

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI KOMPOSIT *BIOCHAR*
MAGNETIT SEBAGAI ADSORBEN ION Pb^{2+} dan Cu^{2+} PADA
LIMBAH CAIR INDUSTRI PERCETAKAN SABLON**

Synthesis and Characterization of *Biochar* Magnetite
Composite as adsorbent of Pb^{2+} and Cu^{2+} Ions on Screen
Printing Industry Liquid Waste

WIDI APRILIA TA'BI

H012 20 2006



PROGRAM STUDI MAGISTER KIMIA

SEKOLAH PASCASARJANA

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2024

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI KOMPOSIT *BIOCHAR*
MAGNETIT SEBAGAI ADSORBEN ION Pb^{2+} dan Cu^{2+} PADA
LIMBAH CAIR INDUSTRI PERCETAKAN SABLON**

Synthesis and Characterization of *Biochar* Magnetite
Composite as adsorbent of Pb^{2+} and Cu^{2+} Ions on Screen
Printing Industry Liquid Waste

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar magister

Program Studi Magister Kimia

Disusun dan diajukan oleh

WIDI APRILIA TA'BI
H012202006

kepada

**PROGRAM MAGISTER KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

TESIS

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI KOMPOSIT *BIOCHAR*
MAGNETIT SEBAGAI ADSORBEN ION Pb^{2+} DAN Cu^{2+} PADA
LIMBAH CAIR INDUSTRI PERCETAKAN SABLON**

WIDI APRILIA TA'BI

NIM: H012202006

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam
rangka Penyelesaian Studi Program Magister Program Kimia Fakultas
Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin

pada tanggal 26 Februari 2024

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan


Menyetujui

Pembimbing Utama



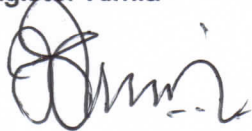
Prof. Dr. Paulina Taba, M.Phil
NIP. 195711151988102001

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Abd. Wahid Wahab, M.Sc
NIP. 194908271976021001

**Ketua Program Studi
Magister Kimia**



Prof. Dr. Hasnah Natsir, M.Si
NIP. 196203201987112001

**Dekan Fakultas MIPA
Universitas Hasanuddin**



Dr. Eng. Amiruddin, M.Si
NIP. 197205151997021002

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Widi Aprilia Ta'bi
NIM : H012202006
Program Studi : Kimia

Dengan ini saya menyatakan bahwa, tesis berjudul "Sintesis dan Karakterisasi Komposit *Biochar Magnetit* Sebagai Adsorben Ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} Pada Limbah Cair Industri Percetakan Sablon" adalah benar karya saya dengan arahan dari (Ibu Prof. Dr. Paulina Taba, M.Phil sebagai Pembimbing Utama dan Bapak Prof. Dr. Abd. Wahid Wahab, M.Sci sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah disubmit di *Makara Journal of Science* sebagai artikel dengan judul "*Adsorption of Cu(II) Ions From Aqueous Solution Using A Magnetite Biochar Composite Material*".

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 8 Maret 2024



WIDI APRILIA TA'BI
NIM. H012202006

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur kepada Tuhan yang Maha Esa yang telah memberikan segala limpahan kasih karunia-Nya. Puji Tuhan, penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik. Penelitian yang saya lakukan dapat terlaksana dengan sukses dan tesis ini dapat terampungkan atas bimbingan, diskusi dan arahan Ibu Prof. Dr. Paulina Taba, M.Phil dan Bapak Prof. Dr. Abd. Wahid Wahab, M.Sci, selaku pembimbing utama dan pertama. Penghargaan yang setinggi-tingginya saya sampaikan kepada Alm. Dr. Nursiah La Nafie, M.Sc selaku pembimbing utama yang telah berkenan membimbing saya hingga ujian proposal.

Ucapan terima kasih saya ucapkan kepada Ibu Prof. Dr. Hasna Natsir, M.Si selaku Ketua Program Studi Magister Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Universitas Hasanuddin, kepada Bapak Dr. Maming, M.Si, Bapak Dr. Sci. Muhammad Zakir, M.Si, dan Ibu Dr. Nur Umriani Permatasari, M.Si selaku dosen penguji yang telah memberikan ilmu dan saran serta masukan dalam penyusunan proposal hingga tesis penulis. Kepada Ibu Tini, Pak Iqbal dan Kak Fibi, saya mengucapkan terima kasih atas kesempatan untuk menggunakan fasilitas dan peralatan selama proses penelitian.

Akhirnya, kepada kedua orang tua tercinta saya mengucapkan limpah terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan motivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang sebesar juga saya sampaikan kepada seluruh keluarga dan kepada adik-adik atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Penulis,

(Widi Aprilia Ta'bi)

ABSTRAK

WIDI APRILIA TA'BI. **Sintesis dan Karakterisasi Komposit *Biochar* Magnetit Sebagai Adsorben Ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} Pada Limbah Cair Industri Percetakan Sablon** (dibimbing oleh Paulina Taba, dan Abd. Wahid Wahab)

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis komposit *biochar* magnetit sebagai adsorben yang dapat mengurangi dampak pencemaran logam dari limbah cair percetakan sablon. *Biochar* (BEG) yang digunakan pada penelitian ini berasal dari tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms). Magnetit disintesis dari prekursor $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ dan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dengan rasio mol (1:2). Sintesis komposit *biochar* magnetit (KBM) dilakukan dengan metode kopresipitasi dan dikarakterisasi dengan instrumen FTIR, XRD, SEM-EDX, BET dan VSM. Komposit *biochar* dan magnetit (Fe_3O_4) dapat mempengaruhi karakteristik dari KBM sehingga dapat meningkatkan nilai kapasitas adsorpsi. Material KBM memiliki fasa kristalin dengan ukuran partikel 11,85 nm, dan merupakan material mesopori dengan luas permukaan 72,54 m^2/g , serta bersifat ferimagnetik dengan nilai M_s 19,10 emu/g. Gugus fungsi yang terdapat pada permukaan KBM yaitu Fe-O-, C-O-, COO-, dan -OH. Kemampuan KBM dalam mengadsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} diuji dengan SSA. Kondisi optimum adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} berturut-turut tercapai pada pH 5, dan pH 6 selama 60 menit, kinetika adsorpsi mengikuti orde dua semu. Model isoterm yang sesuai untuk adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} adalah model isoterm Sips mendekati Langmuir dengan nilai q_{max} ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} berturut-turut adalah 93,72 dan 65,09 mg/g. Larutan HCl 0,1M merupakan agen pendesorpsi yang baik untuk mendesorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} pada adsorben KBM dengan % desorpsi berturut-turut adalah 91,80 dan 90,15%. Penelitian ini menunjukkan bahwa KBM dapat diaplikasikan pada air limbah industri sablon dengan efektifitas adsorpsi untuk ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} berturut-turut adalah 97,35% dan 95,06%.

Kata kunci : *biochar*, magnetit, komposit *biochar* magnetit, adsorpsi, desorpsi, limbah cair sablon

ABSTRACT

WIDI APRILIA TA'BI. **Synthesis and Characterization of *Biochar Magnetite Composite as adsorbent of Pb²⁺ and Cu²⁺ Ions on Screen Printing Industry Liquid Waste*** (supervised by Paulina Taba, and Abd. Wahid Wahab)

This research aims to synthesize a magnetite biochar composite as an adsorbent that can reduce the impact of metal pollution from screen printing liquid waste. The research's biochar (BEG) is derived from water hyacinth plants (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms). Magnetite is synthesized from $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ and $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ precursors with a mole ratio (1:2). The synthesis of biochar magnetite (KBM) composite was carried out using the coprecipitation method and characterized using FTIR, XRD, SEM-EDX, BET, and VSM instruments. The composite between biochar and magnetite (Fe_3O_4) can influence the characteristics of KBM, so that it can increase the adsorption capacity value. KBM material has a crystalline phase with particle size of 11.85 nm, and is a mesoporous material with a surface area of 72.54 m^2/g , as well as a ferimagnetic with a value of Ms 19.10 emu/g. The functional clusters present on the surface of KBM are Fe-O-, C-O-, COO-, and -OH. The ability of KBM to adsorb Pb^{2+} and Cu^{2+} ions was tested using AAS. The optimum conditions for adsorption of Pb^{2+} and Cu^{2+} ions were achieved at pH 5 and pH 6, respectively, for 60 minutes. The adsorption kinetics followed PSO. The appropriate isotherm model for the adsorption of Pb^{2+} and Cu^{2+} ions is the Sips isotherm model approaches Langmuir isotherm model, with the q_{max} values of Pb^{2+} and Cu^{2+} ions being 93.72 and 65.09 mg/g, respectively. The HCl 0.1M solution is a good desorption agent for desorbing Pb^{2+} and Cu^{2+} ions on KBM adsorbent, with %desorption being 91.80 and 90.15%, respectively. This research shows that KBM can be applied to screen printing industry wastewater, with the adsorption effectiveness for Pb^{2+} and Cu^{2+} metal ions being 97.35% and 95.06%, respectively.

Keywords: biochar, magnetite, composite biochar magnetit, adsorption, screen printing liquid waste

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGAJUAN.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR ARTI SINGKATAN	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan dan Manfaat.....	6
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Pencemaran Logam Berat Pada Perairan	7
2.2 Limbah Cair Industri Percetakan Sablon.....	7
2.3 Logam Berat.....	8
2.4 Adsorpsi	10
2.5 Isoterm Adsorpsi	12
2.6 Kinetika Adsorpsi	16
2.7 Desorpsi	18

2.8	Eceng Gondok (<i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms).....	19
2.9	<i>Biochar</i>	21
2.10	Magnetit (Fe_3O_4)	22
2.11	Komposit <i>Biochar</i> Magnetit	23
2.12	Instrumentasi.....	26
2.13	Kerangka Pikir.....	34
2.14	Hipotesis	37
BAB III. METODE PENELITIAN		38
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	38
3.2	Bahan dan Alat.....	38
3.3	Prosedur Kerja	39
3.4	Teknik Analisa Data	43
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN		46
4.1	Sintesis Komposit <i>Biochar</i> Magnetit.....	46
4.2	Karakterisasi Gugus Fungsi FTIR	48
4.3	Karakterisasi KBM dengan XRD	52
4.4	Karakterisasi BEG dan KBM dengan SEM-EDX.....	54
4.5	Karakterisasi Luas Permukaan.....	56
4.6	Karakterisasi Sifat Magnetik dengan VSM.....	59
4.7	Penentuan pH Optimum Adsorpsi Ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM.....	61
4.8	Penentuan Waktu Optimum Adsorpsi Ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM.....	63
4.9	Kapasitas Adsorpsi Ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM.....	69
4.10	Efektivitas Adsorpsi Ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM pada Air Limbah Cair Industri Sablon	76
4.11	Desorpsi Ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM.....	77
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....		80
5.1	Kesimpulan	80

5.1 Saran	80
DAFTAR PUSTAKA.....	81
LAMPIRAN.....	95

DAFTAR TABEL

Nomor urut	Halaman
1. Komposisi kimia eceng gondok	20
2. Pengaruh KBM dengan magnetit terhadap peningkatan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi ion logam.....	26
3. Analisis EDX BEG dan KBM.....	55
4. Data analisis dengan menggunakan metode BET	56
5. Data hasil pengujian VSM.....	59
6. Parameter kinetika adsorpsi orde satu semu dan orde dua semu adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM dari persamaan linear	67
7. Parameter kinetika adsorpsi orde satu semu dan orde dua semu adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM dari persamaan non linier	68
8. Parameter isoterm adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM dari persamaan linear	72
9. Parameter isoterm adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM dari persamaan nonlinear (program solver)	74
10. Konsentrasi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} dalam sampel air limbah industri sablon sebelum dan sesudah diadsorpsi oleh KBM	76

DAFTAR GAMBAR

Nomor urut	Halaman
1. Tanaman eceng gondok	20
2. Skema sintesis KBM	24
3. Skema adsorpsi ion Pb^{2+} dengan menggunakan KBM	25
4. Spektra FTIR <i>biochar</i> dan KBM	27
5. Pencitraan SEM dari <i>biochar</i> dan <i>biochar</i> magnetik	28
6. Difraktogram <i>biochar</i> dan komposit <i>biochar</i> magnetit	30
7. Grafik isoterm adsorpsi-desorpsi N_2 <i>biochar</i> dan komposit <i>biochar</i> magnetit.	31
8. Hasil uji VSM pada sampel Fe_3O_4 dan $Fe_3O_4/biochar$	33
9. Kerangka Pikir Penelitian	36
10. Sintesis KBM	47
11. Gambar hasil sintesis BEG, magnetit, dan KBM	47
12. Spektrum FTIR BEG, magnetit dan KBM	48
13. Spektrum FTIR sebelum dan sesudah adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} dengan menggunakan KBM	51
14. Pola difraksi sinar-X BEG, magnetit dan KBM	53
15. Pencitraan SEM BEG dan KBM	54
16. Isoterm adsorpsi/desorpsi N_2 pada BEG dan KBM	57
17. Distribusi ukuran pori BEG dan KBM	58
18. Kurva magnetisasi sampel magnetit dan KBM	59
19. Interaksi adsorben KBM dengan larutan ion Pb^{2+} dan Cu^{2+}	60
20. Pengaruh pH dengan jumlah ion Pb^{2+} yang diadsorpsi (q_e) oleh KBM	61
21. Pengaruh pH dengan jumlah ion Cu^{2+} yang diadsorpsi (q_e) oleh KBM	61
22. Ilustrasi interaksi adsorben KBM dengan ion Pb^{2+} dan Cu^{2+}	63

23. Hubungan antara waktu adsorpsi dengan jumlah ion Pb^{2+} yang diadsorpsi (q_t) oleh adsorben KBM.....	63
24. Hubungan antara waktu adsorpsi dengan jumlah ion Cu^{2+} yang diadsorpsi (q_t) oleh adsorben KBM.....	64
25. Kinetika orde satu semu adsorpsi ion Pb^{2+} dari persamaan linear	65
26. Kinetika orde dua semu adsorpsi ion Pb^{2+} dari persamaan linear	65
27. Kinetika orde satu semu adsorpsi ion Cu^{2+} dari persamaan linear	66
28. Kinetika orde dua semu adsorpsi ion Cu^{2+} dari persamaan linear.....	66
29. Kinetika orde satu semu dan orde dua semu adsorpsi ion Pb^{2+} dari persamaan nonlinier.....	67
30. Kinetika orde satu semu dan orde dua semu adsorpsi ion Cu^{2+} dari persamaan nonlinier.....	68
31. Hubungan antara jumlah ion Pb^{2+} yang diadsorpsi (q_e) dengan konsentrasi larutan (C_e) oleh KBM.....	70
32. Hubungan antara jumlah ion Cu^{2+} yang diadsorpsi (q_e) dengan konsentrasi larutan (C_e) oleh KBM.....	70
33. Kurva isoterm Langmuir untuk adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM	71
34. Kurva isoterm Freundlich untuk adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM	71
35. Kurva isoterm Sips untuk adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM	72
36. Permodelan isoterm Langmuir, Freundlich dan Sips dari persamaan non-linear untuk adsorpsi ion Pb^{2+} oleh KBM.....	73
37. Permodelan isoterm Langmuir, Freundlich dan Sips dari persamaan non-linear untuk adsorpsi ion Cu^{2+} oleh KBM.....	73
38. Persen efektivitas adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM	77
39. Grafik desorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM	78

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

Lambang/singkatan	Arti dan penjelasan
EG	eceng gondok
BEG	<i>biochar</i> eceng gondok
KBM	komposit <i>biochar</i> magnetit
KBM-Pb	komposit <i>biochar</i> magnetit setelah diinteraksikan dengan larutan Pb^{2+}
KBM-Cu	komposit <i>biochar</i> magnetit setelah diinteraksikan dengan larutan Cu^{2+}
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared</i>
SEM-EDS	<i>Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray</i>
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>
SSA	<i>Surface Area Analyzer</i>
BET	<i>Brunauer-Emmett-Teller</i>
BJH	<i>Barrett-Joyner-Halenda</i>
AAS	<i>Atomic Adsorption Spectroscopy</i>
VSM	<i>Vibrating Sample Magnometer</i>
AAS	<i>Atomic Adsorption Spectroscopy</i>
PFO	<i>Pseudo first order</i>
PSO	<i>Pseudo second order</i>

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor urut	Halaman
1. Skema preparasi bahan baku.....	95
2. Skema pembuatan <i>biochar</i> dari eceng gondok (BEG)	95
3. Skema sintesis magnetit.....	96
4. Skema sintesis KBM.....	97
5. Skema karakterisasi adsorben	97
6. Skema penentuan pH optimum	98
7. Skema penentuan waktu kontak optimum	98
8. Skema penentuan kapasitas adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+}	99
9. Aplikasi adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM ke limbah cair industri sablon.....	99
10. Desorpsi ion logam Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM.....	100
11. Data absorbansi kurva standar larutan ion Pb^{2+} dan hasil analisis konsentrasi ion Pb^{2+} pada eceng gondok dengan menggunakan SSA.....	101
12. Data absorbansi kurva standar larutan Cu^{2+} dan hasil analisis konsentrasi ion Pb^{2+} pada eceng gondok dengan menggunakan SSA.....	102
13. Perhitungan sintesis magnetit dan KBM	103
14. Perhitungan hasil rendemen magnetit dan KBM.....	104
15. Perhitungan pembuatan larutan induk ion Pb^{2+} dan Cu^{2+}	105
16. Data penentuan pH adsorpsi optimum ion Pb^{2+} oleh KBM	106
17. Data penentuan pH adsorpsi optimum ion Cu^{2+} oleh KBM	107
18. Data penentuan waktu adsorpsi optimum ion Pb^{2+} oleh KBM	108
19. Data kinetika adsorpsi ion Pb^{2+} oleh KBM bentuk linear.....	109
20. Data kinetika adsorpsi ion Pb^{2+} oleh KBM bentuk nonlinear	111
21. Data penentuan waktu adsorpsi optimum ion Cu^{2+} oleh KBM	112

22. Data kinetika adsorpsi ion Cu^{2+} oleh KBM bentuk linear.....	113
23. Data kinetika adsorpsi ion Cu^{2+} oleh KBM bentuk nonlinear.....	115
24. Data penentuan kapasitas adsorpsi ion Pb^{2+} oleh KBM	116
25. Data penentuan kapasitas adsorpsi ion Cu^{2+} oleh KBM	117
26. Data penentuan kapasitas adsorpsi ion Pb^{2+} oleh KBM untuk permodelan persamaan isoterm adsorpsi bentuk linear.....	118
27. Data penentuan kapasitas adsorpsi ion Cu^{2+} oleh KBM untuk permodelan persamaan isoterm adsorpsi bentuk linear.....	120
28. Data penentuan kapasitas adsorpsi ion Pb^{2+} oleh KBM untuk permodelan persamaan isoterm adsorpsi bentuk non-linear	122
29. Data penentuan kapasitas adsorpsi ion Cu^{2+} oleh KBM untuk permodelan persamaan isoterm adsorpsi bentuk non-linear	124
30. Efektifitas adsorben KBM	126
31. Data desorpsi.....	127
32. FTIR <i>biochar</i> (BEG)	128
33. FTIR magnetit	129
34. FTIR KBM	130
35. FTIR KBM setelah diinteraksikan dengan ion Pb^{2+}	131
36. FTIR KBM setelah diinteraksikan dengan ion Cu^{2+}	132
37. Perhitungan ukuran kristal dengan metode Debye-Scherrer.....	133
38. SEM-EDX BEG	135
39. SEM-EDX KBM.....	136
40. BET-BJH BEG.....	137
41. BET-BJH KBM	139
42. VSM magnetit.....	141
43. VSM KBM.....	141
44. Dokumentasi kegiatan penelitian.....	142

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan sektor industri saat ini telah mengalami kemajuan yang sangat pesat. Industri kreatif memiliki peranan yang penting dalam meningkatkan perekonomian masyarakat. Selain itu, industri kreatif di Indonesia dalam bidang usaha jasa mengalami perkembangan, salah satunya yaitu usaha percetakan sablon. Industri percetakan sablon sangat marak di kota besar karena kebutuhan yang besar untuk keperluan keindahan pakaian (gambar di kaos), spanduk dan lain sebagainya. Limbah cair sablon umumnya mengandung logam berat, selain itu karakteristik limbah cair sablon dapat dikategorikan sebagai limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) yang dapat berbahaya bagi makhluk hidup, lingkungan, serta bersifat karsinogenik apabila dibuang ke lingkungan tanpa diolah terlebih dahulu (Wijayanti dkk., 2020). Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa limbah cair sablon mengandung ion seperti Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} dan Cr^{3+} yang dapat berpotensi mencemari lingkungan. Dari empat jenis logam yang dianalisis, diperoleh ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} yang memiliki konsentrasi yang tertinggi dari limbah cair industri percetakan sablon. Kandungan konsentrasi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} yang tinggi disebabkan oleh penggunaan cat pewarna yang digunakan pada proses produksi (Sujana dan Martiningsih., 2020). Menurut Kiurski dkk (2016) menyatakan, bahwa penggunaan cat pewarna yang mengandung pelarut serta pigmen menyebabkan limbah cair sablon mengandung ion logam seperti ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} .

Penanganan limbah cair yang mengandung logam berat pada lingkungan perairan menjadi perhatian khusus saat ini. Limbah cair percetakan sablon yang mengandung ion seperti Pb^{2+} dan Cu^{2+} merupakan ion logam yang bersifat toksik bila melebihi batas standar yang telah ditetapkan. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan yang belum memiliki baku mutu air limbah yang ditetapkan batas maksimal logam Pb 0,03 mg/L dan Cu 0,02 mg/L.

Ion Pb^{2+} merupakan ion logam yang bersifat toksik bagi manusia yang dapat menyebabkan gangguan pada perkembangan saraf, gangguan ginjal, kardiovaskular, hipertensi dan gangguan kehamilan bila diserap oleh tubuh manusia (Chubaka dkk., 2018; Schulze dkk., 2019). Ion Cu^{2+} merupakan ion logam esensial yang dibutuhkan oleh manusia dalam jumlah sedikit. Ion Cu^{2+} dalam jumlah besar dapat menyebabkan gangguan pencemaran ringan dan kerusakan hati atau ginjal (Chubaka dkk., 2018; Taylor dkk., 2020). Oleh karena itu, untuk mengurangi dampak dari pencemaran oleh limbah cair yang mengandung ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} , maka pengolahan limbah sebelum dibuang ke lingkungan perlu dilakukan.

Adsorpsi adalah metode yang efektif dan ekonomis untuk remediasi ion logam berat dalam pengolahan air limbah. Metode adsorpsi memiliki beberapa kelebihan. Metode ini sederhana, mudah untuk diaplikasikan dan efisiensi yang tinggi (Kumar dkk., 2019). Salah satu adsorben yang dapat dimanfaatkan untuk proses adsorpsi ion logam berat yaitu *biochar*.

Biochar adalah produk padat kaya karbon berpori yang dihasilkan dari proses karbonisasi biomassa dalam lingkungan oksigen terbatas (Lam dkk., 2019). *Biochar* memiliki kelebihan yaitu luas permukaan yang besar, porositas tinggi, kemampuan adsorpsi yang tinggi, biaya operasi yang rendah dan tidak bersifat beracun (Kumi dkk., 2020). Sumber bahan baku untuk membuat *biochar* dapat berasal dari limbah biomassa, kotoran hewan, limbah pertanian, limbah industri, dan organisme laut dan akuatik (Yang dkk., 2020). *Biochar* dapat diperoleh dari limbah biomassa seperti dari tanaman eceng gondok (Lima dkk., 2020).

Eceng gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) merupakan tanaman gulma yang memiliki ketersediaan melimpah di alam serta dapat diperoleh sepanjang tahun (Hashem dkk., 2020). Pertumbuhan eceng gondok di perairan dapat memberikan dampak negatif yaitu dapat menyebabkan kurangnya pemasukan cahaya dan oksigen, perubahan sifat kimia air, dan terjadinya penurunan volume air melalui evapotranspirasi (Sharma dan Aggarwal, 2020). Tanaman eceng gondok memiliki laju pertumbuhan yang cepat, namun laju pertumbuhan ini belum sebanding dengan pemanfaatan eceng gondok di masyarakat. Oleh karena itu, diversifikasi produk berbasis biomassa eceng gondok dilakukan untuk mengurangi populasi pertumbuhan eceng gondok.

Biomassa eceng gondok memiliki kandungan lignoselulosa tinggi sekitar 70% yang dapat dimanfaatkan untuk pembuatan *biochar* (Nurhilal dkk., 2020). Kandungan lignoselulosa yang tinggi memiliki potensi sebagai pengikat ion-ion logam. Metode pirolisis merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengkonversi biomassa lignoselulosa menjadi *biochar*. Metode pirolisis merupakan proses degradasi termal biomassa tanpa adanya udara dan pada kondisi tekanan atmosfer. Proses pirolisis pada lignoselulosa, mengubah molekul besar hidrokarbon biomassa dipecah menjadi molekul yang lebih kecil. Pirolisis secara langsung mengubah rantai lignoselulosa panjang menjadi senyawa padat gelap yang kaya karbon, yang disebut arang *biochar* (Mukherjee dkk., 2022). Metode pirolisis memiliki beberapa kelebihan. Metode ini sederhana, cepat, dan hasil produk *biochar* yang tinggi (Zadeh dkk., 2020).

^aGuo dkk., (2021) menyimpulkan bahwa *biochar* merupakan adsorben yang baik digunakan untuk adsorpsi ion Cr^{6+} , selain itu karakteristik struktur *biochar* menunjukkan ukuran mesoporous dengan ukuran pori sebesar 2,79 nm, luas permukaan spesifik 1031 m^2/g , dan efisiensi adsorpsi ion Cr^{6+} yaitu 98%. Adsorpsi ion Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} dan Cd^{2+} dengan menggunakan *biochar* dari eceng gondok menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi maksimum untuk masing-masing ion Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} dan Cd^{2+} secara berturut-turut adalah 39,09; 45,40; 48,20 dan 44,04 mg/g (Li dkk., 2018). Meskipun kemampuan adsorpsi *biochar* sangat baik untuk penyerapan ion logam, namun terdapat kekurangan yaitu pemisahan adsorben dari larutan serta penyerapan kurang efektif dan tidak ekonomis untuk volume limbah dalam skala besar. Untuk mengoptimalkan efektivitas *biochar* pada proses adsorpsi pada limbah cair, maka komposit dibuat dari *biochar* dan magnetit (Fe_3O_4), untuk menghasilkan material adsorben yaitu komposit *biochar* magnetit.

Komposit *biochar* magnetit (KBM) merupakan salah satu material yang mulai dikembangkan untuk remediasi lingkungan, serta dapat menghilangkan polutan zat organik maupun anorganik dalam pengolahan air limbah. Komposit *biochar* magnetit memiliki beberapa kelebihan antara lain proses sintesis sederhana, murah, cepat, pemisahan adsorben dari adsorbat lebih mudah dan cepat, dan memiliki efisiensi adsorpsi yang tinggi (Lima dkk., 2020).

Magnetit (Fe_3O_4) merupakan salah satu besi oksida yang memiliki sifat magnetik yang terkuat dibandingkan dengan besi oksida lainnya. Selain itu, pemilihan material magnetit memberikan kelebihan karena magnetit bersifat

superparamagnetik sehingga proses pemisahan antara adsorben dan adsorbat dapat dilakukan dengan mudah melalui medan magnet tanpa menggunakan proses penyaringan, sehingga biaya operasional maupun biaya perawatan komponen saringan yang cepat jenuh dan rusak akibat pemakaian berulang kali dapat dikurangi (Asriza dan Fabiani, 2019); (Lestari dkk., 2021).

Sintesis KBM dapat dilakukan dengan menggunakan metode kopresipitasi. Kelebihan dari metode kopresipitasi yaitu prosesnya sederhana, biayanya murah, dapat dilakukan pada suhu yang rendah, cepat dan efisiensi yang tinggi (Mira dkk., 2018). Material KBM dapat mempengaruhi karakterisasi, meningkatkan kapasitas adsorpsi ion logam, luas permukaan yang besar dan bertambahnya ketersediaan gugus fungsi untuk adsorpsi ion logam berat. Dengan demikian, material KBM berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai adsorben dalam penyerapan ion logam berat (Li dkk., 2020). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa komposit antara *biochar* dari limbah biomassa dengan magnetit mampu menyerap larutan logam dan zat organik pada limbah cair. Kemampuan adsorpsi untuk ion Zn^{2+} , Cu^{2+} , dan Ni^{2+} berturut-turut adalah 81,60; 80,60; dan 61,50%, dan kemampuan penyerapan zat organik yaitu ibuprofen adalah 100% (Lima dkk., 2020).

El-Shafie, dkk (2023), menyatakan bahwa komposit *biochar* dengan Fe_3O_4 dapat mempengaruhi nilai kapasitas adsorpsi dan efisiensi adsorpsi. Kapasitas adsorpsi penyerapan dan efisiensi adsorpsi dengan menggunakan adsorben KBM lebih besar dibandingkan dengan menggunakan Fe_3O_4 saja tanpa penambahan *biochar*. Hasilnya menunjukkan bahwa KBM adalah adsorben yang menjanjikan untuk digunakan dalam pengolahan air limbah farmasi. Kapasitas adsorpsi dan efisiensi adsorpsi dengan menggunakan Fe_3O_4 berturut-turut adalah 83,75 mg/g dan 86,46%. Sedangkan kapasitas adsorpsi dan efisiensi adsorpsi dengan menggunakan KBM masing-masing sebesar 172,43 mg/g dan 98,51%.

Penelitian lainnya dilakukan oleh Chen, dkk (2020), adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} menggunakan *biochar* dari kulit jeruk bali yang dikompositkan dengan magnetit menghasilkan pH optimum untuk ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} berturut-turut adalah 5 dan 6, waktu kontak untuk ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} adalah 60 menit, konsentrasi optimum larutan untuk ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} masing-masing adalah 275 ppm dan 40 ppm. Kapasitas adsorpsi untuk ion Pb^{2+} adalah 187,62 mg/g dan ion Cu^{2+} adalah 83,62 mg/g, model isothermal adsorpsi untuk ion Pb^{2+} sesuai

dengan model Langmuir sedangkan untuk ion Cu^{2+} sesuai dengan model Freundlich dan mengikuti model kinetika orde dua semu.

Proses adsorpsi pada dasarnya tidak terlepas dengan proses desorpsi. Desorpsi adalah proses pelepasan kembali adsorbat yang diadsorpsi oleh adsorben (Daneshvar dkk., 2017). Desorpsi digunakan untuk meregenerasi adsorben sehingga dapat digunakan kembali. Hal ini penting untuk dilakukan, karena untuk mengetahui kemampuan efektivitas dalam penggunaan kembali adsorben yang telah digunakan. Proses desorpsi dapat dilakukan dengan menginteraksikan adsorben dengan larutan agen pendesorpsi yang sesuai, agar tidak menimbulkan kerusakan pada komposit magnetit *biochar* yang telah lepas dari ion logam serapannya sehingga dapat digunakan kembali untuk mengikat ion logam (Pholosi dkk., 2019). Larutan pendesorpsi yang dapat digunakan pada komposit *biochar* magnetit adalah akuades (H_2O), asam klorida (HCl), natrium hidroksida (NaOH), asam nitrat (HNO_3) dan asam sulfat (H_2SO_4) (Alqadami, dkk., 2018).

Zahedifar, dkk (2021) menyatakan bahwa larutan NaOH dapat digunakan sebagai larutan agen pendesorpsi pada adsorben KBM dengan persentasi desorpsi untuk masing-masing ion Cd^{2+} dan Pb^{2+} berturut-turut 82 dan 85%. Penelitian lain juga membandingkan larutan HCl , HNO_3 dan H_2SO_4 sebagai larutan pendesorpsi yang efektif, hasil yang diperoleh larutan HCl adalah yang paling efektif digunakan sebagai larutan pendesorpsi untuk menarik kembali ion Pb^{2+} , Cd^{2+} , dan Co^{2+} pada adsorben KBM (Alqadami dkk., 2018).

Penelitian tentang material KBM sebagai adsorben untuk ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} sudah pernah dilakukan, namun pemanfaatan KBM yang diaplikasikan pada limbah cair percetakan sablon belum pernah dilakukan sebelumnya. Oleh karena itu, berdasarkan uraian dari latar belakang tersebut, maka perlu dilakukan penelitian tentang pemanfaatan KBM sebagai adsorben ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} pada limbah cair percetakan sablon.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. bagaimana hasil karakteristik adsorben KBM?,
2. berapakah pH dan waktu optimum adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM?,
3. bagaimana kinetika adsorpsi dari ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM?,

4. berapa kapasitas adsorpsi dan model isoterm adsorpsi apakah (Langmuir , Freundlich atau Sips) yang sesuai dengan adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM?,
5. berapakah persen efektifitas adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM yang diaplikasikan pada limbah cair industri sablon?,
6. larutan pendesorpsi apa yang efektif diantara aquadest, HCl 0,1 M, dan NaOH 0,1 M yang digunakan sebagai agen pendesorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} dari KBM, serta berapakah persen desorpsinya?.

1.3 Tujuan dan Manfaat

Tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. menentukan hasil karakteristik adsorben KBM,
2. menentukan pH dan waktu optimum adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM,
3. menentukan kinetika adsorpsi dari ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh adsorben KBM,
4. menentukan kapasitas adsorpsi dan menganalisis model isoterm adsorpsi (Langmuir , Freundlich atau Sips) yang sesuai dengan adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM,
5. menganalisis efektifitas adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM yang diaplikasikan pada limbah cair industri sablon,
6. menentukan larutan pendesorpsi apa yang efektif diantara aquadest, HCl 0,1 M, dan NaOH 0,1 M yang digunakan sebagai agen pendesorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} dari KBM.

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. memberikan pengetahuan tentang pemanfaatan eceng gondok sebagai adsorben serta sebagai solusi untuk pengendalian laju pertumbuhan tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solm) di lingkungan,
2. memberikan informasi tentang potensi KBM sebagai adsorben yang murah, mudah diperoleh dan memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} pada limbah cair industri percetakan sablon,
3. menambah informasi bagi masyarakat, pemerintah serta kalangan industri dalam pengolahan limbah cair yang mengandung ion logam, dengan mengaplikasikan material KBM pada limbah cair industri percetakan sablon yang aman dibuang ke lingkungan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pencemaran Logam Berat Pada Perairan

Pencemaran logam berat pada perairan merupakan permasalahan serius yang dapat memicu kerusakan lingkungan. Salah satu penyebab masuknya logam berat ke lingkungan adalah adanya pembuangan sisa dan limbah industri (Kalangie dkk., 2018). Berbagai aktivitas industri diasumsikan sebagai penyumbang masuknya limbah logam berat ke perairan. Aktivitas industri yang beragam memungkinkan keberadaan logam berat di perairan semakin meningkat. Logam berat merupakan zat pencemar yang berbahaya karena memiliki sifat yang tidak dapat terdegradasi secara alami dan cenderung terakumulasi dalam air, sedimen dasar perairan, dan tubuh organisme (Amaliah dkk., 2018).

Tingkat konsentrasi logam dalam air dibagi sesuai dengan tingkat polusi, seperti polusi berat, polusi sedang, dan non-polusi. Air yang mengandung zat polusi berat umumnya memiliki kandungan logam berat yang tinggi di dalam air dan organisme yang hidup di dalamnya. Pada tingkat polusi sedang, kandungan logam berat dalam air dan organisme dalam air berada dalam batas marginal. Beberapa pada tingkat non polusi, kandungan logam berat dalam air dan organisme sangat rendah dan bahkan tidak terdeteksi (Lestari dan Trihadiningrum, 2019).

2.2 Limbah Cair Industri Percetakan Sablon

Perkembangan industri saat ini telah mengalami kemajuan yang sangat pesat. Akibat dari meningkatnya pertumbuhan industri, jumlah limbah yang dihasilkan akan semakin meningkat. Usaha percetakan sablon merupakan salah satu industri jasa yang mengalami perkembangan yang pesat. Industri percetakan sablon merupakan bagian dari industri tekstil yang menghasilkan air

limbah berwarna yang dapat membahayakan lingkungan dan manusia (Sujana dan Martiningsih, 2020).

Salah satu limbah yang dihasilkan dari proses produksi industri percetakan sablon adalah limbah cair yang berasal dari penggunaan bahan-bahan kimia dan air sisa penggunaan zat warna, dan bahan pelarut yang digunakan pada proses pencetakan (*screen*) (Sunarsih dkk., 2016). Limbah tinta cetak adalah sumber utama pencemaran air organik dan anorganik (Kiurski dkk., 2016).

Limbah cair dari industri percetakan sablon dapat memberikan dampak negatif pada lingkungan karena mengandung zat berbahaya yang dapat merusak perairan. Limbah cair sablon juga mengandung ion logam seperti Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} , Zn^{2+} dan Cd^{2+} (Sujana dan Martiningsih, 2020; Ishchenko, 2017). Selain itu, limbah cair industri sablon dapat mencemari perairan dan tanah. Sujana dan Martiningsih (2020) menyimpulkan bahwa, limbah cair industri percetakan sablon mengandung logam berat seperti Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} dan Cr^{3+} . Kandungan ion Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} dan Cr^{3+} setelah dilakukan analisis pada sampel air yang tercemar limbah cair industri percetakan sablon diperoleh konsentrasi masing-masing ion Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , dan Cr^{3+} berturut-turut adalah 36,588; 33,358; 0,732 dan 0,140 ppm. Dari empat jenis logam yang dianalisis, diperoleh dari ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} konsentrasi ion logam yang tertinggi dari limbah cair industri percetakan sablon.

2.3 Logam Berat

Logam berat adalah logam yang densitasnya lebih besar dari 5 g/cm^3 . Kontaminasi akibat logam berat yang bersifat beracun, dan tidak dapat terurai secara hayati akan cenderung terakumulasi dari waktu ke waktu dan dapat menyebabkan ancaman serius terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Adenuga dkk., 2019). Logam berat yang umum ditemukan pada limbah cair industri adalah timbal (Pb), seng (Zn), tembaga (Cu) dan kadmium (Cd) (Wang dkk., 2018). Logam ini bersifat beracun, cenderung terakumulasi dalam organisme hidup, dan menyebabkan berbagai gangguan penyakit (Tabasi dkk., 2018).

2.3.1 Logam Timbal (Pb)

Timbal adalah logam berat yang manfaatnya tidak diketahui untuk organisme air. Namun, jumlah timbal di atas ambang batas dapat mengganggu kelangsungan hidup organisme akuatik dan juga manusia (Yolanda dkk., 2017).

Logam timbal (Pb) umumnya berasal dari limbah cat, pestisida, asap rokok, emisi kendaraan dan industri pertambangan. Adanya kandungan logam Pb pada perairan bila melebihi ambang batas dapat menimbulkan dampak negatif bagi manusia seperti dapat menyebabkan gangguan pada perkembangan saraf, gangguan ginjal, kardiovaskular, hipertensi, dan gangguan kehamilan (Chubaka dkk., 2018; Schulze dkk., 2019).

Menurut Baloch, dkk. (2020) menyatakan, bahwa konsentrasi timbal dalam darah yang lebih besar dari 20 µg/dl dapat menurunkan hemoglobin dan meningkatkan risiko terkena anemia. Kandungan logam timbal secara alamiah di air sungai dan air laut masing-masing adalah 3 µg/L dan 0.03 µg/L (Patang, 2018). Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.22 Tahun 2021, baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan yang memiliki baku mutu air limbah ditetapkan 0,03 mg/L untuk kandungan logam timbal (Pb) pada air limbah industri.

2.3.2 Logam Tembaga (Cu)

Tembaga di alam dapat ditemukan dalam bentuk logam bebas, tetapi lebih umum ditemukan dalam senyawa atau sebagai senyawa padat dalam bentuk mineral. Dalam badan air, tembaga dapat ditemukan dalam bentuk senyawa ion seperti CuCO_3 dan CuOH . Pada batuan mineral atau lapisan tanah, tembaga dapat ditemukan dalam bentuk chalcopyrite, bornite, covellite, chalcocite. Tembaga juga ditemukan dalam bentuk azurit dan karbonat malasit (Palar, 2008). Logam tembaga dapat masuk ke dalam air karena aktivitas manusia seperti pertambangan, pemurnian logam, plastik dan industri elektroplating, operasi peleburan dan rendaman pelapisan, cat dan pigmen, penyulingan minyak bumi, kuningan korosi, pupuk, produksi pulp kayu (Al-Saydeh dkk., 2017). Menurut WHO, jumlah maksimum tembaga dalam limbah industri tidak melebihi 1,3 mg/L dan untuk air minum kandungan ion tembaga tidak melebihi 2,0 mg/L.

Kandungan logam tembaga secara alamiah di air sungai dan air laut masing-masing adalah 7 µg/L dan 2,0 µg/L (Patang, 2018).

Logam tembaga merupakan logam berat yang penting bagi manusia, mamalia, dan ikan untuk metabolisme, pembentukan hemoglobin, haemosianin, dan pigmen dalam proses pengangkutan oksigen. Konsumsi tembaga yang baik untuk manusia adalah 2,5 mg/kg berat badan/hari untuk orang dewasa dan 0,05 mg/kg berat badan/hari untuk anak-anak dan bayi (Palar, 2008). Namun, dalam jumlah yang melebihi batas tersebut dapat bersifat toksik. Jika ikan atau organisme akuatik yang mengandung tembaga dimakan oleh manusia, tembaga dapat masuk ke dalam tubuh dan memberikan efek pada kesehatan. Logam tembaga dapat menyebabkan gangguan pencernaan ringan dan kerusakan hati atau ginjal (Chubaka dkk., 2018 ; Taylor dkk., 2020). Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.22 Tahun 2021, baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan yang memiliki baku mutu air limbah ditetapkan 0,02 mg/L untuk kandungan logam tembaga (Cu) pada air limbah industri.

2.4 Adsorpsi

Adsorpsi adalah metode yang efektif dan ekonomis untuk remediasi ion logam berat dalam pengolahan air limbah. Dalam proses ini, zat dipindahkan dari fase cair atau gas ke permukaan padatan dan dibatasi oleh interaksi fisik dan/atau kimia. Metode adsorpsi memiliki banyak kelebihan yaitu biaya murah, efisiensi tinggi, kemudahan operasi, regeneratif, selektivitas logam, profitabilitas, tidak terbentuk lumpur yang bersifat beracun, dan efektif (Lodhi dkk., 2021). Menurut Aigbe dan Osibote, (2020), proses adsorpsi mempunyai tahapan sebagai berikut:

1. transfer molekul-molekul adsorbat menuju lapisan film yang mengelilingi adsorben,
2. difusi adsorbat melalui lapisan film,
3. difusi adsorbat melalui kapiler atau pori-pori dalam adsorben,
4. adsorpsi adsorbat pada permukaan adsorben.

Pada proses adsorpsi, adsorbat adalah substansi yang dijerap sedangkan adsorben adalah bahan yang berfungsi sebagai penjerap (Kumar dkk., 2019). Adsorben merupakan material padat yang pada umumnya berpori, yang digunakan untuk menjerap molekul adsorbat dalam suatu proses adsorpsi.

Adsorben yang baik harus memenuhi tiga syarat, yaitu mempunyai pori, rongga dan situs aktif. Menurut IUPAC, pori digolongkan menjadi tiga yaitu mikropori (diameter kurang dari 2 nm), mesopori (diameter 2-50 nm) dan makropori (diameter lebih dari 50 nm) (Astuti, 2018). Penjelasan berikut merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi:

1. karakteristik adsorben,

Ukuran pori dan luas permukaan adsorben merupakan karakteristik yang penting dalam proses adsorpsi. Ukuran pori berhubungan dengan luas permukaan, semakin kecil diameter partikel maka semakin luas permukaan adsorben, sehingga proses adsorpsi semakin efektif (Begheri dkk., 2019). Pembentukan luas permukaan internal yang berukuran mikro atau meso sebanyak mungkin, semakin kecil dan banyak pori-pori adsorben, menyebabkan luas permukaan semakin meningkat dengan bertambahnya luas permukaan dan volume pori adsorben (Anusaksathien dkk., 2003). memberikan luas permukaan yang semakin besar bagi adsorbat untuk diadsorpsi untuk penyerapan polutan yang lebih tinggi pada dosis yang lebih tinggi (Kumi, 2020).

2. pH,

Pada proses adsorpsi, pH akan mempengaruhi muatan pada situs aktif dan muatan ion logam dalam larutan (Ariyani dkk., 2018). Menurut Astuti dkk (2017), pada kondisi pH asam, gugus-gugus fungsional pada adsorben akan terprotonasi, sehingga akan terjadi interaksi elektrostatis dengan molekul adsorbat.

3. waktu kontak,

Semakin lama waktu kontak yang digunakan maka semakin banyak zat yang diadsorpsi sampai tercapai suatu keadaan yang setimbang (Sinta dkk., 2015). Setelah itu, penambahan waktu adsorpsi tidak meningkatkan kemampuan adsorpsi bahkan cenderung menurun. Sehingga waktu optimum yang diperoleh dari jumlah zat yang diadsorpsi merupakan waktu yang digunakan oleh adsorben pada saat tercapai kesetimbangan (Alqadami dkk., 2018).

4. konsentrasi,

Konsentrasi larutan adsorbat mempengaruhi adsorpsi. Semakin tinggi konsentrasi larutan, semakin banyak pula zat terlarut yang dapat diadsorpsi (Olusegun dan Mohallem, 2020).

2.5 Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi menggambarkan hubungan antara jumlah zat yang diadsorpsi oleh adsorben pada suhu konstan dan konsentrasi pada saat keadaan kesetimbangan. Studi kesetimbangan pada adsorpsi bertujuan untuk memberikan informasi tentang kapasitas adsorpsi pada adsorben. Sehingga, penting untuk mengetahui sistem adsorpsi (Göktepeli dkk., 2021). Ada beberapa persamaan isoterm yang sering digunakan untuk menganalisis eksperimental data kesetimbangan adsorpsi yaitu isoterm Langmuir, isoterm Freundlich dan isoterm Sips. Model isoterm Langmuir dan Freundlich merupakan model isoterm dengan dua parameter, sedangkan model isoterm Sips merupakan model isoterm tiga parameter (Benmessaoud dkk., 2020).

Untuk memperoleh data kesetimbangan, larutan dengan variasi konsentrasi awal digunakan, sedangkan massa adsorben dalam tiap sampel dibuat tetap, dengan waktu kontak optimum dan pH optimum. (Alqadami dkk., 2018). Berdasarkan data kesetimbangan adsorpsi yang telah diperoleh selanjutnya dapat dibuat model dengan isoterm, kemudian mengkaji informasi adsorpsinya, seperti kapasitas adsorpsi maksimum, serta sifat dari adsorben dengan menggunakan isoterm adsorpsi (Alqadami dkk., 2018).

Kapasitas adsorpsi ion oleh adsorben merupakan jumlah gugus yang dapat ditukarkan dalam adsorben. Kapasitas penukaran adsorpsi ion dari suatu adsorben adalah jumlah ion yang dapat ditukar untuk setiap 1 gram adsorben kering atau jumlah ion yang dapat ditukarkan untuk setiap 1 mL adsorben basah. Besarnya nilai kapasitas adsorpsi suatu adsorben ditentukan dari jumlah gugus-gugus ion yang dapat ditukarkan dalam setiap gram adsorben. Semakin besar jumlah gugus-gugus tersebut, maka semakin besar nilai kapasitas adsorpsinya (Day dan Underwood, 2002). Kapasitas adsorpsi merupakan jumlah logam yang diadsorpsi pada keadaan setimbang (q_e) yang ditentukan melalui persamaan 1 (Shi dkk., 2014).

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (1)$$

Penentuan persentase ion logam yang diadsorpsi pada keadaan setimbang (%E) ditentukan dengan menggunakan persamaan 2 (Shi dkk., 2014).

$$\%E = \frac{(C_0 - C_e)}{m} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

- q_e = kapasitas adsorpsi (mg/g)
- C_0 = konsentrasi awal larutan (mg/L)
- C_e = konsentrasi akhir larutan (mg/L)
- V = volume larutan adsorbat (L)
- m = massa adsorben (g)
- $\%E$ = persentase ion logam yang diadsorpsi (%)

Penentuan model isoterm adsorpsi yang paling cocok dengan menggunakan metode regresi linier adalah teknik yang banyak digunakan untuk mengevaluasi parameter model serta untuk menentukan model isoterm yang terbaik. Namun, untuk menentukan keakuratan data maka dapat menentukan persamaan isoterm linear dan non linear dapat ditentukan. Metode regresi nonlinier digunakan oleh beberapa orang peneliti untuk menentukan isoterm adsorpsi parameter. Hal ini didasarkan pada minimalisir persentase kesalahan antara data eksperimen dan isoterm yang diprediksi (Benmessaoud dkk., 2020). Metode regresi nonlinier lebih akurat dan kuat untuk estimasi parameter model isoterm daripada metode regresi linier (Wang dan Guo., 2020). Beberapa fungsi kesalahan digunakan untuk mengevaluasi data isoterm. Fungsi kesalahan yang paling umum yang digunakan adalah koefisien determinasi R^2 (Benmessaoud dkk., 2020).

Beberapa isoterm yang umumnya digunakan dalam adsorpsi yaitu:

1. Isotermal Langmuir,

Model isotermal Langmuir merupakan proses adsorpsi yang berlangsung secara kemisorpsi dan terjadi akibat adanya lapisan tunggal (*monolayer*). Kemisorpsi merupakan adsorpsi yang terjadi melalui ikatan kimia yang sangat kuat antara sisi aktif permukaan dengan molekul adsorbat. Adsorpsi satu lapis terjadi karena ikatan kimia biasanya spesifik, sehingga permukaan adsorben mampu mengikat adsorbat dengan ikatan kimia (Arafah, 2014). Menurut Oscik J.,(1994) menyatakan bahwa isoterm adsorpsi Langmuir didasarkan atas beberapa asumsi, yaitu:

- a. adsorpsi hanya terjadi pada lapisan tunggal (*monolayer*),
- b. panas adsorpsi tidak tergantung pada penutupan permukaan,

c. semua situs dan permukaannya bersifat homogen.

Persamaan isoterm adsorpsi Langmuir digunakan untuk memperkirakan kapasitas adsorpsi adsorben pada permukaan homogen dengan adsorpsi monolayer tanpa interaksi antara molekul diadsorpsi, dengan asumsi bahwa semua situs adsorpsi setara dan adsorpsi pada satu situs tidak mempengaruhi adsorpsi di situs yang berdekatan (Khadir dkk., 2020). Persamaan isoterm adsorpsi Langmuir linear dan nonlinear dituliskan berturut-turut pada persamaan 3 dan persamaan 4

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L} \quad (3)$$

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (4)$$

Keterangan :

C_e = konsentrasi kesetimbangan adsorbat dalam larutan setelah adsorpsi
(mg/L)

q_e = jumlah adsorbat diadsorpsi per bobot adsorben (mg/g)

K_L = konstanta Langmuir yang terkait dengan kapasitas adsorpsi

Weber and Chakravorti (1974), mendefinisikan faktor pemisahan (R_L) sebagai konstanta tak berdimensi yang ditunjukkan pada persamaan 5

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_o} \quad (5)$$

Keterangan:

C_o = konsentrasi awal adsorbat (mg/L)

K_L = konstanta Langmuir yang terkait dengan kapasitas adsorpsi

Sifat adsorpsi dapat dikaitkan dengan nilai R_L dimana ($R_L = 1$) menunjukkan linear, irreversibel jika ($R_L = 0$), tidak menguntungkan jika ($R_L > 1$) dan menguntungkan jika ($0 < R_L < 1$).

2. Isoterm Freundlich,

Isoterm Freundlich merupakan jenis adsorpsi yang menunjukkan kesetimbangan adsorpsi yang terjadi pada permukaan heterogen (Göktepe dkk., 2021). Persamaan isoterm adsorpsi Freundlich merupakan terbentuknya lapisan monolayer dari molekul-molekul adsorbet pada permukaan adsorben. Namun pada isoterm Freundlich, situs-situs aktif pada permukaan adsorben bersifat heterogen. Persamaan bentuk linier dan nonlinier dari model Freundlich dituliskan berturut-turut pada persamaan 6 dan persamaan 7 (Wang dan Guo., 2020).

$$\log q_e = \log K_f + \left[\frac{1}{n} \right] \log C_e \quad (6)$$

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (7)$$

Keterangan:

q_e = jumlah adsorbat diadsorpsi per bobot adsorben (mg/g)

C_e = konsentrasi kesetimbangan adsorbat dalam larutan setelah adsorpsi (mg/L)

n = intensitas adsorpsi, model Freundlich akan direduksi menjadi model linear jika $n=1$

K_f = konstanta Freundlich yang terkait dengan kapasitas adsorpsi dan laju adsorpsi

Bentuk persamaan dan parameternya dapat ditemukan ketika membuat kurva plot $\log q_e$ vs $\log C_e$, sehingga akan menghasilkan garis lurus dengan $1/n$ sebagai slope dan $\log (K_f)$ sebagai intersep (Al-Ghouti dan Da'ana., 2020).

Nilai $1/n$ adalah intensitas adsorpsi atau heterogenitas permukaan yang menunjukkan distribusi relatif energi dan heterogenitas situs adsorbat. Ketika $1/n$ lebih besar dari nol atau ($0 < 1/n < 1$) maka adsorpsi menguntungkan dan ireversibel jika $1/n = 1$. Ketika nilai ini mendekati nol, permukaan adsorben menjadi lebih heterogen dan isoterm adsorpsi menjadi lebih nonlinier, sedangkan apabila $1/n$ lebih besar dari 1, proses adsorpsi tidak menguntungkan (Al-Ghouti dan Da'ana., 2020).

3. Isoterm Sips

Kombinasi antara model isoterm Langmuir dan isoterm Freundlich menghasilkan model isoterm adsorpsi Sips. Isoterm Sips dapat memprediksi heterogenitas sistem adsorpsi serta untuk menghindari keterbatasan yang terkait dengan peningkatan konsentrasi dari adsorbat (Al-Ghouti dan Da'ana., 2020). Pada konsentrasi adsorbat rendah, maka akan tereduksi menjadi isoterm Freundlich, sedangkan pada konsentrasi tinggi, maka akan berubah menjadi Langmuir (Khadir dkk., 2020). Model isoterm Sips dapat diaplikasikan dengan menggunakan tiga parameter sehingga dapat mengkorelasikan data eksperimen adsorpsi dengan baik (Wang dan Guo, 2020). Persamaan bentuk linier dan nonlinier dari model Freundlich dituliskan berturut-turut pada persamaan 8 dan persamaan 9.

$$\ln \frac{q_e}{q_m - q_e} = \ln K_s + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (8)$$

$$q_e = \frac{q_m K_s C_e^{n_s}}{1 + K_s C_e^{n_s}} \quad (9)$$

dimana q_m (mg/g) adalah jumlah maksimum yang diserap, K_s ($L^{n_s} \cdot mg^{-n_s}$) dan n_s adalah konstanta Sips. Model Sips menjadi model Langmuir ketika $n_s = 1$, dan menjadi model Freundlich pada konsentrasi adsorbat (C_0) rendah.

2.6 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adalah penggambaran tentang laju reaksi atau kecepatan saat proses reaksi terjadi (Yan dkk., 2020). Kinetika adsorpsi menyatakan adanya adsorpsi suatu zat oleh adsorben dalam setiap perubahan waktu (Jasim dan Abbas, 2019). Kinetika adsorpsi bergantung pada luas permukaan adsorben, jenis pelarut, ukuran partikel, suhu, jenis gugus fungsi dan konsentrasi. Kemampuan pengikatan yang tinggi dari gugus fungsi pada adsorben dapat meningkatkan kecepatan reaksi secara keseluruhan (Madan dkk., 2019).

Orde reaksi menyatakan kebergantungan laju reaksi terhadap konsentrasi suatu zat yang bereaksi. Orde reaksi ditentukan secara eksperimen dan tidak berhubungan dengan stoikiometri reaksi, namun diatur oleh mekanisme reaksi

yaitu dari jumlah spesies yang bertumbukan selama reaksi terjadi (Tang dkk., 2020). Persamaan (10) merupakan persamaan orde satu semu.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (10)$$

Notasi k_1 (menit^{-1}) adalah tetapan laju adsorpsi pada orde satu semu, q_t menunjukkan jumlah molekul target yang diadsorpsi (mg/g) pada waktu t (menit) dan q_e menunjukkan jumlah molekul target (mg/g) yang diadsorpsi pada kesetimbangan. Integrasi persamaan untuk kondisi batas $t=0$ hingga $t=t$ dan $q_t = 0$, hingga $q_t = q_t$, maka menghasilkan persamaan (11).

$$\ln \frac{q_e}{q_e - q_t} = k_1 t \quad (11)$$

dimana persamaan (11) merupakan laju orde satu semu. Persamaan (11) dapat ditulis seperti pada persamaan (12). Persamaan kinetika orde satu semu bentuk linear dan non linier dituliskan berturut-turut pada persamaan (12) dan persamaan (13).

$$\ln (q_e - q_t) = \ln (q_e) - k_1 \cdot t \quad (12)$$

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 \cdot t}) \quad (13)$$

Selain itu, persamaan orde dua semu dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan (14).

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (14)$$

Notasi k_2 ($\text{g/mg} \cdot \text{min}$) adalah tetapan laju adsorpsi pada orde dua semu. Persamaan (14) kemudian diintegrasikan dan menerapkan kondisi awal, menghasilkan persamaan (15).

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} k_2 \cdot t \quad (15)$$

Persamaan (15) dapat ditulis dalam bentuk linear seperti pada persamaan (16).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \cdot q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (16)$$

Persamaan bentuk nonlinear dari persamaan orde dua semu dituliskan pada persamaan (17)

$$q_t = \frac{k_2 \cdot q_e^2 \cdot t}{1 + k_2 \cdot q_e \cdot t} \quad (17)$$

2.7 Desorpsi

Proses desorpsi merupakan proses pengambilan kembali bahan yang diadsorpsi oleh adsorben. Adsorben yang digunakan untuk adsorpsi ion logam pada air limbah dapat digunakan kembali dengan cara meregenerasinya kembali. Regenerasi suatu adsorben merupakan proses pembukaan kembali permukaan pori-pori suatu adsorben. Mekanisme regenerasi dikenal dengan istilah desorpsi. Selain itu, desorpsi adalah proses pelepasan ion-ion atau molekul yang telah berikatan dengan gugus aktif. Metode desorpsi yang umumnya digunakan adalah desorpsi termal dan regenerasi kimiawi. Desorpsi termal yaitu tahap pengeringan adsorben, sedangkan desorpsi secara kimiawi adalah proses dimana adsorbat dihilangkan dari adsorben dengan mereaksikannya dengan zat kimia yang sesuai (Annisah dan Subhan, 2020).

Regenerasi dan penggunaan kembali adsorben merupakan hal yang penting secara ekonomi dalam pengolahan air limbah. Oleh karena itu, kajian perlu dilakukan untuk mengetahui kemampuan desorpsi dalam daur ulang dari adsorben (Jain dkk., 2018). Komposit *biochar* magnetit dapat didesorpsi menggunakan zat pendesorpsi yaitu akuades, asam klorida (HCl), asam nitrat (HNO₃), dan asam sulfat (H₂SO₄) (Alqadami dkk., 2018). Selain itu, beberapa zat kimia yang dapat digunakan dalam desorpsi nanokomposit *biochar* yaitu natrium hidroksida (NaOH), natrium bikarbonat (NaHCO₃), dan asam fosfat (H₃PO₄) (Liang dkk., 2020). Rumus untuk mengetahui efisiensi desorpsi suatu adsorben diberikan pada persamaan (18) (Jain, dkk., 2018).

$$\% \text{ Efisiensi Desorpsi} = \frac{\text{Jumlah ion logam yang didesorpsi}}{\text{Jumlah ion logam yang diadsorpsi}} \times 100\% \quad (18)$$

Oladipo dkk (2019) menyimpulkan, bahwa efisiensi desorpsi ion Cu²⁺, Hg²⁺, dan Zn²⁺ dari komposit *biochar* magnetit dengan menggunakan agen pendesorpsi larutan NaOH 0,1 M adalah 78 - 98% dengan penggunaan lima kali siklus daur ulang. Selain itu, penelitian lain juga melakukan penelitian tentang penggunaan larutan HCl 0,1 M dapat digunakan sebagai larutan agen pendesorpsi yang efektif untuk menarik kembali ion Cu²⁺, Cd²⁺, dan Cr⁶⁺ pada adsorben nanokomposit *biochar* magnetit. Efisiensi desorpsi menunjukkan untuk masing-masing ion Cu²⁺, Cd²⁺, dan Cr⁶⁺ adalah 83,80 dan 23,20% (Jain dkk., 2018).

2.8 Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)

Eceng gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) merupakan tanaman gulma air yang memiliki kemampuan pertumbuhan yang sangat cepat, sehingga tanaman tersebut dapat menutupi permukaan sungai dan mengganggu kehidupan biota di dalam sungai, dapat menjadi tempat berkembang biaknya hama, dan menurunkan kualitas air (Ayanda dkk., 2020). Eceng gondok merupakan salah satu tanaman gulma dari sepuluh besar dunia yang termasuk spesies invasif, yang penyebarannya dapat membawa dampak buruk serta kerugian bagi lingkungan perairan karena dapat menyebabkan kurangnya pemasukan cahaya dan oksigen, perubahan sifat kimia air, dan terjadi penurunan volume air melalui evapotranspirasi (Sharma dan Aggarwal, 2020).

Menurut data *Integrated Taxonomic Information System* (2012), klasifikasi tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) adalah sebagai berikut:

Kingdom	: Plantae
Subkingdom	: Viridiplantae
Superdivision	: Embryophyta
Division	: Tracheophyta
Class	: Magnoliopsida
Superorder	: Lilianae
Order	: Commelinales
Family	: Pontederiaceae
Genus	: <i>Eichhornia</i> Kunth
Species	: <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms

Eceng gondok *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) (Gambar 1) adalah tumbuhan air yang hidup dalam perairan terbuka. Tumbuhan ini terdiri dari akar, tangkai, daun, dan bunga. Eceng gondok dapat tumbuh hingga tinggi sekitar 0,4 -0,8 meter, tidak memiliki batang sejati. Daunnya berwarna hijau, berbentuk daunnya oval, dan permukaannya licin, dapat berbunga berwarna ungu dan termasuk bunga majemuk, dan memiliki akar serabut (Agrotek, 2020). Berikut bentuk tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) (Agrotek., 2020).

Menurut Bordoloi dkk (2018), komposisi kimia pada tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia eceng gondok (Bordoloi, dkk.,2018).

No.	Komponen	Kandungan (%)
1	Selulosa	45
2	Lignin	11,30
3	Hemiselulosa	21
4	Ash	11,20
5	Natural moisture content	12,46

(Bordoloi dkk., 2018).

Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) merupakan salah satu jenis tanaman yang dapat digunakan untuk meremediasi air limbah serta memiliki kemampuan menyerap zat organik, anorganik, serta logam berat yang merupakan bahan pencemar. Biomassa eceng gondok memiliki kandungan selulosa dan hemiselulosa yang cukup tinggi, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai alternatif untuk mengolah air yang tercemar limbah logam berat. Beberapa ion logam seperti Fe^{3+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , dan Ni^{2+} dapat dihilangkan melalui bioakumulasi dalam jaringan tanaman dengan urutan efisiensi penyerapan ion $Fe^{3+} > Pb^{2+} > Cu^{2+} > Ni^{2+}$ (Gaballah dkk., 2021). Selain itu, ion seperti Mn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} dan Zn^{2+} dapat diserap oleh tanaman eceng gondok dengan waktu penyerapan selama 24 hari adalah Mn^{2+} (97,69%), Pb^{2+} (85,31%), Cd^{2+} (72,83%) dan Zn^{2+} (31,00%) (Zhou dkk., 2020).

Serbuk eceng gondok dapat dimanfaatkan sebagai adsorben yang ramah lingkungan, dengan harga yang murah yang dapat digunakan untuk menghilangkan ion logam pada air limbah dan larutan yang mengandung ion Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , dan Cr^{6+} . Konsentrasi ion Pb^{2+} dalam beberapa sampel air limbah berada dalam kisaran 1,2 - 75,3 ppm, ion Ni^{2+} pada kisaran 0,5 - 95,5 ppm, ion Zn^{2+} pada kisaran 0,5-95,5 ppm, ion Cd^{2+} 0,8-52,7 ppm, dan ion Cr^{6+} pada kisaran 0,8-52,7 ppm. Efisiensi adsorpsi ion Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} dan Cr^{6+} adalah berkisar antara 65,8 - 81,1%, sedangkan efisiensi adsorpsi ion Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} dan Cr^{6+} yang diaplikasikan pada air limbah berkisar antara 60,4 - 74,9% (Mwaniki dkk., 2019). Keberadaan gugus hidroksil (-OH), dan gugus karboksil (-C=O) dalam selulosa eceng gondok memungkinkan terjadinya interaksi dengan ion logam, sehingga biomassa eceng gondok memiliki kapasitas adsorpsi yang besar untuk mengadsorpsi ion logam pada air limbah (Sayago., 2020).

2.9 Biochar

Biochar merupakan bahan yang berasal dari biomassa, yang diproses melalui proses pirolisis atau pembakaran tanpa oksigen dan mengandung karbon yang tinggi (Wang dan Wang, 2019). Proses pirolisis biomassa menghasilkan zat padat, cair, dan gas. Bahan baku yang umumnya digunakan untuk produksi *biochar* adalah kotoran hewan, limbah pertanian dan sisa hutan, limbah bioindustri dan organisme laut dan akuatik dll (Yang dkk., 2020). *Biochar* juga dapat dimanfaatkan sebagai adsorben untuk menghilangkan kontaminasi ion logam pada teknologi pengolahan air limbah (Li dkk., 2018). Penggunaan *biochar* sebagai adsorben dapat menjadi solusi alternatif untuk menghilangkan zat polutan organik maupun zat anorganik pada perairan. Kelebihan *biochar* sebagai adsorben pada pengolahan air yaitu porositas tinggi, stabilitas fisiokimia dalam air, bahan baku melimpah di alam. Selain itu, mengandung gugus fungsi karboksil (-COOH) dan hidroksil (-OH) pada permukaan *biochar* yang berfungsi sebagai penukar ion pada saat proses adsorpsi dengan logam berat (Oladipo dkk., 2019).

Biochar dapat diperoleh dari berbagai macam limbah biomassa, salah satunya limbah biomassa yang dapat digunakan dari eceng gondok. Menurut

Huang dkk (2021), menyatakan bahwa biomassa eceng gondok setelah dilakukan proses pirolisis menghasilkan luas permukaan spesifik yang lebih besar yaitu sebesar 62,9 m²/g atau 13,81 nm.

Beberapa penelitian sebelumnya menyatakan bahwa *biochar* eceng gondok berpotensi digunakan sebagai adsorben untuk ion Pb²⁺, Zn²⁺, Cu²⁺, dan Cd²⁺. Kapasitas adsorpsi maksimum berturut-turut sebesar 39,09; 45,50; 48,20 dan 44,04 mg/g. Suhu optimum untuk pirolisis pada penelitian ini adalah 500°C dengan waktu pirolisis selama 4 jam (Li, dkk., 2018).

Biochar dapat digunakan untuk mengadsorpsi ion Cr⁶⁺. Efisiensi adsorpsi ion Cr⁶⁺ adalah 98%. Beberapa gugus fungsi utama yang berpartisipasi dalam proses penyisihan logam Cr⁶⁺ adalah (-OH-, -C=O-, -COOH-, -CH₃-, -OH/C=O- dan -COOH) (Guo, dkk., 2021).

Biochar merupakan adsorben yang bermuatan negatif yang berasal dari gugus fungsi seperti -OH dan -COOH, sedangkan ion logam bermuatan positif. Interaksi antara *biochar* dengan ion logam dapat menghasilkan daya tarik elektrostatik, sehingga dapat menghilangkan ion logam pada air limbah (Kumar, dkk., 2018).

2.10 Magnetit (Fe₃O₄)

Secara umum mineral besi oksida yang umumnya ditemukan di alam berupa besi magnetit (Fe₃O₄), hematite (α-Fe₂O₃), dan maghemite (γ-Fe₂O₃). Ketiga bentuk oksida besi ini sangat berguna dalam teknologi. Besi magnetit (Fe₃O₄), merupakan material yang menarik dan memiliki aplikasi yang sangat luas. Magnetit merupakan mineral magnetik yang terkuat sifat magnetiknya dengan nilai magnetisasi 90 Am²/kg sampai dengan 93 Am²/kg. Kelebihan material magnetit terletak pada sifat uniknya yaitu sifat kemagnetannya yang berbeda dengan material ukuran bulk, serta luas permukaannya spesifik yang besar. Magnetit dalam ukuran nano bersifat superparamagnetik dan dapat dimanipulasi oleh suatu medan magnet eksternal. Selain itu, pada ukuran di bawah 20 nm dengan morfologi partikel berbentuk bulat, material ini dapat diaplikasikan dengan baik untuk kebutuhan biomedis (Jia dkk., 2009 ; Saragi dkk., 2017).

Magnetit (Fe_3O_4) memiliki kelebihan dalam menyerap ion logam beracun dari air karena memiliki sifat magnet, stabilitas kimia yang tinggi, metode sintesis yang mudah serta memiliki kemampuan daur ulang yang baik (Sartika dkk., 2019). Beberapa metode yang digunakan untuk menyintesis nanopartikel magnetit, salah satunya dengan menggunakan metode kopresipitasi, di mana senyawa Fe_3O_4 merupakan senyawa yang dihasilkan dari reaksi antara senyawa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, dan NaOH , yang kemudian saling berinteraksi serta dapat menempel pada medan magnet eksternal (Jain dkk., 2018). Metode kopresipitasi memiliki beberapa kelebihan antara lain, metode ini sederhana, murah, cepat, memiliki efisiensi tinggi dan dapat dilakukan pada suhu rendah (Mira dkk., 2018). Selain itu, nanopartikel magnetit dapat digunakan sebagai adsorben dalam bentuk komposit karena memiliki sifat stabil, superparamagnetik, bersifat amfoter dan efisiensi adsorpsi tinggi (Karunayake dkk., 2019).

Partikel-partikel Fe_3O_4 memiliki kecenderungan saling mendekat dan beraglomerasi sehingga membentuk suatu kumpulan partikel Fe_3O_4 (Zhao dkk., 2016). Ukuran partikel dari nanopartikel magnetit dapat mempengaruhi sifat dan karakteristik dari nanopartikel magnetit (Fe_3O_4), di mana ukuran sebuah partikel relatif kecil dapat membuat material tersebut sangat reaktif terhadap medan magnet luar, akan tetapi jika medan magnet luar dihilangkan pengaruhnya secara perlahan-lahan sifatnya akan mirip dengan material paramagnetik (Rahmi dkk., 2018).

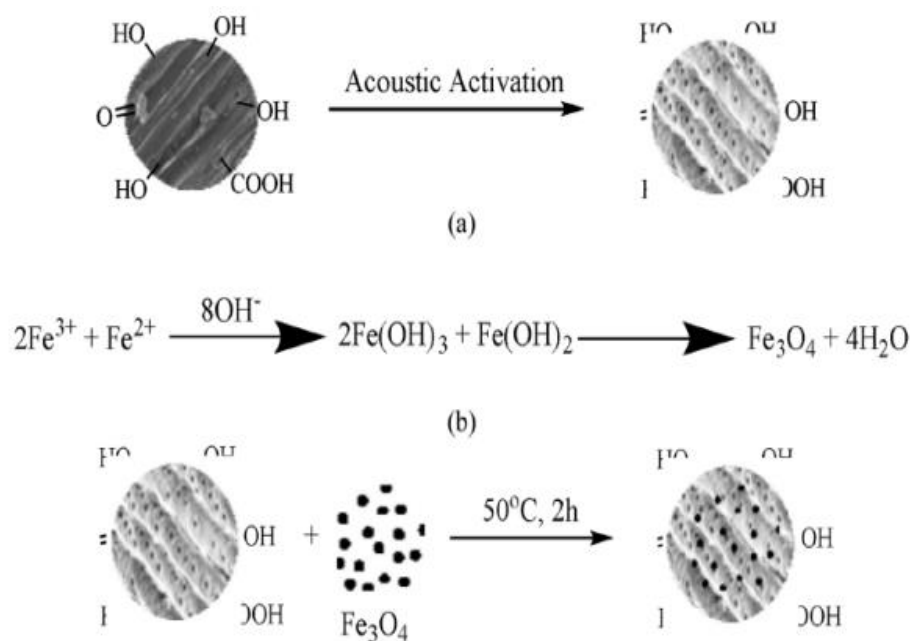
2.11 Komposit *Biochar* Magnetit

Material komposit merupakan material yang terdiri atas dua atau lebih molekul anorganik atau organik dalam beberapa bentuk kombinasi dengan pembatas antar keduanya minimal satu molekul (Abdullah dkk, 2008). Salah satu penggunaan komposit untuk mengatasi adsorpsi ion logam pada perairan yaitu menggunakan material komposit *biochar* magnetit (KBM).

Material KBM merupakan salah satu adsorben yang mulai dikembangkan saat ini untuk remediasi lingkungan karena adsorben ini mudah dipisahkan, proses sintesis sederhana, harga bahan baku (*biochar*) murah. *Biochar* diketahui memiliki potensi untuk dimanfaatkan adsorben untuk menyerap logam berat dalam air limbah, namun penggunaan *biochar* saja memiliki kekurangan seperti

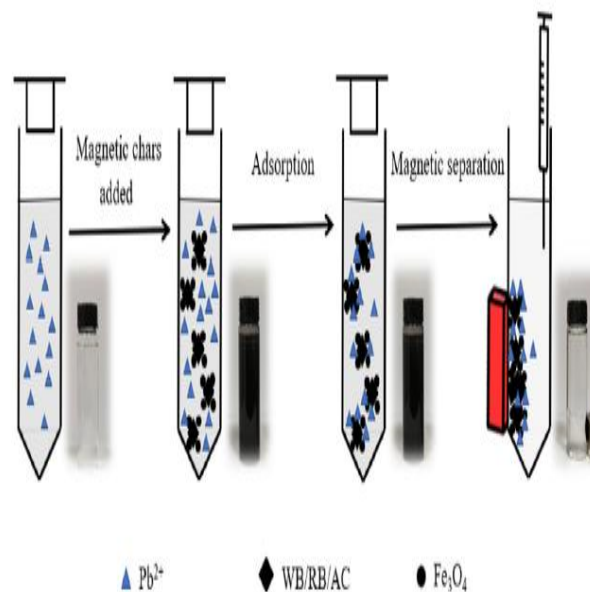
sulitnya memisahkan serbuk biochar dari lingkungan media, sehingga menyebabkan polusi sekunder dan menghambat aplikasi skala besar dari biochar sebagai adsorben (Yi dkk., 2019). Untuk mengatasi masalah tersebut, maka pemanfaatan KBM sebagai adsorben merupakan solusi alternatif untuk menyerap logam berat pada pengolahan air limbah. Namun, penggunaan magnetit sebagai adsorben, memiliki beberapa keterbatasan seperti kecenderungannya untuk membentuk agregasi. Biochar dapat mengurangi agregasi pada Fe_3O_4 , sehingga dalam komposit biochar magnetit agregasi Fe_3O_4 dapat berkurang. Selain itu, luas permukaan komposit menjadi lebih tinggi, dan adsorben memiliki sifat superparamagnetik (Bhushan dkk., 2020).

Sintesis KBM umumnya dibuat menggunakan senyawa besi, dimana besi berperan sebagai prekursor media magnetik. Namun, beberapa penggunaan larutan yang juga umum digunakan sebagai spesies magnetik dalam sintesis komposit *biochar* magnetit antara lain dapat berasal dari $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, FeSO_4 , FeCl_3 , FeCl_2 , MnCl_2 , CoCl_2 dan NiCl_2 (Zhao dkk., 2016). Impregnasi sifat magnetik ke *biochar* dengan menggabungkan sifat adsorpsi dan sifat magnetik dapat meningkatkan efisiensi adsorpsi dan mempermudah dalam proses pemisahan adsorben dan adsorbat (Bhushan dkk., 2020). Berikut ilustrasi sintesis KBM dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema sintesis KBM (Sajjadi dkk., 2020).

Pemisahan KBM dapat dilakukan hanya dengan batang magnet sederhana, sehingga waktu yang diperlukan lebih cepat dibandingkan proses sentrifugasi dan filtrasi (Karunayake dkk, 2017). Selain itu, *biochar* yang dimodifikasi dengan magnetit memiliki luas permukaan spesifik yang besar sehingga kemampuan kapasitas adsorpsi semakin besar (Li dkk., 2020). Skema adsorpsi dengan menggunakan KBM dengan pemisahan secara magnetik dengan menggunakan magnet eksternal dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema adsorpsi ion Pb^{2+} dengan menggunakan KBM (a) Larutan ion Pb^{2+} , (b) Penambahan KBM ke dalam larutan ion Pb^{2+} , (c) Adsorpsi ion Pb^{2+} dengan adsorben KBM, (d) Pemisahan larutan dengan adsorben KBM menggunakan batang magnet (Li dkk., 2020).

Material KBM memiliki potensi adsorpsi yang lebih baik dibandingkan dengan hanya menggunakan *biochar* saja. Material KBM memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih besar dibandingkan dengan menggunakan *biochar* saja. Hal ini dapat dipengaruhi oleh peningkatan luas permukaan adsorben komposit *biochar* magnetit. Tabel 2 menunjukkan pengaruh kombinasi antara *biochar* dengan magnetit (Fe_3O_4) terhadap peningkatan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi ion logam.

Tabel 2. Pengaruh komposit *biochar* dengan magnetit (Fe_3O_4) terhadap peningkatan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi ion logam

Adsorben	Adsorbat	Luas permukaan (m^2/g)	Kapasitas adsorpsi (mg/g)	Sumber
Batang gandum		13,96	160,39	
Batang gandum + Fe_3O_4		31,04	179,89	
Sekam padi		194,23	73,34	Li dkk., 2020
Sekam padi + Fe_3O_4	Pb^{2+}	224,62	95,44	
Sabut kelapa		459,36	39,15	
Sabut kelapa + Fe_3O_4		491,53	40,30	
Kulit pisang		95,89	$\text{Hg}^{2+} = 45,5$ $\text{Cu}^{2+} = 44,9$ $\text{Zn}^{2+} = 53,9$	Oladipo dkk., 2019
Kulit pisang + Fe_3O_4	Hg^{2+} , Cu^{2+} , dan Zn^{2+}	323,2	$\text{Hg}^{2+} = 83,4$ $\text{Cu}^{2+} = 75,9$ $\text{Zn}^{2+} = 72,8$	

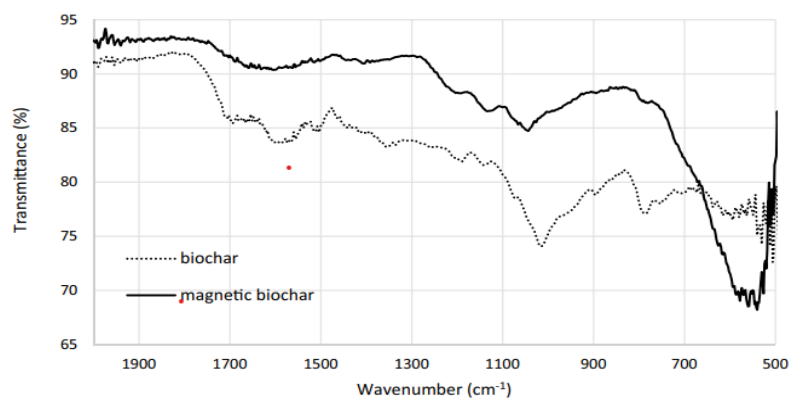
2.12 Instrumentasi

Karakterisasi KBM pada penelitian ini menggunakan beberapa instrumen yaitu *Fourier Transform – Infrared*. (FT-IR), *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDS), *X-Ray Diffraction* (XRD), Brunauer-Emmett-Teller (BET) Metode Barret-Joyner-Helenda (BJH) dan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM). Selain itu, untuk mengukur kandungan ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} menggunakan instrumen Spektrofotometer Serapan Atom (SSA).

2.12.1 Fourier Transform - Infra Red (FT-IR)

Spektrometer *Fourier Transform-Infra Red* merupakan suatu metode pengukuran untuk mengidentifikasi gugus fungsi penyusun suatu senyawa. Kelebihan dari metode FTIR adalah preparasi sampel yang tidak membutuhkan waktu yang lama dan mudah. Selain itu, sampel yang digunakan dapat berupa padat, cair ataupun gas. Prinsip dari FT-IR yaitu berdasarkan perbedaan penyerapan radiasi inframerah oleh molekul suatu materi (Sulistiyani dan Huda 2017). Radiasi infra merah memiliki range frekuensi. Pengukuran spektrum infra merah dilakukan pada daerah cahaya infra merah tengah pada panjang gelombang 2,5-50 μm atau bilangan gelombang 4000-200 cm^{-1} . Energi yang dihasilkan dari oleh radiasi ini menyebabkan vibrasi atau getaran pada molekul (Dachriyanus, 2004).

Penelitian Lomenech dkk (2021), menunjukkan karakterisasi dengan instrumen FTIR pada sampel biochar, dan *biochar* magnetik. *Biochar* yang digunakan berasal dari produk sampingan biorefinery (humin) yang dikombinasikan dengan oksida besi magnetit dengan metode kopresipitasi yang diaplikasikan dalam adsorpsi metilen biru. Spektra FTIR dari kedua sampel dapat dilihat pada Gambar 4.



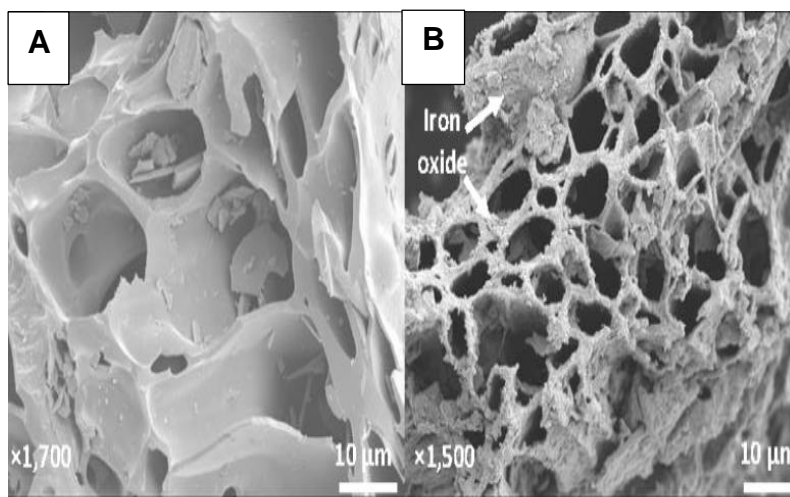
Gambar 4. Spektra FTIR *biochar* dan KBM (Lomenech dkk., 2021).

Gambar 4 menunjukkan adanya puncak serapan yang luas dan kuat di kisaran 530–580 cm^{-1} , yang merupakan karakteristik dari vibrasi ikatan Fe–O dari oksida besi magnetit. Hasil ini menegaskan bahwa pengendapan oksida besi terjadi pada permukaan *biochar*. Pada daerah sekitar 2000 hingga 1000 cm^{-1} , spektra IR dari sampel *biochar* dan komposit *biochar* magnetit menunjukkan

adanya puncak yang berasal dari vibrasi gugus seperti (-C-O-, -C-O-H-, -C-O-C-) yaitu pada pita serapan sekitar ($1000-1400\text{ cm}^{-1}$) dan vibrasi *stretching* dari gugus (-C=O-, dan -C=C-) yaitu pada sekitar $1600-1800\text{ cm}^{-1}$. Selain itu, beberapa penelitian sebelumnya mengemukakan bahwa, sampel biochar non-magnetik, memiliki gugus fungsi utama yaitu lakton, karboksil, hidroksil dan aromatik (Lomenech dkk., 2021).

2.12.2 Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)

Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS) merupakan instrumen yang digunakan untuk mengetahui morfologi senyawa padatan dan komposisi unsur yang terdapat dalam suatu senyawa. *Scanning Electron Microscope* (SEM) merupakan suatu tipe *mikroskop* elektron yang menggambarkan permukaan sampel melalui proses *scan* dengan menggunakan pancaran energi yang tinggi dari elektron. Elektron berinteraksi dengan atom-atom yang membuat sampel menghasilkan sinyal yang memberikan informasi tentang permukaan topografi suatu sampel, komposisi dan sifat-sifat lainnya seperti konduktivitas listrik. SEM dapat menentukan struktur morfologi maupun bentuk permukaan yang berskala lebih halus. Selain itu, EDS (*Electron Dispersive Xray Spectroscopy*) juga dapat mendeteksi komposisi unsur dari suatu material (Yuliyanti dkk., 2012).



Gambar 5. Pencitraan SEM dari a) *biochar*, dan b) *biochar* magnetik
(^(a)Karunanayake, dkk., 2017)

Gambar 5 menunjukkan gambaran morfologi permukaan *biochar* dan *biochar* magnetit yang memiliki celah serta memiliki pori-pori yang cukup banyak, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai adsorben untuk mengadsorpsi senyawa organik yaitu asam salisilat, 4-nitroaniline, asam benzoat, dan asam ftalat. Selain itu, uji EDS menunjukkan bahwa komposisi *biochar* dan *biochar* magnetik didominasi dengan unsur karbon dan oksigen. Kandungan karbon pada *biochar* dan *biochar* magnetit berturut-turut adalah 56,2% dan 91%, kandungan oksigen adalah 7,8% dan 18,2%, sedangkan kadar besi berturut-turut adalah 0,1% dan 24,4%.

2.12.3 X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) merupakan instrumen yang digunakan untuk menentukan struktur padatan kristal, parameter kisi, struktur kristal, derajat kristalisasi dan fase yang terdapat dalam suatu sampel. Instrumen ini dapat digunakan untuk mengetahui komposisi fasa-fasa secara kuantitatif maupun secara kualitatif (Fatimah dan Jamaluddin, 2009). Prinsip instrumen XRD yaitu berdasarkan prinsip Bragg yang mengemukakan bahwa perbedaan lintasan berkas difraksi sinar -X yang merupakan kelipatan panjang gelombang dengan rumus $n\lambda = d \cdot \sin\theta$, dengan n adalah bilangan bulat, sedangkan λ adalah panjang gelombang sinar-X, d adalah jarak antar bidang, dan θ adalah sudut difraksi. Difraktogram yang diperoleh memberikan informasi deretan peaks difraksi dengan intensitas relatif sepanjang nilai 2θ pada rentang yang ditentukan. Besar intensitas relatif puncak tergantung dari banyaknya atom dalam sampel dan pendistribusinya dalam material (Sumari dkk., 2020).

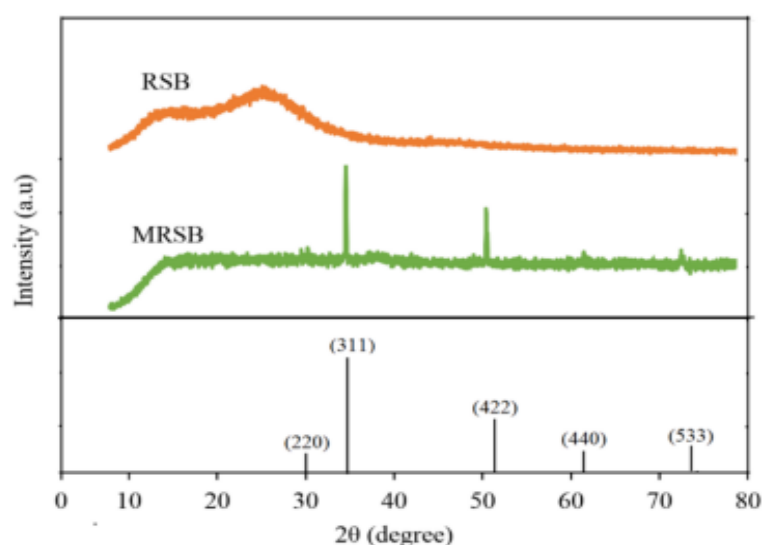
Identifikasi struktur fasa yang ada dalam sampel secara umum dilakukan menggunakan standar data base Joint Committee of Powder Diffraction Standard (JCPDS) dimana analisis secara kualitatif dilakukan dengan cara membandingkan intensitas puncak-puncak yang terbentuk pada pola difraksi dengan data JCPDS. Selain itu, pola difraksi mengandung informasi tentang simetri susunan atom, struktur bahan kristal atau amorf, orientasi kristal serta pengukuran berbagai sifat bahan yaitu tegangan, vibrasi termal dan cacat kristal dengan cara mendeteksi perbedaan intensitas difraksi di daerah kristal dekat dislokasi dan daerah kristal yang mendekati kesempurnaan. Difraksi sinar-x juga dapat digunakan untuk mengetahui parameter kisi dan tipe struktur Kristal (Astuti,

2018). Difraksi sinar-X dapat digunakan untuk menentukan ukuran kristal dengan fase tertentu. Penentuannya dapat merujuk pada puncak-puncak utama di dalam pola difraktogram melalui pendekatan Debye Scherrer yang dirumuskan pada persamaan 19 (Jain dkk., 2018)

$$D = \frac{k \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (19)$$

dimana D adalah ukuran kristal, K adalah konstanta Scherrer yang bergantung pada bentuk dari kristal (0,90), λ adalah panjang gelombang dari sinar-X (1,5406 Å), β = nilai dari *Full Width at Half Maximum* (FWHM) (rad), dan θ adalah sudut difraksi Braggs (°)

Phuong dan Lock (2022) menyatakan, karakterisasi *biochar* dari jerami (RSB) dan nanokomposit *biochar* magnetik (MRSB) dengan menggunakan alat XRD yang bertujuan untuk melihat perubahan antara *biochar* dan komposit *biochar* magnetik dengan melihat struktur kristalnya. Hasil analisis yang diperoleh pada analisis XRD dapat dilihat pada Gambar 6.



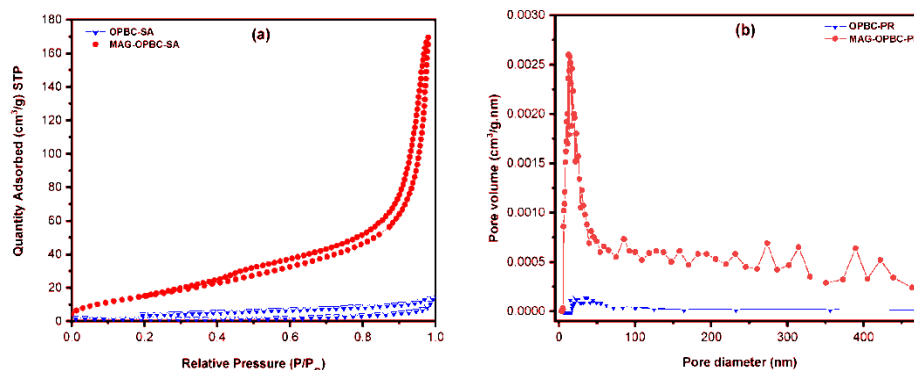
Gambar 6. Difraktogram *biochar* dan komposit *biochar* magnetik (Phuong dan Loc., 2022).

Berdasarkan pola difraksi, sampel *biochar* (RSB) memiliki fase amorf. Selain itu, berdasarkan data standar menurut (JCPDS No. 19-0629), Phuong dan Loc, (2022) melaporkan bahwa puncak difraksi pada sampel MRSB memiliki nilai hkl adalah (220); (311); (422); (440); dan (533).

2.12.4 Brunauer-Emmett-Teller (BET) Metode Barret- Joyner-Helenda (BJH)

Karakterisasi BET merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui diameter, volume pori dan luas permukaan spesifik suatu material. Karakterisasi dengan menggunakan BET didasarkan pada prinsip adsorpsi-desorpsi gas. Mekanisme adsorpsi gas tersebut berupa adsorpsi gas (nitrogen, argon dan helium) oleh suatu permukaan padatan pada suhu dan tekanan tertentu (Remesh dkk., 2014).

Pada prinsipnya, sampel hasil sintesis dipanaskan pada 100°C selama 6 jam dalam keadaan vakum, lalu diukur pada suhu 77 K, pada alat sorptometer seperti mikromeritik ASAP 2010. Data yang diperoleh dapat memberikan informasi tentang tipe isoterm dan loop histerisis dari suatu material. Sedangkan luas permukaan sampel dihitung dengan plot isoterm BET (Anbia dan Gaffar 2011; Kim, dkk., 2013). Penentuan luas permukaan spesifik, ukuran pori rata-rata, dan volume porositas sampel komposit *biochar* magnetit dapat diketahui dengan menggunakan analisis BET-BJH.



Gambar 7. Grafik Isoterm Adsorpsi-Desorpsi N₂ (a) Luas permukaan dan (b) diameter pori untuk kedua adsorben Biochar (OPBC) dan Komposit Biochar magnetit (MAG-OPBC) (El-Shafie dkk., 2023).

Gambar 7 menunjukkan perbandingan kurva adsorpsi desorpsi N₂ dari sampel *biochar* yang diperoleh dari kulit jeruk (OPBC) dan komposit biochar kulit jeruk- Fe₃O₄ (MAG-OPBC). Kurva adsorpsi desorpsi N₂ dari masing-masing sampel OPBC dan MAG-OPBC menunjukkan bahwa luas permukaan meningkat setelah sampel dikompositkan dimana luas permukaan dari OPBC adalah 6,99 m²/g dan dari MAG-OPBC adalah 60,76 m²/g. Distribusi ukuran pori pada masing-masing sampel juga diamati yang dapat dilihat pada Gambar 7b, yang

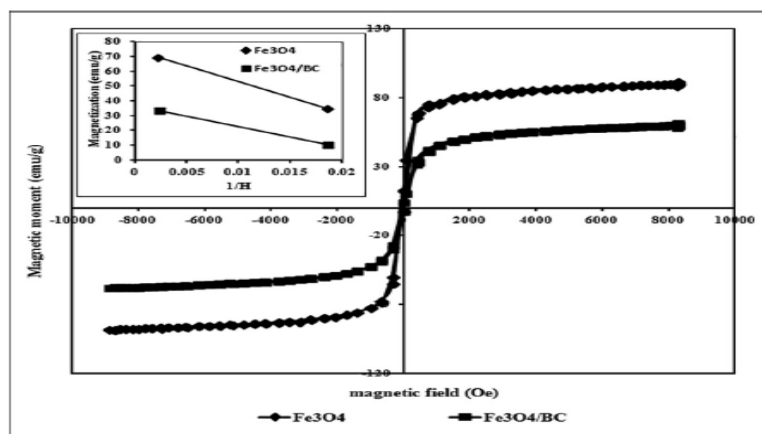
menunjukkan bahwa ukuran pori sampel adalah mesopori (2–50 nm) dan makropori (>50 nm). Gambar 7 menunjukkan bahwa kedua sampel tergolong dalam isotherm tipe IV, menunjukkan adsorpsi monolayer-multilayer dengan kondensasi kapiler, dan loop histerisis tipe-H3 .

2.12.5 *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)*

Vibrating Sample Magnetometer (VSM) merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengetahui sifat magnetik suatu material. VSM dapat mengetahui informasi terkait dengan besaran-besaran sifat magnetik sebagai akibat perubahan medan magnet luar yang digambarkan dengan kurva histeresis, sifat magnetik bahan sebagai akibat perubahan suhu, dan sifat-sifat magnetik sebagai fungsi sudut pengukuran atau kondisi anistropik suatu bahan (Khairunnisa, 2017). Analisis VSM dilakukan untuk memperoleh beberapa sifat kemagnetan suatu material yaitu magnetisasi saturasi, retentivitas magnetik dan koersivitas. Magnetisasi saturasi yaitu kemampuan untuk membangkitkan gaya magnet selama material memperoleh medan magnet luar. Retentivitas magnetik adalah kemampuan suatu material untuk menyimpan energi magnetic yang diubah menjadi gaya magnet internal setelah mendapatkan medan magnet eksternal. Koersivitas adalah nilai yang menentukan jumlah medan magnet yang diperlukan untuk mengurangi gaya magnet internal dari suatu material (Puspitasari, 2021)

Prinsip kerja VSM yaitu, ketika sampel ditempatkan pada medium magnet preparat, yang berada ditengah perangkat, Sampel diletakkan pada ujung batang medium preparat yang dipasang pada sebuah transduser elektromekanis. Sampel akan diletakkan dalam medan magnet yang seragam. Setelah induksi magnet telah dilakukan, maka pada sampel akan menunjukkan sinyal berupa getaran sinusoidal dalam medium *pickup coil*. Sinyal yang dihasilkan sebanding dengan amplitudo dan medan magnet partikel. Kemudian sinyal akan dikirim ke penguat diferensial. Keluaran dari penguat diferensial akan diproses di amplifier yang menerima sinyal referensi. Proses identifikasi akan menghasilkan sinyal DC proposional yang menunjukkan informasi mengenai momen magnetik sampel yang dianalisis. Sinyal tersebut akan membentuk suatu keluaran yang berupa kurva histerisis (Tebriani, 2019). Data yang diperoleh dari karakterisasi sifat magnet berupa kurva histerisis dengan sumbu x yang merupakan medan magnet

yang menginduksi sampel dalam satuan Tesla dan sumbu y yang merupakan magnetisasi sampel dalam satuan emu/gram. Kurva histerisis pada karakterisasi *biochar* magnetit dengan menggunakan alat *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM) dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil uji VSM pada sampel Fe_3O_4 dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Biochar}$ (Bhushan dkk., 2020).

Gambar 8 menunjukkan kurva magnetisasi saturasi dari MNP-BC dan MNP berturut-turut adalah 36,5 dan 74,3 emu/g. Saturasi magnetisasi MNP-BC ditemukan lebih rendah dibandingkan dengan MNP. Hal tersebut dapat dikaitkan dengan impregnasi *biochar* ke permukaan MNP, yang menurunkan momen magnetik. Hasil VSM menunjukkan bahwa komposit *biochar* magnetik yang disintesis dari Fe_3O_4 dapat dengan mudah dipisahkan dari larutan homogen.

2.12.6 Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)

Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) merupakan suatu metode analisis kuantitatif yang pengukurannya berdasarkan banyaknya radiasi yang dihasilkan atau yang diserap oleh spesi atom atau molekul analit. Selain itu, metode analisis SSA didasarkan pada penyerapan cahaya dengan panjang gelombang tertentu oleh atom logam dalam keadaan bebas (Skoog dkk., 2000). Penyerapan energi tersebut, menyebabkan tereksitasinya elektron dari kulit atom ketinggian energi yang lebih tinggi. Keadaan ini bersifat labil, sehingga elektron akan kembali ketinggian energi dasar sambil mengeluarkan energi dalam bentuk radiasi (Puspitanigrum, 2013). Sampel yang akan dianalisis dengan metode SSA harus diubah kedalam bentuk uap atom. Proses pengubahan ini disebut dengan

atomisasi, yaitu sampel akan diuapkan dan didekomposisi untuk membentuk atom dalam bentuk uap (Basset dkk., 1994). Menurut Suryati, dkk. (2016) panjang gelombang yang digunakan untuk analisis logam Pb(II) dengan menggunakan metode AAS adalah 283,3 nm, sedangkan untuk analisa logam Cu(II) digunakan panjang gelombang yaitu 324,8 nm (Puriyandari dan Laksono, 2019).

2.13 Kerangka Pikir

Semakin meningkatnya industri dan aktivitas manusia saat ini mengakibatkan banyaknya limbah yang dibuang ke lingkungan. Salah satu industri yang berkembang saat ini adalah industri sablon. Limbah cair yang dihasilkan dari produksi sablon merupakan limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) yang dapat menimbulkan pencemaran. Karakteristik air limbah cair sablon mengandung beberapa ion logam yang dapat memberikan dampak negatif bagi lingkungan dan manusia. Ion logam yang terkandung limbah cair industri sablon adalah ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} .

Pengolahan limbah cair percetakan sablon saat ini masih kurang dilakukan oleh masyarakat. Limbah cair yang dihasilkan dalam proses produksi, umumnya langsung dibuang ke lingkungan tanpa diolah terlebih dahulu. Oleh karena itu, untuk mengurangi dampak dari pencemaran oleh limbah cair usaha sablon maka diperlukan pengolahan terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan untuk menurunkan kadar ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} yaitu dengan metode adsorpsi. Adsorpsi adalah metode yang efektif dan ekonomis untuk remediasi ion logam dalam pengolahan limbah cair. Metode ini mudah dilakukan, sederhana dan memiliki efisiensi yang tinggi (Kumar dkk., 2019). Selain itu, adsorben yang digunakan dapat diperoleh dari limbah biomassa yang melimpah di alam. Eceng gondok merupakan biomassa yang berpotensi sebagai adsorben yang bersifat ramah lingkungan (Sagayo 2020).

Eceng gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart) Solms) merupakan tanaman gulma air yang pertumbuhannya sangat cepat dan ketersediaannya melimpah sepanjang tahun. Pertumbuhan eceng gondok di perairan dapat membawa dampak buruk bagi lingkungan yaitu kurangnya pemasukan cahaya dan oksigen, perubahan sifat kimia air, dan terjadi penurunan volume air melalui

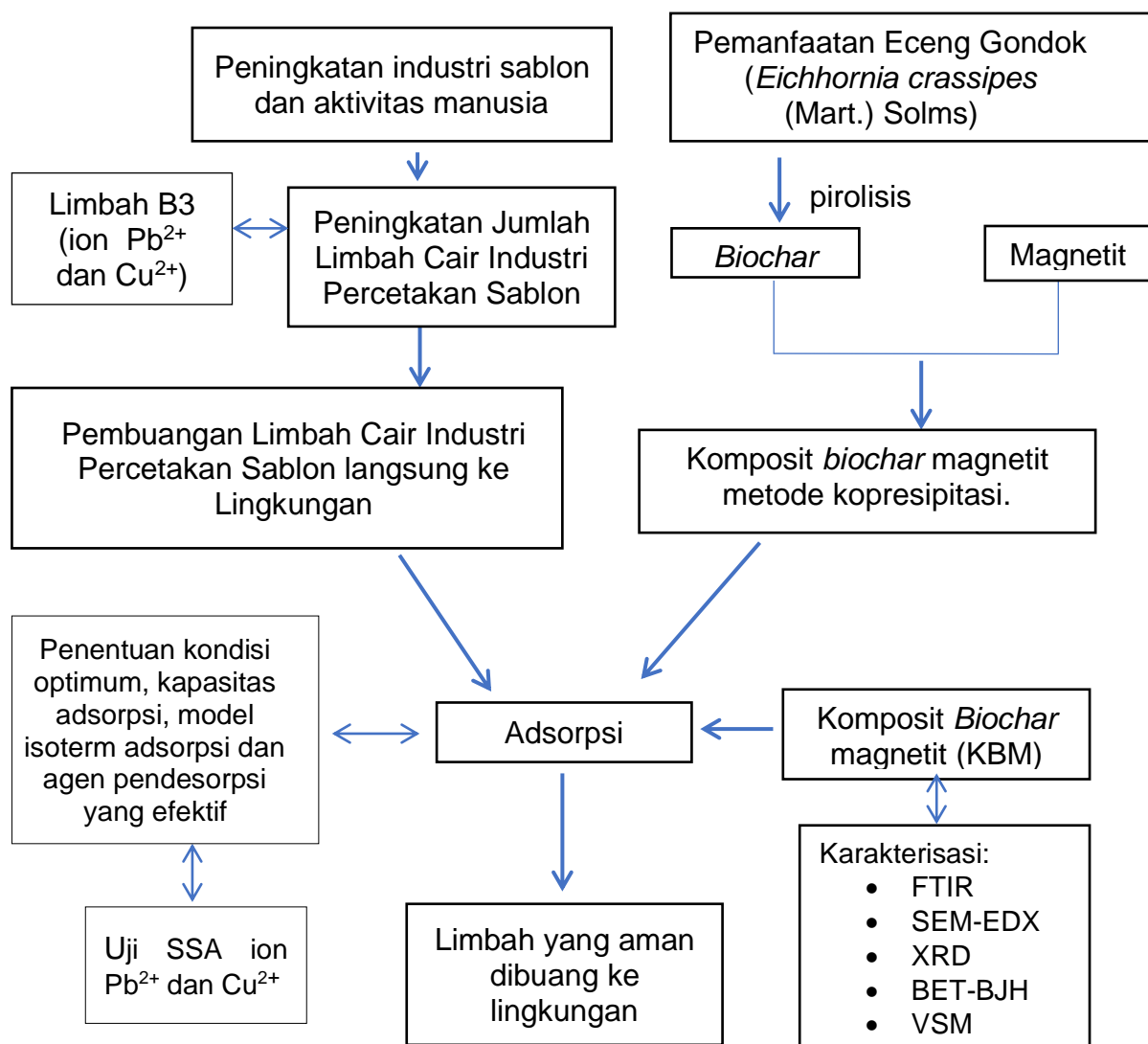
evapotranspirasi (Sharma dan Aggarwal, 2020). Selain itu, pemanfaatan eceng gondok belum sebanding dengan tingkat pertumbuhannya yang tinggi. Untuk mengurangi populasi pertumbuhan tanaman eceng gondok diperairan, sehingga perlu dilakukan diversifikasi produk berbasis biomassa eceng gondok. Pemanfaatan eceng gondok menjadi *biochar*, merupakan solusi alternatif diversifikasi biomassa eceng gondok yang dapat diaplikasikan sebagai adsorben untuk mengadsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} .

Biochar merupakan adsorben yang efektif digunakan untuk menyerap zat warna, logam berat, pestisida, herbisida dan polutan lainnya. *Biochar* memiliki kelebihan antara lain luas permukaan yang besar, porositas tinggi, kemampuan adsorpsi yang besar, biaya operasional yang rendah, dan tidak bersifat beracun (Kumi dkk., 2020). Kapasitas adsorpsi *biochar* dari eceng gondok meningkat lebih tinggi dari pada hanya menggunakan eceng gondok saja, hal ini dikarenakan adanya peningkatan luas permukaan pada *biochar* eceng gondok, sehingga kapasitas adsorpsi *biochar* eceng gondok lebih baik (^(b)Zhou dkk., 2020). Meskipun kemampuan penyerapan *biochar* sangat baik untuk ion logam, namun terdapat kekurangan yaitu pemisahan adsorben dengan larutan serta penyerapannya kurang efektif dan tidak ekonomis untuk volume limbah dalam skala besar. Untuk mengatasi kekurangan tersebut, maka *biochar* dikompositkan dengan material yang bersifat magnetik seperti magnetit

Penggunaan material magnetik seperti magnetit (Fe_3O_4) dipilih karena memiliki sifat magnet yang kuat dan ukuran partikel yang kecil. Selain itu, material magnetit (Fe_3O_4) merupakan oksida besi yang bersifat amfoter serta memiliki daya serap yang tinggi dapat digunakan dalam pengolahan adsorpsi zat polutan, bersifat hidrofilik, stabil, tidak beracun (^(b)Karunanayake dkk., 2019).

Sintesis magnetit pada penelitian ini, dilakukan dengan metode kopresipitasi. Kelebihan dari metode kopresipitasi yaitu sederhana, murah, dapat dilakukan pada suhu yang rendah, cepat, dan efisiensi tinggi (Mira dkk., 2018). Sintesis komposit *biochar* magnetit (KBM) menghasilkan material komposit yang mempunyai dua sifat yaitu sifat adsorpsi dan sifat magnet (Son dkk., 2018). Hasil sintesis KBM, kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan instrumen yaitu FTIR, SEM-EDS XRD, BET dan VSM. Material KBM kemudian diaplikasikan sebagai adsorben untuk ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} pada limbah cair industri sablon dengan menggunakan analisis instrument SSA.

Beberapa parameter yang berpengaruh pada proses adsorpsi seperti pH larutan, waktu kontak, konsentrasi diperlukan untuk mendapatkan kondisi optimum yang diperlukan untuk mendapatkan kapasitas adsorpsi masing-masing ion logam. Proses adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} pada limbah cair sablon dengan menggunakan KBM diawali dengan penentuan kondisi optimum adsorpsi yaitu pH, waktu kontak, dan konsentrasi pada adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} , serta kapasitas adsorpsi pada larutan ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} yang ditentukan dengan menggunakan isoterm adsorpsi Langmuir, Freundlich dan Sips. Selain itu, penentuan agen pendesorpsi yang efektif guna untuk menarik ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} dan untuk meregenerasi adsorben KBM dipelajari dalam penelitian ini. Aplikasi dari penelitian ini adalah adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} pada limbah cair sablon dengan menggunakan material KBM sebagai adsorben ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} . Skema kerangka pikir penelitian disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Kerangka Pikir Penelitian

2.14 Hipotesis

Hipotesis yang dirumuskan dalam penelitian ini adalah :

1. material KBM memiliki karakteristik material yang khas dengan luas permukaan spesifik dan porositas yang baik serta memiliki gugus-gugus fungsi yang dapat berinteraksi dengan ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} , serta memiliki sifat magnetik yang dapat memudahkan dalam pemisahan antara adsorben dan adsorbat,
2. adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} menggunakan adsorben KBM akan berlangsung maksimal pada kondisi optimum (pH, waktu kontak),
3. kinetika adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh KBM sesuai dengan kinetika orde dua semu.
4. kapasitas adsorpsi oleh adsorben KBM sesuai dengan model isotherm Langmuir.
5. kapasitas adsorpsi ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} yang tinggi oleh adsorben KBM, menunjukkan bahwa adsorben dapat diaplikasikan pada limbah cair industri percetakan sablon,
6. agen pendesorpsi HCl 0,1 M yang efektif untuk menarik kembali ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} dari adsorben KBM.