



TUGAS AKHIR (WT43250)

**ANALISIS KARBON AKTIF BONGGOL JAGUNG
TERMODIFIKASI MAGNETIT Fe_3O_4 SEBAGAI ADSORBEN
UNTUK MENURUNKAN LOGAM BERAT TIMBAL (Pb)**

Keyne Nabila Regi
NRP. 1022040048

DOSEN PEMBIMBING
ULVI PRI ASTUTI, S.T., M.T.
PUSPITA KHUMAIROH, S.T., M.Eng.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGOLAHAN LIMBAH
JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (WT43250)

**ANALISIS KARBON AKTIF BONGGOL JAGUNG
TERMODIFIKASI MAGNETIT Fe_3O_4 SEBAGAI ADSORBEN
UNTUK MENURUNKAN LOGAM BERAT TIMBAL (Pb)**

Keyne Nabila Regi
NRP. 1022040048

DOSEN PEMBIMBING
ULVI PRI ASTUTI, S.T., M.T.
PUSPITA KHUMAIROH, S.T., M.Eng.

**PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGOLAHAN LIMBAH
JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026**

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS KARBON AKTIF BONGGOL JAGUNG TERMODIFIKASI
MAGNETIT Fe_3O_4 SEBAGAI ADSORBEN UNTUK MENURUNKAN
LOGAM BERAT TIMBAL (Pb)**

**Disusun Oleh:
Keyne Nabila Regi
1022040048**

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah
Jurusan Teknik Permesinan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA**

**Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 1 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026**

Menyetujui,

Dosen Penguji

NIDN/NUPTK

Tanda Tangan

1. Ulvi Pri Astuti, S.T., M.T.

(8360768669230313) (.....)

2. Puspita Khumairoh, S.T., M.Eng. (0660772673230292) (.....)

3. Novi Eka Mayangsari, S.T., M.T. (8449768669230313) (.....)

4. Sekarsari Wibowo, S.T., M.T. (6351777678230083) (.....)

Dosen Pembimbing

NIDN/NUPTK

Tanda Tangan

1. Ulvi Pri Astuti, S.T., M.T.

(8360768669230313) (.....)

2. Puspita Khumairoh, S.T., M.Eng. (0660772673230292) (.....)

**Menyetujui
Ketua Jurusan,**

Dr. Ir. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T.

NIP. 197708192005011001

**Mengetahui
Koordinator Program Studi,**

Dr. Mirna Apriani, S.T., M.T.

NIP. 197804142005012002

Halaman ini sengaja dikosongkan



PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

No. : F.WD I. 021
Date : 3 Nopember 2015
Rev. : 01
Page : 1 dari 1

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Keyne Nabila Regi

NRP. : 1022040048

Jurusan/Prodi : Teknik Permesinan Kapal/ D4 Teknik Pengolahan Limbah

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

"Analisis Karbon Aktif Bonggol Jagung Termodifikasi Magnetit Fe_3O_4 sebagai Adsorben untuk Menurunkan Logam Berat Timbal (Pb)"

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 31 Juni 2026

Yang membuat pernyataan,



(Keyne Nabila Regi)
NRP. 1022040048

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur, penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan kelimpahan rahmat, hidayah, serta kenikmatan yang tidak terhingga nilainya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**Analisis Karbon Aktif Bonggol Jagung Termodifikasi Magnetit Fe_3O_4 sebagai Adsorben untuk Menurunkan Logam Berat Timbal (Pb)**”. Penulisan tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan pada Program Studi Diploma IV Teknik Pengolahan Limbah di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Penulis juga menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini tidak akan berhasil tanpa bantuan dari berbagai pihak, baik berupa bimbingan, pengarahan dan motivasi sehingga telah memberikan semangat dalam proses penyusunan laporan ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih yang dalam kepada:

1. Kedua orang tua tercinta Bapak Soegiyanto dan Ibu Ni Nyoman Dewi Reni yang selalu memberikan doa, rasa sayang, nasihat, dukungan, serta motivasi yang tiada hentinya untuk segala kemudahan selama menjalani proses pengerjaan Tugas Akhir dari awal hingga akhir.
2. Saudara-saudara tercinta yang selalu memberikan doa, semangat, dukungan, dan motivasi kepada penulis sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
3. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Bapak Dr. Ir. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Permesinan Kapal.
5. Ibu Dr. Mirna Apriani, S.T., M.T. selaku Koordinator Program Studi Teknik Pengolahan Limbah.
6. Ibu Ulvi Pri Astuti, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang telah membantu dan mengarahkan penulis selama mengerjakan tugas akhir ini, serta meluangkan waktu selama proses bimbingan tugas akhir.

7. Ibu Puspita Khumairoh, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing II yang telah membantu dan mengarahkan penulis selama mengerjakan tugas akhir ini, serta meluangkan waktu selama proses bimbingan tugas akhir.
8. Ibu Novi Eka Mayangsari, S.T., M.T. selaku Ketua Sidang dan Dosen Penguji yang telah memberikan arahan, saran, kritik dan masukan dalam menyelesaikan Laporan Tugas Akhir.
9. Ibu Sekarsari Wibowo, S.T., M.T selaku Dosen Penguji yang telah memberikan arahan, saran, kritik dan masukan dalam menyelesaikan Laporan Tugas Akhir.
10. Ibu Ayu Nindyapuspa, S.T., M.T selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Pengolahan Limbah.
11. Bapak dan Ibu Dosen Teknik Pengolahan Limbah yang telah mendoakan kami serta memberikan ilmu yang bermanfaat selama perkuliahan.
12. Rahmadina Sabrina Putri, Karinda Azzahra dan Octavia Ratna Valentina sebagai sahabat penulis yang mendengarkan keluh kesah penulis selama penelitian dan mengerjakan tugas akhir ini. Saat senang dan sedih selalu memberi semangat serta doa sehingga tugas akhir ini dapat tersusun dengan baik.
13. Alvidias Dwi Agustin P. M., Nabilah Fadhillah Pinkan S., dan Adiannur Poppy Arsymillah atau “Tim Meja Depan” sebagai partner yang telah membantu penelitian penulis.
14. Inas Sa'idah Auliya sebagai partner mengerjakan tugas akhir dan revisi bersama.
15. Teman-teman seperjuangan PL 2022 yang saling mendoakan dan memberikan semangat selama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
16. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah membantu memberikan referensi, memberi pengarahan, saran, nasihat, dan dukungan motivasi pada Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa banyak kekurangan dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu penulis mengharapkan adanya saran dan kritik dari berbagai pihak dalam penyempurnaannya. Semoga laporan ini dapat menambah ilmu

pengetahuan dan wawasan dalam perkuliahan dan dunia industri bagi penulis khususnya serta pembaca pada umumnya.

Surabaya, 20 Juli 2026

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISIS KARBON AKTIF BONGGOL JAGUNG TERMODIFIKASI MAGNETIT Fe_3O_4 SEBAGAI ADSORBEN UNTUK MENURUNKAN LOGAM BERAT TIMBAL (Pb)

Keyne Nabila Regi

ABSTRAK

Limbah cair mengandung Pb berpotensi mencemari lingkungan perairan dan membahayakan kesehatan manusia karena Pb bersifat toksik, persisten, dan sulit terurai. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit (Fe_3O_4), pengaruh konsentrasi awal Pb, massa adsorben, waktu kontak, dan pH terhadap efisiensi penyisihan Pb, serta model isoterm dan kinetika adsorpsinya. Bonggol jagung dikarbonisasi, diaktivasi menggunakan H_2SO_4 , kemudian dimodifikasi dengan Fe_3O_4 melalui kopresipitasi. Adsorben dikarakterisasi menggunakan FTIR dan SEM-EDX, sedangkan Pb setelah adsorpsi dianalisis menggunakan AAS. FTIR mengidentifikasi gugus $-\text{OH}$ pada $3348,06\text{ cm}^{-1}$, $\text{C}=\text{C}$ pada $1574,76\text{ cm}^{-1}$, dan $\text{Fe}-\text{O}$ pada $583,53\text{ cm}^{-1}$ yang mengindikasikan magnetit. SEM-EDX menunjukkan permukaan adsorben berpori, tidak beraturan, serta tersusun atas C, O, dan Fe. Setelah adsorpsi, Pb terdeteksi 0,1 wt%. Efisiensi penyisihan tertinggi diperoleh pada konsentrasi awal Pb 2 mg/L sebesar 86,29%, massa adsorben 0,6 g sebesar 86,49%, waktu kontak 150 menit sebesar 95%, dan pH 5 sebesar 94,93%. One-way ANOVA menunjukkan semua variabel berpengaruh signifikan terhadap efisiensi penyisihan Pb. Data adsorpsi paling sesuai dengan isoterm Langmuir dengan $R^2=0,99868$, $Q_{\text{max}}=1,32118\text{ mg/g}$, dan $KL=1,09664\text{ L/mg}$, sedangkan kinetiknya mengikuti model pseudo-orde dua dengan $R^2=0,99860$. Karbon aktif bonggol jagung termodifikasi Fe_3O_4 berpotensi sebagai adsorben untuk penyisihan Pb dari limbah cair sintesis.

Kata kunci: Adsorpsi, Bonggol Jagung, Fe_3O_4 , Karbon Aktif, Timbal

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALYSIS OF MAGNETITE (Fe_3O_4)-MODIFIED CORN COB ACTIVATED CARBON AS AN ADSORBENT FOR REDUCING HEAVY METAL LEAD (Pb)

Keyne Nabila Regi

ABSTRACT

Pb-containing wastewater can contaminate aquatic environments and endanger human health because Pb is toxic, persistent, and difficult to degrade. This study characterized magnetite (Fe_3O_4)-modified corn cob activated carbon and evaluated the effects of initial Pb concentration, adsorbent mass, contact time, and pH on Pb removal efficiency, adsorption isotherms, and kinetics. Corn cobs were carbonized, activated with H_2SO_4 , and modified with Fe_3O_4 through coprecipitation. The adsorbent was characterized using FTIR and SEM-EDX, while residual Pb was analyzed using AAS. FTIR identified $-OH$, $C=C$, and $Fe-O$ groups at 3348,06, 1574,76, and 583,53 cm^{-1} , respectively, indicating the presence of magnetite. SEM-EDX revealed a porous, irregular surface containing C, O, and Fe, with 0,1 wt% Pb detected after adsorption. The highest removal efficiencies were obtained at an initial Pb concentration of 2 mg/L (86,29%), an adsorbent mass of 0,6 g (86,49%), a contact time of 150 minutes (95%), and pH 5 (94,93%). One-way ANOVA confirmed that all variables significantly affected Pb removal. Adsorption followed the Langmuir isotherm model ($R^2 = 0,99868$, $Q_{max} = 1,32118$ mg/g, and $KL = 1,09664$ L/mg) and the pseudo-second-order kinetic model ($R^2 = 0,99860$). Therefore, Fe_3O_4 -modified corn cob activated carbon is a promising adsorbent for Pb removal from synthetic wastewater.

Key word: Activated carbon, Adsorption, Corn cob, Fe_3O_4 , Lead

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Logam Berat Timbal (Pb)	7
2.2 Bonggol Jagung.....	8
2.3 Karbon Aktif	10
2.4 Adsorben yang Termodifikasi Magnetit Fe ₃ O ₄	11
2.5 Adsorpsi	12
2.5.1 Mekanisme Adsorpsi.....	12
2.5.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Proses Adsorpsi.....	13
2.6 Isoterm Adsorpsi	16
2.6.1 Isoterm Adsorpsi Langmuir.....	16
2.6.2 Isoterm Adsorpsi Freundlich.....	17
2.7 Kinetika Adsorpsi.....	18
2.7.1 Kinetika Pseudo Orde Nol.....	20
2.7.2 Kinetika Pseudo Orde Satu.....	20

2.7.3 Kinetika Pseudo Orde Dua	21
2.8 Perhitungan Efisiensi Removal (<i>Removal Efficiency</i>).....	21
2.9 FTIR (<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>)	22
2.10 Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX).....	23
2.11 Pengujian AAS	24
2.12 Uji Statistik	25
2.12.1 Uji Normalitas	26
2.12.2 Uji One Way ANOVA	26
2.13 Penelitian Terdahulu	27
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	33
3.2 Perumusan Ide Penelitian	34
3.3 Perumusan Masalah dan Tujuan.....	35
3.4 Studi Literatur.....	35
3.5 Pengumpulan Data.....	35
3.5.1 Data Primer.....	35
3.5.2 Data Sekunder.....	36
3.6 Penentuan Tempat dan Waktu Penelitian	36
3.6.1 Penentuan Tempat Penelitian	36
3.6.2 Penentuan Waktu Penelitian.....	36
3.7 Penentuan Variabel Penelitian.....	36
3.7.1 Variabel Bebas.....	37
3.7.2 Variabel Terikat.....	37
3.7.3 Variabel Kontrol.....	37
3.8 Populasi dan Sampel Penelitian.....	37
3.8.1 Populasi Penelitian	38
3.8.2 Sampel Penelitian	38
3.9 Prosedur Penelitian	40
3.9.1 Alat	40
3.9.2 Bahan.....	41
3.9.3 Pre-Treatment Bonggol Jagung.....	41

3.9.4	Pembuatan Karbon Aktif Bonggol Jagung	42
3.9.5	Pembuatan Karbon Aktif Bonggol Jagung Termodifikasi Magnetit Fe ₃ O ₄	42
3.9.6	Pembuatan Larutan Induk Pb ²⁺	43
3.9.7	Pengenceran dari 100 mg/L ke Konsentrasi Kerja.....	43
3.9.8	Proses Adsorpsi.....	44
3.9.9	Pengujian AAS.....	45
3.10	Analisa Data dan Pembahasan	46
3.11	Hipotesa Uji Statistik	48
3.12	Kesimpulan dan Saran.....	48
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	49
4.1	Hasil Uji Karakterisasi	49
4.1.1	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR)	49
4.1.2	<i>Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X-Ray</i> (SEM/EDX)	51
4.2	Pengaruh Variasi terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Logam Berat Timbal (Pb)	54
4.2.1	Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Logam Berat Pb	54
4.2.2	Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Logam Berat Pb	56
4.2.3	Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Logam Berat Pb.....	58
4.2.4	Pengaruh pH Larutan terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Logam Berat Pb	60
4.3	Isoterm Adsorpsi	62
4.3.1	Isoterm Langmuir.....	62
4.3.2	Isoterm Freundlich	64
4.4	Kinetika Adsorpsi.....	66
4.5	Analisis Statistika.....	69
4.5.1	Uji Normalitas.....	70
4.5.2	Uji Homogenitas	71

4.5.3 Uji One Way ANOVA	72
4.6 Mekanisme Adsorpsi	74
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	77
DAFTAR PUSTAKA	79
LAMPIRAN A PERHITUNGAN KEBUTUHAN BAHAN KIMIA	89
LAMPIRAN B PERHITUNGAN DAN HASIL PENGUJIAN ADSORPSI ..	95
LAMPIRAN C PERHITUNGAN ISOTERM DAN KINETIKA ADSORPSI	103
LAMPIRAN D UJI STATISTIK	107
LAMPIRAN E PENGUJIAN KARAKTERISASI.....	113
LAMPIRAN F DOKUMENTASI PENELITIAN	121
BIODATA PENULIS	129

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Bonggol Jagung.....	9
Gambar 2. 2. Karbon Aktif (Aprilianti et al., 2023)	11
Gambar 2. 3. Thermo Scientific FTIR Nicolet iS10	23
Gambar 2. 4. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	24
Gambar 2. 5. <i>Atomic Absorption Spectroscopy</i> (AAS).....	25
Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian	34
Gambar 4. 1. Spektrum FTIR Karbon Aktif Termodifikasi Magnetit	49
Gambar 4. 2.(a) Hasil SEM Karbon Aktif Termodifikasi Magnetit Perbesaran 10.000x Sebelum Adsorpsi. (b) Hasil EDX Karbon AKtif Termodifikasi Magnetit Perbesaran 1.000x Sebelum Adsorpsi	52
Gambar 4. 3.(a) Hasil SEM Karbon Aktif Termodifikasi Magnetit Perbesaran 10.000x Setelah Adsorpsi. (b) Hasil EDX Karbon Aktif Termodifikasi Magnetit Perbesaran 1.000x Setelah Adsorpsi	52
Gambar 4. 4. Grafik Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Pb	55
Gambar 4. 5. Grafik Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Pb	57
Gambar 4. 6 Grafik Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Pb	58
Gambar 4. 7 Grafik Pengaruh pH Larutan terhadap Efisiensi Removal dan	60
Gambar 4. 8 Grafik Isoterm Langmuir	63
Gambar 4. 9. Grafik Isoterm Freundlich.....	65
Gambar 4. 10 Grafik Kinetika Pseudo-Orde Nol.....	66
Gambar 4. 11 Grafik Kinetika Pseudo-Orde Satu.....	67
Gambar 4. 12 Grafik Kinetika Pseudo-Orde Dua	67

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Kandungan Lignoselulosa dalam Bonggol Jagung.....	10
Tabel 2. 2	Penelitian Terdahulu Pembuatan Karbon Aktif dari Biomassa dan Karbon Aktif Modifikasi Magnetit	28
Tabel 3. 1	Sampel Pengujian Variasi Konsentrasi Logam Pb	38
Tabel 3. 2	Sampel Pengujian Variasi Massa Adsorben	39
Tabel 3. 3	Sampel Pengujian Variasi Waktu Kontak.....	39
Tabel 3. 4	Sampel Pengujian Variasi pH	40
Tabel 4. 1	Data Penelitian untuk Grafik Isoterm Langmuir.....	62
Tabel 4. 2	Hasil Perhitungan Isoterm Langmuir.....	63
Tabel 4. 3	Data Penelitian untuk Grafik Isoterm Freundlich.....	64
Tabel 4. 4	Hasil Perhitungan Isoterm Freundlich	65
Tabel 4. 5	Studi Kinetika Adsorpsi	67
Tabel 4. 6	Hasil Uji Normalitas Variasi Konsentrasi Awal Pb.....	70
Tabel 4. 7	Hasil Uji Normalitas Variasi Massa Adsorben	70
Tabel 4. 8	Hasil Uji Normalitas Variasi Waktu Kontak	71
Tabel 4. 9	Hasil Uji Normalitas Variasi pH Larutan	71
Tabel 4. 10	Hasil Uji Homogenitas.....	72
Tabel 4. 11	Hasil Uji Anova One Way	73

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Limbah cair industri menjadi salah satu sumber utama pencemar logam berat timbal (Pb) di lingkungan perairan. Limbah cair industri mengandung logam berat Pb sebesar 0,26 hingga 16,126 mg/L, dengan rata-rata kandungan Pb adalah sebesar 6,26 mg/L. Kandungan Pb tersebut melebihi baku mutu air limbah dalam Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013, dimana kadar maksimum logam berat Pb adalah 0,1 mg/L. Konsentrasi Pb sering melampaui baku mutu dan berpotensi menimbulkan dampak toksik jangka panjang. Penelitian global menunjukkan bahwa Pb banyak ditemukan dalam berbagai jenis limbah, termasuk pertambangan, pengolahan mineral, cat, tekstil, elektroplating, baterai, dan pigmen warna (Oladimeji *et al.*, 2024).

Timbal (Pb) merupakan logam berat non-esensial yang bersifat toksik dan persisten (Siddiqi *et al.*, 2023). Pb merupakan logam berat karsinogenik yang mampu mencemari lingkungan seperti air, tanah, udara, hewan, tumbuhan, dan manusia (Salindra *et al.*, 2022). Paparan timbal dapat menyebabkan kerusakan berbagai organ tubuh seperti sistem peredaran darah, sistem saraf pusat, ginjal, hati, dan sistem reproduksi (Ali *et al.*, 2019). Oleh karena itu, Pb yang melebihi baku mutu di limbah cair industri adalah masalah besar yang perlu ditangani melalui teknologi pengolahan yang efektif (Collin *et al.*, 2022).

Berbagai metode utama pengolahan logam berat dalam limbah cair meliputi presipitasi/koagulasi kimia, membran, dan adsorpsi. Presipitasi dan koagulasi–flokulasi efektif untuk konsentrasi logam tinggi dan prosesnya relatif sederhana, tetapi menghasilkan lumpur dalam jumlah besar yang membutuhkan pengolahan lanjutan dan menambah biaya pengelolaan limbah padat (Qasem *et al.*, 2021). Teknologi membran dan elektrodialisis menawarkan efisiensi dan selektivitas tinggi, namun terkendala fouling, kebutuhan praperlakuan, serta biaya investasi dan operasi yang tinggi (Qasem *et al.*, 2021). Metode lanjutan seperti fotokatalisis

dan proses elektro-kimia menjanjikan dari sisi efisiensi, namun masih terbatas skalabilitas industri dan kelayakan ekonominya (Onyenanu & Onyenanu, 2025). Metode adsorpsi yang menggunakan adsorben berpori, khususnya karbon aktif, dipandang sebagai alternatif yang menguntungkan dalam hal ini. Metode ini relatif lebih sederhana, fleksibel, dan berbiaya lebih rendah dibanding beberapa teknik konvensional (Ayach *et al.*, 2024).

Karbon aktif merupakan adsorben yang paling banyak digunakan dalam aplikasi pengolahan limbah cair karena memiliki porositas tinggi, luas permukaan yang besar, dan kapasitas adsorpsi yang tinggi. Pembuatan karbon aktif melibatkan dua proses utama yaitu karbonisasi dan aktivasi kimia menggunakan agen pengaktivasi seperti H_2SO_4 . Aktivasi kimia bonggol jagung menggunakan asam sulfat (H_2SO_4) terbukti meningkatkan luas permukaan spesifik dari $104,4 \text{ m}^2/\text{g}$ menjadi $249,0 \text{ m}^2/\text{g}$ dan volume pori dari $0,0648 \text{ cm}^3/\text{g}$ menjadi $0,1638 \text{ cm}^3/\text{g}$. Mekanisme dekarbonisasi oleh H_2SO_4 menghancurkan fiber bundles dan membentuk struktur pori yang terorganisir dengan gugus hidroksil ($-\text{OH}$) yang meningkatkan kapasitas adsorpsi (Aliyu S.A. *et al.*, 2024). Karbon aktif dapat dihasilkan dari berbagai bahan baku karbonat, seperti batubara, tempurung kelapa, serbuk kayu, dan biomassa pertanian seperti bonggol jagung. (Januszewicz *et al.*, 2023; Aliyu S.A. *et al.*, 2024).

Produksi jagung di Indonesia menghasilkan limbah bonggol jagung dalam skala jutaan ton per tahun, sehingga menyediakan sumber bahan baku murah dan melimpah untuk pembuatan karbon aktif. Menurut Aprilia MTA *et al.*, (2024), produksi jagung rata-rata 12,1 juta ton per tahun akan menghasilkan limbah tongkol jagung sekitar 8,1 juta ton per tahun. Bonggol jagung adalah limbah pertanian lignoselulosik yang kaya akan selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Kandungan lignin pada bonggol jagung sebesar 23,3%, hemiselulosa 31,8%, dan selulosa 44,9% (Suherman *et al.*, 2021). Kandungan lignoselulosa yang tinggi menjadikannya berpotensi menjadi bahan baku karbon aktif untuk adsorpsi (Irawan *et al.*, 2025).

Menurut Irawan *et al.*, (2025), karbon aktif berbasis bonggol jagung yang diaktivasi secara kimia (KOH dan H_2SO_4 , 1–3 M) menunjukkan efisiensi penurunan Pb yang tinggi. Efisiensi penurunan Pb yang dicapai berada pada

kisaran 88,70 – 97,53% pada sistem batch sederhana, dan kadar air dan abu tetap memenuhi SNI karbon aktif. Studi lain oleh Aliyu S.A. *et al.*, (2024), menemukan bahwa luas permukaan karbon aktif bonggol jagung teraktivasi H_2SO_4 mencapai $249 \text{ m}^2/\text{g}$ pada 600°C . Hasil ini menegaskan bahwa tongkol jagung berpotensi kuat sebagai adsorben Pb dalam media air.

Karbon aktif bonggol jagung telah terbukti efektif sebagai adsorben Pb namun terdapat beberapa tantangan dalam aplikasi praktisnya. Salah satu tantangan tersebut adalah kesulitan dalam pemisahan adsorben dari limbah cair setelah proses adsorpsi selesai, serta kapasitas adsorpsi yang masih dapat ditingkatkan. Modifikasi permukaan karbon aktif dengan nanopartikel magnetit Fe_3O_4 dipandang sebagai salah satu pendekatan yang relevan untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Penambahan Fe_3O_4 dilaporkan mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi logam berat sekaligus memberikan sifat magnetik, sehingga adsorben dapat dipisahkan dari larutan dengan lebih mudah menggunakan magnet eksternal (Singh *et al.*, 2023; Guel-Nájar *et al.*, 2023)

Karbon aktif sekam padi yang dimodifikasi dengan nanopartikel magnetit Fe_3O_4 dilaporkan mampu menurunkan konsentrasi Pb^{2+} dari $8,874 \text{ mg/L}$ menjadi $0,167 \text{ mg/L}$, dengan efisiensi penurunan mencapai 98,11% pada kondisi optimum (massa adsorben 100 mg, pH 5, dan waktu kontak 60 menit). Karbon aktif bermagnet berbasis limbah pertanian lain yang disintesis dengan mengintegrasikan fase oksida besi ke dalam matriks karbon juga menunjukkan kapasitas adsorpsi Pb^{2+} pada kisaran $40\text{--}70 \text{ mg/g}$, dengan perilaku adsorpsi yang sesuai dengan model isotherm Langmuir.

Data tersebut menunjukkan bahwa karbon aktif biomassa termodifikasi Fe_3O_4 telah terbukti efektif untuk penurunan Pb^{2+} dari air atau limbah cair, sehingga pendekatan serupa layak diterapkan pada karbon aktif berbasis bonggol jagung dalam penelitian ini. Berdasarkan penelitian, untuk memaksimalkan proses adsorpsi maka pada penelitian ini dilakukan analisa karbon aktif bonggol jagung termodifikasi Fe_3O_4 sebagai adsorben untuk menurunkan kadar logam Pb pada limbah cair. Variasi konsentrasi adsorbat, massa adsorben, waktu kontak, dan pH akan dikaji untuk dapat mengetahui variasi mana yang memiliki kinerja optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, diperoleh rumusan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik adsorben karbon aktif bonggol jagung termodifikasi Fe_3O_4 yang akan digunakan sebagai adsorben untuk menurunkan kadar Pb dalam air limbah?
2. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi awal Pb, massa adsorben, pH, dan waktu kontak terhadap kemampuan penyerapan Pb oleh komposit karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe_3O_4 ?
3. Bagaimana adsorpsi isoterm dan kinetika adsorpsi logam Pb berdasarkan persamaan isoterm Langmuir dan Freunlich?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan, maka penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik adsorben karbon aktif bonggol jagung termodifikasi Fe_3O_4 yang akan digunakan sebagai adsorben untuk menurunkan kadar Pb dalam air limbah.
2. Menganalisis pengaruh variasi konsentrasi awal Pb, massa adsorben, pH, dan waktu kontak terhadap kemampuan penyerapan Pb oleh komposit karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe_3O_4
3. Menganalisis isoterm dan kinetika adsorpsi logam Pb berdasarkan persamaan isoterm Langmuir dan Freunlich

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat antara lain:

1. Memberikan alternatif teknologi pengolahan limbah cair yang mengandung Pb berbasis metode adsorpsi menggunakan karbon aktif bonggol jagung termodifikasi Fe_3O_4 , sehingga memanfaatkan limbah pertanian lokal menjadi adsorben berperforma tinggi dan mudah dipisahkan secara magnetik.

2. Menyediakan data eksperimental mengenai pengaruh konsentrasi awal Pb, massa adsorben, pH, dan waktu kontak terhadap efisiensi penyerapan Pb^{2+} oleh karbon aktif bonggol jagung termodifikasi Fe_3O_4 , yang dapat dijadikan dasar perancangan dan optimasi unit adsorpsi di skala laboratorium maupun industri kecil–menengah.
3. Memberikan informasi ilmiah mengenai sifat isoterm adsorpsi Pb^{2+} pada karbon aktif bonggol jagung termodifikasi Fe_3O_4 , sehingga memperkaya kajian tentang mekanisme adsorpsi logam berat pada adsorben berbasis limbah pertanian dan dapat menjadi referensi untuk penelitian lanjutan atau pengembangan adsorben serupa.
4. Mendukung upaya pengelolaan limbah pertanian dan ekonomi sirkular dengan meningkatkan nilai tambah bonggol jagung melalui pemanfaatannya sebagai bahan baku karbon aktif termodifikasi Fe_3O_4 , sehingga berpotensi mengurangi beban limbah serta membuka peluang aplikatif di bidang pengolahan air dan lingkungan.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian tugas akhir ini antara lain adalah sebagai berikut:

1. Limbah cair yang digunakan adalah limbah cair artifisial.
2. Adsorben yang digunakan adalah karbon aktif bonggol jagung termodifikasi Fe_3O_4 .
3. Penelitian dilakukan secara batch di laboratorium dengan volume larutan per percobaan tetap (100 mL) dan suhu operasi pada kondisi suhu ruang.
4. Parameter yang dikaji terbatas pada variasi konsentrasi logam Pb, massa adsorben, waktu kontak, dan pH.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Logam Berat Timbal (Pb)

Timbal (Pb) adalah salah satu logam berat yang paling berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Meskipun logam ini sebenarnya ada di kerak bumi secara alami, tingkatnya telah meningkat karena aktivitas manusia seperti penambangan, peleburan, penggunaan bensin bertimbal, cat, baterai, dan berbagai proses industri lainnya. Timbal memiliki bentuk lunak dan mudah dibentuk, titik leleh rendah, dan sangat tahan terhadap korosi. Ketika permukaan Pb terpapar udara atau air, senyawa seperti timbal oksida (PbO), timbal sulfat (PbSO₄), dan timbal karbonat (PbCO₃) akan membentuk lapisan yang melindunginya, membuat logam lebih tahan lama dan lebih sulit untuk diuraikan. Pb banyak ditemukan dalam berbagai jenis limbah, seperti pertambangan, pengolahan mineral, cat, tekstil, elektroplating, dan baterai (Oladimeji *et al.*, 2024). Pb digunakan dalam industri-industri tersebut sebagai lapisan antikorosi, material elektrode, stabilizer, dan aditif fungsional. Ion Pb ini dengan mudah terbawa ke air bilasan dan air proses, sehingga masuk ke dalam limbah (Suwazan & Nurhidayanti, 2022). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa limbah cair industri mengandung logam berat Pb sebesar 0,26 hingga 16,126 mg/L, dengan rata-rata kandungan Pb adalah sebesar 6,26 mg/L. Kandungan Pb tersebut melebihi baku mutu air limbah dalam Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013, dimana kadar maksimum logam berat Pb adalah 0,1 mg/L.

Pembuangan limbah cair yang mengandung Pb²⁺ secara langsung ke air permukaan, air laut, atau air tanah memiliki dampak signifikan pada kehidupan organisme (Khashan & Mohammad, 2022). Limbah yang tidak diobati dapat menyebabkan akumulasi Pb dalam sedimen dan organisme air, menciptakan risiko jangka panjang bagi ekosistem perairan.

Menurut Kumar *et al.*, (2020), logam Pb menyebabkan berbagai efek toksik mulai dari fisiologis, morfologis, hingga biokimia pada organisme hidup. Pada

tanaman, toksisitas Pb ditandai dengan produksi klorofil yang terganggu, pembagian sel, pemanjangan akar, organisasi lamellae dalam kloroplas, pertumbuhan tanaman, perkecambahan benih, perkembangan kecambah, dan transpirasi. Besarnya efek ini bervariasi dan/atau bergantung pada kadar Pb, waktu paparan, intensitas stres tanaman, dan stadium perkembangan tanaman. Toksisitas Pb yang diinduksi juga menghasilkan spesies oksigen reaktif (ROS) dalam tanaman. ROS yang disintesis sebagai hasil dari stres oksidatif pada tanaman dapat menyebabkan efek merugikan seperti peroksidasi lipid, gangguan membran sel, kerusakan DNA dan protein, penghambatan fotosintesis, dan penghambatan produksi ATP.

Paparan konsentrasi tinggi Pb^{2+} di lingkungan diketahui memiliki efek merugikan pada kesehatan manusia, termasuk anemia, kerusakan sistem saraf, hati, gangguan reproduksi pada pria, tekanan darah tinggi, dan penyakit mental. Pada anak-anak, Pb^{2+} dapat menyebabkan IQ lebih rendah, gangguan belajar, kesulitan sosial, dan masalah kognitif (Futalan *et al.*, 2023). Menurut Kumar *et al.*, (2020), peningkatan konsentrasi Pb dalam darah mempengaruhi perilaku, kinerja kognitif, pertumbuhan pasca kelahiran, penundaan pubertas, dan mengurangi kapasitas pendengaran pada bayi dan anak-anak.

Pada orang dewasa, Pb menyebabkan masalah kardiovaskular, sistem saraf pusat, ginjal, dan kesuburan. Selama kehamilan, Pb juga dapat mengganggu pertumbuhan janin pada tahap awal. Alam *et al.*, (2024) melaporkan bahwa lead exposure telah dikaitkan dengan dampak merugikan pada otak, sistem saraf, kesuburan perempuan, dan sistem kekebalan tubuh. Standar yang ditetapkan oleh *Commission Regulation E.C. No 1831/2003* menetapkan konsentrasi Pb ($0,3 \text{ mg/kg}^{-1}$) sebagai ambang batas untuk produk pertanian yang berbeda seperti sayuran berdaun dan herba aromatik segar.

2.2 Bonggol Jagung

Jagung atau *Zea mays* adalah salah satu jenis tanaman sereal yang berasal dari benua Amerika, tepatnya dari negara Meksiko. Tanaman ini adalah salah satu jenis rumput-rumputan yang memiliki tipe biji monokotil. Jagung digunakan di Indonesia sebagai pakan ternak dan sebagai bahan dasar industri makanan dan

minuman, tepung, minyak, dan banyak lagi. Tanaman jagung terdiri dari tongkol, biji, akar, batang, dan bunga (Fiqriansyah *et al.*, 2021). Klasifikasi tanaman jagung adalah sebagai berikut:

Regnum : *Plantae*
Divisio : *Spermatophyta*
Class : *Monocotyledoneae*
Ordo : *Poales*
Familia : *Poaceae (Graminae)*
Genus : *Zea*
Species : *Zea mays*



Gambar 2. 1. Bonggol Jagung
(Dinas Pertanian Cilacap, 2023)

Bonggol jagung (tongkol jagung) adalah bagian dari tanaman jagung yang terbentuk setelah proses panen dan pemisahan bulir dari ibu tangkai. Tongkol jagung kering biasanya menjadi limbah dan dibakar begitu saja yang tentunya akan mengakibatkan cemaran lingkungan (Ganing *et al.*, 2023). Bonggol jagung merupakan sisa atau limbah pertanian yang jumlahnya terus meningkat seiring dengan peningkatan aktivitas pasca panen.

Menurut Futralan *et al.*, (2023) limbah pertanian yang sejenis dengan bonggol jagung yang kaya akan lingo-selulosa dapat diubah menjadi sumber karbon berkualitas tinggi untuk pembuatan arang aktif. Hal ini dikarenakan kandungan selulosa yang tinggi dalam bonggol jagung memberikan struktur berpori yang baik setelah melalui proses karbonisasi dan aktivasi. Selain itu, lignin dalam bonggol jagung memberikan struktur rigiditas dan ketahanan. Adapun kandungan komposisi liginoselulosa bonggol jagung ditunjukkan pada Tabel 2.2 dan gambar bonggol

jagung ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Tabel 2. 1 Kandungan Lignoselulosa dalam Bonggol Jagung

Sumber	Selulosa	Hemiselulosa	Lignin
Ganing <i>et al.</i> , 2023	40 – 44%	31 – 33%	16 – 18%
Putri <i>et al.</i> , 2023	38,8%	44,4%	11,9%
Gandam <i>et al.</i> , 2022 mengutip dari Bhatia <i>et al.</i> , 2020	33 – 43%	26 – 36%	17 – 21%

2.3 Karbon Aktif

Arang dibuat dari bahan-bahan yang mengandung karbon yang dipanaskan pada suhu tinggi. Ini adalah padatan berpori yang mengandung 85 hingga 95% karbon. Sebagai adsorben (penyerap), daya serap arang ditentukan oleh luas permukaan partikel. Luas permukaan partikel arang dapat meningkat karena aktivasi dengan bahan kimia atau pemanasan pada suhu tinggi. Arang aktif adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan arang yang telah diaktivasi (Meriatna, Leni., Maulinda., Munawar, Khalil., 2021).

Karbonisasi dan aktivasi adalah dua langkah dalam pembuatan arang aktif atau karbon aktif. Karbonisasi melibatkan pembakaran bahan karbon aktif dalam ruang tertutup. Selanjutnya, tahapan aktivasi dibagi menjadi aktivasi fisika dan aktivasi kimia (Ramadhani *et al.*, 2020). Aktivasi kimia melibatkan penggunaan bahan kimia tambahan. Bahan kimia seperti hidroksida logam alkali, garam karbonat, klorida, sulfat, fosfat, dan logam alkali tanah seperti ZnCl_2 , NaOH , H_3PO_4 , H_2SO_4 , serta uap air pada suhu tinggi, digunakan sebagai agen pengaktifan (Ganing *et al.*, 2023; Irawan *et al.*, 2025).

Aktivasi kimia dalam pembuatan karbon aktif memiliki beberapa keuntungan diantaranya adalah dapat menghasilkan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan aktivasi fisika (Futalan *et al.*, 2023). Lebih efisien dalam membuka pori-pori tertutup dan menciptakan pori-pori baru. Serta dapat menghasilkan arang aktif dengan daya adsorpsi yang tinggi. Karbon aktif yang diaktivasi menggunakan H_2SO_4 mencapai daya serap Pb^{2+} hingga 97,25%, menunjukkan performa superior (Irawan *et al.*, 2025). Namun, aktivasi karbon aktif secara kimia ini memiliki kekurangan yaitu proses aktivasi memakan waktu dan memerlukan air dalam

jumlah besar. Khashan & Mohammad, (2022) menyatakan bahwa proses aktivasi secara kimia memerlukan pencucian berulang untuk menghilangkan residu kimia hingga pH mencapai 7 (netral).

Karbon aktif juga dapat diaktivasi secara fisika. Aktivasi fisika melibatkan penggunaan panas dan uap air tanpa menggunakan bahan kimia tambahan. Menurut Khashan & Mohammad, (2022), dalam penelitian sekam padi, sampel arang yang telah karbonisasi sebelumnya ditempatkan di dalam vessel untuk aktivasi. Suhu vessel dipertahankan pada 650°C selama 140 menit di bawah aliran nitrogen. Setelah itu, arang aktif dibiarkan mendingin hingga 25°C. Aktivasi secara fisika memiliki kelebihan lebih ramah lingkungan karena tidak menggunakan bahan kimia berbahaya atau beracun. Proses ini hanya melibatkan panas dan gas inert (nitrogen). Gambar 2.2 merupakan gambar karbon aktif:



Gambar 2. 2. Karbon Aktif
(Aprilianti *et al.*, 2023)

2.4 Adsorben yang Termodifikasi Magnetit Fe_3O_4

Adsorben magnetik merupakan material adsorben yang dimodifikasi dengan partikel magnetik, umumnya magnetit (Fe_3O_4), sehingga memiliki sifat magnetik yang memungkinkan pemisahan adsorben dari larutan secara efisien menggunakan medan magnet eksternal. Pengembangan adsorben magnetik bertujuan untuk mengatasi keterbatasan adsorben konvensional, terutama kesulitan pemisahan fase padat-cair setelah proses adsorpsi berlangsung (V. Singh *et al.*, 2023).

Magnetit (Fe_3O_4) merupakan oksida besi yang paling sering digunakan dalam modifikasi adsorben karena bersifat feromagnetik, stabil secara kimia, tidak

beracun, serta relatif mudah disintesis melalui metode kopresipitasi. Partikel Fe_3O_4 dapat terdistribusi pada permukaan atau pori adsorben sehingga tidak hanya memberikan sifat magnetik, tetapi juga berkontribusi dalam peningkatan jumlah situs aktif adsorpsi melalui keberadaan gugus $-\text{OH}$ pada permukaan magnetit (Cheyang Li *et al.*, 2023).

Adsorben berbasis karbon aktif atau biochar yang dimodifikasi magnetit menunjukkan kinerja adsorpsi yang lebih baik dibandingkan adsorben tanpa modifikasi. Hal ini disebabkan oleh kombinasi mekanisme adsorpsi fisik pada permukaan karbon berpori dan adsorpsi kimia melalui interaksi kompleksasi atau elektrostatik antara ion logam dengan gugus fungsi hidroksil dan oksida besi pada Fe_3O_4 (V. Singh *et al.*, 2023). Selain itu, distribusi nanopartikel magnetit yang merata pada permukaan adsorben dapat meningkatkan luas permukaan efektif serta mempercepat kinetika adsorpsi.

2.5 Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses akumulasi adsorbat pada permukaan adsorben yang terjadi karena adanya gaya tarik antara molekul adsorbat dan permukaan adsorben (Ganing *et al.*, 2023). Secara lebih spesifik, adsorpsi dapat didefinisikan sebagai proses di mana atom, ion, atau molekul dari suatu zat menempel pada permukaan adsorben melalui interaksi fisik atau kimia (Oladimeji *et al.*, 2024). Adsorpsi adalah suatu fenomena kompleks dengan beberapa langkah, oleh karena itu banyak faktor yang mempengaruhi fenomena ini (Tejada-Tovar *et al.*, 2023). Adsorpsi telah diakui secara luas sebagai teknik pemisahan untuk pengolahan limbah cair dan pemurnian air. Proses ini telah menarik perhatian karena desainnya yang ekonomis, efektif, dan serbaguna serta kesederhanaan operasinya dibandingkan dengan teknik lain (Oladimeji *et al.*, 2024).

2.5.1 Mekanisme Adsorpsi

Adsorpsi logam berat pada permukaan adsorbent terjadi melalui dua mekanisme utama: adsorpsi fisik dan adsorpsi kimia. Menurut Oladimeji *et al.*, (2024), penghilangan logam berat dari limbah cair dilakukan pada permukaan adsorben baik secara fisik berdasarkan gaya van der Waals,

maupun secara kimia berdasarkan ikatan kovalen yang terbentuk.

Penelitian Tejada-tovar *et al.*, (2023), menunjukkan bahwa adsorpsi Pb^{2+} dan Ni^{2+} pada biomassa kering yang dievaluasi sebagai bioadsorben dapat dikontrol oleh mekanisme berikut: chelation (kompleksasi), intra-molecular dispersion (dispersi intra-molekul), dispersion of the ions from the bulk to the adsorbent surface (dispersi ion dari larutan bulk ke permukaan adsorben), dan intraparticle diffusion (difusi intra-partikel). Mekanisme-mekanisme tersebut melibatkan keberadaan driving force yang memungkinkan pergerakan ion dari larutan, dispersi melalui batas ke permukaan adsorben, fiksasi di situs-situs yang tersedia di permukaan, dan kemudian pergerakan ke dalam pori-pori. Menurut Khashan dan Mohammad (2022), adsorpsi Pb^{2+} dan Ni^{2+} melibatkan mekanisme *chelation*, *intra-molecular dispersion*, *dispersion of ions* dari bulk ke permukaan *adsorbent*, dan *intraparticle diffusion*. Alam *et al.*, (2024) juga menyatakan bahwa mekanisme adsorpsi Pb^{2+} melibatkan interaksi elektrostatik dan kompleksasi permukaan dengan kelompok hidroksil dan karboksil.

2.5.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Proses Adsorpsi

Efektivitas penghilangan logam berat dari limbah cair melalui adsorpsi dipengaruhi oleh berbagai faktor. Menurut Oladimeji *et al.*, (2024), efektivitas teknologi remediasi logam berat tergantung pada beberapa faktor, termasuk suhu, tingkat pH, waktu kontak, jumlah adsorben yang digunakan, dan konsentrasi awal ion logam dalam limbah cair.

2.5.2.1 pH

pH merupakan salah satu faktor paling kritis dalam bioadsorpsi logam berat karena pH larutan mempengaruhi muatan permukaan biomassa dan spesiasi ion logam, dengan demikian menentukan atraksi elektrostatik dan interaksi kimia antara biomassa dan ion logam (Tejada-Tovar *et al.*, 2023). Futralan *et al.* (2023) melaporkan bahwa pH memiliki efek signifikan pada efisiensi penghilangan Pb^{2+} . Dalam penelitian mereka, pH 5 hingga 6 memberikan efisiensi penghilangan tertinggi, berkisar dari 96,24%

hingga 99,99% terlepas dari dosis adsorben dan kecepatan pengadukan. Ketika pH larutan ditingkatkan dari pH 5 ke 6, adsorpsi Pb^{2+} juga meningkat, yang dikaitkan dengan atraksi elektrostatik antara permukaan bermuatan negatif dari adsorben dan ion Pb^{2+} yang bermuatan positif.

2.5.2.2 Konsentrasi Awal Adsorbat

Konsentrasi logam berat dalam limbah cair dan isotherm adsorpsi yang sesuai adalah faktor kunci yang menentukan efektivitas teknik bioadsorpsi. Konsentrasi awal logam berat dalam limbah cair mempengaruhi kapasitas material adsorbent untuk menghilangkan ion-ion tersebut (Tejada-Tovar et al., 2023). Menurut Alam et al., (2024), menyatakan bahwa dengan meningkatnya konsentrasi Pb^{2+} , persentase penghilangan secara bertahap menurun. Meskipun ketika membandingkan penyerapan logam terhadap konsentrasi Pb^{2+} , konsentrasi 90 mg/L secara signifikan lebih rendah karena ada lebih banyak ion logam yang bersaing untuk situs aktif adsorben yang sama. Dengan mempertahankan dosis adsorben yang konstan, meningkatkan konsentrasi Pb^{2+} meningkatkan kapasitas adsorpsinya karena kemungkinan tinggi dari tumbukan ion logam dengan permukaan komposit.

2.5.2.3 Dosis Adsorben

Dosis atau jumlah adsorben yang digunakan merupakan faktor penting yang mempengaruhi proses bioadsorpsi logam berat karena mempengaruhi jumlah situs pengikatan yang tersedia untuk logam berat (Tejada-Tovar et al., 2023). Keseimbangan antara parameter ini diperlukan untuk mencapai efisiensi bioadsorpsi optimal. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa efisiensi penghilangan Pb^{2+} meningkat seiring meningkatnya dosis adsorben, mencapai hampir 99% pada dosis optimal 2 g/L karena lebih banyak situs aktif yang tersedia untuk mengikat Pb^{2+} pada dosis adsorben

yang lebih tinggi. Namun, tidak ada perbedaan yang nyata dalam laju penghilangan antara dosis 2 g/L dan 20 g/L, yang mungkin merupakan hasil dari keseimbangan antara logam berat dan adsorben yang mencegah adsorpsi lebih lanjut dari komposit (Alam *et al.*, 2024).

2.5.2.4 Waktu Kontak

Waktu kontak antara adsorbent dan larutan logam berat merupakan faktor penting dalam menentukan kapasitas adsorpsi dan tingkat penghilangan logam berat (Tejada-Tovar *et al.*, 2023). Pemahaman tentang hubungan antara waktu yang diperlukan untuk proses adsorpsi dan kapasitas adsorpsi penting untuk mengoptimalkan proses. Alam *et al.*, (2024) melaporkan bahwa laju adsorpsi sangat cepat pada menit-menit awal, dengan sekitar 94% penghilangan tercapai dalam 15 menit pertama. Setelah itu, laju menurun dan mendekati kesetimbangan karena situs aktif pada permukaan adsorben relatif tidak terisi pada awal proses adsorpsi tetapi menjadi semakin penuh seiring waktu berjalan, menghasilkan laju adsorpsi yang lebih lambat. Sistem adsorpsi mencapai kesetimbangan pada 30 menit, dengan efisiensi 99,16% Pb.

2.5.2.5 Suhu

Suhu memainkan peran penting dalam proses bioadsorpsi logam berat karena mempengaruhi kinetika, termodinamika, dan stabilitas adsorben. Dari studi efek suhu pada adsorpsi Pb^{2+} dan Ni^{2+} pada biomassa yang dievaluasi, meningkatkan suhu dari 298 K ke 318 K menghasilkan proporsi adsorpsi yang lebih tinggi, menunjukkan bahwa proses adsorpsi bersifat endotermik (Tejada-Tovar *et al.*, 2023). Menurut Khashan & Mohammad (2022), nilai K_d (koefisien distribusi) untuk adsorpsi Pb^{2+} dan Ni^{2+} menurun seiring meningkatnya suhu dalam rentang yang dievaluasi dari 303,15 K hingga 353,15 K.

2.6 Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi menggambarkan jumlah material yang diserap oleh suatu substrat dari konsentrasi kesetimbangan pada suhu konstan. Kajian isotherm adsorpsi digunakan untuk memahami perancangan dan pengoperasian sistem adsorpsi. Model isotherm juga digunakan untuk memahami kecenderungan mekanisme adsorpsi, baik melalui interaksi fisik, interaksi kimia, pertukaran ion, maupun pembentukan kompleks pada permukaan adsorben (Ehiomogue *et al.*, 2022). Isoterm adsorpsi yang sering digunakan adalah isoterm Langmuir dan isoterm Freundlich.

2.6.1 Isoterm Adsorpsi Langmuir

Isotherm adsorpsi Langmuir menggambarkan adsorpsi zat terlarut pada adsorben padat yang terbatas pada monolayer tunggal dari molekul zat terlarut. Model ini didasarkan pada asumsi adsorpsi Langmuir, yang mengasumsikan bahwa permukaan adsorben padat memiliki permukaan yang homogen (Khashan & Mohammad, 2022). Menurut (Oladimeji *et al.*, 2024), model Langmuir menggambarkan adsorpsi pada situs aktif adsorben dalam proses adsorpsi monolayer, di mana adsorpsi maksimum bergantung pada pembentukan saturasi monolayer oleh molekul adsorbat pada permukaan adsorben yang homogen secara energi.

Persamaan isotherm adsorpsi Langmuir dapat direpresentasikan secara matematis sebagai berikut (Khashan & Mohammad, 2022):

$$q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.1)$$

Bentuk linear dari persamaan Langmuir adalah (Khashan & Mohammad, 2022):

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m} \quad (2.2)$$

dimana:

- q_e = jumlah adsorbat pada kesetimbangan (mg/g)
- Q_m atau q_{max} = kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g)
- K_L = konstanta Langmuir (L/mg)
- C_e = konsentrasi adsorbat pada kesetimbangan (mg/L)

Alam *et al.*, (2024), menerapkan model isotherm Langmuir dan Freundlich untuk data adsorpsi batch menggunakan dosis adsorben optimal 2 g/L untuk Pb^{2+} pada berbagai konsentrasi awal Pb^{2+} . Koefisien korelasi untuk Pb^{2+} dalam model Langmuir lebih tinggi daripada model Freundlich, dengan demikian model Langmuir memberikan penyesuaian terbaik untuk data adsorpsi. Linearitas plot menyarankan monolayer logam ion yang seragam pada permukaan adsorben, dan q_{max} adalah 38,61 mg/g untuk Pb^{2+} .

Tejada-tovar *et al.*, (2023) menggunakan model Langmuir untuk mengevaluasi adsorpsi Pb^{2+} dan Ni^{2+} pada biomassa. Penyesuaian terhadap model Langmuir menunjukkan pembentukan monolayer selama proses adsorpsi karena situs aktif dianggap sama. Parameter pemisah Langmuir (RL) menyatakan sifat menguntungkan atau tidak menguntungkan dari proses; adsorpsi yang menguntungkan dan tidak menguntungkan diasumsikan ketika RL berada di antara 0 dan 1, dan lebih besar dari 1, masing-masing. Ketika RL sama dengan 0 atau 1, adsorpsi irreversibel dan linear terjadi. Dari nilai yang diperoleh untuk RL, dapat dikatakan bahwa adsorpsi Pb^{2+} dan Ni^{2+} pada empat biomassa kering yang dievaluasi adalah menguntungkan.

Khashan & Mohammad (2022), melaporkan bahwa data adsorpsi Pb^{2+} pada sekam padi tidak sesuai dengan baik oleh model Langmuir, dan mereka menyimpulkan bahwa adsorpsi Pb^{2+} pada semua bentuk sekam padi terbatas pada multilayer dan semua bentuk sekam padi yang disiapkan memiliki permukaan heterogen dengan setiap layer mewakili adsorpsi sebagai lapisan tunggal.

2.6.2 Isotherm Adsorpsi Freundlich

Model Freundlich adalah model empiris yang menjelaskan heterogenitas permukaan adsorben (Oladimeji *et al.*, 2024). Isotherm adsorpsi Freundlich menggambarkan adsorpsi multilayer dari zat terlarut pada permukaan heterogen dari adsorben padat. Penyesuaian baik dari isotherm Freundlich terhadap sistem adsorpsi memungkinkan adsorpsi multilayer dan hampir tidak ada batasan pada adsorpsi (Khashan & Mohammad, 2022).

Menurut Oladimeji *et al.*, (2024), model empiris Freundlich menjelaskan adsorpsi multilayer atau heterogen pada permukaan adsorben, di mana konstanta K_f Freundlich menunjukkan besarnya laju adsorpsi kesetimbangan dan parameter n menunjukkan heterogenitas situs adsorpsi. Secara matematis, persamaan untuk isotherm adsorpsi Freundlich adalah sebagai berikut (Khashan & Mohammad, 2022):

$$q_e = K_f \cdot C_e^{1/n} \quad (2.3)$$

Bentuk linear dari persamaan Freundlich adalah sebagai berikut (Weyrich *et al.*, 2023).

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2.4)$$

dimana:

- q_e = jumlah adsorbat pada kesetimbangan (mg/g)
- K_f = konstanta kapasitas adsorpsi Freundlich ($\text{mg}^{(1-1/n)} \cdot \text{L}^{(1/n)} \cdot \text{g}^{-1}$)
- C_e = konsentrasi adsorbat pada kesetimbangan (mg/L)
- n = parameter intensitas adsorpsi Freundlich

Khashan & Mohammad, 2022 melaporkan bahwa perbandingan nilai R^2 untuk dua model isotherm memberikan bukti bahwa isotherm adsorpsi Freundlich lebih akurat memprediksi hasil eksperimental dibandingkan dengan isotherm adsorpsi Langmuir. Oleh karena itu, disimpulkan bahwa adsorpsi Pb^{2+} pada semua bentuk sekam padi terbatas pada multilayer dan semua bentuk sekam padi yang disiapkan memiliki permukaan heterogen dengan setiap layer mewakili adsorpsi sebagai lapisan tunggal. Penelitian lain menunjukkan bahwa model Freundlich juga dapat menghasilkan penyesuaian yang baik untuk data adsorpsi. Dalam penelitian mereka, kecocokan baik dari model Freundlich terhadap sistem adsorpsi memungkinkan adsorpsi multilayer dengan nilai R^2 0,9231 untuk Pb^{2+} (Alam *et al.*, 2024).

2.7 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi merupakan kajian yang menjelaskan laju penyerapan adsorbat oleh adsorben terhadap waktu kontak. Dalam proses adsorpsi, kinetika

digunakan untuk mengetahui seberapa cepat ion atau molekul adsorbat berpindah dari larutan menuju permukaan adsorben, masuk ke dalam pori, kemudian berinteraksi dengan situs aktif pada permukaan adsorben. Kajian kinetika menjadi penting karena proses adsorpsi tidak hanya ditentukan oleh kapasitas adsorben, tetapi juga oleh kecepatan adsorben dalam mengikat polutan selama waktu kontak berlangsung (El-Sheetta *et al.*, 2022; Tejada-Tovar *et al.*, 2023; Smagulova *et al.*, 2025).

Perhitungan kinetika adsorpsi diperlukan untuk memahami pola penyerapan adsorbat selama proses berlangsung. Pada tahap awal, adsorpsi umumnya berjalan lebih cepat karena masih banyak situs aktif yang tersedia pada permukaan adsorben. Setelah waktu kontak bertambah, laju adsorpsi cenderung menurun karena sebagian situs aktif telah terisi dan perpindahan adsorbat menuju permukaan adsorben menjadi lebih terbatas. El-Sheetta *et al.* (2022) menjelaskan bahwa waktu kontak merupakan salah satu parameter penting dalam adsorpsi Pb karena dapat menunjukkan perubahan kapasitas adsorpsi dari waktu ke waktu. Smagulova *et al.* (2025) juga menyatakan bahwa adsorpsi Pb pada komposit karbon aktif/Fe₃O₄ dapat terjadi melalui tahap penyerapan cepat pada awal proses, kemudian dilanjutkan dengan tahap penyerapan yang lebih lambat.

Kinetika adsorpsi juga digunakan untuk menentukan model laju yang paling mendekati perilaku adsorpsi. Model kinetika membantu menjelaskan apakah proses adsorpsi cenderung berlangsung secara konstan terhadap waktu, dipengaruhi oleh perbedaan kapasitas kesetimbangan dan kapasitas pada waktu tertentu, atau berkaitan dengan pengisian situs aktif pada permukaan adsorben. Model kinetika yang sering digunakan dalam penelitian adsorpsi logam berat meliputi kinetika pseudo-orde nol, pseudo-orde satu, dan pseudo-orde dua (El-Sheetta *et al.*, 2022; Sugumar *et al.*, 2024; Smagulova *et al.*, 2025).

Analisis kinetika adsorpsi menggunakan kapasitas adsorpsi sebagai dasar perhitungan model kinetika. Kapasitas adsorpsi dapat dicari menggunakan persamaan berikut.

$$q = \frac{\text{Volume sampel} \times (C_0 - C_e)}{\text{Massa Adsorben}} \quad (2.5)$$

- C_0 = Konsentrasi awal (mg/L)

- C_e = Konsentrasi akhir (mg/L)

(Singh & Bhateria, 2020)

2.7.1 Kinetika Pseudo Orde Nol

Kinetika pseudo-orde nol merupakan model yang menggambarkan proses adsorpsi dengan laju yang dianggap linier terhadap waktu. Pada model ini, perubahan kapasitas adsorpsi dianggap tidak bergantung secara langsung pada jumlah adsorbat yang belum terserap maupun jumlah situs aktif yang tersisa. Model pseudo-orde nol dapat digunakan sebagai pendekatan awal untuk melihat apakah peningkatan kapasitas adsorpsi berlangsung secara linear terhadap waktu kontak. Model ini biasanya digunakan sebagai pembandingan terhadap model pseudo-orde satu dan pseudo-orde dua (El-Sheeta et al., 2022; Smagulova et al., 2025).

2.7.2 Kinetika Pseudo Orde Satu

Kinetika pseudo-orde satu merupakan model kinetika yang menjelaskan laju adsorpsi berdasarkan selisih antara kapasitas adsorpsi kesetimbangan dan kapasitas adsorpsi pada waktu tertentu. Model ini menggunakan q_e sebagai kapasitas adsorpsi pada kondisi setimbang dan q_t sebagai kapasitas adsorpsi pada waktu t . Zhang *et al.* (2022) menggunakan model *pseudo-first-order* untuk menganalisis adsorpsi Pb dan Cd oleh *magnetic activated carbon*, dengan waktu sebagai sumbu X dan $\ln(q_e - q_t)$ sebagai sumbu Y.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 \cdot t \quad (2.6)$$

Keterangan:

- q_e = kapasitas adsorpsi pada kondisi kesetimbangan (mg/g)
- q_t = kapasitas adsorpsi pada waktu t (mg/g)
- k_1 = konstanta laju pseudo-orde satu (menit^{-1})
- t = waktu kontak (menit)

(Smagulova et al., 2025)

2.7.3 Kinetika Pseudo Orde Dua

Kinetika pseudo-orde dua merupakan model kinetika yang menjelaskan laju adsorpsi berdasarkan hubungan antara waktu kontak, kapasitas adsorpsi pada waktu tertentu, dan kapasitas adsorpsi pada kondisi kesetimbangan. Model ini banyak digunakan dalam penelitian adsorpsi logam berat karena dapat menggambarkan keterlibatan situs aktif permukaan dalam proses penyerapan adsorbat. Zhang *et al.* (2022) menggunakan model pseudo-second-order untuk menganalisis adsorpsi Pb dan Cd oleh magnetic activated carbon. Smagulova *et al.* (2025) juga menggunakan model pseudo-second-order dalam kajian adsorpsi Pb pada komposit karbon aktif/Fe₃O₄.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \cdot q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad \dots (2.7)$$

Keterangan:

- q_e = kapasitas adsorpsi pada kondisi kesetimbangan (mg/g)
- q_t = kapasitas adsorpsi pada waktu t (mg/g)
- k_2 = konstanta laju pseudo-orde dua (g/mg.menit)
- t = waktu kontak (menit)

(Smagulova *et al.*, 2025)

2.8 Perhitungan Efisiensi Removal (*Removal Efficiency*)

Efisiensi removal merupakan parameter kuantitatif yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan suatu adsorben dalam menurunkan konsentrasi polutan dari larutan selama proses adsorpsi. Parameter ini menunjukkan persentase jumlah zat terlarut yang berhasil dihilangkan dari fase cair setelah mencapai kondisi tertentu, seperti waktu kontak atau keadaan kesetimbangan (Oladimeji *et al.*, 2024).

Efisiensi removal pada proses adsorpsi umumnya digunakan sebagai indikator utama kinerja adsorben karena mampu menggambarkan tingkat keberhasilan proses remediasi secara langsung dan mudah dibandingkan dengan parameter lainnya (Alam *et al.*, 2024).

Secara matematis, efisiensi removal (%R) dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$PR (\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad \dots \quad (2.8)$$

Keterangan:

- C_0 = Konsentrasi awal ion logam dalam larutan (mg/L)
- C_e = Konsentrasi akhir ion logam dalam larutan (mg/L)

(Benjedim *et al.*, 2021)

Persamaan tersebut menyatakan perbandingan antara penurunan konsentrasi adsorbat selama proses adsorpsi terhadap konsentrasi awalnya. Nilai efisiensi removal yang tinggi menunjukkan bahwa adsorben memiliki kemampuan yang baik dalam mengikat dan menghilangkan ion logam dari larutan (Tejada-Tovar *et al.*, 2023).

2.9 FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) adalah teknik spektroskopi yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dalam suatu material berdasarkan serapan radiasi inframerah pada panjang gelombang (Alam *et al.*, 2024). FTIR bekerja dengan memaparkan sampel pada sinar inframerah dan merekam spektrum serapan yang dihasilkan, di mana setiap puncak pada spektrum berkaitan dengan vibrasi ikatan tertentu dari gugus fungsi dalam molekul (Tejada-Tovar *et al.*, 2023).

Penerapan FTIR dalam adsorpsi logam berat digunakan untuk mengetahui perubahan gugus fungsi pada permukaan adsorben sebelum dan setelah proses adsorpsi (Alam *et al.*, 2024). Dengan membandingkan spektrum FTIR sebelum dan sesudah adsorpsi, dapat diketahui gugus fungsi mana yang terlibat dalam pengikatan ion logam, seperti gugus hidroksil ($-OH$), karboksil ($-COOH$), dan amina ($-NH_2$) (Tejada-Tovar *et al.*, 2023). Tujuan utama FTIR dalam penelitian adsorpsi logam berat adalah untuk mengonfirmasi mekanisme adsorpsi, misalnya melalui interaksi elektrostatik, pertukaran ion, atau pembentukan kompleks dengan gugus fungsi pada permukaan adsorben (Oladimeji *et al.*, 2024).

FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsional yang terdapat pada permukaan biochar dan komposit biochar- Fe_3O_4 dengan menganalisis serapan radiasi inframerah pada bilangan gelombang tertentu. Huang *et al.*, 2025

melaporkan bahwa spektrum FTIR biochar sekam padi menunjukkan puncak karakteristik di sekitar 3290 cm^{-1} (regangan --OH), 2920 cm^{-1} (regangan C--H alifatik), 1712 cm^{-1} (regangan C=O karboksil/keton), 1606 cm^{-1} (regangan C=C aromatik), dan 1058 cm^{-1} (regangan C--O eter/alkohol). Setelah modifikasi dengan KOH atau HNO_3 , intensitas puncak-puncak ini berubah secara signifikan, menandakan penambahan atau pengurangan gugus fungsional tertentu (Huang *et al.*, 2025). Selain itu, keberadaan puncak di sekitar $500\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ diinterpretasikan sebagai regangan Fe-O dari fase Fe_3O_4 , yang mengonfirmasi keberhasilan pemuatan nanopartikel magnetit pada permukaan biochar (Tichem *et al.*, 2023).

Spektrofotometer FTIR



Gambar 2. 3. Thermo Scientific FTIR Nicolet iS10
(Laboratorium Andaru Analitika Sains, 2021)

2.10 Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX)

SEM-EDX merupakan teknik karakterisasi yang digunakan untuk melihat morfologi permukaan sekaligus mengetahui komposisi unsur pada suatu material. Pada penelitian adsorben berbasis karbon aktif magnetit, SEM-EDX menjadi penting karena adsorben tidak hanya perlu diamati bentuk permukaannya, tetapi juga perlu dibuktikan keberadaan unsur penyusun seperti karbon (C), oksigen (O), dan besi (Fe). Udyani *et al.*, (2025), menjelaskan bahwa SEM-EDX digunakan untuk menganalisis bentuk morfologi permukaan, keberadaan Fe pada permukaan internal karbon aktif magnetit, serta komponen penyusun yang terdapat pada permukaan adsorben. Pada karbon aktif, morfologi permukaan umumnya ditandai dengan struktur yang berpori dan tidak beraturan, terutama setelah melalui proses aktivasi fisika maupun kimia. Udyani *et al.* (2025), menjelaskan bahwa morfologi permukaan merupakan karakteristik fisik yang menunjukkan struktur permukaan material, termasuk bentuk, ukuran, dan distribusi pori. Dalam penelitian tersebut,

SEM digunakan sebagai pengujian kualitatif untuk melihat perbedaan morfologi permukaan antara karbon aktif dan karbon aktif magnetit. Dengan demikian, pada penelitian ini SEM dapat digunakan untuk mengamati apakah karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe_3O_4 memiliki permukaan yang berpori, kasar, dan tidak beraturan sebagai ciri material adsorben.

EDX digunakan sebagai pelengkap SEM karena mampu memberikan informasi mengenai unsur-unsur penyusun adsorben. Pada karbon aktif magnetit, keberadaan unsur C menunjukkan matriks karbon aktif, unsur O dapat berasal dari gugus oksigen pada permukaan karbon maupun oksida besi, sedangkan unsur Fe menjadi indikator penting adanya magnetit atau oksida besi yang berhasil menempel pada karbon aktif. Kusdarini *et al.* (2025), menjelaskan bahwa setelah karbon aktif dimodifikasi dengan larutan magnetik, kandungan C menurun karena masuknya unsur Fe dan O dari komposit Fe_3O_4 . Hasil SEM-EDX pada penelitian tersebut juga menunjukkan komposisi unsur setelah menjadi magnetic activated carbon, yaitu C sebesar 29,08%, O sebesar 24,59%, dan Fe sebesar 30,26%. Penjelasan ini dapat digunakan sebagai dasar bahwa EDX berfungsi untuk memastikan keberadaan unsur Fe dan O sebagai bukti pendukung terbentuknya karbon aktif magnetit.



Gambar 2. 4. *Scanning Electron Microscopy* (SEM)
(Laboratorium Undip, 2021)

2.11 Pengujian AAS

Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) adalah teknik analisis instrumental yang digunakan untuk menentukan konsentrasi unsur logam dalam suatu larutan

dengan mengukur serapan cahaya pada panjang gelombang spesifik oleh atom logam dalam bentuk gas (Alam *et al.*, 2024). AAS bekerja dengan mengubah sampel cair menjadi uap atom menggunakan nyala (*flame*) atau tungku grafit (*graphite furnace*), kemudian mengukur jumlah cahaya yang diserap oleh atom logam pada panjang gelombang karakteristiknya (Khashan & Mohammad, 2022).

Pengujian AAS dalam adsorpsi logam berat digunakan untuk mengukur konsentrasi ion logam (seperti Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+}) dalam larutan sebelum dan setelah proses adsorpsi (Alam *et al.*, 2024). Dengan membandingkan konsentrasi awal dan akhir, dapat dihitung efisiensi penghilangan logam dan kapasitas adsorpsi adsorben (Tejada-Tovar *et al.*, 2023). Tujuan penggunaan AAS dalam adsorpsi logam berat adalah untuk memastikan akurasi dan ketelitian dalam menentukan konsentrasi logam, sehingga data adsorpsi yang diperoleh dapat digunakan untuk analisis isotherm, kinetika, dan termodinamika secara valid (Khashan & Mohammad, 2022).



Gambar 2. 5. *Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)*
(Laboratorium Undip, 2021)

2.12 Uji Statistik

Uji statistik merupakan metode analisis yang digunakan untuk menilai data penelitian secara kuantitatif.. Uji statistik perlu digunakan karena data eksperimen dapat memiliki variasi antar ulangan. Nilai rata-rata yang berbeda belum tentu menunjukkan bahwa perlakuan memberikan pengaruh nyata. Perbedaan tersebut dapat terjadi karena variasi pengukuran, kondisi percobaan, atau penyebaran data yang tidak sama antar kelompok. Tindle *et al.* (2024), menggunakan analisis statistik untuk menentukan signifikansi data eksperimen, dengan batas p-value 0,05 sebagai dasar penentuan signifikansi. Dengan demikian, uji statistik digunakan untuk memberikan dasar objektif dalam menarik kesimpulan dari data penelitian.

Analisis statistik dalam penelitian dengan lebih dari dua kelompok umumnya memerlukan beberapa tahap. Tahap pertama adalah menguji karakter data, terutama normalitas dan homogenitas. Tahap berikutnya adalah menguji perbedaan rata-rata antar kelompok menggunakan uji parametrik jika data memenuhi syarat. Apabila data berdistribusi normal dan memiliki varians yang homogen, uji One Way ANOVA dapat digunakan untuk membandingkan rata-rata lebih dari dua kelompok. Calvet *et al.* (2025), menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov dan Shapiro-Wilk untuk memeriksa distribusi data sebelum analisis lanjutan, sedangkan Tindle *et al.* (2024) menggunakan One Way ANOVA untuk data eksperimen yang terdiri atas tiga kelompok atau lebih.

2.12.1 Uji Normalitas

Uji normalitas merupakan uji statistik yang digunakan untuk mengetahui apakah data penelitian mengikuti distribusi normal. Distribusi normal penting dalam analisis statistik karena beberapa uji parametrik, termasuk ANOVA, mensyaratkan data berasal dari populasi yang berdistribusi normal. Habibzadeh (2024) menjelaskan bahwa pemeriksaan distribusi data perlu dilakukan sebelum menentukan metode analisis yang digunakan, karena data yang berdistribusi normal dan tidak normal memerlukan pendekatan statistik yang berbeda. Keputusan uji normalitas ditentukan berdasarkan nilai signifikansi. Jika nilai signifikansi lebih besar dari 0,05, maka data terdistribusi normal. Jika nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05, maka data terdistribusi tidak normal. Hasil uji normalitas kemudian digunakan untuk menentukan apakah data dapat dilanjutkan ke uji parametrik atau perlu dianalisis menggunakan pendekatan nonparametrik.

2.12.2 Uji One Way ANOVA

One Way Analysis of Variance atau One Way ANOVA merupakan uji statistik parametrik yang digunakan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antara lebih dari dua kelompok perlakuan. Uji ini disebut satu arah karena hanya melibatkan satu variabel bebas atau satu faktor perlakuan, meskipun faktor tersebut dapat memiliki beberapa taraf atau level. Dalam penelitian adsorpsi, One Way ANOVA dapat digunakan

untuk menguji apakah perbedaan variasi perlakuan memberikan perbedaan respons yang signifikan, misalnya terhadap efisiensi removal atau kapasitas adsorpsi (Singh & Bhateria, 2020; Zhou *et al.*, 2023).

One Way ANOVA tidak hanya membandingkan nilai rata-rata secara langsung, tetapi juga membandingkan variasi antar kelompok dan variasi di dalam kelompok. Jika variasi antar kelompok lebih besar daripada variasi di dalam kelompok, maka terdapat kemungkinan bahwa perlakuan yang diberikan menyebabkan perbedaan rata-rata yang signifikan. Zhou *et al.* (2023) menjelaskan bahwa ANOVA digunakan untuk membandingkan rata-rata beberapa kelompok dengan tetap memperhatikan asumsi kesamaan varians. Dasar pengambilan keputusan dalam One Way ANOVA menggunakan nilai signifikansi. Apabila nilai signifikansi lebih besar dari 0,05, maka H_0 diterima, Apabila nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05, maka H_0 ditolak.

2.13 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu berfungsi sebagai pedoman dalam melaksanakan penelitian. Penelitian terdahulu terdapat pada Tabel 2.2

Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu Pembuatan Karbon Aktif dari Biomassa dan Karbon Aktif Modifikasi Magnetit

Judul Jurnal/ Penelitian	Penulis/ Tahun	Metode Assorben	Massa Adsorben dan Volume Sampel	Efisiensi/ Temuan Removal Pb
Optimalisasi Karbon Aktif Berbasis Bonggol Jagung untuk Pengelolaan Limbah Logam Berat Pb dan Mn	Irawan <i>et al.</i> , 2025	Adsorben disiapkan dengan mengkarbonisasi bonggol jagung di Earth pit-kiln, diikuti dengan aktivasi kimia menggunakan H ₂ SO ₄ atau KOH pada konsentrasi yang berbeda untuk mengoptimalkan kemampuan adsorpsi logam beratnya.	• Massa adsorben yang digunakan = 1 gram • Volume sampel = 20 mL	Efisiensi adsorpsi Pb paling besar adalah 97,53% diaktivasi dengan H ₂ SO ₄
Mechanistic Evaluation of Pb(II) Adsorption on Magnetic Activated Carbon/Fe ₃ O ₄ Composites: Influence of Hydrothermal and Ultrasonic Synthesis Routes	Smagulova <i>et al.</i> , 2025	Sekam padi dicuci, lalu dipanaskan dalam oven laboratorium pada suhu 110°C selama 12 jam. Karbonisasi dilakukan pada suhu 550°C selama 100 menit. Karbon kemudian diaktifkan menggunakan KOH dengan rasio massa 1:4. Proses aktivasi dipanaskan hingga 850 °C selama 120 menit, lalu didinginkan. Fe ₃ O ₄ disintesis dengan kopresipitasi 0,32 mol/L FeCl ₃ dan 0,20 mol/L FeSO ₄ . Kemudian tambahkan 25% NH ₃ tetes demi tetes hingga endapan Fe ₃ O ₄ terbentuk. Karbon aktif dan Fe ₃ O ₄ dicampur dengan rasio massa 2 : 1, lalu diultrasonikasi selama 1 jam. Setelah itu, produk disaring, dicuci, dan dikeringkan pada suhu 60 °C.	• Massa adsorben yang digunakan = 50 mg • Volume sampel = 50 mL	Hasil eksperimen menunjukkan bahwa komposit us-AC/Fe ₃ O ₄ menunjukkan kapasitas adsorpsi sebesar 39,15 mg/g dan efisiensi penghilangan sebesar 92,84% ketika mengadsorpsi ion timbal (Pb ²⁺).

Judul Jurnal/ Penelitian	Penulis/ Tahun	Metode Adsorben	Massa Adsorben dan Volume Sampel	Efisiensi/ Temuan Removal Pb
Synthesis and Characterization of AC@Fe ₃ O ₄ Nanocomposite and its Application as an Efficient Adsorbent for Removal of Some Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions	Alhameedawi <i>et al.</i> , 2025	Fe ₃ O ₄ disintesis dari 2,162 g FeCl ₃ ·6H ₂ O (8 mmol) dan 0,795 g FeCl ₂ ·4H ₂ O (4 mmol) dilarutkan dalam 100 mL air deionisasi (DW). Selanjutnya, 5 mL NH ₄ OH ditambahkan tetes demi tetes, untuk pembentukan sedimen hitam (Fe ₃ O ₄). Karbon aktif disiapkan dari kulit delima dicuci, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 24 jam, lalu digiling dan diayak. Karbon diaktivasi dengan asam fosfat (H ₃ PO ₄) dalam rasio volume 1:1 dengan air. Akhirnya, kulit yang dipanaskan pada suhu 900 °C selama 1 jam, lalu dicuci hingga pH netral. Komposit karbon aktif dengan Fe ₃ O ₄ dibuat dengan mencampur suspensi karbon aktif dan Fe ₃ O ₄ dalam etanol, disonikasi, dan diaduk lama. Komposit yang dihasilkan dipisahkan, dicuci, dan dikeringkan dalam oven pada suhu 80 °C selama 16 jam.	• Massa adsorben yang digunakan = 0,1 g • Volume sampel = 50 mL	AC @Fe ₃ O ₄ , persentase adsorpsi dilaporkan efisiensi removal Pb (II) adalah sebesar 89,7% dengan pH optimum adalah 5.
Adsorptive Removal of Lead (II) Pollutants from Wastewater Using Corncob-Activated Carbon	Sunisi A. <i>et al.</i> , 2024	Bonggol jagung dicuci, kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari selama dua hari. Pengeringan lebih lanjut dilakukan dalam oven pada suhu 100 °C selama 24 jam. Bonggol jagung kering digiling dan diayak dengan ayakan mulai dari 75—200 µm. Karbon kemudian diresapi dengan asam sulfat (H ₂ SO ₄) dalam rasio w/w = 1 : 1. Karbon selanjutnya dipanaskan pada suhu 600 °C selama 1,5 jam.	• Massa adsorben yang digunakan = 40 – 240 mg dengan interval 40 mg • Volume sampel = 80 mL	Penghapusan timbal tertinggi yang tercatat adalah 95%. Ini diamati pada dosis adsorben 2,5 g/L selama periode 2 jam.

Judul Jurnal/ Penelitian	Penulis/ Tahun	Metode Assorben	Massa Adsorben dan Volume Sampel	Efisiensi/ Temuan Removal Pb
		Setelah pemanasan, sampel karbon aktif dicuci hingga pH netral. Akhirnya, karbon aktif dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 2 jam.		
Pemanfaatan Arang Aktif dari Tongkol Jagung sebagai Adsorben Ion Pb ²⁺	Ganing <i>et al.</i> , 2023	Bahan mentah dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 3 jam. Selanjutnya bahan mentah dipanaskan pada suhu sekitar 300°C selama 1 jam. Arang kemudian digiling. Arang hasil karbonisasi diaktivasi dengan NaOH konsentrasi 1,75 %. pada suhu 60°C. Setelah itu, arang disaring dan dicuci menggunakan air panas, kemudian dicuci lagi dengan air dingin hingga pH mencapai 7. Kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 2 jam dan ditimbang.	• Massa adsorben yang digunakan = 0,5 gram • Volume sampel = 25 mL	Daya serap optimum dicapai pada waktu 150 menit dengan daya serap sebesar 0,7146 mg/g.
Removal of Heavy Metals Ions from Aqueous Solution using Different Pretreatment Techniques of Corn Cob	Wen-Pei <i>et al.</i> , 2022	Bonggol jagung dicuci dan digiling, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 12 jam, kemudian disaring. Selanjutnya diaktivasi menggunakan asam asetat (CH ₃ COOH) dan asam klorida (HCl).	• Massa adsorben yang digunakan = 10,5 gram • Volume sampel = 25 liter	Karbon yang diaktivasi dengan HCl memiliki efisiensi sebesar 77,18% sedangkan yang diaktivasi dengan CH ₃ COOH memiliki efisiensi sebesar 74,25%.

Judul Jurnal/ Penelitian	Penulis/ Tahun	Metode Assorben	Massa Adsorben dan Volume Sampel	Efisiensi/ Temuan Removal Pb
Removal of Lead (Pb^{2+}) Ions From Aqueous Solution by Adsorption Using Sugarcane Bagasse Activated Carbon Coated with Magnetic Nanoparticles	Abdullahi et al., 2020	Ampas tebu dicuci, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu $120^{\circ}C$ selama 3 jam, kemudian digiling. Selanjutnya diaktivasi kimia dengan H_2SO_4 pada suhu $200^{\circ}C$ dengan agitasi selama 1 jam. Kemudian didinginkan, dicuci dengan air suling, direndam dalam larutan $NaOH$ encer selama 30 menit, dan dicuci lagi dengan air suling. Produk yang dihasilkan dikeringkan, disaring dan disimpan. Fe_3O_4 disiapkan menggunakan teknik pengendapan kimia dari 2,1g $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ dan 3,1g $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dilarutkan dalam 80mL air di bawah atmosfer inert dan diaduk. Selanjutnya, larutan dipanaskan hingga $80^{\circ}C$, 10mL larutan NH_4OH 25% ditambahkan dan 10g karbon aktif ampas tebu ditambahkan. Reaksi berlanjut selama 30 menit. Suspensi yang dihasilkan didinginkan dan dicuci. Produk kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu $50^{\circ}C$ selama 2 jam.	• Massa adsorben yang digunakan = 0,4 gram • Volume sampel = 250 mL	Persentase efisiensi penghilangan untuk timbal (II) ditemukan 91% dalam kondisi pH netral.

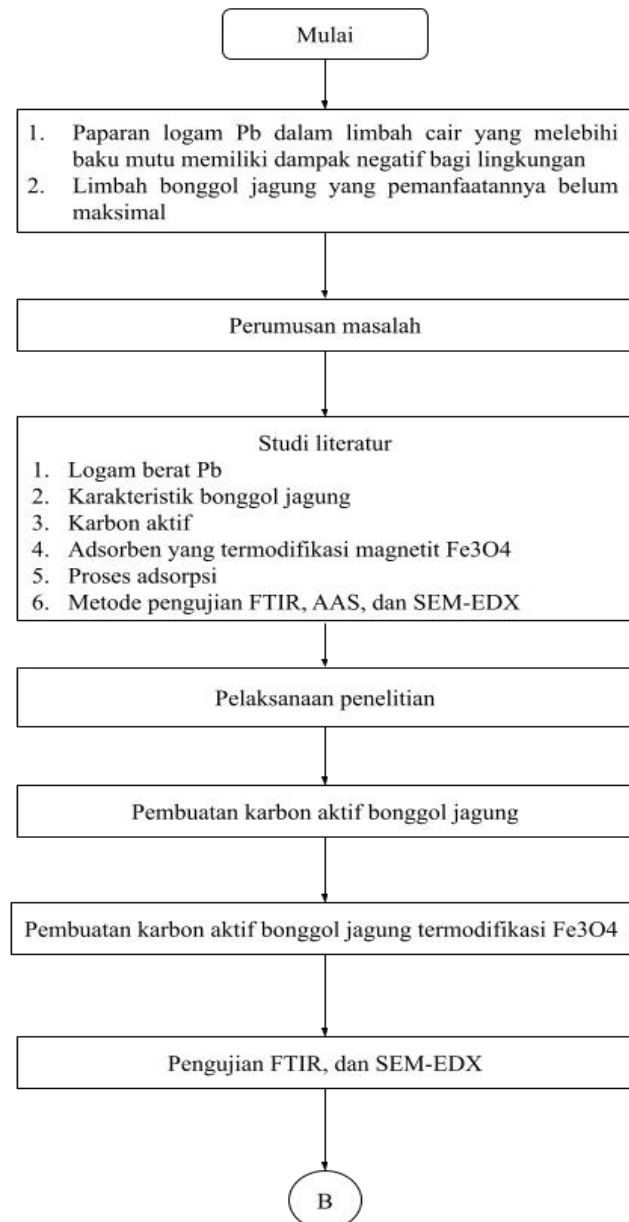
Halaman ini sengaja dikosongkan

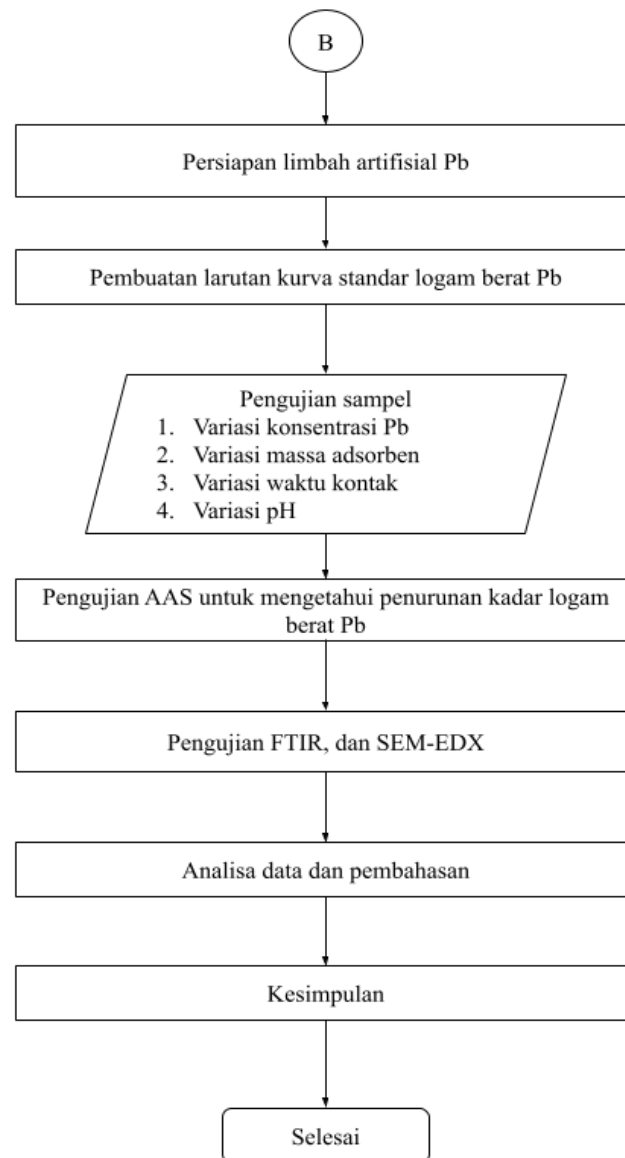
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian adalah alur atau rancangan kegiatan yang dilakukan selama penelitian. Diagram alir penelitian berfungsi untuk mempermudah pelaksanaan penelitian agar dapat berjalan sesuai alur, terstruktur, dan sistematis. Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 3.1.





Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian

3.2 Perumusan Ide Penelitian

Ide penelitian ini adalah mengoptimalkan komposit karbon aktif berbahan bonggol jagung sebagai adsorben murah dan melimpah untuk menurunkan kadar Pb^{2+} dalam limbah cair. Bonggol jagung dipilih karena merupakan limbah pertanian yang melimpah, dan memiliki kandungan lignoselulosa tinggi (selulosa, hemiselulosa, dan lignin). Bonggol jagung telah terbukti potensial sebagai bahan baku karbon aktif untuk adsorpsi logam berat ketika diaktivasi secara kimia, misalnya dengan H_2SO_4 .

3.3 Perumusan Masalah dan Tujuan

Perumusan masalah dan tujuan yang dilakukan dalam penelitian berdasarkan latar belakang dan ide penelitian. Hal ini dilakukan agar permasalahan dan tujuan dapat dimengerti dan mudah dipahami. Perumusan masalah yang dilakukan antara lain meliputi:

1. Karakteristik adsorben karbon aktif bonggol jagung termodifikasi Fe_3O_4 yang akan digunakan sebagai adsorben untuk menurunkan kadar Pb dalam air limbah.
2. Pengaruh variasi konsentrasi awal Pb, massa adsorben, pH, dan waktu kontak terhadap kemampuan penyerapan Pb oleh komposit karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe_3O_4 .
3. Adsorpsi isoterm dan kinetika adsorpsi logam Pb berdasarkan persamaan isoterm Langmuir dan Freunlich.

3.4 Studi Literatur

Studi literatur yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari jurnal, buku, tesis, peraturan, artikel, internet, dan laporan tugas akhir. Studi literatur menyediakan dasar teoritis yang diperlukan untuk memahami konteks penelitian. Studi literatur yang digunakan berhubungan dengan potensi bonggol jagung sebagai bahan adsorben, dan larutan kimia yang digunakan untuk aktivasi karbon. Modifikasi adsorben dengan magnetit Fe_3O_4 juga dibahas dalam studi literatur.

3.5 Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data dilakukan untuk mengumpulkan data primer dan data sekunder dalam menunjang penyelesaian permasalahan pada penelitian ini. Data-data yang digunakan meliputi:

3.5.1 Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh atau dikumpulkan secara langsung melalui pengujian lapangan. Data primer yang digunakan berupa karakteristik adsorben berbasis selulosa menggunakan *Fourier Transformed Infrared* (FTIR) untuk identifikasi gugus fungsi permukaan. Serta SEM-EDX

digunakan untuk melihat morfologi permukaan sekaligus mengetahui komposisi unsur pada karbon aktif termodifikasi magnetit (Udyani *et al.*, 2025).

3.5.2 Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang didapatkan dari beberapa referensi maupun sumber. Data sekunder dibutuhkan untuk membantu penelitian ini agar bisa diselesaikan. Data sekunder yang dibutuhkan dalam penelitian ini meliputi : konsentrasi logam Pb, massa adsorben, waktu kontak, pH, suhu, kecepatan pengadukan, dan larutan kimia untuk aktivasi (H_2SO_4).

3.6 Penentuan Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di beberapa tempat dan waktu yang dapat membantu proses penyelesaian masalah selama masa penelitian berlangsung.

3.6.1 Penentuan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di beberapa lokasi laboratorium yang memiliki fasilitas dan instrumen yang dibutuhkan, antara lain sebagai berikut:

1. Laboratorium Limbah Cair Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
2. Laboratorium Material/Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
3. Laboratorium Universitas Surabaya

3.6.2 Penentuan Waktu Penelitian

Waktu penelitian akan dilaksanakan pada bulan Januari sampai bulan Juli 2026.

3.7 Penentuan Variabel Penelitian

Pada penelitian ini telah ditentukan terkait variabel yang akan digunakan. Terdapat tiga variabel diantaranya variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol.

3.7.1 Variabel Bebas

Variabel bebas (*independent variables*) adalah variabel yang diubah-ubah untuk melihat pengaruhnya terhadap variabel terikat. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah:

1. Konsentrasi Awal Pb = 2 mg/L, 4 mg/L, 6 mg/L, 8 mg/L, 10 mg/L
2. Massa Adsorben = 0,4 g/100 mL, 0,5 g/100 mL, 0,6 g/100 mL
3. Waktu Kontak = 60 menit, 90 menit, 120 menit, 150 menit, 180 menit, 210 menit
4. pH = 5, 6, 7

3.7.2 Variabel Terikat

Variabel terikat (*dependent variables*) adalah variabel yang bergantung pada variabel bebas dan menjadi fokus pengamatan hasil penelitian. Variabel terikat pada penelitian ini adalah efisiensi adsorpsi logam berat Pb dan kapasitas adsorpsi.

3.7.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol merupakan variabel yang dibuat sama dan dapat dikendalikan untuk mencapai tujuan penelitian. Variabel kontrol pada penelitian ini antara lain adalah sebagai berikut:

- a. Kecepatan putaran = 200 rpm (Zhang et al., 2022; Sugumar et al., 2024)
- b. Volume larutan = 100 mL (Sugumar et al., 2024)
- c. Suhu = 25 °C atau suhu ruang (Smagulova et al., 2025; Alhameedawi et al., 2025)

3.8 Populasi dan Sampel Penelitian

Pada penelitian ini memiliki populasi dan sampel. Populasi menyatakan ruang lingkup yang luas pada objek penelitian, sedangkan sampel adalah salah satu bagian dari populasi yang sifatnya representative dari populasi.

3.8.1 Populasi Penelitian

Populasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah cair artifisial Pb

3.8.2 Sampel Penelitian

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah cair artifisial logam berat Pb .yang berasal dari $Pb(NO_3)_2$. Pada tahap post treatment dilakukan pengujian terhadap larutan sampel hasil proses adsorpsi menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) dengan dua kali pembacaan. Sampel yang diuji dilakukan sesuai variasi yang digunakan. Pengujian sampel untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi logam Pb terdapat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Sampel Pengujian Variasi Konsentrasi Logam Pb

Jenis Adsorben	Massa Adsorben	Waktu Kontak	pH	Konsentrasi Logam Berat Pb (mg/L)	Simbol
Karbon Aktif Bonggol Jagung Termodifikasi Magnetit Fe_3O_4	0,6 g	60 menit	7	2	K1 a
	0,6 g	60 menit	7	2	K1 b
	0,6 g	60 menit	7	4	K2 a
	0,6 g	60 menit	7	4	K2 b
	0,6 g	60 menit	7	6	K3 a
	0,6 g	60 menit	7	6	K3 b
	0,6 g	60 menit	7	8	K4 a
	0,6 g	60 menit	7	8	K4 b
	0,6 g	60 menit	7	10	K5 a
	0,6 g	60 menit	7	10	K5 b
Jumlah Sampel			10 Sampel		

Sampel pada Tabel 3.1 adalah filtrat hasil dari pengujian adsorpsi pada larutan Pb dengan variasi konsentrasi Pb. Variasi konsentrasi Pb (adsorbat) dilakukan untuk mengetahui konsentrasi Pb terbaik. Variasi terbaik akan digunakan dalam variasi berikutnya, yaitu variasi massa adsorben.

Tabel 3. 2 Sampel Pengujian Variasi Massa Adsorben

Jenis Adsorben	Konsentrasi Pb	Waktu Kontak	pH	Massa Adsorben (g/50 mL)	Simbol
Karbon Aktif Bonggol Jagung Termodifikasi Magnetit Fe ₃ O ₄	Terbaik	60 menit	7	0,4	M1 a
	Terbaik	60 menit	7	0,4	M1 b
	Terbaik	60 menit	7	0,5	M2 a
	Terbaik	60 menit	7	0,5	M2 b
	Terbaik	60 menit	7	0,6	M3 a
	Terbaik	60 menit	7	0,6	M3 b
Jumlah Sampel			6 Sampel		

Sampel pada Tabel 3.2 adalah filtrat hasil dari pengujian adsorpsi pada larutan Pb dengan variasi massa adsorben. Variasi massa adsorben dilakukan untuk mengetahui massa adsorben yang terbaik. Variasi terbaik akan digunakan dalam variasi berikutnya, yaitu variasi waktu kontak.

Tabel 3. 3 Sampel Pengujian Variasi Waktu Kontak

Jenis Adsorben	Konsentrasi Pb	Massa Adsorben	pH	Waktu Kontak (Menit)	Simbol
Karbon Aktif Bonggol Jagung Termodifikasi Magnetit Fe ₃ O ₄	Terbaik	Terbaik	7	60	T1 a
	Terbaik	Terbaik	7	60	T1 b
	Terbaik	Terbaik	7	90	T2 a
	Terbaik	Terbaik	7	90	T2 b
	Terbaik	Terbaik	7	120	T3 a
	Terbaik	Terbaik	7	120	T3 b
	Terbaik	Terbaik	7	150	T4 a
	Terbaik	Terbaik	7	150	T4 b
	Terbaik	Terbaik	7	180	T5 a
	Terbaik	Terbaik	7	180	T5 b
	Terbaik	Terbaik	7	210	T6 a
	Terbaik	Terbaik	7	210	T6 b
Jumlah Sampel			12 Sampel		

Sampel pada Tabel 3.3 adalah filtrat hasil dari pengujian adsorpsi pada larutan Pb dengan variasi waktu kontak. Variasi waktu kontak dilakukan untuk mengetahui waktu kontak adsorben yang terbaik. Variasi terbaik akan digunakan dalam variasi berikutnya, yaitu variasi pH.

Tabel 3. 4 Sampel Pengujian Variasi pH

Jenis Adsorben	Konsentrasi Pb	Massa Adsorben	Waktu Kontak	pH	Simbol
Karbon Aktif Bonggol Jagung Termodifikasi Magnetit Fe ₃ O ₄	Terbaik	Terbaik	Terbaik	5	P1 a
	Terbaik	Terbaik	Terbaik	5	P1 b
	Terbaik	Terbaik	Terbaik	6	P2 a
	Terbaik	Terbaik	Terbaik	6	P2 b
	Terbaik	Terbaik	Terbaik	7	P3 a
	Terbaik	Terbaik	Terbaik	7	P3 b
Jumlah Sampel				6 Sampel	

Sampel pada Tabel 3.4 adalah filtrat hasil dari pengujian adsorpsi pada larutan Pb dengan variasi pH. Variasi pH dilakukan untuk pH optimum dalam proses adsorpsi. Dari serangkaian percobaan dengan variasi yang dilakukan akan diperoleh konsentrasi Pb, massa adsorben, waktu kontak dan pH terbaik dalam penggunaan Karbon Aktif Bonggol Jagung Termodifikasi Magnetit Fe₃O₄ dalam penurunan konsentrasi Pb. Penelitian dilanjutkan dengan analisis model isotherm dan kinetika adsorpsi logam Pb.

3.9 Prosedur Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dimulai dari menyiapkan alat dan bahan sampai tahap akhir penelitian yaitu perhitungan konsentrasi Pb

3.9.1 Alat

1. Furnace
2. Oven
3. Ayakan 80 mesh
4. Mesin giling/ blender
5. Timbangan analitik
6. Hot plate
7. Magnetic Stirrer
8. pH meter
9. Beaker Glass Iwaki 250 mL

10. Labu ukur Herma 1.000 mL
11. Pipet Volumetrik 5 – 10 mL
12. Kertas saring
13. Corong Herma
14. Erlenmeyer Iwaki 250 mL
15. FTIR
16. SEM-EDX
17. AAS

3.9.2 Bahan

1. Bonggol jagung
2. H_2SO_4
3. Aquades
4. $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$
5. NaOH
6. HNO_3
7. $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
8. $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

3.9.3 Pre-Treatment Bonggol Jagung

Bonggol jagung dipersiapkan sebelum menjadi karbon aktif untuk adsorpsi Pb. Berikut merupakan langkah-langkah pre-treatment bonggol jagung:

1. Bonggol jagung dikumpulkan kemudian dicuci menggunakan air untuk menghilangkan debu, tanah, dan kotoran lain yang menempel (Aliyu *et al.*, 2024).
2. Bonggol jagung yang telah dicuci dikeringkan di bawah sinar matahari selama kurang lebih 2 hari hingga bahan tidak tampak basah (Aliyu *et al.*, 2024). Suhu rata-rata pada Kota Surabaya adalah 24°C hingga 27°C berdasarkan BMKG.
3. Bonggol jagung kemudian dipotong kecil ± 2 cm, lalu dimasukkan ke dalam oven pada suhu sekitar 100 °C selama 24 jam (Aliyu *et al.*, 2024; Haslina *et al.*, 2021)

3.9.4 Pembuatan Karbon Aktif Bonggol Jagung

Bonggol jagung diaktivasi dengan mengadaptasi prosedur yang digunakan oleh Aliyu S.A. *et al.*, (2024), untuk adsorpsi logam Pb. Berikut merupakan langkah-langkah aktivasi karbon bonggol jagung dengan H_2SO_4 :

1. Bonggol jagung dikarbonisasi dengan dipanaskan dalam furnace pada suhu 450°C selama 1 jam, lalu didinginkan dalam desikator (Kamila *et al.*, 2024; Debela, 2016).
2. Bonggol jagung dihaluskan dan diayak dengan saringan berukuran 80 mesh (0,18 mm) (Aliyu *et al.*, 2024; Feng *et al.*, 2020).
3. Serbuk bonggol jagung kemudian direndam dengan 500 mL H_2SO_4 konsentrasi 3 M (Irawan *et al.*, 2025; Kamila *et al.*, 2024) selama 24 jam (Riski *et al.*, 2023).
4. Karbon aktif yang dihasilkan dikeluarkan dari furnace, dicuci dengan aquades dan ditambahkan NaOH hingga pH netral, lalu dikeringkan di oven 105°C selama 2 jam (Aliyu S. A. *et al.*, 2024).

3.9.5 Pembuatan Karbon Aktif Bonggol Jagung Termodifikasi Magnetit Fe_3O_4

Pembuatan karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe_3O_4 mengadaptasi prosedur dari beberapa penelitian sebelumnya berikut merupakan langkah-langkahnya:

1. Melarutkan 2,5 g karbon aktif kedalam larutan yang mengandung 0,028 M $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 0,014 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dalam 250 mL aquades (El-Sheetta *et al.*, 2022)
2. Mengaduk larutan dengan kecepatan 700 rpm pada suhu 80°C , bersmaan dengan menambahkan larutan NaOH (5 M) tetes demi tetes kedalam campuran hingga pH mencapai 10 (El-Sheetta *et al.*, 2022).
3. Mengaduk larutan selama 1 jam (Hendriatiningsih, 2025).
4. Campuran dibiarkan mengendap pada suhu ruang selama 24 jam

(El-Sheetta *et al.*, 2022).

5. Karbon aktif magnetit dipisahkan menggunakan magnet dan dicuci secara berulang dengan aquades dan etanol hingga pH netral (El-Sheetta *et al.*, 2022).
6. Karbon aktif termodifikasi magnetit dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 5 jam (Hendriatiningsih, 2025).

3.9.6 Pembuatan Larutan Induk Pb²⁺

Konsep dasar yang dipakai di SNI 06-6989.8:2009 (Air dan air limbah – Bagian 8: Cara uji timbal (Pb) dengan AAS)

1. Membuat larutan induk Pb 100 mg/L dari garam Pb(NO₃)₂ murni.
2. Timbang ± 0,16 g Pb(NO₃)₂ (kemurnian ≥ 99%).
3. Larutkan Pb(NO₃)₂ dalam ±100 mL aquades di gelas beker, aduk sampai larut.
4. Pindahkan larutan ke dalam labu ukur 1.000 mL yang bersih.
5. Tambahkan HNO₃ pekat 1–2 mL ke dalam labu ukur untuk mencegah Pb²⁺ mengendap sebagai Pb(OH)₂/garam lain.
6. Tambahkan aquades sampai tanda batas 1.000 mL, homogenkan dengan cara membalik labu beberapa kali.
7. Simpan larutan induk 100 mg/L ini dalam botol kaca gelap atau botol yang tertutup rapat.

3.9.7 Pengenceran dari 100 mg/L ke Konsentrasi Kerja

Melakukan pengenceran larutan menggunakan rumus sebagai berikut (Nagar & Ghaziabad, 2022):

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (3.1)$$

- C₁ = Konsentrasi larutan induk = 100 mg/L
- C₂ = Konsentrasi yang diinginkan = 2 mg/L, 4 mg/L, 6 mg/L, 8 mg/L, 10 mg/L
- V₂ = Volume akhir = 100 mL

Hitung V1:

$$V1 = \frac{C2 \times V2}{C1} = \frac{2 \times 100}{100} = 2 \text{ mL}$$

$$V1 = \frac{C2 \times V2}{C1} = \frac{4 \times 100}{100} = 4 \text{ mL}$$

$$V1 = \frac{C2 \times V2}{C1} = \frac{6 \times 100}{100} = 6 \text{ mL}$$

$$V1 = \frac{C2 \times V2}{C1} = \frac{8 \times 100}{100} = 8 \text{ mL}$$

$$V1 = \frac{C2 \times V2}{C1} = \frac{10 \times 100}{100} = 10 \text{ mL}$$

Langkah:

1. Ambil (2 mL, 4 mL, 6 mL, 8 mL, 10 mL) larutan Pb dengan pipet volumetrik dan masukkan ke labu ukur 100 mL.
2. Tambahkan aquades sampai tanda 100 mL, homogenkan.

3.9.8 Proses Adsorpsi

3.9.8.1 Persiapan Larutan dan pH (Dalam variasi pH 5, 6, 7)

1. Siapkan larutan kerja Pb^{2+} dari larutan induk 100 mg/L sebagaimana dijelaskan sebelumnya.
2. Masukkan 100 mL larutan Pb^{2+} ke dalam gelas beker/erlenmeyer 250 mL untuk setiap kombinasi percobaan. Volume tetap 100 mL untuk menjaga rasio volume terhadap massa adsorben.
3. Ukur pH awal dengan pH meter, kemudian atur ke pH 5, 6, atau 7 dengan meneteskan HNO_3 atau $NaOH$ encer sambil diaduk perlahan hingga pH stabil (Azanfire *et al.*, 2020).

3.9.8.2 Penambahan Adsorben

Timbang komposit karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit (Fe_3O_4) sesuai dengan variasi massa adsorben (0,4 gram, 0,5 gram, 0,6 gram). Adsorben yang telah ditimbang dimasukkan ke dalam masing-masing gelas/erlenmeyer berisi 100 mL larutan sampel (Esmaeili & Eslami, 2020)

3.9.8.3 Proses Kontak (Pengadukan)

1. Letakkan gelas pada magnetic stirrer atau orbital shaker dan guncang/putar pada 200 rpm pada suhu ruang (Zhang *et al.*, 2022; Sugumar *et al.*, 2024).
2. Lakukan kontak selama 60, 90, 120, 150, 180, dan 210 menit (Abdullahi *et al.*, 2020; Sugumar *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2022).

3.9.8.4 Pemisahan Fase dan Pengukuran C_e

1. Setelah waktu kontak tercapai, hentikan pengadukan dan biarkan beberapa menit agar partikel kasar mengendap.
2. Pisahkan filtrat dari campuran, saring dengan kertas saring kemudian ambil supernatant (Alam *et al.*, 2024; Aliyu S.A. *et al.*, 2024). Atau bisa menggunakan magnet untuk memisahkan filtrat dari campuran (Benjedim *et al.*, 2021).
3. Ukur konsentrasi Pb^{2+} akhir C_e dengan AAS:
 - Buat seri standar Pb^{2+} (0, 2, 4, 6, 8, 10 mg/L) dari larutan induk 100 mg/L.
 - Ukur absorbansi pada panjang gelombang garis resonansi Pb sesuai SNI 06-6989.8, lalu buat kurva kalibrasi hubungan absorbansi–konsentrasi.
 - Baca C_e masing-masing filtrat dari persamaan kalibrasi tersebut.

3.9.9 Pengujian AAS

1. Menyiapkan larutan pengenceran dengan menggunakan aquades berpengasam ringan (HNO_3) sesuai SNI 06-6989.8-2009.
2. Dari larutan induk Pb dengan konsentrasi 100 mg/L, siapkan rangkaian larutan standar dengan konsentrasi:
 - 0 mg/L (blanko/aquades)
 - 2 mg/L
 - 4 mg/L

- 6 mg/L
 - 8 mg/L
 - 10 mg/L
3. Contoh pembuatan larutan standar 2 mg/L: ambil 2 mL larutan induk 100 mg/L → masukkan ke labu ukur 100 mL → tambahkan larutan pengencer hingga tanda → homogenisasi.
 4. Contoh pembuatan larutan standar 4 mg/L: ambil 4 mL larutan standar 100 mg/L → masukkan ke labu ukur 100 mL → tambahkan larutan pengencer hingga tanda → homogenisasi.
 5. Setelah pembuatan larutan standar selesai, aspirasikan larutan blanko ke dalam AAS-nyala kemudian atur serapan hingga nol.
 6. Aspirasikan larutan kerja satu per satu kedalam AAS, lalu ukur serapannya pada panjang gelombang 283,3 nm atau 217,0 nm, kemudian catat.
 7. Lakukan pembilasan dengan selang aspirator dengan larutan pengencer.
 8. Buat kurva kalibrasi, dan tentukan persamaan garis lurusnya.
 9. Nilai konsentrasi standar (mg/L) diplot pada sumbu X dan nilai absorbansi pada sumbu Y, kemudian dibuat kurva kalibrasi dan dihitung persamaan garis regresi linier dengan persamaan $y = ax$ (Lelifajri *et al.*, 2023).

3.10 Analisa Data dan Pembahasan

Penelitian yang telah dilakukan kemudian dilakukan analisis data, untuk data yang akan dianalisis dan dibahas adalah sebagai berikut:

1. Perhitungan konsentrasi dan efisiensi adsorpsi

$$PR (\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad \dots(3.2)$$

Keterangan:

- C_0 = Konsentrasi awal ion logam dalam larutan (mg/L)
- C_e = Konsentrasi akhir ion logam dalam larutan (mg/L)

(Benjedim *et al.*, 2021)

2. Analisa pengaruh variabel operasi

Data hasil variasi konsentrasi awal Pb, massa adsorben, pH, dan waktu kontak disusun dalam tabel dan grafik (misalnya Pb tersisa vs waktu, removal vs massa, removal vs pH). Setiap grafik dianalisis untuk menentukan kondisi optimum dan melihat tren kenaikan/penurunan efisiensi adsorpsi.

3. Analisa isoterm dan kinetika

- Isoterm adsorpsi Langmuir menggambarkan adsorpsi zat terlarut pada adsorben padat yang terbatas pada monolayer tunggal dari molekul zat terlarut. Model ini didasarkan pada asumsi adsorpsi Langmuir, yang mengasumsikan bahwa permukaan adsorben padat memiliki permukaan yang homogen (Khashan dan Mohammad, 2022).
- Model Freundlich adalah model empiris yang menjelaskan heterogenitas permukaan adsorben (Oladimeji *et al.*, 2024). Isotherm adsorpsi Freundlich menggambarkan adsorpsi multilayer dari zat terlarut pada permukaan heterogen dari adsorben padat.

4. Analisa karakterisasi adsorben (FTIR, dan SEM-EDX)

- *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada permukaan karbon aktif dan memverifikasi keterikatan partikel Fe_3O_4 melalui perubahan pita serapan tertentu. (Benjedim *et al.*, 2021).
- SEM-EDX merupakan teknik karakterisasi yang digunakan untuk melihat morfologi permukaan sekaligus mengetahui komposisi unsur pada suatu material. Pada penelitian adsorben berbasis karbon aktif magnetit, SEM-EDX menjadi penting karena adsorben tidak hanya perlu diamati bentuk permukaannya, tetapi juga perlu dibuktikan keberadaan unsur penyusun seperti karbon (C), oksigen (O), dan besi (Fe) (Udyani *et al.*, 2025).

3.11 Hipotesa Uji Statistik

Hipotesis adalah pernyataan dugaan terhadap sesuatu adalah benar. Hipotesis menjadi bagian penting pada penelitian yang harus terjawab sebagai kesimpulan penelitian. Hipotesis dibagi menjadi dua, yaitu hipotesis nol (H_0) dan hipotesis alternatif (H_1). H_0 adalah hipotesis yang menyatakan tidak ada perubahan/perbedaan. Sedangkan H_1 adalah hipotesis yang memiliki efek atau perbedaan (Hazra & Gogtay, 2016). Adapun hipotesis penelitian ini adalah:

- | | | |
|----------|---|---|
| H_{0K} | = | Tidak ada pengaruh pemberian variasi konsentrasi logam Pb terhadap penurunan konsentrasi logam Pb |
| H_{1K} | = | Ada pengaruh pemberian variasi konsentrasi logam Pb terhadap penurunan konsentrasi logam Pb |
| H_{0M} | = | Tidak ada pengaruh pemberian variasi massa adsorben terhadap penurunan konsentrasi logam Pb |
| H_{1M} | = | Ada pengaruh pemberian variasi massa adsorben terhadap penurunan konsentrasi logam Pb |
| H_{0T} | = | Tidak ada pengaruh pemberian variasi waktu kontak terhadap penurunan konsentrasi logam Pb |
| H_{1T} | = | Ada pengaruh pemberian variasi waktu kontak terhadap penurunan konsentrasi logam Pb |
| H_{0P} | = | Tidak ada pengaruh pemberian variasi pH terhadap penurunan konsentrasi logam Pb |
| H_{1P} | = | Ada pengaruh pemberian variasi pH terhadap penurunan konsentrasi logam Pb |

3.12 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran dapat dilakukan apabila penelitian sudah selesai sampai tahap analisis data. Kesimpulan merupakan jawaban dari rumusan masalah penelitian yang sesuai dengan analisis data yang dilakukan. Untuk saran merupakan rekomendasi yang perlu diperbaiki dalam penelitian dan memberikan masukan untuk penelitian selanjutnya.

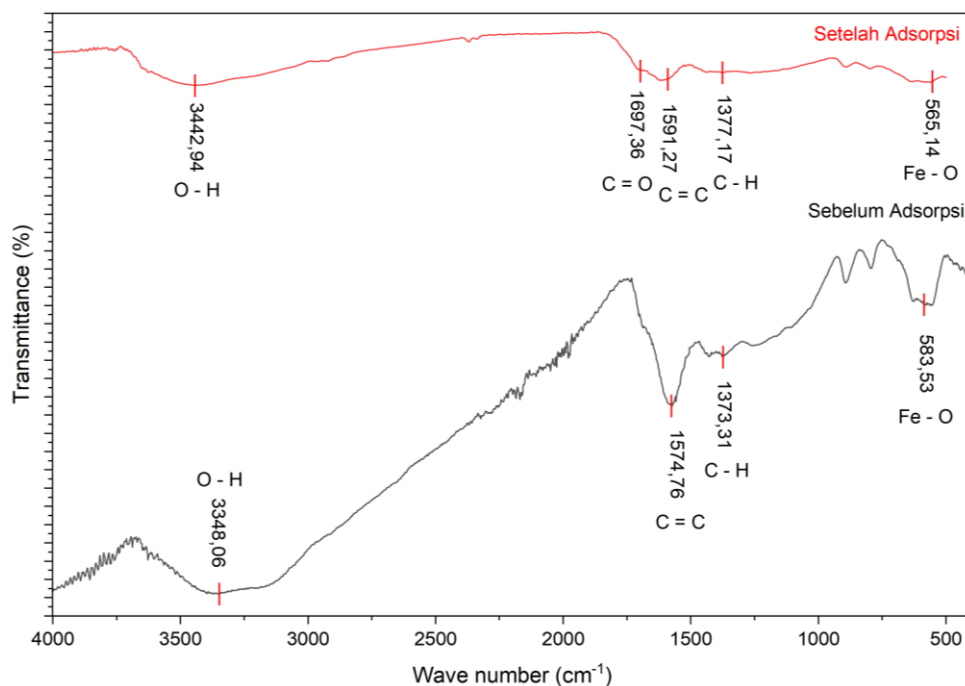
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Uji Karakterisasi

4.1.1 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Pengujian karakter FTIR digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan gugus fungsi kimia tertentu berdasarkan pola serapan gelombang inframerah pada rentang panjang gelombang 4000 hingga 500 cm^{-1} . Pengujian FTIR dilakukan sebelum adsorpsi dan setelah adsorpsi Berikut merupakan hasil pengujian FTIR karbon aktif termodifikasi magnetit sebelum dan setelah adsorpsi pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1. Spektrum FTIR Karbon Aktif Termodifikasi Magnetit

Hasil FTIR karbon aktif termodifikasi magnetit Fe_3O_4 sebelum adsorpsi pada Gambar 4.1 menunjukkan beberapa puncak utama pada 3348,06 cm^{-1} , 1574,76 cm^{-1} , 1373,31 cm^{-1} , dan 583,53 cm^{-1} . Puncak pada 3348,06 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi regangan O-H. Interpretasi ini didukung oleh Dirgayanti *et al.*, (2021), yang melaporkan bahwa Fe_3O_4 -*activated carbon* memiliki puncak O-H pada 3425,58 cm^{-1} . Dengan

demikian, puncak $3348,06\text{ cm}^{-1}$ pada penelitian ini masih berada dalam rentang serapan O–H yang umum ditemukan pada material karbon aktif maupun komposit karbon aktif– Fe_3O_4 . Keberadaan gugus O–H penting karena menunjukkan adanya gugus hidroksil pada permukaan adsorben yang dapat berperan sebagai salah satu situs interaksi dalam proses adsorpsi ion logam.

Puncak pada $1574,76\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan adanya vibrasi regangan C = C pada struktur aromatik karbon aktif magnetit. Ananda dan Dewi (2024), melaporkan bahwa karbon aktif kulit kluwak memiliki puncak pada $1560,13\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan regangan C = C aromatik. Thohir dan Wijaya (2024), juga menyatakan bahwa pita pada 1575 cm^{-1} mengindikasikan adanya gugus C = C yang menjadi salah satu gugus fungsi khas karbon aktif.

Puncak pada $1373,31\text{ cm}^{-1}$ dapat dikaitkan dengan daerah vibrasi tekuk C–H pada struktur karbon. Hal ini mengacu pada oleh Dirgayanti *et al.* (2021), yang mencantumkan rentang C–H bending pada $1340\text{--}1470\text{ cm}^{-1}$ dan melaporkan puncak C–H bending pada $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--activated carbon}$ di $1396,46\text{ cm}^{-1}$. Dengan demikian, puncak $1373,31\text{ cm}^{-1}$ pada penelitian ini masih berada dalam rentang yang relevan dengan vibrasi C–H bending.

Puncak $583,53\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya vibrasi regangan Fe–O dari magnetit Fe_3O_4 . Puncak ini menjadi indikator penting bahwa partikel magnetit berhasil terikat atau terdepresiasi pada permukaan karbon aktif. Dirgayanti *et al.* (2021), melaporkan bahwa Fe_3O_4 murni memiliki puncak Fe–O pada $586,36\text{ cm}^{-1}$, sedangkan komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--activated carbon}$ menunjukkan puncak Fe–O pada $540,07\text{ cm}^{-1}$. Kedekatan posisi puncak tersebut mendukung bahwa adsorben dalam penelitian ini telah termodifikasi oleh magnetit Fe_3O_4 .

Hasil FTIR setelah adsorpsi menunjukkan puncak utama pada $3442,94\text{ cm}^{-1}$, $1697,36\text{ cm}^{-1}$, $1591,27\text{ cm}^{-1}$, $1377,17\text{ cm}^{-1}$, $565,14\text{ cm}^{-1}$. Puncak pada $3442,94\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan bahwa gugus O–H masih teridentifikasi pada permukaan adsorben setelah kontak dengan larutan Pb. Abdulqader dan Abbas (2023), melaporkan pita O – H pada puncak 3410 cm^{-1} pada komposit AC/ Fe_3O_4 . Penelitian tersebut juga membandingkan spektrum

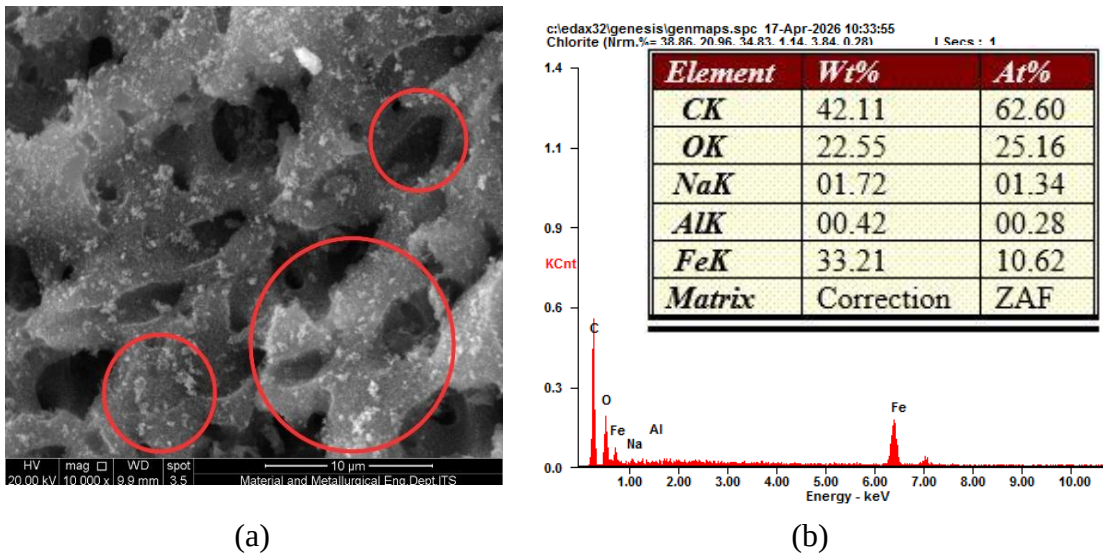
AC/ Fe₃O₄ sebelum dan setelah pemuatan Pb dan menyatakan bahwa terjadi perubahan transmitansi serta posisi pita setelah Pb menempel pada permukaan komposit. Perubahan pada spektrum FTIR ini mengkonfirmasi kompleksasi Pb dengan gugus fungsional.

Puncak pada 1697,36 cm⁻¹ menunjukkan adanya vibrasi C=O dari gugus karbonil atau karboksil pada permukaan adsorben. El-Sheeta *et al.* (2022), mengidentifikasi pita pada 1710,55 cm⁻¹ sebagai vibrasi regangan C = O dari gugus asam karboksilat yang tidak terionisasi. Berdasarkan kedekatan posisi tersebut, puncak serapan 1697,36 cm⁻¹ setelah adsorpsi dapat mengindikasikan vibrasi regangan C = O. Puncak pada 1591,27 cm⁻¹ menunjukkan keberadaan struktur C=C aromatik . Lestari *et al.* (2022), menyatakan bahwa serapan pada 1599 mengindikasikan keberadaan vibrasi C=C dalam cincin aromatik karbon aktif magnetit.

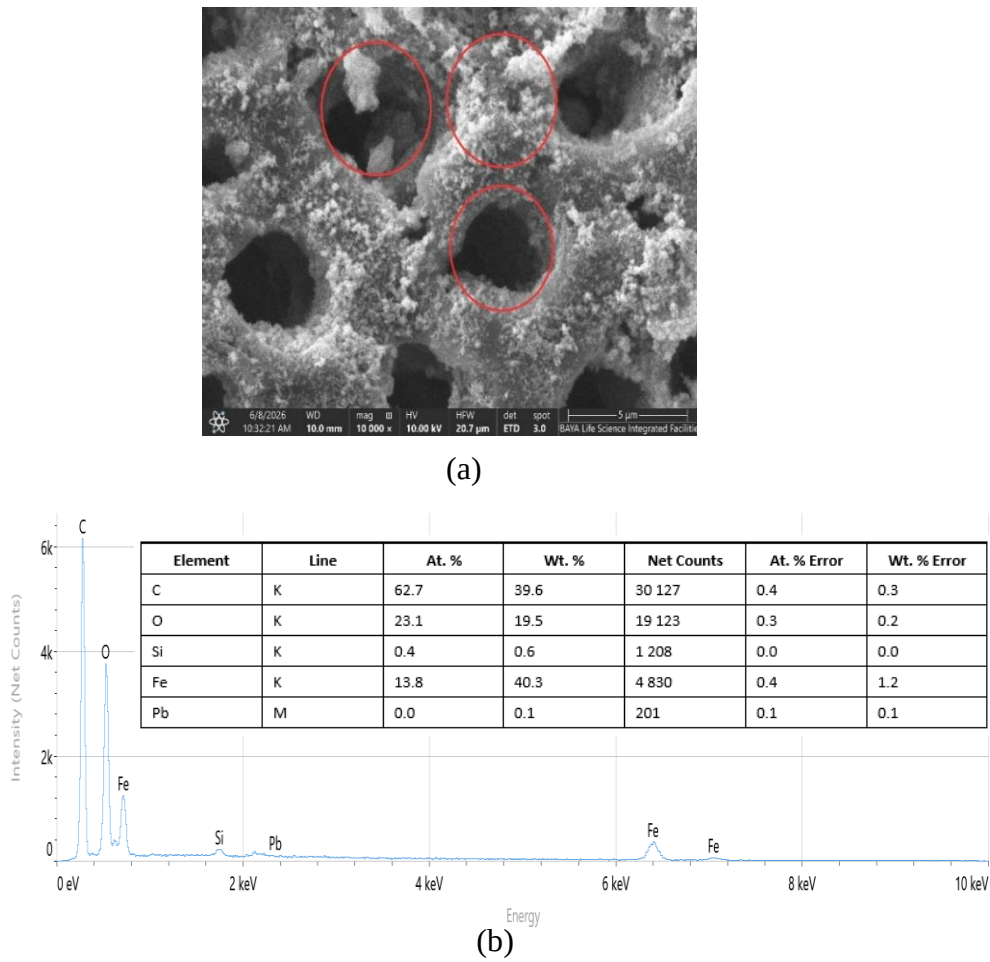
Puncak pada 1377,17 cm⁻¹ menunjukkan vibrasi tekuk C-H (Dirgayanti *et al.*, 2021). Puncak pada 565,14 cm⁻¹ menunjukkan keberadaan gugus Fe-O setelah proses adsorpsi. Dirgayanti *et al.* (2021), melaporkan bahwa Fe₃O₄ murni memiliki puncak Fe–O pada 586,36 cm⁻¹, sedangkan komposit Fe₃O₄–*activated carbon* menunjukkan puncak Fe–O pada 540,07 cm

4.1.2 Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X-Ray (SEM/EDX)

Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) berfungsi untuk mengamati morfologi permukaan karbon aktif termodifikasi magnetit, sedangkan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) digunakan untuk mengetahui unsur-unsur penyusun material adsorben. Pengujian SEM/EDX dilakukan pada sebelum dan setelah adsorpsi Pb. Berikut merupakan hasil pengujian SEM/EDX karbon aktif magnetit sebelum dan setelah adsorpsi pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3.



Gambar 4. 2. (a) Hasil SEM Karbon Aktif Termodifikasi Magnetit Perbesaran 10.000x Sebelum Adsorpsi. (b) Hasil EDX Karbon AKtif Termodifikasi Magnetit Perbesaran 1.000x Sebelum Adsorpsi



Gambar 4. 3. (a) Hasil SEM Karbon Aktif Termodifikasi Magnetit Perbesaran 10.000x Setelah Adsorpsi. (b) Hasil EDX Karbon Aktif Termodifikasi Magnetit Perbesaran 1.000x Setelah Adsorpsi

Hasil SEM sebelum adsorpsi pada Gambar 4.2 (a) menunjukkan bahwa permukaan karbon aktif magnetit memiliki morfologi yang heterogen dan berpori, dengan butiran halus tersebar di atas matriks karbon aktif. Morfologi ini merupakan karakter yang umum dijumpai pada karbon aktif berbasis biomassa karena proses karbonisasi dan aktivasi dapat membentuk permukaan kasar serta membuka pori-pori pada struktur karbon. Struktur berpori tersebut penting dalam proses adsorpsi karena dapat menyediakan area kontak antara adsorben dan adsorbat. El-Sheetta *et al.* (2022) menjelaskan bahwa permukaan adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{activated carbon}$ yang berpori dapat mendukung proses perpindahan ion logam menuju situs aktif pada permukaan adsorben.

Analisis EDX sebelum adsorpsi pada Gambar 4.2 (b) mengonfirmasi keberadaan unsur utama dan minor pada sampel. Unsur karbon (C) merupakan unsur dominan sebanyak 42,11% pada pembacaan 1.000x. Unsur C berasal dari kerangka matriks karbon aktif. Oksigen (O) hadir dalam jumlah signifikan sebanyak 22,55% pada pembacaan 1.000x. Unsur O berasal dari fase magnetit (Fe–O) dan gugus permukaan karbon aktif. Sedangkan besi (Fe) terlihat jelas sebanyak 33,21% pada pembacaan 1.000x, mendukung adanya distribusi magnetit pada permukaan karbon aktif (Lestari *et al.*, 2022). Selain itu, terdapat unsur Al dalam jumlah kecil dari pengotor, dan Na yang berasal dari proses modifikasi magnetit untuk mempercepat pengendapan yang tidak hilang selama proses pencucian (AHDIATY, 2022).

Hasil SEM setelah adsorpsi pada Gambar 4.3 (a) menunjukkan permukaan sampel memiliki morfologi yang berpori, dan agregat partikel halus yang menempel pada dinding dan menutupi sebagian pori-pori. Hasil SEM menunjukkan bahwa morfologi utama karbon aktif magnetit tetap sebelum dan setelah adsorpsi tetap sama, yaitu heterogen dan berpori. Namun, partikel halus yang menempel pada dinding sampel setelah adsorpsi lebih banyak dibandingkan dengan partikel halus yang menempel pada sampel sebelum adsorpsi pada Gambar 4.2 (a).

Hasil EDX setelah adsorpsi menunjukkan adanya unsur C sebesar 39,6 wt%, O sebesar 19,5 wt%, Fe sebesar 40,3 wt%, Si sebesar 0,6 wt%, dan Pb sebesar 0,1 wt%. Keberadaan C menunjukkan bahwa adsorben masih memiliki matriks karbon aktif, sedangkan Fe dan O menunjukkan bahwa komponen magnetit Fe_3O_4 masih terdeteksi setelah proses adsorpsi. Zhang *et al.* (2022), menjelaskan bahwa *magnetic activated carbon* merupakan karbon aktif yang dimodifikasi dengan Fe_3O_4 , sehingga material memiliki kerangka karbon sekaligus partikel magnetit pada permukaannya.

Unsur Si yang terdeteksi sebesar 0,6 wt% setelah adsorpsi menunjukkan adanya silikon dalam jumlah kecil pada permukaan adsorben. Pada material karbon aktif berbasis biomassa, Si dapat hadir dalam bentuk silika atau silikat, bukan sebagai silikon bebas. Sulaiman *et al.* (2022), menyatakan bahwa kulit dan bonggol jagung mengandung silika dan dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan silika gel SiO_2 . Si bisa saja sudah ada pada adsorben sebelum adsorpsi, tetapi tidak terdeteksi pada area EDX yang dianalisis karena EDX bersifat lokal dan semi-kuantitatif. Artinya, hasilnya sangat dipengaruhi oleh titik atau area permukaan yang ditembak elektron.

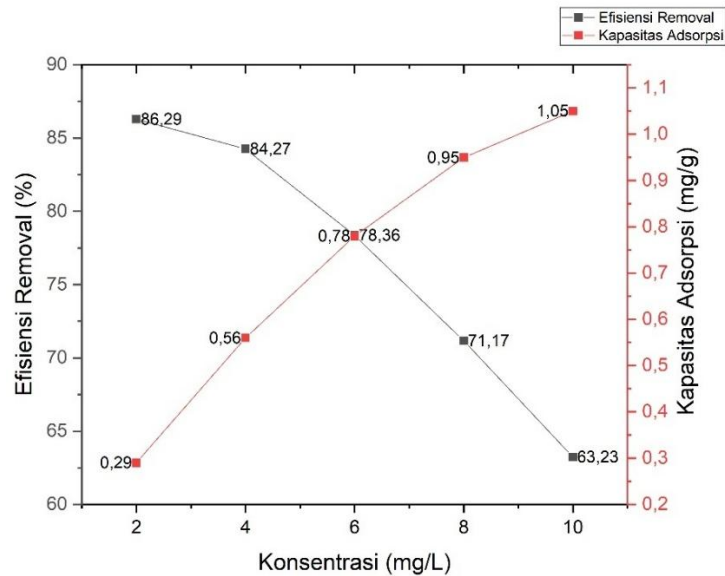
Munculnya Pb sebesar 0,1 wt% setelah adsorpsi merupakan bukti pendukung bahwa Pb telah berada pada permukaan karbon aktif magnetit. Hal ini sejalan dengan Smagulova *et al.* (2025), yang meneliti adsorpsi Pb pada komposit *magnetic activated carbon/Fe₃O₄* dan melaporkan kapasitas adsorpsi 39,15 mg/g serta efisiensi penghilangan Pb 92,84%.

4.2 Pengaruh Variasi terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Logam Berat Timbal (Pb)

4.2.1 Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Logam Berat Pb

Analisis pengaruh konsentrasi sampel Pb dilakukan untuk mengidentifikasi konsentrasi sampel Pb yang memiliki efisiensi removal tertinggi. Variasi konsentrasi Pb yang digunakan adalah 2 mg/L, 4 mg/L, 6

mg/L, 8 mg/L, dan 10 mg/L dengan volume sampel sebanyak 100 mL dan parameter adsorpsi lainnya dibuat tetap (pH 7, waktu kontak 60 menit, agitasi 200 rpm, pada suhu ruang atau 25°C, dan massa adsorben 0,6 g). Gambar 4.4 merupakan hasil pengujian adsorpsi pada variasi konsentrasi awal Pb.



Gambar 4. 4. Grafik Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Pb

Gambar 4.4 menunjukkan efisiensi removal logam berat Pb mencapai 86,29% pada konsentrasi Pb 2 mg/L dan efisiensi removal semakin turun seiring penambahan konsentrasi hingga mencapai 63,23% pada konsentrasi Pb 10 mg/L. Hal tersebut terjadi karena jumlah situs aktif pada adsorben bersifat terbatas sedangkan jumlah ion Pb dalam larutan meningkat bersama dengan peningkatan konsentrasi awal. Semua adsorben memiliki jumlah situs aktif yang tetap yang cenderung diisi oleh ion adsorbat. Pada konsentrasi adsorbat yang lebih tinggi, situs aktif adsorben cenderung jenuh sehingga menyebabkan penurunan efisiensi removal (Chowdhury *et al.*, 2021).

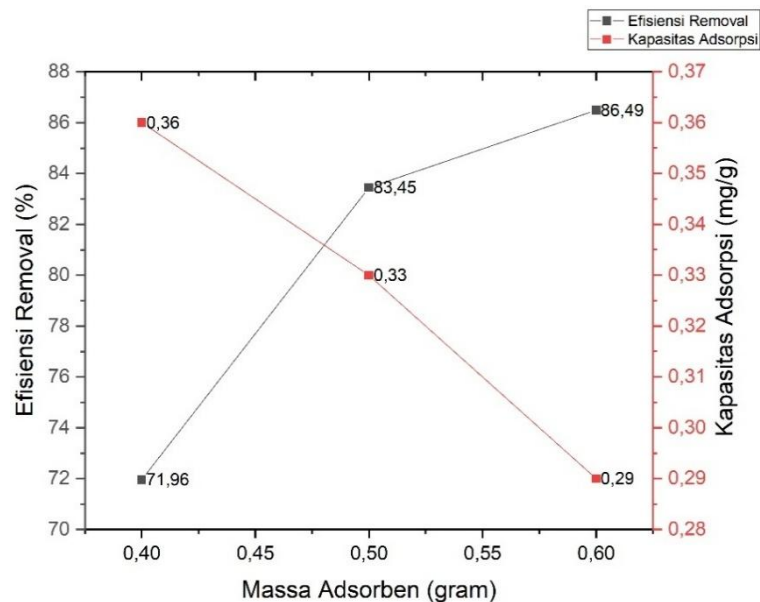
Data hasil pengujian adsorpsi variasi konsentrasi awal Pb pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi Pb meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi awal Pb. Hasil pengujian menunjukkan kapasitas adsorpsi naik dari 0,29 mg/g pada konsentrasi 2 mg/L menjadi 1,05 mg/g pada konsentrasi 10 mg/L. Pada konsentrasi awal yang lebih tinggi, jumlah ion Pb dalam larutan semakin besar sehingga gaya pendorong

perpindahan massa dari fase larutan menuju permukaan adsorben juga meningkat. Kondisi tersebut memperbesar peluang tumbukan antara ion Pb dengan situs aktif pada karbon aktif magnetit, sehingga kapasitas adsorpsi per satuan massa meningkat selama situs aktif belum mencapai kondisi jenuh.

El-Sheetta *et al.* (2022) melaporkan pola serupa pada adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{activated carbon}$, yaitu peningkatan konsentrasi awal Pb menyebabkan peningkatan kapasitas adsorpsi akibat meningkatnya difusi ion Pb^{2+} dari larutan menuju permukaan adsorben. Namun, peningkatan kapasitas adsorpsi tidak selalu diikuti oleh peningkatan efisiensi removal karena jumlah situs aktif adsorben tetap, sedangkan jumlah ion Pb yang bersaing untuk menempati situs aktif semakin besar.

4.2.2 Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Logam Berat Pb

Dosis atau massa adsorben yang digunakan merupakan faktor penting yang mempengaruhi proses bioadsorpsi logam berat karena mempengaruhi jumlah situs pengikatan yang tersedia untuk logam berat (Tejada-Tovar *et al.*, 2023). Pada penelitian ini, analisis pengaruh massa adsorben dilakukan untuk mengidentifikasi massa adsorben yang memiliki efisiensi removal Pb tertinggi. Variasi massa adsorben yang digunakan adalah 0,4 g, 0,5 g, dan 0,6 g. Parameter adsorpsi lain yang digunakan dibuat tetap yaitu pH 7, agitasi 200 rpm, pada suhu ruang atau 25°C, dan menggunakan konsentrasi terbaik dari variasi sebelumnya yaitu 2 mg/L. Gambar 4.5 merupakan hasil pengujian adsorpsi pada variasi massa adsorben.



Gambar 4. 5. Grafik Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Pb

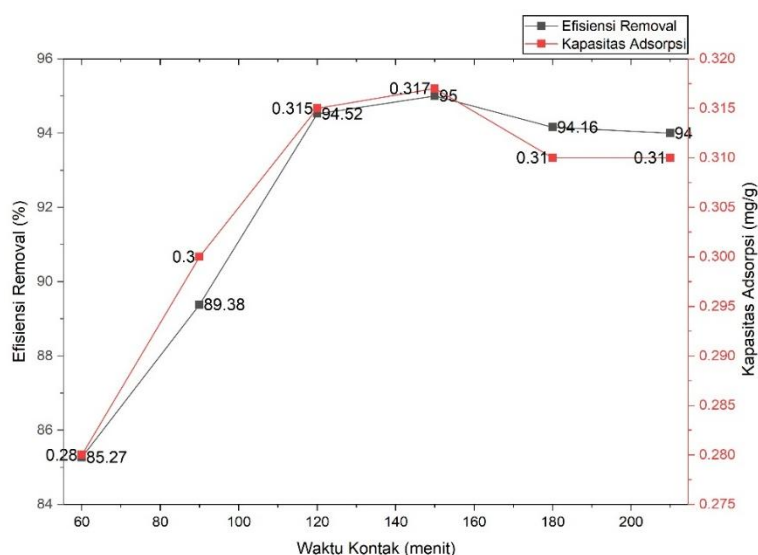
Gambar 4.5 menunjukkan bahwa peningkatan massa adsorben cenderung meningkatkan efisiensi removal Pb, yaitu dari 71,96% pada massa adsorben 0,4 gram menjadi 86,49% pada massa adsorben 0,6 gram. Peningkatan ini terjadi karena pada konsentrasi awal Pb dan volume larutan yang tetap, penambahan massa adsorben menyebabkan jumlah total permukaan kontak dan situs pengikatan yang tersedia dalam sistem batch semakin besar. Hal ini sejalan dengan El-Sheetta *et al.* (2022), yang melaporkan bahwa peningkatan dosis adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{activated carbon}$ pada adsorpsi Pb dapat meningkatkan persen removal karena bertambahnya luas permukaan dan jumlah situs adsorpsi yang tersedia.

Peningkatan efisiensi removal tidak selalu diikuti oleh peningkatan kapasitas adsorpsi per satuan massa. Hasil pengujian adsorpsi pada Gambar 4.5 menunjukkan kapasitas adsorpsi menurun dari 0,36 mg/g pada massa adsorben 0,4 gram menjadi 0,29 mg/g pada massa adsorben 0,6 gram. Penurunan ini terjadi karena kapasitas adsorpsi dihitung berdasarkan jumlah Pb yang teradsorpsi per gram adsorben. Ketika massa adsorben meningkat, sedangkan konsentrasi awal Pb dan volume larutan tetap, maka jumlah ion Pb yang tersedia menjadi terbatas dibandingkan jumlah massa adsorben yang digunakan. Hal ini mengakibatkan sebagian situs adsorpsi tidak

termanfaatkan secara optimal sehingga kapasitas adsorpsi per gram adsorben menurun. Pola ini sejalan dengan El-Sheetta *et al.* (2022), yang melaporkan bahwa kapasitas adsorpsi Pb pada $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{activated carbon}$ menjadi rendah pada dosis adsorben yang lebih tinggi. Dengan demikian, massa adsorben 0,6 gram memberikan efisiensi removal yang tertinggi, tetapi kapasitas adsorpsi lebih rendah dibandingkan adsorben yang lebih kecil.

4.2.3 Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Logam Berat Pb

Waktu kontak merupakan faktor penting dalam proses adsorpsi untuk mengetahui laju adsorpsi dan waktu optimal untuk mencapai efisiensi tertinggi. Variasi waktu kontak yang digunakan dalam penelitian ini adalah 60 menit, 90 menit, 120 menit, 150 menit, 180 menit, dan 210 menit. Parameter lain selain waktu kontak dibuat tetap yaitu pH 7, agitasi 200 rpm, suhu ruang atau 25°C , konsentrasi awal Pb 2 mg/L, dan menggunakan massa adsorben 0,6 gram. Gambar 4.6 merupakan hasil adsorpsi pada variasi waktu kontak.



Gambar 4. 6 Grafik Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Pb

Gambar 4.6 menunjukkan bahwa peningkatan waktu kontak menaikkan efisiensi removal Pb hingga mencapai kondisi optimum pada 150 menit, dengan efisiensi sebesar 95% dan kapasitas adsorpsi 0,317 mg/g. Setelah 150 menit, efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi menurun menjadi

94% dan 0,31 mg/g pada waktu kontak 210 menit. Peningkatan efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi dari 60 hingga 150 menit menunjukkan bahwa penambahan waktu kontak memberi kesempatan lebih besar bagi ion Pb untuk berpindah dari larutan menuju permukaan adsorben.

Pada tahap awal, permukaan karbon aktif magnetit masih memiliki situs adsorpsi yang relatif banyak tersedia, sehingga interaksi antara ion Pb dan permukaan adsorben berlangsung lebih efektif. Ion Pb^{2+} dapat tertahan melalui pori karbon aktif, gugus berbasis oksigen pada permukaan adsorben, serta keterlibatan fase Fe_3O_4 pada komposit adsorben. Penjelasan ini sejalan dengan El-Sheet et al. (2022), yang menjelaskan bahwa pada adsorpsi Pb^{2+} menggunakan $Fe_3O_4/activated\ carbon$, laju removal meningkat seiring bertambahnya waktu kontak karena situs adsorpsi masih mudah tersedia pada awal proses. Seiring bertambahnya waktu, situs adsorpsi mulai terisi sehingga laju adsorpsi menjadi lebih lambat dan sistem mulai mendekati kondisi jenuh.

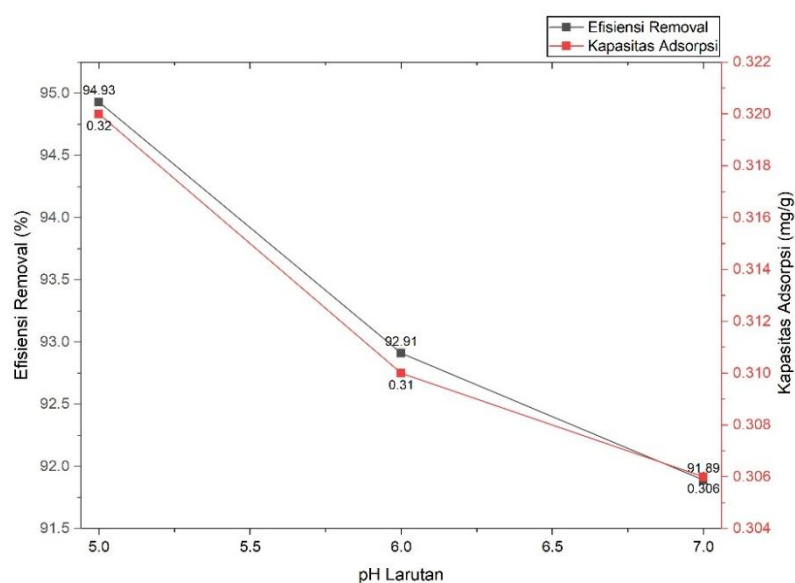
Kenaikan kapasitas adsorpsi dari 120 menit ke 150 menit relatif kecil, yaitu dari 0,315 mg/g menjadi 0,317 mg/g. Perubahan yang kecil ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi mulai mendekati kondisi kesetimbangan. Pada fase tersebut, sebagian besar situs adsorpsi yang mudah diakses telah ditempati oleh ion Pb^{2+} , sehingga penambahan waktu kontak tidak lagi menghasilkan peningkatan kapasitas adsorpsi yang besar.

Waktu kontak lebih dari 150 menit menunjukkan penurunan efisiensi removal dari 95,00% menjadi 94,16% dan 94,00%, serta penurunan kapasitas adsorpsi dari 0,317 mg/g menjadi 0,31 mg/g. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa waktu kontak telah melewati kondisi optimum pada sistem penelitian ini. El-Sheet et al. (2022) menyatakan bahwa setelah adsorpsi Pb^{2+} mendekati kesetimbangan, penambahan waktu kontak tidak lagi memberikan peningkatan removal yang berarti karena jumlah situs aktif yang masih kosong semakin terbatas.

4.2.4 Pengaruh pH Larutan terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Logam Berat Pb

pH merupakan salah satu faktor paling kritis dalam bioadsorpsi logam berat karena pH larutan mempengaruhi muatan permukaan biomassa dan spesiasi ion logam, dengan demikian menentukan atraksi elektrostatik dan interaksi kimia antara biomassa dan ion logam (Tejada-Tovar *et al.*, 2023). Variasi pH yang digunakan dalam penelitian ini adalah pH 5, 6, dan 7. Rentang tersebut dipilih karena mewakili kondisi asam lemah hingga netral yang masih relevan untuk adsorpsi Pb oleh karbon aktif termodifikasi magnetit Fe_3O_4 . pH 5 digunakan karena beberapa penelitian menunjukkan bahwa kondisi tersebut merupakan pH optimum untuk adsorpsi Pb^{2+} pada adsorben berbasis karbon aktif magnetit (El-Sheeta *et al.* 2022; Alhameedawi *et al.* 2025). pH 6 dipilih untuk melihat perubahan kinerja adsorpsi ketika larutan bergerak menuju kondisi netral, sedangkan pH 7 digunakan sebagai pembandingan pada kondisi netral.

Faktor adsorpsi lain pada variasi ini dibuat tetap yaitu konsentrasi awal Pb 2 mg/L, massa adsorben 0,6 gram, agitasi 200 rpm, pada suhu ruang atau 25°C, dan waktu kontak 120 menit. Gambar 4.7 merupakan hasil pengujian adsorpsi variasi pH larutan.



Gambar 4. 7 Grafik Pengaruh pH Larutan terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi Pb

Gambar 4.7 hasil pengujian adsorpsi variasi pH menunjukkan bahwa variasi pH larutan mempengaruhi efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi Pb oleh karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit. Efisiensi removal tertinggi diperoleh pada pH 5 sebesar 94,93% dengan kapasitas adsorpsi 0,32 mg/g. Pada pH 6, efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi menurun menjadi 92,91% dan 0,31 mg/g. Efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi menurun lagi pada pH 7 yaitu sebesar 91,89% dan 0,306 mg/g.

Tingginya efisiensi removal pada pH 5 menunjukkan bahwa kondisi sedikit asam lebih sesuai untuk adsorpsi Pb pada karbon aktif termodifikasi magnetit. Hasil ini sejalan dengan El-Sheetta *et al.* (2022), yang melaporkan bahwa efisiensi removal Pb^{2+} tertinggi pada *activated carbon* dan *activated carbon* Fe_3O_4 diperoleh pada pH 5. Penurunan efisiensi removal pada pH 6 dan pH 7 dapat dikaitkan dengan perubahan spesiasi Pb setelah melewati pH optimum.

El-Sheetta *et al.* (2022), menjelaskan bahwa pada pH di atas 5, sebagian penyisihan ion logam dapat berkaitan dengan pembentukan $Pb(OH)_2$, sedangkan penurunan adsorpsi terutama disebabkan oleh pembentukan kompleks hidroksil Pb yang larut. Kondisi ini mengurangi jumlah Pb^{2+} bebas yang dapat berinteraksi efektif dengan situs aktif pada permukaan adsorben. Pam *et al.* (2021) juga melaporkan pola serupa pada *activated carbon*, yaitu adsorpsi Pb mencapai maksimum pada pH 5 dan menurun ketika pH awal lebih dari 5 akibat pembentukan $Pb(OH)^+$ dan/atau $Pb(OH)_2$.

Penurunan kapasitas adsorpsi dari 0,32 mg/g pada pH 5 menjadi 0,31 mg/g pada pH 6 dan 0,306 mg/g pada pH 7 menunjukkan bahwa jumlah Pb yang terikat pada adsorben berkurang ketika pH melewati kondisi terbaik. Pada penelitian ini, konsentrasi awal Pb, volume larutan, dan massa adsorben dibuat tetap. Ketika jumlah Pb yang teremoval dari larutan menurun pada pH 6 dan pH 7, nilai $(C_0 - C_e)$ menjadi lebih kecil, sehingga kapasitas adsorpsi yang dihitung juga menurun. Penurunan kapasitas adsorpsi ini sejalan dengan Pam *et al.* (2021), yang menunjukkan kapasitas adsorpsi Pb dengan *activated*

carbon mengalami peningkatan dari pH 1 hingga pH 5, kemudian mengalami penurunan setelah melewati pH 5.

4.3 Isoterm Adsorpsi

Kajian isotherm adsorpsi digunakan untuk memahami perancangan dan pengoperasian sistem adsorpsi. Model isotherm juga digunakan untuk memahami kecenderungan mekanisme adsorpsi, baik melalui interaksi fisik, interaksi kimia, pertukaran ion, maupun pembentukan kompleks pada permukaan adsorben (Ehiomogue *et al.*, 2022). Model isotherm yang digunakan dalam penelitian ini adalah Langmuir dan Freundlich. Model Langmuir menggambarkan adsorpsi monolayer pada permukaan adsorben yang relatif homogen. Sedangkan model Freundlich menggambarkan adsorpsi pada permukaan heterogen dan dapat menjelaskan adsorpsi multilayer (Danat *et al.*, 2022).

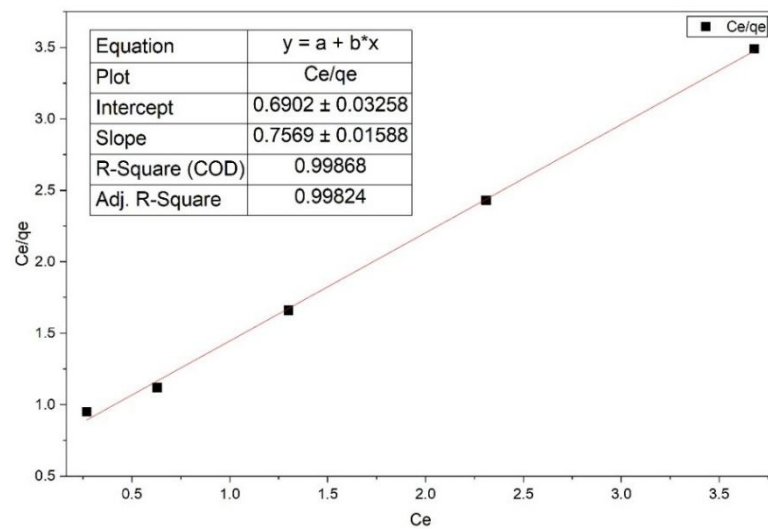
4.3.1 Isoterm Langmuir

Adsorpsi dilakukan dengan variasi konsentrasi awal Pb yaitu 2, 4, 6, 8, dan 10 mg/L. Data hasil adsorpsi kemudian diplot kedalam bentuk linear Langmuir menunjukkan hubungan linear antara C_e/q_e terhadap C_e untuk memperoleh nilai koefisien determinasi atau R^2 . Data penelitian dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data Penelitian untuk Grafik Isoterm Langmuir

(Co) Konsentrasi Awal (mg/L)	(Ce) Konsentrasi Terakhir (mg/L)	Volume (liter)	Massa Adsorben (gram)	(Q) Kapasitas Terserap (m.g/g)	Ce	Ce/qe
2	0,27	0,1	0,6	0,29	0,27	0,95
4	0,63			0,56	0,63	1,12
6	1,30			0,78	1,30	1,66
8	2,31			0,95	2,31	2,43
10	3,68	0,1	0,6	1,05	3,68	3,49

Gambar 4.8 merupakan grafik isotherm Langmuir yang menunjukkan nilai slope, intercept, dan R^2 .



Gambar 4. 8 Grafik Isoterm Langmuir

Gambar 4.8 grafik isoterm Langmuir menunjukkan hubungan linear antara C_e/q_e terhadap C_e . Garis regresi yang terbentuk memiliki nilai intercept sebesar 0,6902 dan slope sebesar 0,7569. Nilai slope dan intercept masing-masing digunakan untuk menghitung kapasitas maksimum (q_{max}) dan konstanta Langmuir (K_L). Hasil perhitungan parameter isoterm Langmuir dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Perhitungan Isoterm Langmuir

Parameter	Nilai
Q_{max} (mg/g)	1,32118
K_L (L/mg)	1,09664
R^2	0,99868

Hasil perhitungan pada Tabel 4.2 menunjukkan bahwa nilai Q_{max} dan K_L isoterm Langmuir adalah 1,32118 mg/g dan 1,09664 L/mg. Nilai Q_{max} menunjukkan kapasitas maksimum teoritis adsorben dalam menyerap ion Pb, sedangkan K_L menunjukkan kekuatan afinitas adsorpsi antara Pb dan permukaan adsorben (Smagulova *et al.*, 2025). Nilai R^2 isoterm Langmuir sebesar 0,99868 menunjukkan bahwa isoterm Langmuir sangat sesuai untuk menjelaskan proses adsorpsi Pb pada karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe_3O_4 . Hasil ini sejalan dengan Smagulova *et al.* (2025), yang menyatakan bahwa isoterm Langmuir memberikan kesesuaian

terbaik dalam menjelaskan adsorpsi Pb pada karbon aktif dan komposit karbon aktif Fe_3O_4 ultrasonik.

Berdasarkan pendekatan isoterm Langmuir, proses adsorpsi diasumsikan terjadi pada permukaan adsorben yang relatif homogen dan membentuk lapisan tunggal atau monolayer. Dasar ini merujuk pada Khashan dan Mohammad (2022) serta Oladimeji *et al.* (2024), yang menjelaskan bahwa model Langmuir digunakan untuk menggambarkan adsorpsi pada situs aktif permukaan adsorben dengan pembentukan lapisan monolayer. Pada penelitian ini, nilai R^2 Langmuir sebesar 0,99868 menunjukkan bahwa hubungan antara C_e/q_e dan C_e memiliki kesesuaian linear yang sangat kuat. Oleh karena itu, perilaku adsorpsi Pb oleh karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe_3O_4 dalam rentang konsentrasi yang diuji dapat dijelaskan lebih baik menggunakan model Langmuir.

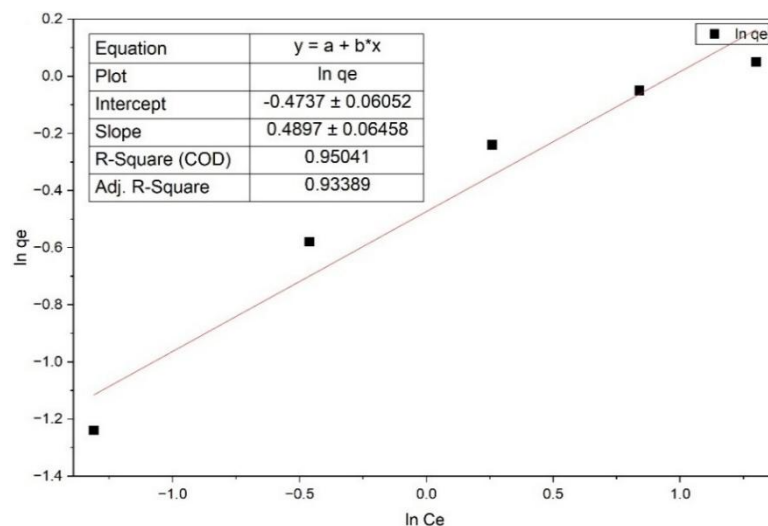
4.3.2 Isoterm Freundlich

Adsorpsi dilakukan dengan variasi konsentrasi awal Pb yaitu 2, 4, 6, 8, dan 10 mg/L. Data hasil adsorpsi kemudian diplot kedalam grafik isoterm Freundlich menunjukkan hubungan linear antara $\log C_e$ terhadap $\log q_e$ untuk memperoleh nilai koefisien determinasi atau R^2 . Data penelitian dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Data Penelitian untuk Grafik Isoterm Freundlich

(Co) Konsentrasi Awal (mg/L)	(Ce) Konsentrasi Terakhir (mg/L)	Volume (liter)	Massa Adsorben (gram)	(Q) Kapasitas Terserap (m.gr/gr)	In Ce	In qe
2	0,27	0,1	0,6	0,29	-1,29	-1,25
4	0,63			0,56	-0,46	-0,58
6	1,30			0,78	0,26	-0,24
8	2,31			0,95	0,84	-0,05
10	3,68	0,1	0,6	1,05	1,30	0,05

Gambar 4.9 merupakan grafik isoterm Freundlich yang menunjukkan nilai slope, intercept, dan R^2 .



Gambar 4. 9. Grafik Isoterm Freundlich

Gambar 4.9 grafik isoterm Freundlich menunjukkan hubungan linear antara $\ln C_e$ terhadap $\ln q_e$. Garis regresi yang terbentuk memiliki nilai intercept sebesar -0,4737 dan slope sebesar 0,4897. Nilai slope dan intercept masing-masing digunakan untuk menghitung $1/n$ dan konstanta Freundlich (K_f). Hasil perhitungan parameter isoterm Freundlich dapat dilihat pada Tabel 4.4

Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Isoterm Freundlich

Parameter	Nilai
K_f (L/g)	0,62269
$1/n$	0,48970
R^2	0,95041

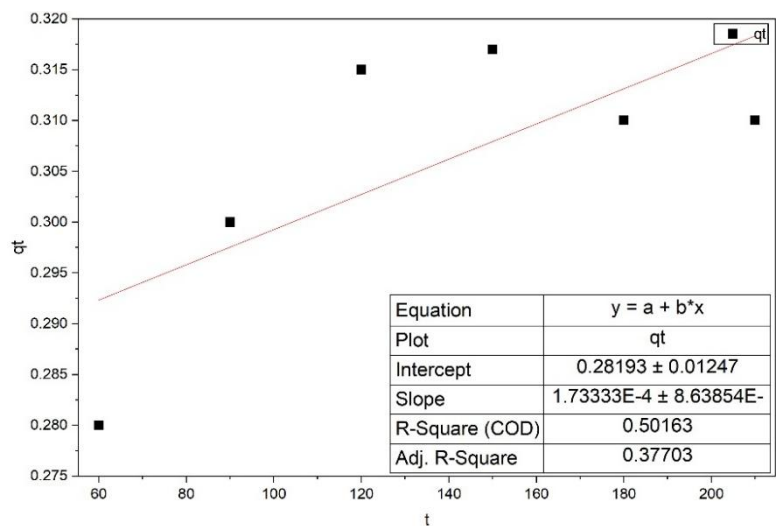
Tabel 4.4 menunjukkan nilai K_f (konstanta Freundlich) yang diperoleh sebesar 0,62269 L/g, nilai $1/n$ sebesar 0,48970, dan nilai R^2 sebesar 0,95041. Nilai K_f menunjukkan kapasitas adsorpsi berdasarkan pendekatan Freundlich. Nilai $1/n$ menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara menguntungkan.

Meskipun nilai R^2 pada model Freundlich cukup tinggi, yaitu 0,95041, nilai tersebut masih lebih rendah dibandingkan nilai R^2 pada model Langmuir. Hal ini menunjukkan bahwa model Freundlich tetap dapat menjelaskan sebagian perilaku adsorpsi Pb pada karbon aktif bonggol

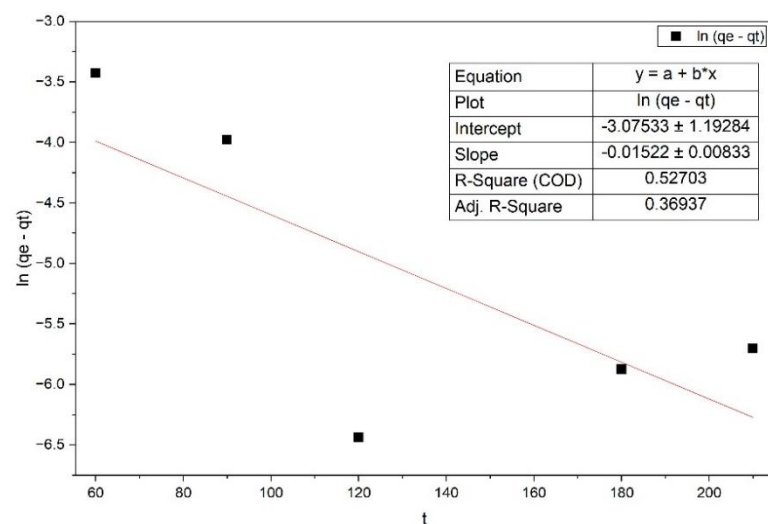
jagung termodifikasi magnetit, tetapi bukan merupakan model yang dominan.

4.4 Kinetika Adsorpsi

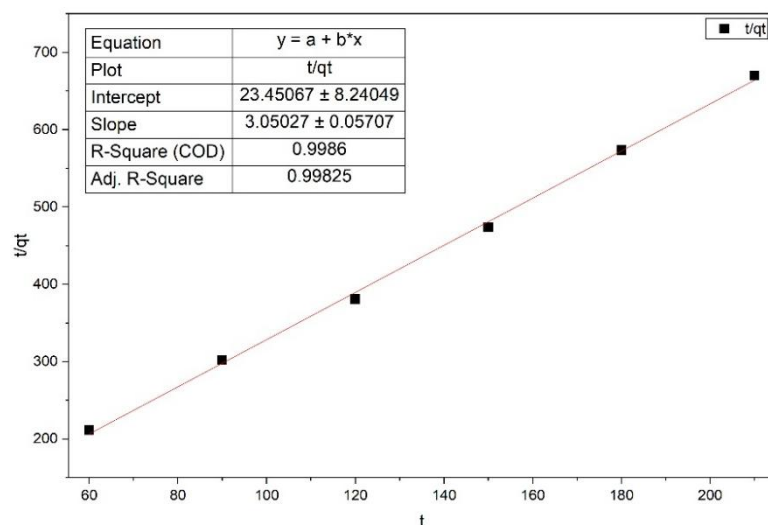
Kinetika adsorpsi digunakan untuk menjelaskan laju penyerapan ion Pb oleh karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe_3O_4 . Analisis ini penting karena model kinetika dapat menunjukkan kesesuaian proses adsorpsi terhadap pola penyerapan tertentu. Smagulova *et al.* (2025), menjelaskan bahwa adsorpsi Pb pada komposit *activated carbon*/ Fe_3O_4 dapat berlangsung melalui dua tahap, yaitu penyerapan cepat pada tahap awal dan penyerapan lebih lambat setelah sebagian situs aktif mulai terisi. El-Sheetta *et al.* (2022) juga menyatakan bahwa waktu kontak menjadi parameter penting karena penyerapan Pb cenderung meningkat pada awal proses, lalu melambat ketika permukaan adsorben mulai mendekati kondisi jenuh. Model kinetika adsorpsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah kinetika pseudo-orde nol, kinetika pseudo-orde satu, dan kinetika pseudo orde- dua. Grafik kinetika dapat dilihat pada Gambar 4.10, Gambar 4.11, dan Gambar 4.12.



Gambar 4. 10. Grafik Kinetika Pseudo-Orde Nol



Gambar 4. 11 Grafik Kinetika Pseudo-Orde Satu



Gambar 4. 12 Grafik Kinetika Pseudo-Orde Dua

Grafik kinetika pada Gambar 4.10, Gambar 4.11, dan Gambar 4.12 menunjukkan garis regresi yang memiliki nilai intercept, slope, dan R^2 . Nilai-nilai tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung parameter kinetika adsorpsi yang ditunjukkan pada Tabel 4.5

Tabel 4. 5 Studi Kinetika Adsorpsi

Model Kinetika	Parameter	Nilai
Pseudo – Orde Nol	q_e (mg/g)	0,28193
	K_0 (mg/g.menit)	0,00017
	R^2	0,50163
Pseudo – Orde Satu	q_e (mg/g)	0,04617
	K_1 (menit ⁻¹)	0,01522
	R^2	0,52703
Pseudo – Orde Dua	q_e (mg/g)	0,32784
	K_2 (g/mg.menit)	0,39675

Model Kinetika	Parameter	Nilai
	R^2	0,99860

Gambar 4.10 grafik kinetika pseudo-orde nol menunjukkan hubungan antara waktu kontak dan kapasitas adsorpsi Pb pada waktu tertentu atau q_t . Model ini menghasilkan nilai q_e sebesar 0,28193 mg/g, nilai K_0 sebesar 0,00017 mg/g.menit, dan nilai R^2 sebesar 0,50163. Nilai R^2 yang rendah menunjukkan bahwa model pseudo-orde nol kurang sesuai untuk menjelaskan adsorpsi Pb pada karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe_3O_4 . Artinya, laju adsorpsi Pb tidak berjalan konstan terhadap waktu. Hasil ini sejalan dengan El-Sheet et al. (2022), yang menunjukkan bahwa adsorpsi Pb pada Fe_3O_4/AC lebih tepat dijelaskan oleh model pseudo-orde dua daripada model yang hanya menggambarkan laju sederhana, karena laju adsorpsi berubah ketika situs aktif mulai terisi.

Gambar 4.11 grafik kinetika pseudo-orde satu menunjukkan hubungan antara $\ln(q_e - q_t)$ terhadap waktu kontak. Hasil perhitungan menunjukkan nilai q_e sebesar 0,04617 mg/g, nilai K_1 sebesar 0,01522 menit⁻¹, dan nilai R^2 sebesar 0,52703. Nilai R^2 tersebut masih rendah, sehingga model pseudo-orde satu belum mampu menggambarkan proses adsorpsi Pb secara baik. Selain itu, nilai q_e hasil perhitungan pseudo-orde satu jauh lebih kecil dibandingkan kapasitas adsorpsi eksperimen yang berada pada kisaran 0,29 sampai 0,317 mg/g. Smagulova et al. (2025), menjelaskan bahwa model pseudo-orde satu lebih sesuai untuk tahap awal adsorpsi yang didominasi oleh penyerapan fisik atau difusi menuju pori yang mudah diakses. Setelah waktu kontak bertambah, penyimpangan dari linearitas dapat terjadi karena proses adsorpsi mulai dipengaruhi oleh pengisian situs aktif dan interaksi kimia permukaan.

Gambar 4.12 grafik kinetika pseudo-orde dua menunjukkan hubungan antara t/q_t terhadap waktu kontak. Model ini menghasilkan nilai q_e sebesar 0,32784 mg/g, nilai K_2 sebesar 0,39675 g/mg.menit, dan nilai R^2 sebesar 0,99860. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa model pseudo-orde dua memiliki kesesuaian paling tinggi dibandingkan model pseudo-orde nol dan pseudo-orde satu. Nilai q_e hasil perhitungan juga mendekati kapasitas adsorpsi eksperimen tertinggi, yaitu sekitar 0,317 mg/g pada waktu kontak 150 menit. Kedekatan antara q_e perhitungan dan q_e eksperimen menjadi salah satu indikator bahwa model pseudo-orde dua

mampu menjelaskan perilaku adsorpsi secara lebih tepat. El-Sheetta *et al.* (2022), menggunakan pendekatan yang sama dan menyimpulkan bahwa model pseudo-orde dua lebih sesuai ketika nilai R^2 tinggi dan nilai q_e hasil perhitungan mendekati nilai q_e eksperimen. Selain itu, Smagulova *et al.* (2025) melaporkan bahwa adsorpsi Pb pada AC dan AC/Fe₃O₄ memiliki nilai R^2 pseudo-orde dua yang sangat tinggi, yaitu 0,9999 untuk AC, 0,9994 untuk h-AC/Fe₃O₄, dan 0,9997 untuk us-AC/Fe₃O₄.

Model pseudo-orde dua yang paling sesuai menunjukkan bahwa adsorpsi Pb pada karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe₃O₄ tidak hanya dikendalikan oleh perpindahan massa secara fisik, tetapi juga dipengaruhi oleh interaksi antara ion Pb²⁺ dengan situs aktif pada permukaan adsorben. Situs aktif tersebut dapat berasal dari pori karbon aktif, gugus oksigen pada permukaan karbon, dan gugus berbasis Fe-O dari magnetit Fe₃O₄. Hal ini sejalan dengan Smagulova *et al.* (2025), yang menyatakan bahwa adsorpsi Pb pada komposit AC/Fe₃O₄ melibatkan penyerapan awal secara fisik, lalu diikuti interaksi permukaan pada tahap berikutnya. El-Sheetta *et al.* (2022), juga menjelaskan bahwa adsorpsi Pb pada Fe₃O₄/AC berkaitan dengan gugus fungsi permukaan seperti karboksil, hidroksil, dan fenol yang dapat berinteraksi dengan Pb²⁺.

4.5 Analisis Statistika

Analisis statistika dilakukan untuk mengetahui apakah variasi konsentrasi awal Pb, massa adsorben, waktu kontak, dan pH larutan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi removal logam berat Pb. Pengujian dilakukan menggunakan uji normalitas, uji homogenitas, dan uji One Way ANOVA dengan bantuan software SPSS. Uji normalitas dan uji homogenitas dilakukan sebelum One Way ANOVA karena ANOVA merupakan uji parametrik yang memerlukan data berdistribusi normal dan memiliki varians antar kelompok yang homogen. Habibzadeh (2024) menjelaskan bahwa uji normalitas digunakan untuk mengevaluasi apakah data mengikuti distribusi normal. Zhou *et al.* (2023) menjelaskan bahwa pada perbandingan lebih dari dua kelompok, ANOVA digunakan untuk menguji perbedaan rata-rata, dengan asumsi bahwa data memenuhi kesamaan varians antar kelompok.

4.5.1 Uji Normalitas

Uji normalitas dilakukan untuk mengetahui apakah data efisiensi removal Pb pada setiap variasi perlakuan mengikuti distribusi normal. Pengujian ini diperlukan karena distribusi normal merupakan salah satu syarat dalam penggunaan uji parametrik seperti One Way ANOVA. Habibzadeh (2024), menyatakan bahwa pada uji normalitas, data dapat dianggap berdistribusi normal apabila nilai signifikansi lebih besar dari 0,05. Tabel 4.6 menyajikan hasil uji normalitas yang diperoleh dalam penelitian ini.

Tabel 4. 6 Hasil Uji Normalitas Variasi Konsentrasi Awal Pb

Konsentrasi (mg/L)	Uji Shapiro-Wilk		
	Nilai Sig. (p value)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
2	1,000	$\text{sig} > \alpha$	Data terdistribusi normal
4	0,997	$\text{sig} > \alpha$	Data terdistribusi normal
6	1,000	$\text{sig} > \alpha$	Data terdistribusi normal
8	1,000	$\text{sig} > \alpha$	Data terdistribusi normal
10	0,967	$\text{sig} > \alpha$	Data terdistribusi normal

Tabel 4.6 menyajikan hasil uji normalitas pada variasi konsentrasi awal Pb terhadap efisiensi removal logam berat Pb. Seluruh data menunjukkan nilai signifikansi lebih besar dari 0,05. Dengan demikian, data pada variasi konsentrasi awal Pb dapat dinyatakan terdistribusi normal.

Tabel 4. 7 Hasil Uji Normalitas Variasi Massa Adsorben

Massa Adsorben (gram)	Uji Shapiro-Wilk		
	Nilai Sig. (p value)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
0,4	1,000	$\text{sig} > \alpha$	Data terdistribusi normal
0,5	0,995	$\text{sig} > \alpha$	Data terdistribusi normal
0,6	1,000	$\text{sig} > \alpha$	Data terdistribusi normal

Berdasarkan hasil uji normalitas yang ditampilkan pada tabel 4.7, seluruh data variasi massa adsorben terhadap efisiensi removal logam berat Pb memperoleh nilai signifikansi di atas 0,05. Hasil tersebut menunjukkan bahwa data pada variasi massa adsorben memenuhi asumsi distribusi normal.

Tabel 4. 8 Hasil Uji Normalitas Variasi Waktu Kontak

Waktu Kontak (menit)	Uji Shapiro-Wilk		
	Nilai Sig. (p value)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
60	0,984	sig > α	Data terdistribusi normal
90	0,984	sig > α	Data terdistribusi normal
120	0,992	sig > α	Data terdistribusi normal
150	1,000	sig > α	Data terdistribusi normal
180	1,000	sig > α	Data terdistribusi normal
210	1,000	sig > α	Data terdistribusi normal

Tabel 4.8 menunjukkan hasil uji normalitas terhadap variasi waktu kontak pada efisiensi removal logam berat Pb. Nilai signifikansi yang diperoleh untuk seluruh data lebih dari 0,05. Berdasarkan hasil tersebut, data dapat disimpulkan memiliki distribusi normal.

Tabel 4. 9 Hasil Uji Normalitas Variasi pH Larutan

pH Larutan	Uji Shapiro-Wilk		
	Nilai Sig. (p value)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
5	1,000	sig > α	Data terdistribusi normal
6	0,984	sig > α	Data terdistribusi normal
7	0,992	sig > α	Data terdistribusi normal

Berdasarkan hasil uji normalitas pada tabel 4.9, seluruh data dari variasi pH larutan terhadap efisiensi logam berat Pb memiliki nilai signifikansi lebih besar dari 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa data tersebut terdistribusi secara normal.

4.5.2 Uji Homogenitas

Uji homogenitas dilakukan untuk mengetahui apakah beberapa kelompok data memiliki varians yang sama atau relatif sebanding. Pengujian ini diperlukan sebelum One Way ANOVA karena ANOVA mensyaratkan kesamaan varians antar kelompok data. Zhou *et al.* (2023), menjelaskan bahwa homogenitas varians merupakan asumsi penting dalam pengujian parametrik, terutama ketika penelitian membandingkan rata-rata lebih dari dua kelompok. Hasil uji homogenitas dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Hasil Uji Homogenitas

Variasi	Nilai Sig. (p value)	$\alpha = 0,05$	Keterangan
Konsentrasi Awal Pb	0,279	$\text{sig} > \alpha$	Data homogen
Massa Adsorben	0,891	$\text{sig} > \alpha$	Data homogen
Waktu Kontak	0,627	$\text{sig} > \alpha$	Data homogen
pH Larutan	0,563	$\text{sig} > \alpha$	Data homogen

Tabel 4.10 menyajikan hasil uji homogenitas terhadap efisiensi removal logam berat Pb. Seluruh data menunjukkan nilai signifikansi lebih dari 0,05. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa data bersifat homogen dan memiliki kesamaan varians antar kelompok.

4.5.3 Uji One Way ANOVA

Uji One Way ANOVA (Analysis of Variance satu arah) merupakan metode statistik yang digunakan untuk menguji adanya perbedaan yang signifikan antara rata-rata lebih dari dua kelompok. Uji ini dilakukan ketika peneliti ingin mengetahui pengaruh satu variabel bebas terhadap satu variabel terikat, dengan jumlah kelompok yang dibandingkan lebih dari dua. Berikut merupakan hipotesis pada efisiensi removal logam berat Pb.

H_{0K} = Tidak ada pengaruh pemberian variasi konsentrasi logam Pb terhadap penurunan konsentrasi logam Pb

H_{1K} = Ada pengaruh pemberian variasi konsentrasi logam Pb terhadap penurunan konsentrasi logam Pb

H_{0M} = Tidak ada pengaruh pemberian variasi massa adsorben terhadap penurunan konsentrasi logam Pb

H_{1M} = Ada pengaruh pemberian variasi massa adsorben terhadap penurunan konsentrasi logam Pb

H_{0T} = Tidak ada pengaruh pemberian variasi waktu kontak terhadap penurunan konsentrasi logam Pb

H_{1T} = Ada pengaruh pemberian variasi waktu kontak terhadap penurunan konsentrasi logam Pb

H_{0P} = Tidak ada pengaruh pemberian variasi pH terhadap penurunan konsentrasi logam Pb

H_{1P} = Ada pengaruh pemberian variasi pH terhadap penurunan konsentrasi logam Pb

Berikut merupakan tabel hasil pengujian Annova One Way menggunakan software SPSS.

Tabel 4. 11 Hasil Uji One Way ANOVA

Variasi	Nilai Sig. (p value)	$\alpha = 0,05$	Keterangan
Konsentrasi Awal Pb	0,000	sig < α	H_1 diterima
Massa Adsorben	0,000	sig < α	H_1 diterima
Waktu Kontak	0,000	sig < α	H_1 diterima
pH Larutan	0,001	sig < α	H_1 diterima

Uji One Way ANOVA dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi awal Pb, massa adsorben, waktu kontak, dan pH larutan terhadap efisiensi removal logam berat Pb. Uji ini dilakukan setelah data memenuhi asumsi normalitas dan homogenitas. Berdasarkan hasil uji homogenitas, seluruh variasi memiliki nilai signifikansi lebih besar dari 0,05, sehingga data dinyatakan homogen dan dapat dilanjutkan ke uji One Way ANOVA.

Berdasarkan tabel 4.11, nilai signifikansi pada variasi konsentrasi awal Pb, massa adsorben, dan waktu kontak masing-masing sebesar 0,000, sedangkan variasi pH larutan memiliki nilai signifikansi sebesar 0,001. Seluruh nilai signifikansi tersebut lebih kecil dari $\alpha = 0,05$. Oleh karena itu, H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi konsentrasi awal Pb, massa adsorben, waktu kontak, dan pH larutan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi removal logam berat Pb oleh karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe_3O_4 .

Dengan demikian, hasil uji One Way ANOVA memperkuat bahwa perubahan kondisi operasi dalam proses adsorpsi menyebabkan perbedaan yang signifikan terhadap penurunan konsentrasi Pb. Namun, uji One Way ANOVA hanya menunjukkan adanya perbedaan signifikan antar variasi, bukan menentukan titik optimum secara langsung. Penentuan kondisi optimum tetap mengacu pada hasil efisiensi removal tertinggi pada masing-masing grafik variasi.

4.6 Mekanisme Adsorpsi

Mekanisme adsorpsi Pb^{2+} oleh karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe_3O_4 dianalisis berdasarkan integrasi hasil isoterm, kinetika adsorpsi, FTIR, dan SEM-EDX. Pendekatan terpadu tersebut digunakan untuk menjelaskan interaksi adsorbat pada permukaan, laju interaksi dengan situs aktif, serta perubahan karakteristik adsorben setelah proses adsorpsi. Hasil isoterm menunjukkan bahwa adsorpsi Pb pada karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe_3O_4 lebih sesuai mengikuti model Langmuir dengan nilai R^2 sebesar 0,99868, Q_{max} sebesar 1,32118 mg/g, dan KL sebesar 1,09664 L/mg. Kesesuaian terhadap model Langmuir mengindikasikan bahwa Pb^{2+} cenderung menempati situs aktif tertentu pada permukaan adsorben dan membentuk lapisan monolayer. Smagulova *et al.* (2025), menjelaskan bahwa model Langmuir menggambarkan adsorpsi pada permukaan dengan pusat aktif tertentu, energi adsorpsi relatif seragam, dan pembentukan lapisan tunggal. Pada penelitian tersebut, model Langmuir memberikan kesesuaian terbaik untuk adsorpsi Pb^{2+} pada AC dan us-AC/ Fe_3O_4 .

Hasil kinetika menunjukkan bahwa adsorpsi Pb lebih sesuai mengikuti model pseudo-orde dua dengan nilai R^2 sebesar 0,99860. Model ini mengindikasikan bahwa laju adsorpsi Pb dipengaruhi oleh interaksi antara Pb^{2+} dan situs aktif pada permukaan adsorben. Somyanonthanakun *et al.* (2023), melaporkan bahwa adsorpsi Pb pada karbon aktif termodifikasi mengikuti pseudo-second order dan mekanismenya berkaitan dengan pertukaran ion serta kompleksasi permukaan oleh gugus fungsi adsorben.

Adsorpsi Pb pada penelitian ini menunjukkan proses pengisian situs aktif permukaan oleh Pb^{2+} sampai membentuk lapisan monolayer, sesuai dengan hasil isoterm Langmuir dan kinetika pseudo-orde dua. Ion Pb^{2+} diperkirakan mengalami perpindahan dari fase larutan menuju permukaan adsorben, kemudian dapat memasuki struktur pori dan berinteraksi dengan gugus aktif pada karbon aktif serta Fe_3O_4 . Abdulqader dan Abbas (2023), menyatakan bahwa *intraparticle diffusion* berperan dalam penyerapan Pb oleh AC/ Fe_3O_4 . Chen *et al.* (2025), juga menjelaskan bahwa adsorpsi Pb pada adsorben termodifikasi Fe melibatkan

adsorpsi pada pori adsorben, interaksi dengan gugus fungsi permukaan, serta pembentukan ikatan antara Pb dan situs aktif adsorben.

Hasil FTIR memperkuat keterlibatan gugus fungsi dalam adsorpsi Pb^{2+} . Sebelum adsorpsi, adsorben menunjukkan puncak O-H pada $3348,06\text{ cm}^{-1}$, C=C pada $1574,76\text{ cm}^{-1}$, dan Fe-O pada $583,53\text{ cm}^{-1}$. Setelah adsorpsi, puncak O-H bergeser menjadi $3442,94\text{ cm}^{-1}$, muncul puncak C=O pada $1697,36\text{ cm}^{-1}$, dan puncak Fe-O bergeser menjadi $565,14\text{ cm}^{-1}$. Pergeseran puncak tersebut mengindikasikan adanya perubahan lingkungan kimia pada gugus fungsi setelah berinteraksi dengan Pb^{2+} . Joga Rao (2021), melaporkan bahwa pergeseran puncak O-H setelah adsorpsi Pb menunjukkan interaksi antara ion logam dengan gugus O-H, alkohol, fenol, dan karboksilat pada permukaan adsorben. Somyanonthanakun *et al.* (2023), juga menyatakan bahwa gugus hidroksil, karboksil, karbonil, dan ester pada karbon aktif termodifikasi berpengaruh terhadap adsorpsi Pb.

Perubahan persentase *transmittance* pada spektrum FTIR sebelum dan setelah adsorpsi menunjukkan perubahan intensitas serapan gugus fungsi setelah kontak dengan Pb^{2+} . Perubahan ini mengindikasikan bahwa jumlah, kekuatan, atau lingkungan ikatan pada gugus fungsi permukaan berubah setelah adsorpsi. Abdulqader dan Abbas (2023), melaporkan bahwa pada AC/ Fe_3O_4 terjadi perubahan *transmission* dan pergeseran posisi puncak setelah Pb menempel pada permukaan adsorben. Perubahan FTIR tersebut digunakan untuk mengonfirmasi kompleksasi Pb dengan gugus fungsi pada nanopartikel AC/ Fe_3O_4 . Dengan demikian, perubahan *transmittance* pada penelitian ini mendukung bahwa gugus O-H, C=O, C=C, dan Fe-O terlibat dalam pengikatan Pb^{2+} . Hasil SEM-EDX juga mendukung mekanisme tersebut. Morfologi adsorben yang berpori memungkinkan Pb^{2+} masuk ke permukaan dan pori adsorben. Setelah adsorpsi, unsur Pb terdeteksi sebesar 0,1 wt% mendukung keberadaan Pb pada permukaan adsorben setelah proses adsorpsi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai karbon aktif bonggol jagung termodifikasi magnetit Fe_3O_4 sebagai adsorben untuk menurunkan logam berat Pb, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Karbon aktif bonggol jagung berhasil dimodifikasi dengan magnetit Fe_3O_4 . Hal ini ditunjukkan oleh hasil FTIR yang memperlihatkan adanya ikatan Fe-O, serta hasil EDX yang menunjukkan keberadaan unsur Fe pada adsorben. Proses adsorpsi Pb juga berhasil terjadi, ditunjukkan oleh terdeteksinya unsur Pb sebesar 0,1 wt% pada hasil EDX setelah adsorpsi.
2. Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi konsentrasi awal Pb, massa adsorben, pH, dan waktu kontak berpengaruh terhadap kemampuan penyerapan Pb.
 - a. Pada variasi konsentrasi awal Pb, diperoleh efisiensi removal tertinggi pada konsentrasi 2 mg/L sebesar 86,29%..
 - b. Pada variasi massa adsorben, diperoleh efisiensi removal tertinggi pada massa 0,6 g sebesar 86,49%.
 - c. Pada variasi waktu kontak, efisiensi removal meningkat hingga waktu kontak 150 menit dengan nilai 95%.
 - d. Pada variasi pH, kondisi terbaik diperoleh pada pH 5 dengan efisiensi removal sebesar 94,93%.
3. Adsorpsi Pb lebih sesuai mengikuti model isoterm Langmuir dengan nilai R^2 sebesar 0,99868, Q_{max} sebesar 1,32118 mg/g, dan KL sebesar 1,09664 L/mg. Model kinetika yang paling sesuai adalah pseudo-orde dua dengan nilai R^2 sebesar 0,99860. Hasil ini menunjukkan bahwa adsorpsi Pb cenderung berlangsung pada situs aktif permukaan adsorben dan dipengaruhi oleh interaksi antara Pb^{2+} dengan gugus aktif pada karbon aktif bonggol jagung termodifikasi Fe_3O_4 .

5.2 Saran

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

1. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan karakterisasi tambahan menggunakan BET untuk mengetahui luas permukaan spesifik dan distribusi pori adsorben secara kuantitatif. Hal ini penting karena kemampuan adsorpsi karbon aktif sangat berkaitan dengan luas permukaan dan struktur pori.
2. Penelitian selanjutnya perlu melakukan uji VSM apabila sifat magnetik adsorben ingin dibuktikan secara kuantitatif. Pada penelitian ini, keberadaan Fe_3O_4 telah didukung oleh FTIR dan SEM-EDX, tetapi nilai magnetisasi adsorben masih perlu diuji agar kemampuan pemisahan magnetik dapat dinilai lebih kuat.
3. Penelitian berikutnya disarankan menggunakan limbah cair aktual yang mengandung Pb, bukan hanya limbah artifisial. Limbah aktual memiliki komposisi yang lebih kompleks, sehingga dapat menunjukkan kemampuan adsorben dalam kondisi yang lebih mendekati aplikasi lapangan.
4. Perlu dilakukan pengujian reuse atau penggunaan ulang adsorben untuk mengetahui stabilitas karbon aktif bonggol jagung termodifikasi Fe_3O_4 setelah beberapa siklus adsorpsi. Uji ini penting untuk menilai efisiensi adsorben dari sisi keberlanjutan dan potensi aplikasi praktis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullahi, M., Sati, S. Y., & Usman, A. H. (2020). *Removal Of Lead (Pb²⁺) Ions From Aqueous Solution By Adsorption Using Sugarcane Bagasse Activated Carbon Coated With Magnetic Nanoparticles*. 2(2), 1–9.
- Abdulqader, W. H., & Abbas, J. A. (2023). *Oak tree leaves activated carbon with magnetite nanoparticles for the removal of Pb(II) ions from aqueous solutions*. *Iranian Journal of Ichthyology*, 10(Special Issue 1), 219–237.
- Alam, M. M., Sultana, A., Sarker, M. R., Hossain, M. D., & Jabbar, M. A. (2024). *Removal of Lead Using Novel Composite Synthesized from Rice Husk and Used Tea Leaves Extract*. *Textile and Leather Review*, 7(June), 1118–1142. <https://doi.org/10.31881/TLR.2024.073>
- Ali Hussein Alhameedawi, F., Samadi-Maybodi, A., & Turki Khathi, M. (2025). *Synthesis and Characterization of AC@Fe₃O₄ Nanocomposite and its Application as an Efficient Adsorbent for Removal of Some Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions*. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 44(9), 2234–2246. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2025.2055552.7036>.
- Ali, I. H., Al Mesfer, M. K., Khan, M. I., Danish, M., & Alghamdi, M. M. (2019). *Exploring adsorption process of lead (II) and chromium (VI) ions from aqueous solutions on acid activated carbon prepared from Juniperus procera leaves*. *Processes*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/pr7040217>
- Aliyu, S. A., Salahudeen, N., & Rasheed, A. A. (2024). *Adsorptive Removal of Lead (II) Pollutants from Wastewater Using Corncob-Activated Carbon*. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, 11(2), H1–H10. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(2\).h1](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(2).h1)
- Aprilya MTA, A., Afifah SFA, N., Syawal, M., & Sari, R. A. (2024). *Pemanfaatan Limbah Tongkol Jagung (Zea mays) sebagai Sumber Energi Baru Terbarukan*. *Journal of Environment Behavior and Engineering*, 2 no (1)(1), 19–25. <https://journal.unibos.ac.id/jebe>
- Ayach, J., El Malti, W., Duma, L., Lalevée, J., Al Ajami, M., Hamad, H., & Hijazi,

- A. (2024). *Comparing Conventional and Advanced Approaches for Heavy Metal Removal in Wastewater Treatment: An In-Depth Review Emphasizing Filter-Based Strategies*. *Polymers*, 16(14). <https://doi.org/10.3390/polym16141959>
- Azanfire, B., Bulgariu, D., Nemeş, L., & Bulgariu, L. (2020). *Optimization of experimental parameters for retention of Pb(II) ions from aqueous solution on clay adsorbent*. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, 2(1), 38–47. <https://doi.org/10.47577/technium.v2i1.40>
- Benjedim, S., Romero-Cano, L. A., Hamad, H., Bailón-García, E., Slovák, V., Carrasco-Marín, F., & Pérez-Cadenas, A. F. (2021). *Synthesis of magnetic adsorbents based carbon highly efficient and stable for use in the removal of Pb(II) and Cd(II) in aqueous solution*. *Materials*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/ma14206134>
- Calvet, B., Vallejo, J., Plu, Y., Soulat, I., & Foucher, A. (2025). *Use of the Temperament and Character Inventory to describe the effectiveness of Gestalt therapy*. (September), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2025.1280954>
- Chen, J., Duan, Q., Liu, J., Zhang, S., Zhang, J., & Lin, S. (2025). *Adsorption of Fe-modified peanut shell biochar for Pb (II) in mixed Pb (II), Cu (II), Ni (II) solutions*. (Ii), 1–21.
- Chowdhury, T., Zhang, L., Zhang, J., & Aggrawal, S. (2021). *Materials Advances an aluminum-based metal organic*. 2, 3051–3059. <https://doi.org/10.1039/d1ma00046b>
- Collin, M. S., Kumar, S., Vijayakumar, N., Kanimozhi, V., Arbaaz, S. M., Stacey, R. G. S., Anusha, J., Choudhary, R., Lvov, V., Ibrahim, G., Senatov, F., Koppala, S., & Swamiappan, S. (2022). *Journal of Hazardous Materials Advances Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human : A review*. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7(March), 100094. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100094>
- Danat, B. T., Wuana, R. A., Chahul, H. F., & Lorungwa, M. S. (2022). *Review of adsorption isotherms models*. *Acta Technica Corviniensis*, 14(4), 87–96. <https://www.researchgate.net/publication/358271705>
- Dirgayanti, D. S., Koesnarpadi, S., & Hindryawati, N. (2021). *Synthesis and*

- characterization of Fe_3O_4 -Activated carbon and it's application to adsorb methylene blue. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 623(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/623/1/012070>
- Ehiomogue, P., Ahuchaogu, I. I., & Ahaneku, I. E. (2022). Review of adsorption isotherms models. *Acta Technica Corviniensis*, 14(4), 87–96. <https://www.researchgate.net/publication/358271705>
- El-Sheetta, M. A., Goher, M. E., Abd El-Moghny, M. G., & El-Deab, M. S. (2022). Efficient elimination of Pb(II) ions from aqueous solutions using magnetic Fe_3O_4 -nanoparticles/activated carbon derived from agricultural waste. *Desalination and Water Treatment*, 258, 241–260. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28365>
- Engineering, B. (2016). Addis Ababa Institute of Technology School of Chemical and Bio Engineering Removal of Lead From Waste Water Using Corn Cob Activated Carbon As an Adsorbent.
- Esmaeili, A., & Eslami, H. (2020). Adsorption of Pb (II) and Zn (II) ions from aqueous solutions by Red Earth. *MethodsX*, 7, 100804. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100804>
- Feng, P., Li, J., Wang, H., & Xu, Z. (2020). Biomass-based activated carbon and activators: Preparation of activated carbon from corncob by chemical activation with biomass pyrolysis liquids. *ACS Omega*, 5(37), 24064–24072. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03494>
- Fiqriansyah, M., Putri, S. A., Syam, R., & Rahmadhani, S. (2021). Teknologi Budidaya Tanaman Jagung (*Zea mays*) dan Sorgum (*Sorghum bicolor* (L.)Moench). Makassar: Penerbit Jurusan Biologi FMIPA UNM.
- Futalan, C. C., Diana, E., Edang, M. F. A., Padilla, J. M., Cenia, M. C., & Alfeche, D. M. (2023). Adsorption of Lead from Aqueous Solution Using Activated Carbon Derived from Rice Husk Modified with Lemon Juice. *Sustainability (Switzerland)*, 15(22), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su152215955>
- Gandam, P. K., Chinta, M. L., Gandham, A. P., Pabbathi, N. P. P., Konakanchi, S., Bhavanam, A., Atchuta, S. R., Baadhe, R. R., & Bhatia, R. K. (2022). A New Insight into the Composition and Physical Characteristics of Corncob—Substantiating Its Potential for Tailored Biorefinery Objectives.

- Fermentation*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/fermentation8120704>
- Ganing, M., Syafaatullah, A. Q., Yusuf, A. A. I. S., Junianti, F., & Suleman, A. I. (2023). Pemanfaatan Arang Aktif Dari Tongkol Jagung Sebagai Adsorben Ion Pb^{2+} . 2, 65–70.
- Guel-Nájar, N. A., Rios-Hurtado, J. C., Muzquiz-Ramos, E. M., Dávila-Pulido, G. I., González-Ibarra, A. A., & Pat-Espadas, A. M. (2023). *Magnetic Biochar Obtained by Chemical Coprecipitation and Pyrolysis of Corn Cob Residues: Characterization and Methylene Blue Adsorption*. *Materials*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/ma16083127>
- Habibzadeh, F. (2024). *Data Distribution : Normal or Abnormal ? J Korean Med Sci*. 39(3), 1–8. <https://doi.org/10.3346/jkms.2024.39.e35>
- Haslina, H., Nazir, N., & Sampurnoa, A. (2021). *Different Drying Duration of Corncobs Powders and Its Effects on Physical, Nutritional and Phytochemical*. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 11(3), 1232–1238. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.3.15321>
- Hendriatiningsih, S. L. (2025). Aplikasi Sintesis Adsorben Schiff Base Magnetik Kitosan-Salisilalaldehid/Silika/Besi Oksida untuk Dekolorisasi Zat Warna *Methylene Blue*. [Tugas Akhir, Program Studi Teknik Pengolahan Limbah, PPNS].
- Huang, Y., Tang, Y., Xie, Z., Wu, J., Huang, J., & Nie, S. (2025). *Degradation of Low-Molecular-Weight Diesel Fractions (C10–C16 Alkane) Drives Cd Stabilization and Pb Activation in Calcareous Soils from Karst Areas*. *Toxics*, 13(6), 1–19. <https://doi.org/10.3390/toxics13060496>
- Irawan, N. I., Afifah, R., Nadira, A., & Suparno, S. (2025). Optimalisasi Karbon Aktif Berbasis Bonggol Jagung untuk Pengelolaan Limbah Logam Berat Pb dan Mn. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(4), 1029–1036. <https://doi.org/10.14710/jil.23.4.1029-1036>
- Januszewicz, K., Kazimierski, P., Cymann-Sachajdak, A., Hercel, P., Barczak, B., Wilamowska-Zawłocka, M., Kardaś, D., & Łuczak, J. (2023). *Conversion of waste biomass to designed and tailored activated chars with valuable properties for adsorption and electrochemical applications*. *Environmental*

- Science and Pollution Research*, 30(43), 96977–96992.
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-28824-y>
- Joga Rao, H. (2021). *Characterization studies on adsorption of lead and cadmium using activated carbon prepared from waste tyres*. *Nature Environment and Pollution Technology*, 20(2), 561–568. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2021.v20i02.012>
- Kamila, N., Asmara, A. P., Nuzlia, C., Ar-raniry, U. I. N., Aceh, B., Fisheries, F., Science, M., & Kuala, U. S. (2024). *Optimisation Of Sulfuric Acid Concentration For Fe^{2+} Ion*. 5(1), 10–18. <https://doi.org/10.22373/ljee.v3i1.>
- Khashan, M. H., & Mohammad, A. K. (2022). *Comparative study for Pb^{2+} adsorption from simulated wastewater of battery manufacture on activated carbon prepared from rice husk with different activation agents*. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, 15(3), 147–155.
<https://doi.org/10.30772/qjes.v15i3.827>
- Kumar, A., Kumar, A., Cabral-Pinto, M., Chaturvedi, A. K., Shabnam, A. A., Subrahmanyam, G., Mondal, R., Gupta, D. K., Malyan, S. K., Kumar, S. S., Khan, S. A., & Yadav, K. K. (2020). *Lead toxicity: Health hazards, influence on food Chain, and sustainable remediation approaches*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7).
<https://doi.org/10.3390/ijerph17072179>
- Kusdarini, E., Kusuma, M. N., Budianto, A., Atiyatussa'adah, E., & Garino, E. A. (2025). *Modification of activated carbon from processed salak fruit waste with Fe_3O_4 composite for removal of $Pb(II)$ in wastewater*. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 26(1), 305–315.
<https://doi.org/10.12912/27197050/196040>
- Lelifajri, L., Salsabila, S., & Suhud, K. (2023). *Analysis of Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Oyster *Crassostrea gigas* and *Saccostrea cucullata* using Atomic Absorption and Ultraviolet-Visible Spectrophotometer Methods*. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 8(2), 55–62.
<https://doi.org/10.24845/ijfac.v8.i2.55>
- Lestari, I., Yohana, A. V., Farid, F., & Gusti, D. R. (2022). *Preparation and Characterisation of Composite Magnetite Fe_3O_4 -Activated Carbon as*

- Adsorben of Phenol. Jurnal Riset Kimia*, 13(1), 34–48.
<https://doi.org/10.25077/jrk.v13i1.442>
- Meriatna, Leni., Maulinda., Munawar, Khalil., dan Z. (2021). Jurnal Teknologi Kimia Unimal. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 2(November), 85–100.
<http://ejournalmapeki.org/index.php/JITKT/article/view/444>
- Nagar, R., & Ghaziabad. (2022). Guidance Document. *General Calculation in Indian Pharmacopoeia*, (September), 1–136.
- Oladimeji, T. E., Oyedemi, M., Emetere, M. E., Agboola, O., Adeoye, J. B., & Odunlami, O. A. (2024). *Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal technologies*. *Heliyon*, 10(23), e40370.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40370>
- Onyenanu, C. N., & Onyenanu, I. U. (2025). *Advanced Treatment Technologies for Heavy Metal Removal from Water and Wastewater: A Comprehensive Review*. *International Journal of Applied and Natural Sciences*, 3(2), 111–131. <https://doi.org/10.61424/ijans.v3i2.345>
- Pam, A. A., Hir, Z. A. M., Abdullah, A. H., & Tan, Y. P. (2021). *Pb(II) Removal in Water Via Adsorption Onto Deep Eutectic Solvent Fabricated Activated Carbon*. *Applied Water Science*, 11(6), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01420-6>
- Putri, D. R., Khoirunnisa, S., & Widiyanto, A. (2023). Peningkatan Keterampilan Warga Desa Purwojiwo dalam Pembuatan Bahan Bakar Briket Sebagai Upaya Pemanfaatan Limbah Pertanian Bonggol Jagung. *Jurnal Bina Desa*, 5(1), 119–123. <https://doi.org/10.15294/jbd.v5i1.41496>
- Qasem, N. A. A., Mohammed, R. H., & Lawal, D. U. (2021). *Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater: a Comprehensive and Critical Review*. *Npj Clean Water*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
- Riski, F., Said, I., Afadil, A., & Ningsih, P. (2023). *Activation of Durian Skin Biomass with H₂SO₄ Activator on the Absorption of Lead from its Solution*. *Jurnal Akademika Kimia*, 12(1), 44–51. <https://doi.org/10.22487/j24775185.2023.v12.i1.pp44-51>
- Salindra, B. P., Ningrum, P. T., & Ariyanto, Y. (2022). *Analysis Of Lead Content (Pb) In Waste Streams And Well Water And Public Health Complaints Around*

- The Paper Industry In Bondowoso. Biolink (Jurnal Biologi Lingkungan Industri Kesehatan), 8(2), 171–179. <https://doi.org/10.31289/biolink.v8i2.5619>*
- Siddiqi, M. N., Ahmad, K., & Almayuf, O. (2023). *Lead and its Effect on Humans: A Mini-Review. Article in International Journal of Innovative Science and Research Technology, 8(7), 8–13. www.ijisrt.com*
- Singh, R., & Bhateria, R. (2020). *Optimization and Experimental Design of The Pb²⁺ Adsorption Process On a Nano-Fe₃O₄-Based Adsorbent using The Response Surface Methodology. ACS Omega, 5(43), 28305–28318. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04284>*
- Singh, V., Pant, N., Sharma, R. K., Padalia, D., Rawat, P. S., Goswami, R., Singh, P., Kumar, A., Bhandari, P., Tabish, A., & Deifalla, A. M. (2023). *Adsorption Studies of Pb(II) and Cd(II) Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions Using a Magnetic Biochar Composite Material. Separations, 10(7). <https://doi.org/10.3390/separations10070389>*
- Smagulova, G., Imash, A., Baltabay, A., Keneshbekova, A., Abdisattar, A., Kazhdanbekov, R., Lesbayev, A., & Mansurov, Z. (2025). *Mechanistic Evaluation of Pb(II) Adsorption on Magnetic Activated Carbon/Fe₃O₄ Composites: Influence of Hydrothermal and Ultrasonic Synthesis Routes. C, 11(4), 83. <https://doi.org/10.3390/c11040083>*
- Somyanonthanakun, W., Ahmed, R., Krongtong, V., & Thongmee, S. (2023). *Studies on The Adsorption of Pb(II) from Aqueous Solutions Using Sugarcane Bagasse-Based Modified Activated Carbon with Nitric Acid: Kinetic, Isotherm and Desorption. Chemical Physics Impact, 6(December 2022), 100181. <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2023.100181>*
- Sugumar, M., Bharathi, S., Sampath, V., Sundramurthy, V. P., Selvaraju, M., Kadaikunnan, S., & Khaled, J. M. (2024). *Biosorption of Pb(II) Ions Through Nanostructured Teff Straw Based Magnetized Activated Biocarbon: Aspects on Modeling, Optimization, and Kinetics. Global Nest Journal, 26(9). <https://doi.org/10.30955/GNJ.06479>*
- Suherman, M., Hidayanti, N. S., Utami, L. N., Firdaus, F. R., & Rabbani, M. H. A. (2021). *Pemanfaatan Olahan Limbah Bonggol Jagung Sebagai Salah Satu*

- Solusi Peningkatan Perekonomian di Desa Tambaksari. 32(3), 167–186.
- Sulaiman, F., Adawiyah, Y. Al, Santoso, M. I., Meutia, Afifah, & Maryani, Y. (2022). *Proceedings of the 2nd International Conference for Smart Agriculture, Food, and Environment* (ICSAFE 2021). In *Proceedings of the 2nd International Conference for Smart Agriculture, Food, and Environment* (ICSAFE 2021) (Vol. 1). Atlantis Press International BV. <https://doi.org/10.2991/978-94-6463-090-9>
- Suwazan, D., & Nurhidayanti, N. (2022). Efektivitas Kombinasi Kitosan dan Ampas Teh Sebagai Adsorben Alami dalam Menurunkan Konsentrasi Timbal Pada Limbah Cair PT PXI. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(1), 37–44. <https://doi.org/10.14710/jil.20.1.37-44>
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortíz, A., & González-Delgado, Á. D. (2023). *High-Efficiency Removal of Lead and Nickel Using Four Inert Dry Biomasses: Insights into the Adsorption Mechanisms*. *Materials*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/ma16134884>
- Thohir, M. B., & Wijaya, T. E. P. (2024). *Characterization of Activated Charcoal Produced Using Green Chemistry Principle Approach Number 7. Hydrogen*: *Jurnal Kependidikan Kimia*, 12(3), 440. <https://doi.org/10.33394/hjkk.v12i3.11834>
- Tichem, T. M., Wang, Y., Gameli, R. B. H., Mbage, B., & Li, B. (2023). *Multicomponent Adsorption of Pollutants from Wastewater Using Low-Cost Eco-Friendly Iron-Modified Rice Husk Biochar in the Era of Green Chemistry. Sustainability* (Switzerland), 15(23). <https://doi.org/10.3390/su152316348>
- Tindle, C., Fonseca, A. G., Taheri, S., Sahoo, D., Tindle, C., Fonseca, A. G., Taheri, S., Katkar, G. D., Lee, J., & Maity, P. (2024). *Article A Living Organoid Biobank of Patients with Crohn ' S Disease Reveals Molecular Subtypes for Personalized Therapeutics Ll. Cell Reports Medicine*, 5(10), 101748. <https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2024.101748>
- Udyani, K., Purwaningsih, D. Y., Radityaningrum, A. D., Diaz, A., & Suparto. (2025). *Preparation of Magnetic Activated Carbon Based on Breadfruit (Artocarpus altilis) Peel Waste by Impregnation Method for Lead Absorption in Wastewater. Ecological Engineering and Environmental Technology*,

26(3), 87–94. <https://doi.org/10.12912/27197050/199580>

- Weyrich, J. N., Mason, J. R., Bazilevskaya, E. A., & Yang, H. (2023). *Understanding the Mechanism for Adsorption of Pb(II) Ions by Cu-BTC Metal–Organic Frameworks*. *Molecules*, 28(14). <https://doi.org/10.3390/molecules28145443>
- Zhang, X., Li, Y., He, Y., Kong, D., Klein, B., Yin, S., & Zhao, H. (2022a). *Co-Pyrolysis Characteristics of Lignite and Biomass and Efficient Adsorption of Magnetic Activated Carbon Prepared by Co-Pyrolysis Char Activation and Modification for Coking Wastewater*. *Fuel*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124816>
- Zhang, X., Li, Y., He, Y., Kong, D., Klein, B., Yin, S., & Zhao, H. (2022). *Preparation of Magnetic Activated Carbon by Activation and Modification of Char Derived from Co-Pyrolysis of Lignite and Biomass and Its Adsorption of Heavy-Metal-Containing Wastewater*. *Fuel*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124816>
- Zhou, Y., Zhu, Y., & Wong, W. K. (2023). *Statistical Tests for Homogeneity of Variance for Clinical Trials and Recommendations*. *Contemporary Clinical Trials Communications*, 33(September 2022), 101119. <https://doi.org/10.1016/j.conctc.2023.101119>

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN KEBUTUHAN BAHAN KIMIA

Halaman ini sengaja dikosongkan

A.1 Aktivasi Kimia Karbon Aktif Bonggol Jagung (Kebutuhan H₂SO₄)

$$\begin{aligned}\text{Konsentrasi H}_2\text{SO}_4 \text{ (yang dibutuhkan)} &= 3 \text{ M} \\ \text{Volume H}_2\text{SO}_4 &= 1.000 \text{ mL} \\ \text{Konsentrasi H}_2\text{SO}_4 &= 96 \% \\ \rho \text{ H}_2\text{SO}_4 &= 1,84 \text{ g/mL} \\ \text{Mr H}_2\text{SO}_4 &= 98 \text{ g/mol} \\ \text{Konsentrasi H}_2\text{SO}_4 &= \frac{10 \times \rho \times \% \text{H}_2\text{SO}_4}{\text{Mr}} \\ &= \frac{10 \times 1,84 \times 96\%}{98} \\ &= 18,02 \text{ M} \\ \text{Volume H}_2\text{SO}_4 &= M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2 \\ &= \frac{3 \text{ M} \times 1000 \text{ mL}}{18,02} \\ &= 166,48 \text{ mL}\end{aligned}$$

A.2 Netralisasi Karbon Aktif (Kebutuhan NaOH 2 M)

$$\begin{aligned}\text{Konsentrasi NaOH (yang dibutuhkan)} &= 2 \text{ M} \\ \text{Konsentrasi NaOH} &= 99,99 \% \\ \text{Mr NaOH} &= 40 \text{ g/mol} \\ \text{Volume NaOH} &= 100 \text{ mL} = 0,1 \text{ L} \\ n &= M \times V \\ &= 2 \times 0,1 \\ &= 0,2 \text{ mol} \\ \text{massa NaOH} &= n \times \text{Mr} \\ &= 0,2 \times 40 \\ &= 8 \text{ gram}\end{aligned}$$

A.3 Pembuatan Karbon Aktif Termodifikasi Magnetit

A. Kebutuhan garam Fe³⁺

$$\begin{aligned}\text{Konsentrasi FeCl}_3 &= 0,028 \text{ M} \\ \text{Volume larutan} &= 250 \text{ mL} = 0,25 \text{ L} \\ \text{Mol FeCl}_3 &= M \times V \\ &= 0,028 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 0,25 \text{ L}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,007 \quad \text{mol} \\
 \text{Ar Fe} &= 56 \quad \text{g/mol} \\
 \text{Ar Cl} &= 35,5 \quad \text{g/mol} \\
 \text{Ar H} &= 1 \quad \text{g/mol} \\
 \text{Ar O} &= 16 \quad \text{g/mol} \\
 \text{Mr FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= 270,5 \quad \text{g/mol} \\
 \text{Massa} &= n \times \text{Mr} \\
 &= 0,007 \text{ mol} \times 270,5 \text{ g/mol} \\
 &= 1,89 \text{ gram} \qquad \qquad \qquad = 1,9 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

B. Kebutuhan garam Fe^{2+}

$$\begin{aligned}
 \text{Konsentrasi FeSO}_4 &= 0,014 \text{ M} \\
 \text{Volume larutan} &= 250 \text{ mL} = 0,25 \text{ L} \\
 \text{Mol FeSO}_4 &= M \times V \\
 &= 0,014 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 0,25 \text{ L} \\
 &= 0,0035 \quad \text{mol} \\
 \text{Ar Fe} &= 56 \quad \text{g/mol} \\
 \text{Ar A} &= 32 \quad \text{g/mol} \\
 \text{Ar H} &= 1 \quad \text{g/mol} \\
 \text{Ar O} &= 16 \quad \text{g/mol} \\
 \text{Mr FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= 278 \quad \text{g/mol} \\
 \text{Massa} &= n \times \text{Mr} \\
 &= 0,0035 \text{ mol} \times 270,5 \text{ g/mol} \\
 &= 0,97 \text{ gram} \qquad \qquad \qquad = 1 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

C. Kebutuhan NaOH 5 M

$$\begin{aligned}
 \text{Konsentrasi NaOH (yang dibutuhkan)} &= 5 \quad \text{M} \\
 \text{Konsentrasi NaOH} &= 99,99 \quad \% \\
 \text{Mr NaOH} &= 40 \quad \text{g/mol} \\
 \text{Volume NaOH} &= 100 \quad \text{mL} = 0,1 \text{ L} \\
 n &= M \times V \\
 &= 4 \times 0,1 \\
 &= 0,4 \quad \text{mol} \\
 \text{massa NaOH} &= n \times \text{Mr} \\
 &= 0,4 \times 40 \\
 &= 16 \quad \text{gram}
 \end{aligned}$$

A.4 Pembuatan Sampel Pb

A. Pembuatan larutan induk Pb 100 mg/L

$$\text{Ar Pb} = 207,2$$

$$\begin{aligned}
 \text{Mr Pb(NO}_3)_2 &= 331,2 \\
 \text{Konsentrasi yang diinginkan} &= 100 \text{ mg/L} \\
 \frac{\text{Ar Pb}}{\text{Mr Pb(NO}_3)_2} &= \frac{100}{x} \\
 \frac{207,2}{331,2} &= \frac{100}{x} \\
 207,2 \times x &= 33120 \\
 x &= 159,84 \text{ mg/L} \\
 &= 0,1598 \text{ g/L} \\
 &= 0,16 \text{ g/L}
 \end{aligned}$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN B

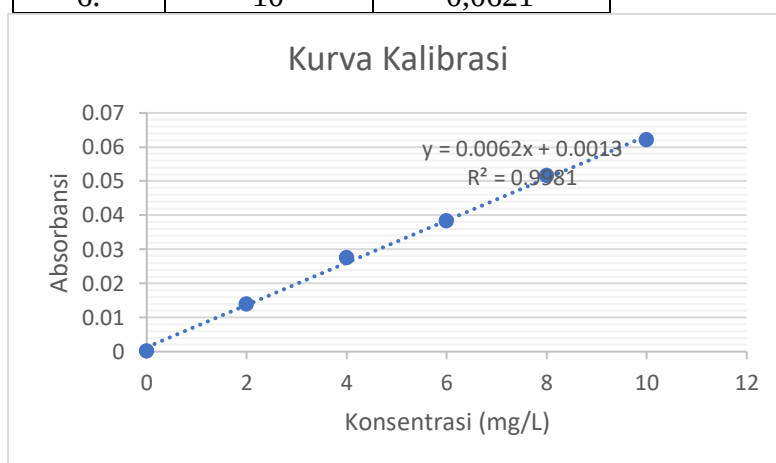
PERHITUNGAN DAN HASIL PENGUJIAN ADSORPSI

Halaman ini sengaja dikosongkan

B.1 Absorbansi Kurva Kalibrasi Variasi Konsentrasi Awal Pb

Sumbu x = konsentrasi
Sumbu y = absorbansi

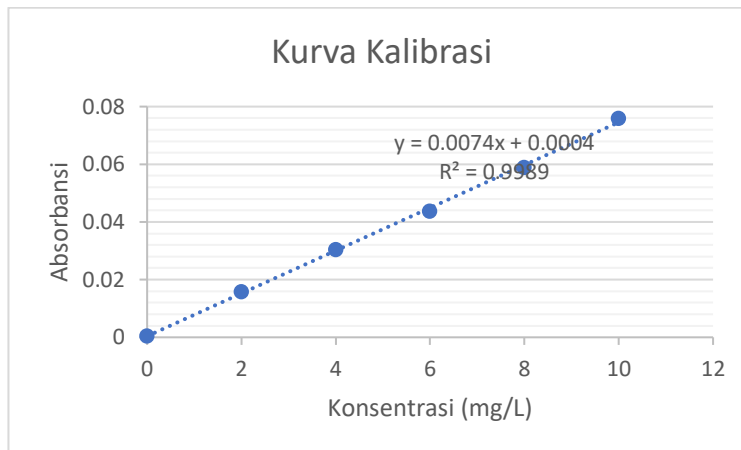
No.	X (mg/l)	Y
1.	0	0,0002
2.	2	0,0139
3.	4	0,0275
4.	6	0,0383
5.	8	0,0516
6.	10	0,0621



B.2 Absorbansi Kurva Kalibrasi Variasi Massa Adsorben

Sumbu x = konsentrasi
Sumbu y = absorbansi

No.	X (mg/l)	Y
1.	0	0,0004
2.	2	0,0158
3.	4	0,0304
4.	6	0,0437
5.	8	0,0588
6.	10	0,0758

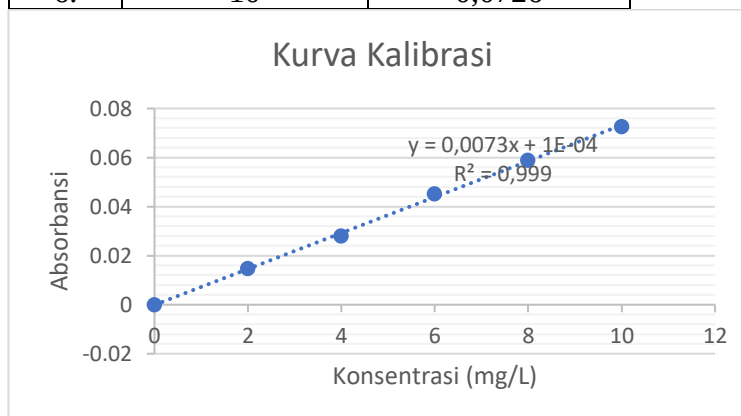


B.3 Absorbansi Kurva Kalibrasi Variasi Waktu Kontak

Sumbu x = konsentrasi

Sumbu y = absorbansi

No.	X (mg/l)	Y
1.	0	0
2.	2	0,0146
3.	4	0,0280
4.	6	0,0452
5.	8	0,0589
6.	10	0,0726

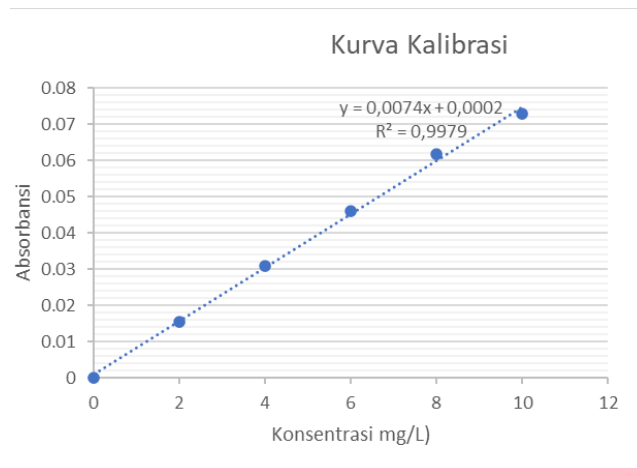


B.4 Absorbansi Kurva Kalibrasi Variasi pH Larutan

Sumbu x = konsentrasi

Sumbu y = absorbansi

No.	X (mg/l)	Y
1.	0	0,0002
2.	2	0,0156
3.	4	0,0308
4.	6	0,0461
5.	8	0,0617
6.	10	0,0728



B.5 Kode Sampel

Variasi Konsentrasi Pb

Jenis Adsorben	Massa Adsorben	Waktu Kontak	pH	Konsentrasi Logam Berat Pb (mg/L)	Simbol
Karbon Aktif Bonggol Jagung Termodifikasi Magnetit Fe ₃ O ₄	0,6 g	60 menit	7	2	K1 a
				2	K1 b
				4	K2 a
				4	K2 b
				6	K3 a
				6	K3 b
				8	K4 a
				8	K4 b
				10	K5 a
				10	K5 b

Variasi Massa Adsorben

Jenis Adsorben	Konsentrasi Pb	Waktu Kontak	pH	Massa Adsorben (g/50 mL)	Simbol
Karbon Aktif Bonggol Jagung Termodifikasi Magnetit Fe ₃ O ₄	2 mg/L	60 menit	7	0,4	M1 a
				0,4	M1 b
				0,5	M2 a
				0,5	M2 b
				0,6	M3 a
				0,6	M3 b

Variasi Waktu Kontak

Jenis Adsorben	Konsentrasi Pb	Massa Adsorben	pH	Waktu Kontak (Menit)	Simbol
Karbon Aktif Bonggol Jagung Termodifikasi Magnetit Fe ₃ O ₄	2 mg/L	0,6 gram	7	60	T1 a
				60	T1 b
				90	T2 a
				90	T2 b
				120	T3 a
				120	T3 b
				150	T4 a
				150	T4 b
				180	T5 a
				180	T5 b
				210	T6 a
				210	T6 b

Variasi pH Larutan

Jenis Adsorben	Konsentrasi Pb	Massa Adsorben	Waktu Kontak	pH	Simbol
Karbon Aktif Bonggol Jagung Termodifikasi Magnetit Fe ₃ O ₄	2 mg/L	0,6 gram	120 menit	5	P1 a
				5	P1 b
				6	P2 a
				6	P2 b
				7	P3 a
				7	P3 b

B.6 Perhitungan Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi

Varia si	Sam pel	Kode Sampel	Concen tration (mg/L)	Mean Absorp tion	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
Konsen trasi Awal Pb	2 mg/L	K1 a	0,29	0,0031	85,48	0,28
		K1 b	0,26	0,0029	87,10	0,29
	Rata -rata		0,27	0,0030	86,29	0,29
	4 mg/L	K2 a	0,56	0,0048	85,89	0,57
		K2 b	0,7	0,0056	82,66	0,55
	Rata -rata		0,63	0,0052	84,27	0,56
	6 mg/L	K3 a	1,31	0,0094	78,23	0,78
		K3 b	1,3	0,0093	78,49	0,78
	Rata -rata		1,30	0,0094	78,36	0,78
	8 mg/L	K4 a	2,24	0,0152	71,98	0,96
		K4 b	2,37	0,0160	70,36	0,94
	Rata -rata		2,31	0,0156	71,17	0,95
	10 mg/L	K5 a	3,69	0,0242	63,06	1,05
		K5 b	3,66	0,0240	63,39	1,06
	Rata -rata		3,68	0,0241	63,23	1,05
Massa Adsor ben	0,4 gram	M1 a	0,58	0,0047	70,95	0,35
		M1 b	0,54	0,0044	72,97	0,36
	Rata -rata		0,56	0,0046	71,96	0,36
	0,5 gram	M2 a	0,31	0,0027	84,46	0,34
		M2 b	0,35	0,0030	82,43	0,33
	Rata -rata		0,33	0,0029	83,45	0,33
	0,6 gram	M3 a	0,297	0,0026	85,14	0,28
		M3 b	0,24	0,0022	87,84	0,29
	Rata -rata		0,27	0,0024	86,49	0,29
Waktu Kontak	60 menit	T1 a	0,29	0,0021	85,62	0,29
		T1 b	0,30	0,0022	84,93	0,28
	Rata -rata		0,29	0,0022	85,27	0,28
	90 menit	T2 a	0,21	0,0015	89,73	0,30
		T2 b	0,22	0,0016	89,04	0,30
	Rata -rata		0,21	0,0016	89,38	0,30
	120 menit	T3 a	0,12	0,0009	93,84	0,31
		T3 b	0,10	0,0007	95,21	0,32
	Rata -rata		0,11	0,0008	94,52	0,315
	150 menit	T4 a	0,09	0,0006	95,68	0,32
		T4 b	0,11	0,0008	94,32	0,31
	Rata – rata		0,10	0,0007	95,00	0,317

Varia si	Sam pel	Kode Sampel	Concen tration (mg/L)	Mean Absorp tion	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
Waktu Kontak	180 menit	T5 a	0,12	0,0009	94,00	0,31
		T5 b	0,11	0,0008	94,32	0,31
	Rata – rata		0,12	0,0009	94,16	0,31
	210 menit	T6 a	0,13	0,0010	93,50	0,31
		T6 b	0,11	0,0008	94,50	0,32
	Rata - rata		0,12	0,0009	94,00	0,31
pH Laru tan	pH 5	P1 a	0,09	0,0009	95,27	0,32
		P1 b	0,11	0,0010	94,59	0,32
	Rata -rata		0,10	0,0010	94,93	0,32
	pH 6	P2 a	0,14	0,0012	93,24	0,31
		P2 b	0,15	0,0013	92,57	0,31
	Rata -rata		0,14	0,0013	92,91	0,31
	pH 7	P3 a	0,18	0,0015	91,22	0,30
		P3 b	0,15	0,0013	92,57	0,31
	Rata -rata		0,16	0,0014	91,89	0,306

LAMPIRAN C

PERHITUNGAN ISOTERM DAN KINETIKA ADSORPSI

Halaman ini sengaja dikosongkan

C.1 Perhitungan Isoterm Langmuir

(Co) Konsentrasi Awal (ppm)	(Ce) Konsentrasi Terakhir	(Co-Ce) Konsentrasi Terserap (ppm)	Volume (liter)	Massa Adsorben (gram)	(Q) Kapasitas Terserap (m.gr/gr)	Ce	Ce/qe
2	0.27	1.73	0.1	0.6	0.29	0.27	0.95
4	0.63	3.37			0.56	0.63	1.12
6	1.30	4.70			0.78	1.30	1.66
8	2.31	5.69			0.95	2.31	2.43
10	3.68	6.32			1.05	3.68	3.49

C.2 Perhitungan Isoterm Freundlich

(Co) Konsentrasi Awal (ppm)	(Ce) Konsentrasi Terakhir	(Co-Ce) Konsentrasi Terserap (ppm)	Volume (liter)	Massa Adsorben (gram)	(Q) Kapasitas Terserap (m.gr/gr)	In Ce	In qe
2	0.27	1.73	0.1	0.6	0.29	-1.29	-1.25
4	0.63	3.37			0.56	-0.46	-0.58
6	1.30	4.70			0.78	0.26	-0.24
8	2.31	5.69			0.95	0.84	-0.05
10	3.68	6.32			1.05	1.30	0.05

C.3 Perhitungan Kinetika Adsorpsi

Waktu (menit)	Konsentrasi Awal (mg/L)	Volume Larutan (L)	Massa Adsorben (gram)	Konsentrasi Ct (mg/L)	Ce	qt (mg/g)	qe (mg/g)	qe - qt	ln(qe - qt)	t/qt
60	2	0.1	0.6	0.29	0.10	0.284	0.32	0.03	-3.429	211.08
90	2			0.21		0.298	0.32	0.02	-3.978	302.07
120	2			0.11		0.315	0.32	0.00	-6.439	380.87
150	2			0.10		0.317	0.32	0.00	#NUM!	473.68
180	2			0.12		0.314	0.32	0.00	-5.875	573.51
210	2			0.12		0.313	0.32	0.00	-5.704	670.21

LAMPIRAN D
UJI STATISTIK

Halaman ini sengaja dikosongkan

D.1 Uji Normalitas

1) Variasi Konsentrasi Awal Pb

Tests of Normality							
	Konsentrasi_awal_Pb	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Efisiensi_removal	2	.175	3	.	1.000	3	1.000
	4	.175	3	.	1.000	3	.997
	6	.175	3	.	1.000	3	1.000
	8	.175	3	.	1.000	3	1.000
	10	.177	3	.	1.000	3	.967

2) Variasi Massa Adsorben

Tests of Normality							
	Massa_adsorben	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Efisiensi_removal	.4	.175	3	.	1.000	3	1.000
	.5	.175	3	.	1.000	3	.995
	.6	.175	3	.	1.000	3	1.000

a. Lilliefors Significance Correction

3) Variasi Waktu Kontak

Tests of Normality							
	Waktu_kontak	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Efisiensi_removal	60	.176	3	.	1.000	3	.984
	90	.176	3	.	1.000	3	.984
	120	.175	3	.	1.000	3	.992
	150	.175	3	.	1.000	3	1.000
	180	.175	3	.	1.000	3	1.000
	210	.175	3	.	1.000	3	1.000

a. Lilliefors Significance Correction

4) Variasi pH Larutan

Tests of Normality							
	pH_larutan	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Efisiensi_removal	5	.175	3	.	1.000	3	1.000
	6	.176	3	.	1.000	3	.984
	7	.175	3	.	1.000	3	.992

a. Lilliefors Significance Correction

D.2 Uji Homogenitas

1) Variasi Konsentrasi Awal Pb

Test of Homogeneity of Variances

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Efisiensi_removal	Based on Mean	1.864	4	10	.193
	Based on Median	1.857	4	10	.195
	Based on Median and with adjusted df	1.857	4	4.101	.279
	Based on trimmed mean	1.864	4	10	.194

2) Variasi Massa Adsorben

Test of Homogeneity of Variances

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Efisiensi_removal	Based on Mean	.117	2	6	.891
	Based on Median	.118	2	6	.891
	Based on Median and with adjusted df	.118	2	5.531	.891
	Based on trimmed mean	.117	2	6	.891

3) Variasi Waktu Kontak

Test of Homogeneity of Variances

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Efisiensi_removal	Based on Mean	.725	5	12	.618
	Based on Median	.720	5	12	.621
	Based on Median and with adjusted df	.720	5	7.951	.627
	Based on trimmed mean	.724	5	12	.618

4) Variasi pH Larutan

Test of Homogeneity of Variances

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Efisiensi_removal	Based on Mean	.677	2	6	.543
	Based on Median	.667	2	6	.548
	Based on Median and with adjusted df	.667	2	4.000	.563
	Based on trimmed mean	.676	2	6	.544

D.3 Uji One Way ANOVA

1) Variasi Konsentrasi Awal Pb

ANOVA

Efisiensi_removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1092.553	4	273.138	344.474	.000
Within Groups	7.929	10	.793		
Total	1100.482	14			

2) Variasi Massa Adsorben

ANOVA

Efisiensi_removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	352.326	2	176.163	136.461	.000
Within Groups	7.746	6	1.291		
Total	360.072	8			

3) Variasi Waktu Kontak

ANOVA

Efisiensi_removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	228.326	5	45.665	189.574	.000
Within Groups	2.891	12	.241		
Total	231.216	17			

4) Variasi pH Larutan

ANOVA

Efisiensi_removal

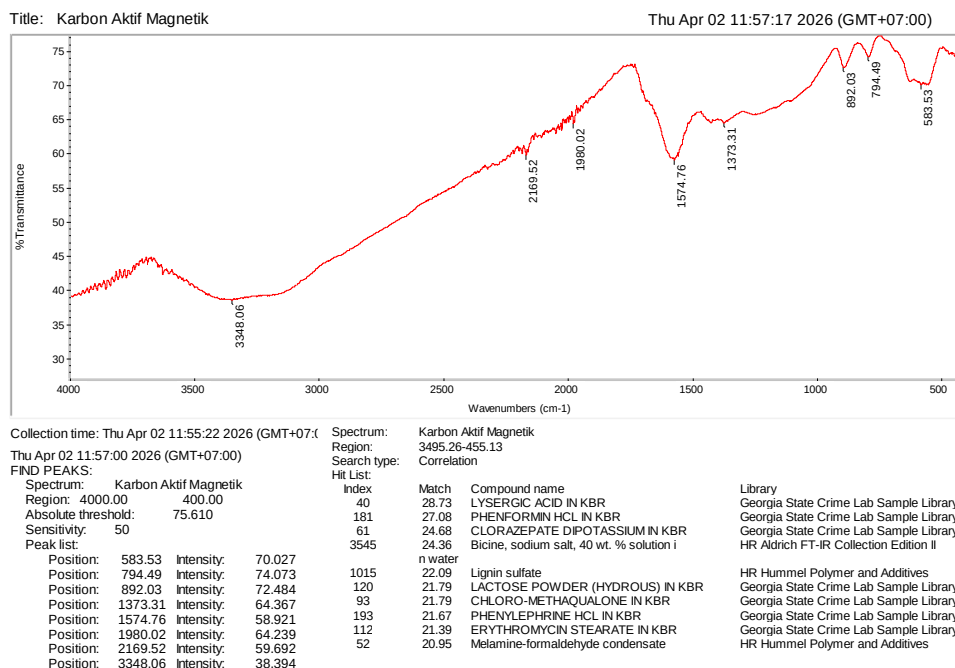
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	14.342	2	7.171	31.476	.001
Within Groups	1.367	6	.228		
Total	15.709	8			

Halaman ini sengaja dikosongkan

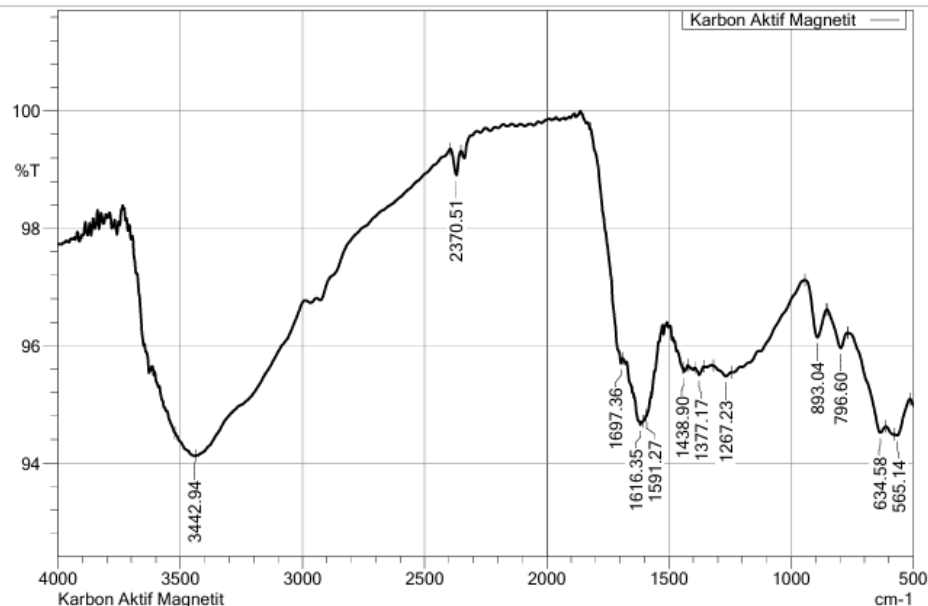
LAMPIRAN E
PENGUJIAN KARAKTERISASI

Halaman ini sengaja dikosongkan

E.1 Uji Karakteristik FTIR Sebelum Adsorpsi



E.2 Uji Karakteristik FTIR Setelah Adsorpsi



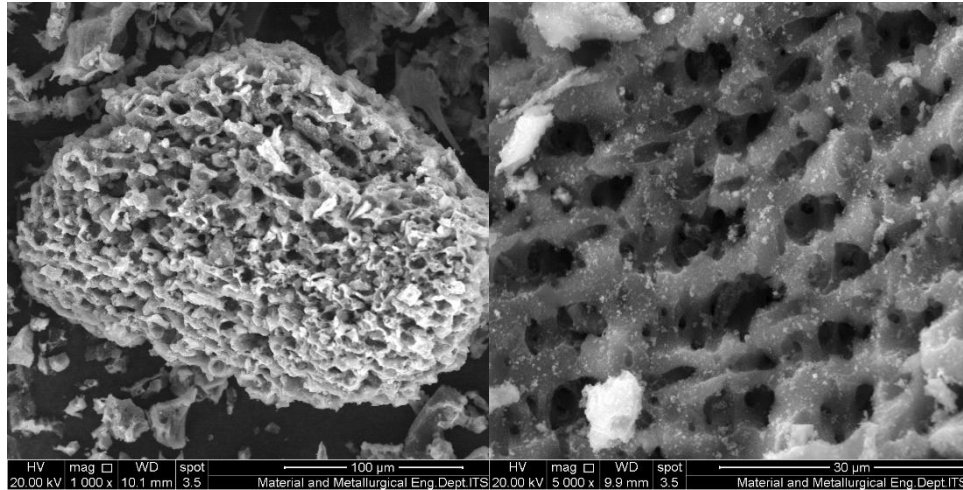
D:\PPNS\Karbon Aktif Magnetit1.ispd

Karbon Aktif Magnetit

	Item	Value
2	Sample name	Karbon Aktif Magnetit
3	Sample ID	08062026
4	Option	DRS
5	Intensity Mode	% Transmittance
6	Apodization	Happ-Genzel
9	No. of Scans	32
10	Resolution	4 cm-1

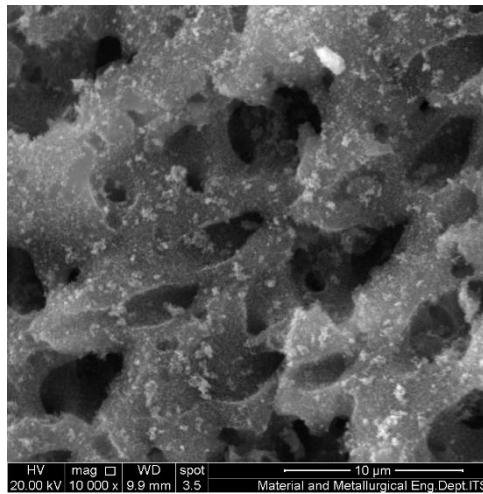
E.3 Uji Karakteristik SEM-EDX Sebelum Adsorpsi

A. Hasil Pengujian SEM Sebelum Adsorpsi



Perbesaran 1.000 x

Perbesaran 5.000 x



Perbesaran 10.000x

B. Hasil Pengujian EDX Sebelum Adsorpsi

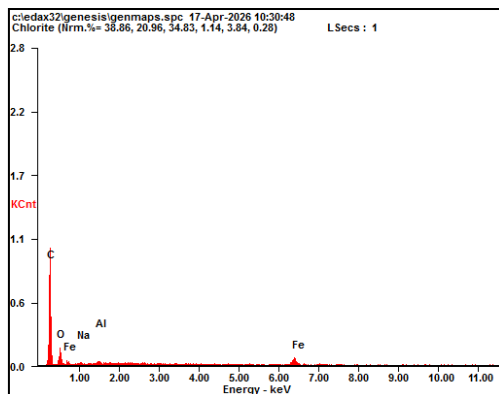
Microanalysis Report

Prepared for: *Company Name Here*

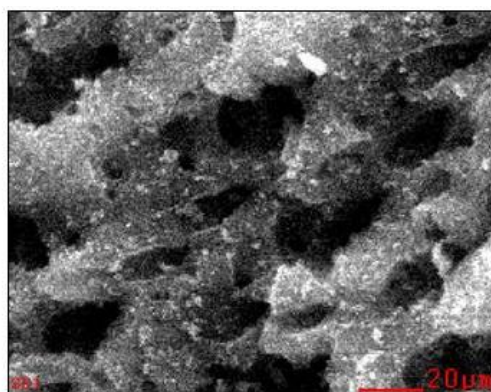
Prepared by: *Your Name Here*

4/17/2026

EDAX^{TSL}
advanced microanalysis solutions
AMETEK



Element	Wt%	At%
CK	60.88	73.75
OK	23.21	21.10
NaK	01.49	00.94
AlK	01.61	00.87
FeK	12.81	03.34
Matrix	Correction	ZAF



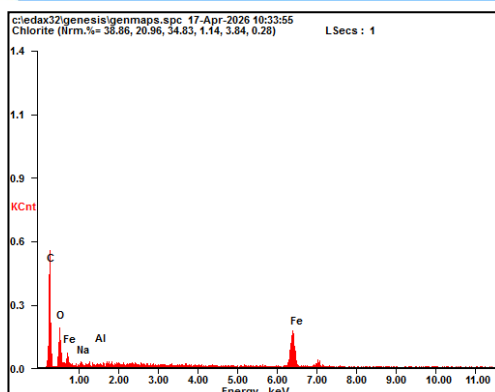
Microanalysis Report

Prepared for: *Company Name Here*

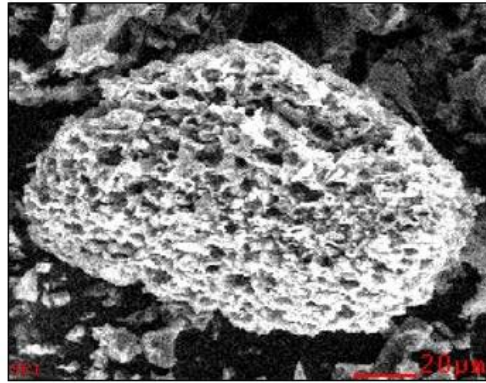
Prepared by: *Your Name Here*

4/17/2026

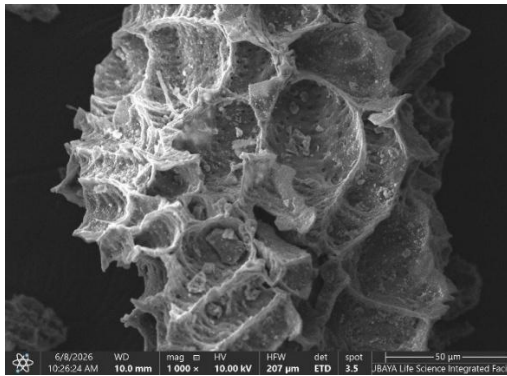
EDAX[™] TSL
advanced microanalysis solutions
AMETEK



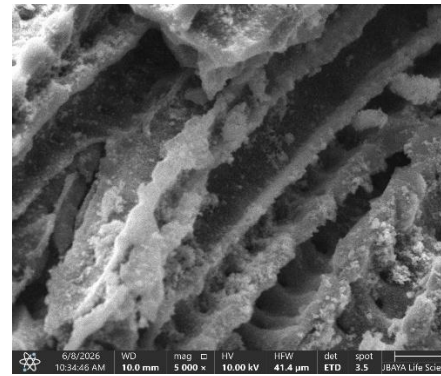
Element	Wt%	At%
CK	42.11	62.60
OK	22.55	25.16
NaK	01.72	01.34
AlK	00.42	00.28
FeK	33.21	10.62
Matrix	Correction	ZAF



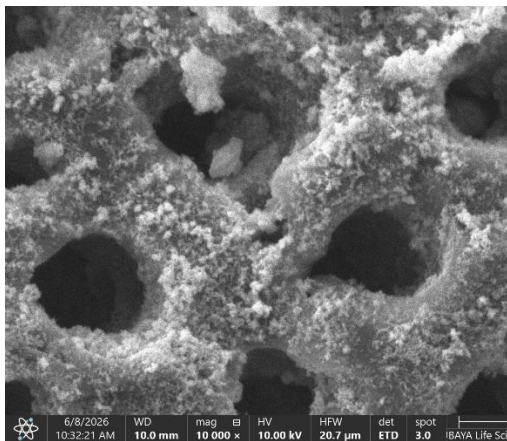
C. Hasil Pengujian SEM Setelah Adsorpsi



Perbesaran 1.000 x



Perbesaran 5.000 x

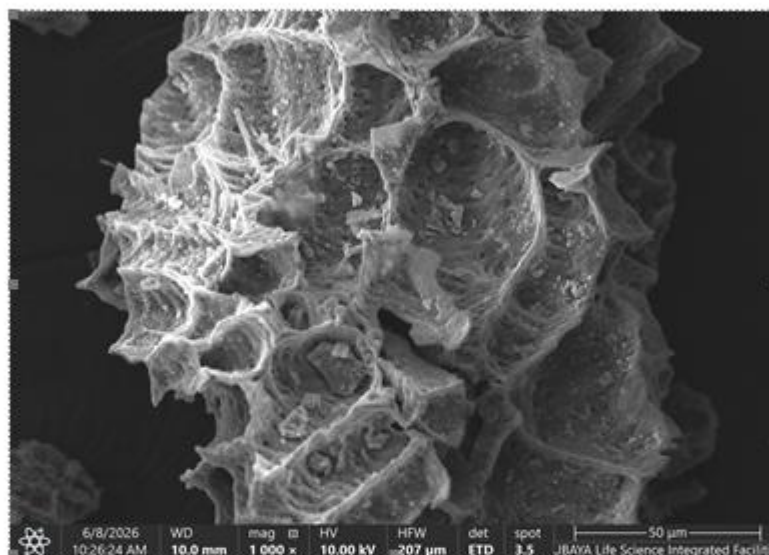


Perbesaran 10.000x

D. Hasil Pengujian EDX Setelah Adsorpsi

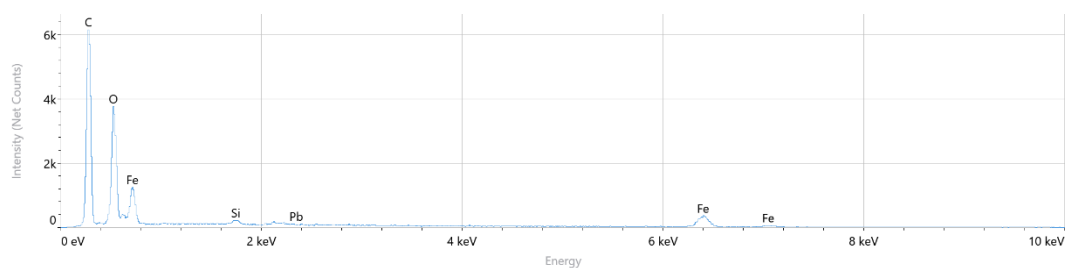
Session 26-04-09 15:03

Site 91



Total Number of Counts: 107 612
Average Count Rate: 2 866 cps
Acceleration Voltage: 10 kV
Total Acquisition Time: 38 seconds

Element	Line	At. %	Wt. %	Net Counts	At. % Error	Wt. % Error
C	K	62.7	39.6	30 127	0.4	0.3
O	K	23.1	19.5	19 123	0.3	0.2
Si	K	0.4	0.6	1 208	0.0	0.0
Fe	K	13.8	40.3	4 830	0.4	1.2
Pb	M	0.0	0.1	201	0.1	0.1

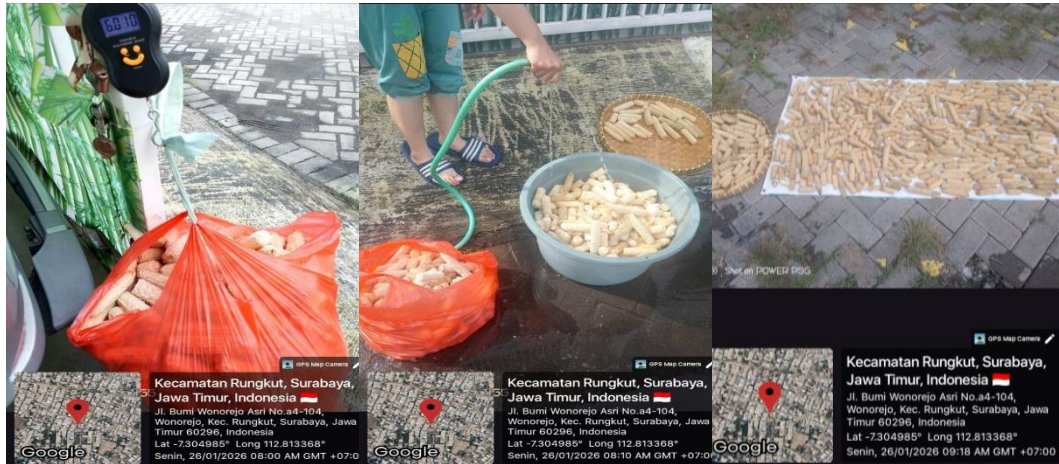


Halaman ini sengaja dikosongkan

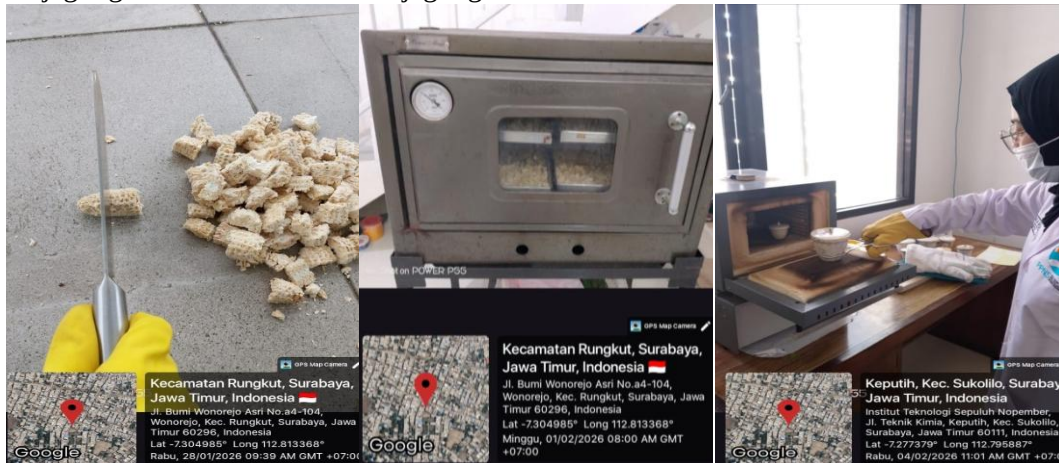
LAMPIRAN F
DOKUMENTASI PENELITIAN

Halaman ini sengaja dikosongkan

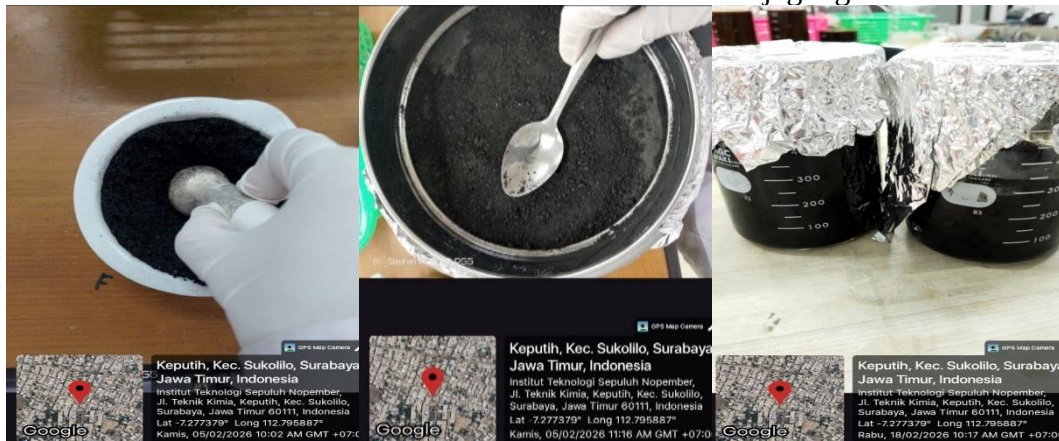
F.1 Pembuatan Karbon Aktif Bonggol Jagung



1. Pengambilan dan penimbangan bonggol jagung
2. Pembersihan dan pencucian bonggol jagung
3. Pengerangan bonggol jagung dengan sinar matahari



4. Pemotongan bonggol jagung
5. Pengerangan bonggol jagung dengan oven
6. Pengarangan bonggol jagung



7. Penghalusan karbon bonggol jagung
8. Pengayakan karbon bonggol jagung
9. Perendaman karbon dengan H_2SO_4



10. Pencucian dan netralisasi karbon aktif

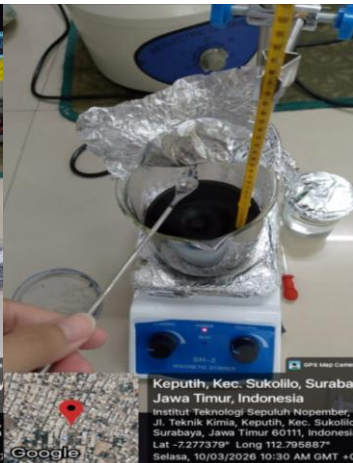


11. Pengeringan karbon aktif

F.2 Pembuatan Karbon Aktif Termodifikasi Magnetit Fe_3O_4



1. Pembuatan larutan 28 mM $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 14 mM $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$



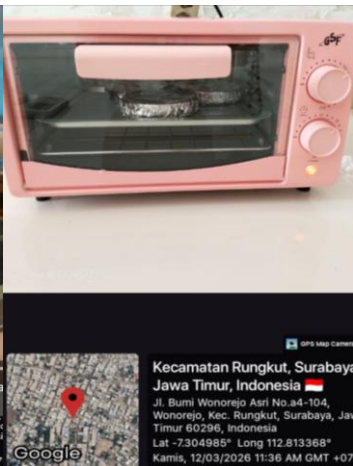
2. Pengadukan larutan dan penambahan karbon aktif



3. Pengendapan karbon aktif magnetit

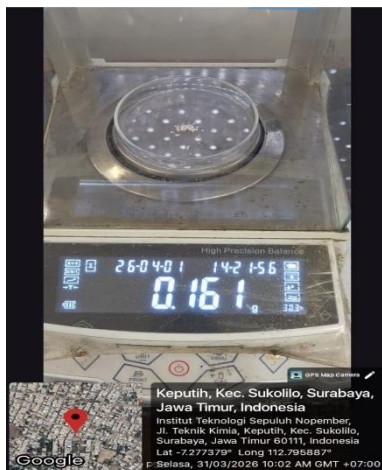


4. Pemisahan dan pencucian karbon aktif magnetit



5. Pengeringan karbon aktif magnetit

F.3 Pembuatan Limbah Artifisial Pb 100 ppm

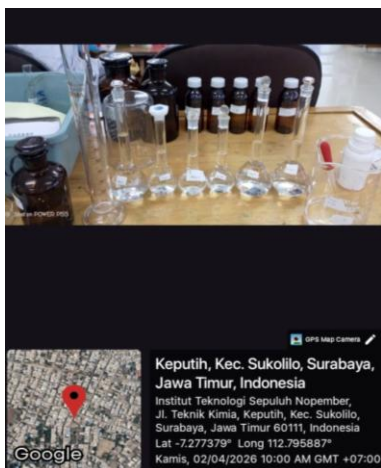


1. Penimbangan massa $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$



2. Pelarutan Pb dengan akuades hingga tanda batas

F.4 Pembuatan Kurva Kalibrasi Limbah Artifisial Pb



1. Pengenceran larutan Pb 2 ppm, 4 ppm, 6 ppm, 8 ppm, dan 10 ppm



2. Pembacaan larutan standar Pb pada AAS

F.5 Pengujian Adsorpsi dan Pengujian AAS



1. Penimbangan massa adsorben

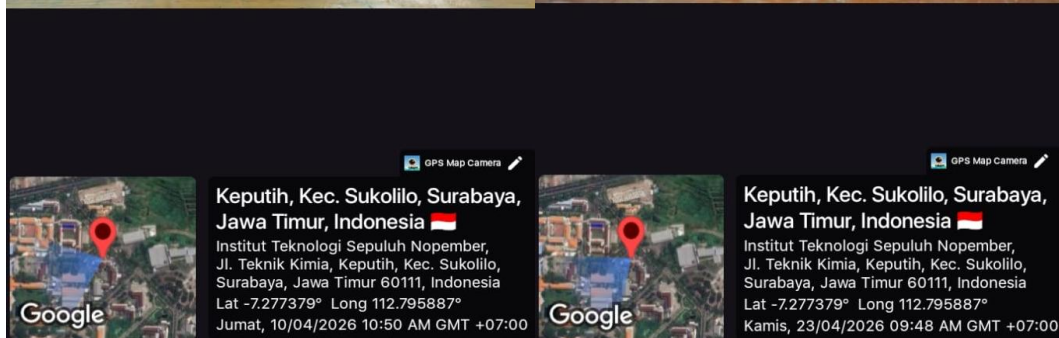
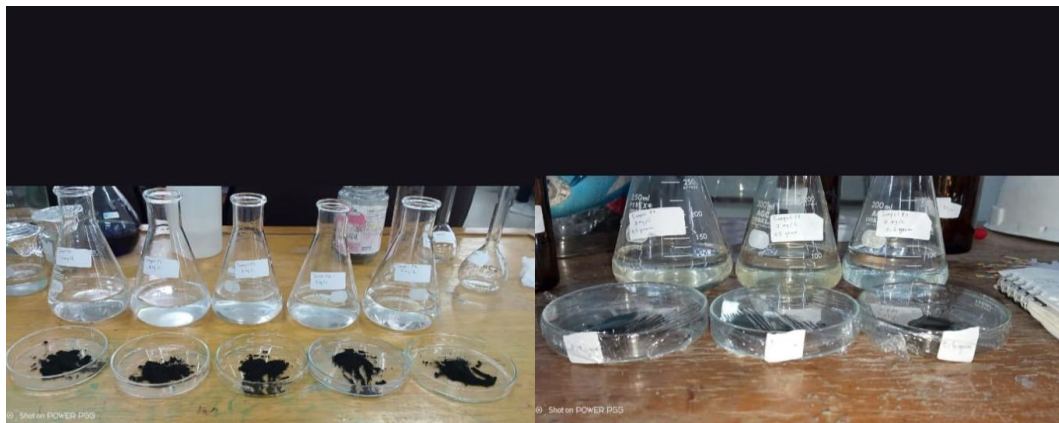
2. Pengenceran larutan sampel Pb

3. Penambahan larutan NaOH 1M



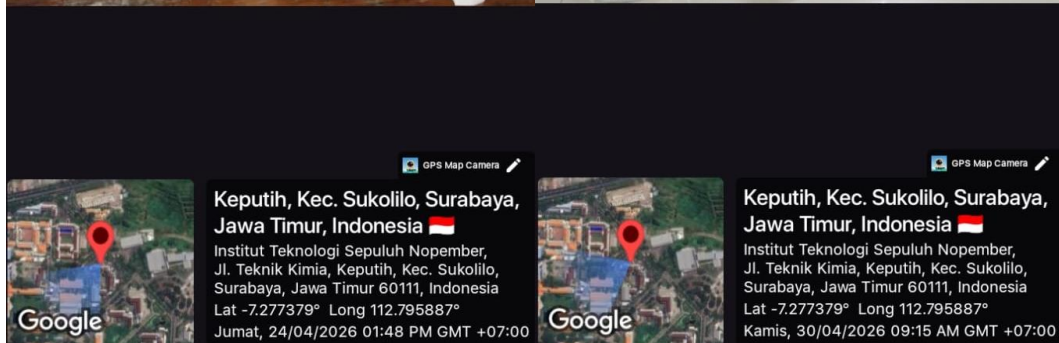
4. Pengecekan pH Larutan

F.6 Pengujian Adsorpsi



1. Variasi konsentrasi

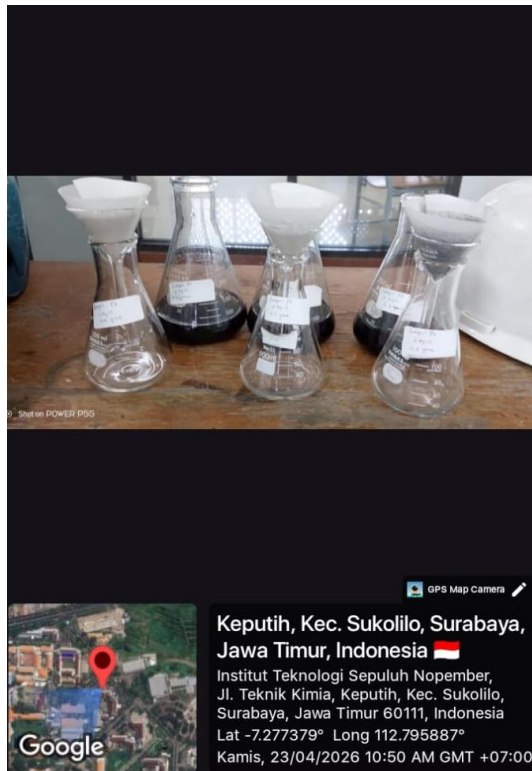
2. Variasi massa adsorben



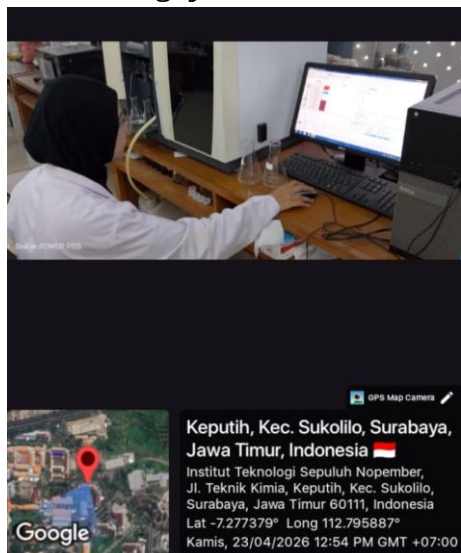
3. Variasi waktu kontak

4. Variasi pH Larutan

F.7 Pemisahan Adsorben dari Larutan



F.8 Pengujian AAS untuk Pembacaan Nilai Konsentrasi dan Absorbansi



BIODATA PENULIS



Penulis bernama Keyne Nabila Regi, lahir di Sidoarjo pada tanggal 27 Agustus 2004. Pendidikan formal yang telah ditempuh penulis diantaranya SDN Katerungan Krian (lulus tahun 2016), SMP Negeri 1 Krian (lulus tahun 2019), dan SMA Negeri 1 Krian (lulus tahun 2022). Penulis melanjutkan Pendidikan tinggi di Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya pada tahun 2022. Semasa menempuh Pendidikan di bangku kuliah, penulis aktif berkecimpung di beberapa kepanitiaan sebagai pemateri, pembawa acara, dan sie perlengkapan. Penulis telah mengikuti kegiatan *On The Job Training* di perusahaan konsultan lingkungan PT Global Solusi Prima selama 5 bulan dan mendapatkan projek untuk menyusun dokumen lingkungan seperti PERTEK BMAL, PERTEK BME, dan RINTEK LB3. Penulis juga mengikuti *On The Job Training* di perusahaan reparasi kapal PT Dewa Ruci Agung selama 5 bulan pada departemen HSE. (*Health, Safety, and Environment*). Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi mengenai Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email keynenabilaregi123@gmail.com.