



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (WT43250)

**SINTESIS LIGNIN TERCROSSLINK ASAM SITRAT DAN
TERMODIFIKASI Fe_3O_4 @CMC DARI TONGKOL JAGUNG
UNTUK ADSORPSI LIMBAH *METHYLENE BLUE***

VELISTYA DEVINA FEBRIYANTI

NRP. 1022040094

DOSEN PEMBIMBING

NOVI EKA MAYANGSARI, S.T., M.T.

RIA RISMAWATI, S.Si., M.Si

PROGRAM STUDI TEKNIK PENGOLAHAN LIMBAH

JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

SURABAYA

2026



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (WT43250)

**SINTESIS LIGNIN TERCROSSLINK ASAM SITRAT DAN
TERMODIFIKASI $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@CMC}$ DARI TONGKOL JAGUNG
UNTUK ADSORPSI LIMBAH *METHYLENE BLUE***

Velistya Devina Febriyanti
NRP. 1022040094

DOSEN PEMBIMBING:
NOVI EKA MAYANGSARI, S.T., M.T.
RIA RISMAWATI, S.Si., M.Si

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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**SINTESIS LIGNIN TERCROSSLINK ASAM SITRAT DAN TERMODIFIKASI
Fe₃O₄@CMC DARI TONGKOL JAGUNG UNTUK ADSORPSI LIMBAH
METHYLENE BLUE**

Disusun Oleh :
Velistya Devina Febriyanti
1022040094

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

Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 08 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026

Menyetujui,

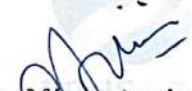
Dosen Penguji	NIDN/NUPTK	Tanda Tangan
1. Novi Eka Mayangsari, S.T., M.T.	(8449768669230313)	(..... )
2. Ria Rismawati, S.Si., M.Si.	(1933776677230192)	(..... )
3. Ulvi Pri Astuti, S.T., M.T.	(8360768669230313)	(..... )
4. Sekarsari Wibowo, S.T., M.T.	(6351777678230083)	(..... )

Dosen Pembimbing	NIDN/NUPTK	Tanda Tangan
1. Novi Eka Mayangsari, S.T., M.T.	(8449768669230313)	(..... )
2. Ria Rismawati, S.Si., M.Si.	(1933776677230192)	(..... )



Dr. Ir. Privo Agus Setiawan, S.T., M.T.
NIP. 197708192005011001

**Mengetahui
Koordinator Program Studi,**


Dr. Mirna Apriani, S.T., M.T.
NIP. 197804142005012002

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

 PPNS POLITEKNIK PERTAMANA SURABAYA	PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	No. : F.WD.I021 Date : 3 Nopember 2015 Rev. : 01 Page : 1 dari 1
---	---------------------------------	---

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Velistya Devina Febriyanti

NRP : 1022040094

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

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :
 Sintesis Lignin Tercrosslink Asam Sitrat dan Termodifikasi Fe_3O_4 @CMC dari
 Tongkol Jagung untuk Adsorpsi Limbah *Methylene Blue*

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

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

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 19 Agustus 2026
 Yang membuat pernyataan,



(Velistya Devina Febriyanti)
 NRP. 1022040094

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, serta hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Sintesis Lignin *Tercrosslink* Asam Sitrat dan Termodifikasi Fe_3O_4 @CMC dari Tongkol Jagung untuk Adsorpsi Limbah *Methylene Blue*”. Penyusunan Tugas Akhir ini dilakukan sebagai salah satu persyaratan untuk kelulusan pada Program Studi Teknik Pengolahan Limbah, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, arahan, dukungan, motivasi, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini kepada :

1. Bapak Eko dan Ibu Nia, selaku kedua orangtua yang selalu memberikan dukungan dan doa kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir.
2. Adik-adik penulis, Vioni dan Vadin yang secara tidak langsung mendorong penulis untuk terus belajar dan berkembang agar dapat menjadi sosok kakak yang dapat diandalkan serta memberikan kebanggaan bagi keluarga.
3. Keluarga besar penulis dan seseorang yang istimewa dalam kehidupan penulis yang selalu memberikan doa, dukungan, serta semangat sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
4. Bapak Rachmad Tri Soelitijono, S.T., M.T selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
5. Bapak Dr. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T selaku Ketua Jurusan Teknik Permesinan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
6. Ibu Dr. Mirna Apriani, S.T., M.T selaku Koordinator Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
7. Ibu Ayu Nindyapuspa, S.T., M.T., selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah.

8. Ibu Novi Eka Mayangsari S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, saran, doa dan masukan kepada penulis, sehingga pengerjaan Tugas Akhir dapat selesai tepat waktu.
9. Ibu Ria Rismawati, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, saran, doa dan masukan kepada penulis, sehingga pengerjaan Tugas Akhir dapat selesai tepat waktu.
10. Ibu Ulvi Pri Astuti S.T., M.T. selaku Ketua Sidang dan Dosen Penguji yang telah memberikan arahan, saran, kritik dan masukan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
11. Ibu Sekarsari Wibowo, S.T, M.T selaku dosen penguji yang telah memberikan arahan, saran, kritik dan masukan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
12. Ibu Tanti Utami Dewi, S.Si., M.Sc selaku Dosen Wali PL 22C yang telah memberikan arahan, dukungan, doa, serta motivasi kepada penulis selama masa perkuliahan hingga pelaksanaan dan penyusunan Tugas Akhir ini.
13. Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Teknik Pengolahan Limbah yang telah memberikan ilmu pengetahuan, bimbingan, arahan, masukan, doa, serta dukungan kepada penulis selama menempuh pendidikan hingga penyelesaian Tugas Akhir ini.
14. Teman-teman seperjuangan dan partner penelitian penulis yang senantiasa memberikan dukungan, motivasi, kerja sama, serta kebersamaan selama proses penelitian dan penyusunan Tugas Akhir hingga dapat terselesaikan dengan baik.
15. Keluarga besar Teknik Pengolahan Limbah Angkatan 2022 atau Ignescant yang telah menemani perjalanan penulis selama 4 tahun perkuliahan melalui kebersamaan, kerja sama, dukungan, dan semangat yang diberikan hingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
16. Semua pihak lain yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu. Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini

masih terdapat kekurangan dan jauh dari kata sempurna. Untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Semoga laporan ini dapat menambah ilmu, wawasan, pengetahuan, dan dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Surabaya, 1 Juli 2026

Penulis

SINTESIS LIGNIN *TERCROSSLINK* ASAM SITRAT DAN TERMODIFIKASI Fe_3O_4 @CMC DARI TONGKOL JAGUNG UNTUK ADSORPSI LIMBAH *METHYLENE BLUE*

Velistya Devina Febriyanti

ABSTRAK

Limbah cair industri tekstil mengandung zat warna sintesis seperti *methylene blue* (MB) yang bersifat toksik, sulit terdegradasi dan berpotensi mencemari lingkungan sehingga diperlukan metode pengolahan yang efektif. Penelitian ini bertujuan mensintesis adsorben magnetik berbasis lignin tongkol jagung yang dimodifikasi menggunakan asam sitrat sebagai *crosslinker* dan dikombinasikan dengan Fe_3O_4 @CMC, serta menganalisis karakteristik dan kinerjanya dalam penyisihan *methylene blue*. Proses adsorpsi dilakukan secara *batch* dengan variasi konsentrasi awal *methylene blue*, waktu kontak, dosis adsorben, pH, dan suhu. Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan keberadaan gugus fungsi $-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}-\text{O}-\text{C}$, dan $\text{Fe}-\text{O}$ yang mengindikasikan keberhasilan sintesis adsorben, karakterisasi XRD dan SEM mendukung terbentuknya struktur adsorben. Keberhasilan ini ditunjukkan dengan hasil analisis BET memiliki luas permukaan sebesar $14.172 \text{ m}^2/\text{g}$. Kondisi optimum adsorpsi diperoleh pada konsentrasi awal *methylene blue* 25 ppm, waktu kontak 40 menit, dosis adsorben 0,03 g/L, pH 10 dan suhu 25°C , efisiensi removal sebesar 86,9%. Analisis isoterm mengikuti model *Freundlich*, sedangkan kinetika adsorpsi mengikuti model pseudo-orde dua. Analisis statistik menunjukkan variasi perlakuan berpengaruh signifikan terhadap efisiensi penyisihan *methylene blue*.

Kata kunci : Adsorpsi, CMC, Fe_3O_4 , *Methylene Blue*, Tongkol Jagung.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

SYNTHESIS OF CITRIC ACID CROSSLINKED LIGNIN AND MODIFIED Fe_3O_4 @CMC FROM CORN COB FOR ADSORPTION METHYLENE BLUE WASTE

Velistya Devina Febriyanti

ABSTRACT

Textile industry wastewater contains synthetic dyes such as methylene blue (MB), which are toxic, resistant to biodegradation, and potentially harmful to aquatic environments, thus requiring effective treatment methods. This study aimed to synthesize a magnetic adsorbent based on corn cob lignin modified with citric acid as a crosslinking agent and combined with Fe_3O_4 @CMC, as well as to evaluate its characteristics and adsorption performance for methylene blue removal. Batch adsorption experiments were conducted by varying the initial methylene blue concentration, contact time, adsorbent dosage, pH, and temperature. FTIR analysis confirmed the presence of hydroxyl ($-OH$), carbonyl ($C=O$), ether ($C-O-C$), and $Fe-O$ functional groups, indicating successful adsorbent synthesis. BET analysis revealed a specific surface area of $14.172\text{ m}^2/\text{g}$. The optimum adsorption conditions were obtained at an initial methylene blue concentration of 25 ppm, a contact time of 40 min, an adsorbent dosage of 0.03 g/L, pH 10, and 25°C , achieving a removal efficiency of 86.9%. The adsorption followed the Freundlich isotherm and pseudo-second-order kinetic models. Statistical analysis confirmed that the investigated adsorption parameters significantly affected methylene blue removal efficiency.

Keywords: Adsorption, CMC, Corn Cob, Fe_3O_4 , Methylene Blue.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR GAMBAR.....	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Tongkol Jagung	5
2.1.1 Lignin	6
2.1.2 Selulosa	7
2.2 <i>Methylene Blue</i>	7
2.3 Magnetit Fe_3O_4	9
2. 4 CMC (<i>Carboxymethyl Cellulose</i>)	9
2.5 <i>Crosslinker</i>	10
2.5.1 Asam Sitrat	10

2.6 Adsorpsi	11
2.6.1 Kapasitas Adsorpsi	12
2.6.2 Isoterm Adsorpsi	13
2.6.3 Kinetika Adsorpsi	14
2.7 Penelitian Terdahulu	16
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Kerangka Penelitian.....	19
3.2 Identifikasi Masalah.....	22
3.3 Perumusan Masalah	22
3.4 Studi Literatur.....	22
3.5 Pengumpulan Data.....	22
3.5.1 Data Primer	22
3.5.2 Data Sekunder	23
3.6 Penentuan Tempat dan Waktu Penelitian	23
3.6.1 Penentuan Tempat.....	23
3.6.3 Penentuan Waktu	23
3.7 Penentuan Variabel dan Parameter Penelitian	23
3.7.1 Variabel Bebas	24
3.7.2 Variabel Terikat	24
3.7.3 Variabel Kontrol.....	24
3.8 Populasi dan sampel penelitian	24
3.8.1 Populasi Penelitian.....	24
3.8.2 Sampel Penelitian.....	25
3.9 Persiapan Alat dan Bahan	27
3.9.1 Alat.....	27
3.9.2 Bahan	28

3.10 Prosedur Penelitian.....	29
3.10.1 Proses Ekstraksi Lignin-Selulosa Tongkol Jagung.....	29
3.10.2 Proses Pembuatan <i>Crosslinker</i> Lignin dengan Asam Sitrat	30
3.10.3 Proses Pembuatan <i>Carboxymethyl Celulose</i> (CMC) dari <i>Celulose</i> Tongkol Jagung.....	30
3.10.4 Pelapisan Magnetik Besi Oksida (Fe_3O_4) dengan <i>Carboxymethyl</i> <i>Celulose</i> (CMC).....	31
3.10.5 Tahap Penggabungan Sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}$ -Lignin-CA.....	31
3.10.6 Pembuatan Limbah <i>Artificial Methylene Blue</i>	31
3.10.7 Pembuatan Kurva Kalibrasi Limbah Artificial Zat Warna <i>Methylene</i> <i>Blue</i>	32
3.10.8 Pengujian <i>pH Point of Zero Charege</i> (<i>pHpzc</i>)	32
3.10.9 Pengujian Adsorpsi Adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ Terhadap Limbah Artifisial Zat Warna	33
3.10.10 Pengujian <i>Reusability</i> Adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ Terhadap Limbah Artifisial Zat Warna <i>Methylene Blue</i>	35
3.11 Pengujian Karakteristik	36
3.11.1 Pengujian Spektro UV – Vis.....	36
3.11.2 Pengujian FTIR.....	36
3.11.3 Pengujian XRD	36
3.11.4 Pengujian SEM	36
3.11.5 Pengujian VSM.....	37
3.11.6 Pengujian BET	37
3.12 Menganalisis Data Hasil Penelitian dan Pembahasan	37
3.12.1 Menganalisis Model Isoterm Adsorpsi.....	38
3.12.2 Menganalisis Kinetika Adsorpsi.....	38
3.12.3 Menganalisis Data Uji Statistika	38

3.13 Menarik Kesimpulan.....	40
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Karakteristik Bahan dan Adsorben	41
4.1.1 Analisis Uji <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	41
4.1.2 Analisis Uji <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	44
4.1.3 Analisis Uji <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	46
4.1.4 Analisis Uji <i>Brauner Emmet and Teller</i> (BET)	47
4.1.5 Analisis Uji <i>Vibrating Sample Magnetometer</i> (VSM).....	48
4.2 Analisa Uji <i>Point Of Zero Charge</i> (pHpzc)	49
4.3 Pengaruh Variasi Terhadap Dekolorisasi Zat Warna <i>Methylene Blue</i>	50
4.3.1 Pengaruh Konsentrasi Awal Zat Warna <i>Methylene Blue</i>	50
4.3.2 Pengaruh Waktu Kontak Zat Warna <i>Methylene Blue</i>	52
4.3.3 Pengaruh Dosis Zat Warna <i>Methylene Blue</i>	53
4.3.4 Pengaruh pH Zat Warna <i>Methylene Blue</i>	55
4.3.5 Pengaruh Suhu Zat Warna <i>Methylene Blue</i>	56
4.4 Penggunaan Ulang Adsorben Fe ₃ O ₄ @CMC@Lignin-CA.....	57
4.5 Model Isoterm Adsorpsi	58
4.6 Kinetika Adsorpsi	59
4.7 Uji Statistika	61
4.7.1 Uji Normalitas	61
4.7.2 Uji Homogenitas	62
4.7.3 Uji NonParametik <i>Kruskal–Wallis</i>	63
4.7.4 Uji <i>One Way ANOVA</i>	64
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	65
5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran	65

DAFTAR PUSTAKA.....	66
LAMPIRAN A PERHITUNGAN PEMBUATAN BAHAN KIMIA.....	73
LAMPIRAN B PENGUJIAN KARAKTERISASI.....	80
LAMPIRAN C DOKUMENTASI PELAKSANAAN PENELITIAN.....	88
LAMPIRAN D DATA DAN PERHITUNGAN.....	103
BIODATA PENULIS.....	119

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu	16
Tabel 3.1 Sampel Pengujian Karakteristik Adsorben	25
Tabel 3.2 Sampel Pengujian Variasi Konsentrasi Awal	25
Tabel 3.3 Sampel Pengujian Variasi Waktu Kontak.....	26
Tabel 3.4 Sampel Pengujian Variasi Dosis	26
Tabel 3.5 Sampel Pengujian Variasi pH	27
Tabel 3.6 Sampel Pengujian Variasi Suhu	27
Tabel 4.1 Gugus Fungsi Lignin, CMC, Fe ₃ O ₄ @CMC@Lignin-CA.....	42
Tabel 4.2 Hasil Pengujian BET.....	48
Tabel 4.3 Data Hasil <i>Reusability</i>	58
Tabel 4.4 Studi Isoterm Adsorpsi.....	59
Tabel 4.5 Studi Kinetika Adsorpsi	60
Tabel 4.6 Hasil Uji Normalitas	62
Tabel 4.7 Hasil Uji Homogenitas Metode <i>Levene's Test</i>	62
Tabel 4.8 Hasil Uji NonParametrik Metode <i>Kruskal-Wallis</i>	63
Tabel 4.9 Hasil Uji <i>One Way ANOVA</i>	64

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tongkol Jagung	5
Gambar 2.2 Struktur Lignin	6
Gambar 2.3 Struktur Selulosa	7
Gambar 2.4 Struktur molekul <i>methylene blue</i>	8
Gambar 2.5 Senyawa Magnetit	9
Gambar 2.6 Struktur Kimia Asam Sitrat.....	11
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	21
Gambar 4.1 Spektra FTIR Lignin, CMC, Fe ₃ O ₄ @CMC@Lignin-CA	41
Gambar 4.2 SEM Fe ₃ O ₄ @CMC@Lignin-CA.....	45
Gambar 4.3 Grafik Pola Difraksi XRD.....	46
Gambar 4.4 Grafik Hasil Uji pH _{pzc}	49
Gambar 4.5 Grafik Hubungan Konsentrasi Adsorben dengan Efisiensi Penyerapan dan Kapasitas Adsorpsi	51
Gambar 4. 6 Grafik Hubungan Waktu Kontak dengan Efisiensi Penyerapan dan Kapasitas Adsorpsi.....	52
Gambar 4. 7 Grafik Hubungan Dosis Adsorben dengan Efisiensi Penyerapan dan Kapasitas Adsorpsi.....	54
Gambar 4.8 Grafik Hubungan pH dengan Efisiensi Penyerapan dan Kapasitas Adsorpsi	55
Gambar 4. 9 Grafik Hubungan Suhu dengan Efisiensi Penyerapan dan Kapasitas Adsorpsi	56
Gambar 4.10 Grafik Isoterm Adsorpsi (a) <i>Langmuir</i> dan (b) <i>Freundlich</i>	59
Gambar 4.11 Grafik Kinetika Adsorpsi (a) Pseudo – Orde Nol; (b) Pseudo – Orde Satu, Pseudo – Orde Dua.....	60

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Limbah cair yang dihasilkan oleh industri tekstil mengandung berbagai zat berbahaya, seperti senyawa organik, partikel padat terlarut, fenol, pewarna buatan, serta logam beracun seperti kromium, timbal, dan lainnya (Ristianingsih *et al.*, 2020). *Methylene blue* (MB) merupakan salah satu pewarna buatan yang digunakan di industri tekstil. Pewarna ini merupakan pewarna kationik golongan thiazine yang mengandung gugus benzena sehingga sulit terurai dan memerlukan waktu yang lama untuk proses dekomposisi (Ernawati *et al.*, 2021). Pencemaran lingkungan akibat penggunaan zat warna MB sangat berbahaya sehingga perlu dilakukan pengolahan.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengurangi kandungan zat warna MB dalam limbah cair, termasuk koagulasi-flokulasi (Jorge *et al.*, 2022), filtrasi membran (Benosmane *et al.*, 2022), biodegradasi (Baral *et al.*, 2025) dan adsorpsi (Sabzevar *et al.*, 2025). Adsorpsi dikenal sebagai teknik yang efektif dan ekonomis karena kemampuan adsorben untuk menarik dan menahan molekul polutan dengan permukaan aktifnya yang besar (Asiah *et al.*, 2022).

Salah satu pilihan adsorben berbasis limbah pertanian adalah tongkol jagung (*Zea mays L.*). Tongkol jagung mengandung komponen utama berupa selulosa, hemiselulosa, dan lignin sehingga berpotensi berinteraksi dengan molekul zat warna kationik melalui ikatan elektrostatik dan ikatan hidrogen (Deepti, 2016). Menurut (Wulandari & Lestari, 2024) tongkol jagung mengandung 23,74% lignin, 65,96% selulosa, dan 10,82% hemiselulosa.

Lignin dapat digunakan sebagai adsorben karena merupakan polimer aromatik kompleks yang mengandung berbagai gugus fungsional reaktif seperti hidroksil ($-OH$), eter ($-O-$), dan fenolik, yang berperan penting dalam proses adsorpsi zat warna seperti MB, melalui mekanisme pembentukan kompleks dan pertukaran ion, sehingga lignin efektif dalam mengikat zat warna sintetis dan

senyawa aromatik (Pourbaba *et al.*, 2024; Khan *et al.*, 2024). Namun, lignin hasil proses delignifikasi kerap menunjukkan kestabilan yang kurang baik dalam media air, misalnya mudah mengalami pelunakan, sebagian terlarut, atau mengalami penurunan kekuatan mekanik sehingga sulit diaplikasikan secara berulang (Camargos *et al.*, 2025). Berbagai pendekatan modifikasi kimia lignin telah dikembangkan untuk mengatasi kelemahan tersebut, antara lain oksidasi, aminasi, sulfonasi, dan terutama reaksi *crosslink* yang bertujuan meningkatkan stabilitas struktural sekaligus menambah atau mengekspos gugus fungsional aktif (Zhang *et al.*, 2022).

Modifikasi kimia melalui proses *crosslink* dapat meningkatkan luas permukaan efektif, jumlah gugus reaktif tersedia untuk interaksi adsorptif, serta ketahanan mekanik maupun kimia dari material lignin itu sendiri (Rothschild *et al.*, 2025). Senyawa *crosslink* yang umum dipakai termasuk *epichlorohydrin*, *glutaraldehyde*, dan asam organik. Asam organik yang digunakan sebagai senyawa *crosslink* pada modifikasi lignin salah satunya adalah asam sitrat, yang mampu membentuk ikatan ester yang stabil sehingga meningkatkan kekuatan struktural dan kestabilan material berbasis lignin (Watumlawar & Park, 2025), di mana penelitian terdahulu melaporkan bahwa lignin yang dimodifikasi menggunakan asam sitrat menunjukkan efisiensi adsorpsi hingga sekitar 78% terhadap kontaminan dalam larutan air (Sabzevar *et al.*, 2025).

Penambahan magnet Fe_3O_4 pada adsorben berperan sebagai solusi untuk mencegah oksidasi sekaligus meningkatkan stabilitas dan kapasitas adsorpsi (Manyangadze *et al.*, 2020). Penelitian Fe_3O_4 dan magnetik lainnya menunjukkan bahwa penambahan magnetit meningkatkan kemampuan adsorpsi MB sekaligus memudahkan pemisahan adsorben dari larutan setelah proses selesai (Rendo, 2021). Selain itu, penambahan *carboxymethyl cellulose* (CMC) yang dilapisi dengan Fe_3O_4 agar Fe_3O_4 lebih stabil/tidak akan mudah teroksidasi. Pelapisan CMC pada Fe_3O_4 dapat menghasilkan adsorben magnetik yang mudah dipisahkan menggunakan medan magnet eksternal serta meningkatkan stabilitas dan efisiensi adsorpsi material (Wang *et al.*, 2023).

Kombinasi modifikasi ini dapat memperbaiki struktur jaringan polimer biomassa sehingga lebih efektif dalam menangkap molekul pewarna seperti MB. Tongkol jagung sebagai limbah pertanian melimpah yang kaya lignoselulosa, terutama lignin dan selulosa, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan dasar adsorben. Modifikasi lignin dengan asam sitrat, penggabungan Fe_3O_4 sebagai magnetit, serta penggunaan CMC hasil modifikasi selulosa tongkol jagung sebagai pelapis magnetit diarahkan untuk meningkatkan kinerja adsorben dalam menurunkan konsentrasi zat warna *methylene blue* pada limbah cair artifisial. Penelitian ini bertujuan menghasilkan adsorben ramah lingkungan yang berpotensi diaplikasikan pada pengolahan limbah pewarna tekstil.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$?
2. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi adsorbat, variasi waktu kontak, variasi dosis, variasi pH dan suhu terhadap penurunan konsentrasi pewarna *methylene blue*?
3. Bagaimana isoterm dan kinetika adsorpsi *methylene blue* menggunakan adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$?
4. Bagaimana efektivitas *reusable* adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ yang digunakan dalam mengadsorpsi *methylene blue*?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dirumuskan, maka tujuan penelitian dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis karakteristik adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$
2. Menganalisis pengaruh konsentrasi adsorbat, waktu kontak, variasi dosis, variasi pH dan suhu terhadap penurunan konsentrasi pewarna *methylene blue*
3. Menganalisis isoterm dan kinetika adsorpsi *methylene blue* menggunakan adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$?

4. Menganalisis efektivitas *reusable* adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ yang digunakan dalam mengadsorpsi *methylene blue*?

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian di atas, manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagi Peneliti

Hasil penelitian ini dapat meningkatkan wawasan, pengetahuan yang telah diperoleh selama masa perkuliahan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dan peneliti dapat berkontribusi mengurangi limbah tongkol jagung.

2. Bagi Perguruan Tinggi

Memberikan data dan bahan kajian sebagai referensi dalam melakukan penelitian selanjutnya.

3. Bagi Masyarakat

- a. Memberikan wawasan terkait manfaat tongkol jagung bisa dijadikan sebagai adsorben.
- b. Dapat berkontribusi dalam mewujudkan program *Sustainable Development Goals (SDGs)*.

1.5 Batasan Masalah

Batasan ruang lingkup yang ditetapkan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Limbah yang digunakan pada penelitian ini yaitu limbah cair artifisial *methylene blue*.
2. Limbah tongkol jagung diperoleh dari PT. Prasad Seeds Pasuruan.
3. Penelitian dilakukan secara *batch* dalam skala laboratorium.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tongkol Jagung

Tongkol jagung adalah limbah pertanian yang tersusun atas komponen lignoselulosa, terutama selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Menurut (Wulandari & Lestari, 2024) tongkol jagung mengandung 23,74% lignin, 65,96% selulosa, dan 10,82% hemiselulosa sehingga sangat potensial dijadikan bahan bak adsorben. Tongkol jagung merupakan bagian sisa dari buah jagung yang tertinggal setelah bijinya dilepaskan atau dipipil, saat proses pemipilan dilakukan biji menjadi produk utama, sedangkan bagian tengahnya disebut tongkol jagung (Islamiyati, 2013). Limbah ini umumnya belum dimanfaatkan secara optimal dan sering dibuang atau dibakar, sehingga berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik.

Tongkol jagung umumnya hanya digunakan sebagai pakan ternak dan belum dimanfaatkan secara optimal sebagai produk bernilai tinggi. Padahal, tongkol jagung memiliki kandungan lignoselulosa yang cukup tinggi serta struktur berserat yang berpotensi dikembangkan menjadi bahan fungsional melalui proses pengolahan lebih lanjut. Kandungan selulosa dan lignin yang terdapat di dalamnya memungkinkan tongkol jagung dimanfaatkan sebagai bahan baku biomaterial, seperti adsorben, karbon aktif, maupun komposit berbasis polimer alami. Berikut merupakan tongkol jagung yang terdapat pada Gambar 2.1

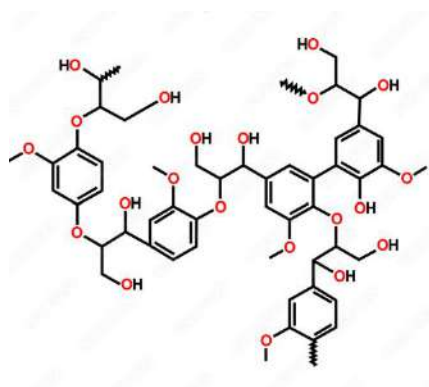


Gambar 2.1 Tongkol Jagung

2.1.1 Lignin

Lignin adalah bagian terbesar dari selulosa. Peran utama lignin adalah membentuk lapisan di antara serat yang berfungsi sebagai pengikat antar serat selulosa dalam kayu maupun non kayu (Khadafi *et al.*, 2022). Lignin adalah polimer aromatik yang kompleks dan heterogen yang terbentuk dari monomer fenilpropana (seperti koniferyl, sinapyl, dan p-coumaryl alkohol) yang saling berikatan secara kovalen. Lignin berfungsi sebagai perekat antar serat selulosa dan hemiselulosa dalam dinding sel tanaman serta memberikan kekakuan mekanik, ketahanan terhadap degradasi, dan sifat hidrofobik pada jaringan tanaman.

Kemampuan lignin sebagai adsorben dikarenakan keberadaan gugus fungsional yang dapat berinteraksi dengan ion logam (Yuris., 2014). Secara keseluruhan, lignin adalah biomassa aromatik kompleks yang kaya gugus fungsional sehingga berpotensi dikembangkan sebagai material adsorben untuk mengatasi pencemaran air oleh zat warna sintetis, ion logam, dan senyawa organik berbahaya. Pemanfaatan lignin tidak hanya mengurangi limbah biomassa pertanian atau industri pulp, tetapi juga menghasilkan material bernilai tambah yang bersifat ramah lingkungan dan ekonomis. Berikut merupakan struktur lignin yang terdapat pada Gambar 2.2



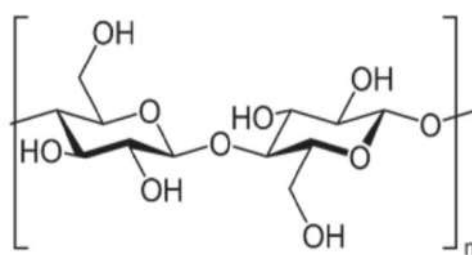
Gambar 2.2 Struktur Lignin

(Sumber : Intech)

2.1.2 Selulosa

Selulosa adalah polisakarida dengan rumus umum $(C_6H_{10}O_5)_n$ yang tersusun dalam bentuk mikrofibril melalui ikatan hidrogen baik antar-molekul maupun intra-molekul. Senyawa ini merupakan komponen struktural utama pada jaringan tumbuhan berkayu. Meskipun banyak ditemukan pada tanaman keras, selulosa sebenarnya hadir pada hampir semua jenis tanaman, mulai dari tanaman semusim, perdu, tanaman merambat, hingga organisme sederhana seperti jamur, ganggang, dan lumut (Khadafi *et al.*, 2022).

Selulosa juga merupakan bahan dasar dalam pembuatan kertas. Serat selulosa memiliki kekuatan dan durabilitas yang tinggi. Apabila dibasahi dengan air, menunjukkan pengembangan saat jenuh dan juga higroskopis, bahkan dalam keadaan basah, serat selulosa alami tidak kehilangan kekuatannya. Material yang umum dimanfaatkan sebagai adsorben meliputi karbon aktif, zeolit, karbon nanotube, serta berbagai jenis polimer. Di samping itu, selulosa juga banyak digunakan sebagai adsorben. Saat ini, selulosa semakin mendapat perhatian luas karena bersifat ramah lingkungan dan tersedia dalam jumlah melimpah. Berikut merupakan struktur selulosa yang terdapat pada Gambar 2.3



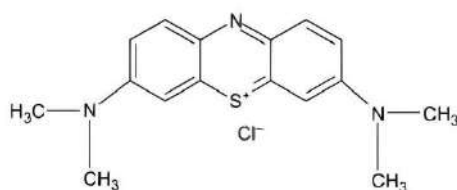
Gambar 2.3 Struktur Selulosa
(Sumber : ThoughtCo)

2.2 Methylene Blue

Methylene blue adalah pewarna yang bersifat kationik, mudah larut dalam air, dan banyak digunakan dalam bidang kimia, biologi, medis, serta industri tekstil. Meski tidak tergolong sangat beracun bagi manusia, senyawa ini dapat menimbulkan iritasi pada mata dan kulit, serta memunculkan efek sistemik seperti

perubahan pada darah. Pada tingkat paparan tertentu, *methylene blue* juga bisa menyebabkan gejala seperti mual, muntah, diare, pusing, keringat berlebih, hingga gangguan pada saluran pencernaan (Sen *et al.*, 2011). Selain dampak tersebut, keberadaan *methylene blue* di perairan juga dapat menimbulkan masalah lain, warna pekat yang dihasilkan akan mengurangi kemampuan cahaya matahari menembus ke dalam air, sehingga proses fotosintesis tumbuhan air menjadi terganggu. Kondisi ini pada akhirnya dapat menurunkan kadar oksigen terlarut dan mengacaukan keseimbangan ekosistem perairan. Karena *methylene blue* dapat menimbulkan dampak lingkungan dan kesehatan yang cukup berbahaya, keberadaannya di air limbah harus dikendalikan dan tidak boleh melebihi batas yang ditetapkan. Pemerintah melalui Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. Kep-51/MENLH/10/1995 menetapkan bahwa konsentrasi *methylene blue* dalam limbah cair hanya diperbolehkan berada pada kisaran 5–10 mg/L untuk menjaga keamanan lingkungan (Hadayani *et al.*, 2015).

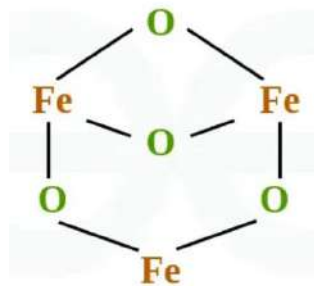
Methylene blue (MB) adalah senyawa kimia yang memiliki rumus molekul $C_{16}H_{18}N_3SCl$ dan dikenal dengan nama kimia 3,7-bis (dimetilamino)-*phenazathionium chloride* atau *tetramethylthionine chloride*. Pewarna ini termasuk ke dalam golongan pewarna tiazina kationik. *Methylene blue* mempunyai massa molekul sebesar 319,86 g/mol, titik leleh sekitar $180^{\circ}C$, serta kelarutan dalam air mencapai 35,5 g/L. Berikut merupakan Struktur molekul *methylene blue* yang terdapat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Struktur molekul *methylene blue*
(Sumber : Testbook)

2.3 Magnetit Fe₃O₄

Magnetit adalah salah satu senyawa besi oksida yang sangat ekonomis. Magnetik Fe₃O₄ merupakan salah satu kelompok material oksida besi (*iron oxide*), dengan rumus molekul Fe₃O₄ yang dapat dituliskan (Fe²⁺)(Fe³⁺)₂O₄. Magnetit memiliki struktur spinel terbalik, yaitu mengandung kation besi dalam keadaan oksidasi campuran dengan formula Fe³⁺(Fe²⁺Fe³⁺)O₄ (Rahmayanti *et al.*, 2015). Ciri-ciri magnetit meliputi warna hitam, sifat non-toksik, biokompatibilitas, medan koersivitas yang tinggi, serta sifat superparamagnetis ketika dalam ukuran nanopartikel. magnetit merupakan bahan supermagnetik berwarna hitam, biokompatibel dan tidak beracun. Magnetit besi oksida Fe₃O memiliki sifat magnet yang lebih kuat dibandingkan dengan mineral oksida besi lainnya (Indrayana, 2019). Berikut merupakan struktur molekul senyawa magnetit yang terdapat pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Senyawa Magnetit
(Sumber : Byjus's)

2. 4 CMC (*Carboxymethyl Cellulose*)

Carboxymethyl cellulose (CMC) merupakan salah satu senyawa turunan selulosa yang diperoleh melalui reaksi karboksimetilasi. Senyawa ini termasuk polimer eter linear yang mengandung gugus karboksimetil (–CH₂–COOH) sebagai substituen yang menggantikan sebagian gugus hidroksil pada unit monomer glukopiranososa. CMC juga diklasifikasikan sebagai polielektrolit anionik yang memiliki kelarutan tinggi dalam air. Keberadaan gugus hidroksil dan karboksil dalam jumlah besar memberikan kontribusi penting terhadap reaktivitas kimia dan kemampuan interaksi CMC dengan berbagai senyawa lain (C. Liu *et al.*, 2018).

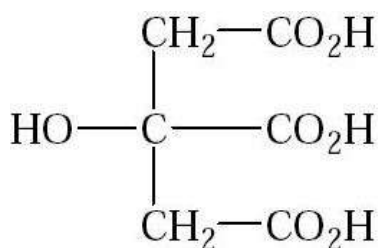
Struktur dasar CMC tersusun dari rantai β -(1 $\rightarrow$ 4)-D-glukopiranos, yang juga menjadi kerangka utama pada selulosa (Eriningsih *et al.*, 2011). Pembuatan *Carboxymethyl cellulose* (CMC) pada umumnya dilakukan melalui beberapa tahap utama, meliputi proses delignifikasi untuk menghilangkan kandungan lignin, tahap alkalisasi dengan menggunakan larutan basa kuat, kemudian dilanjutkan dengan reaksi karboksimetilasi melalui penambahan agen karboksimetil. Setelah reaksi berlangsung, dilakukan tahapan pemurnian yang mencakup proses netralisasi, penyaringan, dan pengeringan hingga diperoleh CMC dengan tingkat kemurnian yang tinggi (Eriningsih *et al.*, 2011).

2.5 Crosslinker

Crosslinker adalah zat aditif yang berperan mengaitkan dua atau lebih rantai polimer melalui pembentukan ikatan kovalen maupun ionik. Dalam bidang kimia polimer, proses curing atau pembentukan ikatan silang menyebabkan peningkatan massa molekul yang berdampak pada perubahan sifat mekanik serta viskositas suatu material. Istilah curing dan *crosslinking* kerap digunakan secara saling menggantikan, khususnya ketika proses tersebut melibatkan polimer sebagai komponen utama. Secara umum, *crosslinker* memiliki tiga atau lebih gugus fungsional aktif, sehingga dapat bereaksi dengan lebih dari dua monomer atau prepolimer dan menghasilkan struktur jaringan polimer yang saling terikat (Malgorzata & Anna, 2019).

2.5.1 Asam Sitrat

Asam sitrat merupakan salah satu asam organik yang mempunyai banyak manfaat mulai dari bidang makanan, minuman maupun farmasi. Asam sitrat banyak tersebar dan berasal dari dalam tumbuhan maupun hewan serta dapat disintesis dengan cara kimiawi maupun biokonversi. Senyawa ini bersifat mudah larut dalam air, tidak beracun, dan digolongkan sebagai bahan yang relatif aman, sehingga menarik digunakan dalam modifikasi polimer dan pembuatan adsorben ramah lingkungan. Berikut merupakan struktur kimia asam sitrat yang terdapat pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Struktur Kimia Asam Sitrat
(Sumber : Master Pendidikan)

Asam sitrat sebagai *crosslinking* agent dapat menghasilkan kopolimer yang memiliki struktur dan sifat yang lebih baik, memiliki ketahanan yang baik terhadap air, dan dapat menaikkan sifat mekanik (Suprpto *et al.*, 2022). Dalam modifikasi polimer berbasis polisakarida (pati, selulosa, CMC, gom), asam sitrat banyak dimanfaatkan sebagai *crosslinker* untuk meningkatkan kestabilan termal, ketahanan air, dan kekuatan mekanik bahan. Gugus karboksilat pada asam sitrat dapat bereaksi dengan gugus hidroksil pada rantai polimer membentuk ikatan ester, sehingga terbentuk jembatan silang yang menghubungkan dua atau lebih rantai polimer.

2.6 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan suatu proses pemisahan di mana molekul atau ion dari fase cair atau gas menempel pada permukaan suatu material padat yang disebut adsorben. Zat yang teradsorpsi disebut sebagai adsorbat. Proses adsorpsi pada adsorben umumnya berlangsung di dalam pori-pori berukuran kecil, sedangkan pori-pori yang lebih besar berfungsi sebagai jalur masuk adsorbat dari permukaan luar menuju pori-pori internal. Selektivitas adsorpsi menunjukkan kemampuan suatu adsorben dalam menyerap jenis adsorbat tertentu. Pada penelitian ini, selektivitas adsorpsi ditinjau terhadap jenis zat warna, yaitu *methylene blue*. Tingkat selektivitas adsorpsi dinyatakan dalam bentuk rasio adsorpsi, yang diperoleh dengan membandingkan jumlah adsorbat yang teradsorpsi dalam satuan mol sehingga menghasilkan nilai yang sederhana dan mudah dianalisis (Mukhlishin *et al.*, 2020).

Selektivitas warna dalam proses adsorpsi merujuk pada kemampuan material adsorben, seperti karbon aktif, dalam menyerap dan menghilangkan zat warna atau pigmen tertentu dari larutan. Adsorben yang memiliki selektivitas warna umumnya mempunyai gugus atau ikatan kimia spesifik yang mampu berinteraksi lebih kuat dengan jenis pewarna tertentu, sehingga efektivitas penyisihan terhadap zat warna tersebut menjadi lebih tinggi dibandingkan pewarna lainnya. Selain itu, selektivitas warna juga dipengaruhi oleh karakteristik adsorben, seperti ukuran pori dan struktur permukaan, serta kondisi lingkungan adsorpsi, termasuk pH larutan dan jenis interaksi antara adsorben dan adsorbat. Dalam penerapan praktis, selektivitas warna yang tinggi sangat dibutuhkan, terutama pada industri tekstil, industri pangan, dan proses pemurnian air, karena mampu membantu menghilangkan zat warna berbahaya dari bahan kimia maupun air limbah, sehingga meningkatkan kualitas dan keamanan produk akhir (Mukhlisin *et al.*, 2020). Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi daya adsorpsi suatu bahan yaitu (Anggriani *et al.*, 2021) :

- a. Karakteristik fisik dan kimia adsorben, antara lain luas permukaan, ukuran pori, adsorpsi kimia dan sebagainya.
- b. Karakteristik kimia adsorbat, antara lain ukuran molekul, polaritas molekul, komposisi kimia dan sebagainya.
- c. Konsentrasi adsorbat dalam larutan.
- d. Karakteristik larutan, antara lain pH dan temperatur.
- e. Lama waktu adsorpsi.

2.6.1 Kapasitas Adsorpsi

Kapasitas adsorpsi merupakan hubungan kesetimbangan antara konsentrasi larutan pada fase cair dengan konsentrasi yang terikat pada partikel adsorben pada kondisi suhu tertentu. Suatu adsorben dikategorikan baik apabila memiliki kapasitas dan efisiensi adsorpsi yang tinggi. Kapasitas adsorpsi dan efisiensi adsorpsi dapat dihitung melalui Persamaan 2.1 dan Persamaan 2.2 (Anggriani *et al.*, 2021).

$$Q = \left(\frac{C_0 - C_a}{m} \right) \times V \quad (2.1)$$

$$\%E = \left(\frac{C_0 - C_a}{C_0} \right) \times 100\% \quad (2.2)$$

Dimana :

- Q = Kapasitas adsorpsi per satuan massa adsorben (mg/g)
- C₀ = Konsentrasi awal larutan (mg/L atau ppm)
- C_a = Konsentrasi akhir larutan (mg/L atau ppm)
- V = Volume larutan (L)
- m = Massa adsorben yang digunakan (g)
- %E = Efisiensi adsorpsi

2.6.2 Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi pada kondisi suhu yang tetap. Dua model isoterm yang sering diterapkan ialah isoterm *Langmuir* dan isoterm *Freundlich* (Anggriani *et al.*, 2021).

a. Isoterm *Langmuir*

Model *Langmuir* digunakan untuk menggambarkan interaksi antara adsorben dan adsorbat. Persamaan dasarnya disajikan pada persamaan :

$$q_e = q_m \cdot KL \frac{C_e}{1 + KL \times C_e} \quad (2.3)$$

Persamaan linear dari model *Langmuir* dapat dilihat pada persamaan :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m \times KL} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.4)$$

Keterangan :

q_m = kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g)

KL = konstanta adsorpsi *Langmuir* (L/mg)

Nilai q_m dan KL diperoleh dari kemiringan dan titik potong grafik hubungan C_e/q_e terhadap C_e

b. Isoterm *Freundlich*

Hubungan kesetimbangan antara adsorbat dan adsorben dapat dianalisis menggunakan model *Freundlich*, yang dinyatakan pada persamaan :

$$q_e = K_f \times C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.5)$$

Keterangan :

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

C_e = konsentrasi zat terlarut dalam larutan setelah terjadi kesetimbangan adsorpsi

K_f dan n = kapasitas adsorpsi dan intensitas adsorpsi

Bentuk linear dari model *Freundlich* ditampilkan pada persamaan:

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.6)$$

Persamaan ini menunjukkan apabila mekanisme adsorpsi mengikuti model *Freundlich*, maka grafik hubungan antara $\log q_e$ dan $\log C_e$ akan menghasilkan garis lurus (Usgodaarachchi *et al.*, 2021).

2.6.3 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi merupakan proses penyerapan suatu zat oleh adsorben sebagai fungsi terhadap waktu. Efektivitas adsorben dalam menangkap adsorbat dapat dilihat dari laju adsorpsinya, yang ditentukan melalui konstanta laju (k) serta orde reaksi sesuai model kinetika yang digunakan. Model kinetika Pseudo-Orde Nol, Pseudo-Orde Satu, dan Pseudo-Orde Dua masing masing dinyatakan pada persamaan berikut :

a. Pseudo-Orde Nol :

$$q_t = q_e + K_0 \times t \quad (2.7)$$

b. Pseudo-Orde Satu :

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 \times t \quad (2.8)$$

c. Pseudo-Orde Dua :

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{K_2(qe)^2} + \frac{1}{qe} \times t \quad (2.9)$$

Keterangan :

qt = kapasitas adsorpsi waktu (mg/g)

qe = kapasitas adsorpsi setimbangan (mg/g)

t = waktu kontak adsorpsi (m)

Ko = konstanta adsorpsi Pseudo – Orde Nol (mg/g.menit)

Parameter pada model kinetika orde 0, orde 1, dan orde 2 masing-masing ditentukan melalui plot liner antara t dan qt, ln (qe – qt), serta $\frac{t}{qt}$. Model kinetika yang dianggap paling sesuai dengan data penelitian adalah model yang memiliki nilai R^2 tertinggi (Angraini *et al.*, 2016) (Medhi *et al.*, 2020) (Usgodaarachchi *et al.*, 2021)

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dan dapat digunakan sebagai referensi untuk melakukan penelitian selanjutnya. Berikut beberapa penelitian terdahulu yang menjadi referensi pada penelitian ini, terlampir pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Adsorben	Agen Ikatan Silang	Polutan	Hasil	Refrensi
1	CMC- Fe ₃ O ₄ -Chitosan-TiO ₂	-	Logam Hg(II)	Efisiensi removal 53%	(Kaharuddin <i>et al.</i> , 2024)
		-	Rhodamine B (Rh B)	Efisiensi removal 38%	
2	Fe ₃ O ₄ -biochar	-	<i>Methylene Blue</i> (MB)	Efisiensi removal 78,30%	(Lee <i>et al.</i> , 2024)
3	Lignin@ Fe ₃ O ₄	-	<i>Methylene Blue</i> (MB)	Efisiensi removal 74.1% ± 7.1%	(Petrie <i>et al.</i> , 2021)
4	Selulosa	-	<i>Methylene Blue</i> (MB)	Efsiensi Removal 98%	(Hamidi <i>et al.</i> , 2024)

No	Adsorben	Agen Ikatan Silang	Polutan	Hasil	Refrensi
5	Fe ₃ O ₄ @SiO ₂	-	<i>Methyl Orange</i>	Kapasitas adsorpsi 182,503 mg/g	(Li <i>et al.</i> , 2024)
6	β-CD-CA-MKL	<i>Citric acid</i> (CA)	<i>Methylene Blue</i> (MB)	Efisiensi removal 78%	(Sabzevar <i>et al.</i> , 2025)
	β-CD-CA-MKL	<i>Tartaric Acid</i> (TA)	<i>Methylene Blue</i> (MB)	Efisiensi removal 97%	
	β-CD-CA-MKL	<i>Malic acid</i> (MA)	<i>Methylene Blue</i> (MB)	Efisiensi removal 82%	

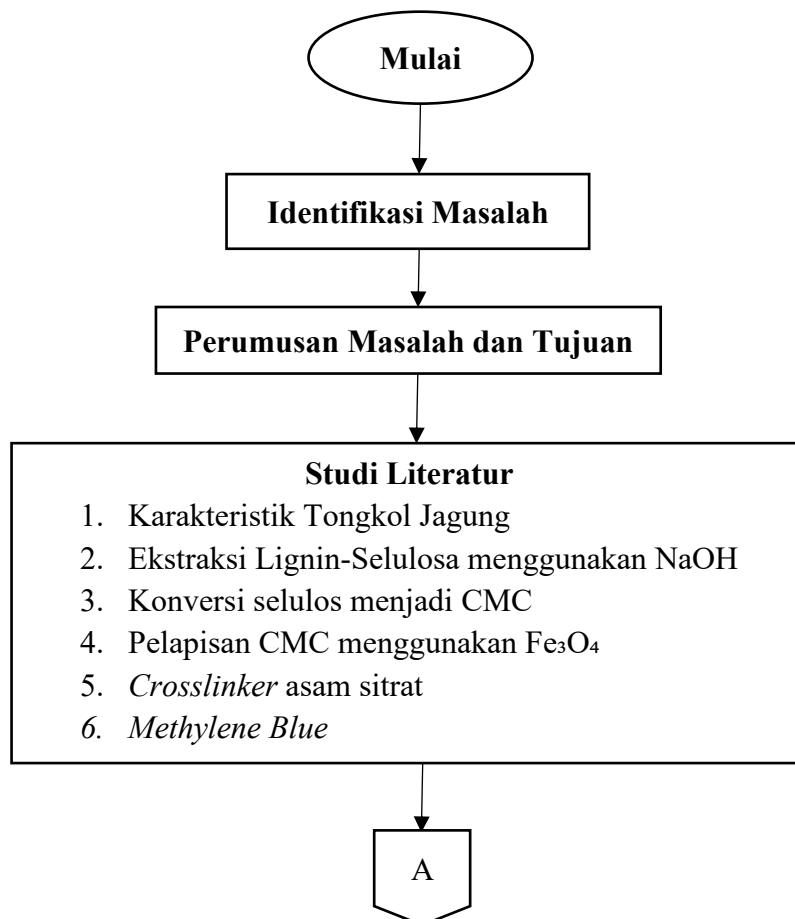
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

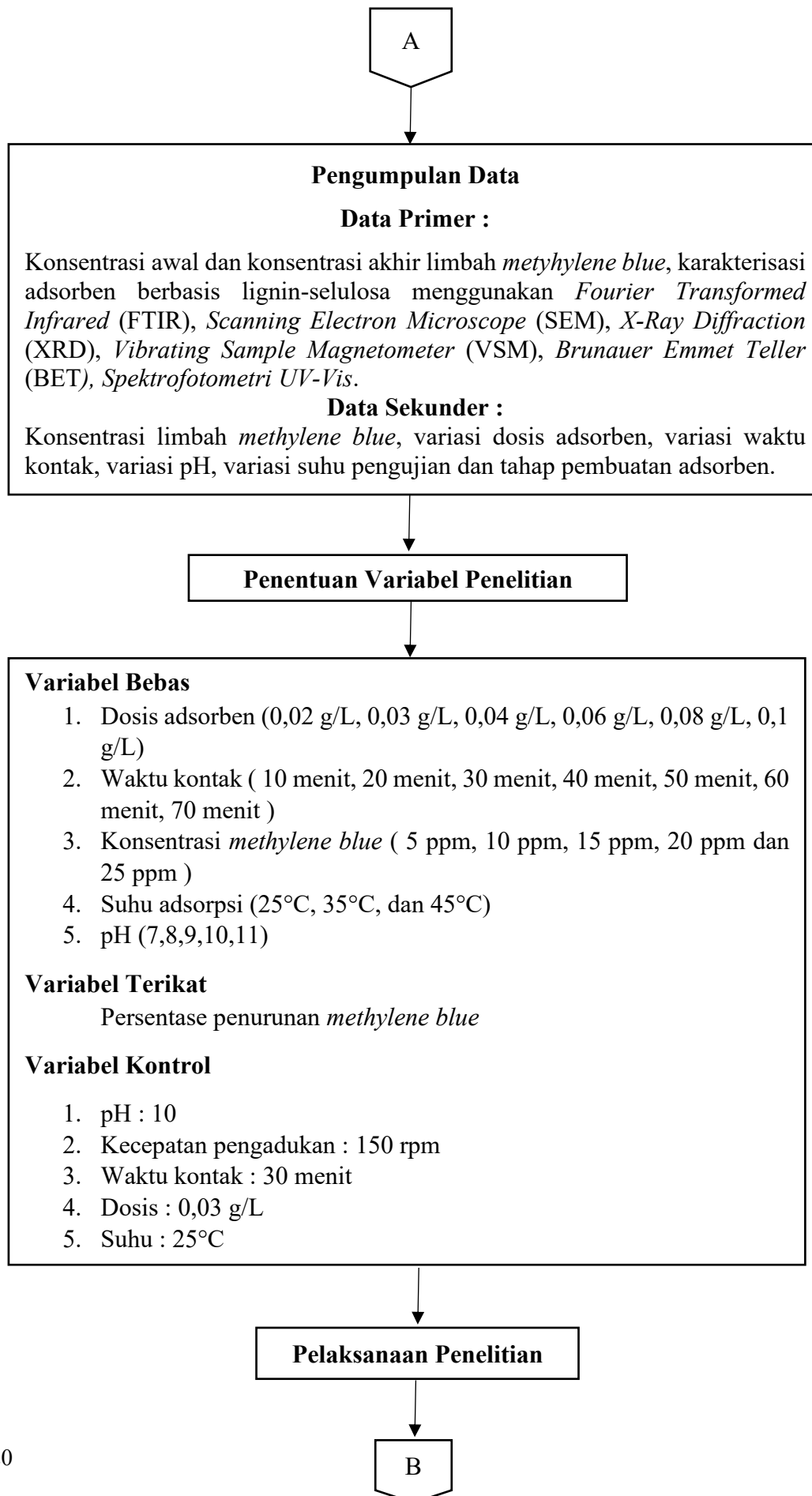
BAB 3

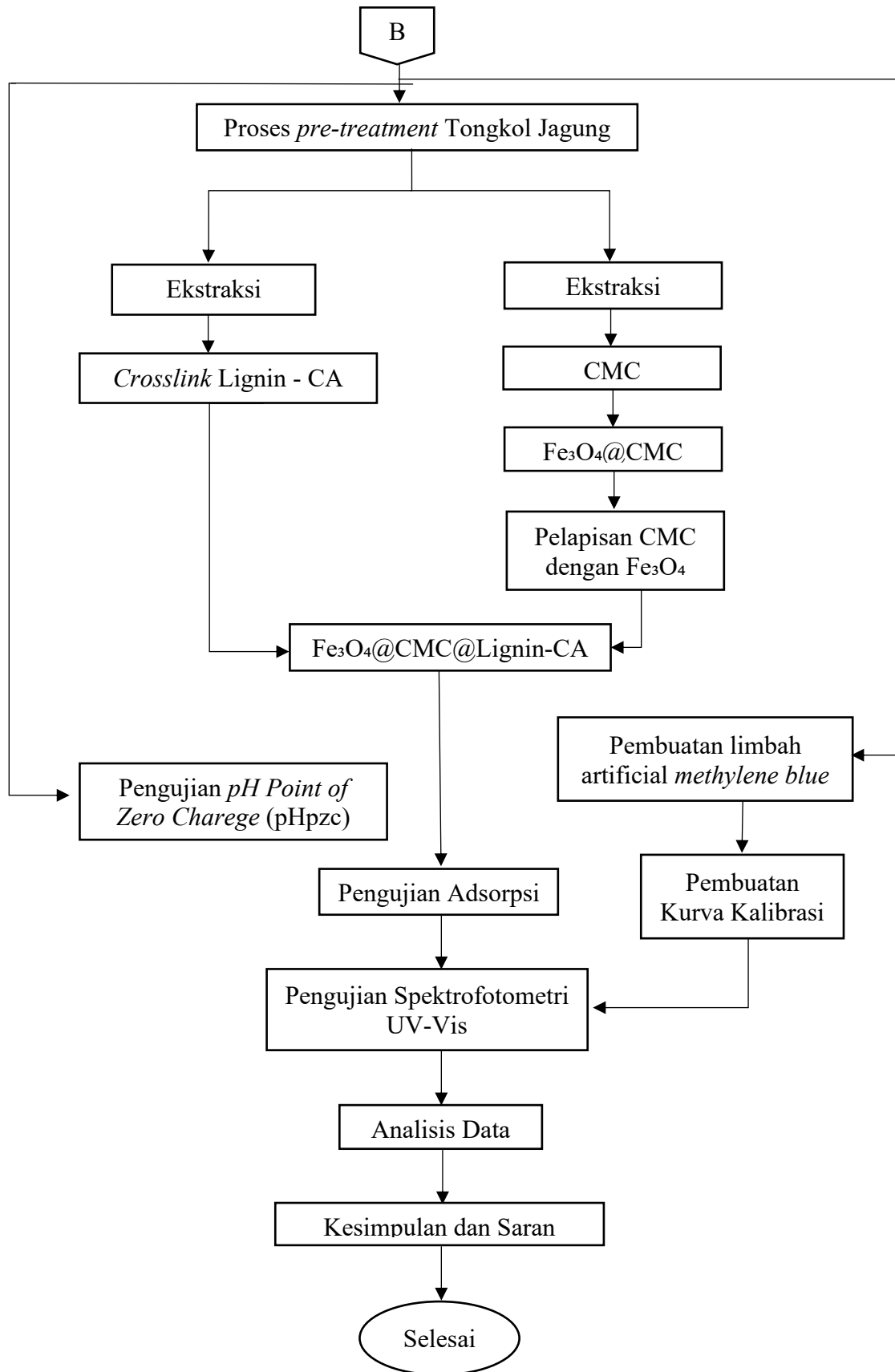
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian berisi alur atau rancangan kegiatan yang dilakukan selama penelitian. Kerangka penelitian berfungsi untuk mempermudah suatu penelitian agar dapat berjalan sesuai alur, struktur dan sistematis. Berikut merupakan kerangka penelitian yang terdapat pada Gambar 3.1







Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Identifikasi Masalah

Topik yang diangkat dalam penelitian ini adalah pemanfaatan lignin tongkol jagung, asam sitrat sebagai *crosslink*, Fe_3O_4 sebagai magnetit, selulosa tongkol jagung yang dimodifikasi menjadi CMC, serta CMC sebagai pelapis magnetit (Fe_3O_4) untuk menurunkan konsentrasi zat warna *methylene blue* pada limbah cair artifisial. Penelitian ini dilatar belakangi oleh masih rendahnya pemanfaatan tongkol jagung yang umumnya hanya digunakan sebagai pakan ternak atau limbah, sehingga berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dikelola secara optimal. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif pemanfaatan tongkol jagung sebagai adsorben yang bernilai tambah dan ramah lingkungan.

3.3 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan tujuan penelitian yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini meliputi karakteristik adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji pengaruh variasi dosis, waktu kontak, konsentrasi adsorbat, pH dan suhu terhadap penurunan konsentrasi pewarna *methylene blue*.

3.4 Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini diperoleh dari berbagai sumber ilmiah seperti jurnal nasional dan internasional, buku teks, tesis, serta referensi lain yang relevan. Studi literatur ini digunakan sebagai landasan teoritis untuk memahami konsep dan perkembangan penelitian. Pemanfaatan lignin tongkol jagung, asam sitrat sebagai *crosslink*, Fe_3O_4 sebagai magnetit, selulosa tongkol jagung yang dimodifikasi menjadi CMC, serta CMC sebagai pelapis magnetit (Fe_3O_4) untuk menurunkan konsentrasi zat warna *methylene blue* pada limbah cair artifisial.

3.5 Pengumpulan Data

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

3.5.1 Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh atau dikumpulkan secara langsung melalui pengujian lapangan. Data primer yang digunakan berupa konsentrasi awal limbah *methylene blue*, karakteristik adsorben berbasis lignin-selulosa menggunakan *Fourier Transformed Infrared* (FTIR), *Scanning Electron*

Microscope (SEM), X-Ray Diffraction (XRD), Vibrating Sample Magnetometer (VSM), Brunauer Emmet Teller (BET), Spektrofotometri UV-Vis.

3.5.2 Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang didapatkan dari beberapa referensi maupun sumber. Data sekunder dibutuhkan untuk membantu penelitian ini agar bisa diselesaikan. Data sekunder yang dibutuhkan dalam penelitian ini meliputi :

1. Tahap Pembuatan Adsorben

Data sekunder yang dibutuhkan pada tahap pembuatan adsorben adalah komposisi bahan pembuatan adsorben.

2. Tahap Adsorpsi

Data sekunder yang dibutuhkan pada tahap adsorpsi yaitu data variasi konsentrasi air limbah, dosis adsorben, waktu kontak, pH dan suhu.

3.6 Penentuan Tempat dan Waktu Penelitian

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

3.6.1 Penentuan Tempat

Penelitian dilakukan di beberapa tempat yaitu :

1. Laboratorium Limbah Cair Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (pelaksanaan penelitian dan uji konsentrasi larutan limbah artifisial *methylene blue* dengan spektrofotometri UV-Vis)
2. Laboratorium Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember, ITS Center dan Universitas Islam Indonesia (uji karakteristik FTIR, XRD, SEM, VSM dan BET).

3.6.3 Penentuan Waktu

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

3.7 Penentuan Variabel dan Parameter Penelitian

Variabel penelitian merupakan aspek yang dapat diukur dan diamati serta berpengaruh terhadap hasil penelitian yang dilakukan. Pada penelitian ini terdiri dari tiga variabel, diantaranya:

3.7.1 Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang bersifat bebas artinya, variabel bebas dapat berdiri sendiri tanpa dipengaruhi oleh variabel lainnya. Selain itu, suatu variabel berpengaruh dikarenakan memberikan pengaruh terhadap variabel lainnya. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini berada pada proses penelitian tahap adsorpsi. Variabel bebas pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Dosis adsorben (0,02 g/L, 0,03 g/L, 0,04 g/L, 0,06 g/L, 0,08 g/L, 0,1 g/L)
2. Waktu kontak (10 menit, 20 menit, 30 menit, 40 menit, 50 menit, 60 menit, 70 menit)
3. Konsentrasi *methylene blue* (5 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm dan 25 ppm)
4. Suhu adsorpsi (25°C, 35°C, dan 45°C)
5. pH (7,8,9,10,11)

3.7.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini berada pada tahap adsorpsi. Variabel terikat pada tahap adsorpsi meliputi efisiensi penurunan konsentrasi *methylene blue*.

3.7.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah variabel yang dibuat oleh peneliti untuk mencapai hasil yang diinginkan. Variabel kontrol dalam penelitian ini berada pada tahap adsorpsi. Berikut ini adalah variabel kontrol tersebut:

1. pH : 10
2. Kecepatan pengadukan : 150 rpm
3. Waktu kontak : 30 menit
4. Dosis : 0,03 g/L
5. Suhu : 25°C

3.8 Populasi dan sampel penelitian

3.8.1 Populasi Penelitian

Populasi pada penelitian ini adalah air limbah warna *methylene blue* buatan (artifisial).

3.8.2 Sampel Penelitian

Sampel penelitian ini adalah air limbah artifisial berupa limbah pewarna *methylene blue*. Sampel yang dibutuhkan disesuaikan dengan tahap dan variasi yang dilakukan, yaitu sebagai berikut :

1. Tahap *Pre-Treatment*

Pada tahap *pre-treatment* dilakukan pengujian terhadap karakteristik adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ yang dihasilkan pada penelitian. Sampel yang diujikan terlampir pada Tabel 3.1 :

Tabel 3.1 Sampel Pengujian Karakteristik Adsorben

Jenis Adsorben	Pengujian Karakteristik				
	FTIR	XRD	SEM	VSM	BET
Lignin	✓	-	-	-	-
CMC	✓	-	-	-	-
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$	✓	✓	✓	✓	✓
Setelah Adsorpsi	✓	-	-	-	-
Jumlah Sampel	8 Sampel				

2. Tahap *Post-Treatment*

Pada tahap *post-treatment* dilakukan pengujian terhadap larutan sampel hasil proses adsorpsi menggunakan Spektrofotometer UV-Vis dengan tiga kali pembacaan. Sampel yang diuji dilakukan sesuai dengan variasi yang digunakan, yaitu variasi dosis adsorben, variasi waktu kontak, variasi konsentrasi *methylene blue*, variasi suhu dan pH adsorpsi. Sampel yang diuji untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi awal yang terdapat pada Tabel 3.2 :

Tabel 3.2 Sampel Pengujian Variasi Konsentrasi Awal

Jenis Adsorben	Waktu Kontak (menit)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Konsentrasi Awal (ppm)				
					5	10	15	20	25
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$	30	0,03	10	25	P1	P2	P3	P4	P5
Jumlah Sampel					5 Sampel				

Sampel pada Tabel 3.2 adalah filtrat hasil dari pengujian adsorpsi pada larutan *methylene blue* dengan konsentrasi awal. konsentrasi awal dilakukan untuk mengetahui pengaplikasian konsentrasi awal terbaik dalam penurunan

konsentrasi *methylene blue*. konsentrasi awal terbaik akan digunakan dalam percobaan variasi selanjutnya, yaitu variasi waktu kontak. Sampel yang diuji untuk mengetahui pengaruh variasi waktu kontak dilampirkan pada Tabel 3.3 :

Tabel 3.3 Sampel Pengujian Variasi Waktu Kontak

Jenis Adsorben	Konsentrasi awal (ppm)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Waktu Kontak (menit)						
					10	20	30	40	50	60	70
Fe ₃ O ₄ @CMC@Lignin-CA	Terbaik	0,03	10	25	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
Jumlah Sampel					7 Sampel						

Sampel pada Tabel 3.3 adalah filtrat hasil dari pengujian adsorpsi pada larutan *methylene blue* dengan variasi waktu kontak. Variasi waktu kontak dilakukan untuk mengetahui pengaplikasian waktu kontak terbaik dalam penurunan konsentrasi *methylene blue*. Waktu kontak terbaik akan digunakan dalam percobaan variasi selanjutnya, yaitu variasi dosis adsorben. Sampel yang diuji untuk mengetahui pengaruh variasi dosis adsorben dilampirkan pada Tabel 3.4 :

Tabel 3.4 Sampel Pengujian Variasi Dosis

Jenis Adsorben	Konsentrasi awal (ppm)	Waktu Kontak (menit)	pH	Suhu (°C)	Dosis (g/L)					
					0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,1
Fe ₃ O ₄ @CMC@Lignin-CA	Terbaik	Terbaik	10	25	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Jumlah Sampel					6 Sampel					

Sampel pada Tabel 3.4 adalah filtrat hasil dari pengujian adsorpsi pada larutan *methylene blue* dengan variasi dosis adsorben. Variasi dosis adsorben dilakukan untuk mengetahui pengaplikasian dosis adsorben terbaik dalam penurunan konsentrasi *methylene blue*. Dosis adsorben terbaik akan digunakan dalam percobaan variasi selanjutnya, yaitu variasi pH. Sampel yang diuji untuk mengetahui pengaruh variasi pH dilampirkan pada Tabel 3.5 :

Tabel 3.5 Sampel Pengujian Variasi pH

Jenis Adsorben	Konsentrasi awal (ppm)	Waktu Kontak (menit)	Dosis (g/L)	Suhu (°C)	pH				
					7	8	9	10	11
Fe ₃ O ₄ @CMC@Lignin-CA	Terbaik	Terbaik	Terbaik	25	H1	H2	H3	H4	H5
Jumlah Sampel					5 Sampel				

Sampel pada Tabel 3.5 adalah filtrat hasil dari pengujian adsorpsi pada larutan *methylene blue* dengan variasi pH. Variasi pH dilakukan untuk mengetahui pengaplikasian Variasi pH terbaik dalam penurunan konsentrasi *methylene blue*. Variasi pH akan digunakan dalam percobaan variasi selanjutnya, yaitu variasi suhu. Sampel yang diuji untuk mengetahui pengaruh variasi suhu dilampirkan pada Tabel 3.6 :

Tabel 3.6 Sampel Pengujian Variasi Suhu

Jenis Adsorben	Konsentrasi awal (ppm)	Waktu Kontak (menit)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)		
					25	35	45
Fe ₃ O ₄ @CMC@Lignin-CA	Terbaik	Terbaik	Terbaik	Terbaik	T1	T2	T3
Jumlah Sampel					3 Sampel		

Sampel pada Tabel 3.6 adalah filtrat hasil dari pengujian adsorpsi pada larutan *methylene blue* dengan variasi suhu. Variasi suhu dilakukan untuk mengetahui suhu optimal dalam penurunan konsentrasi *methylene blue* sesuai dengan percobaan sebelumnya. Dari serangkaian percobaan dengan variasi yang dilakukan akan diperoleh dosis, waktu kontak, konsentrasi adsorbat, pH dan suhu terbaik dalam penggunaan adsorben Adsorben Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA dalam penurunan konsentrasi *methylene blue*.

3.9 Persiapan Alat dan Bahan

3.9.1 Alat

1. Alat penggiling
2. Glassware
3. *Hotplate*
4. *Magnetic stirrer*
5. Oven
6. *Furnace*

7. Cawan krusibel
8. Termometer
9. Neraca Analitik
10. Sendok stainless steel
11. pH meter
12. Spektrofotometer UV – Vis
13. Ayakan 60 mesh
14. Alu dan mortar
15. Soklet
16. Botol vial
17. Sentrifugasi
18. Sonikasi
19. *Shaker*

3.9.2 Bahan

1. Akuades
2. Tongkol Jagung
3. Natrium Hidroksida (NaOH)
4. Asam Klorida (HCl)
5. Asam Kloroasetat (ClCH_2COOH)
6. Fero Sulfat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
7. Feri Klorida ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
8. Asam Sitrat
9. *Methylene blue*
10. Kertas Saring
11. Etanol 95%
12. Aluminium Foil
13. Asam Sulfat (H_2SO_4)
14. Kain Kasa
15. Kertas Lakmus
16. Amonia

3.10 Prosedur Penelitian

3.10.1 Proses Ekstraksi Lignin-Selulosa Tongkol Jagung

a. Tahap *Pre-Treatment*

Tahap proses *pre-treatment* yang dilakukan oleh (Kanani *et al.*, 2018) :

1. Tongkol jagung dipotong menjadi ukuran yang kecil kemudian dikeringkan dibawah sinar matahari selama 2 hari (suhu lingkungan berkisar antara 25-30°C).
2. Tongkol jagung digiling sampai berbentuk serbuk dan diayak dengan ayakan 60 mesh sampai diperoleh serbuk tongkol jagung.
3. Serbuk tongkol jagung yang lolos ayakan siap di gunakan menjadi lignin dan selulosa.

b. Tahap Ekstraksi Lignin dan Selulosa

Tahap ekstraksi lignin dan selulosa mengacu pada metode yang dilakukan oleh (Kusumo *et al.*, 2020) dengan tahapan sebagai berikut :

1. Serbuk tongkol jagung 70 g dan 1750 mL larutan NaOH 12% disiapkan, kemudian dimasukkan kedalam labu leher tiga dan memasang alat hidrolisa (soklet).
2. *Hotplate* dinyalakan selama 2 jam pada suhu 110°C.
3. Padatan residu yang dihasilkan disaring dengan saringan buncher atau saringan manual (*decanter*), kemudian filtrat dipindahkan kedalam gelas beaker.
4. Filtrat berwarna gelap yang diperoleh merupakan lignin terlarut, sedangkan residu padat mengandung selulosa dan komponen lainnya.
5. Residu selulosa kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 90°C selama 2 jam hingga diperoleh berat yang konstan, selulosa telah dibuat.
6. Proses pengendapan lignin dilakukan pengasaman filtrat sampai pH 3 dengan larutan H₂SO₄ 72% sebanyak 105 mL.
7. Diendapkan selama 15 menit
8. Endapan yang terbentuk dipisahkan dengan penyaringan menggunakan sentrifugasi kecepatan 500 rpm selama 15 menit.
9. Endapan lignin dikeringkan menggunakan oven pada suhu 60°C selama 2 jam hingga kadar airnya berkurang.

3.10.2 Proses Pembuatan *Crosslinker* Lignin dengan Asam Sitrat

Proses *crosslinker* lignin dengan asam sitrat dilakukan dengan berbagai tahap (Sabzevar *et al.*, 2025) :

1. Timbang lignin sebanyak 2,5 gram dan asam sitrat 2 gram dicampurkan dengan 75 mL akuades ke dalam beaker glass, kemudian diaduk selama 2 jam hingga homogen.
2. Campuran dipindahkan ke dalam cawan petri dan dipanaskan dalam oven pada suhu 140°C selama 2 jam.
3. Campuran didinginkan kemudian merendamnya dengan akuades dan dibilas menggunakan akuades sebanyak 3 – 4 kali.
3. Produk disaring menggunakan kertas saring.
4. Produk dikeringkan dengan oven dengan suhu 60°C selama 2 jam hingga berat konstan.

3.10.3 Proses Pembuatan *Carboxymethyl Celulose* (CMC) dari *Celullose* Tongkol Jagung

Pembuatan *Carboxymethyl Celulose* (CMC) dari *celullose* tongkol jagung dilakukan dengan berbagai tahap (Shui *et al.*, 2017) :

1. Menyiapkan selulosa dari hasil isolasi yang telah dilakukan pada poin 3.10.1
2. Timbang 30 g selulosa masukkan ke dalam gelas beaker
3. Tambahkan 29,7 g NaOH 50% dan 300 mL akuades.
4. Gelas beaker ditutup dengan aluminium foil dan ditempatkan pada *hotplate* pada suhu 35°C selama 1 jam dengan pengadukan 150 rpm.
5. 29,7 g larutan NaOH 50% dicampurkan terlebih dahulu dengan 35,1 gram asam kloroasetat hingga homogen kemudian diencerkan 1050 ml dengan etanol 95%.
6. Larutan hasil pencampuran ditambahkan ke dalam *beaker glass*. kemudian dipanaskan pada suhu 75°C selama 1,5 jam dengan pengadukan 200 rpm menggunakan *hotplate*.
7. Dinginkan hingga suhu ruang, campuran tersebut dinetralkan menggunakan asam klorida.
8. Produk disaring dan dicuci etanol 95% sebanyak tiga kali.
9. Residu dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 3 jam.
10. Residu kering dikumpulkan sebagai produk CMC.

3.10.4 Pelapisan Magnetik Besi Oksida (Fe_3O_4) dengan *Carboxymethyl Cellulose* (CMC)

Pelapisan magnetit besi oksida dengan CMC ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}$) dilakukan beberapa tahap (Araichimani *et al.*, 2022) :

1. Siapkan CMC sebesar 0,7 g.
2. Campurkan dengan larutan 7,32 g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan 13,32 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan pengadukan 500 rpm selama 1 jam dengan menggunakan injeksi N_2 .
3. Campuran tersebut ditambahkan amonia sebanyak 15 mL sampai pH 10.
4. Setelah 1 jam pengadukan, endapan yang dihasilkan di sentrifugasi dan dikeringkan pada suhu 110°C selama 5 jam
5. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}$ telah dibuat

3.10.5 Tahap Penggabungan Sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}$ -Lignin-CA

Penggabungan $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}$ dengan Lignin-CA ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@$ Lignin-CA) dilakukan dengan beberapa tahap (Hanh *et al.*, 2023) :

1. Timbang $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}$ sebanyak 2 g didispersikan dalam campuran 100 mL air dan 20 mL etanol selama 15 menit menggunakan proses ultrasonik *batch* dengan frekuensi 35kHz hingga terdispersi secara merata.
2. Timbang Lignin-CA sebanyak 1 g ditambahkan secara perlahan ke dalam campuran tersebut dengan kecepatan 600 rpm dengan suhu 60°C .
3. Padatan $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@$ Lignin-CA dipisahkan melalui penyaringan dan dicuci dengan akuades.
4. Padatan dikeringkan pada suhu 50°C selama 24 jam hingga diperoleh $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@$ Lignin-CA telah dibuat.

3.10.6 Pembuatan Limbah *Artificial Methylene Blue*

Pengujian efektivitas adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@$ Lignin-CA dilakukan pada larutan artifisial *methylene blue* dengan variasi konsentrasi yaitu sebesar 5 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm dan 25 ppm. Tahap pembuatan larutan artifisial *methylene blue* sebagai berikut:

1. *Methylene blue* sebanyak 1 gram dilarutkan dalam 1000 mL akuades sehingga diperoleh *methylene blue* 1000 ppm.
2. Pembuatan larutan *methylene blue* 5 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm dan 25

ppm menggunakan pengenceran larutan induk *methylene blue* 1000 ppm sebesar 0,5 mL, 1 mL, 1,5 mL, 2 mL dan 2,5 mL hingga 100 mL menggunakan akuades sehingga diperoleh konsentrasi larutan artifisial sesuai dengan variasi.

3.10.7 Pembuatan Kurva Kalibrasi Limbah Artificial Zat Warna *Methylene Blue*

Pembuatan kurva kalibrasi larutan limbah artifisial *methylene blue* mengacu pada penelitian (Nurzihan *et al.*, 2019). Berikut langkah – langkah pembuatan kurva kalibrasi larutan limbah artifisial zat warna *methylene blue* :

1. Melarutkan masing – masing sebanyak 0,1 mL; 0,2 mL; 0,3 mL; 0,4 mL; 0,5 mL; 1 mL; 2 mL dan 2,5 mL larutan induk *methylene blue* dengan akuades dalam 100 mL labu ukur hingga tanda batas untuk membuat deret standar larutan *methylene blue* dengan konsentrasi 1 ppm, 2 ppm, 3 ppm, 4 ppm, 5 ppm, 10 ppm, 20 ppm dan 25 ppm.
2. Mengukur adsorbansi masing – masing larutan dalam spektrofotometer UV – Vis pada panjang gelombang 665 nm.
3. Membuat kurva garis linear dengan sumbu y adalah adsorbansi dan sumbu x konsentrasi larutan *methylene blue* untuk memperoleh persamaan regresi linear $y = mx + c$.

3.10.8 Pengujian *pH Point of Zero Charege (pHpzc)*

Pengujian pHpzc dilakukan dengan metode yang digunakan oleh berikut tahapan dalam pengujian pHpzc (Salama & Sakhwy, 2023) :

1. Menyiapkan larutan NaCl 0,1 M kemudian mendidihkan larutan selama beberapa menit untuk menghilangkan CO₂ terlarut dan mendinginkannya hingga mencapai suhu ruang ($\pm 25^{\circ}\text{C}$)
2. Membagi larutan NaCl 50 mL ke dalam erlenmeyer dan mengatur pH awal (pHi) pada rentang pH 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 dan 12 dengan menambahkan larutan HCl 0,1 M untuk menurunkan pH atau NaOH 0,1 M untuk menaikkan pH.
3. Menambahkan dosis adsorben 0,1 g ke dalam masing-masing erlenmeyer yang berisi NaCl 50 mL
4. Mengaduk campuran menggunakan *shaker* pada kecepatan 150 rpm, suhu 25°C, selama 5 jam.
5. Mengukur dan mencatat pH akhir larutan (pHf) setelah waktu kontak

selesai, kemudian menghitung selisih pH ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_f - \text{pH}_i$).

6. Membuat grafik hubungan antara pH awal (pH_i) sebagai sumbu X dan ΔpH sebagai sumbu Y, serta menentukan nilai pH pada kondisi $\Delta\text{pH} = 0$ sebagai pH_{zpc} adsorben.

3.10.9 Pengujian Adsorpsi Adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ Terhadap Limbah Artifisial Zat Warna

a. Pengaruh Konsentrasi Awal *Methylene Blue*

1. Memasukkan 100 mL larutan limbah artifisial *methylene blue* dengan variasi konsentrasi 5 ppm; 10 ppm; 15 ppm; 20 ppm dan 25 ppm dalam gelas beaker.
2. Menambahkan larutan NaOH 1 M secara bertahap hingga pH larutan mencapai 10
3. Menambahkan adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ dalam larutan *methylene blue* dengan dosis 0,03 g/L.
4. Mengaduk larutan pada kecepatan 150 rpm selama 30 menit dengan suhu 25°C .
5. Memisahkan adsorben dengan larutan limbah artifisial.

b. Pengaruh Waktu Kontak

1. Memasukkan 100 mL limbah artifisial *methylene blue* yang optimum untuk dekolonisasi zat warna *methylene blue* pada pengujian variasi pengaruh konsentrasi awal *methylene blue*.
2. Mengatur suasana larutan dalam kondisi basa dengan menteteskan larutan NaOH 1M dalam larutan artifisial hingga $\text{pH} = 10$
3. Menambahkan adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ dalam larutan dengan dosis 0,03 g/L
4. Mengaduk larutan pada kecepatan 150 rpm selama variasi waktu 10 menit; 20 menit; 30 menit; 40 menit; 50 menit; 60 menit dan 70 menit dengan suhu 25°C .
5. Memisahkan adsorben dengan larutan limbah artifisial *methylene blue*

c. Pengaruh Dosis Adsorben

1. Memasukkan 100 mL limbah artifisial *methylene blue* yang optimum untuk dekolorisasi zat warna *methylene blue* pada pengujian variasi pengaruh konsentrasi awal *methylene blue*.
2. Menambahkan larutan NaOH 1 M secara bertahap hingga pH larutan mencapai 10.
3. Menambahkan adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ sebanyak dosis adsorben dengan variasi 0,02 g/L; 0,03 g/L; 0,04 g/L; 0,06 g/L dan 0,08 g/L, 0,1 g/L.
4. Mengaduk larutan pada kecepatan 150 rpm selama waktu optimum untuk dekolorisasi zat warna *methylene blue* pada pengujian variasi pengaruh waktu kontak adsorpsi dengan suhu 25°C.
5. Memisahkan adsorben dengan larutan limbah artifisial.

d. Pengaruh pH

1. Memasukkan 100 mL limbah artifisial *methylene blue* yang optimum untuk dekolorisasi zat warna *methylene blue* pada pengujian variasi pengaruh konsentrasi awal *methylene blue*.
2. Menambahkan larutan NaOH 1 M secara bertahap hingga pH larutan mencapai variasi 7, 8, 9, 10 dan 11.
3. Menambahkan adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ sebanyak dosis adsorben yang optimum untuk dekolorisasi zat warna *methylene blue* pada pengujian variasi dosis adsorben.
4. Mengaduk larutan pada kecepatan 150 rpm selama waktu optimum untuk dekolorisasi zat warna *methylene blue* pada pengujian variasi pengaruh waktu kontak adsorpsi dengan suhu 25°C.
5. Memisahkan adsorben dengan larutan limbah artifisial.

e. Pengaruh Suhu

1. Memasukkan 100 mL limbah artifisial *methylene blue* yang optimum untuk dekolorisasi zat warna *methylene blue* pada pengujian variasi pengaruh konsentrasi awal *methylene blue*.
2. Menambahkan larutan NaOH 1 M secara bertahap hingga pH yang optimum untuk dekolorisasi zat warna *methylene blue* pada pengujian

variasi pengujian pengaruh pH.

3. Menambahkan adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ sebanyak dosis adsorben yang optimum untuk dekolorisasi zat warna *methylene blue* pada pengujian variasi dosis adsorben.
4. Mengaduk larutan pada kecepatan 150 rpm selama waktu optimum untuk dekolorisasi zat warna *methylene blue* pada pengujian variasi pengaruh waktu kontak adsorpsi dengan variasi suhu 25°C, 35°C dan 45°C.
5. Memisahkan adsorben dengan larutan limbah artifisial.

3.10.10 Pengujian *Reusability* Adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ Terhadap Limbah Artifisial Zat Warna *Methylene Blue*

Pengujian *reusability* adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ terhadap limbah artifisial zat warna *methylene blue* dilakukan menggunakan adsorben jenuh dengan penurunan konsentrasi *methylene blue* terbaik. Tahapan *reusability* sebagai berikut :

1. Adsorben disiapkan dan ditimbang sebanyak 0,1 g/L.
2. Larutan *methylene blue* (MB) dibuat dengan konsentrasi 25 ppm.
3. Adsorben dimasukkan ke dalam larutan MB, kemudian dilakukan proses adsorpsi menggunakan *hotplate stirrer* pada kecepatan pengadukan 150 rpm, suhu 25°C, dan waktu kontak 40 menit.
4. Setelah proses adsorpsi selesai, campuran disaring untuk memisahkan adsorben dan larutan.
5. Larutan hasil adsorpsi dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk menentukan konsentrasi akhir *methylene blue*.
6. Adsorben yang telah dipisahkan dikeringkan, kemudian digunakan kembali untuk proses adsorpsi dengan menyiapkan larutan *methylene blue* 25 ppm yang baru.
7. Proses adsorpsi dan analisis dilakukan kembali dengan kondisi yang sama.
8. Tahapan penggunaan ulang adsorben dilakukan secara berulang hingga 4–5 siklus untuk mengetahui kestabilan dan kemampuan reusabilitas adsorben.

3.11 Pengujian Karakteristik

3.11.1 Pengujian Spektro UV – Vis

Spektrofotometri UV-Vis adalah teknik analisis yang memanfaatkan daerah serapan sinar ultraviolet dan cahaya tampak untuk mengidentifikasi keberadaan suatu senyawa. Senyawa yang umumnya dapat dianalisis dengan metode ini adalah senyawa yang memiliki gugus kromofor dan auksokrom, karena gugus tersebut mampu menyerap radiasi pada panjang gelombang tertentu. Selain itu, analisis menggunakan *spektrofotometri UV-Vis* dikenal sebagai metode yang relatif sederhana dan memiliki waktu pengujian yang lebih singkat dibandingkan dengan metode analisis lainnya (Sahumena *et al.*, 2020).

3.11.2 Pengujian FTIR

Fourier Transform Infrared (FTIR) merupakan metode spektroskopi inframerah yang memanfaatkan transformasi Fourier untuk menghasilkan dan menganalisis spektrum serapan. Teknik ini banyak digunakan dalam identifikasi senyawa organik karena spektrum yang dihasilkan menunjukkan pola puncak yang beragam, yang merepresentasikan keberadaan gugus fungsi tertentu berdasarkan nilai bilangan gelombangnya. Spektrofotometer FTIR berfungsi sebagai instrumen analisis untuk memperoleh informasi mengenai vibrasi molekul, sehingga dapat digunakan dalam penentuan dan perkiraan struktur kimia suatu senyawa.

3.11.3. Pengujian XRD

Metode *X-Ray Diffraction* (XRD) adalah teknik analisis yang menggunakan radiasi sinar-X untuk mengidentifikasi material kristalin, baik dalam penentuan struktur kristal secara kualitatif maupun analisis fase material secara kuantitatif. Selain itu, metode XRD juga digunakan untuk mengkaji karakteristik kristal lainnya, seperti susunan atom, keberadaan cacat kristal, orientasi kristal, serta tingkat ketidakaturan dalam struktur kristal (Hakim *et al.*, 2019).

3.11.4 Pengujian SEM

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan instrumen analisis yang digunakan untuk mengamati objek berukuran sangat kecil, khususnya dalam karakterisasi morfologi dan topografi permukaan sampel. SEM termasuk mikroskop berbasis elektron yang dimanfaatkan untuk mengevaluasi sifat

material, seperti struktur permukaan, ukuran partikel, cacat struktural, serta distribusi atau keberadaan kontaminan pada suatu bahan (Fathia, 2018). Komponen utama SEM meliputi sumber elektron, lensa magnetik dan lensa objektif, fine probe, detektor, spesimen, serta monitor CRT. Prinsip kerja SEM didasarkan pada pendeteksian elektron yang dipantulkan dari permukaan sampel dan pengaturan fokus sinar untuk memperoleh intensitas maksimum. Arah dan intensitas pantulan elektron tersebut memberikan informasi mengenai profil permukaan objek. Selain itu, tumbukan elektron berenergi tinggi pada sampel dapat menghasilkan pancaran sinar-X, di mana energi dan intensitasnya bergantung pada komposisi unsur penyusun sampel (Sari, 2019).

3.11.5 Pengujian VSM

Vibrating Sample Magnetometer (VSM) adalah instrumen yang digunakan untuk mengkarakterisasi dan menganalisis sifat magnetik suatu material. Pengujian menggunakan VSM menghasilkan data mengenai parameter-parameter magnetik material sebagai respons terhadap variasi medan magnet eksternal, yang selanjutnya disajikan dalam bentuk kurva histeresis.

3.11.6 Pengujian BET

Metode *Brunauer–Emmett–Teller* (BET) merupakan salah satu teknik yang paling umum dan penting dalam penentuan luas permukaan spesifik material berpori. Metode ini didasarkan pada teori adsorpsi fisik gas pada permukaan padatan, yang dikembangkan oleh Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett, dan Edward Teller pada tahun 1938. Teknik BET banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, antara lain katalisis, ilmu material, dan kimia permukaan.

3.12 Menganalisis Data Hasil Penelitian dan Pembahasan

Analisis data dan pembahasan dilakukan untuk mengolah data hasil dari penelitian yang telah dilakukan. Hasil penelitian yang akan dianalisis dan dibahas meliputi hasil uji karakterisasi bahan dan adsorben, hasil pengujian spektro UV – Vis larutan limbah artifisial *methylene blue*, perhitungan kapasitas adsorpsi dan efisiensi dekolorisasi zat warna *methylene blue*, pengaruh variasi terhadap efisiensi dekolorisasi zat warna *methylene blue*, kemampuan penggunaan ulang adsorben sebagai adsorben, dan uji statistika.

3.12.1 Menganalisis Model Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi digunakan untuk mengkaji interaksi antara molekul adsorben dan adsorbat, serta untuk menggambarkan distribusi adsorbat antara fase padat dan fase cair setelah sistem mencapai keadaan setimbang (Amelia *et al.*, 2023). Dalam penelitian ini, dua model isoterm adsorpsi diterapkan, yaitu isoterm *Langmuir* dan isoterm *Freundlich*. Evaluasi terhadap kedua model tersebut dilakukan untuk menilai kesesuaian model kesetimbangan adsorpsi dengan data hasil penelitian. Perhitungan isoterm *Langmuir* dan *Freundlich* dilakukan menggunakan Persamaan 2.3–2.6. Penentuan model isoterm yang paling sesuai didasarkan pada nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati satu. Nilai R^2 diperoleh melalui pelinieran persamaan isoterm *Langmuir* dan *Freundlich*, di mana pada isoterm *Langmuir* digunakan grafik hubungan antara C_e dan C_e/Q_e , sedangkan pada isoterm *Freundlich* digunakan grafik hubungan antara $\log Q_e$ dan $\log C_e$ (Amelia *et al.*, 2023).

3.12.2 Menganalisis Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi digunakan untuk menjelaskan kecepatan penyerapan adsorbat oleh adsorben, yang dipengaruhi oleh waktu kontak hingga sistem mencapai kondisi kesetimbangan sebagai indikator laju proses adsorpsi (Taihuttu *et al.*, 2019). Dalam penelitian ini, tiga model kinetika adsorpsi diterapkan, yaitu model pseudo-orde nol, pseudo-orde satu, dan pseudo-orde dua. Perhitungan kinetika adsorpsi dilakukan menggunakan Persamaan 2.7–2.9. Penentuan model kinetika yang paling sesuai didasarkan pada nilai koefisien determinasi (R^2) serta kapasitas adsorpsi yang diperoleh (Taihuttu *et al.*, 2019). Model dengan nilai R^2 yang semakin mendekati satu dianggap paling representatif dalam menggambarkan mekanisme adsorpsi yang berlangsung (Setyorini *et al.*, 2023).

3.12.3 Menganalisis Data Uji Statistika

Uji hipotesis merupakan prosedur statistik yang digunakan untuk menguji kebenaran suatu pernyataan atau dugaan sementara, serta menentukan apakah hipotesis tersebut dapat diterima atau harus ditolak (Septiad & Ramadhani, 2020). Pada penelitian ini, pengujian hipotesis dilakukan menggunakan metode analisis variansi satu arah (*one way ANOVA*). Metode ini diterapkan untuk menganalisis perbedaan satu variabel independen terhadap dua atau lebih kelompok pada satu variabel dependen (Dewi *et al.*, 2023). Sebelum pelaksanaan uji *ANOVA*, dilakukan

terlebih dahulu uji prasyarat yang meliputi uji normalitas dan uji homogenitas. Adapun tahapan pelaksanaan uji hipotesis dengan metode *one way ANOVA* dalam penelitian ini dijelaskan sebagai berikut:

1. Uji normalitas

Uji normalitas dilakukan untuk menilai persebaran data dalam sebuah variabel terdistribusi secara normal atau tidak. Suatu data dinyatakan berdistribusi normal apabila nilai signifikansinya lebih besar dari 0,05 ($\text{Sig} > 0,05$) (Dewi *et al.*, 2023 dan Utami *et al.*, 2024).

2. Uji homogenitas

Uji homogenitas digunakan untuk mengetahui data sampel yang telah diambil berasal dari populasi yang memiliki variasi yang sama atau tidak. Suatu data dinyatakan homogen apabila nilai signifikansinya lebih besar dari 0,05 ($\text{Sig} > 0,05$) (Dewi *et al.*, 2023 dan Utami *et al.*, 2024).

3. Uji Nonparametik *Kruskal-Wallis*

Uji *Kruskal-Wallis* merupakan metode statistik nonparametrik yang digunakan sebagai alternatif *One-Way ANOVA* apabila data tidak memenuhi asumsi normalitas atau homogenitas. Uji ini bertujuan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antar kelompok perlakuan berdasarkan nilai median data. Hasil uji diinterpretasikan berdasarkan nilai signifikansi (*p-value*). Apabila nilai signifikansi kurang dari 0,05 ($\text{Sig.} < 0,05$), maka terdapat perbedaan yang signifikan antar kelompok perlakuan, sedangkan nilai signifikansi lebih besar dari 0,05 ($\text{Sig.} > 0,05$) menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antar kelompok.

4. Uji hipotesis

Analisis variasi satu arah (*One Way ANOVA*) Pengujian hipotesis dengan *one way ANOVA* untuk mengetahui adanya pengaruh dari berbagai kriteria yang diuji terhadap hasil penelitian (Rahmawati & Erina, 2020). Pada penelitian ini menganalisis pengaruh dosis adsorben, waktu kontak adsorpsi, konsentrasi awal methylene blue, dan suhu terhadap dekolonisasi zat warna *methylene blue*. Pengambilan keputusan terkait hipotesis diterima atau ditolak diamati dari nilai signifikan hasil uji statistika *one way ANOVA*. Apabila nilai signifikan kurang dari 0,05 maka hipotesa H_1 diterima dan H_0 ditolak, artinya pada penelitian terdapat pengaruh variasi terhadap hasil (Utami *et al.*, 2024). Adapun hipotesis dalam penelitian diantaranya :

a. Pengaruh dosis adsorben

H_0 = tidak terdapat pengaruh dosis adsorben terhadap dekolonisasi zat warna *methylene blue*.

H_1 = terdapat pengaruh dosis adsorben terhadap dekolonisasi zat warna *methylene blue*.

b. Pengaruh waktu kontak

H_0 = tidak terdapat pengaruh waktu kontak terhadap dekolonisasi zat warna *methylene blue*.

H_1 = terdapat pengaruh waktu kontak terhadap dekolonisasi zat warna *methylene blue*.

c. Pengaruh konsentrasi awal *methylene blue*

H_0 = tidak terdapat pengaruh konsentrasi awal *methylene blue* terhadap dekolonisasi zat warna *methylene blue*.

H_1 = terdapat pengaruh konsentrasi awal *methylene blue* terhadap dekolonisasi zat warna *methylene blue*.

d. Pengaruh pH

H_0 = tidak terdapat pengaruh pH terhadap dekolonisasi zat warna *methylene blue*.

H_1 = terdapat pengaruh pH terhadap dekolonisasi zat warna *methylene blue*.

e. Pengaruh suhu

H_0 = tidak terdapat pengaruh suhu terhadap dekolonisasi zat warna *methylene blue*.

H_1 = terdapat pengaruh suhu terhadap dekolonisasi zat warna *methylene blue*.

3.13 Menarik Kesimpulan

Kesimpulan merupakan ringkasan dari hasil analisis data dan pembahasan dari penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan penelitian berisi jawaban dari rumusan masalah dan tujuan penelitian yang telah dirumuskan sebelumnya.

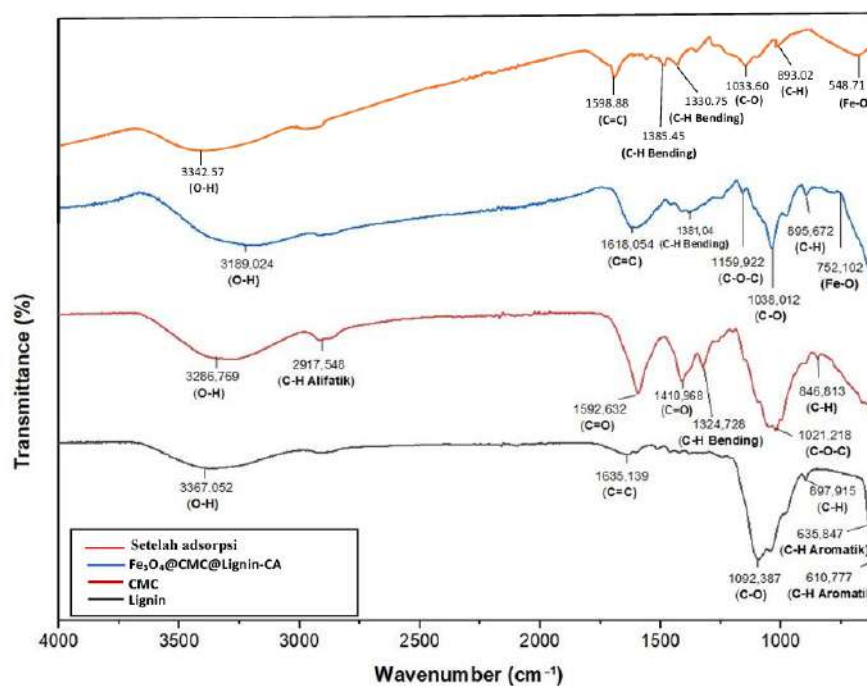
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Bahan dan Adsorben

4.1.1 Analisis Uji *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Karakterisasi menggunakan spektroskopi FTIR bertujuan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat dalam sampel. Pengukuran dilakukan pada rentang bilangan gelombang 4000–500 cm^{-1} . Data hasil pengujian FTIR ditampilkan dalam bentuk spektrum yang menggambarkan hubungan antara nilai absorbansi dan bilangan gelombang, sebagaimana disajikan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Spektra FTIR Lignin, CMC, Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA

Tabel 4.1 Gugus Fungsi Lignin, CMC, Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA

Sampel	Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	Rentang Serapan (cm ⁻¹)	Referensi
Lignin	O–H	3367,052	3200–3600	Nasution M <i>et al.</i> , 2025
	C=C aromatik	1635,139	1500–1650	Luu <i>et al.</i> , 2023
	C–O	1092,387	1000–1100	Anwar, 2019
	C–H	897,915	850–900	Andini Sri., 2024
	C–H aromatik	635,847	600–700	Luu <i>et al.</i> , 2023
	C–H aromatik	610,777	600–700	Luu <i>et al.</i> , 2023
CMC	O–H	3286,769	3200–3600	Nasution M <i>et al.</i> , 2025
	C–H alifatik	2917,548	2850–2950	Tavares <i>et al.</i> , 2020
	C=O (karboksilat)	1592,635	1550–1650	Elma <i>et al.</i> , 2023
	C=O (karboksilat)	1410,968	1400–1450	Elma <i>et al.</i> , 2023
	C–H bending	1324,728	1300–1390	Andini Sri., 2024
	C–O–C	1021,218	1000–1150	Edward, 2017
	C–H	846,813	800–900	Andini Sri., 2024
Fe ₃ O ₄ @CMC@Lignin-CA	O–H	3189,024	3200–3600	Nasution M <i>et al.</i> , 2025
	C=C aromatik	1618,054	1500–1650	Luu <i>et al.</i> , 2023
	C–H	1381,04	1370–1460	Sari, 2020
	C–O–C	1159,922	1050–1200	Edward, 2017
	C–O	1038,012	1000–1100	Anwar, 2019
	Fe–O	752,102	500–744	Pebrina <i>et al.</i> , 2023
Setelah Adsorpsi	O–H	3342,57	3200–3600	Nasution M <i>et al.</i> , 2025
	C=C aromatik	1598,88	1500–1650	Luu <i>et al.</i> , 2023
	C–H bending	1385,45	1300–1390	Andini Sri., 2024
	C–H bending	1330,75	1300–1390	Andini Sri., 2024
	C–O	1033,60	1000–1100	Anwar, 2019
	C–H	893,02	800–900	Andini Sri., 2024
	Fe–O	548,71	500–744	Pebrina <i>et al.</i> , 2023

Gambar 4.1 dan Tabel 4.1 tersebut menampilkan puncak-puncak spektrum dapat digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada sampel. Pada sampel lignin terdeteksi adanya gugus fungsi O-H khas polisakarida dengan pita lebar akibat ikatan hidrogen pada puncak 3367,052 cm⁻¹ (Nasution M *et al.*, 2025). Pada nilai puncak 1635,139 mengidentifikasi gugus cincin aromatik (Luu *et al.*, 2023), yang merupakan ciri khas struktur cincin aromatik pada lignin,

keberadaan puncak ini mengonfirmasi bahwa lignin memiliki struktur aromatik yang kompleks dan masih terjaga dengan baik. Puncak $1092,387\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya gugus karbonil (C=O) (Anwar, 2019). Gugus C-H berada pada puncak $897,915\text{ cm}^{-1}$ dan puncak pada $635,847\text{ cm}^{-1}$ dan $610,777\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya vibrasi C-H aromatik, yang berkaitan dengan getaran cincin aromatik pada struktur lignin.

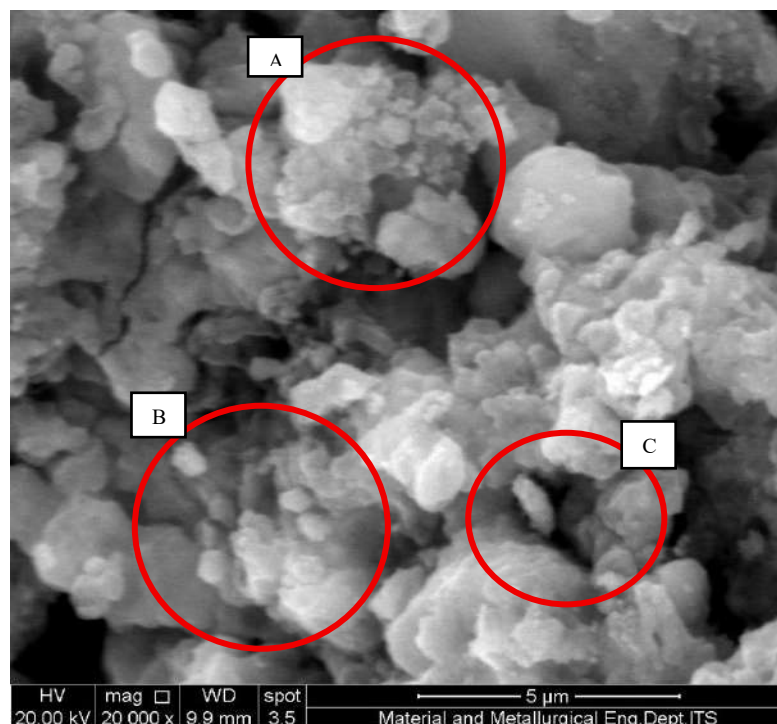
Pada sampel CMC terdeteksi puncak pada $3286,769\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan adanya vibrasi O-H khas polisakarida dengan pita lebar akibat ikatan hidrogen (Nasution M *et al.*, 2025). Puncak pada $2917,548\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan vibrasi C-H dari gugus $-\text{CH}_2$ alifatik, yang menandakan bahwa struktur dasar selulosa masih dipertahankan (Tavares *et al.*, 2020). Keberhasilan pembentukan CMC ditunjukkan oleh munculnya puncak pada $1592,635\text{ cm}^{-1}$ dan $1410,968\text{ cm}^{-1}$ yang berkaitan dengan vibrasi gugus karboksilat (C=O). Nilai puncak $1324,728\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi C-H bending, yang berkaitan dengan gugus C-H pada struktur CMC. Selain itu, puncak pada $1021,218\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya gugus eter (C-O-C) dari ikatan glikosidik, sedangkan puncak pada $846,813\text{ cm}^{-1}$ berhubungan dengan vibrasi C-H pada cincin glukosa (Andini Sri., 2024; Elma dkk., 2023). Secara keseluruhan, hasil ini mengindikasikan bahwa CMC telah terbentuk dengan tetap mempertahankan struktur utama selulosa.

Spektrum FTIR adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ menunjukkan adanya gugus fungsi karakteristik yang mengindikasikan keberadaan Fe_3O_4 , CMC dan lignin-CA dalam adsorben. Pada nilai puncak $3189,024\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi gugus O-H khas polisakarida dengan pita lebar akibat ikatan hidrogen (Nasution M *et al.*, 2025), yang berasal dari gugus hidroksil pada CMC dan lignin. Puncak pada $1618,054\text{ cm}^{-1}$ mengidentifikasi gugus cincin aromatik dari lignin (Luu *et al.*, 2023), sedangkan pita $1159,922\text{ cm}^{-1}$ dan $1038,012\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi C-O-C dan C-O yang berkaitan dengan struktur polisakarida. Nilai puncak $1324,728\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi C-H bending, yang berkaitan dengan gugus C-H pada struktur CMC. Puncak pada $752,102\text{ cm}^{-1}$ (Pebrina *et al.*, 2023), diinterpretasikan sebagai vibrasi Fe-O yang berkaitan dengan keberadaan magnetit (Fe_3O_4). Kemunculan pita serapan ini mengindikasikan bahwa inti Fe_3O_4 terdeteksi setelah proses pelapisan oleh CMC dan lignin, sehingga mendukung keberhasilan pembentukan adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$.

Hasil karakterisasi FTIR adsorben setelah adsorpsi *methylene blue*, teridentifikasi beberapa gugus fungsi utama yang berperan dalam proses adsorpsi. Pita serapan pada bilangan gelombang $3342,57\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya gugus hidroksil (O–H) yang berasal dari lignin dan CMC. Gugus hidroksil ini berfungsi sebagai situs aktif yang dapat berinteraksi dengan molekul *methylene blue* melalui ikatan hidrogen (Nasution *et al.*, 2025). Puncak pada $1598,88\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan keberadaan gugus C=C aromatik yang merupakan karakteristik struktur aromatik lignin (Luu *et al.*, 2023). Selanjutnya, pita serapan pada $1385,45\text{ cm}^{-1}$ dan $1330,75\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan adanya vibrasi tekuk (bending) C–H yang menunjukkan keberadaan struktur organik penyusun adsorben (Andini Sri, 2024) sementara daerah $1320\text{--}1390\text{ cm}^{-1}$ juga dikaitkan dengan vibrasi gugus C–N pada molekul *methylene blue* (Mohammadi *et al.*, 2023). Puncak pada $1033,60\text{ cm}^{-1}$ berkaitan dengan vibrasi regangan gugus C–O yang mengonfirmasi keberadaan lignin dan CMC dalam material adsorben (Anwar, 2019). Selain itu, pita serapan pada $893,02\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi C–H yang berkaitan dengan struktur polisakarida penyusun adsorben (Andini Sri, 2024). Keberadaan magnetit (Fe_3O_4) dikonfirmasi oleh munculnya pita serapan pada $548,71\text{ cm}^{-1}$ yang merupakan karakteristik vibrasi ikatan Fe–O (Pebrina *et al.*, 2023). Pada konsentrasi optimum 25 ppm, gugus O–H dan C–O berperan sebagai situs aktif yang mengikat *methylene blue*, hal ini ditunjukkan oleh adanya pergeseran bilangan gelombang setelah proses adsorpsi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa gugus fungsi utama penyusun adsorben masih terdeteksi setelah proses adsorpsi *methylene blue*, sehingga mengindikasikan kestabilan struktur adsorben selama proses adsorpsi berlangsung.

4.1.2 Analisis Uji *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) dilakukan untuk mengamati karakteristik morfologi permukaan adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$, meliputi bentuk partikel, distribusi ukuran, tingkat aglomerasi, serta keberadaan pori pada permukaan adsorben. Hasil karakterisasi SEM pada perbesaran $20.000\times$ dengan rentang pengamatan $5\text{ }\mu\text{m}$ yang disajikan pada Gambar 4.2 digunakan untuk mengevaluasi perubahan morfologi setelah proses pelapisan $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$. Pengamatan morfologi ini penting karena struktur permukaan adsorben dapat memengaruhi luas area kontak dan interaksi adsorben terhadap adsorbat selama proses adsorpsi berlangsung.



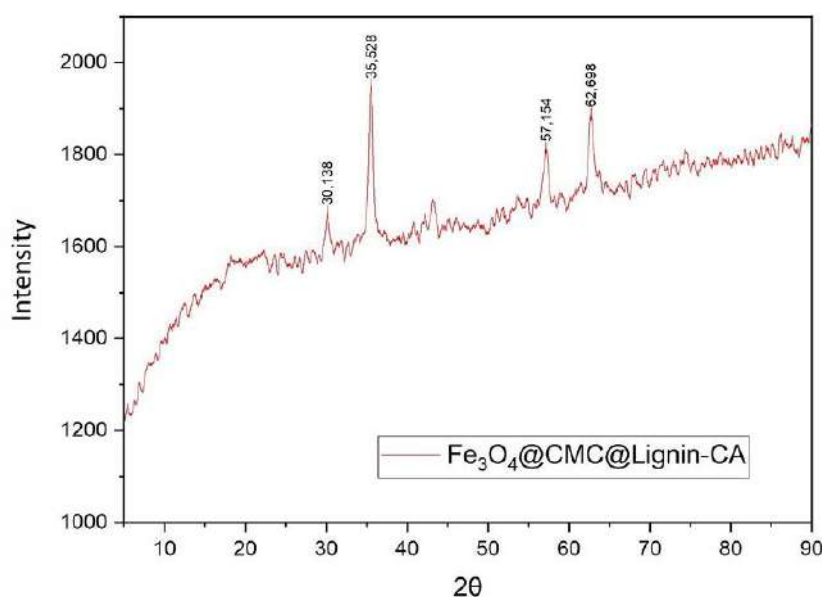
Gambar 4.2 SEM Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA

Berdasarkan hasil pengamatan morfologi adsorben pada Gambar 4.2 menunjukkan struktur permukaan yang heterogen, tidak beraturan, dan cenderung teraglomerasi. Pada area (a) terlihat aglomerasi partikel yang mengindikasikan adanya penggumpalan antarpartikel penyusun adsorben, kondisi ini diduga dipengaruhi oleh penggunaan asam sitrat (CA) (Sabzevar *et al.*, 2025), sebagai agen ikatan silang yang mampu membentuk jaringan adsorben lebih padat melalui interaksi gugus karboksilat, sehingga memperkuat keterikatan antara inti Fe₃O₄ dan matriks selulosa (Huang *et al.*, 2024). Pada area (b) tampak partikel granular dengan ukuran bervariasi yang menunjukkan distribusi partikel heterogen. Variasi ukuran partikel ini diduga berkaitan dengan perbedaan tingkat kerapatan struktur akibat proses crosslinking (Sabzevar *et al.*, 2025). Penggunaan asam sitrat (CA) dengan beberapa gugus karboksilat memungkinkan terbentuknya ikatan silang yang lebih rapat sehingga membentuk jaringan lebih kompak (Pooja *et al.*, 2025), yang dapat memengaruhi ukuran partikel dan susunan morfologi permukaan adsorben (Zhou *et al.*, 2016).

Keberadaan rongga pada area (c) menunjukkan adanya celah antarpartikel yang merepresentasikan porositas permukaan adsorben. Struktur berpori ini diduga terbentuk akibat partikel yang tidak menyatu secara sempurna setelah proses *coating* dan crosslinking, sehingga menghasilkan ruang antarpartikel yang berpotensi menjadi situs aktif adsorpsi. Morfologi adsorben yang terbentuk menunjukkan bahwa proses modifikasi lignin menggunakan asam sitrat serta penambahan $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}$ berhasil menghasilkan material struktur yang relatif kompleks dan berpori. Struktur tersebut mendukung proses adsorpsi karena memungkinkan difusi molekul *methylene blue* ke dalam pori-pori adsorben serta meningkatkan kontak antara adsorbat dan situs aktif yang tersedia pada permukaan adsorben.

4.1.3 Analisis Uji X-Ray Diffraction (XRD)

Uji *X-Ray Diffraction* (XRD) digunakan untuk mengetahui fase kristal dan tingkat kristalinitas pada adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$. Pola difraksi sampel diamati pada rentang sudut 2θ dari 0° hingga 90° . Hasil karakterisasi XRD disajikan pada Gambar 4.3



Gambar 4.3 Grafik Pola Difraksi XRD

Karakterisasi XRD dilakukan untuk mengidentifikasi fase kristalin dan mengevaluasi struktur kristal adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ berdasarkan pola difraksi pada rentang sudut 2θ . Difraktogram pada Gambar 4.3 memperlihatkan beberapa puncak karakteristik magnetit (Fe_3O_4) pada $2\theta =$

30,138°; 35,528°; 57,154°; dan 62,698° yang masing-masing berkaitan dengan bidang kristal (220), (331), (511), dan (440). Posisi puncak ini sesuai dengan data standar JCPDS/ICDD No. 19-0629 dan sejalan dengan laporan bahwa magnetit umumnya menunjukkan refleksi utama pada sekitar 30,1°; 35,5°; 57,1°; dan 62,6° (Alharthi *et al.*, 2025).

Puncak dengan intensitas tertinggi muncul pada bidang (331) di 35,528°, yang menunjukkan fase magnetit menjadi fase dominan pada adsorben. Sedikit pergeseran maupun perubahan intensitas puncak dibanding magnetit murni dapat dikaitkan dengan adanya interaksi antara inti Fe₃O₄@CMC dan lapisan *coating* berbasis lignin-CA, yang dapat memengaruhi parameter kisi serta derajat kristalinitas material. Fenomena ini umum terjadi setelah modifikasi permukaan atau pembentukan struktur *core-shell*, di mana pelapisan dapat menyebabkan pelebaran puncak atau sedikit penurunan kristalinitas, namun tanpa menghilangkan fase utama Fe₃O₄ (Hamid *et al.*, 2026). Keberadaan puncak (220), (331), (511), dan (440) yang tetap teridentifikasi menunjukkan bahwa proses *crosslinking* menggunakan *citric acid* tidak menghilangkan fase kristalin magnetit. Hal ini mengindikasikan inti Fe₃O₄ tetap stabil.

Selain itu, tidak ditemukannya puncak-puncak baru yang dominan menunjukkan bahwa proses pelapisan menggunakan CMC dan lignin-*crosslink citric acid* lebih banyak terjadi pada permukaan partikel tanpa mengubah struktur kristal utama magnetit. Keberadaan lapisan organik tersebut umumnya bersifat amorf sehingga tidak menghasilkan puncak difraksi yang tajam pada pola XRD. Hal ini menunjukkan bahwa material organik berhasil terdeposisi pada permukaan Fe₃O₄ tanpa merusak sifat kristalinitasnya.

4.1.4 Analisis Uji *Brauner Emmet and Teller* (BET)

Analisis *Brunauer–Emmett–Teller* merupakan metode karakterisasi yang digunakan untuk mengukur luas permukaan suatu benda. Kemampuan adsorpsi suatu adsorben sangat dipengaruhi oleh karakteristik teksturnya, terutama luas permukaan spesifik dan struktur pori. Berikut hasil pengujian BET pada adsorben Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian BET

Jenis Material	Luas Permukaan Spesifik (m ² /g)	Ukuran Pori (nm)	Volume Pori (cc/g)
Fe ₃ O ₄ @CMC@Lignin-CA	14.172	7.09547	0.05028

Berdasarkan hasil karakterisasi BET pada Tabel 4.2, adsorben Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA memiliki luas permukaan spesifik sebesar 14.172 m²/g, ukuran pori rata-rata sebesar 7.09547 nm, dan volume pori sebesar 0.05028 cm³/g. Parameter-parameter tersebut menunjukkan bahwa adsorben memiliki struktur berpori yang berperan dalam menyediakan situs aktif untuk proses adsorpsi *methylene blue*.

Luas permukaan spesifik adsorben Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA sebesar 14.172 m²/g sebanding dengan material berbasis lignin yang dianalisis oleh (Pourbaba *et al.*, 2024) yaitu sekitar 14.9 m²/g. Hasil tersebut menunjukkan bahwa material berbasis lignin tidak harus memiliki luas permukaan yang sangat tinggi untuk memperoleh kinerja adsorpsi yang baik, karena keberadaan gugus hidroksil (–OH) dan karboksilat (–COOH/C–O) sebagai gugus aktif yang berinteraksi dengan gugus C–N pada *methylene blue* juga berkontribusi terhadap proses adsorpsi *methylene blue*.

Nilai ukuran pori rata-rata sebesar 7.09547 nm mengindikasikan bahwa adsorben termasuk ke dalam kategori mesopori, karena berada pada rentang 2–50 nm (Thommes *et al.*, 2015). Struktur mesopori meningkatkan efisiensi adsorpsi *methylene blue* karena memberikan akses yang lebih mudah ke situs adsorpsi di dalam material (Khushnood *et al.*, 2024).

Volume pori sebesar 0.05028 cm³/g menunjukkan bahwa adsorben Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA memiliki ruang pori yang dapat berkontribusi dalam proses penampungan molekul adsorbat selama adsorpsi berlangsung. Meskipun nilai volume pori tergolong relatif rendah dibandingkan material berpori tinggi, keberadaan pori tetap mendukung proses difusi dan interaksi antara adsorben dan *methylene blue* (Yu *et al.*, 2021).

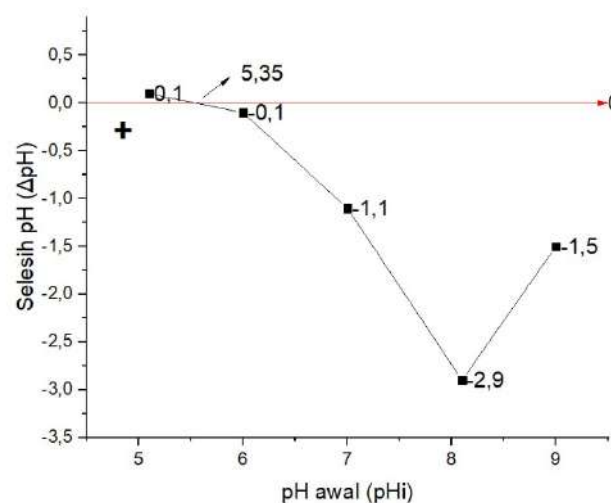
4.1.5 Analisis Uji *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM)

Vibrating Sample Magnetometer (VSM) merupakan teknik karakterisasi yang digunakan untuk mengetahui sifat magnetik suatu material melalui pengukuran magnetisasi terhadap medan magnet eksternal yang diberikan pada sampel (Husnaa *et al.*, 2024). Pengujian VSM menghasilkan kurva histeresis

yang menggambarkan hubungan antara magnetisasi (M) dan medan magnet (H), sehingga karakteristik magnetik material dapat dianalisis (Plant *et al.*, 2024). Parameter yang dapat diperoleh dari hasil pengujian VSM meliputi magnetisasi saturasi (M_s), magnetisasi remanen (M_r), dan koersivitas (H_c) yang digunakan untuk mengevaluasi respons dan kekuatan magnetik suatu material. Pada material berbasis Fe_3O_4 , analisis VSM digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik magnetik serta mengetahui perilaku superparamagnetik berdasarkan bentuk kurva histeresis dan nilai magnetisasi remanennya (Zedan *et al.*, 2024). Dalam penelitian ini, pengujian VSM bertujuan untuk mengetahui sifat magnetik adsorben $Fe_3O_4@CMC@Lignin-CA$ dan memastikan keberadaan sifat magnetik Fe_3O_4 sehingga adsorben dapat dipisahkan dari larutan menggunakan medan magnet setelah proses adsorpsi.

4.2 Analisa Uji *Point Of Zero Charge* (pHpzc)

Uji *Point Of Zero Charge* (pHpzc) merupakan salah satu karakterisasi awal adsorben yang dilakukan untuk mengetahui kondisi pH saat permukaan adsorben berada pada muatan netral, serta berkaitan dengan distribusi muatan positif dan negatif pada permukaan adsorben (Rahmiana *et al.*, 2023). Mengetahui nilai pHpzc dapat ditentukan kondisi pH yang mendukung proses adsorpsi, karena pada pH tertentu permukaan adsorben dapat menjadi lebih efektif dalam menarik ion bermuatan positif melalui interaksi elektrostatik.



Gambar 4.4 Grafik Hasil Uji pHpzc

Grafik nilai pHpzc dapat dilihat pada Gambar 4.4, dimana diperoleh pada pH 5,35. Pada kondisi pH yang lebih tinggi ($pH > pHpzc$), ion H^+ cenderung berada di dalam larutan dibandingkan terikat pada permukaan adsorben, sehingga permukaan adsorben akan

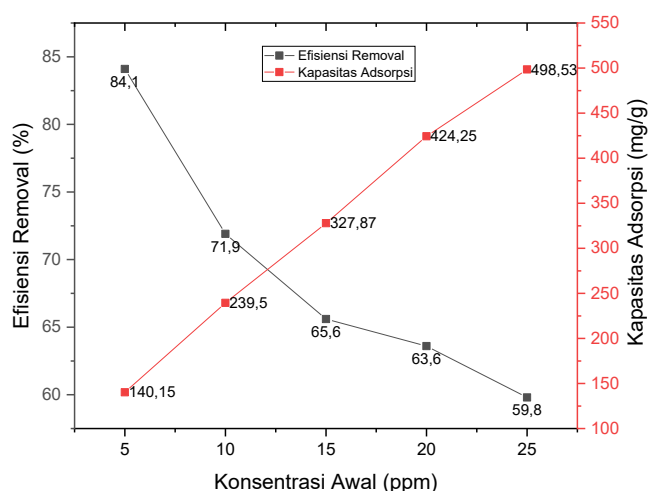
bermuatan negatif (Fairuzi *et al.*, 2025). Kondisi ini meningkatkan interaksi elektrostatis antara permukaan adsorben yang bermuatan negatif dengan molekul MB yang bermuatan positif, sehingga proses adsorpsi berlangsung lebih optimal karena gaya tarik antara adsorben dan adsorbat menjadi lebih kuat (Hkiri *et al.*, 2024). Mekanisme adsorpsi diawali dengan deprotonasi gugus hidroksil ($-OH$) dan karboksilat ($-COOH$) pada permukaan adsorben saat $pH > pHPZC$, sehingga permukaan menjadi bermuatan negatif. Muatan negatif tersebut kemudian menarik molekul *methylene blue* yang bermuatan positif melalui interaksi elektrostatis, sehingga proses adsorpsi berlangsung lebih efektif.

Nilai $pHpzc$ sebesar 5,35 juga menunjukkan bahwa adsorben $Fe_3O_4@CMC@Lignin-CA$ cenderung bekerja lebih efektif pada pH di atas titik nol muatan, khususnya untuk adsorbat kationik seperti *methylene blue*. Kondisi ini sejalan dengan peningkatan efisiensi penyisihan pada pH basa, yang mengindikasikan bahwa mekanisme adsorpsi dipengaruhi oleh muatan permukaan adsorben. Kombinasi mekanisme tersebut menunjukkan bahwa karakter permukaan adsorben berperan penting dalam meningkatkan kinerja adsorpsi terhadap *methylene blue*.

4.3 Pengaruh Variasi Terhadap Dekolorisasi Zat Warna *Methylene Blue*

4.3.1 Pengaruh Konsentrasi Awal Zat Warna *Methylene Blue*

Konsentrasi awal adsorbat merupakan salah satu parameter yang mempengaruhi proses adsorpsi. Pengujian variasi konsentrasi awal dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan adsorben dalam menyerap adsorbat dari larutan. Pada penelitian ini, variasi konsentrasi awal larutan *methylene blue* yang digunakan yaitu 5 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm dan 25 ppm meliputi dosis adsorben sebesar 0,03 g/L, waktu kontak 30 menit, pH 10, suhu 25°C dan kecepatan pengadukan sebesar 150 rpm. Efisiensi penyisihan *methylene blue* dan kapasitas adsorpsi pada masing-masing variasi konsentrasi awal disajikan pada Gambar 4.5



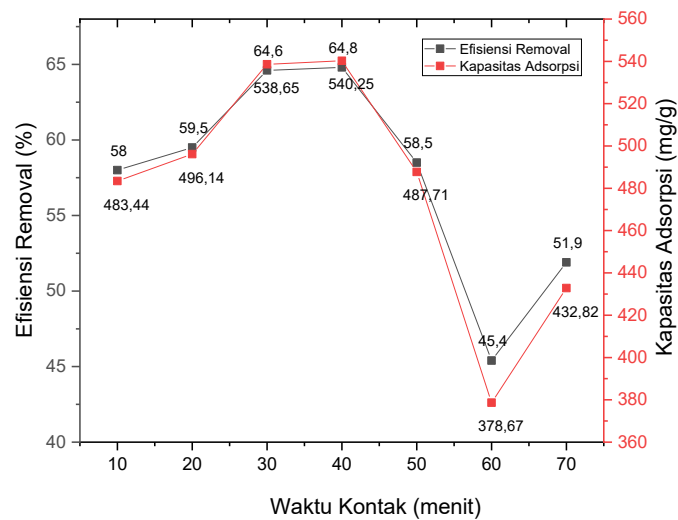
Gambar 4.5 Grafik Hubungan Konsentrasi Adsorben dengan Efisiensi Penyerapan dan Kapasitas Adsorpsi

Gambar 4.5 tersebut menunjukkan pengaruh variasi konsentrasi adsorbat terhadap efisiensi penyisihan *methylene blue* serta kapasitas adsorpsi. Efisiensi tertinggi diperoleh pada konsentrasi 5 ppm sebesar 84,1%, sedangkan efisiensi terendah terjadi pada konsentrasi 25 ppm yaitu sebesar 59,8%. Penurunan efisiensi penyisihan terjadi akibat peningkatan konsentrasi adsorbat yang menyebabkan kompetisi antar molekul dalam menempati situs aktif adsorben, sehingga tidak semua adsorbat dapat terikat secara optimal (Vasiljevi & Pani, 2025). Selain itu, jumlah situs aktif yang tersedia pada adsorben bersifat terbatas, sehingga ketika konsentrasi *methylene blue* semakin tinggi, sebagian molekul adsorbat tetap berada di dalam larutan dan tidak dapat teradsorpsi secara maksimal, kondisi tersebut mengakibatkan persentase penyisihan menurun.

Kapasitas adsorpsi meningkat seiring kenaikan konsentrasi awal dari 5 ppm 140,15 mg/g hingga 25 ppm 498,53 mg/g, karena jumlah adsorbat yang teradsorpsi semakin banyak (Permady & Mustakim, 2024). Peningkatan konsentrasi awal *methylene blue* menyebabkan jumlah molekul adsorbat yang tersedia di dalam larutan semakin besar, sehingga peluang terjadinya kontak antara adsorbat dan permukaan adsorben juga meningkat. Saya memilih konsentrasi 25 ppm untuk variasi selanjutnya karena berdasarkan tren hasil adsorpsi, efisiensi removal menurun sedangkan kapasitas adsorpsi meningkat seiring kenaikan konsentrasi awal sehingga 25 ppm dipandang sesuai untuk mengevaluasi batas kemampuan adsorben dan melanjutkan optimasi proses pada kondisi beban adsorbat yang lebih tinggi.

4.3.2 Pengaruh Waktu Kontak Zat Warna *Methylene Blue*

Variasi waktu kontak dilakukan untuk mengetahui lama waktu optimum yang dibutuhkan oleh suatu adsorben dalam mengadsorpsi adsorbat sampai terbentuknya kesetimbangan (Merpiseldin Nitsae *et al.*, 2021). Variasi waktu kontak yang digunakan dalam adsorpsi selama 10 menit, 20 menit, 30 menit, 40 menit, 50 menit, 60 menit dan 70 menit dengan dosis adsorben 0,03 g/L, pH 10, suhu 25°C, konsentrasi 25 ppm dan kecepatan pengadukan 150 rpm. Efisiensi penyisihan *methylene blue* dan kapasitas adsorpsi pada masing-masing variasi konsentrasi awal disajikan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Grafik Hubungan Waktu Kontak dengan Efisiensi Penyerapan dan Kapasitas Adsorpsi

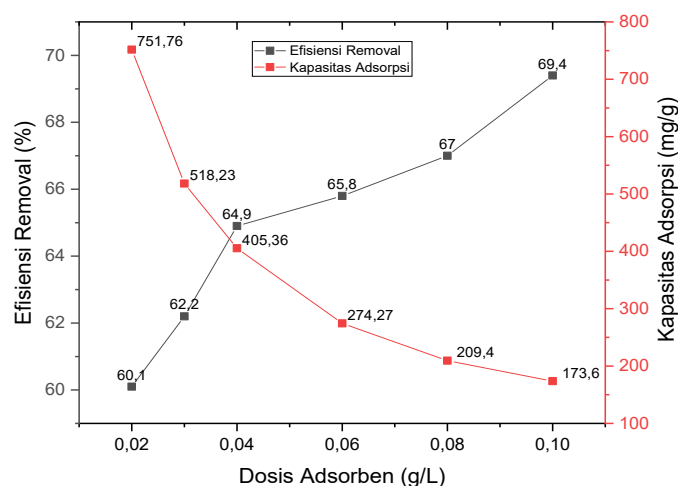
Gambar 4.6 tersebut menunjukkan pengaruh variasi waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan *methylene blue* serta kapasitas adsorpsi. Efisiensi penyisihan *methylene blue* meningkat seiring bertambahnya waktu kontak dari 10 hingga 40 menit, yaitu dari 58% menjadi 64,8%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak antara adsorben dan adsorbat, maka semakin banyak molekul adsorbat yang berinteraksi dan terikat pada permukaan adsorben (Kusuma *et al.*, 2024). Namun, setelah mencapai waktu optimum pada 40 menit, efisiensi penyisihan mengalami penurunan pada waktu kontak 50–60 menit, yaitu menjadi 58,5% dan 45,4%. Penurunan ini dapat disebabkan oleh mulai terjadinya kejenuhan pada situs aktif adsorben. Pada waktu kontak 70 menit efisiensi sedikit meningkat menjadi 51,9%, peningkatan kembali adsorpsi pada waktu kontak 70 menit diduga dipengaruhi oleh proses difusi intrapartikel, yaitu molekul *methylene blue* yang telah mencapai

permukaan adsorben secara bertahap berdifusi ke pori-pori bagian dalam hingga teradsorpsi pada situs aktif internal (Liu *et al.*, 2019). Proses ini berlangsung lebih lambat dibandingkan adsorpsi pada permukaan luar sehingga memerlukan waktu kontak yang lebih lama. Namun tidak lebih tinggi dibandingkan kondisi optimum, yang menunjukkan bahwa waktu kontak optimum dalam penelitian ini terjadi pada waktu 40 menit. Penurunan efisiensi penyisihan pada waktu kontak yang lebih lama disebabkan oleh proses desorpsi, yaitu pelepasan kembali molekul adsorbat dari permukaan adsorben. Hal ini terjadi karena ikatan adsorbat–adsorben relatif lemah, sehingga sebagian molekul yang telah terikat dapat terlepas kembali ke dalam larutan (Chairunnisak *et al.*, 2023).

Kapasitas adsorpsi menunjukkan tren yang sejalan dengan efisiensi removal. Nilai kapasitas adsorpsi meningkat dari 483,44 mg/g pada waktu kontak 10 menit menjadi puncaknya sekitar 540,25 mg/g pada 40 menit. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah *methylene blue* yang teradsorpsi per satuan massa adsorben semakin besar seiring bertambahnya waktu kontak, karena lebih banyak molekul yang berhasil menempati pori dan situs aktif adsorben. Fenomena ini sesuai dengan teori kinetika adsorpsi yang menyatakan bahwa peningkatan waktu kontak akan meningkatkan jumlah adsorbat yang terikat hingga tercapai kesetimbangan (Henry *et al.*, 2026). Setelah melewati waktu optimum, kapasitas adsorpsi menurun hingga sekitar 378,67 mg/g pada 60 menit, yang menunjukkan adsorben mulai jenuh dan berpotensi terjadi desorpsi akibat berkurangnya kestabilan interaksi adsorben–adsorbat. Pada 70 menit, kapasitas adsorpsi sedikit meningkat menjadi sekitar 432,82 mg/g, namun belum melampaui kondisi optimum. Kondisi ini menegaskan bahwa waktu kontak 40 menit merupakan kondisi terbaik untuk memperoleh kapasitas adsorpsi maksimum sebelum terjadi ketidakseimbangan antara proses adsorpsi.

4.3.3 Pengaruh Dosis Zat Warna *Methylene Blue*

Pengujian pengaruh dosis adsorben dilakukan untuk menentukan jumlah adsorben optimum dalam proses penyisihan zat warna *methylene blue*. Variasi dosis adsorben yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar 0,02 g/L, 0,03 g/L, 0,04 g/L, 0,06 g/L, 0,08 g/L dan 0,1 g/L dengan konsentrasi 25 ppm, pH 10, waktu 40 menit, suhu 25°C dan kecepatan pengadukan 150 rpm. Efisiensi penyisihan *methylene blue* dan kapasitas adsorpsi pada masing-masing variasi konsentrasi awal disajikan pada Gambar 4.7



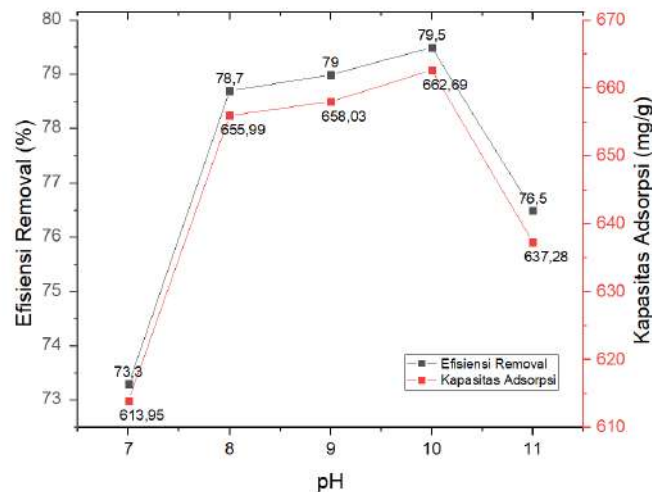
Gambar 4. 7 Grafik Hubungan Dosis Adsorben dengan Efisiensi Penyerapan dan Kapasitas Adsorpsi

Gambar 4.7 tersebut menunjukkan pengaruh variasi dosis terhadap efisiensi penyisihan *methylene blue* serta kapasitas adsorpsi. Efisiensi penyisihan *methylene blue* meningkat seiring dengan bertambahnya dosis adsorben, yaitu dari 60,1% pada dosis 0,02 g/L menjadi 69,4% pada dosis 0,1 g/L. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin besar dosis adsorben, maka jumlah situs aktif yang tersedia untuk mengikat adsorbat juga semakin banyak, sehingga proses adsorpsi menjadi lebih efektif. Dosis adsorben memiliki pengaruh terhadap nilai kapasitas adsorpsi, semakin tinggi dosis adsorben menyebabkan kapasitas adsorpsinya akan semakin rendah. Hal ini terjadi karena adanya penggumpalan adsorben sehingga permukaan adsorben tidak seluruhnya terbuka sehingga proses penyerapan tidak efektif yang mengakibatkan berkurangnya kapasitas penyerapan (Yusrita & Daud, 2021).

Kapasitas adsorpsi menurun seiring bertambahnya dosis adsorben dari 751,76 mg/g pada dosis 0,02 g/L menjadi 173,6 mg/g pada dosis 0,1 g/L. Penurunan ini diduga disebabkan hambatan transfer massa dan meningkatnya jalur difusi adsorbat menuju situs aktif, sehingga tidak seluruh molekul *methylene blue* mampu menjangkau permukaan adsorben secara efektif. Kondisi tersebut menyebabkan sebagian situs aktif tetap kosong dan menurunkan kapasitas adsorpsi per satuan massa adsorben (Ahmad & Ansari, 2021). Saya memilih dosis adsorben sebesar 0,03 g/L untuk variasi selanjutnya karena berdasarkan tren hasil adsorpsi, efisiensi removal menunjukkan peningkatan yang cukup baik, sedangkan kapasitas adsorpsi masih relatif tinggi sehingga dosis tersebut dipilih sebagai kondisi optimum untuk tahap optimasi berikutnya.

4.3.4 Pengaruh pH Zat Warna *Methylene Blue*

Uji variasi pH dilakukan untuk menentukan kondisi pH optimum dalam proses penyisihan zat warna *methylene blue*. Variasi pH yang digunakan dalam penelitian ini yaitu pH 7,8,9,10, dan 11 dengan konsentrasi 25 ppm, dosis 0,03 g/L, pH 10, suhu 25°C, waktu 40 menit dan kecepatan pengadukan 150 rpm. Efisiensi penyisihan *methylene blue* dan kapasitas adsorpsi pada masing-masing variasi pH disajikan pada Gambar 4.8



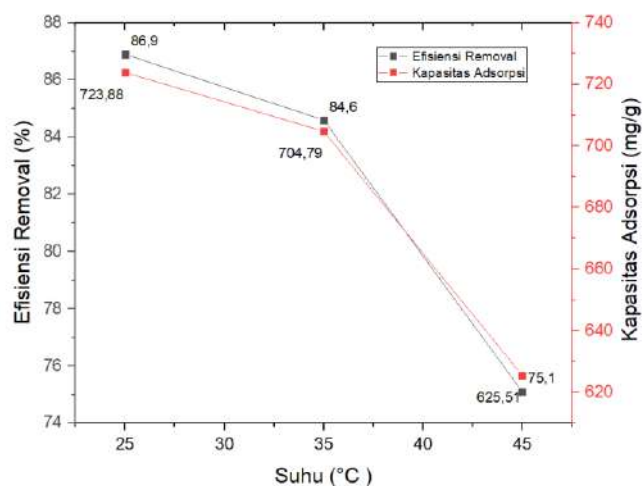
Gambar 4.8 Grafik Hubungan pH dengan Efisiensi Penyerapan dan Kapasitas Adsorpsi

Gambar 4.8 tersebut menunjukkan pengaruh variasi pH terhadap efisiensi penyisihan *methylene blue* serta kapasitas adsorpsi. Berdasarkan grafik, efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi meningkat dari pH 7 hingga mencapai nilai optimum pada pH 10 yaitu sebesar 79,5% (efisiensi) dan 662,69 mg/g (kapasitas). Peningkatan ini menunjukkan bahwa kondisi basa mendukung proses adsorpsi *methylene blue* karena permukaan adsorben yang bermuatan negatif dengan molekul MB yang bermuatan positif, sehingga proses adsorpsi berlangsung lebih optimal karena gaya tarik antara adsorben dan adsorbat menjadi lebih kuat (Hkiri *et al.*, 2024). Penurunan efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi pada pH 11 diduga disebabkan oleh kondisi larutan yang terlalu basa sehingga mempengaruhi interaksi antara adsorben dan *methylene blue*. Menurut (Doan, 2023) pada kondisi pH yang terlalu tinggi, perubahan muatan permukaan adsorben dapat menurunkan gaya tarik elektrostatik antara adsorben dan zat warna kationik seperti *methylene blue*, sehingga kemampuan adsorpsi menjadi tidak optimal.

Kapasitas adsorpsi menunjukkan tren yang sejalan dengan efisiensi removal, di mana nilai kapasitas meningkat dari 613,95 mg/g pada pH 7 menjadi maksimum sebesar 662,69 mg/g pada pH 10, kemudian menurun pada pH 11 menjadi 637,28 mg/g. Efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi yang meningkat secara bersamaan hingga pH optimum terjadi karena keduanya dipengaruhi oleh mekanisme yang sama, yaitu interaksi elektrostatik antara adsorben dan adsorbat. Pada kondisi pH basa, gugus fungsional pada permukaan adsorben mengalami deprotonasi sehingga bermuatan negatif, yang meningkatkan gaya tarik terhadap *methylene blue* yang bermuatan kationik. Akibatnya, tidak hanya persentase penyisihan meningkat, tetapi juga jumlah adsorbat yang terikat per satuan massa adsorben (kapasitas adsorpsi) ikut meningkat secara paralel (Mohammadzadeh *et al.*, 2023).

4.3.5 Pengaruh Suhu Zat Warna *Methylene Blue*

Uji pengaruh variasi suhu terhadap efisiensi removal zat warna *methylene blue*. Variasi suhu yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 25°C , 35°C , 45°C dengan konsentrasi 25 ppm, dosis 0,03 g/L, waktu kontak 40 menit, pH 10 dan kecepatan pengadukan 150 rpm. Efisiensi penyisihan *methylene blue* dan kapasitas adsorpsi pada masing-masing variasi suhu disajikan pada Gambar 4.9



Gambar 4. 9 Grafik Hubungan Suhu dengan Efisiensi Penyerapan dan Kapasitas Adsorpsi

Gambar 4.9 tersebut menunjukkan pengaruh variasi suhu terhadap efisiensi penyisihan *methylene blue* serta kapasitas adsorpsi. Hasil grafik kenaikan suhu dari 25°C ke 45°C menyebabkan persentase removal turun dari 86,9% menjadi 75,1%, dan kapasitas adsorpsi turun dari 723,88 mg/g menjadi

625,51 mg/g. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi terbaik pada data ini adalah 25°C, karena pada suhu lebih tinggi kemampuan adsorben menangkap zat terlarut semakin menurun. Pengaruh suhu tinggi terhadap adsorpsi menunjukkan semakin rendahnya kapasitas adsorpsi ketika suhu dinaikkan, yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi bersifat eksotermik. Menurunnya efisiensi penyerapan dan kapasitas adsorpsi pada suhu tinggi disebabkan oleh meningkatnya proses desorpsi molekul *methylene blue* dari permukaan adsorben. Pengaruh suhu tinggi terhadap adsorpsi menunjukkan semakin rendahnya kapasitas adsorpsi ketika suhu dinaikkan, ini dikarenakan melemahnya energi ikat antara adsorben dan adsorbat (Chen *et al.*, 2024).

Fenomena serupa dilaporkan oleh Tran *et al.*, (2017), yang menyatakan bahwa adsorpsi *methylene blue* yang bersifat eksotermik cenderung mengalami penurunan kapasitas adsorpsi seiring peningkatan suhu karena berkurangnya afinitas adsorben terhadap adsorbat. Hasil ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi *methylene blue* pada Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA lebih menguntungkan pada suhu rendah hingga suhu ruang. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa energi yang dilepaskan selama proses adsorpsi cukup untuk mempertahankan molekul *methylene blue* pada permukaan adsorben tanpa memerlukan penambahan energi dari luar.

4.4 Penggunaan Ulang Adsorben Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA

Kemampuan penggunaan ulang (*reusability*) adsorben merupakan salah satu parameter penting untuk menilai kestabilan dan potensi pemanfaatan adsorben dalam aplikasi pengolahan limbah. Pada penelitian ini, uji *reusability* dilakukan terhadap adsorben Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA menggunakan adsorben yang telah digunakan pada proses adsorpsi *methylene blue*. Setelah proses adsorpsi selesai, adsorben dipisahkan dari larutan, kemudian dicuci menggunakan akuades untuk melepaskan *methylene blue* yang masih terikat pada permukaan adsorben. Selanjutnya, adsorben dikeringkan dan digunakan kembali pada proses adsorpsi berikutnya. Pengujian dilakukan pada kondisi optimum, yaitu konsentrasi *methylene blue* 25 ppm, dosis adsorben 0,1 g/L, pH 10, suhu 25°C, waktu kontak 40 menit, dan kecepatan pengadukan 150 rpm. Data yang diperoleh berupa efisiensi penyisihan *methylene blue* dan kapasitas adsorpsi pada setiap siklus penggunaan ulang, yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan adsorben dalam mempertahankan kinerjanya setelah digunakan secara berulang. Berikut hasil pengujian *reusability* adsorben Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA.

Tabel 4.3 Data Hasil *Reusability*

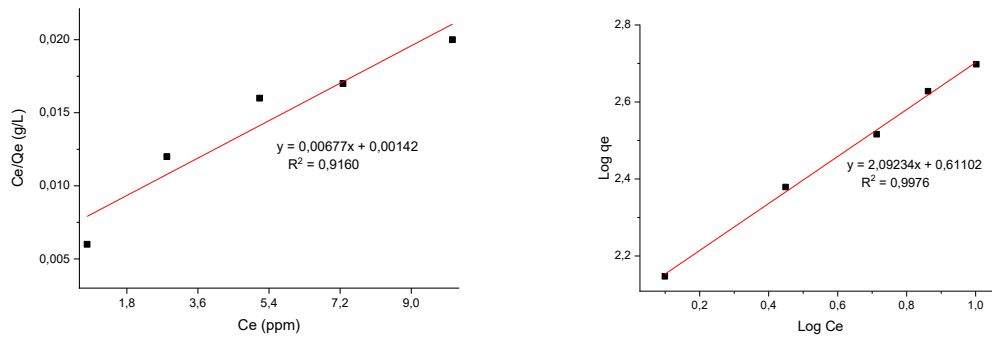
<i>Reusability</i> ke-	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
0	84,5	704,11
1	78,7	655,83

Hasil uji penggunaan ulang (*reusability*) adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ dalam penyisihan *methylene blue* ditunjukkan pada Tabel 4.3. Berdasarkan tabel tersebut, terjadi penurunan efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi setelah adsorben digunakan kembali. Pada penggunaan awal, adsorben mampu mencapai efisiensi removal sebesar 84,5% dengan kapasitas adsorpsi sebesar 704,11 mg/g. Setelah satu kali penggunaan ulang, efisiensi removal menurun menjadi 78,7%, sedangkan kapasitas adsorpsi berkurang menjadi 655,83 mg/g.

Penurunan efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi dapat disebabkan oleh molekul *methylene blue* yang tidak terdesorpsi secara sempurna selama proses regenerasi sehingga masih menempati sebagian situs aktif adsorben. Keberadaan adsorbat yang tersisa pada permukaan adsorben mengurangi jumlah situs aktif yang tersedia untuk proses adsorpsi berikutnya dan menyebabkan penurunan kinerja adsorben (El Messaoudi *et al.*, 2022). Penurunan kapasitas adsorpsi yang terjadi setelah penggunaan ulang menunjukkan bahwa regenerasi menggunakan akuades belum mampu melepaskan seluruh molekul *methylene blue* yang terikat pada permukaan adsorben. Hal ini karena desorpsi dengan air murni umumnya tidak cukup kuat untuk memutus interaksi elektrostatis dan ikatan kimia antara *methylene blue* dan situs aktif adsorben, sehingga sebagian besar molekul tetap teradsorpsi dan menurunkan jumlah situs aktif pada siklus berikutnya (Abbas & Trari, 2024).

4.5 Model Isoterm Adsorpsi

Proses adsorpsi *Methylene Blue* dianalisis menggunakan model isoterm adsorpsi. Model isoterm ini digunakan untuk menggambarkan hubungan antara jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada permukaan adsorben dengan konsentrasi adsorbat dalam larutan pada kondisi kesetimbangan (Akbar & Dewajani, 2025). Analisis dalam penelitian ini menggunakan isoterm *Langmuir* dan isoterm *Freundlich*. Data analisis diambil dari hasil adsorpsi pada variasi konsentrasi. Berikut grafik hasil dari kedua model isoterm adsorpsi ditampilkan pada Gambar 4.11



Gambar 4.10 Grafik Isoterm Adsorpsi (a) *Langmuir* dan (b) *Freundlich*

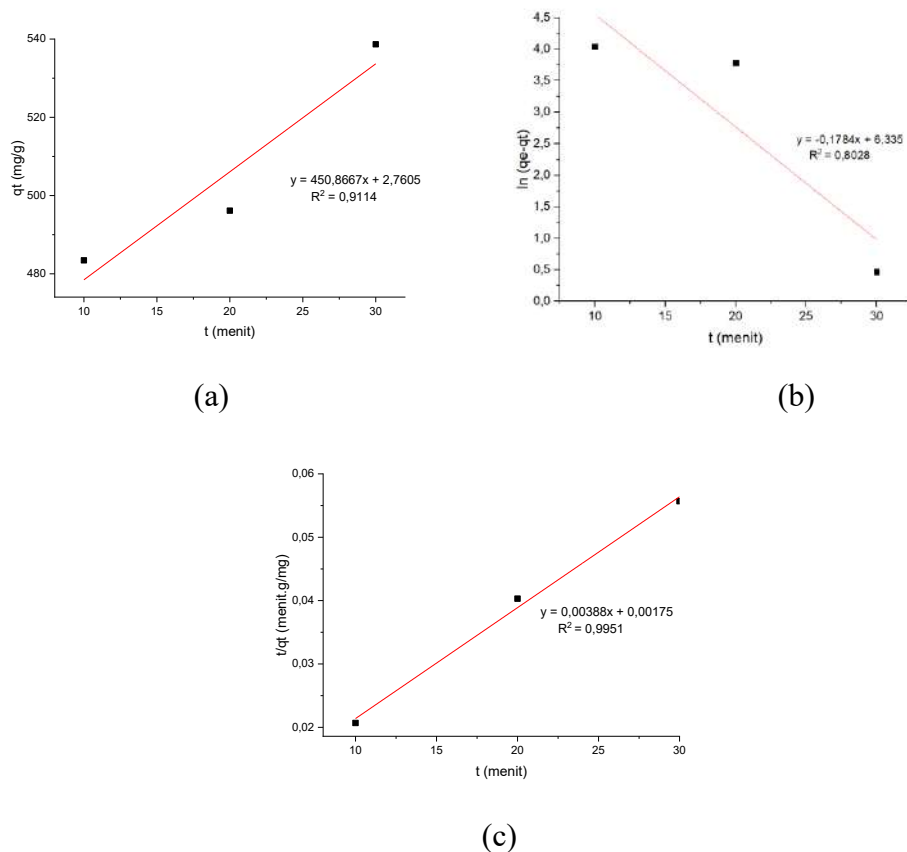
Tabel 4.4 Studi Isoterm Adsorpsi

Model Isoterm	Parameter	Nilai
Langmuir	qm (mg/g)	147,7105
	K_L (L/mg)	4,7676
	R^2	0,9160
Freundlich	n	1,6366
	K_f (mg/g)	123,6915
	R^2	0,9976

Berdasarkan hasil evaluasi parameter isoterm adsorpsi pada Tabel 4.4, model *Freundlich* menunjukkan kecocokan yang lebih baik dibandingkan model *Langmuir* dengan nilai R^2 sebesar 0,9976. Nilai intensitas adsorpsi (n) yang diperoleh sebesar 1,6366 ($n > 1$) menunjukkan bahwa nilai lebih tinggi menunjukkan adsorpsi yang menguntungkan, sedangkan ($n < 1$) mewakili karakteristik adsorpsi yang buruk (Setyorini *et al.*, 2023). Selain itu, nilai konstanta *Freundlich* (K_f) sebesar 123,6915 mg/g mengindikasikan kemampuan adsorben dalam mengadsorpsi *methylene blue* relatif tinggi. Kesesuaian model *Freundlich* pada penelitian ini juga berkaitan dengan hasil pengujian variasi konsentrasi awal *methylene blue*, dimana perubahan konsentrasi adsorbat mempengaruhi kapasitas adsorpsi dan persentase penyisihan yang diperoleh dan menunjukkan adsorpsi berlangsung pada permukaan heterogen dengan distribusi energi adsorpsi yang berbeda-beda, sehingga memungkinkan adsorpsi terjadi secara bertahap pada berbagai situs aktif yang tersedia (Kazemi *et al.*, 2025).

4.6 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi digunakan untuk mempelajari mekanisme serta laju proses adsorpsi yang terjadi (Merpiseldin Nitsae *et al.*, 2021). Pada penelitian ini kinetika adsorpsi dilakukan dengan menggunakan model kinetika Pseudo – Orde Nol, – Orde Satu, Pseudo – Orde Dua. Data analisis diambil dari hasil adsorpsi pada variasi waktu kontak. Berikut grafik hasil dari ketiga model isoterm adsorpsi ditampilkan pada Gambar 4.11



Gambar 4.11 Grafik Kinetika Adsorpsi (a) Pseudo – Orde Nol; (b) Pseudo – Orde Satu, Pseudo – Orde Dua

Tabel 4.5 Studi Kinetika Adsorpsi

Model Kinetika	Parameter	Nilai
PSEUDO ORDE NOL	q_e (mg/g)	450,8687
	K_0 (mg/g.menit)	2,7805
	R^2	0,9114
PSEUDO ORDE SATU	q_e (mg/g)	563,969
	K_1 (menit-1)	0,1784
	R^2	0,8028
PSEUDO ORDE DUA	q_e (mg/g)	257,732
	K_2 (g/mg.menit)	0,0086
	R^2	0,9951

Berdasarkan hasil perhitungan parameter kinetika adsorpsi yang disajikan pada Tabel 4.5, pada penelitian ini dilakukan analisis menggunakan model pseudo orde nol, pseudo orde satu, dan pseudo orde dua untuk membandingkan model kinetika yang paling sesuai dalam menggambarkan proses adsorpsi *methylene blue* pada adsorben $Fe_3O_4@CMC@Lignin-CA$. Model pseudo orde nol tetap digunakan sebagai pembanding awal untuk mengetahui apakah laju adsorpsi berlangsung konstan dan tidak dipengaruhi oleh jumlah adsorbat maupun ketersediaan situs aktif adsorben. terlihat bahwa model kinetika pseudo orde dua memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) paling tinggi dibandingkan model lainnya, yaitu sebesar 0,9951.

Nilai tersebut menunjukkan bahwa model pseudo orde dua memberikan kecocokan terbaik dalam menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi pada sistem penelitian ini. Jika dibandingkan dengan model kinetika pseudo orde pertama. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi yang terbentuk adalah adsorpsi secara kimia karena adanya ikatan antara molekul adsorbat dan adsorben (Merpiseldin Nitsae *et al.*, 2021) dan dapat dijelaskan bahwa terdapat hubungan yang erat antara variabel t/q_t dengan waktu, yaitu semakin besar waktu kontak antara adsorben dan adsorbat maka akan semakin besar pula nilai t/q_t .

4.7 Uji Statistika

Analisis statistik dilakukan untuk mengetahui variasi perlakuan yang digunakan dalam penelitian memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil yang diperoleh. Pada penelitian ini, analisis data dilakukan menggunakan uji Analisis Varian Satu Arah (*One Way ANOVA*), yang digunakan untuk membandingkan rata-rata hasil dari beberapa kelompok perlakuan sehingga dapat diketahui adanya perbedaan yang bermakna secara statistik. Sebelum dilakukan uji ANOVA, data terlebih dahulu diuji normalitas untuk memastikan bahwa data berdistribusi normal serta diuji homogenitas untuk mengetahui kesamaan varian antar kelompok perlakuan. Pemenuhan kedua asumsi tersebut diperlukan agar hasil analisis ANOVA yang diperoleh valid, akurat, dan dapat digunakan sebagai dasar dalam menarik kesimpulan mengenai pengaruh variasi penelitian terhadap hasil yang diamati.

4.7.1 Uji Normalitas

Uji normalitas bertujuan untuk mengetahui tingkat kesesuaian distribusi data penelitian dengan distribusi normal. Pada penelitian ini, pengujian normalitas dilakukan menggunakan metode *Shapiro-Wilk* karena jumlah sampel yang digunakan sebanyak 26 sampel atau kurang dari 50 sampel. Data dinyatakan memenuhi asumsi normalitas apabila memiliki nilai signifikansi lebih besar dari 0,05 (Sig. > 0,05).

Tabel 4.6 Hasil Uji Normalitas

Variasi		Sig	α	Keterangan	
Konsentrasi Awal (ppm)	5	1	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	10	0.843	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	15	0.363	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	20	0.373	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	25	0.089	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
Waktu Kontak (menit)	10	0.637	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	20	0.213	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	30	0.288	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	40	0.407	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	50	0.834	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	60	0.862	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	70	0.085	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
Dosis Adsorben (gram)	0.02	0.839	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	0.03	0.125	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	0.04	0.850	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	0.06	0.726	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	0.08	0.527	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	0.1	0.873	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
pH	7	0.339	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	8	0.780	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	9	0.109	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	10	0.114	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	11	0.144	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
Suhu (°C)	25	0.780	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	35	0.132	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal
	45	0.148	0,05	Sig. >0,05	Data terdistribusi normal

4.7.2 Uji Homogenitas

Uji homogenitas dilakukan untuk mengetahui kesamaan antar data yang digunakan dalam penelitian. Data dinyatakan memiliki varians yang homogen apabila nilai signifikansi yang diperoleh lebih besar dari 0,05 (Sig. > 0,05). Pada penelitian ini pengujian homogenitas dilakukan menggunakan metode *Levene's Test*. Berdasarkan hasil yang disajikan pada Tabel 4.7 diperoleh nilai signifikansi lebih besar dari 0,05 menandakan bahwa data homogen.

Tabel 4.7 Hasil Uji Homogenitas Metode *Levene's Test*

Variasi	Sig	α	Keterangan	
Konsentrasi Awal	0.300	0,05	Sig. >0,05	Data homogen
Waktu Kontak	0.136	0,05	Sig. >0,05	Data homogen
Dosis Adsorben	0.013	0,05	Sig. >0,05	Data tidak homogen
pH	0.000	0,05	Sig. >0,05	Data tidak homogen
Suhu	0.038	0,05	Sig. >0,05	Data tidak homogen

Hasil uji homogenitas menggunakan metode *Levene's Test* pada Tabel 4.7, variasi konsentrasi awal dan waktu kontak memiliki nilai signifikansi masing-masing sebesar 0,300 dan 0,136 (Sig. > 0,05), sehingga data dinyatakan homogen. Sementara itu, variasi dosis adsorben, pH, dan suhu memiliki nilai signifikansi masing-masing sebesar 0,013; 0,000; dan 0,038 (Sig. < 0,05), sehingga data dinyatakan tidak homogen. Hasil tersebut menunjukkan bahwa asumsi homogenitas hanya terpenuhi pada variasi konsentrasi awal dan waktu kontak. Oleh karena itu, untuk variasi yang tidak memenuhi asumsi homogenitas, analisis statistik dilanjutkan menggunakan uji nonparametrik *Kruskal–Wallis*.

4.7.3 Uji NonParametrik *Kruskal–Wallis*

Uji nonparametrik *Kruskal–Wallis* digunakan sebagai alternatif uji *One-Way ANOVA* apabila data tidak memenuhi asumsi homogenitas. Uji ini bertujuan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antar variasi perlakuan terhadap proses adsorpsi *methylene blue*. Dasar pengambilan keputusan dilakukan berdasarkan nilai signifikansi (Sig.), yaitu jika Sig. < 0,05 maka terdapat pengaruh yang signifikan, sedangkan jika Sig. > 0,05 maka tidak terdapat pengaruh yang signifikan. Hasil uji *Kruskal–Wallis* pada penelitian ini disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil Uji NonParametrik Metode *Kruskal–Wallis*

Variasi	Sig	α	Keterangan	
Dosis Adsorben	0.005	0,05	Sig. <0,05	Berpengaruh Signifikan
pH	0.009	0,05	Sig. <0,05	Berpengaruh Signifikan
Suhu	0,027	0,05	Sig. <0,05	Berpengaruh Signifikan

Berdasarkan hasil uji nonparametrik *Kruskal–Wallis* pada Tabel 4.8, diperoleh nilai signifikansi untuk variasi dosis adsorben, pH, dan suhu masing-masing sebesar 0,005; 0,009; dan 0,027. Seluruh nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05 (Sig. < 0,05), sehingga menunjukkan bahwa variasi dosis adsorben, pH, dan suhu memberikan pengaruh yang signifikan terhadap proses adsorpsi *methylene blue*. Hasil pengujian ini memperkuat bahwa perbedaan perlakuan pada setiap variasi memberikan respon adsorpsi yang berbeda secara nyata. Selanjutnya, analisis dilanjutkan menggunakan uji *One-Way ANOVA* sesuai dengan tujuan penelitian untuk mengevaluasi pengaruh masing-masing variasi

perlakuan terhadap efisiensi adsorpsi.

4.7.4 Uji *One Way ANOVA*

Pengujian hipotesis dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi penelitian terhadap efisiensi penyisihan methylene blue. Metode statistik yang digunakan adalah *One-Way ANOVA*, karena pengujian melibatkan satu faktor perlakuan dengan lebih dari dua tingkat variasi. Hasil pengujian digunakan untuk menentukan ada atau tidaknya perbedaan yang signifikan antar variasi perlakuan yang diberikan. Hipotesis yang diuji pada penelitian ini meliputi :

H0 = tidak terdapat pengaruh variasi penelitian terhadap dekolonisasi zat warna *methylene blue*.

H1 = terdapat pengaruh variasi penelitian terhadap dekolonisasi zat warna *methylene blue*.

Tabel 4.9 Hasil Uji *One Way ANOVA*

Variasi	Sig	α	Keterangan	
Konsentrasi Awal	<0,001	0,05	Sig. <0,05	H1 diterima (terdapat pengaruh)
Waktu Kontak	<0,001	0,05	Sig. <0,05	H1 diterima (terdapat pengaruh)
Dosis Adsorben	<0,001	0,05	Sig. <0,05	H1 diterima (terdapat pengaruh)
pH	<0,001	0,05	Sig. <0,05	H1 diterima (terdapat pengaruh)
Suhu	<0,001	0,05	Sig. <0,05	H1 diterima (terdapat pengaruh)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan terbentuknya ikatan ester akibat *crosslinking* asam sitrat dengan lignin, SEM menunjukkan morfologi permukaan adsorben yang heterogen, berpori dan kasar disertai konfirmasi keberadaan unsur Fe dari magnetik melalui uji XRD dan BET menunjukkan luas permukaan spesifik sebesar 14,172 m²/g, sehingga adsorben Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA berhasil disintesis.
2. Kondisi optimum adsorpsi *methylene blue* diperoleh pada konsentrasi awal 25 ppm, waktu kontak 40 menit, dosis 0,03 g/L dengan adsorben Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA, pH 10 dan suhu 25°C dengan efisiensi sebesar 86,9%.
3. Proses adsorpsi *methylene blue* pada adsorben Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA lebih sesuai mengikuti model isoterm *Freundlich* dan kinetika pseudo orde dua. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung pada permukaan yang heterogen dengan pembentukan lapisan lebih dari satu (multilayer). Selain itu, mekanisme adsorpsi didominasi oleh interaksi kimia antara adsorben dan adsorbat yang melibatkan gugus aktif pada permukaan adsorben.
4. Efektivitas *reusability* adsorben setelah satu kali penggunaan ulang menunjukkan penurunan efisiensi removal dari 84,5% menjadi 78,7%.

5.2 Saran

1. Pemisahan lignin sebaiknya menggunakan sentrifugasi karena menghasilkan lignin yang lebih bersih dan proses pemisahannya lebih efektif dibandingkan menggunakan kasa.
2. Perlu diuji pada limbah cair tekstil asli untuk mengetahui pengaruh gangguan ion matriks lain.
3. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan uji *reusability* lebih dari satu siklus agar kemampuan adsorben untuk digunakan kembali dapat dievaluasi dengan lebih baik.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- abbas, M., & Trari, M. (2024). *Adsorption Behavior Of Methylene Blue Onto Activated Coconut Shells : Kinetic , Thermodynamic , Mechanism And Regeneration Of The Adsorbent. December*, 1–18.
- Akbar, D. F., & Dewajani, H. (2025). Analisis Model Isoterm Langmuir Dan Freundlich Pada Proses Adsorpsi Metilen Biru Menggunakan Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit. *11*(9), 762–776.
- Anggriani, U. M., Hasan, A., & Purnamasari, I. (2021). Kinetika Adsorpsi Karbon Aktif Dalam Penurunan Konsentrasi Logam Tembaga (Cu) Dan Timbal (Pb) *Kinetic Adsorption Of Activated Carbon In Decreasing Concentrations Of Copper (Cu) And Lead (Pb) Metals. 12*(02), 29–37.
- Angraini, S., Pinem, J. A., & Saputra, E. (2016). Pemompaan Pada Kombinasi Proses Koagulasi Dan. *3*(1), 1–9.
- Anwar, K. (2019). Yang Merupakan Ciri Khas Struktur Cincin Aromatik Pada Lignin. Keberadaan Puncak Ini Mengonfirmasi Bahwa Lignin Memiliki Struktur Aromatik Yang Kompleks Dan Masih Terjaga Dengan Baik. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Arefe Moatamed Sabzevar, Ali Ahmadpour, M. G. (2025). *Preparation Of Beta-Cyclodextrin Decorated Magnetic Lignin By Citric Acid Cross-Linker For Water Treatment. Carbohydrate Polymer Technologies And Applications, 9* (December 2024), 100654.
- Baral, S. C., Sasml, D., Ram, M., Haldar, K. K., Mekki, A., Sen, S., Science, M., Arabia, S., & Arabia, S. (2025). *Enhancing Fenton-Like Photo-Degradation And Electrocatalytic Oxygen Evolution Reaction (Oer) In Fe-Doped Copper Oxide (Cuo) Catalysts.*
- Benosmane, N., Boutemour, B., Hamdi, S. M., & Hamdi, M. (2022). *Removal Of Methylene Blue Dye From Aqueous Solutions Using Polymer Inclusion Membrane Technology. Applied Water Science, 12*(5), 1–11.
- Camargos, C. H. M., Yang, L., Jackson, J. C., Tanganini, I. C., Francisco, K. R., Ceccato-Antonini, S. R., Rezende, C. A., & Faria, A. F. (2025). *Lignin And Nanolignin : Next-Generation Sustainable Materials For Water Treatment.*
- Chairunnisak, A., Darmadi, D., Adisalamun, A., Yusuf, M., Mukhtar, S., Safitri, U. R., & Shafira, O. A. (2023). *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi Study Of Synthesis And Performance Of Clay And Clay-Manganese Monoliths For Mercury Ion Removal From Water. 26*(4), 133–142.

- Daniel Barker-Rothschild, Jingqian Chen, Zhangmin Wan, Scott Rennekar, Ingo Burgert, Yong Ding, Y. L. And O. J. R. (2025). *Chem Soc Rev.* 54(2).
- Deepti, Y. (2016). *Research In Chemistry And Environment Utilization Of Corn Cob Activated Carbon For Adsorptive Removal Of Mb Dye From Aqueous Solution : Application Of Rsm Approach In Optimization Of Removal Process.* 6(1).
- Dita Yusrita, Syafi Daud, E. H. (2021). Pengaruh Dosis Adsorben Dan Waktu Kontak Terhadap Penyisihan Logam Besi (Fe) Dan Warna Air Gambut Menggunakan Adsorben Tanah Lempung Gambut Yang Telah Diaktivasi. Mahasiswa Prodi Teknik Lingkungan 2) Dosen Teknik Lingkungan Laboratorium Pengendalian Dan Pencegahan Pencemaran Ligkungan Program Studi Teknik Lingkungan S1, Fakultas Teknik Universitas Riau, 1–10.
- Doan, L. (2023). *Modifying Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles As Methylene Blue Adsorbents : A Review.*
- El, N., Mohammed, M., Khomri, E., El, A., Amal, M., Amane, B., Lacherai, A., Iqbal, H. M. N., Mulla, S. I., Kumar, V., Heloisa, J., Américo, P., & Crystal, C. V. (2022). *Regeneration And Reusability Of Non - Conventional Low - Cost Adsorbents To Remove Dyes From Wastewaters In Multiple Consecutive Adsorption – Desorption Cycles : A Review. Biomass Conversion And Biorefinery, 0123456789.*
- Eriningsih, R., Yulina, R., & Mutia, T. (2011). Pembuatan Karboksimetil Selulosa Dari Limbah Tongkol Jagung Untuk Pengental Pada Proses Pencapan Tekstil *Producing.* Jurnal Arena Tekstil, 26(2), 105–113.
- Ernawati, Ifta Mafliah, Irin Ubang, Priscilia Natali Podung, Wahyu Nurbaiti, S. L. (2021). Adsorpsi Metilen Biru Dengan Menggunakan Arang Aktif *Adsorption Of Methylene Blue Using Activated Charcoal.* 173–179.
- Fairuzi, I. I., Yuniarto, A., & Nisa, C. (2025). *Determination Point Of Zero Charge (Pzc) Of Nzvi-Mxene Adsorbent For Reduction Of Ciprofloxacin Contaminants In Wastewater. X(2), 12994–12999.*
- Hadayani, L. W., & Indah Riwayati, R. D. R. (2015). *No Title. 11(1), 19–23.*
- Hamidi, A., Atia, D., Rebiai, A., Reghioua, A., & Zobeidi, A. (2024). *Investigation Of Adsorption Kinetics And Isothermal Thermodynamics For Optimizing Methylene Blue Adsorption Onto A Modified Clay With Cellulose Using The Response Surface Approach. Biomass Conversion And Biorefinery, 14(18), 22573–22587.*
- Hanh, C. L. N., Thanh, L. H. V., Huynh, G. D., Phong Ho Quoc, V. T. N. And, & Thi, V. D. (2023). *Preparation And Characterization Of Magnetic-Lignin Nanoparticles With Potential Applications For Drug Delivery. 15(3), 64–71.*

- Henry, U., Chidiadi, A., Mba, B., Chinyere, M., Uzochukwu, S., Onwuka, F., Jacob, L., Maxwell, K., Anukwonke, C., & Gold, O. (2026). *Adsorption Of Methylene Blue From Aqueous Solutions Using Activated Carbon Derived From Sand Box Seed Shell (Hura Crepitans) : Isothermal , Thermodynamic , And Kinetic Studies*. Springer International Publishing.
- Huang, F., Tian, Z., Wang, Y., Ji, X., Wang, D., & Fatehi, P. (2024). *International Journal Of Biological Macromolecules Cellulose Fiber Drainage Improvement Via Citric Acid Crosslinking. International Journal Of Biological Macromolecules*, 281(P3), 136338.
- Husnaa, S., Taib, M., & Ali, R. R. (2024). *Plant-Assisted Synthesis Of Fe₃O₄ Nanoparticles For Catalytic Degradation Of Methyl Orange Dye And Electrochemical Sensing Of Nitrite. December 2023*, 1–11.
- Indrayana, I. P. T. (2019). *Review Fe₃O₄ Dari Pasir Besi : Sintesis, Karakterisasi, Dan Fungsionalisasi Hingga Aplikasinya Dalam Bidang Nanoteknologi Maju*. 8, 65–75.
- Jorge, N., Teixeira, A. R., March, L., Tavares, P. B., Lucas, M. S., & Peres, J. A. (2022). *Removal Of Methylene Blue From Aqueous Solution By Application Of Plant-Based Coagulants †*.
- Kazemi, S., Tadjarodi, A., & Moghaddam, A. B. (2025). *Multilayer Chemisorption-Enabled Mof-Based Composite Membrane For Rapid And Efficient Trifluralin Removal From Wastewater*. 1–13.
- Khan, P., Ali, S., Jan, R., & Kim, K. (2024). *Lignin Nanoparticles : Transforming Environmental Remediation*.
- Khaoula Hkiri, Hamza Elsayed Ahmed Mohamed, M. M., & Malik, M. (2024). *Experimental And Theoretical Insights Into The Adsorption Mechanism Of Methylene Blue On*. 1–19.
- Kusumo, P., Biyono, S., & Tegar, S. (2020). *Isolasi Lignin Dari Serbuk Grajen Kayu Jati (Tectona Grandis) Dengan Metode Klasson*. 19(02), 130–139.
- Lestari, F. T. W. Dan D. (2024). *Karakteristik Sifat Fisis Biobriket Limbah Tongkol Jagung Dan Serbuk Kayu*. 19(2), 276–283.
- Liu, Q., Zhou, Y., & Wang, M. (2019). *Adsorption Of Methylene Blue From Aqueous Solution Onto Viscose-Based Activated Carbon Fiber Felts : Kinetics And Equilibrium Studies*. 9.
- Luu, C., Hanh, N., Huynh, L., Thanh, V., Giao, D. H., Phong, H. Q., Y, V. T. N., Thi, D., & Anh, V. (2023). *Preparation And Characterization Of Magnetic-Lignin Nanoparticles With Potential Applications For Drug Delivery*. 15(3), 64–71.
- Manyangadze, M., Chikuruwo, N. H. M., Narsaiah, T. B., Chakra, C. S., & Radhakumari, M. (2020). *South African Journal Of Enhancing Adsorption Capacity Of Nano-Adsorbents*

- Via Surface Modification : T A Review. 31, 25–32.*
- Medhi, H., Chowdhury, P. R., Baruah, P. D., & Bhattacharyya, K. G. (2020). *Kinetics Of Aqueous Cu (II) Biosorption Onto Thevetia Peruviana Leaf Powder. Ii.*
- Merpiseldin Nitsae, H. R. L. S., Martinus, S. M., & Imanuel J. Emola. (2021). Studi Adsorpsi Metilen Biru Menggunakan Arang Aktif Tempurung Lontar (*Borassus Flabellifer* L.) Asal Nusa Tenggara Timur. 6(1), 46–57.
- Mohammadzadeh, F., Golshan, M., & Asl, V. H. (2023). *Adsorption Kinetics Of Methylene Blue From Wastewater Using Ph - Sensitive Starch - Based Hydrogels. Scientific Reports, 1–14.*
- Muammar Khadafi, Zulnazri Zulnazri, Eddy Kurniawan, Sulhatun, R. D. (2022). Isolasi Sabut Kelapa Dengan Metode *Chessson-*. Kimia, Jurusan Teknik Teknik, Fakultas Malikussaleh, Universitas Utama, Kampus Teungku, Cot Reuleut, Nie Batu, Muara, 1(Mei), 40–51.
- Muhammadin Hamid, Indri Dayana, Habib Satria, Dadan Ramdan, Junaidi, Muhammad Fadlan Siregar, D. S., & Wijoyo, H. (2026). *Influence Of Silica Addition In Magnetite (Fe₃O₄) Particles On Physical Properties For The Application Of Nano-Lubricant.*
- Mukhlishin, H., Rahmalia, W., & Usman, T. (2020). Selektivitas Adsorpsi Asam Lemak Bebas (Alb) Dan Beta Karoten Minyak Sawit Mentah Menggunakan Metakaolin Teraktivasi Kalium Karbonat(K₂CO₃). *Journal Of Chemical Process Engineering Selektivitas Adsorpsi Asam Lemak Bebas (Alb) Dan Beta Karoten Minyak, 5(2655).*
- Nufus Kanani, Rahmayetty, E. Y. W. (2018). Pengaruh Penambahan FeCl₃ Dan Al₂O₃ Terhadap Kadar Lignin Pada Delignifikasi Tongkol Jagung Dengan Pelarut NaOH Menggunakan Bantuan Gelombang Ultrasonik. 1–9.
- Nur Asiah, Novi Sylvia, S. B. (2022). Adsorpsi Zat Warna Methylene Blue Menggunakan Adsorben Dari Ampas Teh Pada Kolom. 2(Juni), 75–86.
- Nurzihan, A., Ulfah, R., Hrp, N., Siregar, S. H., & Nasution, H. (2019). Adsorpsi Zat Warna *Methylene Blue* Menggunakan Bentonit Termodifikasi *Ethylene Diamine Tetra Aceticacid (Edta)*. 1–13.
- Pebrina, D., Matematika, F., Alam, P., Andalas, U., Unand, K., & Manis, L. (2023). Sintesis Dan Karakterisasi Sifat Optik Nanokomposit Fe₃O₄ @ ZnO : C. 12(2), 298–303.
- Permady, M. W. E., & Mustakim, Z. (2024). Adsorpsi Zat Warna *Methylene Blue* Menggunakan Cangkang Biji Kelapa Sawit Sebagai Adsorben *Adsorption Of Methylene Blue Dyes Using Palm Kernel Shells As Adsorbent.* 1(2), 47–54.
- Plant, P., Centre, P. D., & License, A. (2024). *Crystallographic , Morphological , Magnetic , And Thermal Characterization Of Superparamagnetic Magnetite Nanoparticles (Fe₃O₄)*

4) Synthesized By Chemical Coprecipitation Method And Calcined At 250 ° C For 4 Hr. 2024.

- Pourbaba, R., Abdulkhani, A., Rashidi, A., & Ashori, A. (2024). *Lignin Nanoparticles As A Highly Efficient Adsorbent For The Removal Of Methylene Blue From Aqueous Media. Scientific Reports*, 1–13.
- Rahmayanti, M., & Santosa, S. J. (2015). *Sonochemical Co-Precipitation Synthesis Of Gallic Acid-Modified Magnetite. 1101*, 286–289.
- Rahmiana Zein, I. T. M., Emriadi, Ramadhani Putri, & Syiffa, F. (2023). Potensi Biosorben Kulit Batang Sagu (*Metroxylon Sago*) Untuk Penyerapan Zat Warna Crystal Violet: Studi Isoterm, Kinetika, Termodinamika, Dan Aplikasi. 15(2), 83–98.
- Rendo, D. (2021). *Adsorption Of Methylene Blue Dye Using Fe₃O₄ Magnetized Natural Zeolite Adsorbent. 24(2)*, 51–57.
- Rohmiyatul Islamiyati, Y. D. A. S. Dan W. (2013). 1 , 2 2 2.
- Sahumena, M. H., Nurrohinta, E., Jenderal, J., No, S., & Gorontalo, K. (2020). Identifikasi Jamu Yang Beredar Di Kota Kendari Menggunakan Metode Spektrofotometri Uv-Vis. 2(September), 65–72.
- Sarah Alharthi, Tahira Bibi, C E. Y. S. And A. A. (2025). *Nanoscale Advances Highly Efficient Removal Of Dibutyl Phthalate From Wastewater Using A Novel Hydrophilic – Lipophilic Magnetic Adsorbent Based On Silica-Coated Iron Oxide Nanoparticles* . 4962–4979. <https://doi.org/10.1039/D5na00436e>
- Setyorini, D., Arninda, A., Qodim, A., & Panjaitan, R. (2023). Penentuan Konstanta Isoterm Freundlich Dan Kinetika Adsorpsi Karbon Aktif Terhadap Asam Asetat *Determination Of Isotherm Freundlich Constant And Adsorption Kinetics Of Activated Carbon To Acetic Acid. 20(3)*, 149–155.
- Shui, T., Feng, S., Chen, G., Li, A., Yuan, Z., Shui, H., Kuboki, T., & Xu, C. (2017). *Biomass And Bioenergy Synthesis Of Sodium Carboxymethyl Cellulose Using Bleached Crude Cellulose Fractionated From Cornstalk. 105*, 51–58.
- Suprpto, Pratama, S. R., & Abdillah, M. (2022). *Modification Of Corn Starch (Zea Mays , [L]) And Xanthan Gum With Citric Acid Crosslinking Agent Modifikasi Pati Jagung (Zea Mays , [L]) Dan Xanthan Gum Dengan Crosslinking Agent Asam Sitrat. 1611–1621*.
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). *Physisorption Of Gases , With Special Reference To The Evaluation Of Surface Area And Pore Size Distribution (Iupac Technical Report)* . 87, 1051–1069.

- Tiantian Chen, Jiayu Sun, Ruixue Jiang, Tongfei Zhang, Y. Z. And X. L. (2024). *Adsorption Mechanism Of Methylene Blue On Purified Red Phosphorus And Effects Of Different Temperatures On Methylene*.
- Usgodaarachchi, L., Thambiliyagodage, C., Wijesekera, R., & Bakker, M. G. (2021). *Current Research In Green And Sustainable Chemistry Synthesis Of Mesoporous Silica Nanoparticles Derived From Rice Husk And Surface-Controlled Amine Functionalization For Efficient Adsorption Of Methylene Blue From Aqueous Solution*. *Current Research In Green And Sustainable Chemistry*, 4(March), 100116.
- Vasiljevi, N., & Pani, S. (2025). *Investigation Of The Kinetics Of The Adsorption Of Methylene Blue On Activated Carbon*. 1–10.
- Wang, S., Kong, M., Li, W., Yi, E., Wang, Y., Shen, M., Liu, H., Ren, S., Guo, Y., & Zhang, J. (2023). *Carboxymethyl Cellulose / Polyacrylamide / Fe₃O₄ Magnetic Ion Imprinting Biosorbent For Removal And Recovery Of La³⁺*.
- Watumlawar, E. C., & Park, B. (2025). *Crosslinking Of Hardwood Lignin With Citric Acid For Sustainable Wood Adhesives*. 62–70.
- Yuli Ristianingsih, Alit Istiani, F. I. (2020). *Keseimbangan Adsorpsi Zat Warna Metilen Blue Dengan Adsorben Karbon Aktif Tongkol Jagung Terimpregnasi Fe₂O₃*. 7(1), 47–55.
- Yuris, Chandrawati Cahyani, Dan A. (2014). *Potensi Lignin Untuk Penanganan Logam Berat Cr (VI)*. Vi, 163–172.
- Zhang, Z., Chen, Y., & Wu, C. (2022). *Dual-Modified Lignin-Assembled Multilayer Microsphere With Excellent Pb²⁺ Capture*.

LAMPIRAN A

PERHITUNGAN PEMBUATAN BAHAN KIMIA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

1. Tahap Ekstraksi Lignin dan Selulosa

a. Kebutuhan Larutan NaOH 12%

$$\begin{aligned}\text{Konsentrasi NaOH (yang dibutuhkan)} &= 12\% \\ \text{Volume NaOH} &= 100 \text{ mL} \\ \text{Konsentrasi NaOH (\%)} &= \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \times 100\% \\ 12\% &= \frac{\text{massa}}{2500 \text{ mL}} \times 100\% \\ \text{Massa NaOH} &= \frac{2500 \times 12}{100} \\ \text{Massa NaOH} &= 300 \text{ g}\end{aligned}$$

NaOH 12% didapatkan dari 300 g NaOH dilarutkan dalam 250 mL aquadest.

b. Kebutuhan Larutan H₂SO₄ 72%

$$\begin{aligned}\text{Konsentrasi H}_2\text{SO}_4 \text{ (yang dibutuhkan)} &= 72\% \\ \text{Volume H}_2\text{SO}_4 &= 160 \text{ mL} \\ \text{Konsentrasi H}_2\text{SO}_4 &= 97\% \\ M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ 97\% \times V_1 &= 72\% \times 160 \\ V_1 &= \frac{72 \times 160}{97} \\ \text{Volume H}_2\text{SO}_4 &= 116 \text{ mL}\end{aligned}$$

H₂SO₄ 72% didapatkan dari 116 mL H₂SO₄ 98% dilarutkan dalam 160 mL aquadest.

2. Tahap Pengujian Kandungan Kimia Lignin dan Selulosa

a. Kebutuhan Larutan 1N H₂SO₄

$$\begin{aligned}\text{Konsentrasi H}_2\text{SO}_4 \text{ (yang dibutuhkan)} &= 1\text{N} \\ \text{Volume H}_2\text{SO}_4 &= 300 \text{ mL} \\ \text{Konsentrasi H}_2\text{SO}_4 &= 98\% \\ \rho \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ 98\%} &= 1,84 \text{ g/mol} \\ \text{Mr H}_2\text{SO}_4 &= 98 \text{ g/mol} \\ \text{Konsentrasi H}_2\text{SO}_4 &= \frac{10 \times \rho \times \% \text{H}_2\text{SO}_4}{98} \\ &= 18,4 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_1 \times V_1 &= N_2 \times V_2 \\
 1 \times 300 \text{ mL} &= 18,4 \times V_2 \\
 V_2 &= 16,3 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

1N H₂SO₄ didapatkan dari 16,3 mL H₂SO₄ 98% ditambahkan aquadest hingga 300 mL

3. Tahap Pembuatan *Carboxymethyl Cellulosa* (CMC)

a. Kebutuhan Larutan NaOH 50%

$$\begin{aligned}
 \text{Konsentrasi NaOH (yang dibutuhkan)} &= 50\% \\
 \text{Volume NaOH} &= 300 \text{ mL} \\
 \text{Konsentrasi NaOH (\%)} &= \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \times 100\% \\
 50\% &= \frac{\text{massa}}{10 \text{ mL}} \times 100\% \\
 \text{Massa NaOH} &= \frac{300 \times 50}{100} \\
 \text{Massa NaOH} &= 150 \text{ g}
 \end{aligned}$$

NaOH 50% didapatkan dari 150 g NaOH ditambahkan aquadest hingga 300 mL

b. Kebutuhan Larutan Etanol 95%

$$\begin{aligned}
 \text{Konsentrasi NaOH (yang dibutuhkan)} &= 95\% \\
 \text{Konsentrasi Etanol} &= 96\% \\
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 96\% \times V_1 &= 95\% \times \\
 V_1 &= 1039 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

Etanol 95% didapatkan dari 1039 mL etanol 96% ditambahkan aquadest hingga 1050 mL

4. Perhitungan Limbah *Artificial Methylene Blue*

1. Konsentrasi Limbah *Artificial Methylene Blue* 5 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 1000 \text{ ppm} \times V_1 &= 5 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{500}{1000} \\
 &= 0,5 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

2. Konsentrasi Limbah *Artificial Methylene Blue* 10 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 1000 \text{ ppm} \times V_1 &= 10 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{1000}{1000} \\
 &= 1 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

3. Konsentrasi Limbah *Artificial Methylene Blue* 15 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 1000 \text{ ppm} \times V_1 &= 15 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{1500}{1000} \\
 &= 1,5 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

4. Konsentrasi Limbah *Artificial Methylene Blue* 20 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 1000 \text{ ppm} \times V_1 &= 20 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{2000}{1000} \\
 &= 2 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

5. Konsentrasi Limbah *Artificial Methylene Blue* 25 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 1000 \text{ ppm} \times V_1 &= 25 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{2500}{1000} \\
 &= 2,5 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

5. Perhitungan Pengujian pH_{pzc}

NaCl 0,1 M dalam 500 mL

Massa = mol x massa molar

Mol = m x v

$$\begin{aligned}
 \text{Massa} &= m \times v \times \text{massa molar (mr)} \\
 &= 0,1 \text{ M} \times 500 \text{ mL} \times 58,9 \text{ g/mol} \\
 &= 0,1 \text{ m} \times 0,5 \text{ L} \times 58,5 \text{ g/mol} \\
 &= 2,925 \text{ g}
 \end{aligned}$$

6. Perhitungan Pengujian Adsorpsi Adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}$ - Lignin-CA

$$\text{Mr NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\begin{aligned}\text{Volume Larutan} &= 1000 \text{ mL} \\ &= 1 \text{ L}\end{aligned}$$

$$\text{Konsentrasi NaOH} = 1\text{M}$$

$$\begin{aligned}\text{Mol (n)} &= 1 \text{ mol/L} \times 1 \text{ L} \\ &= 1 \text{ mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Massa NaOH} &= n \times \text{Mr} \\ &= 1 \text{ mol} \times 40 \text{ g/mol} \\ &= 40 \text{ g}\end{aligned}$$

1M NaOH didapatkan dari 40 g NaOH dilarutkan dalam 1 L aquadest

7. Perhitungan *Reusability* Adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ Terhadap Limbah Artifisial Zat Warna *Methylene Blue*

a. Ethanol : HCL = 3 : 1

$$\text{Volume Larutan} = 50 \text{ mL}$$

$$\begin{aligned}\text{Volume Ethanol} &= \frac{3}{4} \times 50 \\ &= 37,5 \text{ mL}\end{aligned}$$

Ethanol didapatkan 37,5 mL dan ditambahkan dalam 50 mL aquadest
HCL

b. Ethanol : HCL = 3 : 1

HCL 1M

$$\text{Volume Larutan} = 50 \text{ mL}$$

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$1 \times V_1 = 0,1 \times 50 \text{ mL}$$

$$V_1 = 5 \text{ mL}$$

1M HCL didapatkan 5 mL dan ditambahkan dalam 50 mL aquadest.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

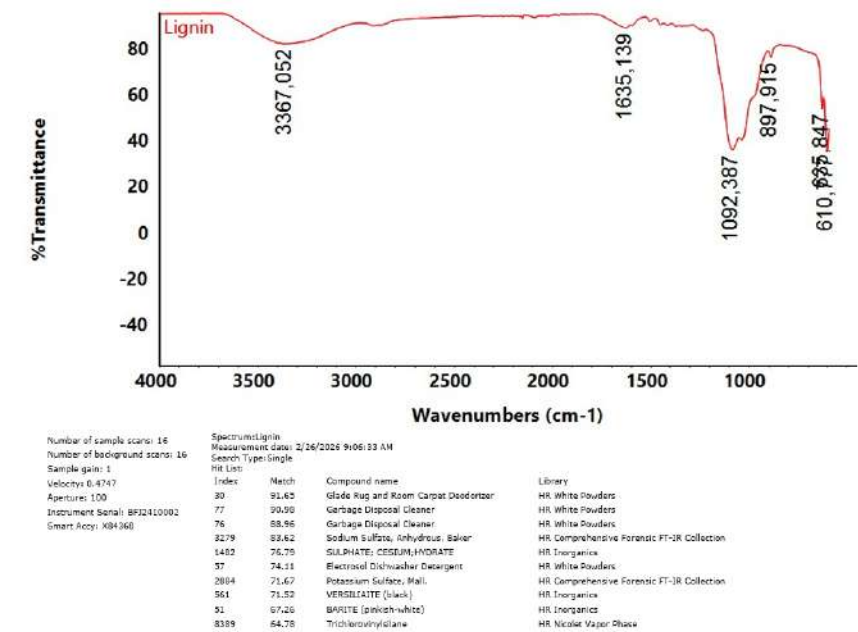
LAMPIRAN B

PENGUJIAN KARAKTERISASI

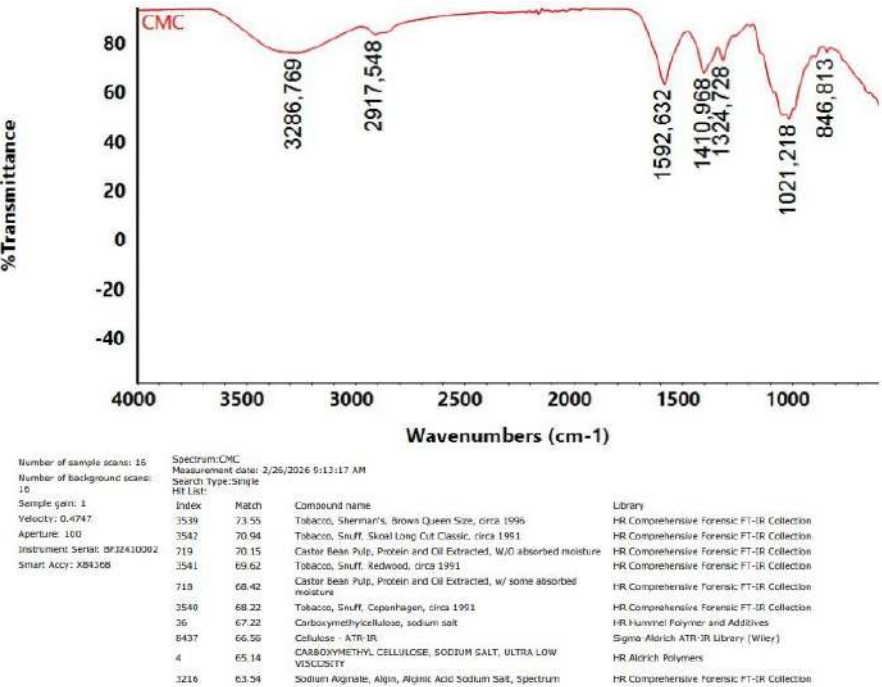
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

C.1 Uji Karakterisasi FTIR

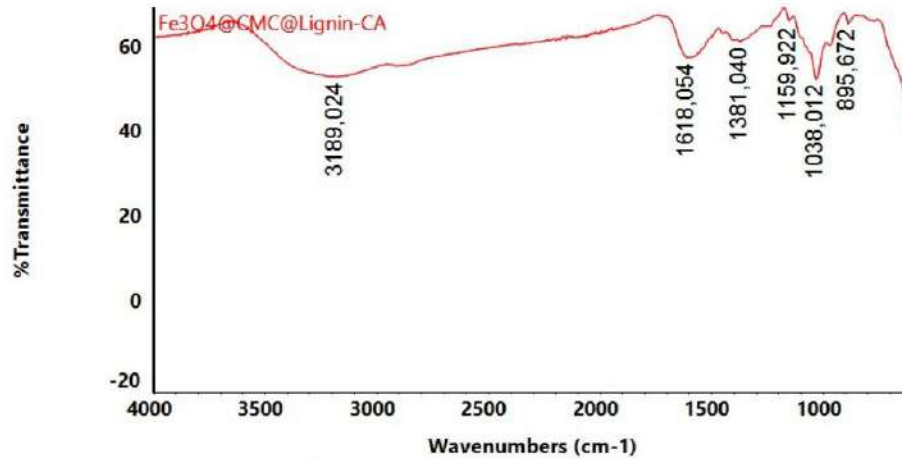
a. Lignin



b. CMC

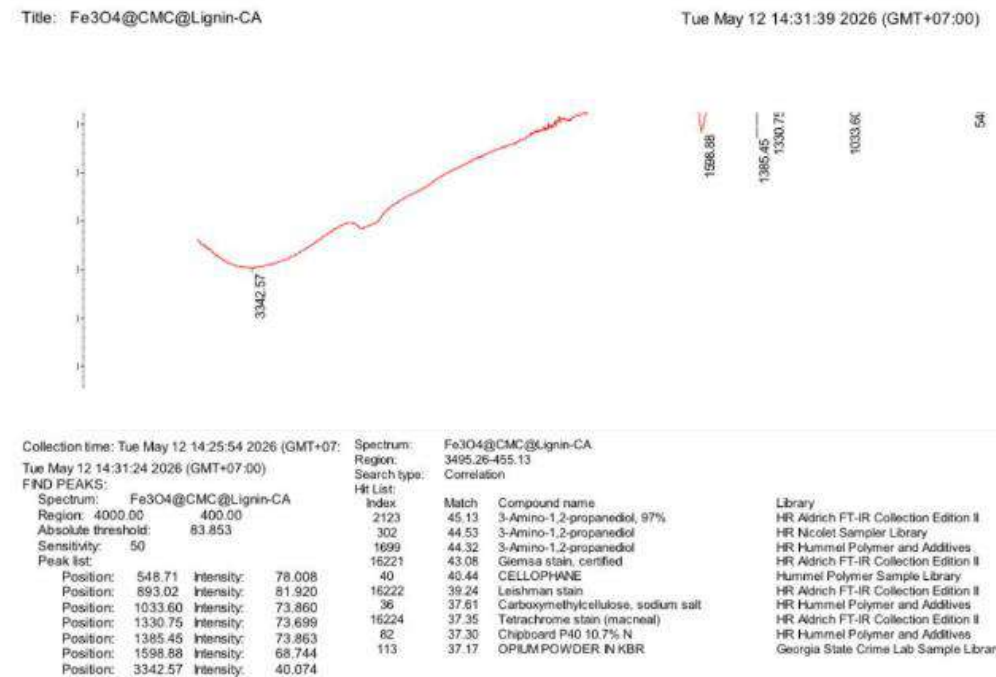


c. Fe₃O₄@CMC@Lignin-CA



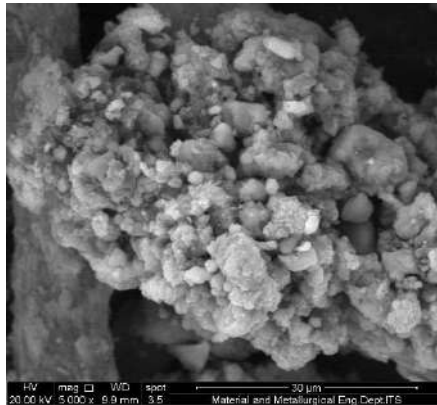
Number of sample scans: 16	Spectrum: Fe3O4@CMC@Lignin-CA			Library:
Number of background scans: 16	Measurement date: 4/7/2026 2:16:48 PM			HR Comprehensive Forensic FT-IR Collection
Sample gain: 1	Search type: Single			Sigma-Aldrich ATR-IR Library (Wiley)
Velocity: 0.4747	IR List:			KidneyASO
Aperture: 160	Index	Match	Compound name	HR Inorganics
Instrument Serial: BP32410002	3731	61.32	Xylan, (polysaccharide, hemicellulose), Cham Serv.	HR Inorganics
Smart Accy: KB4366	10640	58.54	Xylan from oat spels - ATR-IR	HR Inorganics
	18	55.19	Dalmine	HR Inorganics
	332	55.01	MAGNETOTRIPLITE (brown)	HR Comprehensive Forensic FT-IR Collection
	1353	54.31	PHOSPHATE; LITHIUM,HEMIHYDRATE	HR Industrial Coatings
	1350	54.16	PHOSPHATE; COPPER(II); TRIHYDRATE	HR Inorganics
	345	53.57	Agave Fiber Bundle, Processed in Na2CO3/water (hot) to remove parenchyma/pulp	HR Inorganics
	1604	53.40	RO-3097 KROMA RED	Common Materials
	1735	52.43	CERAMICS, FERRITE	
	236	51.54	Stamp Pad Ink (glycerine based)	

d. Setelah Adsorpsi

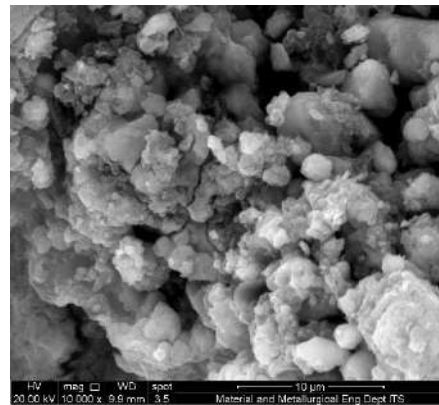


C2. Uji Karakterisasi SEM

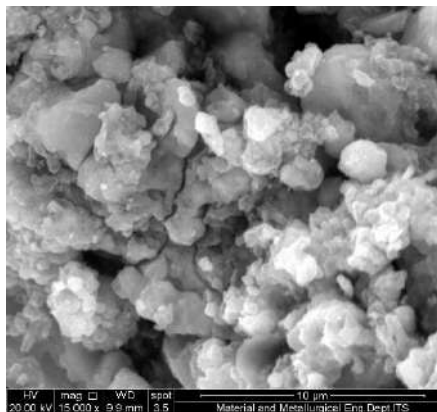
a. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$



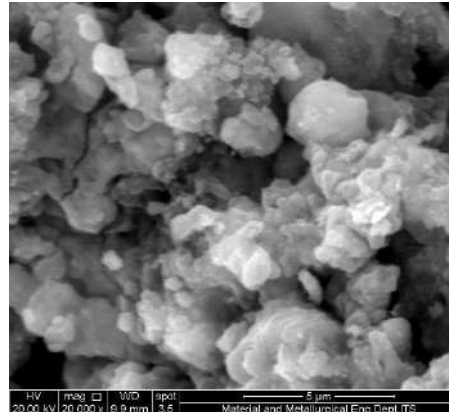
Perbesaran 5000x



Perbesaran 10000x



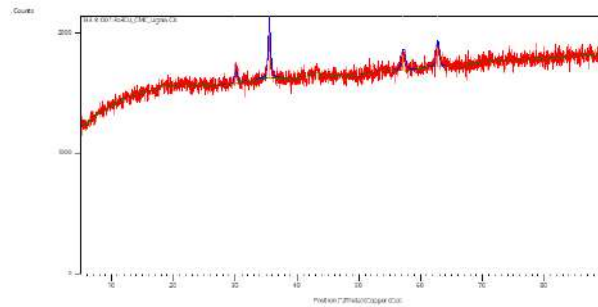
Perbesaran 15000x



Perbesaran 20000x

C3. Uji Karakterisasi XRD

a. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2 θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2 θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
30.0552	74.09	0.5196	2.97333	20.72
35.5183	357.52	0.4330	2.52753	100.00
57.1759	123.02	0.6927	1.61113	34.41
62.7215	157.36	0.4330	1.48136	44.02

Pattern List: (Bookmark 4)

Document History: (Bookmark 5)

Insert Measurement:

- File name = 133-R-007-Fe₃O₄_CMC_Lignin-CA.rd
- Modification time = "4/25/2026 11:51:34 AM"
- Modification editor = "ASTUS"

C4. Uji Karakterisasi BET

a. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$

Analysis Information									
Sample		ID	0484_3.i		Weight	0.9829g			
Description		Fe3O4@CMC@Uginin-CA							
Analysis		Data ID	(5c820b0b-5517-42f2-95b6-6d871fc427b2e)						
Operator		Musuf	Date	2026.06.17		Duration	130.4min		
Instrument		St 1 on NOVA touch 4XL (s/n: 1701705100601)				Firmware	1.07		
Comments		description of sample							
Ambient Temp.		31.56°C	Void Volume	Molecular Weight		NOVA mode	Cell ID	41	
Cell Type		9mm with rod	Thermal Delay	300sec			Pe Mode	Continuous	
Adsorbate		Name	Nitrogen	Molecular Weight	28.013 g/mol		Cross Section Area	16.24 cm²	
Non-ideality		6.5800000-05 1/min	Bath Temperature	77.35K					
Degas information		Time	5.0 1/min	Temp	100.000000°C				
Data Reduction Parameters									
Thermal Transpiration		yes					Eff. Molec. Diameter	0A	
Eff. Cell Diameter		0mm							

Relative Pressure, P/Po	Volume Adsorbed @STP cc/g
0.0453476	2.61841
0.147235	4.90703
0.251342	5.11099
0.351537	5.30927
0.450767	5.31418
0.548271	6.97659
0.647304	8.97253
0.749991	13.7496
0.845088	22.1480
0.947920	32.4251
0.853659	30.5911
0.750503	22.0154
0.650011	13.6650
0.549293	8.34697
0.450203	4.82080
0.354687	2.91924
0.252400	2.11050
0.151027	1.26779
0.0508388	-1.97858

		Analysis Information			
Sample	ID	0484_3 i	Weight	0.0823 g	
	Description	Fe3O4@CMC@Uginin-CA			
Analysis	Data ID	[5c802b0b-55f7-42f2-95b6-6d81fc427b2e]			
	Operator	Yusuf	Date	2026.06.17	Duration
	Instrument	SI 1 on NOVA touch 4LX [s/n:170170510001]			130.4 min
	Comments	description of sample			1.07
Ambient Temp.	31.56 °C	Void Volume Mode	NOVA mode	Cell ID	41
Cell Type	9mm with rod	Thermal Delay	300 sec	Po Mode	Continuous
Adsorbate	Name	Nitrogen	Molecular Weight	28.013 g/mol	Cross Section Area
	Non-ideality	6.580000e-05 1/atom	Bath Temperature	77.35 K	16.2 Å²/mol
Degas information	Time	6.0 hours	Temp	100.000000 °C	
Data Reduction Parameters					
Thermal Transpiration	yes			Eff. Molec. Diameter	Da
Eff. Cell Diameter	0 mm				
Adsorbate Model	Name	Nitrogen	Molecular Weight	28.0134 g	Cross Section Area
	Bath Temperature	77.35 K			16.2 Å²/mol

BET Multi-point BET results	
Isotherm Branch	Adsorption
Slope	256.005
Intercept	-10.2799
Correlation coeff., <i>r</i>	0.998756
C constant	-23.9034
Surface area	14.172 m ² /g

Graph - BET Multi-point BET

Graph of BET and BF points for CO₂ adsorption on 100% CO₂. The y-axis is $1/[W(P/P_0 - 1)]$ and the x-axis is Relative Pressure. The legend indicates: + BET(all), ● BET, and — BF.

Relative Pressure	$1/[W(P/P_0 - 1)]$ (BET)	$1/[W(P/P_0 - 1)]$ (BET(all))
0.15	28	28
0.25	52	52
0.35	80	80

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN C

DOKUMENTASI PELAKSANAAN PENELITIAN

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Tahap <i>Pre -Treatment</i> Tongkol Jagung			
1 Pengeringan tongkol jagung dibawah sinar matahari selama 2 hari dengan suhu lingkungan 25°-30°	2 Penggilingan tongkol jagung	3 Pengayakan menggunakan ayakan 60 mesh	4 Serbuk tongkol jagung

Tahap Ekstraksi Lignin dan Selulosa

1  Menimbang serbuk tongkol jagung.	2  Menambahkan larutan NaOH 12%.	3  Mencampurkan kedua bahan tersebut kemudian merefluks selama 2 jam pada suhu 110°.	4  Proses pemisahan residu (selulosa) dan filtrat (lignin)
--	---	--	---

5  Residu (selulosa) di oven selama 2 jam pada suhu 90°	6  Serbuk selulosa telah dibuat	7  Filtrat (lignin) dilakukan pengasaman pH 3 dengan larutan H₂SO₄ dan diendapkan 15 menit.	8  Proses sentrifugasi 500 rpm selama 15 menit
9  Endapan lignin di oven pada suhu 60° selama 2 jam	10  Serbuk lignin telah dibuat		

Proses Pembuatan <i>Crosslinker</i> Lignin dengan Asam Sitrat			
1	2	3	4
			
Menimbang lignin	Menimbang asam sitrat	Mencampurkan kedua bahan tersebut dan menambahkan aquadest kemudian diaduk selama 2 jam	Proses oven pada suhu 140° selama 2 jam

5	6	7
		
Proses penyaringan	Proses pengeringan dengan suhu 60° selama 2 jam	Produk telah jadi

Proses Pembuatan <i>Carboxymethyl Cellulose</i> (CMC) dari <i>Cellulose</i> Tongkol Jagung			
1  30 gram selulosa	2  Mencampurkan dengan 2,97 gram NaOH 50% dan 300 mL aquadest.	3  Memanaskan pada 35 °C selama 1 jam disertai pengadukan 150 rpm	4  Larutan etherifikasi (2,97 g NaOH 50% dan 35,1 g asam kloroasetat, + diencerkan 1050 mL dengan etanol 95%)
5  Mencampurkan larutan alkalisasi dan etherifikasi dan dipanaskan pada 75 °C selama 1,5 jam, pengadukan 200 rpm.	6  mendinginkan hingga suhu ruang	7  Menetralkan larutan dengan asam klorida, pH=7	8  Menyaring endapan dan dicuci dengan etanol 95%

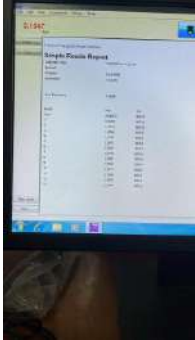
9	 Mengeringkan pada suhu 105 °C selama 3 jam	10	 Produk CMC sudah jadi
---	---	----	--

Proses Pelapisan Magnetik Besi Oksida (Fe_3O_4) dengan <i>Carboxymethyl Cellulose</i> (CMC)			
1	2	3	4
 Menimbang CMC	 Menimbang $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	 Proses pengadukan cepat selama 1 jam dengan penambahan N_2/injeksi	 Proses penambahan ammonia sampai pH 10

5	6	7
		
Proses sentrifugasi	Proses pengeringan suhu 110° selama 5 jam	Produk telah dibuat

Proses Penggabungan Fe ₃ O ₄ @CMC@Lignin-CA			
1	2	3	4
			
Menimbang Fe ₃ O ₄ @CMC 1 gram	Mencampurkan dengan 100 mL air dan 20 mL ethanol	Proses sonikasi	Menimbang Lignin-CA sebanyak 0,5 gram

5	6	7
		
Campuran $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}$ dan Lignin-CA dengan kecepatan 600 rpm dengan suhu 60°C .	Hasil penyaringan $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$	Produk $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}@\text{Lignin-CA}$ telah dibuat

Proses Pembuatan Kurva Kalibrasi			
1	2	3	4
			
Larutan MB konsentrasi 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, dan 25 ppm	Kondisi pH 10	Pembacaan Spektro UV- VIS	Proses pembuatan kurva kalibrasi

Pengujian pH _{pzc}			
1  Membuat Larutan NaCl 0,1 M	2  Membagi larutan NaCl ke dalam erlenmeyer pada pH dan menambahkan dosis yg telah ditentukan	3  Mengaduk menggunakan shaker	4  Mengukur dan mencatatn pH akhir

Pengujian Adsorpsi Variasi Konsentrasi				
1  Menimbang Adsorben	2  Larutan MB Konsentrasi 5, 10, 15, 20 dan 25 ppm	3  Mengaduk larutan	4  Proses pemisahan adsorben dari larutan	5  Pembacaan nilai adsorbansi

Pengujian Adsorpsi Variasi Waktu Kontak				
1	2	3	4	5
 Menimbang Adsorben	 Larutan MB Waktu Kontak 10, 20, 30, 40, 50, 60 dan 70 menit	 Mengaduk larutan	 Proses pemisahan adsorben dari larutan	 Pembacaan nilai adsorbansi

Pengujian Adsorpsi Variasi Dosis				
1	2	3	4	5
 Menimbang Adsorben 0,02, 0,03, 0,04, 0,06, 0,08, 0,1 g/L	 Larutan MB variasi dosis	 Mengaduk larutan	 Proses pemisahan adsorben dari larutan	 Pembacaan nilai adsorbansi

Pengujian Adsorpsi pH				
1	2	3	4	5
				
Menimbang Adsorben	Larutan MB pH 7, 8, 9, 10 dan 11	Mengaduk larutan	Proses pemisahan adsorben dari larutan	Pembacaan nilai adsorbansi

Pengujian Adsorpsi Suhu				
1	2	3	4	5
				
Menimbang Adsorben	Larutan MB suhu 25°C, 35°C dan 45°C,	Mengaduk larutan	Proses pemisahan adsorben dari larutan	Pembacaan nilai adsorbansi

Hasil Adsorpsi				
1	2	3	4	5
				
Variasi Konsentrasi	Variasi Waktu Kontak	Variasi Dosis	Variasi pH	Variasi Suhu

Proses <i>Reusability</i> Adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CMC}$ - Lignin-CA				
1	2	3	4	5
				
Menimbang Adsorben	Adsorpsi MB	Penyaringan Adsorben	Pengeringan Adsorben	Menimbang Adsorben Hasil Adsorpsi

Hasil *Reusability* 1 kali



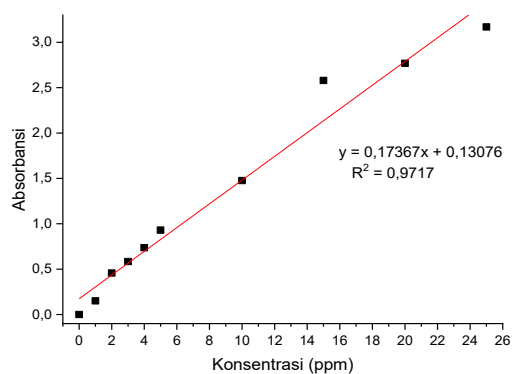
LAMPIRAN D

DATA DAN PERHITUNGAN

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

D1. Adsorbansi Kurva Kalibrasi *Methylene Blue*

Konsentrasi (ppm)	Absorbansi	Rata-rata
0	0	0
1	0,1502	0,1502
	0,1503	
	0,1502	
2	0,4567	0,4572
	0,4569	
	0,458	
3	0,5841	0,5838
	0,5839	
	0,5834	
4	0,7364	0,7357
	0,7358	
	0,7348	
5	0,9311	0,9302
	0,9299	
	0,9295	
10	1,4773	1,4765
	1,4765	
	1,4757	
15	2,5917	2,5797
	2,5683	
	2,5790	
20	2,7491	2,7684
	2,7685	
	2,7877	
25	3,1945	3,1698
	3,1602	
	3,1547	



D2. Hasil Adsorbansi

A. Pengujian Adsorbansi Variasi Konsentrasi Awal

Variasi		Kode Sampel	Konsentrasi Awal (ppm)	Absorbansi	Rata - rata Adsorbansi	Konsentrasi Akhir (ppm)	Perentase Removal (%)	Kapasitas Adsorbansi (mg/g)
Konsentrasi Adsorben (ppm)	5	A1	5	0.2646	0.2635	0.796	84.1%	140.15
				0.2635				
				0.2624				
	10	A2	10	0.5240	0.5173	2.815	71.9%	239.50
				0.5180				
				0.5100				
	15	A3	15	0.8135	0.8126	5.164	65.6%	327.87
				0.8120				
				0.8123				
	20	A4	20	1.0700	1.0777	7.273	63.6%	424.25
				1.0620				
				1.1010				
	25	A5	25	1.4350	1.4260	10.044	59.8%	498.53
				1.4219				
				1.4212				

B. Pengujian Adsorbansi Variasi Waktu Kontak

Variasi		Kode Sampel	Konsentrasi Awal (ppm)	Absorbansi	Rata - rata Absorbansi	Konsentrasi Akhir (ppm)	Perentase Removal (%)	Kapasitas Adsorbansi (mg/g)
Waktu Kontak (menit)	10	B1	25	1.4823	1.4829	10.497	58.0%	483.44
				1.4831				
				1.4834				
	20	B2	25	1.4312	1.4351	10.116	59.5%	496.14
				1.4325				
				1.4415				
	30	B3	25	1.2786	1.2747	8.840	64.6%	538.65
				1.2769				
				1.2687				
	40	B4	25	1.2736	1.2687	8.793	64.8%	540.25
				1.2673				
				1.2653				
	50	B5	25	1.456	1.4668	10.369	58.5%	487.71
				1.4789				
				1.4656				
	60	B6	25	1.8901	1.8780	13.640	45.4%	378.67
				1.8790				
				1.865				
	70	B7	25	1.6780	1.6738	12.015	51.9%	432.82
				1.6720				
				1.6715				

C. Pengujian Adsorbansi Variasi Dosis

Variasi		Kode Sampel	Konsentrasi Awal (ppm)	Absorbansi	Rata - rata Adsorbansi	Konsentrasi Akhir (ppm)	Perentase Removal (%)	Kapasitas Adsorbansi (mg/g)
Dosis Adsorben (gram/liter)	0.02	D1	25	1.4174	1.4161	9.965	60.1%	751.76
				1.4146				
				1.4162				
	0.03	D2	25	1.3514	1.3518	9.453	62.2%	518.23
				1.3513				
				1.3526				
	0.04	D3	25	1.2672	1.2679	8.786	64.9%	405.36
				1.2678				
				1.2686				
	0.06	D4	25	1.1864	1.2374	8.544	65.8%	274.27
				1.263				
				1.2629				
	0.08	D5	25	1.2008	1.2002	8.248	67.0%	209.40
				1.1998				
				1.2001				
	0.1	D6	25	1.1474	1.1238	7.640	69.4%	173.60
				1.1221				
				1.1020				

D. Pengujian Adsorbansi Variasi pH

Variasi		Kode Sampel	Konsentrasi Awal (ppm)	Absorbansi	Rata - rata Adsorbansi	Konsentrasi Akhir (ppm)	Perentase Removal (%)	Kapasitas Adsorbansi (mg/g)
pH	7	D1	25	0.991	0.9908	6.582	73.7%	613.95
				0.9912				
				0.9902				
	8	D2	25	0.8321	0.8323	5.320	78.7%	655.99
				0.8324				
				0.8323				
	9	D3	25	0.8251	0.8246	5.259	79.0%	658.03
				0.8236				
				0.825				
	10	D4	25	0.8076	0.8070	5.119	79.5%	662.69
				0.8067				
				0.8067				
	11	D5	25	0.8692	0.9028	5.881	76.5%	637.28
				0.970				
				0.8697				

E. Pengujian Adsorbansi Variasi Suhu

Variasi		Kode Sampel	Konsentrasi Awal (ppm)	Absorbansi	Rata - rata Adsorbansi	Konsentrasi Akhir (ppm)	Perentase Removal (%)	Kapasitas Adsorbansi (mg/g)
Suhu (°C)	25	E1	25	0.5762	0.5762	3.283	86.9%	723.88
				0.5763				
				0.5762				
	35	E2	25	0.6485	0.6482	3.856	84.6%	704.79
				0.6485				
				0.6477				
	45	E3	25	0.9468	0.9472	6.235	75.1%	625.51
				0.9469				
				0.9479				

F. Pengujian Adsorbansi *Reusability*

Variasi		Kode Sampel	Konsentrasi Awal (ppm)	Absorbansi	Rata - rata Absorbansi	Konsentrasi Akhir (ppm)	Perentase Removal (%)	Kapasitas Adsorbansi (mg/g)
Reusability	0.1	R0	25	0.6754	0.6508	3.877	84.5%	704.11
				0.6980				
				0.5790				
	0.1	R1	25	0.8328	0.8329	5.325	78.7%	655.83
				0.8323				
				0.8335				

Surabaya, 24 Juni 2026
Mengetahui
Kepala Laboratorium Limbah


Vivin Setiani, S.T., M.Eng
NIP. 198909162015042002

D3. Data Isoterm dan Kinetika Adsorpsi

1. Isoterm Adsorpsi

a. Isoterm *Langmuir*

Konsentrasi akhir (Ce)	Kapasitas adsorpsi (qe)	Ce/Qe (g/L)
0.796	140.15	0.006
2.815	239.50	0.012
5.164	327.87	0.016
7.273	424.25	0.017
10.044	498.53	0.020

b. Isoterm *Freundlich*

Konsentrasi Akhir (Ce)	Kapasitas adsorpsi (qe)	Log Ce	Log qe
0.796	140.15	-0.099	2.147
2.815	239.50	0.449	2.379
5.164	327.87	0.713	2.516
7.273	424.25	0.862	2.628
10.044	498.53	1.002	2.698

2. Kinetika Adsorpsi

a. Pseudo – Orde Nol

C ₀ (ppm)	C _t (ppm)	t (menit)	q _t (mg/g)
25	10.497	10	483.44
25	10.116	20	496.14
25	8.840	30	538.65

b. Pseudo – Orde Satu

C ₀ (ppm)	C _t (ppm)	t (menit)	q _t (mg/g)	q _e	q _e - q _t	ln (q _e - q _t)
25	10.497	10	483.44	540.25	56.80	4.03956994
25	10.116	20	496.14		44.11	3.786653589
25	8.840	30	538.65		1.59	0.464419251
*25	8.793	40	540.25		0.00	-

*Kondisi setimbang

c. Pseudo – Orde Dua

C ₀ (ppm)	C _t (ppm)	t (menit)	q _t (mg/g)	t/q _t
25	10.497	10	483.44	0.02068
25	10.116	20	496.14	0.04031
25	8.840	30	538.65	0.05569

D4. Uji Statistika

1. Uji Normalitas

a. Konsentrasi Awal

Tests of Normality							
Konsentrasi Awal		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Efisiensi Removal	5	.175	3	.	1.000	3	1.000
	10	.204	3	.	.993	3	.843
	15	.314	3	.	.893	3	.363
	20	.312	3	.	.896	3	.373
	25	.369	3	.	.789	3	.089

a. Lilliefors Significance Correction

b. Waktu Kontak

Tests of Normality						
Waktu Kontak		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk	
		Statistic	df	Sig.	Statistic	Sig.
Efisiensi Removal	10	.253	3	.	.964	.637
	20	.345	3	.	.839	.213
	30	.330	3	.	.867	.288
	40	.304	3	.	.907	.407
	50	.207	3	.	.992	.834
	60	.200	3	.	.995	.862
	70	.369	3	.	.787	.085

a. Lilliefors Significance Correction

c. Dosis Adsorben

Tests of Normality						
Dosis Adsorben		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk	
		Statistic	df	Sig.	Statistic	Sig.
Efisiensi Removal	0.02	.205	3	.	.993	.839
	0.03	.362	3	.	.805	.125
	0.04	.203	3	.	.994	.850
	0.06	.232	3	.	.980	.726
	0.08	.278	3	.	.940	.527
	0.1	.197	3	.	.996	.873

a. Lilliefors Significance Correction

d. pH

Tests of Normality						
pH		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk	
		Statistic	df	Sig.	Statistic	Sig.
Efisiensi	7	.319	3	.	.885	.339
	8	.219	3	.	.987	.780
	9	.365	3	.	.798	.109
	10	.364	3	.	.800	.114
	11	.358	3	.	.812	.144

a. Lilliefors Significance Correction

e. Suhu

Tests of Normality							
		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Suhu	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Efisiensi Removal	25	.219	3	.	.987	3	.780
	35	.361	3	.	.807	3	.132
	45	.358	3	.	.814	3	.148

a. Lilliefors Significance Correction

2. Uji Homogenitas

a. Konsentrasi Awal

Test of Homogeneity of Variances

Efisiensi Removal

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
4.174	4	10	.030

b. Waktu Kontak

Test of Homogeneity of Variances

Efisiensi Removal

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.985	6	14	.136

c. Dosis Adsorben

Test of Homogeneity of Variances

Efisiensi Removal

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
4.704	5	12	.013

Kruskal-Wallis

Ranks			
	Dosis	N	Mean Rank
Efisiensi Removal	0.02	3	2.00
	0.03	3	5.00
	0.04	3	8.00
	0.06	3	11.00
	0.08	3	14.00
	0.1	3	17.00
Total		18	

Test Statistics ^{a,b}	
	Efisiensi Removal
Chi-Square	16.579
df	5
Asymp. Sig.	.005

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: Dosis Adsorben

d. pH

Test of Homogeneity of Variances

Efisiensi			
Levene Statistic	df1	df2	Sig.
15.713	4	10	.000

Kruskal-Wallis

Ranks			
	pH	N	Mean Rank
Efisiensi	7	3	2.00
	8	3	8.00
	9	3	11.00
	10	3	14.00
	11	3	5.00
Total		15	

Test Statistics ^{a,b}	
	Efisiensi
Chi-Square	13.500
df	4
Asymp. Sig.	.009

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: pH

e. Suhu

Test of Homogeneity of Variances

Efisiensi Removal

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
5.894	2	6	.038

Kruskal-Wallis

Ranks

	Suhu	N	Mean Rank
Efisiensi Removal	25	3	8.00
	35	3	5.00
	45	3	2.00
	Total	9	

Test Statistics^{a, b}

	Efisiensi Removal
Chi-Square	7.200
df	2
Asymp. Sig.	.027

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: Suhu

3. Uji One Way ANOVA

a. Konsentrasi Awal

ANOVA

Efisiensi Removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1081.513	4	270.378	1.256E3	.000
Within Groups	2.153	10	.215		
Total	1083.666	14			

b. Waktu Kontak

ANOVA

Efisiensi Removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	859.254	6	143.209	2.582E3	.000
Within Groups	.776	14	.055		
Total	860.031	20			

c. Dosis Adsorben

ANOVA

Efisiensi Removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	164.977	5	32.995	375.749	.000
Within Groups	1.054	12	.088		
Total	166.030	17			

d. pH

ANOVA

Efisiensi

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	70.232	4	17.558	25.985	.000
Within Groups	6.757	10	.676		
Total	76.989	14			

e. Suhu

ANOVA

Efisiensi Removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	235.132	2	117.566	5.958E5	.000
Within Groups	.001	6	.000		
Total	235.133	8			

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Velistya Devina Febriyanti, lahir di Surabaya pada 14 Februari 2004. Penulis menyelesaikan pendidikan di SDN Nginden Jangkungan I Surabaya, SMP Negeri 17 Surabaya, dan SMA Dr. Soetomo Surabaya. Pada tahun 2022, penulis melanjutkan pendidikan di Program Studi Sarjana Terapan (D4) Teknik Pengolahan Limbah, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS). Selama menempuh pendidikan di PPNS, penulis aktif mengikuti organisasi Sie Kerohanian Islam (SKI) serta Unit Kegiatan Mahasiswa Marine Robotic Community (MRC). Penulis juga melaksanakan *On the Job Training* (OJT) di PT Behaestex Pandaan, PG Wonolangan dan IPLT Keputih Surabaya. Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik, saran, maupun masukan yang membangun sangat diharapkan sebagai bahan evaluasi dan penyempurnaan penelitian selanjutnya. Pembaca yang ingin berdiskusi atau mengajukan pertanyaan terkait penelitian ini dapat menghubungi penulis melalui email: velistya96@gmail.com

(Halaman ini sengaja dikosongkan)