieved: Pemanfaatan Karbon Aktif Sampah Plastik Untuk Menurunkan Besi Dan Mangan Terlarut Pada Air Sumur

Jagaba, A. H., Lawal, I. M., Birniwa, A. H., Affam, A. C., Usman, A. K., Soja, U. B., Saleh, D., Hussaini, A., Noor, A., & Aliyu Yaro, N. S. (2024). Sources of water contamination by heavy metals. Dalam *Membrane Technologies for Heavy Metal Removal from Water* (hlm. 3–27). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003326281-2

JDIH BPK RI-Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup*. PP No. 22 Tahun 2021

JDIH BPK RI-Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2014). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang baku mutu air limbah*. Permen LH No. 5 Tahun 2014

Kavand, M., Eslami, P., & Razeh, L. (2020). The adsorption of cadmium and lead ions from the synthesis wastewater with the activated carbon: Optimization of the single and binary systems. *Journal of Water Process Engineering*, 34, 101151. The adsorption of cadmium and lead ions from the synthesis wastewater with the activated carbon: Optimization of the single and binary systems - ScienceDirect

Khotimah, N., Martin, A., & Taer, E. (2024). Pengaruh Temperatur Aktivasi Fisika Terhadap Daya Serap Iodium Karbon Aktif Berbahan Dasar Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate (PET). *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, *13*(1). https://doi.org/10.24127/trb.v13i1.3314

Kustanto, A. (2020). Dinamika pertumbuhan penduduk dan kualitas air di Indonesia. *Jurnal Ilmu Ekonomi dan Pembangunan, 20*(1), 1–8.

Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361–1403. https://doi.org/10.1021/ja02242a004

Li, S., Cho, M.-K., Lee, K. B., Deng, S., Zhao, L., Yuan, X., & Wang, J. (2022). Diamond in the rough: Polishing waste polyethylene terephthalate into activated carbon for CO2 capture. *Science of the Total Environment*, 834, 155262. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155262

Li, Y., Rahman, S. U., Qiu, Z., Shahzad, S. M., Nawaz, M. F., Huang, J., Naveed, S., Li, L., Wang, X., & Cheng., H. (2023). Toxic effects of cadmium on the physiological and biochemical attributes of plants, and phytoremediation strategies: A review. *Environmental Pollution*, 325. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121433

Limuris, C. F. (2021). Hak Rakyat Atas Air Bersih sebagai Derivasi Hak Asasi Manusia dalam Deklarasi Universal Hak Asasi Manusia. *Jurnal Lentera (atau jurnal serupa bidang hukum)*, 4(2):515–17.

Lin, J. Y., Shi, J. R., Liu, F. C., Wang, C. Y., Liu, F. W., & Lin, C. M. (2025). Sustainable Conversion of Waste PET into Porous Activated Carbon for Efficient Cu2+ Elimination from Aqueous Solution. *ACS Omega*, *10*(15), 14994–15008. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10226

Lowden, V. M. C. M., Alexandre-Franco, M. F., Garrido-Zoido, J. M., Cuerda-Correa, E. M., & Gómez-Serrano, V. (2026). Coconut shell-derived activated carbons: Preparation, physicochemical properties, and dye removal from water. *Molecules, 31*(2), 263. https://doi.org/10.3390/molecules31020263

Lubis, Alfi, R., F., Nasution, H. I., & Zubir, M. (2020). *Production of Activated Carbon from Natural Sources for Water Purification*.

Mai, N. T., Nguyen, M. N., Tsubota, T., Nguyen, P. L. T., & Nguyen, N. H. (2021). Evolution of physico-chemical properties of *Dicranopteris linearis*-derived activated carbon under various physical activation atmospheres. *Scientific Reports, 11*, 14430. https://doi.org/10.1038/s41598-021-93934-x

Maizunati, N. A., & Arifin, M. Z. (2017). Pengaruh perubahan jumlah penduduk terhadap kualitas air di Indonesia. *Jurnal Litbang Provinsi Jawa Tengah, 15*(2), 207–215.

Manimekalai, T. K., Sivakumar, N., & Periyasamy, S. (2015). Real-World Mixed Plastics Waste Into Activated Carbon And Its Performance In Adsorption Of Basic DYE From Textile Effluent. In *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* (Vol. 10, Number 3).

Mashhadikhan, S., Ebadi Amooghin, A., Sanaeepur, H., & Shirazi, M. M. A. (2022). A critical review on cadmium recovery from wastewater towards environmental sustainability. *Desalination*, 535, 115815. https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115815

Mishra, R., Singh, B., & Acharya, B. (2024). A comprehensive review on activated carbon from pyrolysis of lignocellulosic biomass: An application for energy and the environment. In *Carbon Resources Conversion* (Vol. 7, Number 4). KeAi Publishing Communications Ltd. https://doi.org/10.1016/j.crcon.2024.100228

Nuli, M. V, Kumar, J. P., Korni, R., & Putta, S. (2024). Cadmium Toxicity: Unveiling the Threat to Human Health. *Retrospective Analysis of Preferred Hepatectomy Combined with Systemic Drug Therapy for Breast Cancer Liver Metastases*. Retrieved www.ijpsonline.com

Oko, S., Mustafa, M., Kurniawan, A., & Norfitria, L. (2021). Pembuatan Karbon Aktif dari Limbah Plastik PET (Polyethylene terephthalate) Menggunakan Aktivator KOH. *METANA*, *17*(2), 61–68. https://doi.org/10.14710/metana.v17i2.40204

Park, G., Phule, A. D., Elkaee, S., Kim, S. Y., Zaman, Md. W. U., Yang, J. H., & Jeon, S. C. (2024). Conversion of PET bottles into carbonaceous adsorbents for Pb(II) removal from aqueous solutions via KOH activation. *Journal of Water Process Engineering*, vol. 66. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106092

Pereira, L., Castillo, V., Calero, M., Blázquez, G., Solís, R. R., & Martín-Lara, M. Á. (2024). Insights into using plastic waste to produce activated carbons for wastewater treatment applications: A review. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 62). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105386

Patel, H., Weldekidan, H., Mohanty, A., & Misra, M. (2023). Effect of physicochemical activation on $CO_2$ adsorption of activated porous carbon derived from pine sawdust. *Carbon Capture Science & Technology, 8*, Article 100128. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100128

Pulungan, A. F., & Wahyuni, S. (2021). Analisis kandungan logam kadmium (Cd) dalam air minum isi ulang (AMIU) di Kota Lhokseumawe, Aceh. *AVERROUS: Jurnal Kedokteran dan Kesehatan Malikussaleh, 7*(1), 75–83. https://doi.org/10.29103/averrous.v7i1.3666

Rao, M. M., Ramesh, A., Rao, G. P. C., & Seshaiah, K. (2006). Removal of copper and cadmium from the aqueous solutions by activated carbon derived from Ceiba pentandra hulls. *Journal of Hazardous Materials*, 129(1–3), 123–129. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.018

Rio, S., Faur-Brasquet, C., Le Coq, L. and Le Cloirec, P. (2005). Experimental design methodology for the preparation of carbonaceous sorbents from sewage sludge by chemical activation—application to air and water treatments. *Chemosphere*, 58(4), pp.423-437. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.06.003

Suo, C., Du, K., Yuan, R., Chen, H., Wang, F., & Zhou, B. (2020). Adsorption study of heavy metal ions from aqueous solution by activated carbon in single and mixed system. *Desalination and Water Treatment*, *183*, 315–324. https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25236

Sutalhis, M., Nursiwan, & Novaria, A. (2024). Analisis Manajemen Sampah Rumah Tangga Di Indonesia: Literatur Review. CENDEKIA : Jurnal Ilmu Pengetahuan, vol. 4, no. 2, hal. 97-106. Diakses pada tanggal 16 Mei 2025, dari: ANALISIS MANAJEMEN SAMPAH RUMAH TANGGA DI INDONESIA: LITERATUR REVIEW

UNEP Technology for Environment. (2020). National Plastic Waste Reduction Strategic Actions for Indonesia. Diakses pada tanggal 16 Mei 2025, dari: National Plastic Waste Reduction Strategic Actions for Indonesia | International Environmental Technology Centrehttps://igit.me/UNEP-policyandstrategi

Wang, Z., Fang, Z., Yu, J., Hu, X., & Gong, J. (2024). Red Sea crisis impacts on maritime shipping networks. *Heliyon, 10*, e40384. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40384

Wei, W., & Wang, C. (2026). Effects of precursor type and preparation conditions on the physicochemical properties and MB adsorption capacity of activated carbons derived from legume vines. *Chemical Papers*. https://doi.org/10.1007/s11696-026-05047-2

Yuan, G., Chen, D., Yin, L., Wang, Z., Zhao, L., & Wang, J. Y. (2014). High efficiency chlorine removal from polyvinyl chloride (PVC) pyrolysis with a gas–liquid fluidized bed reactor. *Waste Management*, 34(6), 1045–1050. High efficiency chlorine removal from polyvinyl chloride (PVC) pyrolysis with a gas–liquid fluidized bed reactor - ScienceDirect

Zhou, J., Luo, A., & Zhao, Y. (2018). Preparation and characterisation of activated carbon from waste tea by physical activation using steam. *Journal of the Air & Waste Management Association, 68*(12), 1269–1277. https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1460282

# LAMPIRAN

*Lampiran 1 Tabel Perhitungan Variasi Massa*

| Sampel (mg) | Konsentrasi Awal (µg/ml) | Faktor Pengenceran | Massa Adsorbsi (ppm) | Rata-Rata | % Removal | Konversi Volume (mL ke L) | Konverasi Massa (mg ke g) | Kapasitas Adsorpsi (mg/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S0 | 1,834 | 10 | 18,34 | 18,34 | | | | |
| S5K | 2,391 | 3,33 | 7,96 | 7,80 | 57,46 | 0,02 | 0,01 | 42,15 |
| D5K | 2,295 | 3,33 | 7,64 | | | | | |
| S10K | 2,315 | 3,33 | 7,71 | 7,68 | 58,14 | 0,02 | 0,01 | 21,33 |
| D10K | 2,296 | 3,33 | 7,65 | | | | | |
| S20K | 2,289 | 3,33 | 7,62 | 7,60 | 58,57 | 0,02 | 0,02 | 10,74 |
| D20K | 2,274 | 3,33 | 7,57 | | | | | |
| S40K | 2,007 | 3,33 | 6,68 | 6,18 | 66,29 | 0,02 | 0,04 | 6,08 |
| D40K | 1,706 | 3,33 | 5,68 | | | | | |
| S50K | 1,399 | 3,33 | 4,66 | 4,53 | 75,29 | 0,02 | 0,05 | 5,52 |
| D50K | 1,323 | 3,33 | 4,41 | | | | | |

*Lampiran 2 Tabel Perhitungan Variasi Konsentrasi*

| Sampel (mg) | Konsentrasi Awal (µg/ml) | Faktor Pengenceran | Massa Adsorbsi (ppm) | Rata-Rata | % Removal | Konversi Volume (mL ke L) | Konverasi Massa (mg ke g) | Kapasitas Adsorpsi (mg/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Konsentrasi 20 | 3,600 | 10 | 36 | 36 | - | | | |
| Konsentrasi 40 | 4,932 | 10 | 49,32 | 49,32 | - | | | |
| Konsentrasi 60 | 4,276 | 20 | 85,52 | 85,52 | - | | | |
| Konsentrasi 80 | 4,857 | 20 | 97,14 | 97,14 | - | | | |
| Konsentrasi 100 | 5,364 | 20 | 107,28 | 107,28 | - | | | |
| S20K | 0,608 | 10 | 6,08 | 8,65 | 83,11 | 0,005 | 0,050 | 2,74 |
| D20K | 1,121 | 10 | 11,21 | | | | | |
| S40K | 2,624 | 10 | 26,24 | 28,42 | 46,80 | 0,01 | 0,050 | 4,18 |
| D40K | 3,118 | 10 | 30,59 | | | | | |
| S60K | 2,559 | 20 | 51,18 | 59,62 | 40,15 | 0,015 | 0,050 | 7,77 |
| D60K | 3,059 | 20 | 68,06 | | | | | |
| S80K | 3,579 | 20 | 71,58 | 69,82 | 26,31 | 0,02 | 0,050 | 10,93 |
| D80K | 3,403 | 20 | 68,06 | | | | | |
| S100K | 4,197 | 20 | 83,94 | 89,74 | 21,76 | 0,025 | 0,050 | 8,77 |
| D100K | 4,777 | 20 | 95,54 | | | | | |

*Lampiran 3 Tabel Perhitungan Variasi pH*

| Sampel (mg) | Konsentrasi Awal (µg/ml) | Faktor Pengenceran | Massa Adsorbsi (ppm) | Rata-Rata | % Removal | Konversi Volume (mL ke L | Konverasi Massa (mg ke g) | Kapasitas Adsorpsi (mg/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Con. 5 | 3,473 | 10 | 34,73 | 34,73 | - | - | - | - |
| Con. 6 | 2,494 | 10 | 24,94 | 24,94 | - | - | - | - |
| Con. 7 | 3,749 | 10 | 37,49 | 37,49 | - | - | - | - |
| Con. 8 | 3,758 | 10 | 37,58 | 37,58 | - | - | - | - |
| Con. 9 | 1,144 | 10 | 11,44 | 11,44 | - | - | - | - |
| S5K | 0,872 | 10 | 8,72 | 5,87 | 83,10 | 0,02 | 0,050 | 11,54 |
| D5K | 0,302 | 10 | 3,02 | | | | | |
| S6K | 0,427 | 10 | 4,27 | 2,83 | 88,65 | 0,02 | 0,050 | 8,84 |
| D6K | 0,139 | 10 | 1,39 | | | | | |
| S7K | 0,166 | 10 | 1,66 | 0,97 | 97,43 | 0,02 | 0,050 | 14,61 |
| D7K | 0,027 | 10 | 0,27 | | | | | |
| S8K | 0,103 | 10 | 1,03 | 0,76 | 97,99 | 0,02 | 0,050 | 14,73 |
| D8K | 0,048 | 10 | 0,48 | | | | | |
| S9K | 0,091 | 10 | 0,91 | 0,65 | 94,36 | 0,02 | 0,050 | 4,318 |
| D9K | 0,038 | 10 | 0,38 | | | | | |

*Lampiran 4 Tabel Perhitungan Variasi Waktu*

| Sampel (mg) | Konsentrasi Awal (µg/ml) | Faktor Pengenceran | Massa Adsorbsi (ppm) | % Removal | Konversi Volume (mL ke L | Konverasi Massa (mg ke g) | Kapasitas Adsorpsi (mg/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Co | 0,748 | 20 | 14,96 | - | 0,01 | 0,15 | - |
| 10k | 0,462 | 20 | 9,24 | 38,24 | 0,01 | 0,15 | 0,38 |
| 20k | 0,281 | 20 | 5,62 | 62,43 | 0,01 | 0,15 | 0,62 |
| 30k | 0,217 | 20 | 4,34 | 70,99 | 0,01 | 0,15 | 0,71 |
| 40k | 0,181 | 20 | 3,61 | 75,86 | 0,01 | 0,15 | 0,76 |
| 50k | 0,170 | 20 | 3,40 | 77,27 | 0,01 | 0,15 | 0,77 |
| 60k | 0,157 | 20 | 3,13 | 79,07 | 0,01 | 0,15 | 0,79 |
| 90k | 0,113 | 20 | 2,26 | 84,89 | 0,01 | 0,15 | 0,85 |
| 120k | 0,090 | 20 | 1,79 | 88,03 | 0,01 | 0,15 | 0,88 |
| 180k | 0,072 | 20 | 1,44 | 90,37 | 0,01 | 0,15 | 0,90 |
| 24k | 0,056 | 20 | 1,12 | 92,51 | 0,01 | 0,15 | 0,92 |

*Lampiran 5 Tabel Gugus Fungsional Puncak IR 1*

| Functional group/assignment | Wavenumber ($cm^{-1}$) |
|---|---|
| **1. Saturated Aliphatic (alkene/alkyl)** | |
| **a) Methyl (–CH3)** | |
| Methyl C-H asym./sym. Stretch | 2970–2950/2880–2860 |
| Methyl C-H asym./sym. Bend | 1470–1430/1380–1370 |
| gem-Dimethyl or ''iso''- (doublet) | 1385–1380/1370–1365 |
| Trimethyl or ''tert-butyl'' (multiplet) | 1395–1385/1365 |
| **b) Methylene (>CH2)** | |
| Methylene C-H asym./sym. Stretch | 2935–2915/2865–2845 |
| Methylene C-H bend | 1485–1445 |
| Methylene $—(CH_2)_n—$ rocking (n ≥ 3) | 750–720 |
| Cyclohexane ring vibrations | 1055–1000/1005–925 |
| **c) Methyne (>CH–)** | |
| Methyne C-H stretch | 2900–2880 |
| Methyne C-H bend | 1350–1330 |
| Skeletal C-C vibrations | 1300–700 |
| **d) Special methyl (–CH3) frequencies** | |
| Methoxy, methyl ether $O-CH_3$, C-H stretch | 2850–2815 |
| Methylamino, $N-CH_3$, C-H stretch | 2820–2780 |
| **2. Olefinic (alkene)** | |
| Alkenyl C=C stretch | 1680–1620 |
| Aryl-substituted C=C | 1625 |
| Conjugated C=C | 1600 |
| Terminal (vinyl) C-H stretch | 3095–3075<br>3040–3010 |
| Pendant (vinylidene) C-H stretch | 3095–3075 |
| Medial, cis- or trans-C-H stretch | 3040–3010 |
| Vinyl C-H in-plane bend | 1420–1410 |
| Vinylidene C-H in-plane bend | 1310–1290 |
| Vinyl C-H out-of-plane bend | 995–985 + 915–890 |
| Vinylidene C-H out-of-plane bend | 895–885 |
| trans-C-H out-of-plane bend | 970–960 |
| cis-C-H out-of-plane bend | 700 (broad) |
| **3. Olefinic (alkene)** | |
| Alkenyl C=C stretch | 1680–1620 |
| Aryl-substituted C=C | 1625 |
| Conjugated C=C | 1600 |
| Terminal (vinyl) C-H stretch | 3095–3075<br>3040–3010 |
| Pendant (vinylidene) C-H stretch | 3095–3075 |
| Medial, cis- or trans-C-H stretch | 3040–3010 |
| Vinyl C-H in-plane bend | 1420–1410 |
| Vinylidene C-H in-plane bend | 1310–1290 |
| Vinyl C-H out-of-plane bend | 995–985 + 915–890 |
| Vinylidene C-H out-of-plane bend | 895–885 |
| trans-C-H out-of-plane bend | 970–960 |
| cis-C-H out-of-plane bend | 700 (broad) |
| **4. Aromatic ring (aryl)** | |
| C=C-C Aromatic ring stretch | 1615–1580<br>1510–1450 |
| Aromatic C-H stretch | 3130–3070 |
| Aromatic C-H in-plane bend | 1225–950 (several) |
| Aromatic C-H out-of-plane bend | 900–670 (several) |

| | |
|---|---|
| C-H Monosubstitution (phenyl) | 770–730 + 710–690 |
| C-H 1,2-Disubstitution (ortho) | 770–735 |
| C-H 1,3-Disubstitution (meta) | 810–750 + 900–860 |
| C-H 1,4-Disubstitution (para) | 860–800 |
| Aromatic combination bands | 2000–1660 (several) |
| **5. Acetylenic(alkyne)** | |
| C≡C Terminal alkyne (monosubstituted) | 2140–2100 |
| C≡C Medial alkyne (disubstituted) | 2260–2190 |
| Alkyne C-H stretch | 3320–3310 |
| Alkyne C-H bend | 680–610 |
| Alkyne C-H bend | 630 (typical) |
| **6. Aliphatic organohalogen compound** | |
| Aliphatic fluoro compounds, C-F stretch | 1150–1000 |
| Aliphatic chloro compounds, C-Cl stretch | 800–700 |
| Aliphatic bromo compounds, C-Br stretch | 700–600 |
| Aliphatic iodo compounds, C-I stretch | 600–500 |
| **7. Alcohol and hydroxy compound** | |
| Hydroxy group, H-bonded OH stretch | 3570–3200 (broad) |
| Normal ''polymeric'' OH stretch | 3400–3200 |
| Dimeric OH stretch | 3550–3450 |
| Internally bonded OH stretch | 3570–3540 |
| Nonbonded hydroxy group, OH stretch | 3645–3600 (narrow) |
| Primary alcohol, OH stretch | 3645–3630 |
| Secondary alcohol, OH stretch | 3635–3620 |
| Tertiary alcohol, OH stretch | 3620–3540 |
| Phenols, OH stretch | 3640–3530 |
| Primary or secondary, OH in-plane bend | 1350–1260 |
| Phenol or tertiary alcohol, OH bend | 1410–1310 |
| Alcohol, OH out-of-plane bend | 720–590 |
| Primary alcohol, C-O stretch | ~1050 |
| Secondary alcohol, C-O stretch | ~1100 |
| Tertiary alcohol, C-O stretch | ~1150 |
| Phenol, C-O stretch | ~1200 |
| **8. Ether and oxy compound** | |
| Methoxy, C-H stretch ($CH_3$-O-) | 2820–2810 |
| Alkyl-substituted ether, C-O stretch | 1150–1050 |
| Cyclic ethers, large rings, C-O stretch | 1140–1070 |
| Aromatic ethers, aryl -O stretch | 1270–1230 |
| Epoxy and oxirane rings | ~1250 + 890–800[1)] |
| Peroxides, C-O-O- stretch | 890–820[1)] |
| **9. Ether and oxy compound** | |
| Methoxy, C-H stretch ($CH_3$-O-) | 2820–2810 |
| Alkyl-substituted ether, C-O stretch | 1150–1050 |
| Cyclic ethers, large rings, C-O stretch | 1140–1070 |
| Aromatic ethers, aryl -O stretch | 1270–1230 |
| Epoxy and oxirane rings | ~1250 + 890–800[1)] |
| Peroxides, C-O-O- stretch | 890–820[1)] |
| **a) Primary amino** | |
| Aliphatic primary amine, NH stretch | 3400–3380 + 3345–3325 |
| Aromatic primary amine, NH stretch | 3510–3460 + 3415–3380 |
| Primary amine, NH bend | 1650–1590 |
| Primary amine, CN stretch | 1090–1020 |

| | |
|---|---|
| **b) Secondary amino** | |
| Aliphatic secondary amine, >N-H stretch | 3360–3310 |
| Aromatic secondary amine, >N-H stretch | ~3450 |
| Heterocyclic amine, >N-H stretch | 3490–3430 |
| Imino compounds, =N-H stretch | 3350–3320 |
| Secondary amine, >N-H bend | 1650–1550 |
| Secondary amine, CN stretch | 1190–1130 |
| **c) Tertiary amino** | |
| Tertiary amine, CN stretch | 1210–1150 |
| **d) Aromatic amino** | |
| Aromatic primary amine, CN stretch | 1340–1250 |
| Aromatic secondary amine, CN stretch | 1350–1280 |
| Aromatic tertiary amine, CN stretch | 1360–1310 |
| **10. Carbonyl compound** | |
| Carboxylate (carboxylic acid salt) | 1610–1550/1420–1300 |
| Amide | 1680–1630 |
| Quinone or conjugated ketone | 1690–1675/(1650–1600)[2)] |
| Carboxylic acid | 1725–1700 |
| Ketone | 1725–1705 |
| Aldehyde | 1740–1725/(2800–2700)[3)] |
| Ester | 1750–1725 |
| Six-membered ring lactone | 1735 |
| Alkyl carbonate | 1760–1740 |
| Acid (acyl) halide | 1815–1770 |
| Aryl carbonate | 1820–1775 |
| Five-membered ring anhydride | 1870–1820/1800–1775 |
| Transition metal carbonyls | 2100–1800 |
| **11. Nitrogen multiple and cumulated double bond compound** | |
| Aliphatic cyanide/nitrile | 2280–2240 |
| Aromatic cyanide/nitrile | 2240–2220 |
| Cyanate (-OCN and C-OCN stretch) | 2260–2240/1190–1080 |
| Isocyanate (-N=C=O asym. stretch) | 2276–2240 |
| Thiocyanate (-SCN) | 2175–2140 |
| Isothiocyanate (-NCS) | 2150–1990 |
| Open-chain imino (-C=N-) | 1690–1590 |
| Open-chain azo (-N=N-) | 1630–1575 |
| **12. Simple hetero-oxy compounds** | |
| **a) Nitrogen-oxy compounds** | |
| Aliphatic nitro compounds | 1560–1540/1380–1350[4)] |
| Organic nitrates | 1640–1620/1285–1270[4)] |
| Aromatic nitro compounds | 1555–1485/1355–1320[4)] |
| **b) Phosphorus-oxy compounds** | |
| Organic phosphates (P=O stretch) | 1350–1250 |
| Aliphatic phosphates (P-O-C stretch) | 1050–990 |
| Aromatic phosphates (P-O-C stretch) | 1240–1190/995–850 |
| **c) Sulfur-oxy compounds** | |
| Dialkyl/aryl sulfones | 1335–1300/1170–1135[4)] |
| Organic sulfates | 1420–1370/1200–1180[4)] |
| Sulfonates | 1365–1340/1200–1100[4)] |
| **d) Silicon-oxy compounds** | |
| Organic siloxane or silicone (Si-O-Si) | 1095–1075/1055–1020 |
| Organic siloxane or silicone (Si-O-C) | 1110–1080 |

| | |
|---|---|
| **13.Thiols and thio-substituted compounds** | |
| Thiols (S-H stretch) | 2600–2550 |
| Thiol or thioether, CH2-S-(C-S stretch) | 710–685 |
| Thioethers, $CH_3$-S-(C-S stretch) | 660–630 |
| Aryl thioethers, ø-S (C-S stretch) | 715–670 |
| Disulfides (C-S stretch) | 705–570 |
| Disulfides (S-S stretch) | 620–600 |
| Aryl disulfides (S-S stretch) | 500–430 |
| Polysulfides (S-S stretch) | 500–470 |
| **14.Common inorganic ions** | |
| Carbonate ion | 1490–1410/880–860[5)] |
| Sulfate ion | 1130–1080/680–610[5)] |
| Nitrate ion | 1380–1350/840–815[5)] |
| Phosphate ion | 1100–1000 |
| Ammonium ion | 3300–3030/1430–1390[5)] |
| Cyanide ion, thiocyanate ion, and related ions | 2200–2000 |
| Silicate ion | 1100–900 |

Note: 1) Normally, it is very weak in the infrared but more characteristic in the Raman spectrum; 2)Lower frequency band because of the conjugated double bond; 3)Higher frequency band characteristic of aldehydes, related with the terminal aldehydic C-H stretch; 4)Asymmetric/symmetric XO2 stretch (NO2 and SO2); 5)Normally, the first absorption is intense and broad, and the second has weak to medium intensity and narrow. The both often exist as multiple band structures, and it may be used to characterize individual compounds.

*Sumber: Indonesian Journal of Science and Technology*

*Lampiran 6 Tabel Gugus Fungsional Puncak IR 2*

| Peak Position | Group | Class | Peak Details |
|---|---|---|---|
| 3584-3700 | O-H stretching (free) | alcohol, phenol | strong, sharp |
| 3500-3700 | O-H stretching (free) | phenol, alcohol | strong, sharp |
| 3200-3550 | O-H stretching (hydrogen-bonded) | alcohol | strong, broad |
| 3500 | N-H stretching | primary amine | medium, sharp |
| 3300-3400 | N-H stretching | aliphatic primary amine | medium, sharp |
| 3310-3350 | N-H stretching | secondary amine | medium, sharp |
| 3050-3100 | C-H stretching (aromatic) | aromatic hydrocarbon | medium to weak |
| 2500-3300 | O-H stretching | carboxylic acid | very strong, very broad |
| 2700-3200 | O-H stretching | alcohol | weak, broad |
| 2800-3000 | N-H stretching | amine salt | strong, broad |
| 3267-3333 | C-H stretching | alkyne | strong, sharp |
| 3300 | ≡C–H stretching | terminal alkyne | strong, sharp |
| 3000-3100 | C-H stretching | alkene | medium |
| 2840-3000 | C-H stretching | alkane | medium |
| 2695-2830 | C-H stretching | aldehyde | medium (plus weak Fermi doublet at 2720, 2820) |
| 2550-2600 | S-H stretching | thiol | weak |
| 2349 | O=C=O stretching | carbon dioxide | strong |
| 2250-2275 | N=C=O stretching | isocyanate | strong, broad |
| 2222-2260 | C≡N stretching | nitrile | weak to medium, sharp |
| 2190-2260 | C≡C stretching | alkyne | weak |
| 2200-2250 | C≡C stretching | terminal alkyne | weak to medium, sharp |
| 2140-2175 | S-C≡N stretching | thiocyanate | strong |
| 2120-2160 | N=N=N stretching | azide | strong |
| 2150 | C=C=O stretching | ketene | typically sharp, medium |
| 2120-2145 | N=C=N stretching | carbodiimide | strong, sharp |
| 2100-2140 | C≡C stretching | alkyne | weak |
| 1990-2140 | N=C=S stretching | isothiocyanate | strong, sharp |
| 1900-2000 | C=C=C stretching | allene | medium, sharp |
| 2000 | C=C=N stretching | ketenimine | weak to medium, sharp |
| 1650-2000 | C-H bending | aromatic compound | weak |
| 1818 | C=O stretching | anhydride | strong, sharp |
| 1785-1815 | C=O stretching | acid halide | strong, sharp |
| 1770-1800 | C=O stretching | conjugated acid halide | strong, sharp |
| 1775 | C=O stretching | conjugated anhydride | strong, sharp |
| 1770-1780 | C=O stretching | vinyl / phenyl ester | strong, sharp |
| 1760 | C=O stretching | carboxylic acid | strong, sharp |
| 1735-1750 | C=O stretching | esters | strong, sharp |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1735-1750 | C=O stretching | δ-lactone | strong, sharp |
| 1745 | C=O stretching | cyclopentanone | strong, sharp |
| 1720-1740 | C=O stretching | aldehyde | strong, sharp |
| 1715-1730 | C=O stretching | α,β-unsaturated ester | strong, sharp |
| 1705-1725 | C=O stretching | aliphatic ketone | strong, sharp |
| 1706-1720 | C=O stretching | carboxylic acid | strong, broad |
| 1680-1710 | C=O stretching | conjugated acid | strong |
| 1685-1710 | C=O stretching | conjugated aldehyde | strong, sharp |
| 1690 | C=O stretching | primary amide | strong, sharp |
| 1640-1690 | C=N stretching | imine / oxime | strong |
| 1666-1685 | C=O stretching | conjugated ketone | strong, sharp |
| 1680 | C=O stretching | secondary amide | strong, sharp |
| 1680 | C=O stretching | tertiary amide | strong, sharp |
| 1650 | C=O stretching | δ-lactam | strong, sharp |
| 1668-1678 | C=C stretching | alkene | weak |
| 1665-1675 | C=C stretching | alkene | weak |
| 1626-1662 | C=C stretching | alkene | medium |
| 1648-1658 | C=C stretching | alkene | medium |
| 1600-1650 | C=C stretching | conjugated alkene | medium |
| 1580-1650 | N-H bending | amine | medium |
| 1566-1650 | C=C stretching | cyclic alkene | medium |
| 1638-1648 | C=C stretching | alkene | strong |
| 1610-1620 | C=C stretching | α,β-unsaturated ketone | strong |
| 1500-1550 | N-O stretching | nitro compound | strong |
| 1465 | C-H bending | alkane | medium |
| 1450 | C-H bending | alkane | medium |
| 1380-1390 | C-H bending | aldehyde | medium |
| 1380-1385 | C-H bending | alkane | medium |
| 1395-1440 | O-H bending | carboxylic acid | medium |
| 1330-1420 | O-H bending | alcohol | medium |
| 1380-1415 | S=O stretching | sulfate | strong, sharp |
| 1380-1410 | S=O stretching | sulfonyl chloride | strong, sharp |
| 1000-1400 | C-F stretching | fluoro compound | strong |
| 1310-1390 | O-H bending | phenol | medium |
| 1335-1372 | S=O stretching | sulfonate | strong, sharp |
| 1335-1370 | S=O stretching | sulfonamide | strong, sharp |
| 1342-1350 | S=O stretching | sulfonic acid | strong, sharp |
| 1300-1350 | S=O stretching | sulfone | strong, sharp |
| 1266-1342 | C-N stretching | aromatic amine | strong |
| 1250-1310 | C-O stretching | aromatic ester | strong, sharp |
| 1200-1275 | C-O stretching | alkyl aryl ether | strong, sharp |
| 1020-1250 | C-N stretching | amine | medium |
| 1200-1225 | C-O stretching | vinyl ether | strong, sharp |
| 1163-1210 | C-O stretching | ester | strong, sharp |
| 1124-1205 | C-O stretching | tertiary alcohol | strong, sharp |
| 1085-1150 | C-O stretching | aliphatic ether | strong, sharp |
| 1087-1124 | C-O stretching | secondary alcohol | strong, sharp |
| 1050-1085 | C-O stretching | primary alcohol | strong, sharp |
| 1030-1070 | S=O stretching | sulfoxide | strong, sharp |
| 1040-1050 | CO-O-CO stretching | anhydride | strong, broad |
| 985-995 | C=C bending | allene | strong, sharp |
| 970-990 | | trans-alkene | strong, sharp |
| 960-980 | C=C bending | alkene | strong, sharp |
| 905-920 | | vinyl group | medium |
| 885-895 | C=C bending | alkene | strong |
| 790-840 | C=C bending | alkene | medium |
| 665-730 | C=C bending | alkene | strong |
| 650-900 | C-H out-of-plane bending | aromatic substitution | pattern analysis, medium to strong |
| 515-690 | C-Br stretching | halo compound | strong |
| 500-600 | C-I stretching | halo compound | strong |
| 700-800 | C-Cl stretching | alkyl halide | strong, sharp |
| 550-850 | C-Cl stretching | halo compound | strong |
| 860-900 | C-H bending | 1,2,4-trisubstituted benzene | strong |
| 860-900 | C-H bending | 1,3-disubstituted benzene | strong |
| 790-830 | C-H bending | 1,4-disubstituted benzene | strong |
| 790-830 | C-H bending | 1,2,3,4-tetrasubstituted benzene | strong |
| 760-800 | C-H bending | 1,2,3-trisubstituted benzene | strong |
| 735-775 | C-H bending | 1,2-disubstituted benzene | strong |
| 730-770 | C-H bending | monosubstituted benzene | strong |
| 400-600 | M–O stretching | metal–oxygen (inorganic) | strong, broad |
| 680-720 | | benzene derivative | aromatic out-of-plane C–H bending |

*Sumber: FTIR Functional Group Database Table with Search – InstaNANO*

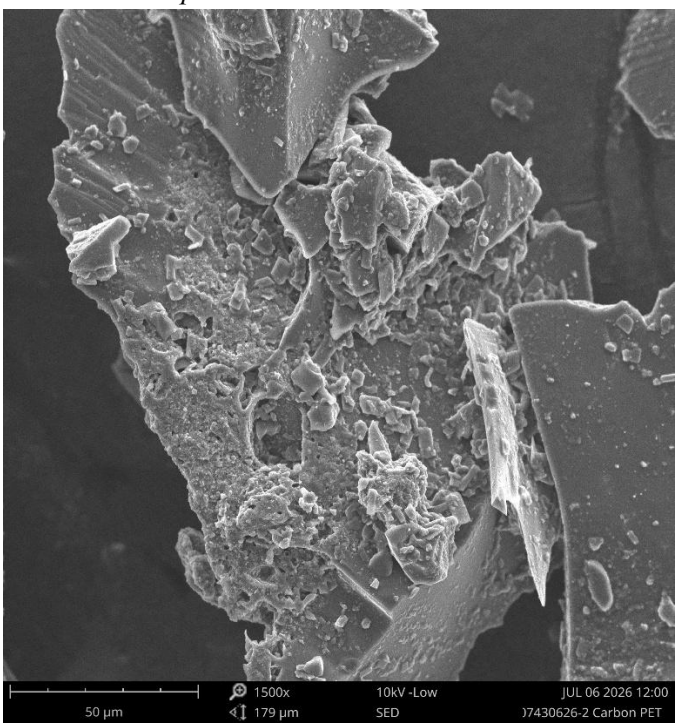
*Lampiran 7 Tabel Gugus Fungsional Puncak IR 3*

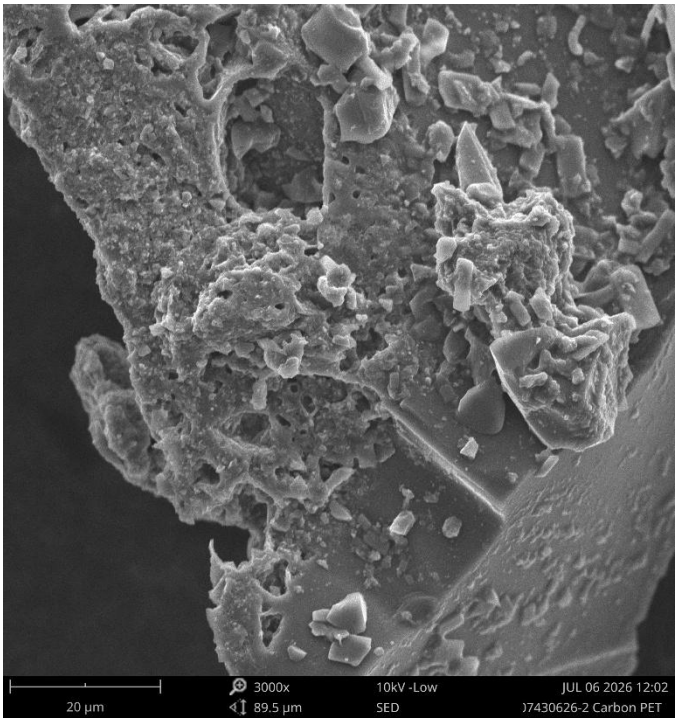
**Table 1. Characteristic IR Absorption Peaks of Functional Groups***

| Vibration | Position ($cm^{-1}$) | Intensity* | Notes |
|---|---|---|---|
| **Alkanes** | | | |
| C-H stretch | 2990 – 2850 | m to s | |
| **Alkenes** | | | |
| =C-H stretch | 3100 – 3000 | m | |
| C=C stretch | 1680 – 1620 (sat.)<br>1650 – 1600 (conj.) | w to m | |
| =C-H bend | 995 – 685 | s | See Table 2 for detail |
| **Alkynes** | | | |
| ≡C-H stretch | 3310 – 3200 | s | |
| C≡C stretch | 2250 – 2100 | m to w | |
| **Aromatic Compounds** | | | |
| C-H stretch | 3100 – 3000 | m to w | |
| C=C stretch | 1625 – 1440 | m to w | Hidden in fingerprint region |
| C-H bend | 900 – 680 | s | See Table 2 for detail |
| **Alcohols**** | | | |
| O-H stretch | 3550 – 3200 | br, s | Hydrogen bonded (typical) |
| **Amines** | | | |
| N-H stretch | 3550 – 3250 | br, m | Primary (two bands)<br>Secondary (one band) |
| **Nitriles** | | | |
| C≡N stretch | 2280 – 2200 | s | |
| **Aldehydes** | | | |
| C-H stretch | 2900 – 2800 &<br>2800 – 2700 | s | H-C=O Fermi doublet |
| C=O stretch | 1740 – 1720 (sat.)<br>1715 – 1680 (conj.) | s | |
| **Ketones** | | | |
| C=O stretch | 1750 – 1705 (sat.)<br>1700 – 1665 (conj.) | s | |
| **Esters**** | | | |
| C=O stretch | 1765 – 1735 (sat.)<br>1730 – 1715 (conj.) | s | |
| **Carboxylic Acids**** | | | |
| O-H stretch | 3200 – 2500 | br, m to w | |
| C=O stretch | 1725 – 1700 (sat.)<br>1715 – 1680 (conj.) | s | |
| **Amides** | | | |
| N-H stretch | 3500 – 3150 | m | Primary (two bands)<br>Secondary (one band) |
| C=O stretch | 1700 – 1630 | s | |

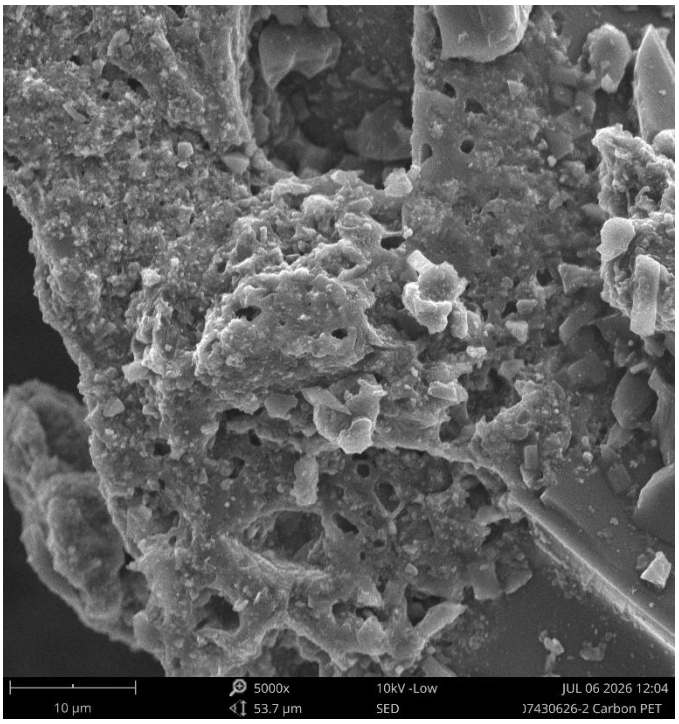
*Sumber: FTIR-LPPT-September-2022-v1.1.pdf*

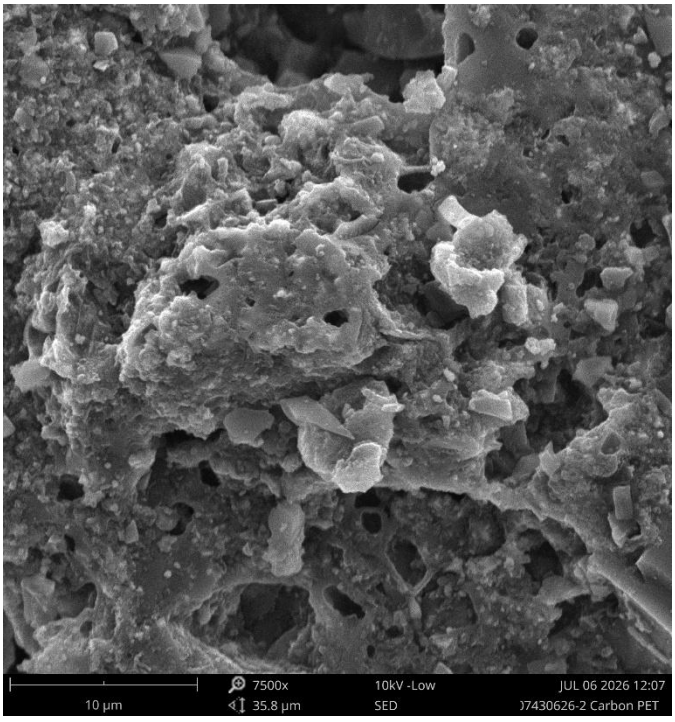
*Lampiran 8 Gambar SEM Raw PET*



*Lampiran 9 Gambar SEM Karbon Aktif (Aktivator KOH)*



*Lampiran 9 Tabel Pembacaan Grafik dengan FTIR Raw PET*

| No. | Peak | Intensity | Corr. Intensity | Base (H) | Base (L) | Area | Corr. Area |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 435.91 | 71.79 | 5.84 | 455.20 | 428.20 | 627.832 | 61.292 |
| 2 | 459.06 | 81.38 | 1.50 | 466.77 | 455.20 | 202.466 | 7.978 |
| 3 | 501.49 | 73.20 | 13.33 | 563.21 | 466.77 | 1608.263 | 400.316 |
| 4 | 570.93 | 90.44 | 0.53 | 586.36 | 563.21 | 213.908 | 6.647 |
| 5 | 632.65 | 86.76 | 2.00 | 640.37 | 586.36 | 557.421 | 6.302 |
| 6 | 721.38 | 18.49 | 73.41 | 752.24 | 640.37 | 3656.687 | 2627.377 |
| 7 | 790.81 | 81.11 | 5.54 | 802.39 | 752.24 | 627.073 | 73.503 |
| 8 | 844.82 | 71.88 | 5.95 | 860.25 | 802.39 | 1240.810 | 83.582 |
| 9 | 871.82 | 59.04 | 18.47 | 891.11 | 860.25 | 900.095 | 228.142 |
| 10 | 972.12 | 68.80 | 8.39 | 987.55 | 914.26 | 1606.709 | 160.167 |
| 11 | 1018.41 | 44.72 | 27.81 | 1029.99 | 987.55 | 1569.744 | 436.221 |
| 12 | 1045.42 | 64.78 | 2.61 | 1053.13 | 1029.99 | 766.196 | 35.951 |
| 13 | 1095.57 | 25.94 | 47.95 | 1161.15 | 1053.13 | 5234.698 | 2667.864 |
| 14 | 1242.16 | 25.99 | 60.89 | 1323.17 | 1184.29 | 5867.701 | 4114.462 |
| `15 | 1338.60 | 70.09 | 21.37 | 1357.89 | 1323.17 | 568.720 | 277.181 |
| 16 | 1373.32 | 88.83 | 3.20 | 1388.75 | 1357.89 | 291.221 | 45.339 |
| 17 | 1408.04 | 73.19 | 20.04 | 1427.32 | 1388.75 | 555.716 | 294.839 |
| 18 | 1458.18 | 89.09 | 3.31 | 1465.90 | 1427.32 | 326.047 | 74.831 |
| 19 | 1473.62 | 90.88 | 2.28 | 1492.90 | 1465.90 | 169.797 | 15.182 |
| 20 | 1504.48 | 90.09 | 6.18 | 1516.05 | 1492.90 | 149.108 | 62.568 |
| 21 | 1712.79 | 28.05 | 68.70 | 1766.80 | 1627.92 | 3527.453 | 3047.119 |

*Lampiran 10 Tabel Pembacaan Grafik dengan FTIR Sebelum Furnace*

| No | X value | Y value | Label |
|---|---|---|---|
| 1 | 555,50 | 108,50 | Below |
| 2 | 1415,75 | 102,00 | Below |
| 3 | 1523,76 | 101,33 | Below |
| 4 | 1681,93 | 101,16 | Below |
| 5 | 1712,79 | 101,36 | Below |
| 6 | 1975,11 | 100,76 | Below |
| 7 | 2333,87 | 98,76 | Below |
| 8 | 2360,87 | 97,63 | Below |

*Lampiran 11 Tabel Pembacaan Grafik dengan FTIR Sesudah Furnace*

| No | X value | Y value | Label |
|---|---|---|---|
| 1 | 528,50 | 106,54 | Below |
| 2 | 1519,91 | 99,19 | Below |
| 3 | 1539,20 | 99,29 | Below |
| 4 | 1554,63 | 100,00 | Below |
| 5 | 1647,21 | 100,05 | Below |
| 6 | 1716,65 | 99,71 | Below |

*Lampiran 12*

| | X value | Y value | Label |
|---|---|---|---|
| 1 | 744.52 | 99.47 | Below |
| 2 | 871.82 | 99.56 | Below |
| 3 | 1735.93 | 99.95 | Below |
| 4 | 1959.68 | 100.61 | Below |
| 5 | 2241.28 | 100.83 | Below |
| 6 | 2353.16 | 100.77 | Below |
| 7 | 2376.30 | 100.72 | Below |

## RIWAYAT HIDUP



Penulis Aisyah Intan Rizqi lahir di Jambi pada tanggal 28 September 2004. Penulis merupakan anak tunggal dari pasangan Ibu Suprapti dan Bapak Bambang Prihartono. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDIT Ash-Shiddiiqi Kota Jambi pada tahun 2010-2016, melanjutkan pendidikan sekolah menengah pertama di SMPIT Ash-Shiddiiqi Kabupaten Batang Hari pada tahun 2016-2019, penulis juga melanjutkan pendidikan sekolah menengah atas di MAN 2 Kota Jambi pada tahun 2019-2022, hingga pada tahun 2022 penulis menempuh pendidikan di Universitas Islam Indonesia sebagai bagian dari mahasiswa Program Studi Teknik Lingkungan. Selama masa pendidikan sebagai mahasiswa penulis mengikuti berbagai macam kegiatan akademik maupun non-akademik yang berperan besar sebagai pengembangan kemampuan bagi penulis. Kegiatan yang diikuti oleh penulis diantaranya, menjadi bagian tim kerja pembagian hasil rangkuman diklat untuk beberapa mata pelajaran seperti kalkulus dan lainnya oleh alumni teknik sipil dan arsitek, berperan aktif sebagai bagian tim kerja dari program kegiatan "Pengabdian Masyarakat dan Zero Waste FTSP" selama satu periode yang dinaungi oleh Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan, penulis juga turut serta mengasah *softskill* dengan mengikuti pelatihan kelas "Public Speaking" yang diselenggarakan oleh Dialogika selama satu bulan, mengikuti kelas private "Make Up Artist" oleh Superprof, bergabung dalam kelas ekonomi kreatif dengan membuat "whimsical crown paper and flanel" yang diselenggarakan oleh in.wipi selama satu hari, adapun selama perkuliahan penulis juga mengambil kelas MBKM bersertifikat yang mengasah kemampuan kinerja kelompok dalam menangani projek "green building" yang hendak dicapai oleh pihak UII yang bekerja sama dengan The International Finance Corporation (IFC) green building program centers on EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) dalam penerapan net zero emission pada beberapa bangunan yang berada di UII selama satu semester. Penulis juga mengikuti kelas CEPT yang menjadi syarat kelulusan dari program strata satu.

FAKULTAS
TEKNIK DESAIN INOVASI
Akreditasi Institusi "Unggul"

PROGRAM STUDI
TEKNIK LINGKUNGAN
TERAKREDITASI UNGGUL
Akreditasi Program Studi "Unggul"
Akreditasi Internasional "IABEE"

# LEMBAR PEMBIMBINGAN TUGAS AKHIR

Tahun Ajaran : 2025/2026
Nama Mahasiswa : Aisyah Intan Rizqi
Nomor Induk Mahasiswa : 22513132
Judul Tugas Akhir : Efektivitas Adsorben dari Limbah Botol PET dalam Menyerap Ion Kadmium (Cd2+) di Dalam Air, Yogyakarta, Universitas Islam Indonesia
Periode Tugas Akhir : 1 Maret 2025 – 1 September 2026
Dosen pembimbing : Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.
Dosen pembimbing II : -

| No. | Tanggal | Catatan Pembimbingan | Tanda Tangan Pembimbing |
|---|---|---|---|
| 1. | 24/09/2025 | - Mencari dan membaca literatur terdahulu yang berkaitan dengan project TA<br>- Mencatat hasil bacaan jurnal terkait suhu yang digunakan dalam pirolisis<br>- Mencari tahapan pengujian | |
| 2. | 03/10/2025 | - Menentukan aktivator yang hendak digunakan dalam penelitian<br>- Membahas persiapan proposal | |
| 3. | 22/10/2025 | - Tahapan penelitian disesuaikan kembali dengan jurnal yang dibaca<br>- Masukkan pembahasan terkait (adsorben) karbon aktif itu sendiri | |
| 4. | 28/11/2025 | - Tambahkan sumber dari jurnal yang telah ada<br>- Penentuan aktivator KOH untuk penelitian<br>- Persiapan tanggal pirolisis PET | |
| 5. | 03/02/2026 | - Menggunakan 1 dari 3 diagram alir yang terpilih<br>- Memeriksa kembali penulisan proposal<br>- Tambahkan kembali bahasan pada latar belakang | |
| 6. | 20/02/2026 | - Tambahan revisi<br>- Tujuan penelitian diselaraskan dengan rumusan masalah<br>- Manfaat penelitian disingkat menjadi 3-5 poin saja<br>- Perbaiki kerangka berpikir<br>- Hapus poin 2-6 pada bab 2<br>- Perbaiki susunan sub-bab yang berada di bab 3<br>- Jadwal penelitian pindah ke bab 4 sebelum RAB<br>- Pertimbangkan jumlah sampel yang akan di uji | |
| 7. | 23/02/2025 | - Perbaiki RAB tambahkan jumlah sampel ke dalam RAB | |
| 8. | 27/02/2026 | - Perbaikan penulisan RAB | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 9. | 02/04/2026 | - Perbaiki penulisan yang masih banyak typo |  |
| 10. | 18/05/2026 | - Menambahkan isoterm freundlich ke dalam pembahasan metode<br>- Menambahkan alat intrumen dan merek yang digunakan<br>- Tambahkan ide pokok pada paragraf bab 1<br>- Jelaskan terkait jumlah sampel yang di RAB dan diselaraskan<br>- Tambahkan kembali literatur dari penelitian terdahulu<br>- Ubah tahapan pengujian pada tiap variasi ke dalam bentuk diagram alir. Bukan kalimat paragraph |  |
| 11. | 09/06/2026 | - Langsung dihitung dengan bantuan excel menggunakan perhitungan %adsorbsi dan massa adsorbsi untuk melihat variasi massa optimal |  |
| 12. | 23/06/2026 | - Langsung dihitung dengan bantuan excel menggunakan perhitungan %adsorbsi dan massa adsorbsi untuk melihat variasi konsentrasi optimal |  |
| 13. | 30/06/2026 | - Langsung dihitung dengan bantuan excel menggunakan perhitungan %adsorbsi dan massa adsorbsi untuk melihat variasi pH optimal |  |
| 14. | 16/07/2026 | - Langsung dihitung dengan bantuan excel menggunakan perhitungan %adsorbsi dan massa adsorbsi untuk melihat variasi waktu optimal dan variasi pH dan konsentrasi yang telah diulang |  |
| 15. | 23/07/2026 | - Konsultasi hasil laporan bab 4 dan penulisan bab 5 dan abstrak. |  |
| 16. | 27/07/2026 | - Ubah kata "karbon aktif" menjadi adsorben<br>- Perbaiki penulisan bab 1 dan bab 3 pada bagian diagram alir sesuai catatan pada word<br>- Perbaiki bab 4 sesuai catatan pada word |  |