

**EFEK PENAMBAHAN SERBUK KAYU DAN BESI (III) OKSIDA (Fe_2O_3)
PADA GEOPOLIMER UNTUK FOTODEGRADASI ZAT WARNA
METILEN BIRU**

(Skripsi)

Oleh

Olga Saputra
2017041026



JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025

ABSTRAK

EFEK PENAMBAHAN SERBUK KAYU DAN BESI (III) OKSIDA (Fe_2O_3) PADA GEOPOLIMER UNTUK FOTODEGRADASI ZAT WARNA METILEN BIRU

Oleh

OLGA SAPUTRA

Telah dilakukan penelitian efek penambahan serbuk kayu dan besi (III) oksida (Fe_2O_3) pada geopolimer untuk adsorpsi zat warna metilen biru yang bertujuan untuk mengetahui pembuatan komposit geopolimer, pengaruh penambahan serbuk kayu dan Fe_2O_3 terhadap kemampuan adsorpsi, serta struktur fasa, gugus fungsi, morfologi, dan kemampuan absorbansi yang terbentuk. Komposit geopolimer dibuat dengan mencampurkan serbuk kayu dan Fe_2O_3 ke dalam matriks geopolimer. Sampel dikarakterisasi menggunakan SEM-EDS, XRD, FTIR, dan UV-Vis. Hasil XRD menunjukkan bahwa sampel geopolimer/serbuk kayu (GE/SK) didominasi oleh fasa *quartz* (SiO_2) dan *enstatite* ($\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$), sedangkan geopolimer/serbuk kayu/ Fe_2O_3 (GE/SK/FE) didominasi oleh fasa *quartz* (SiO_2) dan *anorthite* ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Hasil SEM-EDS memperlihatkan bahwa penambahan Fe_2O_3 meningkatkan densifikasi matriks, dengan unsur dominan Si, O, dan Al. FTIR mengidentifikasi gugus fungsi utama seperti Si-O-Si, Si-O-Al, O-H, dan C-H, dengan pergeseran pita serapan akibat interaksi Fe^{3+} . Hasil UV-Vis menunjukkan bahwa GE/SK/FE memiliki kapasitas adsorpsi dan fotokatalisis tertinggi, dibuktikan dengan penurunan signifikan absorbansi metilen biru pada panjang gelombang 600–700 nm (puncak monomer 666 nm) di bawah paparan UV. Kombinasi serbuk kayu dan Fe_2O_3 menghasilkan mekanisme ganda adsorpsi–fotokatalisis yang efektif untuk pengolahan limbah cair yang mengandung zat warna kationik.

Kata Kunci: geopolimer, serbuk kayu, Fe_2O_3 , metilen biru, adsorpsi, fotokatalisis.

ABSTRACT

THE EFFECT OF ADDING WOOD POWDER AND IRON (III) OXIDE (Fe₂O₃) TO GEOPOLIMER FOR THE PHOTODEGRADATION OF METHYLENE BLUE DYE

By

OLGA SAPUTRA

A research was conducted on the effect of adding wood powder and iron (III) oxide (Fe₂O₃) to geopolymer for the adsorption of methylene blue dye, aiming to investigate the preparation of geopolymer composites, the effect of wood powder and Fe₂O₃ addition on adsorption capacity, as well as the resulting phase structure, functional groups, morphology, and absorbance properties. Geopolymer composites were prepared by incorporating wood powder and Fe₂O₃ into the geopolymer matrix. Samples were characterized using SEM-EDS, XRD, FTIR, and UV–Vis spectroscopy. XRD results showed that geopolymer/wood powder (GE/SK) samples were dominated by quartz (SiO₂) and enstatite (Mg₂Si₂O₆) phases, while geopolymer/wood powder/Fe₂O₃ (GE/SK/FE) samples were dominated by *quartz* (SiO₂) and anorthite (CaAl₂Si₂O₈) phases. SEM-EDS revealed that the addition of Fe₂O₃ increased matrix densification, with Si, O, and Al as the dominant elements. FTIR identified main functional groups such as Si–O–Si, Si–O–Al, O–H, and C–H, with peak shifts due to Fe³⁺ interaction. UV–Vis results indicated that GE/SK/FE exhibited the highest adsorption and photocatalytic performance, as evidenced by a significant decrease in methylene blue absorbance at wavelengths of 600–700 nm (monomer peak at 666 nm) under UV irradiation. The combination of wood powder and Fe₂O₃ produced an effective dual adsorption–photocatalysis mechanism for treating wastewater containing cationic dyes.

Keywords: Geopolymer, wood powder, Fe₂O₃, methylene blue, adsorption, photocatalysis.

**EFEK PENAMBAHAN SERBUK KAYU DAN BESI (III) OKSIDA (Fe_2O_3)
PADA GEOPOLIMER UNTUK FOTODEGRADASI ZAT WARNA
METILEN BIRU**

Oleh

OLGA SAPUTRA

Skripsi

**Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar
SARJANA SAINS**

Jurusan Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Thesis Title : **EFFECT OF ADDING WOOD POWDER AND
IRON (III) OXIDE (Fe_2O_3) TO GEOPOLYMER
FOR PHOTODEGRADATION
OF METHYLENE BLUE**

Student Name : **Olga Saputra**

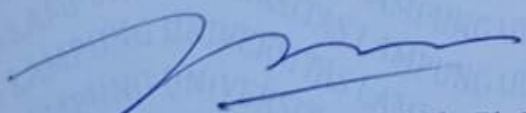
Student ID Number : 2017041026

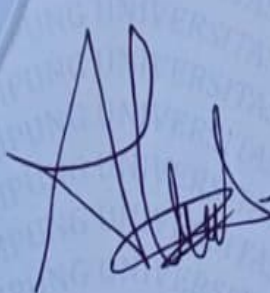
Department : Physics

Faculty : Mathematics and Natural Sciences

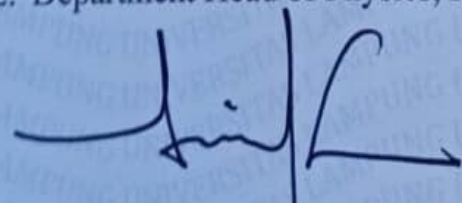


1. Advisory Committee


Prof. Drs. Posman Manurung M.Si., Ph.D.
NIP. 195903081991031001


Asnan Rinovian S.Si., M.T.
NIP. 199211092019021003

2. Department Head of Physics, FMIPA

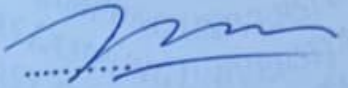

Arif Surtano, S.Si., M.Si., M.Eng
NIP. 1971090920010121001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D.



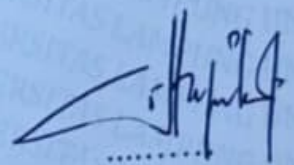
Sekretaris

: Asnan Rinovian S.Si., M.T.



Penguji

Bukan Pembimbing : Suprihatin S.Si., M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si
NIP. 197110012005011002

Tanggal lulus Ujian Skripsi : 17 Desember 2025

PERNYATAAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepengetahuan saya tidak ada karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila ada pernyataan saya yang tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukuman yang berlaku.

Bandar Lampung, 17 Desember 2025



Olga Saputra
NPM. 2017041026

RIWAYAT HIDUP



Penulis yang bernama lengkap Olga Saputra, dilahirkan di Pagar Dewa pada tanggal 28 Agustus 2002 dari pasangan berbahagia Bapak Sabki dan Ibu Siti Masitoh sebagai anak kelima dari delapan bersaudara.

Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD N 2 Lesung Bakti Jaya pada tahun 2014 dan melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP N 1 Lambu Kibang. Pada tahun 2017 penulis melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA N 1 Pagar Dewa. Penulis diterima sebagai mahasiswa di Universitas Lampung, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam melalui jalur SNMPTN pada tahun 2020.

Selama menjadi mahasiswa penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Fisika Unila sebagai anggota bidang Dana dan Usaha. Penulis juga aktif dalam organisasi Ikatan Mahasiswa TUBABA sebagai anggota. Pada tahun 2023 penulis melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PTPN VII Unit Way Berulu, dengan judul **“Analisis Fisiologi Pohon Karet (Hevea Bransiliensis) Klon BPM-24 Berbasis Lateks Diagnosis di PTPN VII Unit Way Berulu”**. Pada tahun 2025 penulis melaksanakan penelitian tugas akhir di Kawasan Sains dan Teknologi (KST) Iskandar Zulkarnain BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional) Tanjung Bintang, Lampung Selatan. Dengan judul **“Efek Penambahan Serbuk Kayu Dan Besi (III) Oksida (Fe_2O_3) Pada Geopolimer Untuk Adsorpsi Zat Warna Metilen Biru”**.

MOTTO

Allahumma Yassir Wala Tu'assir

artinya "Ya Allah permudahlah, jangan dipersulit, berilah kabar gembira, jangan ditakut-takuti,"

(HR. Bukhari dan Muslim).

“Jangan menjelaskan tentang dirimu kepada siapapun, karena yang menyukaimu tidak membutuhkannya, dan yang membencimu tidak akan mempercayainya”

(Ali bin Abi Thalib)

“Alam semesta tidak pernah terburu-buru, tapi semuanya tercapai”

(Marcus Aurelius)

“Diantara ragu dan lelah, aku belajar bahwa bertahanpun adalah bentuk kemenangan”

(Olga Saputra)

" Dari keluarga aku belajar arti kekuatan, bahwa cinta dan do'a lebih kuat dari segala rasa ingin menyerah”.

(Olga Saputra)

PERSEMBAHAN

**Dengan Penuh rasa syukur kepada Allah SWT, penulis
mempersembahkan karya ini kepada :**

Padeku Sabki dan Madeku Siti Masitoh

Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Pade tercinta atas setiap nasihat, do'a, dan kerja keras yang menjadi kekuatan dalam setiap langkahku. Ucapan terima kasih yang tak terhingga juga kupersembahkan kepada Made tercinta yang selalu mendukung, selalu ada di setiap suka dan duka, serta selalu percaya pada kemampuanku, kalian sangat berarti. Semoga Allah SWT selalu menjaga kalian dalam kebaikan dan kemudahan *aamiin*.

Bapak-Ibu Dosen

Terima kasih atas segala ilmu pengetahuan yang telah diberikan, semoga dapat bermanfaat dan menjadi ladang pahala yang selalu mengalir untuk Bapak dan Ibu.

Kakak dan adikku tersayang

Terima kasih atas kepedulian dan perhatian yang tak pernah berkurang sedikitpun,.

“Teman-teman dan almamater tercinta”

SANWACANA

Puji syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul **"Efek Penambahan Serbuk Kayu dan Besi (III) Oksida (Fe_2O_3) pada Geopolimer untuk Fotodegradasi Zat Warna Metilen Biru"** yang merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Fisika di Universitas Lampung. Selama proses penulisan Skripsi ini tentunya terdapat banyak kendala baik internal maupun eksternal, namun dengan dibantu dan didukung oleh banyak pihak sehingga penulis bisa mengatasi kendala tersebut dengan baik dan menyelesaikan Skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D. selaku Pembimbing Utama yang telah bersedia memberikan bimbingan, saran, motivasi, ilmu, dan nasihat kepada penulis saat proses perkuliahan dan penelitian.
2. Bapak Asnan Rinovian, S.Si., MT. selaku Pembimbing Kedua yang senantiasa membimbing serta memberi kritik dan saran dalam proses penelitian.
3. Bapak Amir Supriyanto S.Si., M.Si. selaku Pembimbing Akademik yang telah membantu selama perkuliahan.
4. Orang tua penulis Bapak Sabki dan Ibu Siti Masitoh yang selalu memberi dukungan penuh dan do'a yang tiada henti.
5. Seluruh Dosen Fisika yang telah memberikan banyak ilmu pengetahuan kepada penulis.
6. Orang tersayang penulis Olga Saputra. Terimakasih sayang atas dukungan, kasih sayang dan kepeduliannya. Kehadiran sayang menjadi pendukung selain mak dan apak bagi penulis.

7. Amel dan Sutiana selaku rekan tugas akhir di BRIN yang telah memberikan semangat untuk menyelesaikan Skripsi ini.
8. Rekan-rekan Fisika Angkatan 2020 yang selalu memberikan dukungan kepada penulis, khususnya Putra, Jekri, dan teman-teman kontrakan selaku rekan sejawat penulis sejak awal semester.

Penulis menyadari bahwa Skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik yang membangun akan penulis terima dengan senang hati demi kesempurnaan penelitian selanjutnya. Akhir kata semoga Skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak pada umumnya dan terkhusus pada mahasiswa.

Bandar Lampung, 17 Desember 2025

Penulis

Olga Saputra

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	x
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Geopolimer	7
2.2 Besi (III) Oksida (Fe_2O_3)	9
2.3 Metilen Biru	10
2.4 Adsorpsi	11
2.5 Fotodegradasi	12
2.6 Karakterisasi	14
2.6.1 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	14
2.6.2 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	16
2.6.3 <i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR)	18
III. METODE PENELITIAN	20
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	20
3.2 Alat dan Bahan	20
3.3 Prosedur Penelitian.....	22
3.3.1 Sintesis Geopolimer	22
3.3.2 Preparasi Serbuk Kayu	23
3.3.3 Sintesis Fe_2O_3 Menggunakan Metode Presipitasi	23
3.3.4 Sintesis Komposit Geopolimer/Serbuk Kayu dengan Fe_2O_3	23
3.3.5 Karakterisasi.....	24
3.3.6 Daftar Nama Sampel	24
3.4 Diagram Alir	25

VI. HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1. Karakterisasi Bahan Baku.....	27
4.1.1. Hasil Karakterisasi SEM-EDS Bahan Baku.....	27
4.1.1.1. Hasil Karakterisasi SEM-EDS pada Serbuk Kayu	27
4.1.1.2. Hasil Karakterisasi SEM-EDS pada Fe ₂ O ₃	28
4.1.2. Hasil Karakterisasi XRD Bahan Baku	30
4.1.2.1. Hasil Analisis Kualitatif XRD Bahan Baku	30
4.1.2.2. Hasil Analisis Kuantitatif XRD.....	31
4.1.3. Hasil Karakterisasi FTIR Bahan Baku	33
4.2. Karakterisasi Sampel	35
4.2.1. Hasil Karakterisasi SEM-EDS Geopolimer	35
4.2.1.1. Hasil Karakterisasi SEM Geopolimer	35
4.2.1.2. Hasil Karakterisasi EDS Geopolimer.....	38
4.2.2. Hasil Karakterisasi XRD Sampel	40
4.2.2.1. Hasil Analisis Kualitatif XRD Sampel.....	40
4.2.2.2. Hasil Analisis Kuantitatif XRD.....	45
4.2.3. Hasil Karakterisasi FTIR Sampel	48
4.2.4. Hasil Karakterisasi UV-Vis Sampel.....	50
V. KESIMPULAN DAN SARAN	54
5.1. Kesimpulan	54
5.2. Saran	54
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN.....	61

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Struktur Quartz (Wei, 1935) yang digambarkan dengan VESTA (Koichi) 2021.	8
Gambar 2.2. Struktur Anorthite (Foit dan Peacor, 1973) yang digambarkan dengan VESTA (Koichi) 2021.	9
Gambar 2.3. Struktur Hematite (Finger; Hazen, 1980) yang digambarkan dengan VESTA (Koichi) 2021.	10
Gambar 2.4. Rumus kimia metilen biru (Chon dkk., 1953).	10
Gambar 2.5. Skema spektrum Uv-Vis metilen biru (Iskandari dkk., 2024).	11
Gambar 2.6. Skema Fotodegradasi Fe ₂ O ₃ pada methylen Blue (Mei dkk., 2019).	13
Gambar 2.7. Ilustrasi difraksi sinar-X (Cullity, 2014).	15
Gambar 2.8. Pola XRD pada Fe ₂ O ₃ (Hojamberdiev dkk., 2013).	16
Gambar 2.9. SEM pada α-Fe ₂ O ₃ (Shahad., 2017).	18
Gambar 2.10. FTIR pada SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃ -CaO (Yilmaz., 2012).	20
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.	25
Gambar 4.1. Hasil karakterisasi SEM-EDS serbuk kayu perbesaran 2.500x (a) morfologi serbuk kayu, dan (b) persebaran unsur serbuk kayu	26
Gambar 4.2. Hasil karakterisasi SEM Fe ₂ O ₃ perbesaran 150.000x (a) morfologi Fe ₂ O ₃ , dan (b) persebaran unsur Fe ₂ O ₃	28
Gambar 4.3. Hasil karakterisasi XRD bahan baku (a) serbuk kayu dan (b) Fe ₂ O ₃ dengan panjang gelombang 1,5406 Å	30

Gambar 4.4.	Hasil <i>refinement</i> XRD serbuk kayu menggunakan <i>software</i> Rietica menggunakan metode normal	32
Gambar 4.5.	Hasil <i>refinement</i> XRD Fe_2O_3 menggunakan <i>software</i> Rietica menggunakan metode normal.....	32
Gambar 4.6.	Hasil karakterisasi FTIR bahan baku (a) serbuk kayu dan (b) Fe_2O_3	34
Gambar 4.7.	Hasil karakterisasi SEM geopolimer (a) geopolimer murni (GP) perbesaran 100.000x, (b) geopolimer/serbuk kayu (GP/SK) dan (c) geopolimer/serbuk kayu/ Fe_2O_3 (GP/SK/FE) perbesaran 10.000x.....	36
Gambar 4.8.	Hasil karakterisasi EDS geopolimer (a) geopolimer murni (GP) perbesaran 100.000x, (b) geopolimer/serbuk kayu (GP/SK) dan (c) geopolimer/serbuk kayu/ Fe_2O_3 (GP/SK/FE) perbesaran 10.000x.....	38
Gambar 4.9.	Hasil karakterisasi XRD sampel (a) geopolimer (GP) (b) geopolimer/serbuk kayu (GP/SK) dan (c) geopolimer/serbuk kayu/ Fe_2O_3 (GP/SK/FE) pada panjang gelombang 1,5406 Å	41
Gambar 4.10.	Hasil <i>refinement</i> XRD geopolimer (GP) menggunakan <i>software</i> Rietica menggunakan metode normal	45
Gambar 4.11.	Hasil <i>refinement</i> XRD geopolimer/serbuk kayu (GP/SK) menggunakan <i>software</i> Rietica menggunakan metode normal	46
Gambar 4.12.	Hasil <i>refinement</i> XRD geopolimer/serbuk kayu/ Fe_2O_3 (GP/SK/FE) menggunakan <i>software</i> Rietica menggunakan metode normal	46
Gambar 4.13.	Hasil karakterisasi FTIR sampel (a) geopolimer (GP), (b) geopolimer/serbuk kayu (GP/SK) dan (c) geopolimer/serbuk kayu/ Fe_2O_3 (GP/SK/FE)	48
Gambar 4.14.	Hasil karakterisasi UV-Vis sampel geopolimer (GP) (a) tanpa menggunakan lampu UV, dan (b) menggunakan lampu UV	51
Gambar 4.15.	Hasil karakterisasi UV-Vis sampel geopolimer/serbuk kayu (GP/SK) (a) tanpa menggunakan lampu UV, dan (b) menggunakan lampu UV	52

Gambar 4.16. Hasil karakterisasi UV-Vis sampel geopolimer/serbuk kayu/ Fe_2O_3 (GE/SK/FE) (a) tanpa menggunakan lampu UV, dan (b) menggunakan lampu UV	53
---	----

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Alat yang digunakan pada penelitian.....	21
Tabel 3.2 Alat karakterisasi yang digunakan.....	21
Tabel 3.3 Bahan yang digunakan pada penelitian	22
Tabel 3.4 Daftar Nama Sampel yang digunakan pada penelitian.....	24
Tabel 4.1. Komposisi persebaran unsur dalam serbuk kayu.....	27
Tabel 4.2. Komposisi persebaran unsur dalam Fe_2O_3	29
Tabel 4.3. Fasa yang terdeteksi pada serbuk kayu.....	30
Tabel 4.4. Fasa yang terdeteksi pada Fe_2O_3	31
Tabel 4.5. Parameter kesesuaian <i>refinement</i> XRD serbuk kayu dan Fe_2O_3	33
Tabel 4.6. Persentase molar yang terdeteksi pada bahan baku.....	33
Tabel 4.7. Parameter sel dari fasa yang terdeteksi pada serbuk kayu.....	33
Tabel 4.8. Parameter sel dari fasa yang terdeteksi pada Fe_2O_3	33
Tabel 4.9. Gugus fungsi yang terdeteksi pada bahan baku.....	34
Tabel 4.10. Komposisi persebaran unsur geopolimer.....	40
Tabel 4.11. Fasa yang terdeteksi pada geopolimer (GP)	43
Tabel 4.12. Lanjutan fasa yang terdeteksi pada geopolimer (GP).....	43
Tabel 4.13. Fasa yang terdeteksi pada geopolimer/serbuk kayu (GP/SK)	43
Tabel 4.14. Lanjutan fasa yang terdeteksi pada geopolimer/serbuk kayu (GP/SK)	43

Tabel 4.15. Fasa yang terdeteksi pada geopolimer/serbuk kayu/ Fe_2O_3 (GP/SK/FE).....	44
Tabel 4.16. Parameter kesesuaian <i>refinement</i> XRD geopolimer (GP, geopolimer/serbuk kayu (GP/SK) dan geopolimer/serbuk kayu/ Fe_2O_3 (GP/SK/FE)	47
Tabel 4.17. Persentase molar yang terdeteksi pada sampel	47
Tabel 4.18. Parameter sel dari fasa yang terdeteksi pada geopolimer (GP).....	47
Tabel 4.19. Parameter sel dari fasa yang terdeteksi pada geopolimer/serbuk kayu (GP/SK)	47
Tabel 4.20. Parameter sel dari fasa yang terdeteksi pada geopolimer/serbuk kayu/ Fe_2O_3 (GP/SK/FE).....	47
Tabel 4.21. Gugus fungsi yang terdeteksi pada sampel geopolimer.....	49

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ilmu pengetahuan dan teknologi semakin berkembang seiring pesatnya dunia industri, seperti industri pakaian, makanan, dan industri lainnya. Salah satu industri yang cukup pesat berkembang di Indonesia adalah industri tekstil. Lingkungan tercemar dalam berbagai cara, dan industri tekstil merupakan salah satu kontributor utama. Industri ini mencemari lingkungan dan merusak ekosistem, mempengaruhi komponen vital alam seperti udara, tanah, dan air. Pewarna beracun yang digunakan dalam proses pengolahan tekstil merupakan sumber utama polusi kimia. Polutan ini dapat mencemari sumber air permukaan dan air tanah, mengurangi kesuburan dan produktivitas tanah, merusak lapisan ozon, serta menyebabkan berbagai penyakit pada populasi rentan seperti anak-anak dan lansia. Pencemaran air dan udara merupakan masalah utama pencemaran air mempengaruhi tanah dan sumber air tawar, sementara pencemaran udara berdampak pada seluruh lingkungan. Logam berat dari pencemaran udara dapat menyebabkan masalah paru-paru dan kanker (Rofi dan Rahman, 2025).

Zat warna metilen biru menjadi salah satu limbah beracun yang dapat menyebabkan pencemaran lingkungan. Limbah zat warna ini bersifat toksik, karsinogenik, dan sulit terdegradasi secara alami, sehingga dapat mencemari ekosistem perairan dan mengancam kesehatan manusia. Sehingga, diperlukan metode pengolahan limbah yang efektif dan ramah lingkungan untuk mengurangi dampak negatifnya.

Beberapa proses yang dapat digunakan untuk pengolahan limbah cair dapat dikaji dengan pendekatan kimia, fisika, dan biologi maupun kombinasi antara tiga proses tersebut. Metode yang paling sering digunakan adalah adsorpsi. Adsorpsi

menjadi salah satu teknik yang banyak digunakan karena efisiensinya dalam menghilangkan zat warna dari air. Namun, meningkatnya permintaan akan adsorben telah membuat harganya semakin mahal, yang mendorong penelitian pelengkap untuk pembuatan bahan adsorben baru yang lebih murah dari biomassa yang tersedia di Maroko (limbah makanan, tanaman obat aromatik, dan lain-lain) (Benjelloun dkk., 2017). Sebagai alternatif, Biosorpsi menawarkan banyak keunggulan karena kesederhanaannya dalam penerapan, efisiensi penghilangan yang tinggi, dan efisiensi biaya sesuai Adsorpsi menjadi salah satu teknik yang banyak digunakan karena efisiensinya dalam menghilangkan zat warna dari air (Khating dan Saini, 2022).

Akhirnya, karena spektroskopi UV telah memungkinkan analisis kontaminan di udara, air, dan tanah secara cepat, sensitif, dan selektif, hal ini telah sepenuhnya mengubah pemantauan lingkungan. Spektroskopi UV telah berkembang menjadi alat yang berguna untuk mengidentifikasi, mengukur, dan mengkarakterisasi polutan lingkungan berkat perkembangan instrumen, integrasi teknologi, dan teknik analitis kreatif. Karena metode ini memiliki sifat yang mudah digunakan, efisien karena kebutuhan energi yang rendah, serta dapat menggunakan berbagai jenis adsorben (Alum, 2024).

Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses adsorpsi yaitu jenis adsorben dan adsorbat, konsentrasi zat, luas permukaan dan tekanan, daya larut adsorben dan koadsorpsi, serta lama pengadukan. Dalam penelitian ini, akan menggunakan salah satu adsorben yang berasal dari limbah serbuk gergaji kayu. Serbuk gergaji kayu memiliki potensi sebagai adsorben logam berat dalam media air karena mengandung senyawa selulosa, sehingga mampu menjadi alternatif masalah pencemaran lingkungan.

Fotodegradasi dapat diartikan sebagai proses peruraian suatu senyawa (biasanya senyawa organik) dengan bantuan energi foton. Prinsip fotodegradasi adalah adanya loncatan elektron dari pita valensi ke pita konduksi pada logam semikonduktor jika dikenai suatu energi foton. Loncatan elektron ini

menyebabkan timbulnya hole (lubang elektron) yang dapat berinteraksi dengan pelarut (air) membentuk radikal OH, radikal bersifat aktif dan dapat berlanjut untuk menguraikan senyawa organik target. Sesuai fotokatalisis merupakan pendekatan yang kuat dan serbaguna dalam mengatasi tantangan lingkungan dan energi yang kritis. Dengan memanfaatkan energi dari cahaya, proses fotokatalitik memungkinkan degradasi polutan, konversi energi surya, dan produksi bahan bakar bersih. Prinsip dasar fotokatalis berpusat pada penyerapan foton, pembentukan pasangan elektron-lubang, dan reaksi redoks selanjutnya yang memfasilitasi pemecahan kontaminan atau sintesis senyawa berharga (Chakravorty dan Roy, 2024).

Geopolimer menjadi material yang sering diteliti karena proses pembuatannya dilakukan dengan memanfaatkan bahan-bahan alam yang ramah lingkungan. Sintesis geopolimer menggunakan abu biomassa, lumpur merah, kaca daur ulang, dan limbah yang mengandung logam berat. Cara tersebut merupakan potensial untuk membuang dan menggunakan kembali limbah-limbah tersebut yang sulit didaur ulang. Beberapa inovasi dalam produksi geopolimer dimungkinkan dengan memanfaatkan limbah tersebut. Misalnya, penggunaan lumpur merah dapat memberikan manfaat tambahan; berkat alkalinitas residu yang tinggi, aktivator alkali yang dibutuhkan lebih sedikit, sehingga mengurangi penggunaan material termahal selama sintesis geopolimer (Toniolo dan Boccacini, 2017).

Pada penelitian ini, geopolimer dikombinasikan dengan serbuk kayu (*wood powder/wood particles*) sebagai aditif. Serbuk kayu dalam komposit geopolimer berperan sebagai *filler* organik yang dapat mempengaruhi karakteristik struktur material, terutama pada aspek pembentukan fasa, gugus fungsi, dan morfologi permukaan. Kandungan lignoselulosa pada serbuk kayu berpotensi berinteraksi dengan matriks geopolimer melalui gugus –OH, selulosa, lignin, dan hemiselulosa sehingga dapat memengaruhi pola serapan pada analisis FTIR serta memberikan tekstur morfologi yang lebih berpori atau berstruktur heterogen, yang kemudian berkaitan dengan kemampuan absorpsi material. Berdasarkan penelitian Zhang dkk., (2025) bahwa hasil FTIR mengonfirmasi keberhasilan introduksi geopolimer pada permukaan serat. Terutama mengurangi paparan gugus hidrofilik, sehingga

berkontribusi pada permukaan yang lebih hidrofobik. Sebaliknya memperkenalkan gugus fungsi tambahan yang mengandung oksigen, yang meningkatkan hidrofilisitas dan memberikan potensi interaksi antarmuka yang kuat dalam aplikasi komposit.

Selain itu, keberadaan oksida besi seperti Fe_2O_3 dalam matriks geopolimer juga dapat berperan sebagai modifikator struktur, terutama pada sistem geopolimer tipe *ferro-sialate*. Pada jaringan ini, atom Fe dapat menggantikan sebagian posisi Al atau Si dalam kerangka aluminosilikat dan membentuk struktur $[-\text{Fe}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}]$, sebagaimana dijelaskan oleh Davidovits bahwa geopolimer berbasis batuan jenis (Ca, Na, K) poli (*ferro-sialate*) (Davidovits, 2020). Studi tersebut juga menunjukkan bahwa tingginya kandungan Fe memengaruhi teknik karakterisasi yang dapat digunakan serta menegaskan pentingnya peran Fe dalam stabilitas struktur geopolimer. Dengan demikian, penambahan Fe_2O_3 pada sistem geopolimer diperkirakan dapat memodifikasi karakteristik mekanik, stabilitas termal, maupun interaksi kimia matriks. Meskipun penelitian yang secara spesifik mengkaji kombinasi Fe_2O_3 , geopolimer, dan serbuk kayu masih sangat terbatas.

Selain perannya dalam memodifikasi struktur geopolimer melalui pembentukan jaringan *ferro-sialate*, oksida besi (Fe_2O_3) juga dikenal sebagai $\alpha\text{-Fe}$ yang diuji memiliki efek fotokatalitik yang signifikan. Temuan ini dapat menjadi titik awal untuk menciptakan degradasi fotokatalitik yang sangat efektif yang dapat digunakan di masa mendatang untuk mendegradasi warna berbahaya dari air yang terkontaminasi (Goudjil dkk., 2024). Nanopartikel $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ memiliki kemampuan untuk menyerap energi cahaya dan menghasilkan pasangan elektron-hole yang kemudian berperan dalam reaksi oksidasi yang memecah struktur kimia metilen biru. Kemampuan fotokatalitik ini juga terbukti meningkat ketika Fe_2O_3 digunakan dalam bentuk komposit, seperti penambahan Fe_2O_3 sebagai pendukung meningkatkan pemisahan pasangan elektron-lubang dan meningkatkan laju transfer pembawa fotogenerasi lebih lanjut, penambahan ini memperpanjang umur elektron dan lubang fotogenerasi. Kehadiran Fe_2O_3 semakin mengurangi celah pita (2,4 eV) komposit fotokatalitik Fe_2O_3 , yang berkontribusi signifikan terhadap aktivitas fotokatalitiknya yang tinggi (Zheng dkk., 2024). Dengan demikian,

keberadaan Fe_2O_3 dalam sistem geopolimer tidak hanya berperan sebagai modifikator struktur, tetapi juga membuka potensi penerapan geopolimer berbasis Fe sebagai material multifungsi yang mampu berkontribusi pada proses fotodegradasi pewarna organik dalam aplikasi pengolahan limbah cair.

Berdasarkan penjabaran di atas, maka penelitian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana karakteristik komposit geopolimer dengan penambahan serbuk kayu dan Fe_2O_3 dan kemampuannya sebagai adsorben metilen biru. Komposit geopolimer dengan penambahan serbuk kayu dan besi-III oksida dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscopy Dispersive Spectroscopy* (SEM-EDS), *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dan kemampuannya sebagai adsorben terhadap metilen biru menggunakan *Ultraviolet-visible* (UV-Vis).

1.2 Rumusan masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana proses pembuatan komposit geopolimer dengan penambahan serbuk kayu dan Fe_2O_3 ?
2. Bagaimana pengaruh penambahan serbuk kayu dan Fe_2O_3 terhadap kemampuan adsorpsi zat warna metilen biru?
3. Bagaimana struktur fasa, gugus fungsi, bentuk morfologi, dan absorbansi yang terbentuk dari geopolimer dengan penambahan serbuk kayu dan Fe_2O_3 ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian ini sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui pembuatan komposit geopolimer dengan penambahan serbuk kayu dan Fe_2O_3 .
2. Untuk mengetahui pengaruh penambahan serbuk kayu dan Fe_2O_3 terhadap kemampuan adsorpsi zat warna metilen biru.

3. Untuk mengetahui struktur fasa, gugus fungsi, bentuk morfologi, dan kemampuan absorbansi yang terbentuk dari geopolimer dengan penambahan serbuk kayu dan Fe_2O_3 .

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah penelitian ini sebagai berikut:

1. Serbuk kayu cempaka yang dipakai berasal dari panglong kayu Jati Mulyo.
2. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Non-Logam Pusat Riset Teknologi Pertambangan BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan.
3. Karakterisasi sampel dilakukan menggunakan XRD, SEM-EDS, FTIR, dan Uv-Vis.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukan penelitian ini sebagai berikut:

1. Meningkatkan pemahaman yang lebih baik tentang mekanisme adsorpsi zat warna metilen biru oleh geopolimer dengan penambahan serbuk kayu dan Fe_2O_3 .
2. Berkontribusi dalam pengembangan material absorben ramah lingkungan dan mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah zat warna melalui metode adsorpsi yang efektif dan berkelanjutan.
3. Dapat menjadi referensi bagi penelitian berikutnya untuk diperbaiki dan dikembangkan lebih baik lagi kedepannya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

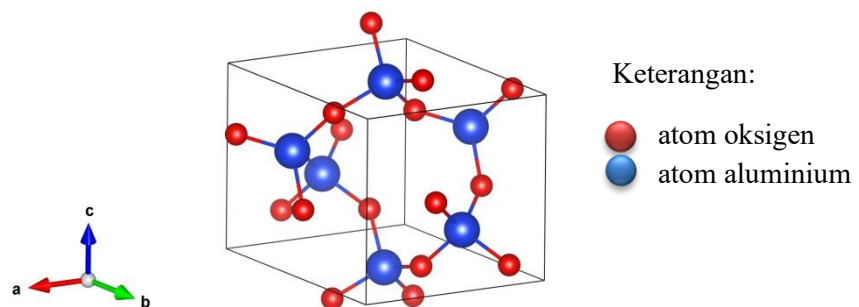
2.1 Geopolimer

Geopolimer pertama kali ditemukan oleh seorang ilmuwan Perancis yang bernama Davidovits sebagai alternatif pengganti semen dalam pembuatan mortar. istilah "geopolimer" digunakan untuk mendefinisikan material aluminosilikat yang diaktivasi oleh aktivator basa atau asam untuk membentuk polimer anorganik (El alouani dkk., 2024). Sumber aluminosilikat (prekursor) dan sumber silika atau alumina tambahan yang sesuai untuk bahan yang diaktivasi alkali satu bagian sebagian besar sama dengan sumber untuk bahan yang diaktivasi alkali konvensional. Aktivator yang digunakan dalam studi geopolimer yaitu abu terbang kelas F, terak tanur sembur, kaolin/metakaolin, albit, bentonit, silika panas bumi, residu silika dari produksi klorosilane, asap silika, terak fayalit, dan sebagainya. Aktivator yang paling umum digunakan dalam studi geopolimer satu bagian adalah natrium hidroksida padat sintetis dan natrium silikat. Namun, bahan kimia sintetis ini, terutama natrium silikat sintetis, tidak mewakili solusi yang optimal secara komersial maupun ekologis ketika digunakan sebagai satu-satunya aktivator (Luukkonen dkk., 2018).

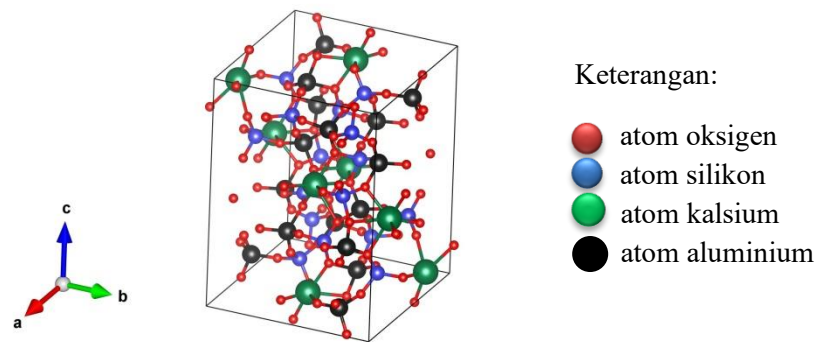
Sintesis geopolimer, yaitu proses geopolimerisasi, terutama terdiri dari tiga langkah yaitu pelarutan bahan baku dalam larutan pengaktif, pembentukan gel awal (gel hidrat aluminosilikat alkali), dan pembentukan struktur jaringan silikat (El alouani dkk., 2024). Melalui proses polikondensasi, monomer-monomer pada larutan silikat akan tersusun menjadi anion aluminasilikat yang mempunyai rantai utama yang disebut dengan polisialat yang menghasilkan jaringan anorganik tiga dimensi dengan mikrostruktur amorf atau semi kristal yang dibentuk oleh kombinasi antara $[\text{SiO}_4]$ dan $[\text{AlO}_4]$ tetrahedral.

Berdasarkan rasio silika/alumina, geopolimer dibagi menjadi tiga jenis yang meliputi *apolysialate* ($-\text{Si-O-Al-O}-$), *polysialatesiloxo* ($-\text{Si-O-Al-O-Si-O}-$), dan *polysialatedisiloxo* ($-\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O}-$). Geopolimerisasi pada dasarnya terdiri dari tiga tahap yaitu pelarutan prekursor, pembentukan gel awal, dan pembentukan struktur jaringan silikat (Chong dan Cheng, 2021). Struktur geopolimer mempunyai kemiripan dengan zeolit tetapi memiliki mikrostruktur yang amorf. Struktur 2D atau 3D berdasarkan pada alumina (Al_2O_3) dan silika (SiO_2) tetrahedral yang berikatan melalui atom oksigen. Aktivator umum bahan geopolimer meliputi natrium hidroksida, natrium silikat, natrium karbonat, natrium sulfat, kalsium karbonat, dan litium hidroksida, selain itu asam fosfat juga digunakan sebagai aktivator. Secara umum, dibandingkan dengan mortar dan beton biasa, mortar geopolimer dan beton geopolimer memiliki kekuatan mekanik yang setara atau bahkan lebih tinggi, lebih tahan terhadap erosi asam dan garam, serta memiliki ketahanan api yang lebih baik (Chong dan Cheng, 2021).

Geopolimer memiliki dua fasa yang terdeteksi yaitu Quartz (SiO_2) dan Anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) yang dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 yang dibuat menggunakan perangkat lunak VESTA.



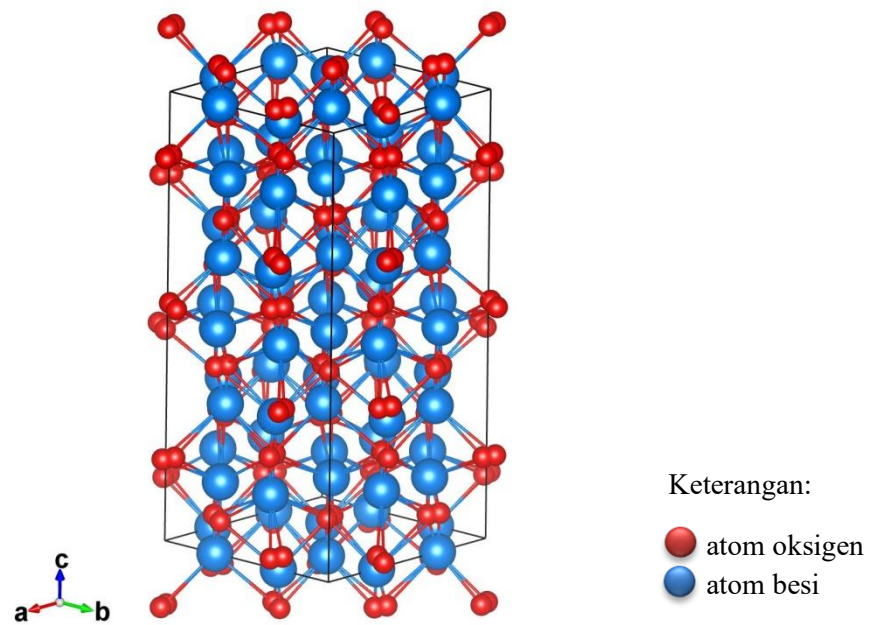
Gambar 2.1 Struktur Quartz (Wei, 1935) yang digambarkan dengan VESTA (Koichi, 2021).



Gambar 2.2 Struktur Anorthite (Foit dan Peacor, 1973) yang digambarkan dengan VESTA (Koichi, 2021).

2.2 Besi (III) Oksida (Fe_2O_3)

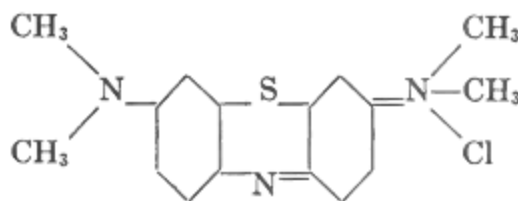
Besi (III) Oksida (Fe_2O_3) atau dikenal dengan nama bijih besi adalah salah satu senyawa oksida dari besi yang memiliki sifat *paramagnetik* dan banyak diaplikasikan sebagai pigmen, katalis, sensor, agen pembersih lingkungan polutan, bahan biomedis hingga bahan magnetik. Terdapat beberapa fasa besi (III) oksida, yaitu fasa $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dan $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Belum pernah teridentifikasi fasa besi(III) oksida dengan struktur kristal monoklinik yang stabil pada tekanan atmosfer dan suhu ruangan. Dengan demikian, $\zeta\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dapat dianggap sebagai anggota baru dari keluarga polimorfik besi(III) oksida (Tucek dkk., 2015). Struktur kristal ini adalah rhombohedral (trigonal) dengan tipe kristal seperti corundum ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) yang memiliki *space group* “R-3 c” dengan parameter kisi a dan b sebesar 5.0066 Å, c sebesar 13.6411 Å, serta α dan β bernilai 90° , serta γ bernilai 120° . Hasil struktur kristal *hematite* yang dibuat menggunakan perangkat lunak VESTA ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Struktur Hematite (Finger dan Hazen, 1980) yang digambarkan dengan VESTA (Koichi, 2021).

2.3 Metilen biru

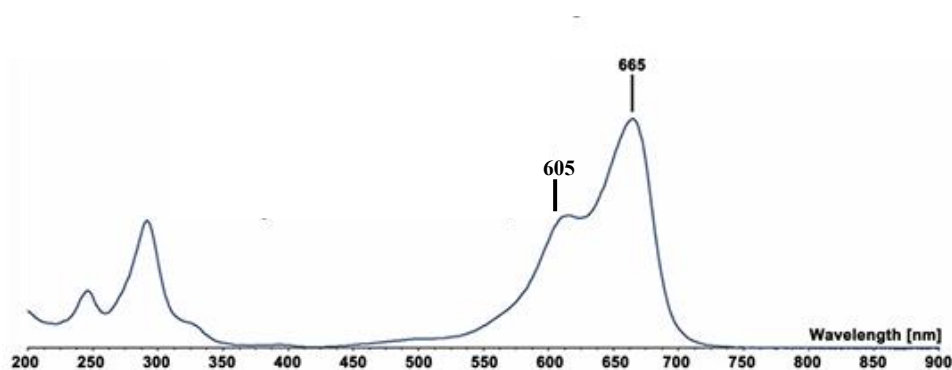
Metilen biru dengan rumus senyawa $C_{16}H_{18}ClN_3S$ merupakan salah satu zat warna kationik yang sering digunakan pada berbagai industri. Terkhususnya industri tekstil pewarnaan serat seperti kapas, wol dan sutra. Selain itu metilen biru juga digunakan dalam bidang kesehatan, seperti agen dalam terapi fotodinamik yang membantu mempercepat pemulihan jaringan. Dalam penggunaannya yang luas metilen biru menimbulkan tantangan lingkungan yang serius dikarenakan sifatnya yang toksik dan karsinogenik, serta sulit terurai alami di lingkungan perairan. Rumus kimia metilen biru ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Rumus kimia metilen biru (Mollier, 1938).

Sehingga limbah dari industri yang menggunakan metilen biru dapat mencemari air dan memasuki rantai makan dan mengancam kesehatan manusia yang dapat menimbulkan penyakit kulit, anemia, muntah, hipertensi dan potensi kanker. Oleh karena itu diperlukan pengolahan limbah yang benar untuk mencegah dampak negatif yang ditimbulkan. Berbagai metode pengolahan limbah metilen biru telah dikaji, dengan salah satu yang paling banyak dipelajari adalah metode adsorpsi dan fotokatalis untuk menguraikan dan menghilangkan metilen biru dari limbah cair.

Spektrum metilen biru memiliki spesies monomer dan dimer yang menunjukkan maksimum penyerapan pada 665 nm dan 605 nm (Wani dkk., 2023). Berikut spektrum Uv-Vis metilen biru dapat kita lihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Skema spektrum Uv-Vis metilen biru (Iskandari dkk., 2024).

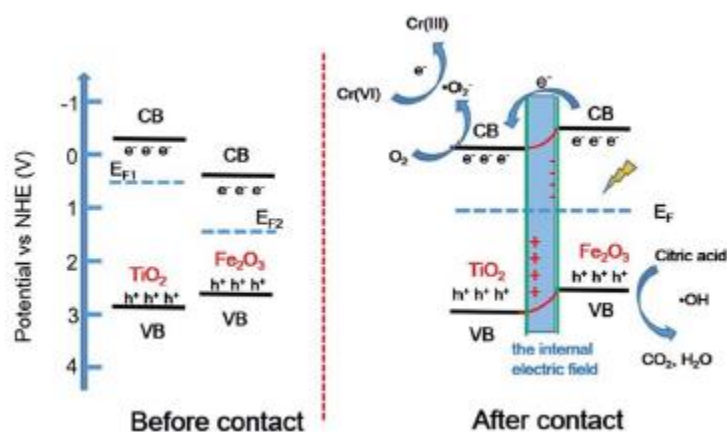
2.4 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses penyerapan atom, ion, atau molekul dalam larutan pada suatu permukaan zat penyerap. Proses adsorpsi bisa disebut sebagai proses perlakuan untuk memisahkan unsur dari fase cair yang menempel pada permukaan padatan. Proses ini terjadi pada permukaan dengan dua fasa yaitu antara fasa gas-padat atau cair-padat. Istilah untuk zat yang teradsorpsi disebut dengan adsorbat, sedangkan untuk zat yang mengadsorpsi disebut dengan adsorben. Dalam proses adsorpsi melibatkan berbagai macam gaya, seperti gaya Van der Waals, gaya elektrostatik, ikatan hidrogen, serta ikatan kovalen.

Pemodelan proses biosorpsi merupakan tantangan tersendiri karena beragamnya proses fisika dan kimia yang terlibat (Raji dkk., 2023). Molekul-molekul yang diadsorpsi secara fisika terikat secara lemah yang melibatkan gaya Van der Waals pada permukaan polar dan non polar. Selain itu, adsorpsi ini dapat terjadi dengan mekanisme pertukaran ion dimana permukaan padatan dapat mengadsorpsi ion-ion dari larutan. Sehingga, ion yang berada pada gugus senyawa permukaan padatan adsorbennya dapat berpindah tempat ke adsorbat. Pada adsorpsi kimia hanya satu lapisan gaya yang terjadi. Adsorpsi ini menyebabkan terbentuknya ikatan secara kimia yang diikuti dengan reaksi kimia, sehingga akan menghasilkan produk berupa senyawa baru. Ikatan yang terbentuk selama kemisorpsi sangat kuat mengikat molekul gas dengan permukaan padatan, sehingga membuatnya sangat sulit untuk dilepas. Hal ini menunjukkan bahwa pelepasan molekul yang terikat di adsorben pada proses kemisorpsi sangatlah kecil.

2.5 Fotodegradasi

Fotodegradasi adalah proses penguraian suatu senyawa, terutama senyawa organik, dengan memanfaatkan energi foton. Proses ini memerlukan keberadaan fotokatalis, yang umumnya berupa material semikonduktor. Ketika semikonduktor menyerap energi cahaya, elektron pada pita valensi akan tereksitasi menuju pita konduksi, meninggalkan hole (lubang elektron) pada pita valensi. Hole tersebut kemudian dapat bereaksi dengan molekul air atau ion hidroksida (OH^-) untuk menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$), yaitu spesies oksidatif yang sangat reaktif dan berperan utama dalam penguraian senyawa organik target (Chakravorty dan Roy, 2024).



Gambar 2.6. Skema Fotodegradasi Fe₂O₃ (Mei dkk., 2019).

Pada Fe₂O₃ sebagai fotokatalis, karakteristik *electronic band structure*-nya dapat dijelaskan melalui analisis Mott–Schottky, di mana Fe₂O₃ menunjukkan kemiringan negatif sebagai penanda bahwa material ini merupakan semikonduktor tipe-p. Posisi pita datarnya berada dekat dengan pita konduksi (CB), yaitu sekitar +0,30 V terhadap NHE, sedangkan pita valensinya (VB) berada pada +1,70 V berdasarkan nilai *band gap* 1,4 eV. Susunan pita energi ini menunjukkan bahwa Fe₂O₃ mudah teraktivasi oleh cahaya tampak sehingga elektron dapat tereksitasi dari VB ke CB dengan relatif mudah.

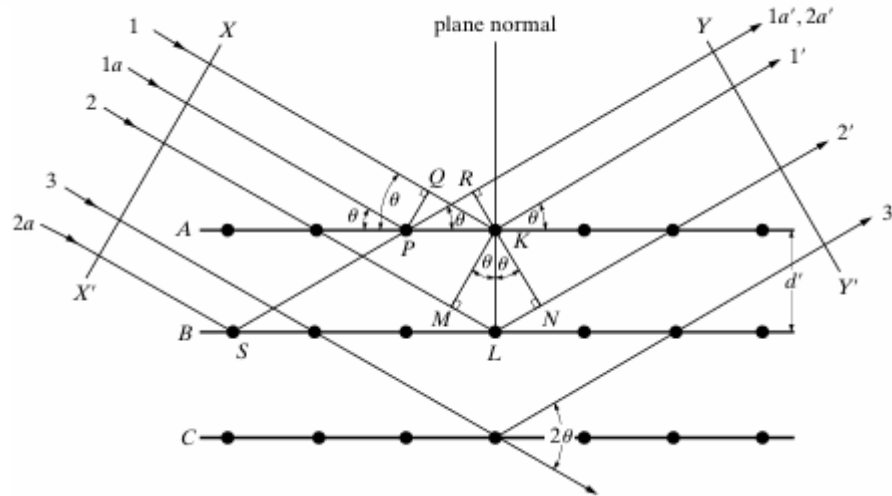
Mekanisme tersebut digambarkan pada skema fotodegradasi Gambar 2.6, di mana Fe₂O₃ menyerap foton dan menghasilkan pasangan elektron–hole. Hole yang tertinggal di VB Fe₂O₃ kemudian berinteraksi dengan H₂O atau OH⁻ untuk menghasilkan radikal hidroksil (•OH), sedangkan elektron pada CB dapat mereduksi oksigen terlarut menjadi radikal superoksida (O₂^{•-}). Kedua radikal reaktif inilah yang selanjutnya berperan dalam proses oksidasi dan pemutusan ikatan senyawa organik, sehingga memperjelas peran Fe₂O₃ sebagai pusat aktif dalam reaksi fotodegradasi sebagaimana ditampilkan pada skema tersebut (Mei dkk., 2019).

2.6 Karakterisasi

2.6.1 X- Ray Diffraction (XRD)

XRD merupakan teknik analisis yang digunakan untuk mengkarakterisasi fase kristal dari berbagai macam bahan, biasanya untuk analisis mineralogi dan identifikasi bahan yang tidak diketahui (Bunaciu dkk., 2015). Pengujian menggunakan XRD memiliki dua fungsi utama, yaitu untuk mengkonfirmasi jenis fasa dan ukuran rata-rata partikel yang dihasilkan. Berdasarkan posisi puncak yang dihasilkan dari data eksperimental XRD berupa besar sudut 2θ dengan membandingkan *data base* yang diperoleh dari *International Center for Diffraction Data* (ICDD) atau *Crystallography Open Database* (COD). Sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang (λ) sebesar 0,01 hingga 10 nm lebih pendek jika dibandingkan dengan gelombang cahaya yang berkisar antara 400 hingga 800 nm. Panjang gelombang sinar-X menjadi dasar yang digunakan dalam teknik XRD untuk mengetahui struktur mikroskopis dari suatu bahan.

Cara kerja mesin XRD yaitu sinar-X dihasilkan ketika partikel bermuatan listrik dengan energi kinetik yang cukup mengalami perlambatan secara cepat. Elektron biasanya digunakan untuk tujuan ini, radiasi dihasilkan dalam tabung sinar-X yang berisi sumber elektron dan dua elektroda logam. Tegangan tinggi yang dipertahankan di antara elektroda ini, beberapa puluh ribu volt, dengan cepat menarik elektron ke anoda, atau target, yang mereka hantam dengan kecepatan sangat tinggi. Sinar-X dihasilkan pada titik benturan dan memancar ke segala arah (Cullity dan Stock 2014). Sampel serbuk pada padatan kristalin memiliki bidang-bidang kisi yang tersusun secara acak dengan berbagai kemungkinan orientasi, begitu pula partikel- partikel kristal yang terdapat di dalamnya. Setiap kumpulan bidang kisi tersebut memiliki beberapa sudut orientasi tertentu, sehingga difraksi Sinar-X memenuhi hukum bragg disajikan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Ilustrasi difraksi sinar-X (Cullity dan Stock 2014) Keterangan; X: Sinar datang, X': berkas bayangan, Y: berkas sinar-X terdifraksi, Y': perpanjangan sinar difraksi, A: bidang kristal pertama, B: bidang kristal kedua, C: bidang kristal ketiga, θ : sudut antara sinar datang dan bidang kristal, dan d : jarak antara bidang kristal.

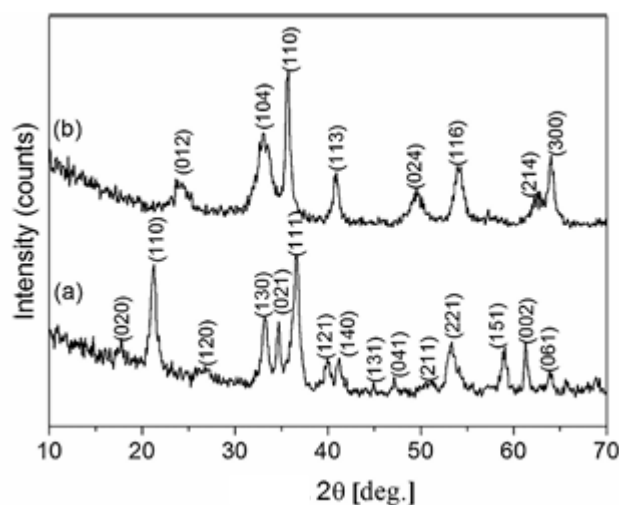
Dari Gambar 2.7. dapat dideskripsikan sebagai berikut. Ini juga merupakan perbedaan lintasan untuk sinar yang tumpang tindih yang dipancarkan oleh S dan P dalam arah yang ditunjukkan, karena dalam arah ini tidak ada perbedaan lintasan antara sinar yang dipancarkan oleh S dan L atau P dan K. Sinar yang dipancarkan akan sepenuhnya sefase jika perbedaan lintasan ini sama dengan jumlah bulat n dari panjang gelombang, sehingga persamaan menjadi persamaan (2.1.)

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.1)$$

dengan λ = panjang gelombang sinar-X θ = sudut difraksi yang menggambarkan posisi puncak d = jarak antar bidang yang menggambarkan sistem, ukuran sel satuan dan miller bidang tersebut.

Bila seberkas sinar-X dengan panjang gelombang diarahkan pada permukaan kristal dengan sudut datang θ , maka sinar tersebut akan dihamburkan oleh bidang atom kristal dan menghasilkan puncak-puncak difraksi yang dapat diamati dengan peralatan XRD (Cullity dan Stock 2014).

Contoh spektrum XRD pada $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Spektrum XRD pada Fe_2O_3 (Hojamberdiev dkk., 2013).

Menurut penelitian Hojamberdiev dkk., (2013) nanopartikel $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ditunjukkan pada gambar Pola XRD bagian (b) menunjukkan adanya puncak difraksi yang tajam dan sempit pada sudut hamburan (2θ) yaitu pada [012]; [104]; [110]; [113]; [024]; [116]; [214]; dan [300]. Hal ini mengindikasikan bahwa oksida besi dari *alfa aesar* ditemukan sebagai hematit pada $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

2.6.2 Scanning Electron Microscopy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)

SEM merupakan salah satu mikroskop yang menggunakan berkas elektron untuk menggambar profil permukaan benda. Pengembangan mikroskop elektron pemindai, dari konsep hingga pemasaran instrumen komersial pada tahun 1965, memakan waktu 30 tahun. Pondasinya diletakkan pada tahun 1930-an oleh Max Knoll (lahir 1897, wafat 1969) yang pertama kali memperoleh citra elektron pindaian dari permukaan benda padat, dan oleh Manfred von Ardenne (lahir 1906) yang menetapkan prinsip-prinsip yang mendasari SEM, termasuk pembentukan probe elektron dan defleksinya, posisi detektor, dan cara-cara untuk memperkuat arus sinyal yang sangat kecil. Teknologi yang diperlukan untuk mewujudkan ide-idenya baru saja tersedia, dan karena waktu yang sangat singkat untuk mengembangkan SEM, ia tidak dapat mempraktikkannya (Mullan, 1993). SEM

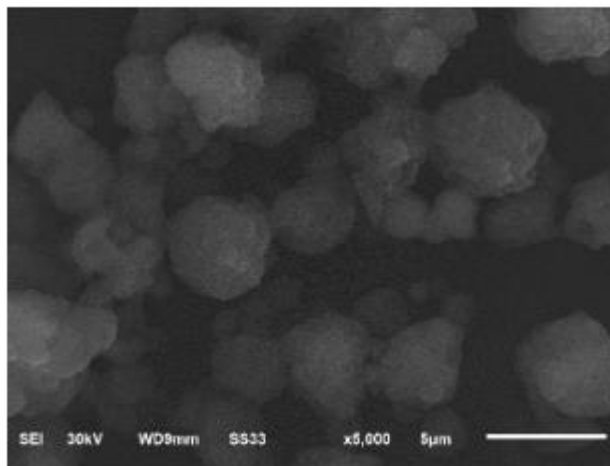
berfungsi untuk mengamati dan menganalisis struktur mikro dan morfologi berbagai material. Hasil yang diperoleh disajikan dalam bentuk tiga dimensi yang berupa gambar atau foto. Keunggulan SEM dibandingkan dengan mikroskop optik adalah tingkat perbesaran yang tinggi dengan *range* antara 25-25.000 kali atau hingga ukuran partikel 1-5 nm dan memiliki fokus kedalaman yang lebih besar.

Pada alat SEM terdapat pistol elektron yang berfungsi sebagai Referensi elektron dengan menggunakan tegangan tinggi sekitar 10-40 kV. Pistol elektron adalah sistem pembangkit berkas elektron pada mikroskop elektron. Pistol elektron terdiri dari tiga komponen: 1) filamen atau katoda yang terbuat dari kawat tungsten, kristal lantanum heksaborida (LaB_6), atau serium heksaborida (CeB_6), tutup kisi (silinder wehnelt) yang mengontrol aliran elektron (bias), dan pelat anoda bermuatan positif yang menarik dan mempercepat elektron menuruni kolom menuju spesimen (Dunlap dan Adaskaveg, 1997). Bahan yang digunakan sebagai Referensi elektron disebut *emitter* atau katoda dan bahan yang menerima elektron disebut anoda. Pada lensa magnetik terdapat dua buah kondensator yang berfungsi menguatkan elektron agar informasi gambar yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik. Sedangkan, koil pemindai berfungsi mengumpulkan berkas sinar elektron.

Pada prinsip kerja SEM, elektron yang mengenai sampel akan terjadi tumbukan. Tumbukan yang terjadi antara elektron dan sampel, akan direkam oleh detektor yang memuat interaksi antara keduanya. *Secondary electron detector* (SE) adalah sintilator yang jika mengenai elektron akan menghasilkan cahaya. Kemudian cahaya tersebut dikonversi menjadi sinyal elektrik oleh *photomultiplier*. SE berasal dari interaksi elektron yang energinya kurang dari 50 kV dan hanya dapat berinteraksi pada permukaan sampel, sehingga informasi yang dihasilkan adalah bentuk permukaan sampel (topografi). elektron hamburan balik, elektron berkas primer dapat dihamburkan sedemikian rupa sehingga terlepas kembali dari spesimen tetapi tidak menembus spesimen. Elektron hamburan balik adalah elektron berkas asli dan karenanya, memiliki tingkat energi

yang tinggi, mendekati tegangan pistol. Pengoperasian dalam mode pencitraan hamburan balik berguna ketika informasi kerapatan atom relatif yang dipadukan dengan informasi topografi akan ditampilkan disebut *backscattered electron* (BSE) (Dunlap dan Adaskaveg, 1997). Energi yang dimiliki elektron tersebut dapat berinteraksi dengan sampel sampai menembus lapisan permukaan sampel. Hasil yang diperoleh dari BSE berupa morfologi struktur pada bahan material.

Berikut merupakan contoh hasil SEM pada γ -Fe₂O₃ yang dimuat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. SEM pada γ -Fe₂O₃ (Shahad., 2017).

Berdasarkan karakterisasi morfologi nanopartikel γ -Fe₂O₃ (maghemite) menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) sebagai salah satu tahap penting untuk mengamati struktur permukaan dan distribusi ukuran partikel. Berdasarkan citra SEM yang ditampilkan dalam publikasi tersebut, nanopartikel γ -Fe₂O₃ Permukaan nanopartikelnya halus dengan kristalit yang baik (Shahad, 2017)

2.6.3 *Fourier Transform Infra Red (FTIR)*

Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier (FTIR) adalah spektroskopi inframerah yang dilengkapi dengan transformasi Fourier untuk mendeteksi dan menganalisis hasil spektrum. Metode ini digunakan untuk menganalisis molekul

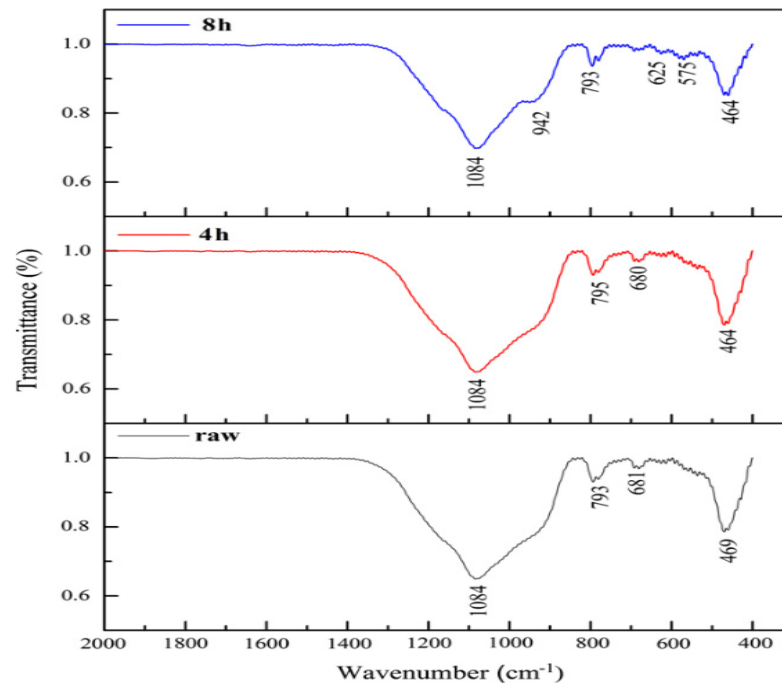
organik dan anorganik secara kualitatif dan kuantitatif dengan rentang bilangan gelombang 14.000 cm^{-1} hingga 10 cm^{-1} . Berdasarkan bilangan gelombang tersebut, daerah inframerah dibagi menjadi tiga daerah, yaitu inframerah dekat, inframerah menengah, dan inframerah jauh (Faturahman dkk., 2025).

Bagian utama pada FTIR yaitu sebagai berikut.

1. Referensi sinar, yang terbuat dari filamen nerst atau globar yang dipanaskan menggunakan listrik hingga suhu 1.000 sampai $1.800\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Pemecah berkas, berupa material transparan dengan indeks relatif yang menghasilkan 50% refleksi radiasi dan 50% darinya diteruskan.
3. Interferometer, ialah bagian utama dari FTIR yang berfungsi sebagai pembentuk interferogram yang selanjutnya diteruskan menuju detektor.
4. Daerah sampel, adalah daerah berkas acuan dan sampel yang masuk ke dalam daerah sampel, kemudian masing-masing menembus secara bersesuaian.
5. Detektor, adalah piranti yang berfungsi untuk mengukur energi pancaran yang lewat akibat panas yang dihasilkan.

Prinsip kerja FTIR adalah dengan mengemisikan sinar inframerah dari referensi dengan bergerak melalui celah sempit untuk mengontrol jumlah energi yang akan diberikan ke sampel. Pada saat berkas laser dipancarkan memasuki ruang sampel, maka berkas akan diteruskan atau dipantulkan oleh permukaan sampel tergantung dari besarnya energi yang diserap, sampai berkas akhirnya sampai ke detektor. Akibat kelemahan detektor DTGS, jenis material elemen detektor lain telah dikembangkan, seperti merkuri kadmium telurida (MCT). Material ini merupakan paduan unsur merkuri (Hg), kadmium (Cd), dan telurium (Te). MCT merupakan fotokonduktor, ketika menyerap cahaya inframerah, elektron terlepas dan menghasilkan arus listrik. Semakin intens cahaya inframerah, semakin besar arusnya. (Smith, 2011).

Berikut merupakan contoh hasil FTIR pada $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ yang dimuat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. FTIR pada $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ (Yilmaz., 2012).

Menurut penelitian Yilmaz (2012) mengenai struktur keramik yang mengandung $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ dapat dilihat bahwa puncak yang dipilih untuk penentuan doublet kuarsa adalah 795 cm^{-1} dan untuk *anorthite* muncul di sekitar 942 cm^{-1} dan ikatan muncul pada 460 cm^{-1} untuk *mullite*, serta hematit puncaknya muncul pada 680 cm^{-1} . Hal ini menunjukkan bahwa pada suhu $1050\text{ }^\circ\text{C}$ menghasilkan sampel dengan kepadatan permukaan yang jauh lebih halus dan pori-pori berbentuk bola ditemukan dalam formasinya.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei hingga Agustus 2025 di Laboratorium Non-Logam Pusat Riset Teknologi Pertambangan BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1, Tabel 3.2, dan Tabel 3.3.

Tabel 3.1. Alat yang digunakan pada penelitian.

No	Nama Alat	Fungsi
1.	Gelas <i>beaker</i>	Untuk mencampur atau mereaksikan larutan
2.	Pipet volume	Untuk mengambil larutan dengan ketelitian tinggi
3.	Spatula, batang pengaduk	Untuk mengambil bahan kimia dan mengaduk larutan
4.	<i>Hotplate</i> dan <i>magnetic stirrer</i>	Untuk mengaduk larutan dengan bantuan <i>stirrer</i> yang memutar di dalamnya
5.	Labu ukur	Untuk mengukur volume larutan
6.	Labu <i>erlenmeyer</i>	Untuk mencampur dan menyimpan larutan
7.	<i>Cup</i> 50 mL	Untuk wadah larutan yang akan diuji
8.	Neraca analitik	Untuk menimbang bahan yang diinginkan
9.	Mortar dan alu	Untuk menghaluskan bahan
10.	Plastik <i>ziplock</i>	Untuk menyimpan sampel
11.	Oven	Untuk mengeringkan bahan dan alat-alat gelas
12.	<i>Orbital shaker</i>	Untuk menghomogenkan larutan
13.	<i>Disk mill</i>	Untuk menghaluskan bahan dengan cara digiling
14.	pH meter, kertas pH	Untuk mengukur tingkat keasaman dan kebasaan larutan
15.	Ayakan 200 <i>mesh</i>	Untuk memisahkan bagian yang tidak diinginkan berdasarkan ukurannya

Tabel 3.2. Alat karakterisasi yang digunakan.

No	Nama alat	Tipe Alat	Produsen/ Negara Asal
1.	<i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	PANalytical	Belanda
2.	<i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy</i> (SEM-EDS)	Thermo Scientific Apreo	Amerika Serikat
3.	<i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR)	Bruker	Jerman
4.	<i>Spectroscopy Ultraviolet- Visible</i> (UV-Vis)	PerkinElmer	Amerika Serikat

Tabel 3.3. Bahan yang digunakan pada penelitian.

No	Nama Bahan	Fungsi
1.	Serbuk kayu Cempaka	Sebagai adsorben pada geopolimer
2.	<i>Aquades</i>	Sebagai pelarut bahan kimia
3.	<i>Ammonia</i> (NH ₃) 25% merek Aldrich	Untuk menaikkan pH larutan
4.	Metilen biru merek <i>sigma aldrich</i>	Sebagai zat pewarna
5.	<i>Fly ash</i> batubara	Sebagai bahan dalam pembuatan geopolimer
6.	<i>Sodium hydroxide</i> (NaOH) merek Aldrich 97%	Sebagai aktivator untuk memicu reaksi geopolimerisasi
7.	<i>Sodium silicate</i> (Na ₂ SiO ₃) merek Aldrich 98%	Sebagai aktivator
8.	<i>Hydrochloric acid</i> (HCl) 37% merek smart lab	Sebagai asam kuat yang dapat menurunkan pH larutan
9.	<i>Ferri klorida heksahidrat</i> (FeCl ₃ 6H ₂ O) 97% merek Aldrich	Sebagai prekursor dari Fe

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur dalam penelitian ini yakni:

3.3.1 Sintesis Geopolimer

Tahapan pada prosedur ini adalah:

1. Sebanyak 14 M pelet NaOH dilarutkan menggunakan aquades.
2. Alkaline solution (NaOH dengan Na₂SiO₃) dengan perbandingan 2:1 yang dicampur untuk membuat alkali aktivator.
3. Masukkan *fly ash* dan aduk hingga homogen.
4. Cetak menggunakan cetakan dan dibiarkan pada suhu kamar selama 4 hari.
5. Disk mill selama 5 menit dengan kecepatan 500 rpm dan diayak menggunakan *mesh* 200 dan disimpan dalam plastik zip.

3.3.2 Preparasi Serbuk Kayu

Tahapan pada prosedur ini adalah:

1. Serbuk kayu dicuci berulang kali dengan aquades hingga bersih.
2. Serbuk kayu dikeringkan pada suhu 80°C selama 24 jam.
3. Serbuk kayu dihidrolisis dengan sulfuric acid (H_2SO_4) 60% pada suhu 45°C selama 30 menit dengan diaduk rutin.
4. Serbuk kayu yang sudah dihidrolisis dicuci dengan aquades hingga pH konstan dan dikeringkan pada suhu 80°C hingga kering dan disimpan dalam plastik zip.

3.3.3 Sintesis Fe_2O_3 Menggunakan Metode Presipitasi

Tahapan pada prosedur ini adalah:

1. 4,054 g *ferri klorida heksahidrat* ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) dilarutkan dalam 100 mL *aquades* diaduk selama 1 jam pada suhu 80°C untuk mendapatkan larutan konsentrasi 0,05 M dengan larutan 50 ml.
2. Tambahkan NH_3 setetes demi setetes untuk mempertahankan nilai pH 11.
3. Stirrer selama 4 jam pada suhu 80°C.
4. Sentrifugasi dengan kecepatan 5000 rpm selama 10 menit untuk mendapatkan endapan.
5. Endapan yang dihasilkan dicuci menggunakan aquades dan etanol beberapa kali dan dikeringkan pada suhu 80°C selama 12 jam.
6. Kalsinasi pada suhu 700°C selama 4 jam.
7. Haluskan menggunakan mortar dan simpan dalam plastik zip.

3.3.4 Sintesis Komposit Geopolimer/Serbuk Kayu dengan Fe_2O_3

Tahapan pada prosedur ini adalah:

1. Untuk membuat komposit geopolimer/serbuk kayu dengan perbandingan 10:1 gram, kemudian geopolimer dicampur menjadi satu dengan serbuk kayu dan diaduk hingga homogen.
2. Untuk membuat komposit geopolimer/serbuk kayu/ Fe_2O_3 menggunakan perbandingan 10:1:1 gram. Selanjutnya, geopolimer dicampur menjadi satu dengan serbuk kayu dan serbuk Fe_2O_3 hingga homogen.

3. Kedua variasi geopolimer tersebut dicetak serta dibiarkan pada suhu kamar selama 4 hari. Setelah itu, *disk mill* dengan kecepatan 800 rpm selama 5 menit, diayak dengan *mesh* 200, dan disimpan pada plastik zip.

3.3.5 Karakterisasi

Hasil sintesis komposit geopolimer/serbuk kayu/ Fe_2O_3 dikarakterisasi menggunakan SEM EDS untuk melihat permukaan citra suatu bahan, XRD untuk mengkarakterisasi struktur padatan geopolimer, FTIR untuk mengkarakterisasi gugus fungsi geopolimer dan kemampuannya sebagai adsorben terhadap metilen biru menggunakan *Ultraviolet-visible* (UV-Vis).

3.3.6 Daftar Nama Sampel

Nama sampel yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.4

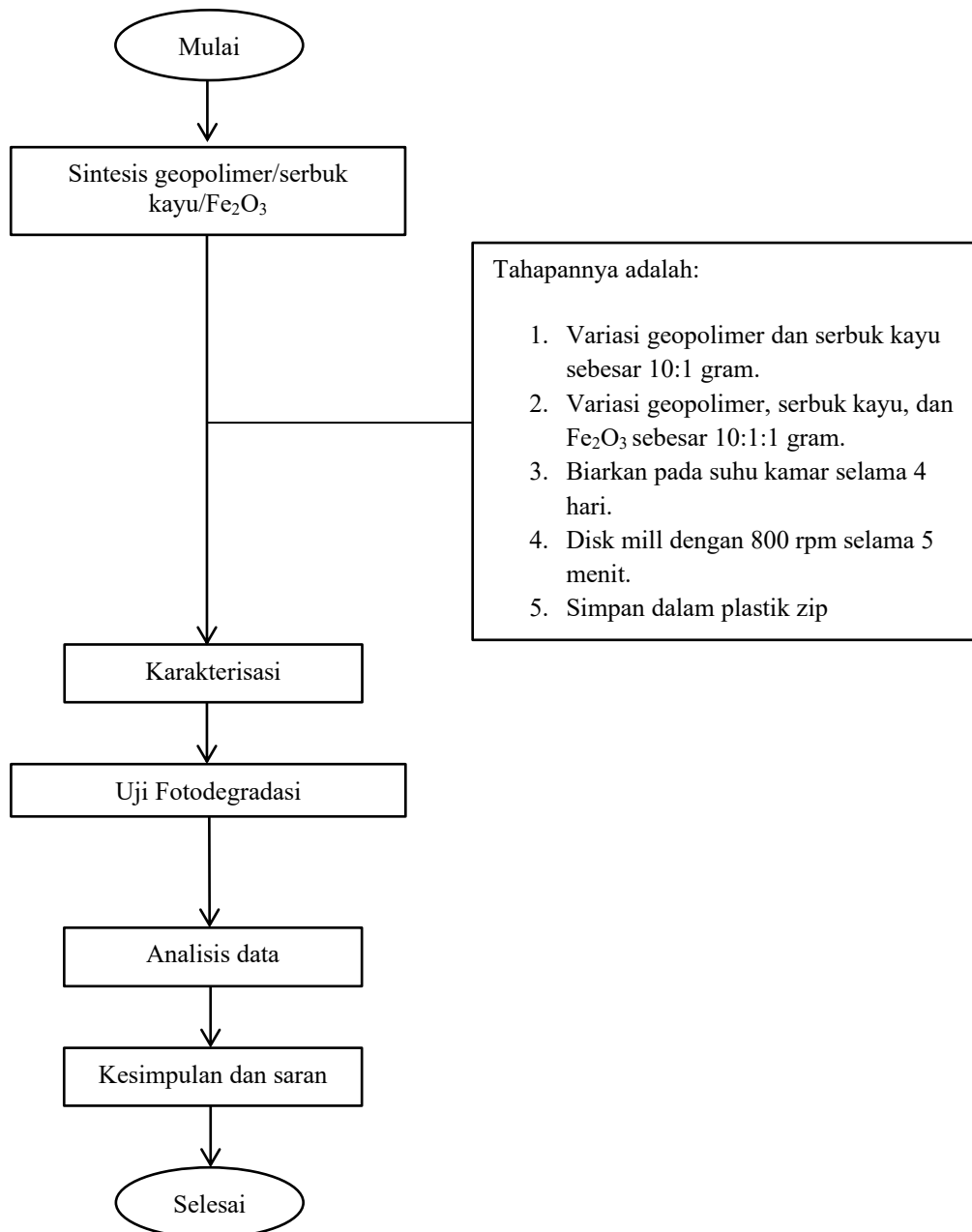
Tabel 3.4 Daftar Nama Sampel yang digunakan pada penelitian

No	Nama	Keterangan
1.	GP (1,5,15,30,60, dan 90)	Tanpa Lampu (18 sampel)
2.	GP/SK (1,5,15,30,60, dan 90)	Dengan Lampu (18 sampel)
3.	GP/SK/FE (1,5,15,30,60, dan 90)	
4.	LGP 1(1,5,15,30,60, dan 90)	
5.	LGP/SK (1,5,15,30,60, dan 90)	
6.	LGP/SK/FE (1,5,15,30,60, dan 90)	

Tabel 3.4 menunjukkan daftar nama-nama sampel yang digunakan dalam penelitian, dimana sampel dengan kode GP 1 merupakan sampel geopolimer dengan variasi waktu 1 menit dan seterusnya. Sampel dengan kode GP/SK 1 merupakan sampel geopolimer/serbuk kayu dengan variasi waktu 1 menit dan seterusnya. Sampel dengan kode GP/SK/FE 1 merupakan sampel geopolimer/serbuk kayu/ Fe_2O_3 dengan variasi waktu 1 menit dan seterusnya. Sedangkan sampel yang diawali dengan L merupakan sampel yang diuji menggunakan lampu UV dan tanpa L berarti sampel diuji tidak menggunakan lampu UV. Masing-masing sampel yang digunakan seberat 0,02 gram dan di stirrer dengan waktu yang diinginkan sedangkan lampu yang digunakan adalah lampu UV Germicidal 11 Watt, ketika menggunakan lampu diaduk dengan kotak hitam tertutup dengan jarak gelas *beaker* ke lampu sekitar 15 cm.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pembuatan komposit geopolimer dengan penambahan serbuk kayu dan Fe_2O_3 berhasil dilakukan melalui proses geopolimerisasi.
2. Pengaruh penambahan serbuk kayu dan Fe_2O_3 terhadap kemampuan adsorpsi metilen biru menunjukkan bahwa serbuk kayu dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi, sedangkan Fe_2O_3 berperan sebagai fotokatalis yang mempercepat degradasi metilen biru di bawah radiasi UV, ditunjukkan dengan penurunan absorbansi yang lebih cepat dibandingkan sampel tanpa Fe_2O_3 .
3. Hasil karakterisasi struktur fasa, gugus fungsi, morfologi, dan sifat absorbansi menunjukkan terbentuknya jaringan aluminosilikat dengan gugus fungsi khas Si–O–Si, Si–O–Al, O–H, dan C–H. Penambahan Fe_2O_3 memadatkan morfologi dan memodifikasi struktur matriks, sedangkan serbuk kayu tetap memberikan kontribusi terhadap perubahan morfologi yang mempengaruhi kemampuan adsorpsi.

5.2. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan mengoptimalkan rasio penambahan serbuk kayu dan Fe_2O_3 untuk memperoleh keseimbangan antara kapasitas adsorpsi dan efisiensi fotodegradasi, serta melakukan karakterisasi permukaan lengkap seperti pengukuran BET (luas permukaan, porositas), zeta potential, dan titik muatan permukaan (pHpzc) untuk menjelaskan mekanisme adsorpsi elektrostatis dan fisiko-kimia.

DAFTAR PUSTAKA

- Alum, B. N. 2024. Advances in UV Spectroscopy for Monitoring the Environment. *Research Invention Journal of Biological and Applied Sciences*. No.3. Vol.1. Page. 82–89.
- Benjelloun, M., Miyah, Y., Akdemir Evrendilek, G., Zerrouq, F., and Lairini, S. (2021). Recent advances in adsorption kinetic models: Their application to dye types. *Arabian Journal of Chemistry*. Vol. 14. No. 4. Page. 103031–103052.
- Bishop, J., Madejová, J., Komadel, P. and Fröschl, H. 2002. The Influence of Structural Fe, Al and Mg on the Infrared OH Bands in Spectra of Dioctahedral Smectites. *Clay Minerals*. Vol. 37. Page. 607–616.
- Bouaissi, A., Li, L.Y., Moga, L.M., Sandu, I.G., Al Bakri Abdullah, M.M. and Sandu, A.V. 2018. A Review on Fly Ash as a Raw Cementitious Material for Geopolymer Concrete. *Revista de Chimie*. Vol. 69. No. 7. Page. 1661–1667.
- Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E. G., and Aboul-Enein, H. Y. 2015. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. Vol.45. No.4. Page. 289–299.
- Bradut, A., Ionescu, M., Chira, M., Vermesan, H., Hegyi, A., Lăzărescu, A.V., Thalmaier, G. and Sur, I.M. 2022. Influence of Fe₂O₃, MgO and Molarity of NaOH Solution on the Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymers. *Materials*. Vol. 15. Page. 1–18.
- Chakravorty, D., and Roy, S. 2024. A review of photocatalysis: Basic principles, processes, and materials. *Sustainable Chemistry for the Environment*. Vol. 8. No. 1. Page. 3-14.
- Colom, X. and Carrillo, F. 2002. Crystallinity changes in lyocell and viscose-type fibres by caustic treatment. *European Polymer Journal*. Vol. 38. No. 11. Page. 225–230.
- Cullity, B.D. dan Stock. S.R. 2014. *Element of X-Ray Diffraction*. Person New International Edition. Us. Page. 151.

- Danielowska, D., S. and Jablonska, M. 2022. Chemical and mineral composition of ashes from wood biomass combustion in domestic wood-fired furnaces. *International Journal of Environmental Science and Technology*. Vol. 19. No.1. Page. 1-14.
- Davidovits, J. 2020. *Geopolymer Chemistry and Applications*. Saint-Quentin, France: Institut Géopolymère. Page.505–512.
- Dunlap, M., and Adaskaveg, J. E. 1997. *Introduction To The Scanning Electron Microscope; Theory Practice Dan Produres*. Facility For Advanced Instrumen. Page. 9.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., dan van Deventer, J. S. J. 2007. Geopolymer Technology: The Current State of the Art. *Journal of Materials Science*. Vol. 42. No. 9. Page. 2917–2933.
- El Alouani, M., Saufi, H., Aouan, B., Bassam, R., Alehyen, S., Rachdi, Y., El Hadki, H., El Hadki, A., Mabrouki, J., Belaaouad, S., Ez-Zaki, H., and Barka, N. 2024. A comprehensive review of synthesis, characterization, and applications of aluminosilicate materials-based geopolymers. *Environmental Advances*. Vol.16. Article No. 100524.
- Faturachman, G. F. Ramanda, A. A. Maharani, S. Latif, L. A. Belo, G. A., G. and Ayubi., S. G. 2025. Application of Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) for Quantitative Analysis of Pharmaceutical Compounds. *Indonesian Journal of Pharmaceutical Education (e-Journal)*. Vol. 5. No. 1. Page. 27-33.
- Finger, L. W., and Hazen, R. M. 1980. Crystal structure and isothermal compression of Fe_2O_3 hematite at high pressure and temperature. *Journal of Applied Physics*. Vol. 51. No. 10. Page. 5362–5367.
- Foit, F. F., and Peacor, D. R. 1973. The anorthite crystal structure at 410 and 830°C. *American Mineralogist*. Vol. 58. No. 1. Page. 1–6.
- Goudjil, M. B., Dali, H., Zighmi, S., Mahcene, Z., d and Bencheikh, S. E. 2024. Photocatalytic Degradation Of Methylene Blue Dye With Biosynthesized Hematite Fe_2O_3 Nanoparticles Under UV-Irradiation. *Desalination And Water Treatment*, Vol. 317, Article No. 100079.
- Hill, R. J. and Howard, C. J. 1987. Quantitative phase analysis from neutron powder diffraction data using the Rietveld method. *Journal of Applied Crystallography*. Vol. 20. No. 6. Page. 467–474.
- Hojamberdiev, M., Zhu, G., Eminov, A., and Okada, K. 2013. Template-Free Hydrothermal Synthesis Of Hollow A-Feooh Urchin-Like Spheres And Their Conversion To A- Fe_2O_3 Under Low-Temperature Thermal Treatment In Air. *Journal Of Cluster Science*. Vol. 24. No.1. Page. 97–106.

- Iskandari, A., Baghdadi, A. M. and Bannani, F. 2024. Polyoxometalate Supported on Bentonite as Efficient Adsorbent for the Removal of Methylene Blue Dye and Bacteria from Wastewater. *Journal of Physical Chemistry*. Vol. 14. No. 1. Page. 61-81.
- Kalinkin, A.M., Kalinkina, E.V., Kruglyak, E.A., Semushin, V.V., Chislov, M.V. and Zvereva, I.A. 2023. Composite Geopolymers Based on Mechanically Activated Fly Ash Blended with SrCO_3 (Strontianite) and BaCO_3 (Witherite). *Minerals*. Vol. 13. Page. 1–14.
- Kisi, E. J. 1994. Reitveld Analysis of Powder Diffraction Pattern. *Material Forum*. Page. 135-153.
- Koichi Momma and Fujio Izumi. 2021. VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *Journal of Applied Crystallography*. Vol. 44. Page. 1272–1276.
- Liu, L., Cui, Z., Feng, B., Sui, M., Huang, H., and Wu, Z. 2024. Synthesis of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ Photocatalytic Composites for Methylene Blue Degradation as a Novel Strategy for High-Value Utilisation of Iron Scales. *Journal materials*. Vol. 17. No.1. Page. 16-20.
- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., and Illikainen, M. 2018. One-part alkali-activated materials: *A review*. *Cement and Concrete Research*. Vol. 1. No. 103. Page. 21–34
- Matsimbe, J., Dinka, M., Olukanni, D. and Musonda, I. 2022. A Bibliometric Analysis of Research Trends in Geopolymer. *Materials*. Vol. 15. Page. 1–20.
- Mei, Q., Zhang, F., Wang, N., Yang, Y., Wu, R., and Wang, W. 2019. *TiO₂/Fe₂O₃ heterostructures with enhanced photocatalytic reduction of Cr(VI) under visible light irradiation*. RSC Advances. Vol.9. No.39. Page.22764–22771.
- Mollier, G. 1938. *Eine Vierfachfarbung zur Darstellung glatter und quergestreifter Muskulature und ihrer Beziehung zun/Bindegewebe*. Zts. Wis. Mikr. Vol.55. No. 1. Page. 472-473.
- Mullan, M. D. 1993. *Scanning Electron Microscopy (SEM)*. 1928-1965. the Foundation for Advances of Medicine and Science (FAMS).
- Ngnintedem, D.L.V., Lampe, M. dan Rüschler, C.H. 2022. Effects of Iron Minerals on the Compressive Strengths and Microstructural Properties of Metakaolin-Based Geopolymer Materials. *Gels*. Vol. 8. Page. 1–20.
- Pandey, K.K. and Pitman, A.J. 2003. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. *International Biodeterioration dan Biodegradation*. Vol. 52. No. 3. Page. 151–160.
- Periotto, B., Balic-Zunic, T., Nestola, F., Katerinopoulou, A., and Angel, R. J. 2012. Re-investigation of the crystal structure of enstatite under high-

- pressure conditions. *American Mineralogist*. Vol. 97. No. 11. Page. 1741–1748.
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A. and Khalloufi, S. 2023. Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation—A Review. *Journal MDPI*. Page. 775-805.
- Ramli, C.Z.A., Asim, N., Isahak, W.N.R.W., Emdadi, Z., Ahmad-Ludin, N., Yarmo, M.A. and Sopian, K. 2014. Photocatalytic Degradation of Methylene Blue under UV Light Irradiation on Prepared Carbonaceous TiO₂. *The Scientific World Journal*. Vol. 2014. Page. 1–8.
- Rietveld, H. M. 1969. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Journal of Applied Crystallography*. Vol. 2. No. 2. Page. 65–71.
- Rofi, M. R. I., and Rahman, M. R. (2023). A critical review on environmental pollution caused by the textile industry. *Explora: Environment and Resource*. Vol. 2. No.2. Hal. 206–232.
- Rovnaník, P. 2010. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. Vol. 24. No. 7. Page. 116–118.
- Shahad., S. H. 2017. Preparation of maghemite γ -Fe₂O₃ nanoparticles by electrochemical method. *Wasit journal for science dan medicine*. Vol. 10. No. 2. Page. 47-51.
- Smith B. C. 2011. *Foundamental Of Fourier Transform Infrared Spectroscopy*. Taylor dan Francis Group. Page. 46.
- Talbot, D., Campos, J.Q., Checa-Fernandez, B.L., Marins, J.A., Lomenech, C., Hurel, C., Godeau, G.D., Raboisson-Michel, M., Verger-Dubois, G., Obeid, L., Kuzhir, P. and Bee, A. 2021. Adsorption of Organic Dyes on Magnetic Iron Oxide Nanoparticles. Part I: Mechanisms and Adsorption-Induced Nanoparticle Agglomeration. *ACS Omega*. Vol. 6. Page. 19086–19098.
- Temuujin, J., van Riessen, A. and MacKenzie, K.J.D. 2012. Preparation and characterization of fly ash based geopolymer–mortar. *Construction and Building Materials*. Vol. 24. No. 10. Page. 1906–1910.
- Toniolo, N., and Boccaccini, A. R. 2017. *Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste: A review*. *Ceramics International*. Vol. 43. No.17. Page. 14545–14551.
- Tucek, J., Machala, L., Ono, S., Namai, A., Salazar-Alvarez, G. 2015. Zeta-Fe₂O₃. A new stable polymorph in iron(III) oxide family. *Scientific Reports*. Vol.5. No.1. Page. 15091.
- Varol, E.A. and Mutlu, Ü. 2023. TGA–FTIR Analysis of Biomass Samples Based on the Thermal Decomposition Behavior of Hemicellulose, Cellulose, and Lignin. *Energies*. Vol. 16. Page. 1–19.

- Wani, H. A., Shaikh, V. R., More, D. and Patil, K. J. 2023. Studies of monomer–dimer equilibria of methylene blue as a probe to investigate the solute–solvent and hydrophobic interactions in aqueous solutions of polyethylene glycols at 298 K.. *Chemical Physics Impact*. Vol.7. 100288.
- Wei, P. H. 1935. Die Bindung im Quarz. *Zeitschrift für Kristallographie*. Vol. 92. No. 1. Page. 355–362.
- Yilmaz., G. 2012. Structural Characterization of Glass–Ceramics Made from Fly Ash Containing $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ and Analysis by FT-IR–XRD–SEM Methods. *Journal of Molecular Structure*. Vol. 1019. No. 1. Page. 37-42.
- Yusuf, M. O. 2023. Bond Characterization in Cementitious Material Binders Using Fourier-Transform Infrared Spectroscopy. *Applied Sciences*. Vol.13. No.5. Page. 21-27.
- Zhang, X. Xue, W. Yang, X. Shaikh, F. U.A. 2015. Effect of surface treatments on the physical mechanical properties and interfacial microstructure of wood fiber-reinforced geopolymer composites. *Journal Industrial Crops and Products*. Vol.226. No.1. 122492.
- Zheng, Y., Zhang, L., Lv, J., Zhang, Y., and Chen, X. (2024). Efficient photocatalytic degradation of methylene blue using $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ composites synthesized from industrial solid waste. *Environmental Technology & Innovation*. Vol.37. No. 103702.