



JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

***Biochar* Sekam Padi yang Termodifikasi Magnetit sebagai
Adsorben Logam Berat Timbal (Pb) pada Limbah Cair
Industri Batik Yogyakarta**

Rosa Amelia

21513164

Dosen Pembimbing:

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

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Universitas Islam Indonesia

2025



DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Magnetite-Modified Rice Husk Biochar as A Lead (Pb) Heavy Metal Adsorbent in Yogyakarta's Batik Industry Wastewater

Rosa Amelia

21513164

Supervisor:

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

Environmental Engineering Bachelor Program

Faculty of Civil Engineering and Planning

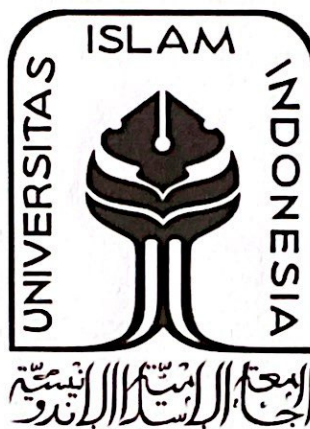
Universitas Islam Indonesia

2025

TUGAS AKHIR

BIOCHAR SEKAM PADI YANG TERMODIFIKASI MAGNETIT SEBAGAI ADSORBEN LOGAM BERAT TIMBAL (PB) PADA LIMBAH CAIR INDUSTRI BATIK YOGYAKARTA

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana (S1) Teknik Lingkungan**



**ROSA AMELIA
21513164**

Disetujui,
Dosen Pembimbing:

Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.E.S., Ph.D., I.P.U.

NIK. 025100406

Tanggal: 23 Mei 2025

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan FTSP UII



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

GYANIK. 045130401

Tanggal: 23/5 2025

HALAMAN PENGESAHAN

**BIOCHAR SEKAM PADI YANG TERMODIFIKASI
MAGNETIT SEBAGAI ADSORBEN LOGAM BERAT
TIMBAL (PB) PADA LIMBAH CAIR INDUSTRI
BATIK YOGYAKARTA**

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji

**Hari: Kamis
Tanggal: 15 Mei 2025**

Disusun Oleh:

**ROSA AMELIA
21513164**

Tim Penguji :

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

() 23/5 '2025

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

()

Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

() 22/5 '2025

PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

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

Yogyakarta, 26 Mei 2025

Yang membuat pernyataan,



Rosa Amelia

21513164

PRAKATA

Segala puji bagi Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul "*Biochar* Sekam Padi yang Termodifikasi Magnetit sebagai Adsorben Logam Berat Timbal (Pb) pada Limbah Cair Industri Batik Yogyakarta". Penelitian ini disusun sebagai salah satu syarat untuk lulus jenjang Strata-1 dan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Daerah Istimewa Yogyakarta.

Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, saya ingin menyampaikan rasa syukur yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT, atas segala rahmat, hidayah, dan petunjuk-Nya yang senantiasa memberikan kekuatan kepada saya dalam menyelesaikan laporan ini.
2. Kedua orang tua saya, Bapak Ahmad Rozali Effendi dan Ibu Risdariah, yang senantiasa memberikan dukungan, doa, dan dorongan yang tiada henti.
3. Bapak Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., IPU. selaku Dosen Pembimbing atas saran, masukan, dan bimbingan yang sangat berarti bagi penelitian ini.
4. Ibu Any Juliani, S.T., M.Si. (Res.Eng.), Ph.D., selaku Ketua Program Studi Teknik Lingkungan UII sekaligus dosen penguji atas arahan dan saran yang diberikan selama proses penelitian ini.
5. Ibu Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D. selaku dosen penguji yang telah membimbing, memberi saran dan arahan dalam pelaksanaan tugas akhir ini
6. Seluruh dosen dan karyawan Program Studi Teknik Lingkungan UII atas ilmu, arahan, dan bantuannya dalam proses administrasi selama penyusunan tugas akhir ini.
7. Teman-teman TL 2021, terutama rekan satu topik yang senantiasa membantu dan berjuang Bersama.
8. Para asisten laboratorium di Laboratorium Kualitas Air FTSP UII yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian.

9. Semua pihak yang terlibat dalam penyusunan tugas akhir ini, baik secara langsung maupun tidak langsung.

Semoga segala kebaikan yang telah diberikan oleh semua pihak mendapat balasan yang terbaik dari Allah SWT. Saya juga menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu saya sangat terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun. Semoga karya ini dapat memberikan manfaat bagi saya dan para pembaca.

Sleman, 26 Mei 2025

Rosa Amelia

***Biochar* Sekam Padi yang Termodifikasi Magnetit sebagai
Adsorben Logam Berat Timbal (Pb) pada Limbah Cair Industri
Batik Yogyakarta**

Mahasiswa : Rosa Amelia
NIM : 21513164
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.E.S., Ph.D., IPU.

Abstrak

Industri batik merupakan salah satu sektor yang berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan, khususnya akibat limbah cair yang mengandung logam berat timbal (Pb) yang bersifat toksik. Untuk mengatasi permasalahan ini, diperlukan metode pengolahan limbah yang efektif dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik serta efektivitas biochar sekam padi, biochar teraktivasi, dan biochar termodifikasi magnetit dalam mengadsorpsi Pb dari limbah cair industri batik. Serangkaian uji dilakukan, meliputi karakterisasi menggunakan FTIR dan SEM untuk mengamati perubahan gugus fungsi dan morfologi permukaan adsorben, serta uji adsorpsi dengan variasi massa, pH, waktu kontak, dan konsentrasi awal Pb untuk menentukan kondisi optimum. Hasil menunjukkan bahwa aktivasi dengan H_3PO_4 meningkatkan luas permukaan dan jumlah pori biochar, sedangkan modifikasi dengan magnetit menambah sifat magnetik dan afinitas terhadap ion Pb. Kondisi optimum adsorpsi diperoleh pada massa adsorben 100 mg, pH 5, dan waktu kontak 60 menit, dengan efisiensi adsorpsi menurun seiring peningkatan konsentrasi awal Pb. Biochar termodifikasi magnetit menunjukkan efisiensi tertinggi sebesar 98,11%, dengan penurunan konsentrasi Pb dari 8,874 mg/L menjadi 0,167 mg/L. Proses adsorpsi oleh biochar termodifikasi paling sesuai dengan model isoterm Freundlich, sedangkan biochar biasa mengikuti model Langmuir dengan kapasitas maksimum sebesar 7,7399 mg/g. Dengan demikian, biochar sekam padi termodifikasi magnetit terbukti efektif dan ramah lingkungan sebagai adsorben dalam pengolahan limbah cair industri batik.

Kata kunci: adsorpsi, *biochar* sekam padi, limbah batik, magnetit, timbal (Pb)

***Biochar Sekam Padi yang Termodifikasi Magnetit sebagai
Adsorben Logam Berat Timbal (Pb) pada Limbah Cair Industri
Batik Yogyakarta***

Student : Rosa Amelia
Student Number : 21513164
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., IPU.

Abstract

The batik industry is one of the sectors that contributes to environmental pollution, especially due to liquid waste containing the toxic heavy metal lead (Pb). We need an effective and environmentally friendly waste treatment method to overcome this problem. This study aims to evaluate the characteristics and effectiveness of rice husk biochar, activated biochar, and magnetite-modified biochar in adsorbing Pb from batik industry liquid waste. A series of tests were carried out, including characterization using FTIR and SEM to observe changes in functional groups and surface morphology of the adsorbent, as well as adsorption tests with variations in mass, pH, contact time, and initial Pb concentration to determine optimum conditions. The results showed that activation with H_3PO_4 increased the surface area and number of pores of the biochar, while modification with magnetite increased the magnetic properties and affinity for Pb ions. The optimum adsorption conditions were obtained at an adsorbent mass of 100 mg, pH 5, and contact time of 60 minutes, with adsorption efficiency decreasing as the initial Pb concentration increased. Magnetite-modified biochar showed the highest efficiency of 98.11%, with a decrease in Pb concentration from 8.874 mg/L to 0.167 mg/L. The adsorption process by modified biochar best fits the Freundlich isotherm model, while ordinary biochar follows the Langmuir model with a maximum capacity of 7.7399 mg/g. Thus, magnetite-modified rice husk biochar is proven to be effective and environmentally friendly as an adsorbent in the treatment of batik industry wastewater.

Keywords: adsorption, batik waste, lead (Pb), magnetite, rice husk biochar

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	i
Abstrak.....	iii
<i>Abstract</i>	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Karakteristik Limbah Cair Industri Batik	5
2.2 Timbal (Pb)	6
2.3 Adsorpsi	7
2.4 <i>Biochar</i>	7
2.5 Sekam Padi.....	8
2.6 Magnetit	9
2.7 Uji Karakteristik Adsorben	10
2.8 Penelitian Terdahulu.....	10
BAB III METODE PENELITIAN.....	14
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	14
3.2 Alat, Bahan, dan Instrumen.....	14
3.3 Variabel Penelitian	15
3.4 Prosedur Penelitian.....	16
3.4.1 Pengambilan Sampel Limbah Cair Batik.....	17

3.4.2	Preparasi Adsorben.....	17
3.4.3	Aktivasi <i>Biochar</i> Sekam Padi	18
3.4.4	Modifikasi <i>Biochar</i> Sekam Padi dengan Magnetit	18
3.4.5	Karakterisasi Adsorben	19
3.4.6	Proses Adsorpsi	19
3.4.7	Preparasi Limbah Cair Batik.....	23
3.4.8	Pengujian Kondisi Optimum Adsorben pada Limbah Batik.....	24
3.4.9	Analisis Data	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		27
4.1	Karakterisasi Adsorben	27
4.1.1	Pengujian Fourier <i>Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR).....	27
4.1.2	Pengujian <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	32
4.2	Pengujian Adsorpsi	34
4.2.1	Pengujian Variasi Massa	34
4.2.2	Pengujian Variasi Nilai pH.....	38
4.2.3	Pengujian Variasi Waktu Kontak.....	40
4.2.4	Pengujian Variasi Konsentrasi Larutan	43
4.3	Analisis Isoterm Adsorpsi	46
4.4	Aplikasi Adsorben ke Limbah Cair Batik	54
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		56
1.1	Kesimpulan	56
5.2	Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA		58
LAMPIRAN.....		62
RIWAYAT HIDUP		77

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu.....	10
Tabel 4. 1 Interpretasi Gugus Adsorben Sebelum Adsorpsi.....	28
Tabel 4. 2 Interpretasi Gugus Adsorben Setelah Adsorpsi.....	30
Tabel 4. 3 Data Variasi Massa Biochar Sekam Padi	35
Tabel 4. 4 Data Variasi Massa Biochar Sekam Padi Teraktivasi.....	35
Tabel 4. 5 Data Variasi Massa Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit.....	35
Tabel 4. 6 Data Variasi pH Larutan pada Biochar Sekam Padi.....	38
Tabel 4. 7 Data Variasi pH Larutan pada Biochar Sekam Padi Teraktivasi	38
Tabel 4. 8 Data Variasi pH Larutan pada Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	39
Tabel 4. 9 Data Variasi Waktu Kontak Biochar Sekam Padi.....	41
Tabel 4. 10 Data Variasi Waktu Kontak Biochar Sekam Padi Teraktivasi	41
Tabel 4. 11 Data Variasi Waktu Kontak Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	41
Tabel 4. 12 Data Variasi Konsentrasi Larutan pada Biochar Sekam Padi.....	43
Tabel 4. 13 Data Variasi Konsentrasi Larutan pada Biochar Sekam Padi Teraktivasi	43
Tabel 4. 14 Data Variasi Konsentrasi Larutan pada Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit.....	44
Tabel 4. 15 Perhitungan Isoterm Langmuir Biochar Sekam Padi, Biochar Sekam Padi Teraktivasi, dan Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	47
Tabel 4. 16 Perhitungan Isoterm Freundlich Biochar Sekam Padi, Biochar Sekam Padi Teraktivasi, dan Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	49
Tabel 4. 17 Perbandingan Hasil Pemodelan Isoterm Langmuir dan Freundlich...	52
Tabel 4. 18 Hasil Pengujian Adsorpsi Pb Limbah Batik Menggunakan Biochar Sekam Padi, Biochar Sekam Padi Teraktivasi, dan Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit.....	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian.....	16
Gambar 3. 2 Tahapan Preparasi Adsorben	17
Gambar 3. 3 Tahapan Aktivasi Biochar Sekam Padi	18
Gambar 3. 4 Tahapan Modifikasi Biochar Sekam Padi dengan Magnetit	19
Gambar 3. 5 Tahapan Pembuatan Larutan Pb	20
Gambar 3. 6 Tahapan Pembuatan Standar Pb	21
Gambar 3. 7 Tahapan Penentuan Massa Optimum	21
Gambar 3. 8 Tahapan Penentuan pH Optimum.....	22
Gambar 3. 9 Tahapan Penentuan Waktu Kontak Optimum	23
Gambar 3. 10 Tahapan Penentuan Konsentrasi Optimum	23
Gambar 3. 11 Tahapan Preparasi Limbah Cair Batik.....	24
Gambar 3. 12 Tahapan Pengujian Kondisi Optimum Adsorben pada Limbah Batik	25
Gambar 4. 1 Hasil Uji FTIR Sebelum Adsorpsi	28
Gambar 4. 2 Hasil Uji FTIR Setelah Adsorpsi.....	30
Gambar 4. 3 (a) Permukaan Biochar Adsorben Sekam Padi (b) Permukaan Biochar Adsorben Sekam Padi Teraktivasi (c) Permukaan Biochar Adsorben Sekam Padi Termodifikasi Magnetit.....	32
Gambar 4. 4 (a) Permukaan Biochar Adsorben Sekam Padi Setelah Adsorpsi (b) Permukaan Biochar Adsorben Sekam Padi Teraktivasi Setelah Adsorpsi (c) Permukaan Biochar Adsorben Sekam Padi Termodifikasi Magnetit Setelah Adsorpsi	33
Gambar 4. 5 Grafik Hubungan Variasi Massa terhadap Adsorpsi Pb	36
Gambar 4. 6 Grafik Hubungan Variasi pH terhadap Adsorpsi Pb.....	39
Gambar 4. 7 Grafik Hubungan Variasi waktu terhadap Adsorpsi	42
Gambar 4. 8 Grafik Hubungan Variasi Konsentrasi Larutan terhadap Adsorpsi ..	44
Gambar 4. 9 Model Isoterm Langmuir Adsorpsi Logam Pb oleh Adsorben Biochar Sekam Padi.....	48

Gambar 4. 10 Model Isoterm Langmuir Adsorpsi Logam Pb oleh Adsorben Biochar Sekam Padi Teraktivasi	48
Gambar 4. 11 Model Isoterm Langmuir Adsorpsi Logam Pb oleh Adsorben Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	49
Gambar 4. 12 Model Isoterm Freundlich Adsorpsi Logam Pb oleh Adsorben Biochar Sekam Padi	51
Gambar 4. 13 Model Isoterm Freundlich Adsorpsi Logam Pb oleh Adsorben Biochar Sekam Padi Teraktivasi	51
Gambar 4. 14 Model Isoterm Freundlich Adsorpsi Logam Pb oleh Adsorben <i>Biochar</i> Sekam Padi Termodifikasi Magnetit.....	51

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan.....	62
Lampiran 2 Dokumentasi Penelitian.....	64
Lampiran 3 Data Pengujian Adsorpsi	67
Lampiran 4 Data Karakteristik FTIR	71

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Batik merupakan salah satu warisan budaya Indonesia yang telah memperoleh pengakuan dari United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) berkat keragaman motif batik dengan makna filosofis yang mendalam. Namun, di balik pelestariannya, industri batik juga menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, terutama dalam hal pencemaran air akibat limbah cair yang dihasilkan dari proses pewarnaan. Limbah cair ini mengandung zat pewarna sintetik dalam konsentrasi tinggi serta senyawa organik *non-biodegradable* yang dapat mencemari ekosistem perairan (Suprihatin, 2014).

Salah satu kandungan berbahaya dalam limbah cair industri batik adalah logam berat timbal (Pb). Timbal merupakan logam berat nonesensial yang bersifat toksik dan akumulatif sehingga dapat menimbulkan gangguan kesehatan dan pencemaran lingkungan jika kadarnya melebihi ambang batas yang ditetapkan. Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan limbah yang efektif untuk menurunkan kadar timbal dalam air limbah industri batik.

Terdapat berbagai metode yang dapat digunakan dalam pengolahan limbah cair industri tekstil dan batik, seperti degradasi elektrokimia, pertukaran ion, adsorpsi, presipitasi, filtrasi membran, fotokatalisis, serta koagulasi dan flokulasi. Namun, sebagian besar metode tersebut memiliki kelemahan, seperti biaya operasional yang tinggi, kompleksitas dalam pengolahan, dan potensi menghasilkan limbah sekunder yang memerlukan penanganan lebih lanjut. Salah satu metode yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan adalah adsorpsi karena memiliki desain yang sederhana, pengoperasian yang mudah, dan tidak menghasilkan lumpur yang berbahaya (Zannah, 2020).

Adsorpsi merupakan peristiwa fisik atau kimia yang terjadi pada permukaan yang dipengaruhi oleh reaksi kimia yang terjadi antara adsorben dan adsorbat (Muhimmatin, 2019). Efektivitas adsorpsi dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti

luas permukaan adsorben, konsentrasi adsorbat, struktur molekul, kecepatan pengadukan, waktu kontak, temperatur, serta pH larutan. Seiring dengan berkembangnya penelitian, pemanfaatan adsorben berbahan alami menjadi fokus utama karena lebih murah dan tersedia melimpah. Salah satu bahan alami yang berpotensi digunakan sebagai adsorben adalah sekam padi.

Sekam padi merupakan limbah pertanian yang melimpah di Indonesia seiring dengan tingginya produksi padi. Kandungan utama sekam padi adalah selulosa dan hemiselulosa dengan gugus hidroksil (-OH) yang memungkinkan terjadinya interaksi dengan ion logam berat seperti timbal (Pb) sehingga berpotensi sebagai adsorben (Wardalia, 2016). Hubungan sekam padi dengan adsorpsi terletak pada kandungan gugus fungsi aktif seperti hidroksil (-OH) yang memungkinkan terbentuknya ikatan dengan logam berat melalui mekanisme pertukaran ion atau ikatan kompleks, sehingga sekam padi efektif dalam menyerap logam berat dari limbah cair. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa karbon aktif sekam padi memiliki kapasitas adsorpsi Pb sebesar 0,1377 mg/g dengan massa adsorben 2 g dan waktu kontak 180 menit (Halim et al., 2021). Namun, penelitian ini belum menggunakan modifikasi magnetit (Fe_3O_4) yang dapat meningkatkan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi *biochar* sekam padi.

Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan *biochar* sekam padi yang dimodifikasi dengan magnetit (Fe_3O_4) sebagai adsorben dalam penghilangan timbal (Pb) dari limbah cair industri batik. Modifikasi ini diharapkan dapat meningkatkan efektivitas adsorpsi melalui perluasan luas permukaan spesifik adsorben, peningkatan afinitas terhadap logam berat, dan pemberian sifat kemagnetan pada adsorben sehingga proses penyaluran pasca adsorpsi menjadi lebih mudah dan efisien. *Biochar* magnetit memiliki keunggulan ukuran partikel kecil, luas permukaan spesifik besar, reaktivitas tinggi, serta adsorpsi reversibel dan efisien dalam menghilangkan polutan dari air limbah (Zhang et al., 2020). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi optimum adsorpsi *biochar* sekam padi yang dimodifikasi magnetit terhadap timbal (Pb), meliputi penentuan massa, pH, waktu kontak, dan konsentrasi adsorbat optimum guna mengetahui efisiensi penyisihan timbal (Pb) dari limbah cair industri batik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

- 1) Bagaimana hasil karakterisasi *biochar* sekam padi, *biochar* sekam padi teraktivasi dan *biochar* sekam padi yang dimodifikasi magnetit?
- 2) Bagaimana pengaruh variasi massa adsorben, pH, waktu kontak, dan konsentrasi awal timbal (Pb) terhadap efisiensi adsorpsi logam berat timbal (Pb) menggunakan *biochar* sekam padi, *biochar* sekam padi teraktivasi dan *biochar* sekam padi yang dimodifikasi magnetit?
- 3) Bagaimana kapasitas adsorpsi maksimum *biochar* sekam padi, *biochar* sekam padi teraktivasi dan *biochar* sekam padi yang dimodifikasi magnetit terhadap logam berat timbal (Pb) dalam limbah cair industri batik?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini sebagai berikut:

- 1) Mengkaji hasil karakterisasi *biochar* sekam padi, *biochar* sekam padi teraktivasi dan *biochar* sekam padi yang dimodifikasi magnetit
- 2) Menganalisis pengaruh variasi massa adsorben, pH, waktu kontak, dan konsentrasi awal timbal (Pb) terhadap efisiensi adsorpsi logam berat timbal (Pb) menggunakan *biochar* sekam padi, *biochar* sekam padi teraktivasi dan *biochar* sekam padi yang dimodifikasi magnetit
- 3) Mengkaji kapasitas adsorpsi maksimum *biochar* sekam padi, *biochar* sekam padi teraktivasi dan *biochar* sekam padi yang dimodifikasi magnetit terhadap logam berat timbal (Pb) dalam limbah cair industri batik

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

- 1) Memberikan pengetahuan terkait kemampuan penurunan kadar logam berat timbal limbah cair pada industri batik menggunakan *biochar* sekam padi,

biochar sekam padi teraktivasi dan *biochar* sekam padi yang dimodifikasi magnetit

- 2) Menyediakan alternatif teknologi adsorpsi timbal (Pb) yang berasal dari limbah sekam padi.
- 3) Memberikan kontribusi terhadap ilmu pengetahuan terkait pengolahan limbah cair industri batik yang mengandung logam berat timbal (Pb).

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pada penelitian ini sebagai berikut:

- 1) Penelitian akan dilaksanakan di Laboratorium Kualitas Air, Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP), Universitas Islam Indonesia (UII).
- 2) Sampel air limbah cair batik yang digunakan berasal dari salah satu pembuangan limbah cair di industri batik wilayah Yogyakarta.
- 3) Media adsorben yang digunakan adalah *biochar* dari limbah sekam padi.
- 4) Proses aktivasi adsorben dilakukan dengan menggunakan asam fosfat (H_3PO_4).
- 5) Proses modifikasi adsorben dilakukan dengan menggunakan besi Oksida (Fe_3O_4).
- 6) Air limbah yang digunakan adalah air limbah batik asli dan air limbah sintetis yang mengandung ion timbal (Pb^{2+}), dengan metode pengujian mengacu pada SNI 6989,8-2009 tentang Cara Uji Timbal dengan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)-nyala.
- 7) Parameter utama pengujian pada penelitian ini meliputi massa adsorben, pH, waktu kontak adsorben, dan konsentrasi ion timbal (Pb^{2+}) dalam larutan.
- 8) Pengujian karakteristik gugus fungsi adsorben dalam penelitian ini menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR).
- 9) Pengujian morfologi adsorben menggunakan instrumen *Scanning Electron Microscope* (SEM).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Limbah Cair Industri Batik

Limbah cair industri batik merupakan hasil pencampuran antara air dengan berbagai bahan pencemar yang terbawa dalam dan terlarut atau tersuspensi selama proses produksi batik. Secara fisik, limbah ini berwarna keruh karena mengandung partikel terlarut, tersuspensi, dan senyawa koloid, serta berbau menyengat dan bersuhu tinggi sehingga dapat mempengaruhi kadar oksigen terlarut (DO). Kandungan padatan dalam limbah tersebut berupa zat padat yang mengapung, mengendap, tersuspensi, atau terlarut sehingga dapat meningkatkan kekeruhan air. Secara kimia, limbah batik bersifat basa dengan nilai Chemical Oxygen Demand (COD) yang tinggi, yang menunjukkan adanya bahan organik yang sulit terurai. Kadar DO yang rendah dapat membahayakan biota perairan, sedangkan keberadaan logam berat seperti timbal (Pb) berpotensi mencemari lingkungan dan mengganggu keseimbangan ekosistem. Secara biologi, limbah batik mengandung mikroorganisme dengan konsentrasi tinggi, sekitar 105-108 organisme/mL, yang berperan dalam proses degradasi bahan organik dan meningkatkan kadar Biological Oxygen Demand (BOD) (Apriyani, 2018).

Pada proses produksi batik melibatkan teknik canting dan cap, dengan menggunakan berbagai bahan kimia seperti pewarna dan bahan pengikat (mordan) yang mengandung logam berat. Tahap pewarnaan yang melibatkan lebih dari satu warna memerlukan proses yang berulang, di mana motif yang belum diwarnai dilapisi dengan lilin sebelum diberi bahan pengikat. Penggunaan lilin, pewarna sintetis, dan bahan pengikat menyebabkan limbah batik mengandung unsur logam berat seperti Cd, Fe, Pb, Cu, Zn, Mn, Al, Mg, Ca, Cr, dan Si. Timbal (Pb) umumnya berasal dari zat pewarna dan mordan seperti PbCrO_4 (Alfiany et al., 2013). Pada penelitian yang dilakukan oleh Esti Nugraheni (2015) menunjukkan bahwa kadar timbal (Pb) dalam limbah cair industri batik dapat mencapai 3,668 mg/L, yang berarti masih jauh melebihi baku mutu limbah cair industri sebesar 1,0 mg/L sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 3 Tahun 2010 tentang Baku Mutu

Air Limbah. Kadar Pb yang tinggi ini menimbulkan risiko toksik bagi organisme perairan dan dapat berdampak buruk pada kesehatan manusia apabila terjadi akumulasi melalui rantai makanan. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengolahan limbah yang efektif sebelum limbah tersebut dibuang ke lingkungan.

2.2 Timbal (Pb)

Timbal (Pb) adalah logam berat dengan nomor atom 82 dan bobot atom 207,20 g/mol. Secara fisik, timbal berkilau dengan warna putih kebiruan atau kelabu keperakan, memiliki titik leleh 327°C dan titik didih 1755°C (Irianti et al., 2017). Timbal bersifat sangat lunak, mudah dibentuk, dan tahan terhadap korosi, menjadikannya bahan yang sering digunakan sebagai pelapis. Meskipun memiliki kegunaan dalam berbagai industri seperti pembuatan baterai, cat, keramik, dan bahan bakar, timbal tergolong logam yang sangat beracun, terutama bagi anak-anak. Di alam, timbal jarang ditemukan dalam bentuk murni, tetapi sering dijumpai dalam pencampuran bersama logam lain seperti zinc, perak, dan tembaga. Pencemaran timbal di lingkungan sebagian besar disebabkan oleh aktivitas manusia, terutama dari emisi kendaraan bermotor dan industri. Timbal dapat terakumulasi dalam tanah, air, dan udara, serta diserap oleh tanaman yang dapat masuk ke dalam rantai makanan dan menimbulkan masalah kesehatan yang serius. Sifat timbal yang tidak dapat terdegradasi menjadikannya polutan yang menetap di lingkungan, sehingga pengelolaannya memerlukan perhatian khusus untuk meminimalkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan ekosistem (Irianti et al., 2017).

Timbal (Pb) juga sering ditemukan dalam limbah industri, termasuk industri batik. Dalam proses produksi batik, timbal dapat berasal dari zat pewarna atau zat mordant seperti $PbCrO_4$ yang digunakan sebagai perekat warna. Keberadaan timbal dalam limbah cair batik yang dibuang ke badan sungai menjadi masalah serius karena dapat mencemari air dan menurunkan kualitas sungai. Pencemaran ini tidak hanya berdampak pada ekosistem perairan, tetapi juga dapat membahayakan kesehatan manusia apabila air yang tercemar tersebut digunakan untuk kebutuhan sehari-hari. Oleh karena itu, keberadaan timbal dalam limbah cair batik merupakan

masalah lingkungan yang serius dan perlu penanganan yang tepat.

2.3 Adsorpsi

Adsorpsi adalah metode pengolahan limbah yang efektif dan ekonomis untuk mengatasi pencemaran zat warna dan logam berat. Proses ini melibatkan penempelan atom atau molekul suatu zat (adsorbat) pada permukaan zat lain (adsorben) akibat sirkulasi gaya pada permukaan. Adsorpsi dapat terjadi secara fisika melalui gaya van der Waals atau secara kimia. Efektivitas adsorpsi dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk karakteristik fisik dan kimia adsorben (seperti luas permukaan dan ukuran pori), sifat kimia adsorbat (seperti ukuran dan polaritas molekul), konsentrasi adsorbat, kondisi lingkungan (pH dan suhu), serta durasi proses adsorpsi. Adsorpsi dapat terjadi antara berbagai fase, termasuk gas-cair, cair-cair, padat-cair, dan gas-padat (Anggriani et al., 2021).

Metode adsorpsi unggul dalam efektivitas dan efisiensinya untuk menyisihkan logam berat dari air limbah, bahkan pada konsentrasi adsorbat yang rendah (Safrianti et al., 2012). Keunggulan lainnya meliputi kemudahan regenerasi adsorben, penghentian penggunaan, dan desain sistem yang sederhana. Adsorben, sebagai bahan padat berpori dengan situs aktif, berperan penting dalam menjerap molekul adsorbat. Dengan berbagai keunggulan tersebut, adsorpsi menjadi pilihan yang menjanjikan dalam upaya mengurangi dampak negatif pencemaran lingkungan, khususnya dalam pengolahan air limbah yang mengandung zat warna dan logam berat.

2.4 Biochar

Biochar merupakan produk padat berpori kaya karbon yang dihasilkan dari proses karbonisasi biomassa dalam lingkungan yang terbatas oksigen. Secara lebih spesifik, *biochar* merupakan material yang berasal dari biomassa, yang diolah melalui proses pirolisis atau pembakaran pada suhu rendah ($< 700\text{ }^{\circ}\text{C}$) tanpa oksigen dan mengandung karbon tinggi. Proses pirolisis biomassa ini menghasilkan padatan, cairan, dan gas. Sumber bahan baku pembuatan *biochar* dapat berasal dari berbagai sumber, antara lain limbah biomassa, limbah hewan, limbah pertanian,

limbah industri, sisa hutan, limbah bioindustri, serta organisme laut dan akuatik (Pratiwi et al., 2021). Ketersediaan bahan baku yang melimpah di alam menjadikan *biochar* sebagai solusi yang menjanjikan untuk berbagai aplikasi.

Biochar memiliki beberapa keunggulan yang membuatnya menarik untuk digunakan dalam berbagai aplikasi, terutama dalam pengolahan air dan limbah cair. Keunggulan tersebut antara lain luas permukaan yang besar, porositas yang tinggi, kapasitas adsorpsi yang tinggi, biaya operasi yang rendah, serta sifatnya yang tidak beracun (Jagadeesh & Sundaram, 2023). Selain itu, *biochar* memiliki stabilitas fisika-kimia yang baik dalam air.

2.5 Sekam Padi

Sekam padi adalah produk sampingan dari proses penggilingan padi yang jumlahnya cenderung terus bertambah. Proses degradasi alami sekam padi berlangsung sangat lambat, sehingga akumulasinya dapat menimbulkan masalah lingkungan dan kesehatan. Sekam padi merupakan bagian pelindung keras yang menyelubungi biji padi, terdiri dari dua komponen yang saling terkait, yaitu lemma dan palea. Sekam padi umumnya memiliki warna kekuningan atau keemasan. Sekam padi merupakan bagian terluar dari gabah yang dihasilkan selama proses penggilingan. Sekitar 20% dari berat beras merupakan sekam padi, dan setelah dibakar akan menghasilkan abu dengan kandungan silika yang tinggi. Pembakaran sekam padi pada suhu di atas 650°C dapat meningkatkan kristalinitas silikanya, sehingga menghasilkan fasa kristobalit dan tridimit (Ummah et al., 2010).

Sekam padi adalah biomassa yang memiliki komposisi kompleks rincian komposisi kimia yang lebih spesifik, meliputi 9,02% kadar air, 3,03% protein kasar, 1,18% lemak, 35,68% serat kasar, 17,17% kadar abu, dan 33,71% karbohidrat dasar. Salah satu karakteristik unik sekam padi adalah kandungan silikanya yang sangat tinggi, berkisar antara 87-97% SiO₂, yang menjadikannya sebagai sumber silika potensial (Hasan et al., 2017).

2.6 Magnetit

Magnetit (Fe_3O_4) merupakan salah satu jenis oksida besi yang memiliki sifat kemagnetan paling kuat dibandingkan dengan oksida besi lainnya, seperti maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) dan hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Sifat kemagnetannya yang tinggi membuat magnetit banyak digunakan dalam berbagai bidang, termasuk biomedis, adsorben, dan katalis. Magnetit tersusun dari besi dalam dua tingkat oksidasi, yaitu Fe^{2+} dan Fe^{3+} , yang menghasilkan struktur spinel terbalik dan sifat feromagnetik pada suhu di bawah titik Curie (Mahmuda et al., 2014). Selain itu, magnetit juga menunjukkan sifat superparamagnetik ketika ukuran partikelnya sangat kecil, biasanya di bawah 30 nm. Dengan luas permukaannya yang besar dan kapasitas adsorpsi yang tinggi, magnetit sangat efektif dalam aplikasi pemisahan logam berat dan pengolahan air limbah.

Sintesis magnetit dapat dilakukan melalui berbagai metode, antara lain kopresipitasi, sol-gel, hidrotermal, elektrokimia, dan sonokimia. Dalam proses sintesis, magnetit terbentuk dari reaksi antara Fe^{2+} dan Fe^{3+} dengan rasio molar 1:2. Namun, karena Fe^{2+} mudah teroksidasi menjadi Fe^{3+} , pembentukan fase maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) sering terjadi sebagai produk sampingan. Untuk mencegah oksidasi ini, reaksi sintesis dapat dilakukan dalam atmosfer inert dengan aliran gas nitrogen atau kondisi vakum. Metode yang lebih maju, seperti sonokimia, bahkan mampu menghasilkan magnetit dengan magnetisasi yang lebih tinggi daripada metode presipitasi. Dalam aplikasi lingkungan, kombinasi magnetit dengan material lain, seperti karbon aktif, zeolit, atau kitosan, dapat meningkatkan efisiensi dalam menyerap kontaminan dari air limbah dan memudahkan proses pemisahan menggunakan medan magnet (Fisli et al., 2018).

Meskipun memiliki banyak kelebihan, magnetit juga memiliki kekurangan, yaitu kecenderungannya untuk teroksidasi, yang dapat mengurangi sifat magnetiknya. Oleh karena itu, berbagai upaya modifikasi telah dilakukan, seperti pelapisan dengan material lain untuk meningkatkan kestabilannya. Dengan karakteristiknya yang unik, magnetit terus dikembangkan untuk berbagai aplikasi teknologi dan lingkungan yang lebih luas.

2.7 Uji Karakteristik Adsorben

Uji karakteristik adsorben bertujuan untuk menganalisis struktur, ukuran pori, dan kandungan kimia yang terkandung dalam material yang diuji. Beberapa instrumen yang digunakan dalam pengujian ini antara lain *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Fourier Transform Infrared* (FTIR), dan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). SEM merupakan teknik yang memanfaatkan sinar-X untuk menganalisis karakteristik suatu zat dengan menghasilkan gambar yang menyerupai peta komposisi unsur pada permukaan material. Metode ini sering digunakan dalam penelitian untuk mengamati kandungan dan sebaran logam berat pada permukaan karbon (Durán-Valle, 2012)

Instrumen FTIR digunakan untuk mengidentifikasi komponen organik dalam sampel, meliputi jenis ikatan kimia dan kandungan senyawa seperti protein, karbohidrat, dan lipid. Prinsip kerja FTIR didasarkan pada interaksi antara radiasi inframerah dengan molekul dalam sampel. Ketika radiasi IR dilewatkan melalui sampel, sebagian energi akan diserap dan sebagian lagi akan ditransmisikan. Hasilnya adalah spektrum yang menggambarkan pola penyerapan dan transmisi molekuler, sehingga menghasilkan sidik jari unik yang berbeda untuk setiap struktur molekul (Elina et al., 2023).

Sedangkan AAS atau Spektrofotometri Serapan Atom merupakan teknik analisis yang mengukur penyerapan radiasi elektromagnetik oleh atom-atom gas bebas pada panjang gelombang tertentu. Prinsip kerja AAS didasarkan pada hubungan linier antara sinyal penyerapan dan konsentrasi atom penyerap di lintasan optik, sehingga teknik ini sangat efektif untuk analisis kuantitatif unsur logam dalam suatu sampel (Maharani et al., 2024).

2.8 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu terkait sekam padi sebagai adsorben logam berat disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Referensi	Jenis Adsorben	Hasil Penelitian
----	-----------	----------------	------------------

1	Karakterisasi Pembuatan Adsorben dari Sekam Padi Sebagai Pengadsorp Logam Timbal pada Limbah Cair)(Wardalia, 2016)	Sekam padi dengan aktivator HCl, NaOH, dan tanpa aktivator	1. Efisiensi penyerapan maksimum mencapai 99% pada kondisi ukuran partikel adsorben 80 mesh dan aktivator HCl 0,1 M. 2. Proses adsorpsi mengikuti persamaan isoterm Langmuir. 3. Luas permukaan adsorben terbesar (210,712 m²/g) diperoleh dengan aktivator HCl 0,1 M.
2	Pembuatan Adsorben dari Sekam Padi sebagai Penyerap Logam Berat Tembaga (Cu) dan Timbal (Pb) dalam Air Limbah (Halim et al., 2021).	Sekam padi dengan aktivator HCl	1. Karbon aktif dari sekam padi memiliki efisiensi penyerapan yang cukup tinggi terhadap ion logam Cu dan Pb. Efisiensi penyerapan tertinggi untuk ion logam Cu adalah 98,63%, yang diperoleh dengan menggunakan massa adsorben 2 g dan waktu pengadukan selama 180 menit. Sementara itu, efisiensi penyerapan tertinggi untuk ion logam Pb mencapai 99,39% pada kondisi yang sama. 2. Kapasitas adsorpsi tertinggi yang dicapai untuk ion logam Cu adalah 0,3205 mg/g, sedangkan untuk ion logam Pb adalah 0,1377 mg/g. 3. Efisiensi penyerapan meningkat seiring dengan bertambahnya massa adsorben dan waktu pengadukan. Semakin lama waktu pengadukan dan semakin besar massa adsorben yang digunakan, semakin besar

			pula efisiensi penyerapan ion logam tersebut.
3	Sekam Padi untuk Menyerap Ion Logam Tembaga dan Timbal dalam Air Limbah (Nurhasni et al., 2014)	Sekam padi	1. Hasil analisis menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) menunjukkan efisiensi penyerapan tertinggi untuk ion logam Pb pada air limbah multikomponen mencapai 99,38%, sedangkan untuk ion logam Cu pada air limbah laboratorium efisiensi penyerapan tertinggi mencapai 78,57 %. 2. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa efisiensi penyerapan meningkat seiring dengan bertambahnya massa adsorben dan waktu pengadukan. Kapasitas adsorpsi tertinggi yang dicapai pada ion logam Cu sebesar 0,3205 mg/g, sedangkan pada ion logam Pb sebesar 0,1377 mg/g.

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu yang telah dikaji, sekam padi telah banyak digunakan sebagai adsorben dalam proses penghilangan logam berat seperti Pb dari air limbah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivasi dapat meningkatkan efisiensi penyerapan. Namun, penelitian-penelitian sebelumnya masih terbatas pada penggunaan sekam padi dalam bentuk karbon aktif atau yang hanya diaktivasi dengan larutan kimia seperti HCl dan NaOH, tanpa adanya modifikasi lebih lanjut yang dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi.

Penelitian ini berupaya untuk mengeksplorasi efektivitas *biochar* sekam padi yang dimodifikasi dengan magnetit sebagai adsorben logam berat Pb pada air

limbah industri batik di Yogyakarta. Modifikasi dengan magnetit diharapkan dapat meningkatkan sifat magnetik adsorben sehingga memperlancar proses bebas setelah adsorpsi, serta meningkatkan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi biochar terhadap ion Pb. Selain itu, penelitian ini akan difokuskan pada aplikasi spesifik pada industri batik yang memiliki karakteristik air limbah yang kompleks dengan berbagai kandungan pencemar, termasuk logam berat.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada Oktober 2024 hingga Februari 2025. Lokasi penelitian berada di Laboratorium Kualitas Air, Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

3.2 Alat, Bahan, dan Instrumen

- 1) Alat
 - a. Oven
 - b. Ayakan 70 mesh
 - c. Neraca analitik
 - d. Corong kaca
 - e. Kaca arloji
 - f. Blender
 - g. Pipet ukur (1, 5, dan 10 mL)
 - h. Erlenmeyer (100, 250) mL
 - i. Labu ukur (100 dan 1000 mL)
 - j. Gelas beaker (100 dan 1000 mL)
 - k. Mortar dan alu
 - l. Spatula

2) Bahan

- a. Sekam padi
- b. Limbah batik cair
- c. Larutan induk Pb 100 mg/L
- d. Larutan H_3PO_4 10%
- e. Larutan NaOH 5 M
- f. Larutan HCl 0,1 M
- g. Larutan HNO_3 pekat

3) Instrumen

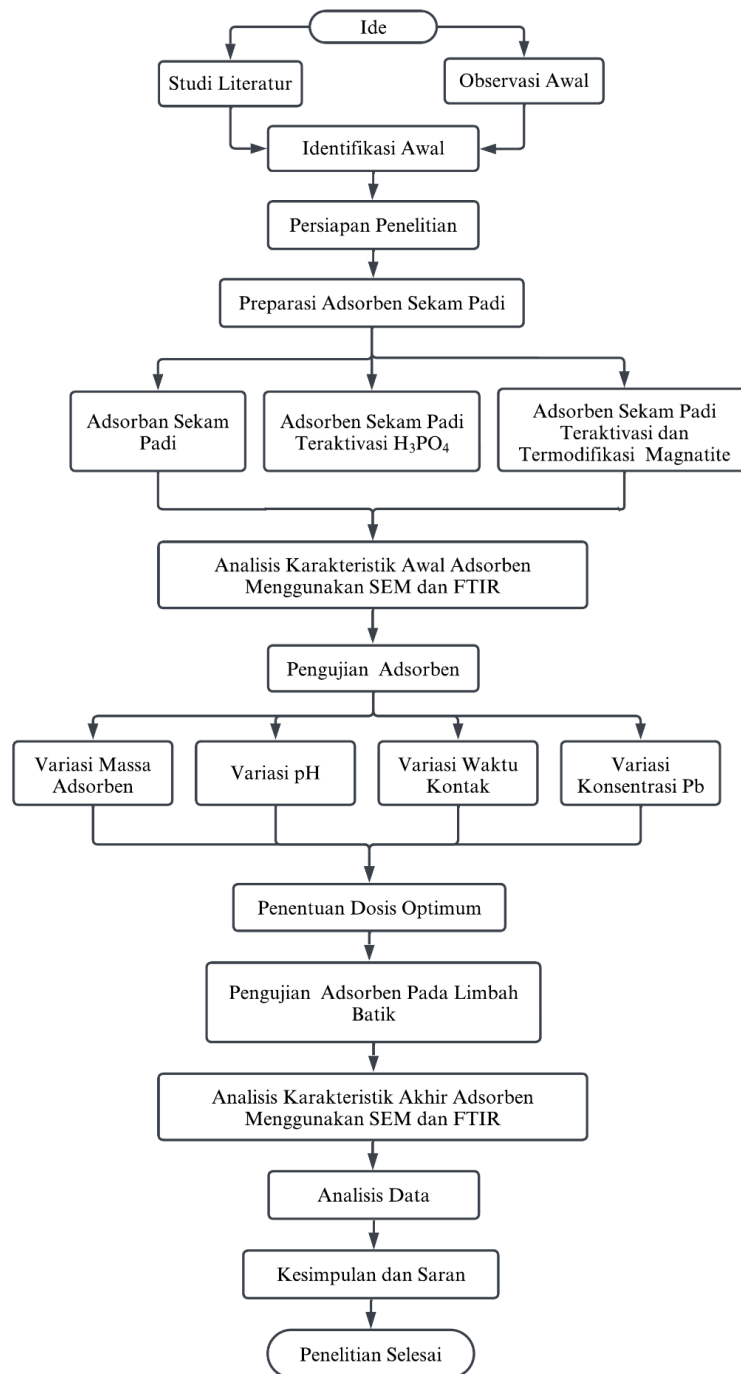
- a. Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)
- b. *Fourier Transform Infrared* (FTIR)
- c. *Scanning Electron Microscope* (SEM)

3.3 Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan dua jenis variabel untuk mengetahui efektivitas adsorpsi *biochar* sekam padi terhadap logam berat timbal (Pb) pada limbah cair industri batik di Yogyakarta. Variabel terikat dalam penelitian ini meliputi efisiensi *removal* Pb (%) dan kapasitas adsorpsi *biochar* (mg/L). Sedangkan variabel bebas terdiri dari dosis adsorben (mg/L), pH larutan, waktu kontak (menit), dan konsentrasi awal Pb di larutan (mg/L). Melalui variasi parameter tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi optimal penggunaan *biochar* sekam padi dalam menyerap logam berat timbal (Pb) dari limbah cair industri batik, sehingga dapat menjadi solusi efektif dalam pengolahan limbah ini.

3.4 Prosedur Penelitian

Alur Penelitian mengenai pemanfaatan biochar sekam padi sebagai adsorben logam timbal (Pb) pada limbah batik secara umum disajikan pada Gambar 3. 1.



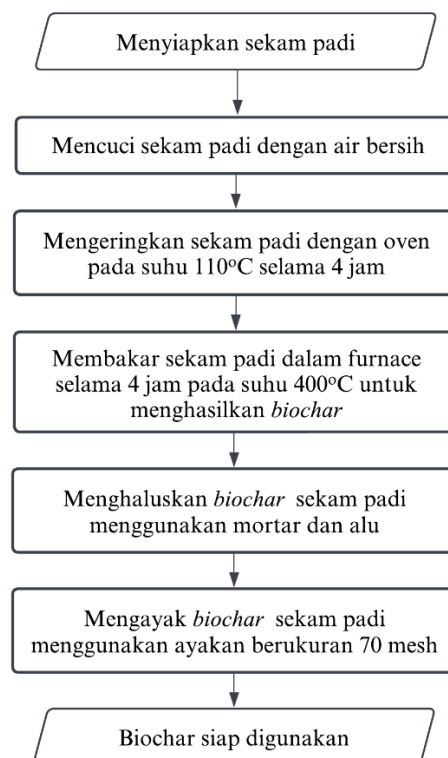
Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian

3.4.1 Pengambilan Sampel Limbah Cair Batik

Sampel limbah cair batik yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari industri batik yang berlokasi di daerah Yogyakarta. Prosedur pengambilan sampel mengikuti standar SNI 6989.59:2008 tentang Metoda Pengambilan Sampel Air Limbah. Sampel dikumpulkan dalam wadah plastik 5 liter untuk menjaga kualitas dan kuantitas sesuai dengan kebutuhan analisis. Penyimpanan sampel dilakukan dalam jangka waktu maksimal 6 bulan.

3.4.2 Preparasi Adsorben

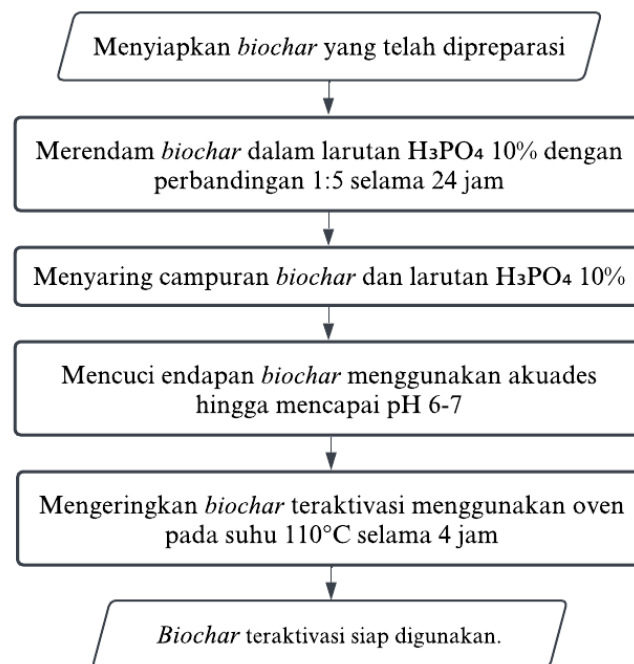
Tahapan awal dalam pembuatan adsorben adalah pembuatan sekam padi menjadi *biochar*. Sekam padi terlebih dahulu dicuci untuk menghilangkan kotoran yang masih menempel dan dikeringkan. Setelah kering, sekam padi dikarbonisasi menggunakan furnace pada suhu 400°C selama 4 jam. Setelah proses karbonisasi selesai, arang sekam padi dihancurkan dan diayak menggunakan ayakan berukuran 70 mesh untuk mendapatkan partikel dengan ukuran seragam (Wardalia, 2016). Alur lengkap tahapan preparasi adsorben disajikan pada Gambar 3. 2.



Gambar 3. 2 Tahapan Preparasi Adsorben

3.4.3 Aktivasi *Biochar* Sekam Padi

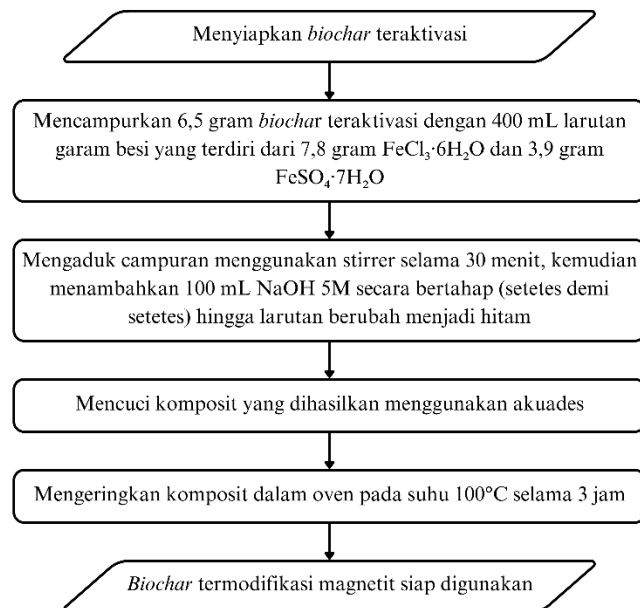
Proses aktivasi *biochar* dilakukan dengan mencampur *biochar* dan H_3PO_4 10% selama 24 jam dengan perbandingan 1:5. Campuran tersebut kemudian disaring dan endapannya dicuci dengan akuades hingga mencapai pH 6-7. *Biochar* yang telah diaktivasi kemudian dikeringkan untuk meningkatkan daya serapnya. Alur lengkap tahapan aktivasi *biochar* sekam padi disajikan pada Gambar 3. 3.



Gambar 3. 3 Tahapan Aktivasi *Biochar* Sekam Padi

3.4.4 Modifikasi *Biochar* Sekam Padi dengan Magnetit

Modifikasi dilakukan dengan cara mencampurkan 6,5 gram *biochar* teraktivasi dengan 400 mL larutan garam besi yang terdiri dari 7,8 gram $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 3,9 gram $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Campuran diaduk selama 30 menit dan ditambahkan 100 mL NaOH 5M hingga terbentuk endapan komposit berwarna hitam. Komposit yang dihasilkan dicuci dan dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 3 jam (Chander et al., 2024). Alur lengkap tahapan modifikasi *biochar* sekam padi dengan magnetit disajikan pada Gambar 3. 4.



Gambar 3. 4 Tahapan Modifikasi *Biochar* Sekam Padi dengan Magnetit

3.4.5 Karakterisasi Adsorben

Karakterisasi adsorben dilakukan untuk mengetahui perubahan morfologi permukaan serta gugus fungsi yang terdapat dalam material adsorben. Uji karakterisasi ini dilakukan pada biochar sebelum aktivasi, *biochar* setelah aktivasi dengan H_3PO_4 , *biochar* termodifikasi magnetit dan biochar setelah proses adsorpsi. Analisis karakterisasi dilakukan menggunakan dua instrumen, yaitu *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Instrumen SEM digunakan untuk mencitrakan morfologi permukaan adsorben dengan pemindaian menggunakan pancaran elektron tinggi sehingga menghasilkan gambar perbesaran yang detail. Sementara itu, FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat dalam adsorben dengan menganalisis serapan spektrum *infrared* pada sampel.

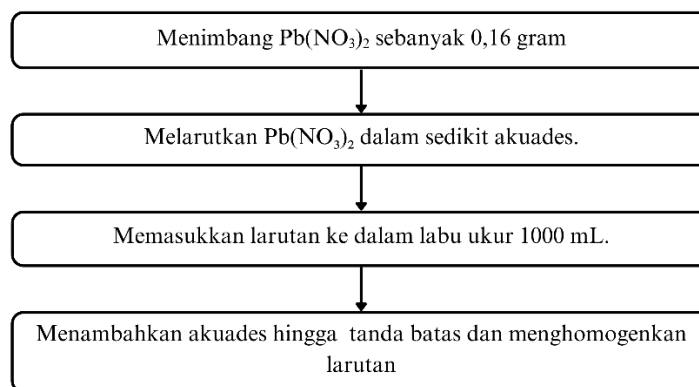
3.4.6 Proses Adsorpsi

Proses adsorpsi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan *biochar* sekam padi dalam adsorpsi ion logam timbal (Pb). Proses ini melibatkan beberapa tahapan utama, termasuk penimbangan massa adsorben, pengaturan pH larutan, pengadukan suspensi, pemisahan adsorben melalui penyaringan, serta analisis hasil

menggunakan instrumen SSA. Pada proses adsorpsi tahap pengujian kondisi optimum, digunakan limbah buatan yang mengandung ion Pb pada konsentrasi tertentu untuk menjamin konsistensi dan pengendalian variabel pada proses adsorpsi. Variabel yang diuji mencakup massa adsorben, waktu kontak, pH larutan, dan konsentrasi awal Pb, guna menentukan kondisi optimum untuk adsorpsi Pb oleh *biochar* sekam padi dalam limbah cair industri batik.

3.4.6.1 Pembuatan Larutan Induk Pb dan Larutan Standar Pb

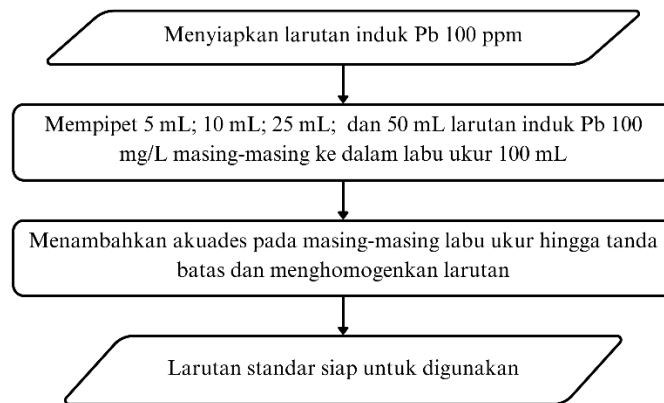
Larutan induk Pb digunakan dalam beberapa prosedur dalam penelitian ini. Pembuatan larutan Pb 100 mg/L diawali dengan menimbang 0,16 gram $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ secara hati-hati. Senyawa tersebut kemudian dilarutkan dalam sedikit akuades hingga larut sempurna. Setelah itu, larutan dimasukkan ke dalam labu ukur 1000 mL, kemudian ditambahkan akuades hingga mencapai tanda batas. Larutan dikocok hingga homogen sehingga menghasilkan larutan induk Pb dengan konsentrasi 100 mg/L. Tahapan pembuatan larutan induk Pb disajikan pada Gambar 3. 5.



Gambar 3. 5 Tahapan Pembuatan Larutan induk Pb 100 mg/L

Selanjutnya, larutan standar Pb dengan konsentrasi 5, 10, 25, dan 50 mg/L dibuat dengan cara memipet larutan induk 100 mg/L sebanyak 5 mL, 10 mL, 25 mL, dan 50 mL ke dalam labu ukur 100 mL. Masing-masing larutan kemudian diencerkan dengan akuades hingga mencapai tanda batas dan dikocok hingga homogen. Dengan cara tersebut, diperoleh larutan standar Pb siap pakai yang

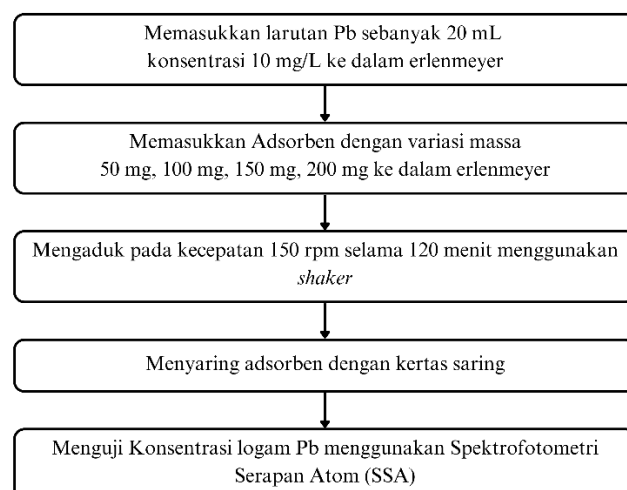
digunakan untuk analisis selanjutnya.. Tahapan pembuatan larutan standar Pb disajikan pada Gambar 3. 6.



Gambar 3. 6 Tahapan Pembuatan Standar Pb

3.4.6.2 Penentuan Massa Optimum

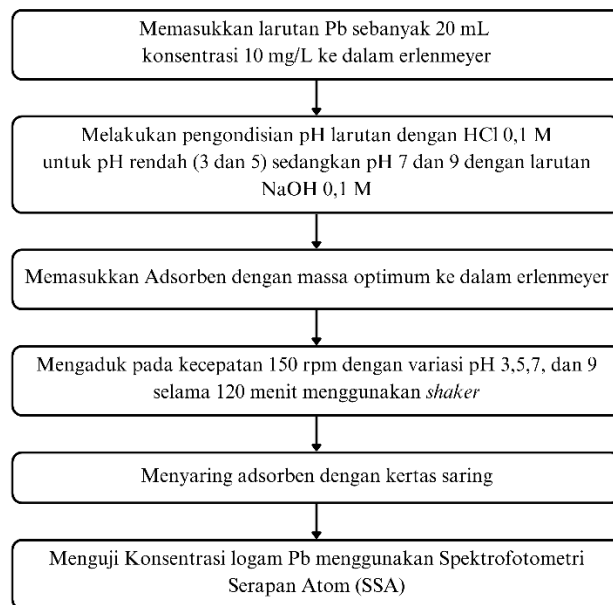
Variasi massa adsorben yang digunakan untuk menentukan massa optimum adalah 50, 100, 150, dan 200 mg. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kondisi optimum dalam proses adsorpsi. Pada parameter ini, larutan logam Pb digunakan tanpa pengkondisian pH, dengan waktu kontak 120 menit dan kecepatan pengadukan 150 rpm. Tahapan penentuan massa optimum adsorben disajikan pada Gambar 3. 7.



Gambar 3. 7 Tahapan Penentuan Massa Optimum

3.4.6.3 Penentuan pH Optimum

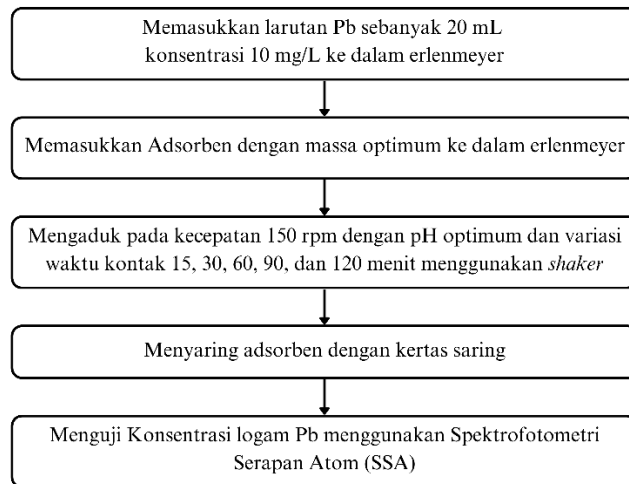
Penentuan pH optimum dilakukan dengan variasi pH 3, 5, 7, dan 9 pada larutan logam Pb. Variasi ini dipilih untuk mewakili kondisi asam pada pH 3 dan 5, kondisi netral pada pH 7, dan kondisi basa pada pH 9, sehingga dapat ditentukan pH terbaik untuk proses adsorpsi logam berat. Tahapan penentuan pH optimum disajikan pada Gambar 3. 8.



Gambar 3. 8 Tahapan Penentuan pH Optimum

3.4.6.4 Penentuan Waktu Kontak Optimum

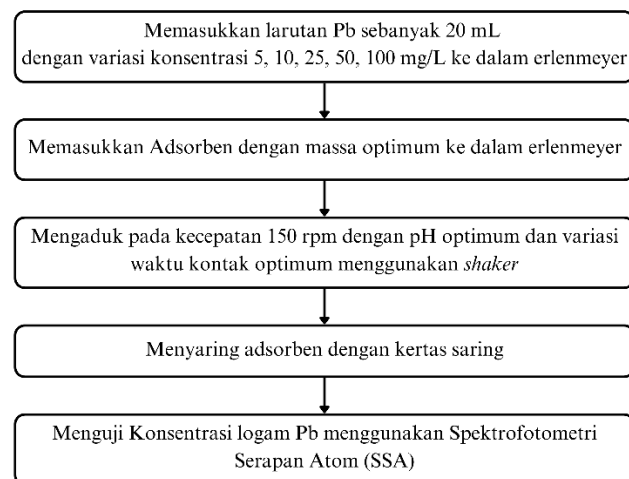
Variasi waktu kontak yang digunakan untuk menentukan waktu kontak optimum adalah 15, 30, 60, 90, dan 120 menit. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kondisi optimum dalam proses adsorpsi. Tahapan penentuan waktu kontak optimum disajikan pada Gambar 3. 9.



Gambar 3. 9 Tahapan Penentuan Waktu Kontak Optimum

3.4.6.5 Penentuan Konsentrasi Optimum

Variasi konsentrasi yang digunakan untuk menentukan konsentrasi optimum adalah 5, 10, 25, 50 dan 100 mg/L. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kondisi optimum dalam proses adsorpsi. Tahapan penentuan konsentrasi optimum disajikan pada Gambar 3. 10.

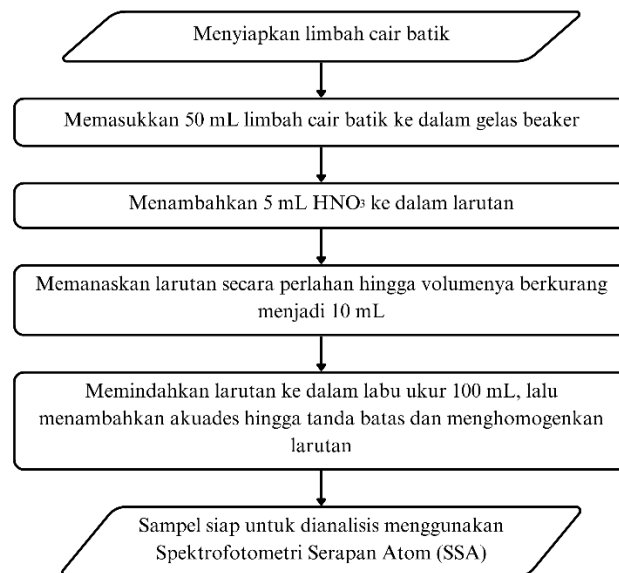


Gambar 3. 10 Tahapan Penentuan Konsentrasi Optimum

3.4.7 Preparasi Limbah Cair Batik

Penentuan kadar logam dalam limbah cair batik dilakukan dengan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA). Preparasi sampel sebelum analisis dilakukan melalui metode destruksi, yaitu suatu proses yang bertujuan untuk

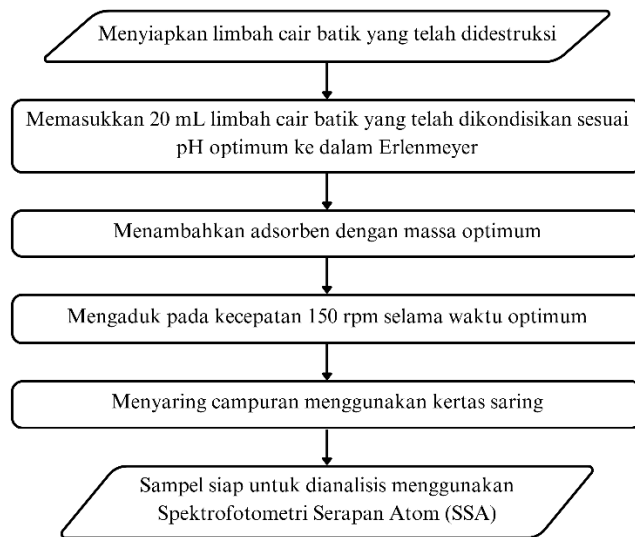
memecah senyawa dan memisahkan unsur logam dari ion atau komponen lainnya. Tahapan destruksi air limbah mengacu pada SNI 6989.8:2009 tentang Metode Pengujian Timbal dengan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)-nyala. Tahapan preparasi limbah cair batik disajikan pada Gambar 3. 11.



Gambar 3. 11 Tahapan Preparasi Limbah Cair Batik

3.4.8 Pengujian Kondisi Optimum Adsorben pada Limbah Batik

Setelah kondisi optimum dari setiap variabel uji adsorpsi ditentukan, adsorben diaplikasikan pada limbah cair batik. Proses ini dilakukan pada limbah yang telah melalui tahap destruksi untuk memastikan efektivitas adsorpsi logam Pb. Tahapan lengkap uji adsorpsi logam Pb pada limbah cair batik disajikan pada Gambar 3. 12.



Gambar 3. 12 Tahapan Pengujian Kondisi Optimum Adsorben pada Limbah Batik

3.4.9 Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk memahami hasil penelitian dan mengevaluasi efektivitas adsorpsi biochar terhadap logam Pb. Model isoterm yang digunakan bertujuan untuk menggambarkan efisiensi penyerapan dan menentukan interaksi antara adsorbat dan adsorben.

3.4.8.1 Model Isoterm Adsorpsi

Dalam penelitian ini, model isoterm Langmuir dan Freundlich digunakan untuk menganalisis hubungan antara konsentrasi zat terlarut yang teradsorpsi dan konsentrasi larutan pada kesetimbangan.

1) Isoterm Langmuir

Isoterm Langmuir menggambarkan penyerapan dalam lapisan *monolayer* dengan asumsi bahwa tidak ada interaksi antara adsorbat dan semua situs molekuler memiliki afinitas yang sama. Persamaan yang digunakan untuk isoterm Langmuir seperti persamaan (1) berikut:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_0 b} + \frac{C_e}{Q_0} \quad \dots (1)$$

Keterangan:

C_e = konsentrasi kesetimbangan larutan (mg/L)

q_e = jumlah zat yang diadsorpsi per gram adsorben (mg/g)

q_0 = kapasitas adsorpsi (mg/g)

b = intensitas adsorpsi (L/mg)

2) Isoterm Freundlich

Isoterm Freundlich menggambarkan adsorpsi zat terlarut pada permukaan adsorben dengan asumsi bahwa permukaannya heterogen dan tidak ada asosiasi atau disosiasi. Persamaan yang digunakan untuk isoterm Freundlich seperti persamaan (2) berikut:

$$\log \frac{x_m}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \dots (2)$$

Keterangan:

x = jumlah zat terlarut yang diserap (mg)

m = gram adsorben yang digunakan (g)

C_e = konsentrasi kesetimbangan larutan (mg/L)

k = kapasitas adsorpsi (mg/g)

n = intensitas adsorpsi (L/g)

3.4.8.2 Analisis Efisiensi Kemampuan Adsorben

Untuk menganalisis data dari setiap uji adsorpsi dan menentukan kondisi optimum setiap variabel, perlu diperhatikan efisiensi penyerapan atau kapasitas adsorpsi untuk menyerap logam berat timbal (Pb). Persamaan yang digunakan untuk efisiensi penyerapan seperti persamaan (3) berikut:

$$E = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100\% \dots (3)$$

Keterangan:

E = Efisiensi Penyerapan (%)

C_o = Konsentrasi Awal (mg/L)

C_e = Konsentrasi Akhir (mg/L)

BAB IV

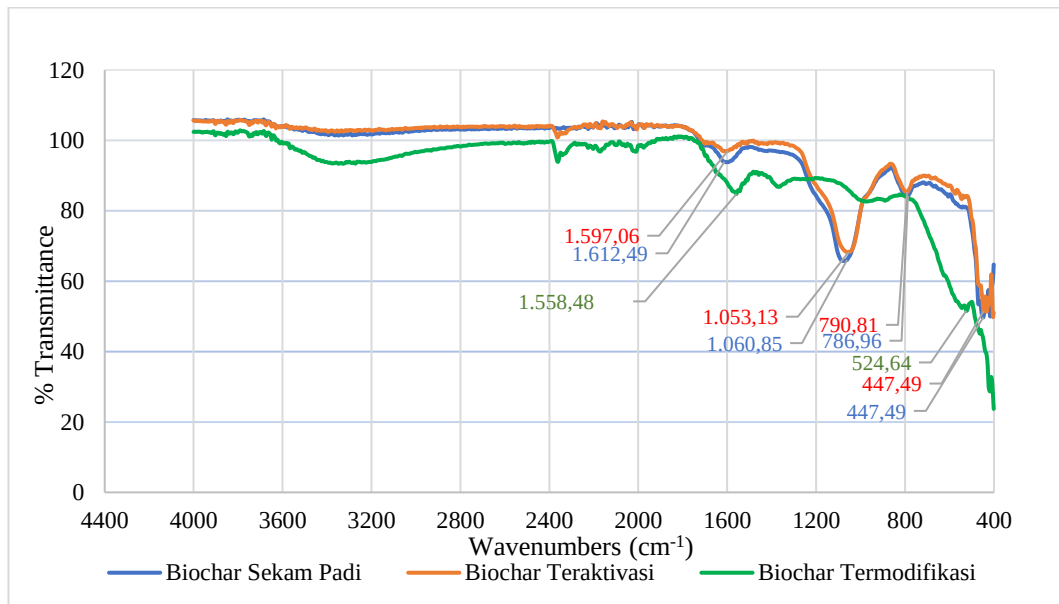
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Adsorben

Karakterisasi adsorben bertujuan untuk mengevaluasi potensi sekam padi dalam proses adsorpsi logam berat Pb. Selain itu, karakterisasi ini juga dilakukan untuk mengidentifikasi jenis senyawa, gugus fungsi, serta struktur dan pori permukaan adsorben. Analisis dilakukan dengan menggunakan instrumen laboratorium *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) di Laboratorium Kualitas Air, Teknik Lingkungan, FTSP UII.

4.1.1 Pengujian *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Fourier Transform Infra-Red (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada adsorben secara kualitatif, dengan tujuan menganalisis perubahan yang terjadi sebelum dan sesudah proses adsorpsi logam Pb. Gugus fungsi tertentu, seperti hidroksil (-OH) dan karbonil (C=O), memiliki peran penting dalam mekanisme adsorpsi karena dapat berinteraksi dengan ion logam berat melalui ikatan kimia (Yang et al., 2019). Hasil analisis FTIR sebelum proses adsorpsi disajikan dalam Gambar 4. 1, yang menunjukkan spektrum serapan gugus fungsi pada adsorben sebelum digunakan untuk mengadsorpsi logam Pb.



Gambar 4. 1 Hasil Uji FTIR Sebelum Adsorpsi

Hasil yang ditampilkan dalam grafik pada Gambar 4.1 menunjukkan adanya titik puncak yang spesifik, yang dapat diidentifikasi lebih lanjut berdasarkan klasifikasi yang tercantum dalam Tabel 4.1.

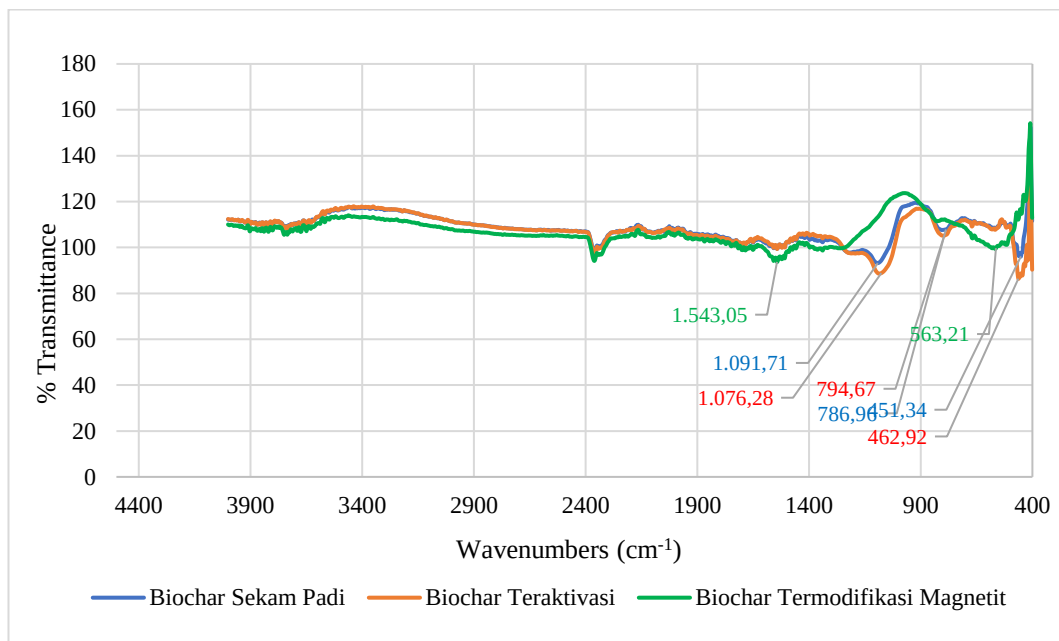
Tabel 4. 1 Interpretasi Gugus Adsorben Sebelum Adsorpsi

Puncak	Biochar Sekam Padi	Biochar Sekam Padi Teraktivasi	Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	Panjang Gelombang (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi
A	1612,49	1597,06	1558,48	1500-1680	C=C
B	1060,85	1053,13	-	1100-1000	Si-O-Si
C	786,96	790,81	-	860-760	Si-C
D	-	-	524,64	520-590	Fe-O
E	447,49	447,49	-	520-430	C-O-C

Dari hasil analisis FTIR, beberapa gugus fungsi yang memiliki peran signifikan dalam proses adsorpsi logam Pb dapat diidentifikasi. Gugus hidroksil (-OH) yang biasanya terdeteksi pada kisaran 3200-3600 cm⁻¹ tidak terlihat pada spektrum, namun gugus oksigen lainnya seperti Fe-O dan Si-O-Si berperan penting dalam mekanisme adsorpsi logam Pb. Berdasarkan data puncak serapan diketahui bahwa gugus alkena (C=C) teridentifikasi pada panjang gelombang 1612,49 cm⁻¹ pada biochar sekam padi, 1597,06 cm⁻¹ pada *biochar* sekam padi teraktivasi,

dan $1558,48\text{ cm}^{-1}$ pada biochar sekam padi teraktivasi magnetit. Perbedaan posisi puncak tersebut mengindikasikan adanya perubahan konjugasi struktur pada material yang mungkin disebabkan oleh aktivasi dengan agen kimia. Gugus siloksan (Si-O-Si) terdeteksi pada biochar sekam padi dengan panjang gelombang $1060,85\text{ cm}^{-1}$ dan pada biochar sekam padi teraktivasi pada $1053,13\text{ cm}^{-1}$, sedangkan pada biochar sekam padi termodifikasi magnetit tidak terdeteksi. Hal ini mengindikasikan bahwa proses modifikasi dapat menyebabkan terjadinya transformasi gugus silanol dan siloksan menjadi gugus fungsi yang berbeda (Wimarsela et al., 2021). Selanjutnya, gugus Si-C hanya terdeteksi pada *biochar* sekam padi ($786,96\text{ cm}^{-1}$) dan *biochar* sekam padi teraktivasi ($790,81\text{ cm}^{-1}$), tetapi tidak terdeteksi pada biochar sekam padi teraktivasi magnetit. Hal ini mengindikasikan bahwa proses modifikasi dapat menyebabkan terjadinya perubahan struktur karbon-silikon pada *biochar*. Pada biochar sekam padi termodifikasi magnetit, ditemukan gugus Fe-O pada panjang gelombang $524,64\text{ cm}^{-1}$ yang mengindikasikan adanya ion besi pada struktur material setelah proses modifikasi dengan magnetit. Gugus C-O-C terdeteksi pada panjang gelombang $447,49\text{ cm}^{-1}$ baik pada *biochar* sekam padi maupun *biochar* sekam padi teraktivasi, tetapi tidak terdeteksi pada *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit.

Hasil analisis FTIR setelah proses adsorpsi disajikan dalam Gambar 4.2 yang menunjukkan spektrum serapan gugus fungsi pada adsorben setelah digunakan untuk mengadsorpsi logam Pb.



Gambar 4. 2 Hasil Uji FTIR Setelah Adsorpsi

Hasil yang ditampilkan dalam grafik pada Gambar 4.1 menunjukkan adanya titik puncak yang spesifik, yang dapat diidentifikasi lebih lanjut berdasarkan klasifikasi yang tercantum dalam Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Interpretasi Gugus Adsorben Setelah Adsorpsi

Puncak	Biochar Sekam Padi	Biochar Sekam Padi Teraktivasi	Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	Panjang Gelombang (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi
A	-	-	1543,05	1500-1680	C=C
B	1.091,71	1076,28	-	1100-1000	Si-O-Si
C	786,96	794,67	-	860-760	Si-C
D	-	-	563,21	520-590	Fe-O
E	451,34	462,92	-	520-430	C-O-C

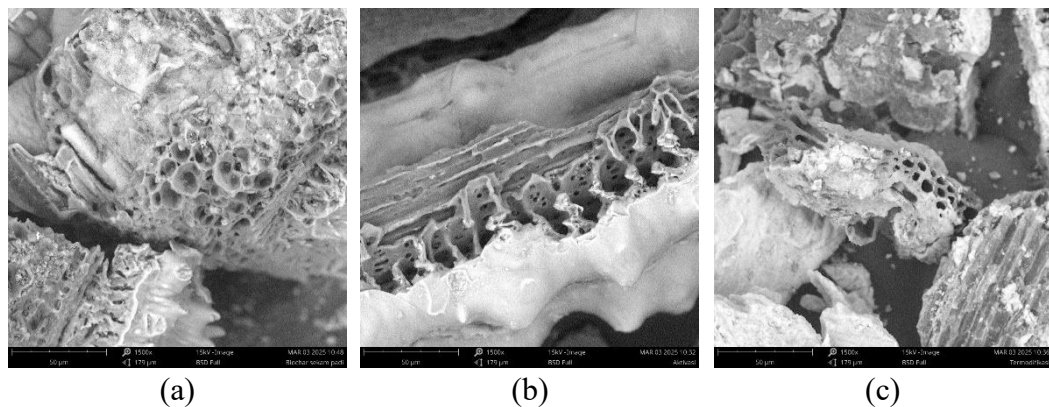
Setelah proses adsorpsi, spektrum FTIR berubah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 2 dan Tabel 4. 2. Gugus C=C yang sebelumnya terdeteksi pada biochar sekam padi (1612,49 cm⁻¹) dan *biochar* sekam padi teraktivasi (1597,06 cm⁻¹) kini tidak ditemukan, sedangkan pada *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit muncul gugus C=C baru pada panjang gelombang 1543,05 cm⁻¹. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi dapat menyebabkan perubahan pada ikatan alkena

yang terdapat pada bahan penyerap. Gugus Si-O-Si bergeser setelah adsorpsi, dengan puncak serapan pada $1091,71\text{ cm}^{-1}$ pada *biochar* sekam padi dan $1076,28\text{ cm}^{-1}$ pada *biochar* sekam padi teraktivasi, sedangkan pada *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit tetap tidak terdeteksi. Pada spektrum setelah adsorpsi, gugus Fe-O pada *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit bergeser dari $524,64\text{ cm}^{-1}$ menjadi $563,21\text{ cm}^{-1}$. Selain itu, gugus C-O-C sedikit berubah setelah adsorpsi, dengan puncak bergeser dari $447,49\text{ cm}^{-1}$ menjadi $451,34\text{ cm}^{-1}$ pada *biochar* sekam padi dan $462,92\text{ cm}^{-1}$ pada *biochar* sekam padi teraktivasi.

Dari hasil FTIR sebelum dan sesudah adsorpsi, terlihat bahwa *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit memiliki gugus Fe-O yang tidak terdapat pada *biochar* sekam padi biasa maupun *biochar* sekam padi teraktivasi. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan magnetit berhasil memasukkan gugus oksida besi ke dalam struktur *biochar* yang berpotensi meningkatkan kapasitas adsorpsi ion logam. Perbedaan signifikan lainnya adalah pada *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit, beberapa gugus yang sebelumnya terdeteksi pada *biochar* sekam padi dan *biochar* sekam padi teraktivasi, seperti Si-O-Si dan Si-C, menghilang setelah dimodifikasi. Hal ini menunjukkan bahwa proses modifikasi dapat menyebabkan perubahan signifikan pada komposisi kimia *biochar* (Wimarsela et al., 2021). Hilangnya beberapa puncak gugus C=C pada *biochar* sekam padi ($1612,49\text{ cm}^{-1}$) dan *biochar* sekam padi teraktivasi ($1597,06\text{ cm}^{-1}$) setelah adsorpsi juga mengindikasikan adanya interaksi antara gugus tersebut dengan ion Pb^{2+} . Namun, pada *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit, gugus C=C tetap terdeteksi meskipun mengalami pergeseran ke $1543,05\text{ cm}^{-1}$, yang menunjukkan bahwa gugus ini juga berperan dalam proses adsorpsi Pb pada adsorben termodifikasi magnetit. Setelah adsorpsi, terlihat fluktuasi panjang gelombang pada beberapa gugus, terutama pada gugus C=C, Si-O-Si, dan Fe-O yang mengindikasikan adanya interaksi antara adsorben dengan zat yang diadsorpsi.

4.1.2 Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

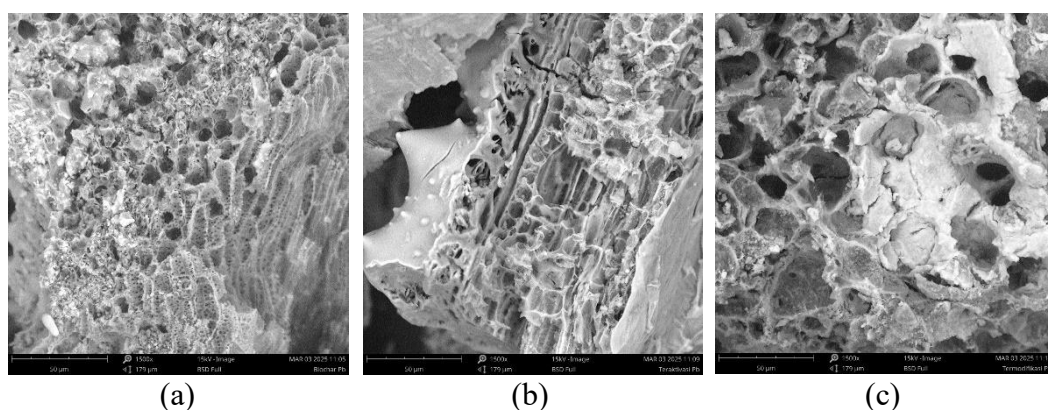
Pengujian menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk menganalisis morfologi permukaan *biochar* sekam padi yang digunakan sebagai adsorben sebelum dan sesudah proses adsorpsi. Pada penelitian ini menggunakan perbesaran 1500x untuk menangkap gambar morfologi permukaan *biochar* sekam padi yang digunakan. Hasil analisis SEM dengan perbesaran 1500x yang menunjukkan perbedaan struktur permukaan pada berbagai jenis *biochar*, yaitu *biochar* sekam padi tanpa aktivasi, *biochar* teraktivasi, dan *biochar* termodifikasi magnetit disajikan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 (a) Permukaan *Biochar* Adsorben Sekam Padi (b) Permukaan *Biochar* Adsorben Sekam Padi Teraktivasi (c) Permukaan *Biochar* Adsorben Sekam Padi Termodifikasi Magnetit

Pengujian menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk menganalisis morfologi permukaan *biochar* sekam padi yang digunakan sebagai adsorben sebelum dan sesudah proses adsorpsi. Hasil analisis SEM yang menunjukkan perbedaan struktur permukaan pada berbagai jenis *biochar*, yaitu *biochar* sekam padi yang tidak diaktivasi, *biochar* yang diaktivasi, dan *biochar* yang dimodifikasi magnetit disajikan pada Gambar 4. 3. Pada Gambar 4. 3(a), permukaan *biochar* sekam padi yang tidak diaktivasi menunjukkan struktur yang masih relatif kasar dengan pori-pori yang belum berkembang secara signifikan. Hal ini disebabkan oleh proses karbonisasi yang hanya menghasilkan struktur berpori alami tanpa aktivasi lebih lanjut. Gambar 4.3(b) menunjukkan permukaan *biochar* yang telah mengalami proses aktivasi. Terlihat bahwa pori-pori *biochar* tampak

lebih terbuka dan berkembang dengan baik. Proses aktivasi meningkatkan luas permukaan spesifik dan jumlah situs aktif yang tersedia untuk adsorpsi ion logam (Goswami et al., 2022). Sementara itu, pada Gambar 4.3 (c), permukaan *biochar* yang telah dimodifikasi dengan magnetit menunjukkan adanya butiran halus atau titik-titik agregat yang tersebar di permukaan *biochar*. Partikel-partikel ini memberikan sifat magnetik pada adsorben, sehingga memudahkan sinkronisasi setelah proses adsorpsi (Long et al., 2023). Struktur pori masih terlihat cukup terbuka, memungkinkan terjadinya interaksi antara ion Pb dengan situs aktif yang terdapat pada *biochar* yang dimodifikasi. Setelah proses adsorpsi selesai, dilakukan lagi pengujian SEM menggunakan perbesaran 1500x terhadap *biochar* sekam padi yang tidak diaktivasi, *biochar* yang diaktivasi, dan *biochar* yang dimodifikasi magnetit yang disajikan pada Gambar 4. 4.



Gambar 4. 4 (a) Permukaan *Biochar* Adsorben Sekam Padi Setelah Adsorpsi (b) Permukaan *Biochar* Adsorben Sekam Padi Teraktivasi Setelah Adsorpsi (c) Permukaan *Biochar* Adsorben Sekam Padi Termodifikasi Magnetit Setelah Adsorpsi

Setelah proses adsorpsi, terjadi perubahan morfologi pada permukaan adsorben seperti yang ditunjukkan pada gambar bawah. Pada Gambar 4.4 (a) setelah adsorpsi, permukaan *biochar* sekam padi tanpa aktivasi terlihat mengalami penyumbatan pori akibat akumulasi ion logam Pb. Fenomena ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi telah terjadi dan ion Pb menempati sisi aktif yang tersedia pada *biochar*. Pada Gambar 4.4 (b), permukaan *biochar* yang teraktivasi setelah adsorpsi menunjukkan perubahan yang signifikan dengan adanya partikel yang

teradsorpsi yang menutupi sebagian besar pori-pori. Gambar 4.4 (c) setelah adsorpsi menunjukkan bahwa biochar yang dimodifikasi magnetit menunjukkan perubahan yang jelas di mana partikel yang teradsorpsi menutupi sebagian permukaan pori.

Perlu diketahui bahwa analisis SEM hanya memberikan informasi tentang morfologi permukaan dan tidak dapat digunakan untuk menentukan secara akurat peningkatan atau penurunan kapasitas adsorpsi. Visualisasi SEM tidak dapat menunjukkan secara kuantitatif kapasitas adsorpsi yang sebenarnya karena hanya menggambarkan perubahan fisik pada permukaan adsorben. Karakterisasi SEM dalam penelitian ini hanya digunakan untuk mengamati perubahan morfologi permukaan sebelum dan sesudah proses adsorpsi, bukan untuk mengukur efektivitas adsorpsi secara langsung. Oleh karena itu, meskipun terdapat perbedaan morfologi permukaan antara ketiga jenis adsorben, namun kesimpulan mengenai peningkatan kapasitas adsorpsi tidak dapat diambil hanya berdasarkan hasil analisis SEM ini.

4.2 Pengujian Adsorpsi

Pengujian kemampuan adsorben dalam adsorpsi logam berat dilakukan dengan memvariasikan massa adsorben, nilai pH, waktu kontak, dan konsentrasi larutan. Tujuannya adalah menentukan kondisi optimum adsorben, yang kemudian diterapkan pada limbah cair batik untuk mengadsorpsi logam berat Pb.

4.2.1 Pengujian Variasi Massa

Pengujian variasi massa adsorben bertujuan untuk menentukan pengaruh massa adsorben terhadap efisiensi adsorpsi ion Pb dari larutan. Pada penelitian ini, digunakan tiga jenis adsorben yaitu *biochar* sekam padi, *biochar* sekam padi teraktivasi, dan *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit. Variasi massa adsorben yang digunakan adalah 50 mg, 100 mg, 150 mg, dan 200 mg. Parameter yang diamati meliputi konsentrasi awal (C_{in}), konsentrasi akhir (C_{ef}), pH awal dan pH akhir, serta efisiensi adsorpsi.

Metode yang diterapkan dalam pengujian ini adalah sistem batch, di mana pengadukan dilakukan menggunakan *orbital shaker* selama 120 menit. Setelah

pengadukan selesai, adsorben disaring menggunakan kertas saring dan kemudian diuji dengan AAS. Hasil pembacaan SSA untuk variasi massa dalam adsorpsi logam Pb pada adsorben *biochar* sekam padi, *biochar* sekam padi yang telah diaktivasi, dan *biochar* sekam padi yang dimodifikasi dengan magnetit disajikan dalam Tabel 4. 3, Tabel 4. 4, dan Tabel 4. 5.

Tabel 4. 3 Data Variasi Massa *Biochar* Sekam Padi

Massa Adsorben (mg)	C _{in} (mg/L)	pH awal	pH akhir	C _{ef} (mg/L)	C _{terserap} (mg/L)	Efisiensi (%)
Kontrol	8,4859	5,31	5,35	7,2260	1,2599	14,85
50	8,4859	5,31	5,42	3,7459	4,74	55,86
100	8,4859	5,31	6,15	4,2424	4,2435	50,01
150	8,4859	5,31	6,18	4,3526	4,1333	48,71
200	8,4859	5,31	6,23	3,9268	4,5591	53,73

Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 4. 4 Data Variasi Massa *Biochar* Sekam Padi Teraktivasi

Massa Adsorben (mg)	C _{in} (mg/L)	pH awal	pH akhir	C _{ef} (mg/L)	C _{terserap} (mg/L)	Efisiensi (%)
Kontrol	8,4859	5,31	5,36	6,8393	1,6466	19,40
50	8,4859	5,31	5,41	1,5949	6,891	81,21
100	8,4859	5,31	5,43	1,3554	7,1305	84,03
150	8,4859	5,31	5,53	1,4901	6,9958	82,44
200	8,4859	5,31	6,13	0,9282	7,5577	89,06

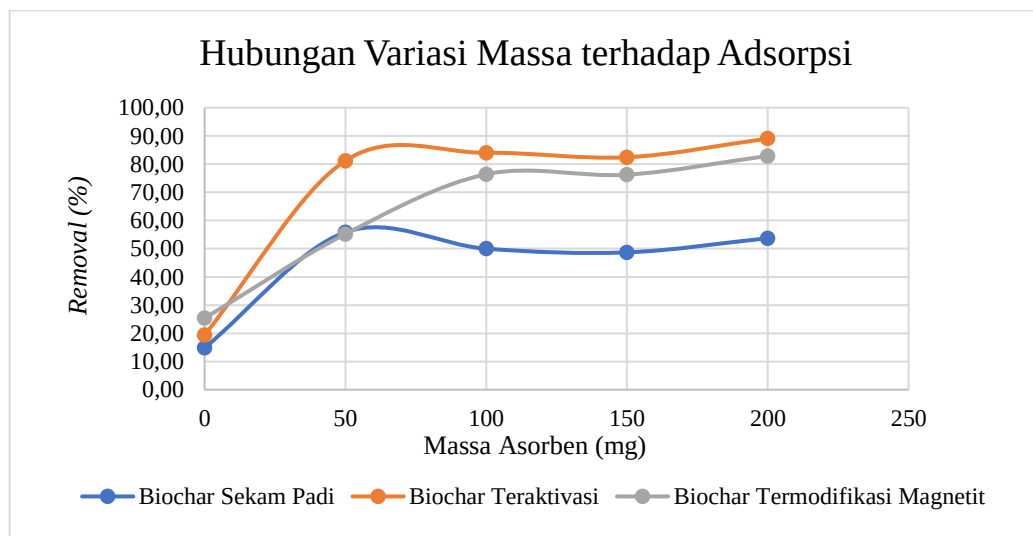
Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 4. 5 Data Variasi Massa *Biochar* Sekam Padi Termodifikasi Magnetit

Massa Adsorben (mg)	C _{in} (mg/L)	pH awal	pH akhir	C _{ef} (mg/L)	C _{terserap} (mg/L)	Efisiensi (%)
Kontrol	8,4859	5,31	5,33	6,3330	2,1529	25,37
50	8,4859	5,31	6,24	3,8016	4,6843	55,20
100	8,4859	5,31	6,20	2,0017	6,4842	76,41
150	8,4859	5,31	6,32	2,0154	6,4705	76,25
200	8,4859	5,31	6,34	1,4507	7,0352	82,90

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh kemudian dilakukan *plotting* data dalam bentuk grafik untuk menampilkan hubungan antara persentase *removal* adsorbat dengan penambahan dosis adsorben. Grafik hubungan variasi massa terhadap adsorpsi disajikan pada Gambar 4. 5.



Gambar 4. 5 Grafik Hubungan Variasi Massa terhadap Adsorpsi Pb

Berdasarkan data yang diperoleh (Tabel 4. 3, Tabel 4. 4, dan Tabel 4. 5) serta visualisasi dalam grafik, terlihat bahwa peningkatan massa adsorben berbanding lurus dengan efisiensi adsorpsi hingga titik tertentu. Pada *biochar* sekam padi tanpa aktivasi, efisiensi adsorpsi meningkat dari 14,85% pada kontrol menjadi 55,86% pada 50 mg, dan kemudian berfluktuatif dengan nilai tertinggi pada massa 200 mg sebesar 53,73%. Pola ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi peningkatan efisiensi dengan bertambahnya massa, namun terjadi kejenuhan permukaan adsorben yang menghambat peningkatan signifikan pada efisiensi adsorpsi (Hegazi, 2013).

Pada *biochar* Sekam padi teraktivasi menunjukkan peningkatan yang lebih signifikan dalam efisiensi adsorpsi dibandingkan dengan *biochar* sekam padi tanpa aktivasi. Pada massa 50 mg, efisiensi mencapai 81,21% dan meningkat 89,06% pada 200 mg. Hal ini menunjukkan bahwa aktivasi meningkatkan jumlah situs aktif pada permukaan adsorben sehingga kapasitas adsorpsi meningkat. Aktivasi meningkatkan luas permukaan dan polaritas bahan adsorben, yang menyebabkan peningkatan interaksi dengan ion Pb dalam larutan (Goswami et al., 2022).

Pada biochar Sekam padi termodifikasi magnetit juga menunjukkan kinerja yang baik dengan efisiensi adsorpsi mencapai 55,20% pada 50 mg dan meningkat hingga 82,90% pada 200 mg. Modifikasi dengan magnetit berkontribusi pada peningkatan afinitas adsorben terhadap ion Pb melalui mekanisme interaksi elektrostatis dan pertukaran ion (Rofikoh et al., 2023).

Dari hasil pengujian, massa adsorben 100 mg dipilih sebagai kondisi optimum karena pada massa ini terjadi keseimbangan antara efisiensi adsorpsi dan penggunaan bahan adsorben. Pada 100 mg, sekam padi teraktivasi memiliki efisiensi 84,03%, sedangkan sekam padi termodifikasi magnetit mencapai 76,41%. Efisiensi ini relatif tinggi dibandingkan dengan massa 50 mg, sementara peningkatan hingga massa 150 mg dan 200 mg tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Fenomena ini sejalan dengan teori adsorpsi, di mana penambahan massa adsorben melebihi titik optimum tidak selalu menghasilkan peningkatan efisiensi yang besar karena terbatasnya jumlah ion Pb dalam larutan serta terbentuknya lapisan adsorbat yang mengurangi efektivitas situs aktif (Satoding et al., 2024)

Efisiensi adsorpsi tertinggi diperoleh pada teraktivasi *biochar* dibandingkan dengan *biochar* sekam padi dan *biochar* termodifikasi magnetit. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya luas permukaan dan keberadaan gugus fungsional aktif pada *biochar* teraktivasi yang meningkatkan kapasitas adsorpsi ion Pb (Goswami et al., 2022). Proses aktivasi menyebabkan terbentuknya pori-pori dengan ukuran yang lebih sesuai untuk menangkap ion Pb, sehingga meningkatkan interaksi antara ion Pb dan situs aktif adsorben. Sementara itu, modifikasi dengan magnetit meningkatkan sifat magnetik *biochar*, yang dapat memudahkan pemisahan, tetapi tidak secara signifikan meningkatkan efisiensi adsorpsi dibandingkan dengan aktivasi kimia (Long et al., 2023).

Namun perlu diketahui bahwa pada proses pasca adsorpsi, *biochar* sekam padi yang dimodifikasi dengan magnet tidak dapat dipisahkan secara sempurna dari lingkungan dengan menggunakan magnet. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun secara teoritis penambahan magnetit diharapkan dapat mempermudah pelepasan adsorben dari larutan, namun pada praktiknya sifat magnetiknya kurang kuat atau distribusi magnetit pada permukaan *biochar* tidak merata. Akibatnya, proses

penyaringan masih harus dilakukan secara konvensional dengan penyaringan. Ketidakmampuan penarikan adsorben hasil modifikasi magnetit dengan magnet diduga disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain distribusi partikel magnetit yang tidak merata pada permukaan *biochar*, sehingga tidak semua bagian adsorben memiliki sifat magnetik yang cukup kuat. Selain itu, ukuran partikel *biochar* yang relatif besar dan berpori memungkinkan partikel magnetik terperangkap dalam struktur pori, sehingga menghambat interaksi langsung dengan medan magnet. Kandungan magnetit yang terlalu rendah juga menjadi faktor pembatas, karena tidak menghasilkan daya tarik magnetik yang cukup untuk menarik semua partikel adsorben dari larutan.

4.2.2 Pengujian Variasi Nilai pH

Pengujian variasi nilai pH atau tingkat keasaman dilakukan untuk mengetahui kondisi optimum agar adsorben dapat menyerap ion logam Pb secara efektif. Pada penelitian ini, adsorben yang digunakan adalah 100 mg, yang telah ditetapkan sebagai kondisi optimum berdasarkan hasil uji variasi massa sebelumnya. Sampel uji yang digunakan adalah larutan Pb dengan konsentrasi 10 mg/L, volume 20 mL, dan waktu kontak 120 menit. Pada rangkaian pengkondisian larutan, digunakan larutan *buffer* HCl 0,1 M untuk kondisi asam dan NaOH 0,1 M untuk kondisi basa. Variasi pH yang diuji adalah 3, 5, 7, dan 9 yang mewakili kondisi asam, netral, dan basa. Hasil pengujian variasi pH pada larutan logam Pb disajikan pada Tabel 4. 6, Tabel 4. 7, dan Tabel 4. 8.

Tabel 4. 6 Data Variasi pH Larutan pada *Biochar* Sekam Padi

Massa Adsorben (mg)	pH rencana	pH awal	pH akhir	C _{in} (mg/L)	C _{ef} (mg/L)	C _{terserap} (mg/L)	Efisiensi (%)
100	3	3,17	3,26	8,4859	0,9454	7,5405	88,86
100	5	5,23	6,12	8,4859	0,7318	7,7541	91,38
100	7	7,25	7,61	8,4859	2,8542	5,6317	66,37
100	9	9,28	9,45	8,4859	0,7386	7,7473	91,30

Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 4. 7 Data Variasi pH Larutan pada *Biochar* Sekam Padi Teraktivasi

Massa Adsorben (mg)	pH rencana	pH awal	pH akhir	C _{in} (mg/L)	C _{ef} (mg/L)	C _{terserap} (mg/L)	Efisiensi (%)
100	3	3,17	3,36	8,4859	2,797	5,6889	67,04
100	5	5,23	5,35	8,4859	1,3222	7,1637	84,42
100	7	7,25	7,25	8,4859	1,5739	6,912	81,45
100	9	9,28	9,28	8,4859	1,5617	6,9242	81,60

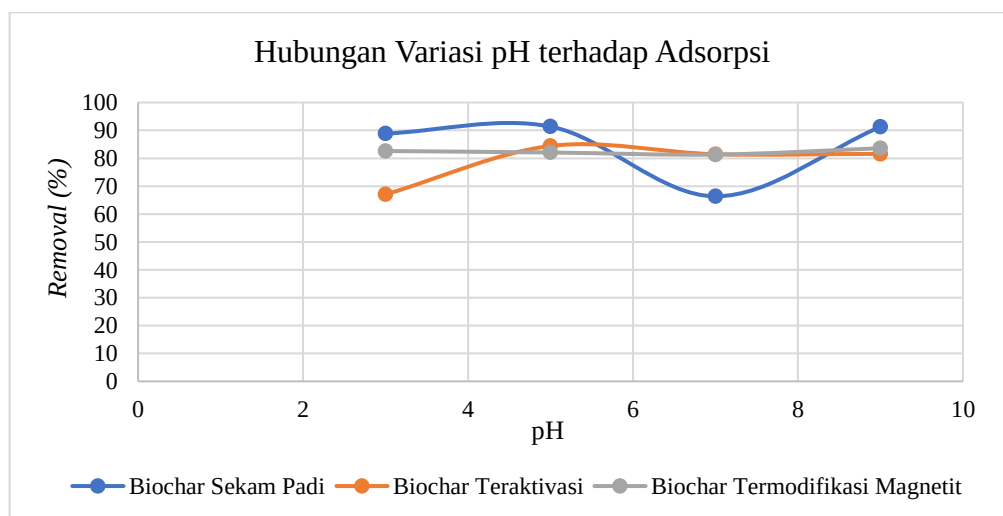
Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 4. 8 Data Variasi pH Larutan pada *Biochar* Sekam Padi Termodifikasi Magnetit

Massa Adsorben (mg)	pH rencana	pH awal	pH akhir	C _{in} (mg/L)	C _{ef} (mg/L)	C _{terserap} (mg/L)	Efisiensi (%)
100	3	3,17	3,29	8,4859	1,476	7,0099	82,61
100	5	5,23	6,21	8,4859	1,5209	6,965	82,08
100	7	7,25	8,01	8,4859	1,5848	6,9011	81,32
100	9	9,28	9,31	8,4859	1,3916	7,0943	83,60

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan data pengujian yang diperoleh kemudian dilakukan *plotting* dalam bentuk grafik untuk menampilkan hubungan antara persentase *removal* adsorbat dengan variasi pH larutan. Grafik hubungan variasi nilai pH terhadap adsorpsi disajikan pada Gambar 4. 6.



Gambar 4. 6 Grafik Hubungan Variasi pH terhadap Adsorpsi Pb

Pengujian variasi pH pada adsorpsi ion Pb oleh sekam padi, sekam padi teraktivasi, dan sekam padi termodifikasi magnetit menunjukkan bahwa pH berpengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi. pH merupakan salah satu faktor penting dalam proses adsorpsi. Pada kondisi pH yang semakin asam, kelarutan logam terlarut di air meningkat, yang juga mempengaruhi muatan pada ion H^+ . Sebaliknya, pada kondisi basa, kelarutan logam menurun, yang ditandai dengan terbentuknya presipitasi atau kekeruhan larutan logam (Ariyani et al., 2018).

Dari data yang diperoleh, adsorpsi optimal terjadi pada pH 5, dengan efisiensi tertinggi untuk semua jenis adsorben: 91,38% untuk sekam padi, 84,41% untuk sekam padi teraktivasi, dan 89,73% untuk sekam padi termodifikasi magnetit. Efisiensi adsorpsi *biochar* sekam padi (tanpa aktivasi/modifikasi) lebih tinggi dibandingkan kedua jenis lainnya. Hal ini dapat disebabkan oleh karakter permukaan alami *biochar* yang lebih stabil pada pH tersebut, sehingga mampu membentuk interaksi fisik yang cukup efektif dengan ion Pb. Penurunan efisiensi yang terjadi pada pH 5 dan pH 7 (netral) disebabkan oleh reaksi hidrolisis yang dialami oleh ion timbal. Pada kondisi ini, muatan resiprokal positif menurun menjadi +1, sehingga kestabilannya menurun dan interaksi antara permukaan adsorben dengan ion logam menurun (Solika et al., 2018).

Pada pH basa, ion logam timbal mulai membentuk presipitasi hidroksida. Peningkatan konsentrasi ion OH^- menyebabkan konsentrasi ion H^+ menurun, sehingga interaksi kompetitif dengan logam berkurang. Hal ini menyebabkan penurunan jumlah logam yang teradsorpsi dan meningkatkan efisiensi transmisi. Kehadiran ion hidroksida juga membuat gugus fungsi bermuatan negatif pada permukaan adsorben menjadi lebih reaktif dalam mengikat logam Pb (Ariyani et al., 2018). Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa pH berperan penting dalam mempengaruhi efisiensi adsorpsi ion Pb oleh berbagai jenis adsorben yang digunakan.

4.2.3 Pengujian Variasi Waktu Kontak

Setelah menentukan kondisi pH yang optimal pada tahap sebelumnya, langkah selanjutnya adalah pengujian kontak waktu yang optimal antara adsorben

dan lingkungan. Variasi kontak waktu merupakan faktor penting yang perlu diteliti karena memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi proses adsorpsi. Hal ini berkaitan dengan adanya gaya adhesi atau interaksi antara permukaan adsorben dan ion logam Pb (Solika et al., 2018). Pada penelitian ini, adsorben yang digunakan adalah 100 mg dan pH 5 yang telah ditetapkan sebagai kondisi optimum berdasarkan hasil uji variasi massa sebelumnya. Sampel uji yang digunakan adalah larutan Pb dengan konsentrasi 10 mg/L dengan volume 20 mL. Variasi kontak waktu yang digunakan adalah 15, 30, 60, 90, dan 120 menit. Hasil pengujian variasi waktu terhadap adsorpsi disajikan dalam Tabel 4. 9, Tabel 4. 10., dan Tabel 4. 11.

Tabel 4. 9 Data Variasi Waktu Kontak *Biochar* Sekam Padi

Massa Adsorben (mg)	pH awal	pH akhir	Waktu Kontak (menit)	C _{in} (mg/L)	C _{ef} (mg/L)	C _{terserap} (mg/L)	Efisiensi (%)
100	5,12	5,21	15	8,4859	4,173	4,3129	50,82
100	5,12	6,11	30	8,4859	3,1513	5,3346	62,86
100	5,12	6,07	60	8,4859	3,3309	5,155	60,75
100	5,12	6,21	90	8,4859	3,2656	5,2203	61,52
100	5,12	6,18	120	8,4859	3,3785	5,1074	60,19

Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 4. 10 Data Variasi Waktu Kontak *Biochar* Sekam Padi Teraktivasi

Massa Adsorben (mg)	pH awal	pH akhir	Waktu Kontak (menit)	C _{in} (mg/L)	C _{ef} (mg/L)	C _{terserap} (mg/L)	Efisiensi (%)
100	5,12	5,13	15	8,4859	1,2983	7,1876	84,70
100	5,12	5,15	30	8,4859	0,6085	7,8774	92,83
100	5,12	5,21	60	8,4859	1,2071	7,2788	85,78
100	5,12	5,11	90	8,4859	1,335	7,1509	84,27
100	5,12	6,02	120	8,4859	1,0167	7,4692	88,02

Sumber: Data Primer, 2025

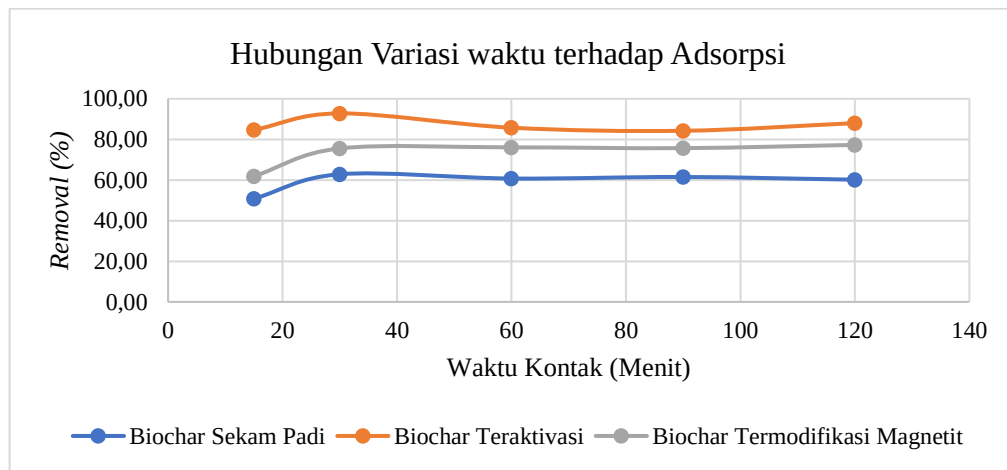
Tabel 4. 11 Data Variasi Waktu Kontak *Biochar* Sekam Padi Termodifikasi Magnetit

Massa Adsorben (mg)	pH awal	pH akhir	Waktu Kontak (menit)	C _{in} (mg/L)	C _{ef} (mg/L)	C _{terserap} (mg/L)	Efisiensi (%)
100	5,12	6,12	15	8,4859	3,2343	5,2516	61,89

100	5,12	6,01	30	8,4859	2,0724	6,4135	75,58
100	5,12	6,11	60	8,4859	2,0289	6,457	76,09
100	5,12	6,25	90	8,4859	2,0602	6,4257	75,72
100	5,12	6,21	120	8,4859	1,9255	6,5604	77,31

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan data pengujian yang diperoleh kemudian dilakukan *plotting* dalam bentuk grafik untuk menampilkan hubungan antara persentase *removal* adsorbat dengan variasi waktu kontak. Grafik hubungan variasi waktu kontak terhadap adsorpsi disajikan pada Gambar 4. 7.



Gambar 4. 7 Grafik Hubungan Variasi waktu terhadap Adsorpsi

Berdasarkan hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi meningkat seiring dengan bertambahnya waktu kontak hingga mencapai titik keseimbangan. Semakin lama waktu kontak, semakin besar peluang bagi zat yang akan disisihkan untuk mencapai kesetimbangan, karena kontak antara zat terlarut dengan bioadsorben menjadi lebih maksimal (Kenedy et al., 2024). Pada adsorben *biochar* sekam padi, efisiensi adsorpsi meningkat dari 50,82% pada 15 menit menjadi 62,86% pada 30 menit. Namun, pada waktu kontak 60 menit dan setelahnya, efisiensi cenderung mengalami sedikit penurunan dan tekanan di sekitar 60%. Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan adsorpsi tercapai pada 60 menit. Terdapat titik jenuh di mana penambahan waktu tidak lagi meningkatkan adsorpsi secara signifikan.

Pada adsorben *biochar* sekam padi teraktivasi, efisiensi adsorpsi mencapai nilai tertinggi sebesar 92,83% pada waktu kontak 30 menit, kemudian mengalami sedikit penurunan pada 60 dan 90 menit, yaitu masing-masing sebesar 85,77% dan 84,26%. Namun, pada waktu kontak 120 menit, efisiensi meningkat kembali menjadi 88,02%. Sementara itu, pada adsorben *biochar* termodifikasi magnetit, efisiensi adsorpsi cenderung stabil setelah 30 menit dengan efisiensi tertinggi 77,30% pada waktu kontak 120 menit. Peningkatan efisiensi dari 61,88% pada 15 menit menjadi 76,09% pada 60 menit menunjukkan bahwa waktu kontak yang lebih lama meningkatkan jumlah ion Pb yang teradsorpsi, tetapi setelah 60 menit, peningkatan tidak signifikan. Berdasarkan hasil tersebut, dipilih waktu optimum 60 menit karena pada waktu ini efisiensi adsorpsi sudah mencapai kondisi yang relatif stabil pada ketiga jenis adsorben.

4.2.4 Pengujian Variasi Konsentrasi Larutan

Setelah memperoleh kondisi optimum dari variasi sebelumnya, yaitu massa adsorben 100 mg, pH 5, dan waktu kontak 60 menit, langkah selanjutnya adalah menguji variasi konsentrasi larutan Pb. Pengujian variasi konsentrasi larutan ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi awal ion logam Pb terhadap efisiensi adsorpsi oleh adsorben sekam padi dengan berbagai modifikasi. Hasil pengujian variasi waktu terhadap adsorpsi disajikan dalam Tabel 4. 12, Tabel 4. 13, dan Tabel 4. 14.

Tabel 4. 12 Data Variasi Konsentrasi Larutan pada *Biochar* Sekam Padi

Massa Adsorben (mg)	pH awal	pH akhir	Konsentrasi rencana (mg/L)	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi (%)
100	5,16	5,23	5	5,1707	0,4390	4,7317	91,51
100	5,16	6,31	10	14,5000	1,2317	13,2683	91,51
100	5,16	6,23	25	28,4573	7,7012	20,7561	72,94
100	5,16	5,42	50	47,4512	9,5610	37,8902	79,85
100	5,16	5,44	100	76,2195	46,0915	30,1280	39,53

Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 4. 13 Data Variasi Konsentrasi Larutan pada *Biochar* Sekam Padi Teraktivasi

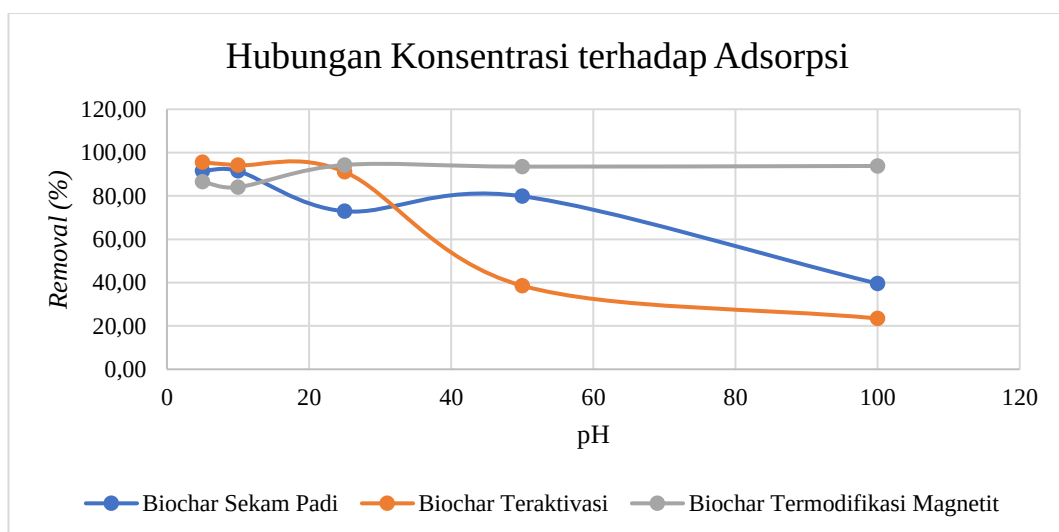
Massa Adsorben (mg)	pH awal	pH akhir	Konsentrasi rencana (mg/L)	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi (%)
100	5,16	5,19	5	5,171	0,232	4,939024	95,52
100	5,16	5,25	10	14,500	0,848	13,65244	94,15
100	5,16	5,23	25	28,457	2,530	25,92683	91,11
100	5,16	6,15	50	47,451	29,146	18,30488	38,58
100	5,16	5,25	100	76,220	58,341	17,87805	23,46

Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 4. 14 Data Variasi Konsentrasi Larutan pada *Biochar* Sekam Padi
Termodifikasi Magnetit

Massa Adsorben (mg)	pH awal	pH akhir	Konsentrasi rencana (mg/L)	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi (%)
100	5,16	6,13	5	5,1707	0,695	4,4756	86,56
100	5,16	6,17	10	14,5000	2,311	12,1890	84,06
100	5,16	6,21	25	28,4573	1,628	26,8293	94,28
100	5,16	6,31	50	47,4512	3,073	44,3780	93,52
100	5,16	6,24	100	76,2195	4,695	71,5244	93,84

Berdasarkan data pengujian yang diperoleh kemudian dilakukan *plotting* dalam bentuk grafik untuk menampilkan hubungan antara persentase *removal* adsorbat dengan variasi konsentrasi larutan. Grafik hubungan variasi konsentrasi terhadap adsorpsi disajikan pada Gambar 4. 8.



Gambar 4. 8 Grafik Hubungan Variasi Konsentrasi Larutan terhadap Adsorpsi

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi dipengaruhi oleh konsentrasi awal ion Pb dalam larutan. Berdasarkan data pada Tabel 4. 12, efisiensi adsorpsi *biochar* sekam padi yang tidak diaktivasi mengalami penurunan seiring dengan peningkatan konsentrasi awal Pb. Pada konsentrasi 5 mg/L, efisiensi adsorpsi mencapai 91,51%, namun pada konsentrasi 100 mg/L, efisiensinya turun menjadi 39,53%. Hal ini menunjukkan bahwa dengan peningkatan konsentrasi ion logam, efisiensi penyerapannya semakin menurun. Kemampuan adsorben dalam menyerap ion logam mencapai titik maksimum, dan penurunan efisiensi penyerapan pada konsentrasi tinggi terjadi karena jumlah ion logam dalam larutan tidak sebanding dengan jumlah partikel adsorben yang tersedia (Lestari et al., 2020).

Pada *biochar* sekam padi teraktivasi, efisiensi adsorpsi lebih tinggi dibandingkan dengan *biochar* sekam padi tak teraktivasi. Pada konsentrasi 5 mg/L, efisiensinya mencapai 95,52%, dan pada 100 mg/L turun menjadi 23,46%. Meskipun terjadi penurunan, adsorpsi pada sekam padi teraktivasi lebih efektif menangkap ion Pb dibandingkan dengan sekam padi biasa. Aktivasi meningkatkan luas permukaan dan ketersediaan situs aktif, sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsi (Wardalia, 2016).

Sementara itu, *biochar* sekam padi yang dimodifikasi dengan magnetit menunjukkan kinerja adsorpsi yang lebih baik dibandingkan dengan kedua jenis adsorben lainnya. Efisiensi adsorpsi cenderung stabil pada konsentrasi yang lebih luas, dengan kisaran efisiensi tertinggi sebesar 94,28% pada 25 mg/L dan tetap tinggi sebesar 93,84% pada 100 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa modifikasi dengan magnetit dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi dan mempercepat proses fragmentasi adsorben dari larutan, mengingat sifat magnetiknya.

Penentuan kondisi optimum dilakukan dengan mempertimbangkan efisiensi dan kapasitas adsorpsi yang tinggi. Dari hasil yang diperoleh, adsorben modifikasi magnetit dengan konsentrasi 25 mg/L dipilih sebagai kondisi optimum karena memiliki efisiensi yang tinggi dan relatif stabil meskipun konsentrasi Pb meningkat. Variasi efisiensi penyisihan pada berbagai konsentrasi disebabkan oleh beberapa

faktor, antara lain jumlah situs aktif pada adsorben, kompetisi antar ion dalam larutan, dan kemungkinan terjadinya desorpsi pada konsentrasi tinggi. Pada konsentrasi rendah, hampir semua ion Pb dapat menempel pada situs aktif adsorben, sehingga efisiensinya tinggi. Namun, pada konsentrasi tinggi, jumlah ion Pb melebihi kapasitas adsorpsi adsorben, sehingga menyebabkan efisiensinya berkurang. Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa modifikasi adsorben dapat meningkatkan efisiensi adsorpsi dan ketahanan terhadap variasi konsentrasi larutan Pb.

4.3 Analisis Isoterm Adsorpsi

Pada penelitian ini dilakukan analisis model isoterm adsorpsi untuk mengetahui kapasitas adsorpsi logam Pb menggunakan tiga jenis adsorben yaitu *biochar* sekam padi, *biochar* sekam padi teraktivasi, dan *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit. Proses adsorpsi suatu zat pada permukaan adsorben dipengaruhi oleh berbagai faktor dan mengikuti pola isoterm tertentu. Isoterm adsorpsi menggambarkan hubungan kesetimbangan antara konsentrasi suatu zat di lingkungan dengan jumlah zat yang teradsorpsi pada permukaan adsorben pada suhu tetap. Salah satu parameter utama dalam menghitung isoterm adalah jumlah zat yang teradsorpsi per satuan massa adsorben yang dinyatakan dalam miligram adsorbat per gram adsorben (mg/g) atau dikenal dengan (q_e) (Faris et al., 2024). Pada penelitian ini model isoterm yang digunakan adalah model Langmuir dan Freundlich. Dari kedua model tersebut diperoleh persamaan yang digunakan untuk menganalisis kapasitas adsorpsi maksimum (Q_{max}) dalam mg/g dan konstanta kesetimbangan adsorpsi.

Model Langmuir merupakan model empiris yang mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi secara homogen, dengan energi aktivasi dan entalpi yang konstan untuk setiap molekul yang diadsorpsi. Model ini menyatakan bahwa molekul-molekul adsorbat membentuk satu lapisan atau *monolayer* pada permukaan adsorben. Menurut Langmuir, perpindahan zat ke permukaan padatan mengikuti prinsip kinetika, di mana laju adsorpsi dan desorpsi berada dalam kesetimbangan (Perdana et al., 2023). Berdasarkan hasil pengujian dengan variasi konsentrasi

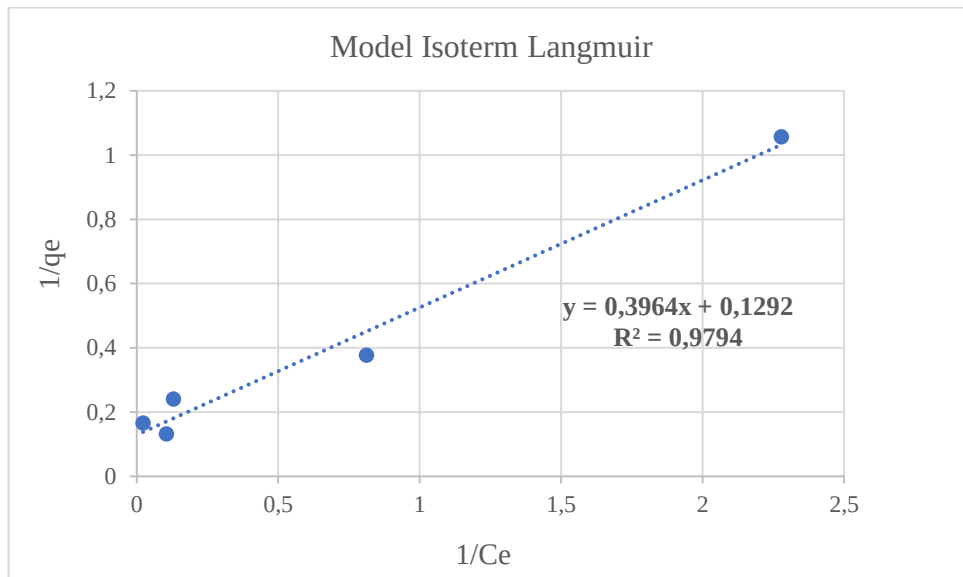
larutan, kapasitas penyerapan maksimum dihitung dan disajikan pada Tabel 4. 15 untuk model isoterm Langmuir untuk setiap jenis *biochar* yang digunakan.

Tabel 4. 15 Perhitungan Isoterm Langmuir *Biochar* Sekam Padi, *Biochar* Sekam Padi Teraktivasi, dan *Biochar* Sekam Padi Termodifikasi Magnetit

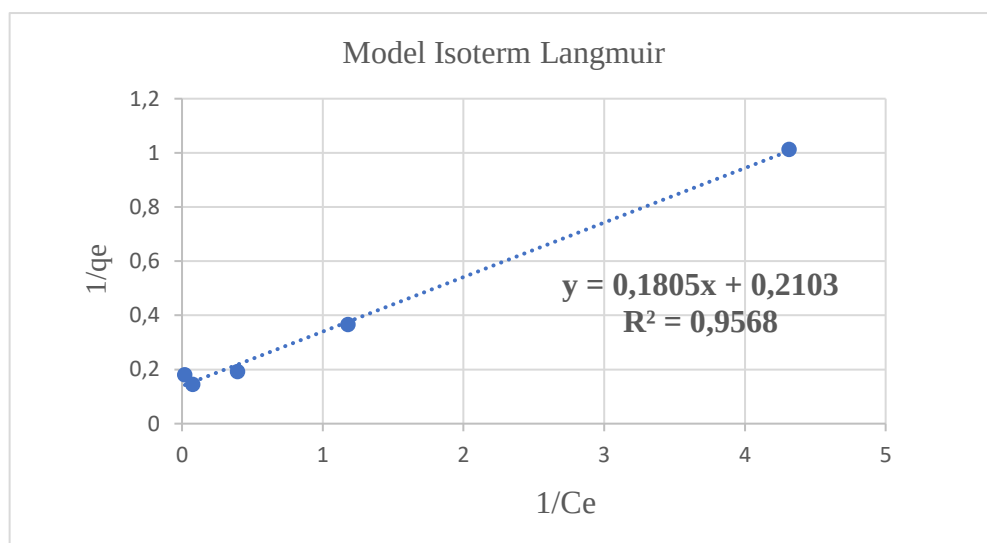
Jenis Adsorben	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	Qe	1/ce	1/qe
<i>Biochar</i> Sekam Padi	5,1707	0,4390	0,9463	2,2778	1,0567
	14,5000	1,2317	2,6537	0,8119	0,3768
	28,4573	7,7012	4,1512	0,1298	0,2409
	47,4512	9,5610	7,5780	0,1046	0,1320
	76,2195	46,0915	6,0256	0,0217	0,1660
<i>Biochar</i> Sekam Padi Teraktivasi	5,171	0,232	0,9878	4,3158	1,0123
	14,500	0,848	2,7305	1,1799	0,3662
	28,457	2,530	5,1854	0,3952	0,1929
	47,451	29,146	3,6610	0,0343	0,2732
	76,220	58,341	3,5756	0,0171	0,2797
<i>Biochar</i> Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	5,1707	0,695	0,8951	1,4386	1,1172
	14,5000	2,311	2,4378	0,4327	0,4102
	28,4573	1,628	5,3659	0,6142	0,1864
	47,4512	3,073	8,8756	0,3254	0,1127
	76,2195	4,695	14,3049	0,2130	0,0699

Sumber: Data Primer, 2025

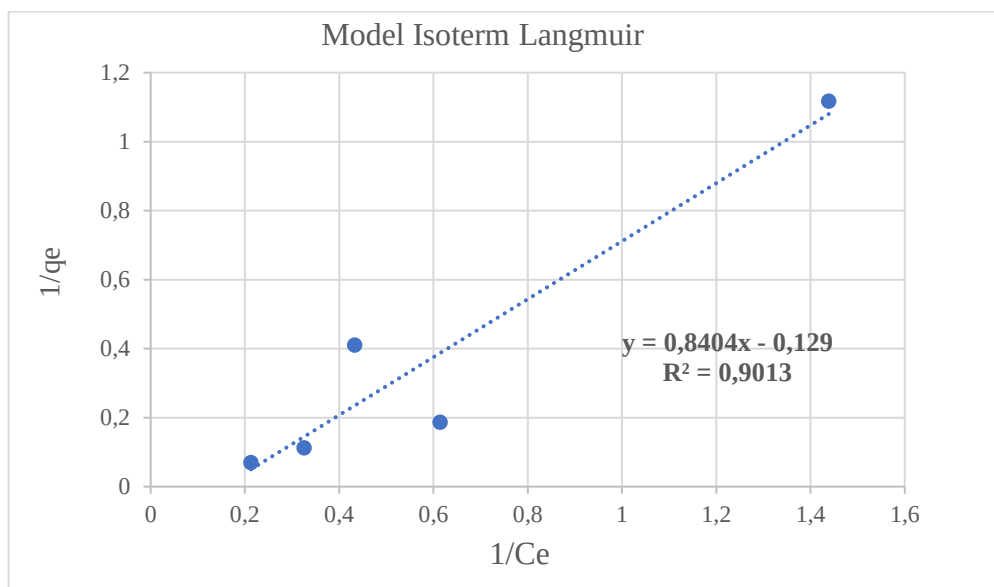
Proses analisis isoterm Langmuir melibatkan pemetaan nilai $1/C_e$ terhadap $1/q_e$ untuk menghasilkan grafik persamaan linear. Melalui grafik ini dapat ditentukan koefisien determinasi (R^2), yang merupakan indikator kesesuaian model dengan data eksperimen. Visualisasi grafik persamaan linear untuk isoterm Langmuir disajikan pada Gambar 4. 9, Gambar 4. 10, dan Gambar 4. 11.



Gambar 4. 9 Model Isoterm Langmuir Adsorpsi Logam Pb oleh Adsorben *Biochar* Sekam Padi



Gambar 4. 10 Model Isoterm Langmuir Adsorpsi Logam Pb oleh Adsorben *Biochar* Sekam Padi Teraktivasi



Gambar 4. 11 Model Isoterm Langmuir Adsorpsi Logam Pb oleh Adsorben *Biochar* Sekam Padi Termodifikasi Magnetit

Berdasarkan hasil pemodelan, diperoleh nilai R^2 untuk *biochar* sekam padi sebesar 0,9794, yang menunjukkan kesesuaian data dengan model Langmuir. *Biochar* sekam padi teraktivasi memiliki nilai R^2 sebesar 0,9568, sedangkan *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit memiliki nilai R^2 sebesar 0,9013. Nilai yang tinggi menunjukkan bahwa adsorpsi Pb lebih sesuai dengan model Langmuir, yang menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung secara *monolayer* pada permukaan yang homogen.

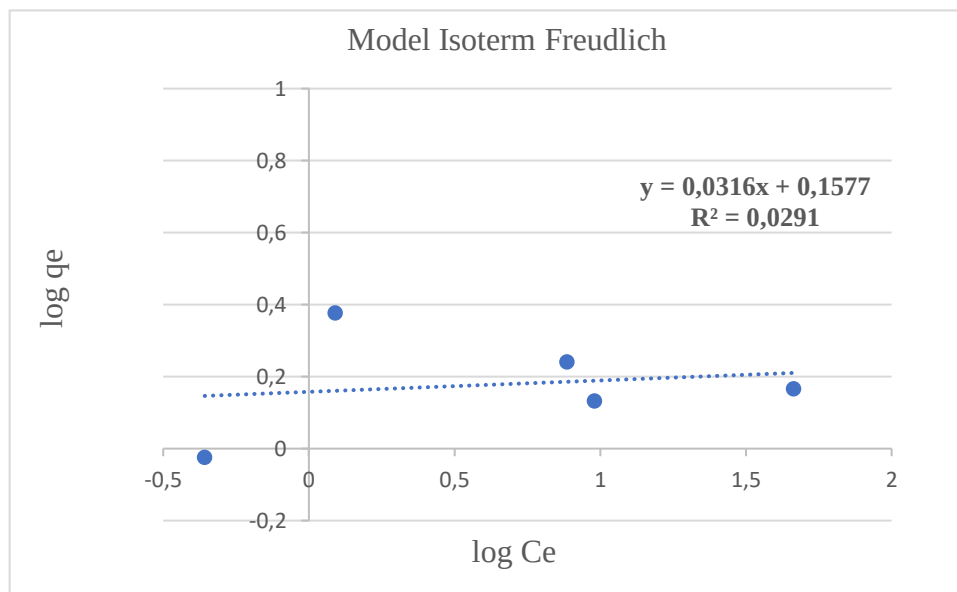
Selain model isoterm Langmuir, penelitian ini juga menggunakan model isoterm Freundlich. Persamaan isoterm Freundlich mengasumsikan bahwa permukaan adsorben memiliki situs aktif yang heterogen, dengan energi dan jenis ikatan yang bervariasi. Proses adsorpsi terjadi secara *multilayer* di permukaan adsorben, di mana semua sisi permukaan dapat terlibat dalam adsorpsi dalam kondisi tertentu (Aman et al., 2018). Berdasarkan hasil pengujian dengan variasi konsentrasi larutan, kapasitas penyerapan dihitung dan disajikan pada Tabel 4. 16 untuk model isoterm Freundlich untuk setiap jenis *biochar* yang digunakan.

Tabel 4. 16 Perhitungan Isoterm Freundlich *Biochar* Sekam Padi, *Biochar* Sekam Padi Teraktivasi, dan *Biochar* Sekam Padi Termodifikasi Magnetit

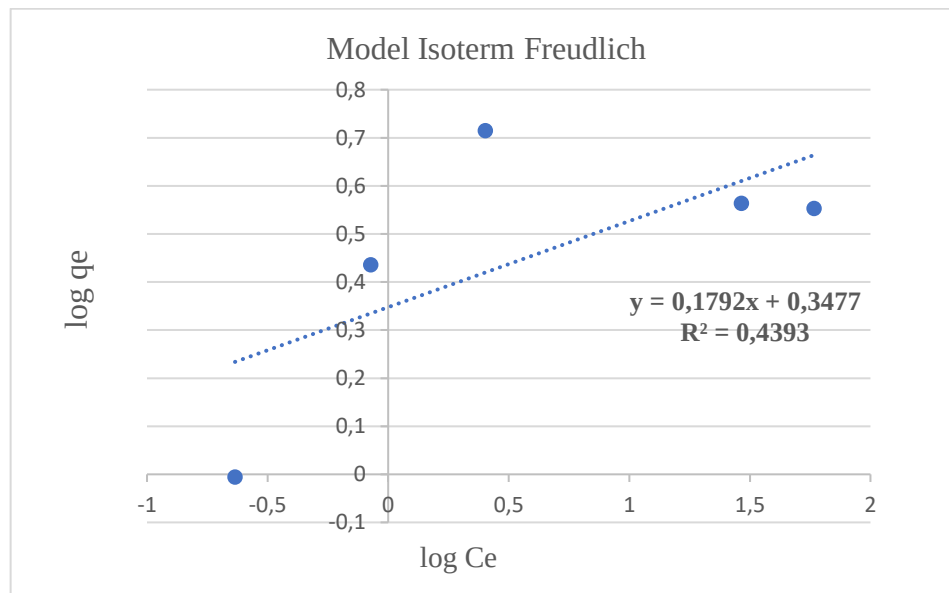
Jenis Adsorben	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	Qe	log Ce	Log qe
Biochar Sekam Padi	5,1707	0,4390	0,9463	-0,3575	-0,0240
	14,5000	1,2317	2,6537	0,0905	0,3768
	28,4573	7,7012	4,1512	0,8866	0,2409
	47,4512	9,5610	7,5780	0,9805	0,1320
	76,2195	46,0915	6,0256	1,6636	0,1660
Biochar Sekam Padi Teraktivasi	5,171	0,232	0,9878	-0,6351	-0,0053
	14,500	0,848	2,7305	-0,0718	0,4362
	28,457	2,530	5,1854	0,4032	0,7148
	47,451	29,146	3,6610	1,4646	0,5636
	76,220	58,341	3,5756	1,7660	0,5534
Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	5,1707	0,695	0,8951	-0,1579	-0,0481
	14,5000	2,311	2,4378	0,3638	0,3870
	28,4573	1,628	5,3659	0,2117	0,7296
	47,4512	3,073	8,8756	0,4876	0,9482
	76,2195	4,695	14,3049	0,6716	1,1555

Sumber: Data Primer, 2025

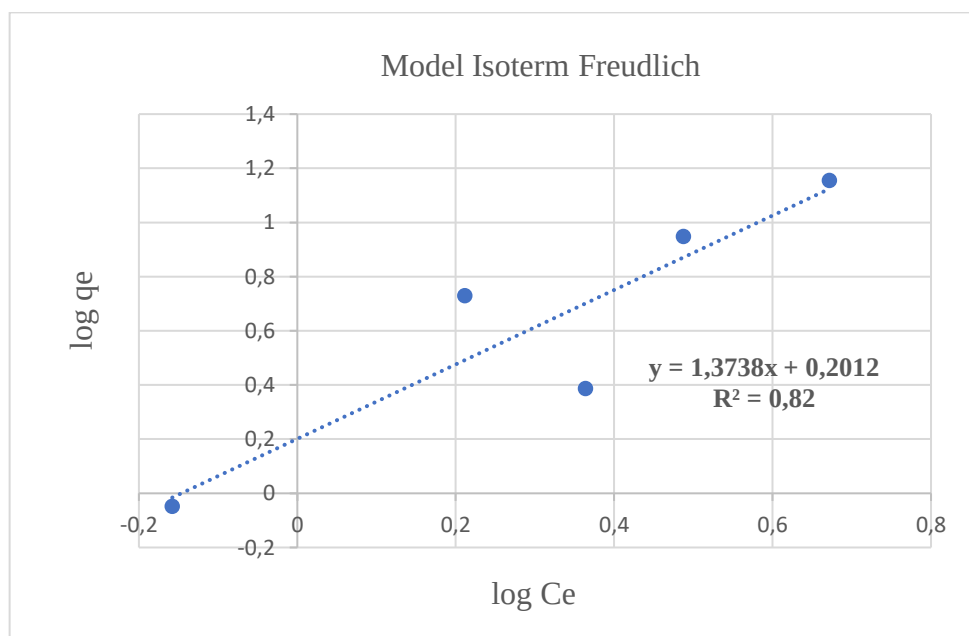
Proses analisis isoterm Freundlich melibatkan pemetaan nilai log Ce terhadap log qe untuk menghasilkan grafik persamaan linear. Melalui grafik ini dapat ditentukan koefisien determinasi (R^2), yang merupakan indikator kesesuaian model dengan data eksperimen. Visualisasi grafik persamaan linear untuk isoterm Freundlich disajikan pada Gambar 4.12, Gambar 4.13, dan Gambar 4.14



Gambar 4. 12 Model Isoterm Freundlich Adsorpsi Logam Pb oleh Adsorben
Biochar Sekam Padi



Gambar 4. 13 Model Isoterm Freundlich Adsorpsi Logam Pb oleh Adsorben
Biochar Sekam Padi Teraktivasi



Gambar 4. 14 Model Isoterm Freundlich Adsorpsi Logam Pb oleh Adsorben
Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit

Berdasarkan hasil analisis pemodelan menunjukkan bahwa nilai R^2 untuk model Freundlich adsorben *biochar* sekam padi dan *biochar* sekam padi teraktivasi lebih rendah dibandingkan model Langmuir. Namun, pada *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit dengan nilai R^2 tertinggi pada model Freundlich sebesar 0,8200. Hal ini menunjukkan bahwa model Freundlich lebih tepat untuk menggambarkan proses adsorpsi pada adsorben yang dimodifikasi magnetit.

Selanjutnya, nilai R^2 dari setiap grafik akan dibandingkan untuk menentukan model adsorpsi yang paling sesuai. Model dengan nilai R^2 tertinggi akan dipilih untuk sampel adsorben. Perbandingan nilai antara isoterm Langmuir dan Freundlich disajikan pada Tabel 4. 17.

Tabel 4. 17 Perbandingan Hasil Pemodelan Isoterm Langmuir dan Freundlich

Jenis Adsorben	Langmuir			Freundlich		
	Qm	KL	R^2	Kf	1/n	R^2
<i>Biochar</i> Sekam Padi	7,7399	0,3259	0,9794	1,4378	0,0316	0,0291
<i>Biochar</i> Sekam Padi Teraktivasi	4,7551	1,1651	0,9568	2,2269	2,2269	0,4393
<i>Biochar</i> Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	-7,7519	-0,1535	0,9013	1,5893	1,3738	0,8200

Berdasarkan hasil pemodelan isoterm adsorpsi menggunakan model Langmuir dan Freundlich, diketahui bahwa masing-masing jenis adsorben menunjukkan kesesuaian yang berbeda terhadap model yang digunakan. Adsorben *biochar* sekam padi memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi pada model Langmuir sebesar 0,9794 dengan kapasitas maksimum adsorpsi (Qm) sebesar 7,7399 mg/g, menunjukkan bahwa model Langmuir paling sesuai untuk menggambarkan proses adsorpsi Pb oleh adsorben ini. *Biochar* sekam padi teraktivasi juga cocok dimodelkan dengan Langmuir dengan nilai R^2 sebesar 0,9568 dan Qm sebesar 4,7551 mg/g, menandakan adanya adsorpsi monolayer pada permukaan yang relatif homogen. Sementara itu, *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit menunjukkan Qm negatif sebesar -7,7519 mg/g dengan R^2 sebesar 0,9013,

yang secara teoritis tidak tepat karena nilai negatif menunjukkan adanya kesalahan atau ketidaksesuaian model dengan data eksperimen. Meskipun nilai R^2 untuk adsorben *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit relatif tinggi (0,9013), namun hasil ini menunjukkan bahwa model Langmuir tidak cocok untuk menggambarkan proses adsorpsi pada adsorben yang dimodifikasi magnetit.

Sebaliknya, pada model Freundlich, adsorben termodifikasi magnetit menunjukkan nilai R^2 tertinggi sebesar 0,8200, menandakan bahwa model Freundlich lebih tepat digunakan karena mampu merepresentasikan permukaan adsorben yang heterogen akibat modifikasi magnetit. Kedua adsorben lainnya memiliki nilai R^2 yang rendah pada model Freundlich, yakni 0,0291 untuk *biochar* biasa dan 0,4393 untuk *biochar* teraktivasi, sehingga model ini kurang sesuai untuk menggambarkan model adsorpsi pada kedua adsorben tersebut. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa model Langmuir lebih sesuai untuk *biochar* sekam padi dan *biochar* teraktivasi, sedangkan model Freundlich lebih menggambarkan model adsorpsi pada *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit.

Selain itu, *biochar* sekam padi menunjukkan kapasitas adsorpsi tertinggi berdasarkan model Langmuir dengan nilai Q_m sebesar 7,7399 mg/g, diikuti oleh *biochar* sekam padi teraktivasi sebesar 4,7551 mg/g, sedangkan *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit menunjukkan nilai Q_m negatif (-7,7519 mg/g) yang tidak valid dalam interpretasi model Langmuir, meskipun nilai K_f dalam model Freundlich cukup tinggi sebesar 1,5893 mg/g. Hasil ini menunjukkan bahwa proses aktivasi menurunkan kapasitas adsorpsi dibandingkan dengan *biochar* biasa, mungkin karena adanya perubahan struktur pori atau gugus fungsi yang kurang mendukung, sedangkan modifikasi magnetit, meskipun tidak valid dalam model Langmuir, tetap menunjukkan peningkatan dalam model Freundlich yang menunjukkan peningkatan heterogenitas permukaan dan potensi peningkatan kapasitas adsorpsi. Hasil ini masih lebih unggul dibandingkan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa kapasitas adsorpsi Pb menggunakan karbon aktif sekam padi hanya sebesar 0,1377 mg/g (Halim et al., 2021). Dengan demikian, penggunaan *biochar* sekam padi, baik dalam bentuk asli maupun yang telah dimodifikasi, memberikan peningkatan kapasitas adsorpsi logam berat Pb yang

signifikan dibandingkan dengan karbon aktif biasa. Selain itu, temuan ini mendukung hasil penelitian Zannah (2020) yang menyatakan bahwa modifikasi *biochar* dapat meningkatkan luas permukaan dan jumlah situs aktif, sehingga meningkatkan efisiensi adsorpsi logam berat. Oleh karena itu, baik *biochar* sekam padi maupun bentuk yang telah dimodifikasi memiliki potensi besar sebagai adsorben dalam aplikasi remediasi limbah cair yang mengandung Pb^{2+} .

4.4 Aplikasi Adsorben ke Limbah Cair Batik

Limbah cair industri batik mengandung berbagai macam pewarna sintetis dan logam berat yang dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menurunkan kadar polutan dalam limbah batik adalah adsorpsi menggunakan *biochar*. Dalam penelitian ini, dilakukan uji adsorpsi menggunakan tiga jenis *biochar* sekam padi, yaitu *biochar* sekam padi murni, *biochar* sekam padi teraktivasi, dan *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit. Setelah melakukan pengujian variasi optimum pada prosedur sebelumnya, didapatkan kondisi optimum yaitu massa adsorben 100 mg, pH larutan 5, waktu kontak 60 menit yang akan diaplikasikan pada sampel limbah batik untuk pengujian adsorpsi. Hasil pengujian Adsorpsi Pb pada limbah batik disajikan dalam Tabel 4. 18

Tabel 4. 18 Hasil Pengujian Adsorpsi Pb Limbah Batik Menggunakan *Biochar* Sekam Padi, *Biochar* Sekam Padi Teraktivasi, dan *Biochar* Sekam Padi Termodifikasi Magnetit

Jenis Adsorben	Massa Adsorben (mg)	pH awal	pH akhir	C_{in} (mg/L)	C_{ef} (mg/L)	$C_{terserap}$ (mg/L)	Efisiensi (%)
<i>Biochar</i> Sekam Padi	100	5,14	5,20	8,874	2,681	6,193	69,78815
<i>Biochar</i> Sekam Padi Teraktivasi	100	5,14	5,21	8,874	2,923	5,951	67,06108

<i>Biochar</i> Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	100	5,14	6,02	8,874	0,167	8,707	98,11359
---	-----	------	------	-------	-------	-------	----------

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan hasil yang disajikan pada Tabel 4.13, efisiensi adsorpsi tertinggi diperoleh pada *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit dengan nilai sebesar 98,11%, diikuti oleh *biochar* sekam padi murni (69,79%) dan *biochar* sekam padi teraktivasi (67,06%). Hasil tersebut menunjukkan bahwa modifikasi *biochar* dengan magnetit meningkatkan kapasitas adsorpsi secara signifikan. Perbedaan efisiensi ini dapat dikaitkan dengan perubahan struktur dan sifat permukaan akibat proses aktivasi dan modifikasi. Aktivasi *biochar* bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan dan ketersediaan situs adsorpsi aktif (Wardalia, 2016). Sementara itu, modifikasi dengan magnetit dapat meningkatkan daya tarik elektrostatik dan pertukaran ion, sehingga meningkatkan efisiensi penyerapan polutan pada limbah batik.

Dari data yang diperoleh, pH awal limbah batik sebelum adsorpsi sebesar 5,14 dan mengalami sedikit peningkatan setelah proses adsorpsi, yaitu menjadi 5,20 pada *biochar* sekam padi murni, 5,21 pada *biochar* sekam padi teraktivasi, dan 6,02 pada *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit. Peningkatan pH yang lebih signifikan pada *biochar* hasil modifikasi magnetik mengindikasikan bahwa interaksi antara ion-ion di lingkungan dengan gugus fungsi pada permukaan adsorben semakin kuat (Senthilkumar et al., 2020)

Biochar memiliki berbagai mekanisme adsorpsi, meliputi interaksi elektrostatik, pertukaran ion, dan interaksi hidrofobik dengan zat organik pada limbah batik. Modifikasi dengan magnetit meningkatkan efisiensi adsorpsi dengan cara meningkatkan interaksi elektrostatik antara permukaan *biochar* magnetik dengan ion-ion polutan dalam larutan (Ahmad et al., 2014). Selain itu, kombinasi *biochar* dan magnetit dapat meningkatkan daya tarik ion logam pada limbah batik, sehingga meningkatkan efisiensi adsorpsi hingga 98,11%. Berdasarkan hasil penelitian ini, *biochar* sekam padi hasil modifikasi magnetit terbukti paling efektif dalam menurunkan kadar polutan pada limbah cair batik.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pemanfaatan *biochar* sekam padi yang termodifikasi magnetit sebagai adsorben logam berat timbal (Pb) pada Limbah Cair Industri Batik Yogyakarta, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakterisasi *biochar* sekam padi, *biochar* sekam padi teraktivasi, dan *biochar* sekam padi termodifikasi magnetit menunjukkan bahwa aktivasi dengan H_3PO_4 meningkatkan luas permukaan dan jumlah pori, sedangkan modifikasi magnetit menambah sifat magnetik yang meningkatkan interaksi elektrostatik dengan ion Pb.
2. Variasi massa adsorben, pH, waktu kontak, dan konsentrasi awal Pb mempengaruhi efisiensi adsorpsi, dengan kondisi optimum massa adsorben 100 mg, pH 5, waktu kontak 60 menit, dan konsentrasi awal yang lebih rendah sehingga menghasilkan efisiensi adsorpsi yang lebih tinggi.
3. *Biochar* sekam padi termodifikasi magnetit menunjukkan efisiensi adsorpsi maksimum tertinggi terhadap logam berat timbal (Pb) dalam limbah cair industri batik dengan efisiensi hingga 98,11% dengan penurunan konsentrasi Pb dari 8,874 mg/L menjadi 0,167 mg/L setelah proses adsorpsi. Secara kapasitas, *biochar* sekam padi memiliki nilai adsorpsi maksimum tertinggi sebesar 7,7399 mg/g berdasarkan model Langmuir, namun *biochar* termodifikasi magnetit lebih sesuai dengan model Freundlich, yang menunjukkan karakter permukaan heterogen dan efektivitas tinggi dalam kondisi limbah nyata.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya perlu dilakukan untuk mengoptimalkan metode aktivasi dan modifikasi *biochar* guna meningkatkan kapasitas adsorpsi dan menguji aplikasinya pada skala industri sehingga efektivitasnya dapat diaplikasikan secara nyata. Selain itu, diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai strategi regenerasi dan

daur ulang *biochar* pasca-adsorpsi agar dapat digunakan kembali tanpa kehilangan efisiensinya, sehingga teknologi ini menjadi lebih ekonomis dan berkelanjutan dalam pengolahan limbah industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*, 99, 19-33.
- Alfiany, H., Bahri, S., & Nurakhirawati, N. (2013). Kajian penggunaan arang aktif tongkol jagung sebagai adsorben logam Pb dengan beberapa aktivator asam. *Natural Science: Journal of Science and Technology*, 2(3).
- Aman, F., Mariana, M., Mahidin, M., & Maulana, F. (2018). Penyerapan limbah cair amonia menggunakan arang aktif ampas kopi. *Indonesian Journal of Industrial Research*, 8(1), 47-52.
- Anggriani, U. M., Hasan, A., & Purnamasari, I. (2021). Kinetika adsorpsi karbon aktif dalam penurunan konsentrasi logam tembaga (Cu) dan timbal (Pb). *Kinetika*, 12(2), 29-37.
- Apriyani, N. (2018). Industri batik: kandungan limbah cair dan metode pengolahannya. *Media Ilmiah Teknik Lingkungan (MITL)*, 3(1), 21-29.
- Chander, S., Yadav, S., Sharma, H. R., & Gupta, A. (2024). Sequestration of Cd (II) utilizing biowaste-fabricated recyclable mesoporous magnetite (Fe₃O₄) nano-adsorbent: Process optimization, thermodynamic investigation, simulation modeling, and feasibility for electroplating effluent. *Journal of Alloys and Compounds*, 986, 174088.
- Durán-Valle, C. J. (2012). Techniques employed in the physicochemical characterization of activated carbons. Lignocellulosic Precursors Used in the Synthesis of Activated Carbon-Characterization Techniques and Applications in the Wastewater Treatment, 38-58.
- Elina, R., Rori, D. C., & Khair, M. (2023). Karakterisasi FTIR pada Karbon Aktif Terimpregnasi ZnO. *J. Pendidik. Tambusai*, 7(3), 23827-23831.
- Fisli, A., Safitri, R. D., Nurhasni, N., & Deswita, D. (2018). Analisis struktur dan porositas komposit Fe₃O₄-karbon aktif dari limbah kertas sebagai adsorben magnetik. *Indonesian Journal of Materials Science*, 19(4), 179-187.

- Goswami, L., Kushwaha, A., Kafle, S. R., & Kim, B. S. (2022). Surface modification of biochar for dye removal from wastewater. *Catalysts*, 12(8), 817.
- Halim, A., Romadon, J., & Achyar, M. Y. (2021). Pembuatan adsorben dari sekam padi sebagai penyerap logam berat tembaga (Cu) dan timbal (Pb) dalam air limbah. *Sustainable Environmental and Optimizing Industry Journal*, 3(2), 66-74.
- Hasan, E. S., Jahiding, M., Ilmawati, W. O. S., Wati, W., & Sudiana, I. N. (2017, May). Proximate and the calorific value analysis of brown coal for high-calorie hybrid briquette application. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 846, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.
- Hegazi, H. A. (2013). Removal of heavy metals from wastewater using agricultural and industrial wastes as adsorbents. *HBRC journal*, 9(3), 276-282.
- Irianti, T. T., Kuswandi, K., Nuranto, S., & Budiyan, A. (2017). Logam berat dan kesehatan. Yogyakarta: CV Grafika Indah.
- Jagadeesh, N., & Sundaram, B. (2023). Adsorption of pollutants from wastewater by biochar: a review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 100226.
- Kenedy, F. V., Nada, I. M., Wiratama, I. G. N. M., & Wijaya, I. M. W. (2024). Pengaruh Waktu Kontak Adsorpsi Biochar Terhadap Penyerapan Ion Fosfat Dalam Air Limbah Sintetis. *Jurnal Ilmiah Teknik Universitas Mahasaraswati Denpasar (JITUMAS)*, 4(2), 129-134.
- Lestari, I., Mahraja, M., Farid, F., Gusti, D. R., & Permana, E. (2020). Penyerapan ion Pb (II) menggunakan adsorben dari limbah padat lumpur aktif pengolahan air minum. *Chemistry Progress*, 13(2).
- Long, X., Zhang, R., Rong, R., Wu, P., Chen, S., Ao, J., ... & Xie, H. (2023). Adsorption characteristics of heavy metals Pb²⁺ and Zn²⁺ by magnetic biochar obtained from modified AMD sludge. *Toxics*, 11(7), 590.
- Maharani, E. P., Briliana, H., Putri, E. H., Faraditta, F. S., & Az-zhaffirah, A. R. (2024). A Comprehensive Review on Atomic Absorption Spectroscopy: Principles, Techniques, and Applications. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 10(15), 20-29.

- Mahmudah, D., Sakinah, N., & Suharyadi, E. (2014). Adsorpsi Logam Tembaga (Cu), Mangan (Mn) dan Nikel (Ni) dalam Artificial Limbah Cair dengan Menggunakan Nanopartikel Magnetit (Fe_3O_4). *Indonesian Journal of Applied Physics*, 4(02), 126-133.
- Muhimmatin, I. (2019). Pengelolaan limbah cair industri batik menggunakan mikroorganisme di Kecamatan Cluring Kabupaten Banyuwangi. *Warta Pengabdian*, 13(3), 106-115.
- Nurhasni, N., Hendrawati, H., & Saniyyah, N. (2014). Sekam padi untuk menyerap ion logam tembaga dan timbal dalam air limbah. *Jurnal Kimia Valensi*, 4(1).
- Pasaribu, J., Nurlaila, R., Ibrahim, I., Muhammad, M., & Hakim, L. (2024). Pengaruh Aktivator Konsentrasi Asam Sulfat dan Massa Serbuk Biji Pepaya Terhadap Kualitas Biosorben. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, 4(4), 570-583.
- Perdana, A., Zarkasi, A., Hamdani, D., Natalisanto, A. I. N., & Munir, R. (2023). Karakteristik Adsorben Ampas Teh dalam Menyerap Ion Logam Timbal Menggunakan Model Isoterm Langmuir. *JlIF (Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika)*, 7(1), 90-97.
- Pratiwi, D., Syakur, S., & Darusman, D. (2021). Karakteristik Biochar Pada Beberapa Metode Pembuatan dan Bahan Baku. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 6(3), 210-216.
- Rofikoh, V., Zaman, B., & Samadikun, B. P. (2023). The Potential of Commercial Biomass-Based Activated Carbon to Remove Heavy Metals in Wastewater—A Review. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(1), 132-141.
- Safrianti, I., Wahyuni, N., & Zaharah, T. A. (2012). Adsorpsi timbal (II) oleh selulosa limbah jerami padi teraktivasi asam nitrat: pengaruh pH dan waktu kontak. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 1(1).
- Satoding, G. A., Ardiansah, A., & Sumbung, J. (2024). A Study on The Effectiveness of Bentonite Adsorbent in Reducing Pb Metal Levels in Used Lubricating Oil. *Jurnal Sains dan Teknik Terapan*, 2(1), 20-26.
- Senthilkumar, R., & Prasad, D. M. R. (2020). Sorption of Heavy Metals onto. *Applications of Biochar for Environmental Safety*, 207.

- Solika, N., Napitupulu, M., & Gonggo, S. T. (2017). Bioadsorpsi Pb (II) Menggunakan Kulit Jeruk Siam (*Citrus Reticulata*). *Jurnal Akademika Kimia*, 6(3), 160-164.
- Suprihatin, H. (2014). Kandungan organik limbah cair industri batik Jetis Sidoarjo dan alternatif pengolahannya. *Pusat Penelitian Lingkungan Hidup Universitas Riau*, 130-138.
- Umah, S., Prasetyo, A., & Barroroh, H. (2012). Kajian penambahan abu sekam padi dari berbagai suhu pengabuan terhadap plastisitas kaolin. *Alchemy*, 1(2), 70-74.
- Wardalia, W. (2016). Karakterisasi pembuatan adsorben dari sekam padi sebagai pengadsorp logam timbal pada limbah cair. *Jurnal Integrasi Proses*, 6(2).
- Wimarsela, S., Junaidi, R., & Silviyati, I. (2021). Sintesis Silika Gel dari Abu Cangkang dan Serabut Kelapa Sawit Terimobilisasi Difenilkarbazon dengan Metode Sol-Gel. *Jurnal Penelitian Inovatif*, 1(2), 165-174.
- Yang, X., Wan, Y., Zheng, Y., He, F., Yu, Z., Huang, J., ... & Gao, B. (2019). Surface functional groups of carbon-based adsorbents and their roles in the removal of heavy metals from aqueous solutions: a critical review. *Chemical Engineering Journal*, 366, 608-621.
- Zannah, M. (2020). Isoterm Adsorpsi Metilen Biru oleh Biochar dari Kulit Singkong (*Manihot esculenta crantz*) yang Dimodifikasi Menggunakan Magnetit (Fe_3O_4).

LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan

1. Preparasi 1 L Larutan Standar Pb 100 Mg/L

- $M_r \text{ Pb(NO}_3)_2 = 331,2 \text{ G/Mol}$
- $A_r \text{ Pb} = 207,19 \text{ g/mol}$
- Fraksi massa Pb dalam $\text{Pb(NO}_3)_2$:
$$\frac{A_r \text{ Pb}}{M_r \text{ Pb(NO}_3)_2} = \frac{207,19 \text{ g/mol}}{331,2 \text{ g/mol}} = 0,625$$
- Massa $\text{Pb(NO}_3)_2$ yang dibutuhkan:

$$\frac{100 \text{ mg}}{0,625} = 160 \text{ mg} = 0,16 \text{ g}$$

Jadi, 0,16 gram $\text{Pb(NO}_3)_2$ dilarutkan dalam 1000 ml aquades akan menjadi larutan induk Pb 100 mg/L.

2. Pembuatan Larutan Standar Pb Seri 5-50 ppm

a) **5 ppm**

$$\begin{aligned} M_1 \cdot V_1 &= M_2 \cdot V_2 \\ 100 \text{ ppm} \cdot V_1 &= 5 \text{ ppm} \cdot 100 \text{ ml} \\ V_1 &= 5 \text{ ml} \end{aligned}$$

b) **10 ppm**

$$\begin{aligned} M_1 \cdot V_1 &= M_2 \cdot V_2 \\ 100 \text{ ppm} \cdot V_1 &= 10 \text{ ppm} \cdot 100 \text{ ml} \\ V_1 &= 10 \text{ ml} \end{aligned}$$

c) **25 ppm**

$$\begin{aligned} M_1 \cdot V_1 &= M_2 \cdot V_2 \\ 100 \text{ ppm} \cdot V_1 &= 25 \text{ ppm} \cdot 100 \text{ ml} \\ V_1 &= 25 \text{ ml} \end{aligned}$$

d) **50 ppm**

$$\begin{aligned}M_1 \cdot V_1 &= M_2 \cdot V_2 \\100 \text{ ppm} \cdot V_1 &= 50 \text{ ppm} \cdot 100 \text{ ml} \\V_1 &= 50 \text{ ml}\end{aligned}$$

3. Pembuatan 1 L Larutan NaOH 5 M

- Molaritas (M) = 5 M
- Volume larutan = 1 L
- Mr NaOH = 40 g/mol
- Massa NaOH yang dibutuhkan:
 $\text{Massa} = \text{Molaritas} \cdot \text{Mr} \cdot \text{Volume}$
 $\text{Massa} = 5 \text{ M} \cdot 40 \text{ g/mol} \cdot 1 \text{ L}$
 $\text{Massa} = 200 \text{ g}$

Jadi, 200 gram NaOH ditambahkan dalam labu ukur 1000 ml dan ditambahkan aquades hingga tanda batas.

4. Pembuatan 100 mL Larutan NaOH 0,1 M

$$\begin{aligned}M_1 \cdot V_1 &= M_2 \cdot V_2 \\5 \text{ M} \cdot V_1 &= 0,1 \text{ M} \cdot 100 \text{ ml} \\V_1 &= 2 \text{ ml}\end{aligned}$$

5. Pembuatan H₃PO₄ 10% 1 L dari larutan H₃PO₄ 85%

$$\begin{aligned}C_1 \cdot V_1 &= C_2 \cdot V_2 \\85\% \cdot V_1 &= 10\% \cdot 1000 \text{ ml} \\V_1 &= 117,65 \text{ ml}\end{aligned}$$

Jadi, 117,65 ml H₃PO₄ 85% ditambahkan dalam labu ukur 1000 ml dan ditambahkan aquades hingga tanda batas.

Lampiran 2 Dokumentasi Penelitian

1. Preparasi Adsorben *Biochar* Sekam Padi



Proses Pengeringan
Sekam Padi Setelah
dicuci



Sekam Padi Setelah
Proses Furnace



Biochar Setelah
dihaluskan

2. Aktivasi *Biochar* Sekam Padi



Proses Aktivasi *Biochar* Sekam Padi



Pengeringan *Biochar* Sekam Padi
Setelah Aktivasi dan Pencucian

3. Modifikasi *Biochar* Sekam Padi dengan Magnetit



Modifikasi *Biochar* Sekam Padi dengan Magnetit



Penambahan NaOH pada Proses Modifikasi



Biochar Sekam Padi yang telah dimodifikasi dengan Magnetit



Menguji Sifat Kemagnetan *Biochar* Modifikasi

4. Pengujian Adsorpsi



Pengadukan Larutan dan Adsorben
dalam Proses Adsorpsi



Pengujian pH Larutan

Lampiran 3 Data Pengujian Adsorpsi

1. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Massa

Jenis Adsorben	Sampel (mg)	C in (mg/L)	pH awal	pH akhir	C ef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi (%)
<i>Biochar Sekam Padi</i>	Kontrol	8,4859	5,31	5,35	7,226	1,2599	14,85
	50	8,4859	5,31	5,42	3,7459	4,74	55,86
	100	8,4859	5,31	6,15	4,2424	4,2435	50,01
	150	8,4859	5,31	6,18	4,3526	4,1333	48,71
	200	8,4859	5,31	6,23	3,9268	4,5591	53,73
<i>Biochar Sekam Padi Teraktivasi</i>	Kontrol	8,4859	5,31	5,36	6,8393	1,6466	19,40
	50	8,4859	5,31	5,41	1,5949	6,891	81,21
	100	8,4859	5,31	5,43	1,3554	7,1305	84,03
	150	8,4859	5,31	5,53	1,4901	6,9958	82,44
	200	8,4859	5,31	6,13	0,9282	7,5577	89,06
<i>Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit</i>	Kontrol	8,4859	5,31	5,33	6,3330	2,1529	25,37
	50	8,4859	5,31	6,24	3,8016	4,6843	55,20
	100	8,4859	5,31	6,2	2,0017	6,4842	76,41
	150	8,4859	5,31	6,32	2,0154	6,4705	76,25
	200	8,4859	5,31	6,34	1,4507	7,0352	82,90

2. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi pH

Jenis Adsorben	Massa (mg)	pH rencana	pH awal	pH akhir	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi (%)
<i>Biochar Sekam Padi</i>	100	3	3,17	3,26	8,4859	0,9454	7,5405	88,86
	100	5	5,23	6,12	8,4859	0,7318	7,7541	91,38
	100	7	7,25	7,61	8,4859	2,8542	5,6317	66,37
	100	9	9,28	9,45	8,4859	0,7386	7,7473	91,30
<i>Biochar Sekam Padi Teraktivasi</i>	100	3	3,17	3,36	8,4859	2,797	5,6889	67,04
	100	5	5,23	5,35	8,4859	1,3222	7,1637	84,42
	100	7	7,25	7,25	8,4859	1,5739	6,912	81,45
	100	9	9,28	9,28	8,4859	1,5617	6,9242	81,60
<i>Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit</i>	100	3	3,17	3,29	8,4859	1,476	7,0099	82,61
	100	5	5,23	6,21	8,4859	1,5209	6,965	82,08
	100	7	7,25	8,01	8,4859	1,5848	6,9011	81,32
	100	9	9,28	9,31	8,4859	1,3916	7,0943	83,60

3. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Waktu Kontak

Jenis Adsorben	Massa Adsorben (mg)	pH awal	pH akhir	Waktu Kontak (menit)	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terjerap (mg/L)	Efisiensi (%)
<i>Biochar</i> Sekam Padi	100	5,12	5,21	15	8,4859	4,173	4,3129	50,82
	100	5,12	6,11	30	8,4859	3,1513	5,3346	62,86
	100	5,12	6,07	60	8,4859	3,3309	5,155	60,75
	100	5,12	6,21	90	8,4859	3,2656	5,2203	61,52
	100	5,12	6,18	120	8,4859	3,3785	5,1074	60,19
<i>Biochar</i> Sekam Padi Teraktivasi	100	5,12	5,13	15	8,4859	1,2983	7,1876	84,70
	100	5,12	5,15	30	8,4859	0,6085	7,8774	92,83
	100	5,12	5,21	60	8,4859	1,2071	7,2788	85,78
	100	5,12	5,11	90	8,4859	1,335	7,1509	84,27
	100	5,12	6,02	120	8,4859	1,0167	7,4692	88,02
<i>Biochar</i> Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	100	5,12	6,12	15	8,4859	3,2343	5,2516	61,89
	100	5,12	6,01	30	8,4859	2,0724	6,4135	75,58
	100	5,12	6,11	60	8,4859	2,0289	6,457	76,09
	100	5,12	6,25	90	8,4859	2,0602	6,4257	75,72
	100	5,12	6,21	120	8,4859	1,9255	6,5604	77,31

4. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Konsentrasi Larutan

Jenis Adsorben	Massa Adsorben (mg)	pH awal	pH akhir	Konsentrasi rencana (mg/L)	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terjerap (mg/L)	Efisiensi (%)
<i>Biochar</i> Sekam Padi	100	5,16	5,23	5	5,1707	0,4390	4,7317	91,51
	100	5,16	6,31	10	14,5000	1,2317	13,2683	91,51
	100	5,16	6,23	25	28,4573	7,7012	20,7561	72,94
	100	5,16	5,42	50	47,4512	9,5610	37,8902	79,85
	100	5,16	5,44	100	76,2195	46,0915	30,1280	39,53
<i>Biochar</i> Sekam Padi Teraktivasi	100	5,16	5,19	5	5,171	0,232	4,939024	95,52
	100	5,16	5,25	10	14,500	0,848	13,65244	94,15
	100	5,16	5,23	25	28,457	2,530	25,92683	91,11
	100	5,16	6,15	50	47,451	29,146	18,30488	38,58
	100	5,16	5,25	100	76,220	58,341	17,87805	23,46
<i>Biochar</i> Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	100	5,16	6,13	5	5,1707	0,695	4,4756	86,56
	100	5,16	6,17	10	14,5000	2,311	12,1890	84,06
	100	5,16	6,21	25	28,4573	1,628	26,8293	94,28
	100	5,16	6,31	50	47,4512	3,073	44,3780	93,52
	100	5,16	6,24	100	76,2195	4,695	71,5244	93,84

5. Perhitungan Model Isoterm

a. Isoterm Langmuir

Jenis Adsorben	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	Qe	1/ce	1/qe
Biochar Sekam Padi	5,1707	0,4390	0,9463	2,2778	1,0567
	14,5000	1,2317	2,6537	0,8119	0,3768
	28,4573	7,7012	4,1512	0,1298	0,2409
	47,4512	9,5610	7,5780	0,1046	0,1320
	76,2195	46,0915	6,0256	0,0217	0,1660
Biochar Sekam Padi Teraktivasi	5,171	0,232	0,9878	4,3158	1,0123
	14,500	0,848	2,7305	1,1799	0,3662
	28,457	2,530	5,1854	0,3952	0,1929
	47,451	29,146	3,6610	0,0343	0,2732
	76,220	58,341	3,5756	0,0171	0,2797
Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	5,1707	0,695	0,8951	1,4386	1,1172
	14,5000	2,311	2,4378	0,4327	0,4102
	28,4573	1,628	5,3659	0,6142	0,1864
	47,4512	3,073	8,8756	0,3254	0,1127
	76,2195	4,695	14,3049	0,2130	0,0699

b. Isoterm Freundlich

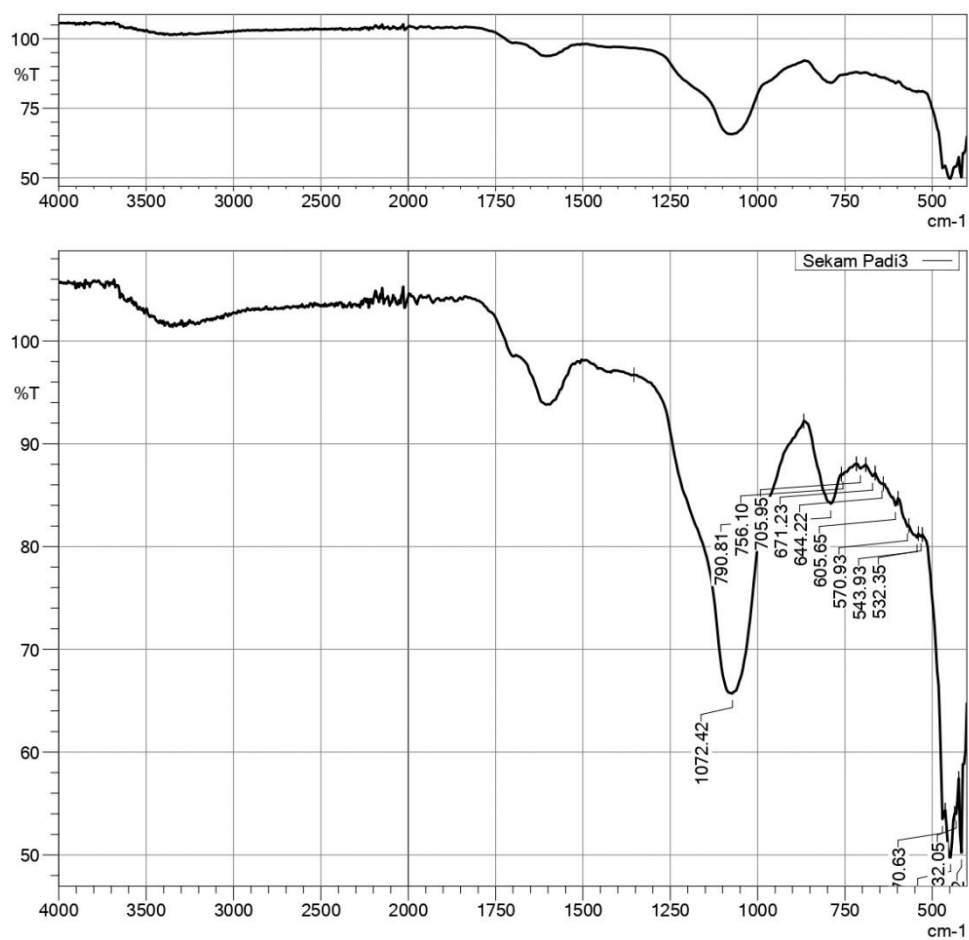
Jenis Adsorben	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	Qe	log Ce	Log qe
Biochar Sekam Padi	5,1707	0,4390	0,9463	-0,3575	-0,0240
	14,5000	1,2317	2,6537	0,0905	0,3768
	28,4573	7,7012	4,1512	0,8866	0,2409
	47,4512	9,5610	7,5780	0,9805	0,1320
	76,2195	46,0915	6,0256	1,6636	0,1660
Biochar Sekam Padi Teraktivasi	5,171	0,232	0,9878	-0,6351	-0,0053
	14,500	0,848	2,7305	-0,0718	0,4362
	28,457	2,530	5,1854	0,4032	0,7148
	47,451	29,146	3,6610	1,4646	0,5636
	76,220	58,341	3,5756	1,7660	0,5534
Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	5,1707	0,695	0,8951	-0,1579	-0,0481
	14,5000	2,311	2,4378	0,3638	0,3870
	28,4573	1,628	5,3659	0,2117	0,7296
	47,4512	3,073	8,8756	0,4876	0,9482
	76,2195	4,695	14,3049	0,6716	1,1555

c. Perbandingan Metode Langmuir dan Freundlich

Jenis Adsorben	Langmuir			Freundlich		
	Qm	KL	R ²	Kf	1/n	R ²
<i>Biochar</i> Sekam Padi	7,7399	0,3259	0,9794	1,4378	0,0316	0,0291
<i>Biochar</i> Sekam Padi Teraktivasi	4,7551	1,1651	0,9568	2,2269	2,2269	0,4393
<i>Biochar</i> Sekam Padi Termodifikasi Magnetit	-7,7519	-0,1535	0,9013	1,5893	1,3738	0,8200

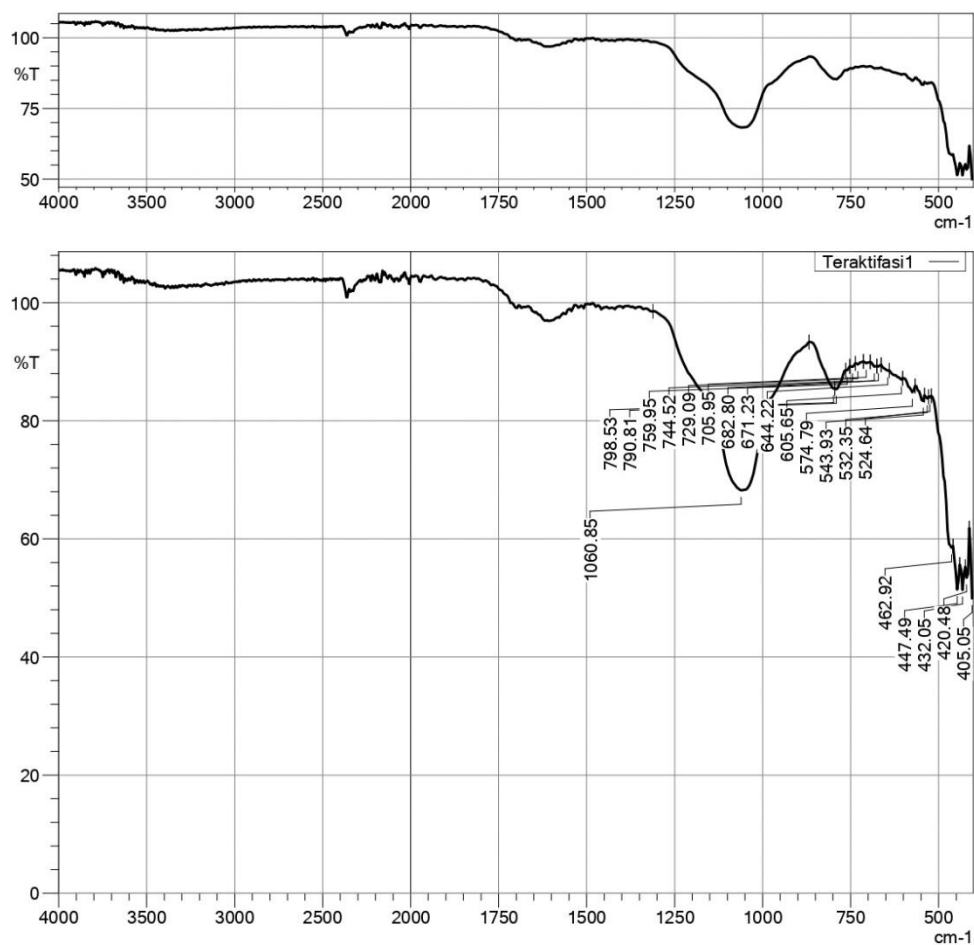
Lampiran 4 Data Karakteristik FTIR

1. Biochar Sekam Padi Sebelum Adsorpsi



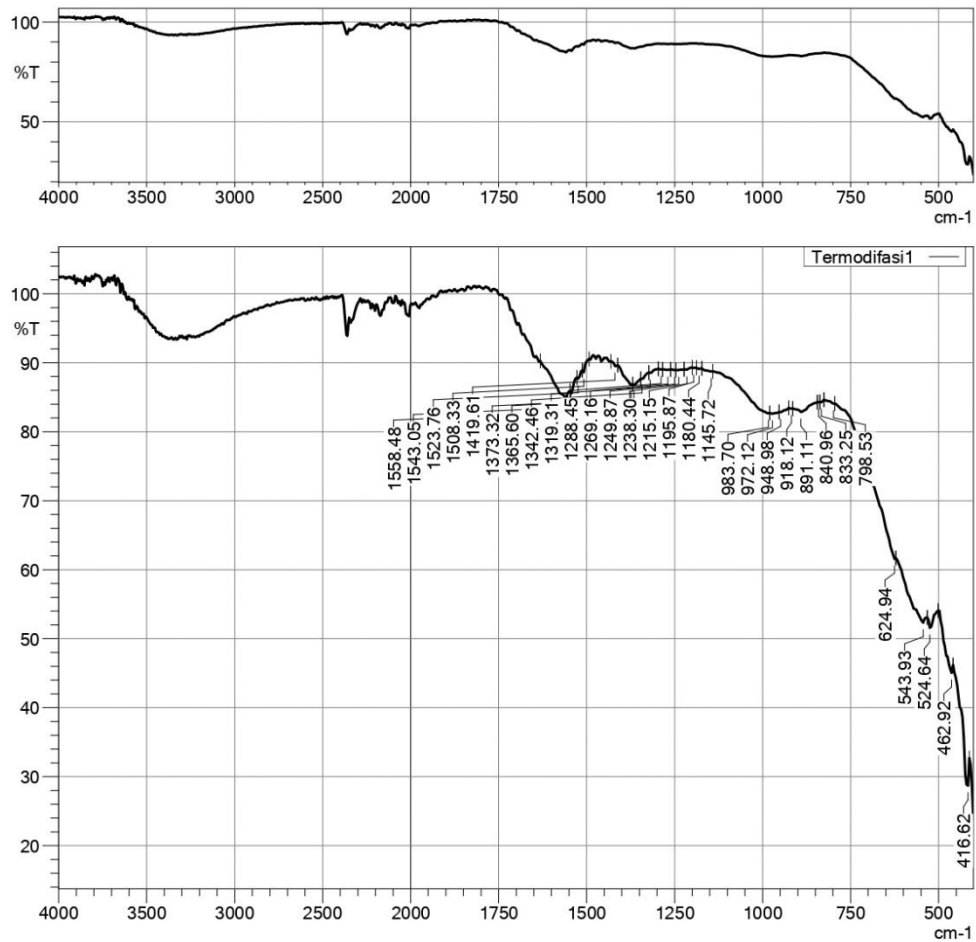
	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	416.62	50.23	9.62	424.34	401.19	997.838	96.707	
2	432.05	54.00	1.15	435.91	424.34	520.743	8.253	
3	447.49	49.77	4.39	462.92	435.91	1303.944	66.843	
4	470.63	53.50	4.01	528.50	462.92	1928.079	-186.399	
5	532.35	80.98	0.21	540.07	528.50	219.095	1.548	
6	543.93	80.88	0.48	567.07	540.07	504.789	9.065	
7	570.93	81.96	0.42	597.93	567.07	521.279	7.956	
8	605.65	84.00	0.95	640.37	597.93	634.183	14.680	
9	644.22	86.09	0.19	663.51	640.37	313.827	4.235	
10	671.23	86.85	0.52	690.52	663.51	343.294	7.035	
11	705.95	87.59	0.42	717.52	690.52	329.212	5.108	
12	756.10	86.99	0.14	759.95	717.52	529.955	1.044	
13	790.81	84.17	4.34	867.97	759.95	1363.213	241.255	
14	1072.42	65.71	28.38	1354.03	867.97	8036.144	5337.680	

2. Biochar Sekam Padi Teraktivasi Sebelum Adsorpsi



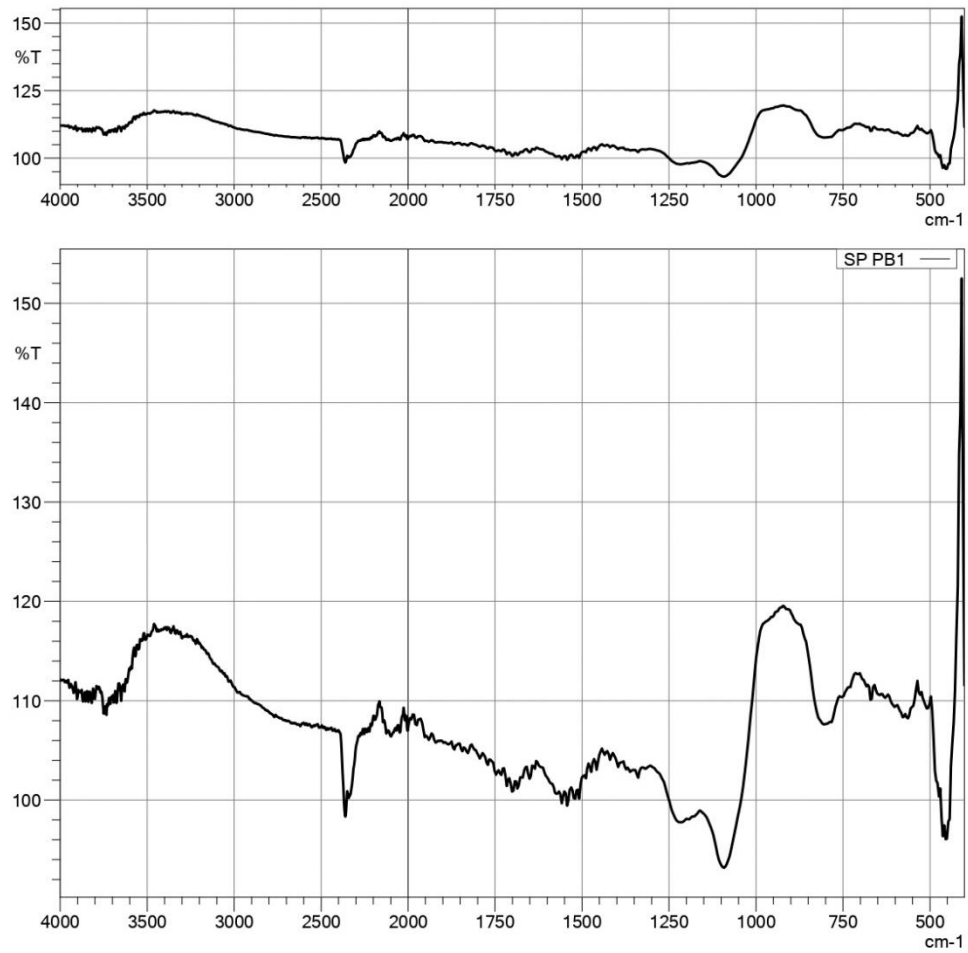
	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	405.05	49.91	4.70	412.77	401.19	523.040	18.593	
2	420.48	53.41	4.03	424.34	412.77	516.788	36.946	
3	432.05	51.36	4.09	439.77	424.34	712.293	24.865	
4	447.49	51.44	5.45	459.06	439.77	876.672	51.241	
5	462.92	58.54	1.83	520.78	459.06	1734.859	-24.508	
6	524.64	83.96	0.19	528.50	520.78	123.014	0.718	
7	532.35	83.79	0.38	540.07	528.50	185.139	2.361	
8	543.93	83.38	1.18	567.07	540.07	415.490	13.586	
9	574.79	84.84	1.35	601.79	567.07	486.079	18.945	
10	605.65	86.97	0.36	640.37	601.79	477.673	9.030	
11	644.22	88.50	0.18	663.51	640.37	258.885	4.157	
12	671.23	89.19	0.14	675.09	663.51	123.766	0.763	
13	682.80	89.17	0.37	694.37	675.09	203.176	2.893	
14	705.95	89.76	0.25	713.66	694.37	195.379	2.502	
15	729.09	89.56	0.26	736.81	713.66	236.508	2.122	
16	744.52	89.14	0.33	752.24	736.81	165.426	2.874	
17	759.95	88.55	0.24	763.81	752.24	129.938	1.424	
18	790.81	85.34	0.53	794.67	763.81	411.587	11.300	
19	798.53	85.44	0.46	867.97	794.67	772.253	-3.344	
20	1060.85	68.26	27.36	1311.59	867.97	7002.652	5207.333	

3. Biochar Sekam Padi Termodifikasi Magnetit Sebelum Adsorpsi

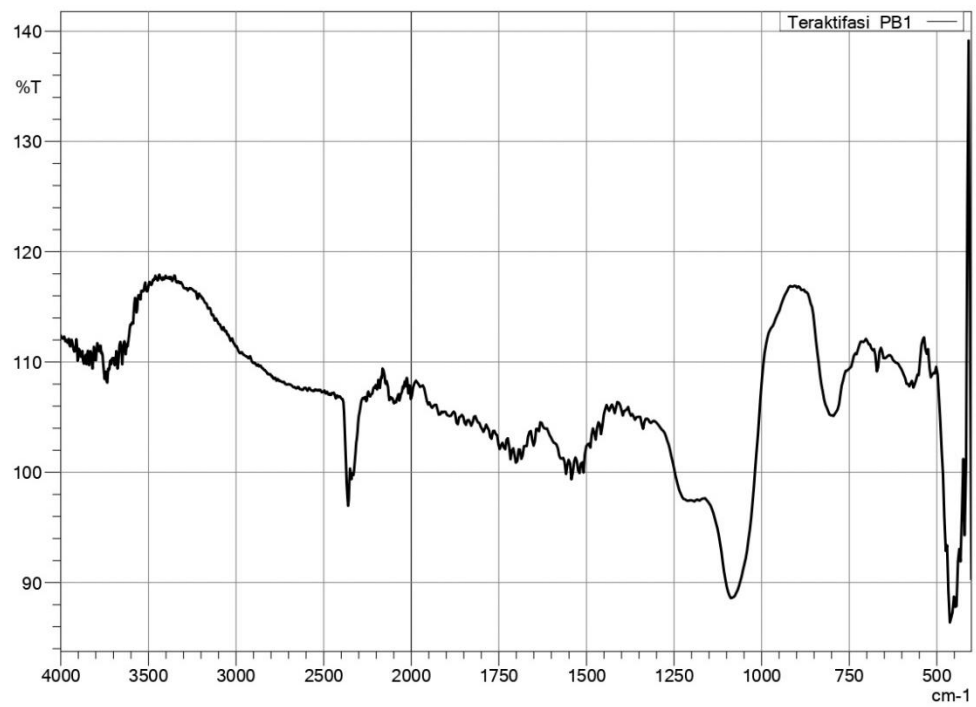
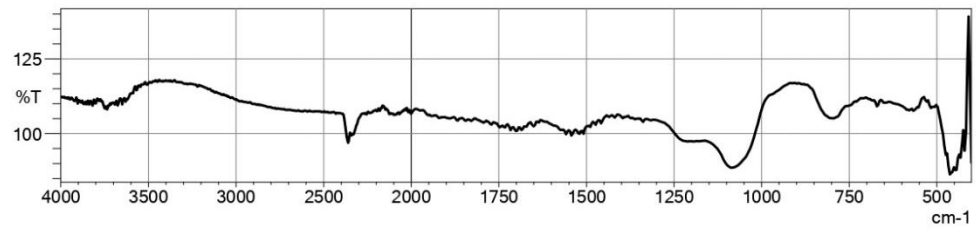


	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	416.62	28.71	5.11	459.06	412.77	2869.980	66.317	
2	462.92	45.06	1.83	501.49	459.06	2164.869	48.352	
3	524.64	51.59	1.74	532.35	501.49	1454.134	21.571	
4	543.93	52.35	1.86	621.08	532.35	3899.721	118.533	
5	624.94	61.58	0.60	794.67	621.08	4365.988	-341.968	
6	798.53	84.07	0.08	825.53	794.67	482.783	0.172	
7	833.25	84.30	0.12	837.11	825.53	180.526	0.924	
8	840.96	84.26	0.04	844.82	837.11	121.299	0.160	
9	891.11	82.86	0.82	914.26	844.82	1146.988	24.254	
10	918.12	83.36	0.05	925.83	914.26	192.326	0.417	
11	948.98	82.85	0.10	952.84	925.83	456.907	2.234	
12	972.12	82.62	0.15	979.84	952.84	466.885	2.357	
13	983.70	82.69	0.17	1141.86	979.84	2276.927	-33.261	
14	1145.72	88.75	0.06	1172.72	1141.86	343.243	3.070	
15	1180.44	89.10	0.14	1188.15	1172.72	167.108	1.023	
16	1195.87	89.26	0.04	1199.72	1188.15	124.107	0.230	
17	1215.15	89.01	0.13	1222.87	1199.72	251.163	0.875	
18	1238.30	88.95	0.05	1246.02	1222.87	254.950	0.684	
19	1249.87	88.95	0.04	1261.45	1246.02	169.929	0.207	
20	1269.16	88.96	0.08	1284.59	1261.45	254.553	0.877	
21	1288.45	89.03	0.05	1296.16	1284.59	126.556	0.258	
22	1319.31	88.54	0.11	1323.17	1296.16	301.394	0.279	
23	1342.46	87.68	0.15	1346.31	1323.17	275.942	1.148	
24	1365.60	86.84	0.20	1369.46	1346.31	297.338	3.299	
25	1373.32	86.80	0.36	1411.89	1369.46	509.296	12.048	
26	1419.61	89.52	0.35	1431.18	1411.89	196.442	2.182	
27	1508.33	88.62	0.62	1512.19	1492.90	198.295	0.240	
28	1523.76	87.71	0.41	1527.62	1512.19	181.681	2.510	
29	1543.05	85.57	0.75	1546.91	1527.62	255.460	2.627	
30	1558.48	84.77	1.75	1631.78	1546.91	1089.339	79.447	

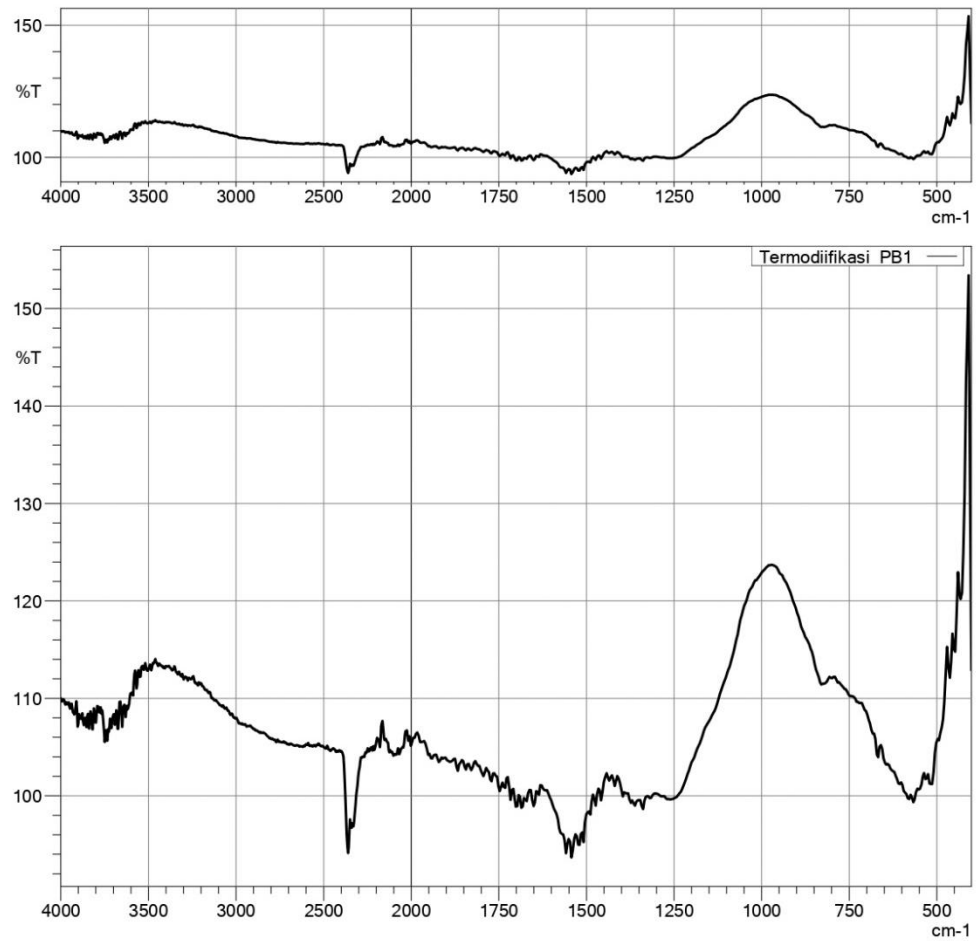
4. *Biochar Sekam Padi Setelah Adsorpsi*



5. *Biochar* Sekam Padi Teraktivasi Setelah Adsorpsi



6. *Biochar* Sekam Padi Termodifikasi Magnetit Setelah Adsorpsi



RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Rosa Amelia, yang akrab disapa Oca. Penulis lahir di Kota Prabumulih pada tanggal 18 Juli 2003 dan merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Ahmad Rozali Effendi dan Ibu Risdariah. Penulis menempuh pendidikan menengah pertama di SMP N 1 Prabumulih pada tahun 2015 hingga 2018. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 1 Prabumulih pada tahun 2018 hingga 2021. Setelah menyelesaikan pendidikan menengah atas, pada tahun 2021 penulis diterima di Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, dan memilih Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, sebagai bidang studi jenjang Strata Satu (S1).

Selama masa perkuliahan, penulis turut aktif mengikuti berbagai kegiatan di dalam maupun di luar kampus. Penulis bergabung dalam Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) *Enviro English Community* (EVIC) sebagai staf Divisi Media. Penulis juga menjadi bagian dari *organizing committee* acara “Lintas Lingkungan 2022” sebagai staf Divisi Dekorasi dan Dokumentasi. Selain itu, penulis juga pernah dipercaya sebagai Kepala Bidang Media dalam Tim Kerja Dusun Binaan. Melalui berbagai pengalaman organisasi dan kegiatan tersebut, penulis memperoleh banyak pembelajaran serta pengembangan keterampilan dalam bidang komunikasi, kerja tim, dan pengabdian masyarakat, yang turut mendukung proses akademik dan pengembangan diri penulis selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi.