



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (WT43250)

**KOMPOSIT BERBASIS PEMANFAATAN *FLY ASH* MENJADI ZEOLIT
SINTETIS DAN NANO *ZERO VALENT IRON* (nZVI) UNTUK
LIMBAH CAIR ARTIFISIAL Cu(II)**

INDIRRA YASMINE PUTRI SANTOSO
NRP. 1022040025

DOSEN PEMBIMBING
DENNY DERMAWAN, S. T., M. T., Ph. D.
SEKARSARI WIBOWO, S. T., M. T.

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



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

HAIRAN SUJUD

TUGAS AKHIR (WT43250)

**KOMPOSIT BERBASIS PEMANFAATAN *FLY ASH* MENJADI
ZEOLIT SINTETIS DAN *NANO ZERO VALENT IRON* (nZVI)
UNTUK LIMBAH CAIR ARTIFISIAL Cu(II)**

INDIRRA YASMINE PUTRI SANTOSO

NRP. 1022040025

DOSEN PEMBIMBING

DENNY DERMAWAN S.T., M.T., Ph.D

SEKARSARI WIBOWO S.T., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGOLAHAN LIMBAH

JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

SURABAYA

2026

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**HALAMAN PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**KOMPOSIT BERBASIS PEMANFAATAN *FLY ASH* MENJADI ZEOLIT
SINTETIS DAN *NANO ZERO VALENT IRON* (nZVI) UNTUK LIMBAH
CAIR ARTIFISIAL Cu(II)**

**Disusun Oleh:
Indirra Yasmine Putri Santoso
1022040025**

**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. Denny Dermawan, S.T., M.T., Ph.D.	(2740754655130122)	(.....)
2. Sekarsari Wibowo, S.T., M.T.	(6351777678230083)	(.....)
3. Ayu Nindyapuspa, S.T., M.T.	(0458769670230292)	(.....)
4. Milasari, S.Stat., M.Stat.	(1050772673230313)	(.....)

Dosen Pembimbing	NIDN/NUPTK	Tanda Tangan
1. Denny Dermawan, S.T., M.T., Ph.D.	(2740754655130122)	(.....)
2. Sekarsari Wibowo, S.T., M.T.	(6351777678230083)	(.....)

**Menyetujui
Ketua Jurusan,**



**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	<u>PERNYATAAN BEBAS</u> <u>PLAGIAT</u>	No. : F.WD I. 021 Date : 3 Nopember 2015 Rev. : 01 Page : 1 dari 1
--	---	---

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Indirra Yasmine Putri Santoso
 NRP : 1022040025
 Jurusan/Prodi : Teknik Permesinan Kapal/D4-Teknik Pengolahan Limbah

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

“Komposit Berbasis Pemanfaatan *Fly Ash* menjadi Zeolit Sintetis dan *Nano Zero Valent Iron* (nZVI) untuk Limbah Cair Artifisial Cu(II)”

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

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

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 18 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,



(Indirra Yasmine Putri Santoso)

NRP. 1022040025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan kelimpahan berkat, kekuatan, kasih dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Komposit Berbasis Pemanfaatan *Fly Ash* menjadi Zeolit Sintetis dan *Nano Zero Valent Iron* (nZVI) untuk Limbah Cair Artifisial Cu(II)”. Penulisan tugas akhir ini diajukan sebagai salah satu pemenuhan syarat kelulusan pada Program Studi Diploma IV Teknik Pengolahan Limbah di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Penulis juga menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini tidak akan berhasil tanpa bantuan dari berbagai pihak, baik berupa bimbingan, pengarahan, dan motivasi, sehingga dapat memberikan semangat dalam proses penyusunan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang dalam kepada:

1. Papa dan mama tercinta, kedua adik penulis dan seluruh keluarga yang menjadi alasan utama penulis berjuang. Terima kasih atas kesabaran yang tak bertepi dan semangat yang selalu kalian titipkan di saat penulis nyaris menyerah. Tugas akhir dan gelar ini penulis dedikasikan kepada kalian yang telah memberikan segalanya demi masa depan penulis.
2. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T., selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
3. Bapak Dr. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Permesinan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Ibu Dr. Mirna Apriani, S.T., M.T., selaku Koordinator Program Studi Diploma IV Teknik Pengolahan Limbah Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya atas dukungan, motivasi, nasihat, dan doa-doa yang diberikan kepada mahasiswa prodi Teknik Pengolahan Limbah.
5. Bapak Denny Dermawan, Ph.D., selaku Dosen Pembimbing 1 yang telah menuntun, meluangkan waktu, memberikan masukan, nasihat dan doa-doanya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan baik.

6. Ibu Sekarsari Wibowo, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah menuntun, meluangkan waktu, memberikan masukan, nasihat dan doanya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan baik.
7. Ibu Ayu Nindyapuspa, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji 1 dan Koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Pengolahan Limbah Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan masukan, saran, dan dukungan dalam penyempurnaan tugas akhir. Terima kasih atas kerja kerasnya dalam mengatur jadwal sidang, doa-doa, dan semangat untuk mahasiswa prodi Teknik Pengolahan Limbah.
8. Ibu Milasari, S.Stat., M.Stat., selaku Dosen Penguji 2 yang telah memberikan masukan, saran, dan dukungan dalam penyempurnaan tugas akhir penulis.
9. Bapak/Ibu Dosen Teknik Pengolahan Limbah yang telah memberikan dukungan, ilmu yang bermanfaat dan doa kepada mahasiswa prodi Teknik Pengolahan Limbah.
10. Mbak Ifa dan Aan, terima kasih sudah menjadi keluarga penulis di tanah rantau. Terima kasih atas hangat sambutan ketika penulis pulang membawa lelah, serta keceriaan yang selalu berhasil mengembalikan semangat penulis dalam menyusun tugas akhir.
11. Sahabat terbaik saya, Grace, Viola, Lestari, Ica, Novi, Faiq, Ufi, Nilam, Niken dan Hevi, yang terpisahkan oleh jarak, namun kehadirannya selalu dekat di hati. Terima kasih sudah menjadi ruang aman untuk berbagi meski hanya melalui suara dan layar.
12. Anggota seperjuangan P2MW, Nala, Andreas, Dhiyo, Nanda dan Hiu, terima kasih sudah menjadi teman yang paling seru sekaligus pendengar yang baik sehingga perjalanan mengerjakan Tugas Akhir menjadi jauh lebih berwarna berkat kehadiran kalian.
13. Sahabat seperjuangan tangguh saya, Deswitha, Rina, Imelda, Iper, Vidi, Yossie, Poppy, Pinkan, Disa dan Nia. Terima kasih telah menjadi garda terdepan yang selalu siap sedia mendampingi penulis. Humor dan canda tawa kalian yang tak pernah absen untuk mengembalikan semangat penulis.

14. Adik-adik tingkat saya, baik himpunan maupun PKM, Puput, Mia, Naura, Ajeng, Dava, Ardi dan Rara. Terima kasih sudah menjadi *support system* yang menyenangkan. Terima kasih atas setiap cerita lucu dan bantuan yang diberikan, yang secara tidak langsung menjaga semangat dan *mood* penulis hingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.
15. Keluarga besar Teknik Pengolahan Limbah Angkatan 2022, atas kebersamaan dan perjuangan selama empat tahun masa studi. Terima kasih sudah menjadi rekan bertumbuh yang luar biasa.
16. Semua pihak-pihak yang bersangkutan dan tidak dapat penulis sebutkan satu persatu. Terima kasih atas semua doa, dukungan dan bantuan yang telah diberikan.

Penulis menyadari terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan adanya kritik dan saran dari berbagai pihak dalam penyempurnaan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat menambah ilmu pengetahuan dan wawasan dalam perkuliahan khususnya pengolahan limbah cair dengan metode adsorpsi, dan dunia industri serta para pembaca pada umumnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KOMPOSIT BERBASIS PEMANFAATAN *FLY ASH* MENJADI ZEOLIT SINTETIS DAN *NANO ZERO VALENT IRON (NZVI)* UNTUK LIMBAH CAIR ARTIFISIAL Cu(II)

Indirra Yasmine Putri Santoso

ABSTRAK

Pencemaran logam Cu(II) akibat limbah industri mengancam ekosistem dan manusia. Seiring meningkatnya produksi *fly ash* PLTU diproyeksikan mencapai 16,2 juta ton pada tahun 2026, limbah ini berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku zeolit sintetis. Namun, zeolit dari *fly ash* memiliki daya adsorpsi yang relatif rendah sehingga perlu dimodifikasi melalui pembentukan komposit. *Nano Zero Valent Iron (nZVI)* memiliki reaktivitas tinggi terhadap logam berat, tetapi mudah mengalami aglomerasi sehingga diperlukan material penyangga yang stabil. Penelitian ini bertujuan mensintesis komposit zeolit berbasis *fly ash* dan *Nano Zero Valent Iron (Z@nZVI)* dengan rasio massa 2:1 sebagai adsorben Cu(II). Kinerja adsorpsi dievaluasi berdasarkan pengaruh pH, massa adsorben, waktu kontak, konsentrasi awal, serta reusabilitas adsorben. *Fly ash* yang disintesis memiliki kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ masing-masing sebesar 48,98% dan 23,34% dengan rasio Si/Al 2,09. Komposit Z@nZVI memiliki luas permukaan spesifik sebesar 35,93 m²/g. Karakterisasi XRD, FTIR dan pH_{zpc} mengonfirmasi keberadaan zeolit dan nZVI, perubahan gugus fungsi, serta nilai pH_{zpc} sebesar 6,68. Kondisi terbaik adsorpsi Cu(II) diperoleh pada massa adsorben 0,75 g/L, pH 7, waktu kontak 60 menit dan konsentrasi awal 450 mg/L. Mekanisme penyisihan logam berat Cu(II) meliputi proses adsorpsi secara fisisorpsi dan kemisorpsi, reduksi-oksidasi, dan presipitasi.

Kata kunci: Fly Ash; Zeolit-nZVI; Cu(II); Adsorpsi; Redoks; Presipitasi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

COMPOSITES BASED ON THE UTILIZATION OF FLY ASH AS SYNTHETIC ZEOLITE AND NANO ZERO-VALENT IRON (NZVI) FOR THE TREATMENT OF ARTIFICIAL Cu(II) WASTEWATER

Indirra Yasmine Putri Santoso

ABSTRACT

Cu(II) contamination from industrial waste threatens both ecosystems and humans. Fly ash can be utilized as a raw material for synthetic zeolite production; however, its adsorption capacity is relatively low and requires modification. This study aimed to synthesize a fly ash-based zeolite/nano zero-valent iron composite (Z@nZVI) with a mass ratio of 2:1 for Cu(II) removal. Adsorption performance was evaluated with respect to pH, adsorbent dosage, contact time, initial concentration, and reusability. The synthesized fly ash-based zeolite contained 48.98% SiO₂ and 23.34% Al₂O₃, with a Si/Al ratio of 2.09. The Z@nZVI composite had a specific surface area of 35.93 m²/g. XRD, FTIR, and pH_{Hpzc} analyses confirmed the presence of zeolite and nZVI, changes in functional groups, and a pH_{Hpzc} value of 6.68. The optimum Cu(II) removal was achieved at an adsorbent dosage of 0.75 g/L, pH 7, contact time of 60 min, and initial concentration of 450 mg/L. The removal mechanism of heavy metal Cu(II) involves physisorption, chemisorption, reduction-oxidation (redox), and precipitation processes.

Keywords: Fly Ash; Zeolit-nZVI; Cu(II); Adsorption; Redox; Precipitation.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT.....	v
KATA PENGANTAR	vii
ABSTRAK	xi
ABSTRACT.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Logam Berat Cu(II).....	7
2.2 Adsorpsi	8
2.2.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Adsorpsi	9
2.2.2 Efisiensi Removal	10
2.2.3 Kapasitas Adsorpsi.....	11
2.2.4 Isoterm Adsorpsi	11
2.2.5 Kinetika Adsorpsi	13
2.3 <i>Nano Zero Valent Iron (nZVI)</i>	15
2.4 Fly Ash.....	17
2.4.1 Klasifikasi Fly Ash.....	17
2.5 Zeolit	18
2.5.1 Zeolit Alam	19
2.5.2 Zeolit Buatan.....	20
2.6 Komposit Zeolit Sintetis - <i>Nano Zero Valent Iron (nZVI)</i>	21

2.7 Spektrofotometri UV-Vis	22
2.8 Pengujian Karakteristik	22
2.8.1 <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR).....	23
2.8.2 <i>Brunauer–Emmett–Teller</i> (BET).....	23
2.8.3 <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	24
2.8.4 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	24
2.8.5 pH Point Zero Charge (pHpzc).....	25
2.9 <i>Analysis of Variance</i> (ANOVA).....	25
2.10 Penelitian Terdahulu.....	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	29
3.2 Identifikasi Masalah	31
3.3 Studi Literatur.....	31
3.4 Penetapan Rumusan dan Batasan Masalah.....	31
3.5 Penetapan Tujuan dan Manfaat Penelitian	31
3.6 Pengumpulan Data.....	32
3.6.1 Data Primer.....	32
3.6.2 Data Sekunder	32
3.7 Penentuan Tempat dan Waktu Penelitian.....	32
3.7.1 Penentuan Tempat Penelitian	32
3.7.2 Penentuan Waktu Penelitian.....	32
3.8 Metode Penelitian.....	33
3.9 Populasi dan Sampel Penelitian.....	33
3.9.1 Populasi Penelitian	33
3.9.2 Sampel Varian	33
3.10 Penentuan Variabel dan Parameter Bebas	34
3.10.1 Variabel Bebas.....	34
3.10.2 Variabel Terikat.....	37
3.10.3 Variabel Kontrol	39
3.11 Persiapan Penelitian.....	40
3.11.1 Alat	40
3.11.2 Bahan	41
3.12 Prosedur Penelitian	42

3.12.1 Preparasi Sampel <i>Fly Ash</i>	42
3.12.2 Peleburan Alkali pada <i>Fly Ash</i>	42
3.12.3 Persiapan Larutan Natrium Aluminat	42
3.12.4 Pembentukan Nukleasi Melalui Waktu Aging.....	43
3.12.5 Pembentukan Zeolit Sintetis Melalui Proses Kalsinasi.....	43
3.12.6 Komposit Zeolit Sintetis – Nano Zero Valent Iron (nZVI)	44
3.12.7 Pembuatan Larutan Artifisial Cu(II)	45
3.12.8 Preparasi Sampel untuk Pembacaan Spektrofotometri UV-Vis.....	45
3.12.9 Pembuatan Kurva Kalibrasi Logam Berat Cu(II)	46
3.12.10 Variasi Konsentrasi Logam Cu(II) dan Waktu Kontak.....	46
3.12.11 Pengukuran Pengaruh pH.....	47
3.12.12 Pengukuran Pengaruh Massa Adsorben.....	48
3.12.13 Pengukuran Pengaruh Reusabilitas Adsorben	48
3.13 Pengujian Karakteristik.....	49
3.13.1 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	49
3.13.2 <i>Fourier Transform-Infrared Spectroscopy</i> (FTIR)	49
3.13.3 <i>Brunauer–Emmett–Teller</i> (BET)	50
3.13.4 pH Point Zero Charger (pHpzc).....	50
3.14 Analisis Data	50
3.14.1 Efisiensi Removal	50
3.14.2 Kapasitas Adsorpsi.....	50
3.14.3 Isoterm Adsorpsi	51
3.14.4 Kinetika Adsorpsi	52
3.15 Uji Statistika.....	53
3.16 Kesimpulan dan Saran.....	54
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1 Uji Karakteristik.....	55
4.1.1 <i>X-ray Fluorescence</i> (XRF).....	55
4.1.2 <i>X-ray Diffraction</i> (XRD).....	56
4.1.3 <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR).....	63
4.1.4 <i>Brunauer–Emmett–Teller</i> (BET)	67
4.1.5 pH <i>Point Zero Charge</i> (pHpzc)	68
4.2 Efektivitas Proses Adsorpsi	70

4.2.1 Pengaruh Konsentrasi dan Waktu Kontak terhadap Proses Adsorpsi Logam Cu(II).....	70
4.2.2 Pengaruh pH Larutan terhadap Proses Adsorpsi Logam Cu(II).....	73
4.2.3 Pengaruh Massa Adsorben terhadap Proses Adsorpsi Logam Cu(II) ..	76
4.2.4 Reusabilitas Adsorben dalam Proses Adsorpsi Logam Berat Cu(II) ...	77
4.3 Analisis Isoterm Adsorpsi dan Kinetika Adsorpsi	78
4.3.1 Kinetika Adsorpsi	78
4.3.2 Isoterm Adsorpsi	80
4.4 Analisis Mekanisme Penghilangan Cu(II).....	82
4.5 Uji Statistika	85
4.5.1 Pengaruh Waktu Kontak dan Konsentrasi Larutan	86
4.5.2 Pengaruh pH Larutan.....	88
4.5.3 Pengaruh Massa Adsorben	90
4.5.4 Pengaruh Reusabilitas Adsorben	91
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	95
5.1 Kesimpulan.....	95
5.2 Saran	97
DAFTAR PUSTAKA.....	99
DAFTAR LAMPIRAN	119
BIOGRAFI PENULIS	209

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Proses Adsorpsi	8
Gambar 2. 2 Grafik Isoterm Langmuir	12
Gambar 2. 3 Grafik Isoterm Freundlich	13
Gambar 2. 4 Mekanisme nZVI dalam Media Larutan	15
Gambar 2. 5 Struktur nZVI	16
Gambar 2. 6 Struktur Zeolit	18
Gambar 2. 7 Spektrofotometri UV-Vis	22
Gambar 2. 8 <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>	23
Gambar 2.9 <i>Quantachrome Quadrasorb-Evo Surface Area & Pore Size Analyzer</i>	24
Gambar 2.10 <i>X-Ray Fluorescence</i>	24
Gambar 2.11 <i>X-Ray Diffraction</i>	25
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	30
Gambar 3. 2 Skema Penelitian Variabel Bebas	35
Gambar 4. 1 Pola Difraksi Zeolit	57
Gambar 4. 2 Pola Difraksi Komposit Z@nZVI Sebelum Adsorpsi	60
Gambar 4. 3 Pola Difraksi Komposit Z@nZVI Setelah Adsorpsi	61
Gambar 4. 4 Spektrum FTIR dari Zeolit	63
Gambar 4. 5 Spektrum FTIR dari Komposit Z@nZVI	64
Gambar 4. 6 Analisis Titik Muatan Nol (pHpzc) dari Komposit Z@nZVI	69
Gambar 4. 7 Pengaruh Variasi Konsentrasi dan Waktu Kontak terhadap Efisiensi Removal	71
Gambar 4. 8 Pengaruh Variasi Konsentrasi dan Waktu Kontak terhadap Kapasitas Adsorpsi	72
Gambar 4. 9 Pengaruh Variasi pH terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi	74
Gambar 4. 10 Kesetimbangan Hidrolisis Cu(II) terhadap pH	75
Gambar 4. 11 Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi	76
Gambar 4. 12 Pengaruh Reusabilitas Adsorben terhadap Efisiensi Removal	77
Gambar 4. 13 Kinetika Adsorpsi Model Orde Dua Semu	79
Gambar 4. 14 Kinetika Adsorpsi Model Orde Satu Semu	80
Gambar 4. 15 Isoterm Adsorpsi Model Freundlich	81
Gambar 4. 16 Isoterm Adsorpsi Model Langmuir	82
Gambar 4. 17 Mekanisme Penghilangan Logam Berat Cu(II)	84

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Jenis-Jenis Zeolit Alami.....	19
Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu	27
Tabel 3. 1 Variabel Bebas Penelitian	34
Tabel 3. 2 Uji Pengaruh Konsentrasi Logam Cu(II) terhadap Waktu Kontak.....	35
Tabel 3. 3 Uji Pengaruh Variasi pH	36
Tabel 3. 4 Uji Pengaruh Variasi Massa Adsorben	37
Tabel 3. 5 Uji Reusabilitas Komposit	37
Tabel 3. 6 Variabel Terikat	38
Tabel 3. 7 Variabel Kontrol Umum	40
Tabel 4. 1 Komposisi Oksida dalam Fly Ash	55
Tabel 4. 2 Identifikasi Posisi 2 θ pada uji XRD.....	57
Tabel 4. 3 Identifikasi pola difraksi komposit Z@nZVI sebelum Adsorpsi	60
Tabel 4. 4 Identifikasi pola difraksi komposit Z@nZVI setelah Adsorpsi	62
Tabel 4. 5 Identifikasi Spektrum FTIR Komposit Z@nZVI.....	66
Tabel 4. 6 Hasil Analisis Karakterisasi BET pada Komposit Z@nZVI	67
Tabel 4. 7 Analisis Titik Muatan Nol (pHpzc) Komposit Z@nZVI.....	69
Tabel 4. 8 Identifikasi Kinetika Adsorpsi Model Orde Satu Semu dan Orde Dua Semu.....	79
Tabel 4. 9 Analisis Uji Normalitas terhadap Variasi Waktu Kontak dan Konsentrasi.....	87
Tabel 4. 10 Analisis Uji Kruskal-Wallis terhadap Variasi Waktu Kontak dan Konsentrasi.....	88
Tabel 4. 11 Analisis Uji Normalitas terhadap Pengaruh pH.....	88
Tabel 4. 12 Analisis Uji Homogenitas terhadap Pengaruh pH	89
Tabel 4. 13 Analisis Uji Welch terhadap Pengaruh pH	89
Tabel 4. 14 Analisis Uji Normalitas terhadap Pengaruh Massa Adsorben	90
Tabel 4. 15 Analisis Uji Homogenitas terhadap Pengaruh Massa Adsorben	90
Tabel 4. 16 Pengaruh Uji <i>One-Way</i> ANOVA terhadap Pengaruh Massa Adsorben	91
Tabel 4. 17 Analisis Uji Normalitas terhadap Pengaruh Reusabilitas Adsorben..	91
Tabel 4. 18 Analisis Uji Homogenitas terhadap Pengaruh Reusabilitas Adsorben	92
Tabel 4. 19 Analisis Uji <i>One-Way</i> ANOVA terhadap Pengaruh Reusabilitas Adsorben	92

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Logam berat tembaga pada dasarnya merupakan komponen alami lingkungan. Namun, aktivitas manusia meningkatkan konsentrasi tembaga pada lingkungan secara signifikan, salah satunya limbah industri (Hakim A, Subekti S, 2016; Setyaningrum et al., 2018). Logam berat Cu(II) banyak digunakan dalam industri pelapisan logam, cat dan pewarna, penyulingan minyak bumi, pupuk, pertambangan dan metalurgi, bahan peledak, pestisida dan telah dianggap sebagai salah satu logam berat berbahaya yang paling utama dalam aliran limbah cair industri tersebut. Pencemaran logam berat tembaga pada badan air menimbulkan ancaman serius bagi ekosistem perairan dan kesehatan manusia (Y. Liu *et al.*, 2023). Akumulasi logam berat tembaga pada organ manusia seperti ginjal, hati, dan organ lainnya melalui rantai makanan menyebabkan keracunan hingga kematian (Briffa *et al.*, 2020). Oleh karena itu, diperlukan pengolahan air limbah yang tepat untuk mengatasi permasalahan limbah logam berat tembaga.

Penerapan adsorpsi dapat menjadi salah satu solusi efektif karena memiliki kelebihan di antaranya biaya yang relatif murah, proses sederhana, efektifitas dan efisiensinya relatif tinggi. Teknologi adsorpsi adalah proses penyerapan substansi terlarut terhadap luas permukaan benda penyerap dimana terjadi ikatan kimia-fisika (Purwitasari *et al.*, 2022). *Nano Zero Valent Iron* merupakan teknologi menjanjikan dalam pengolahan limbah cair terkontaminasi logam berat karena memiliki kemampuan reduksi yang kuat dan kemudahan dalam operasionalnya (S. Li *et al.*, 2024). Namun, nZVI memiliki keterbatasan akibat gaya *Van der Waals* dan gaya magnetik yang tinggi sehingga menyebabkan penurunan luas permukaan. Aglomerasi nZVI dapat diatasi dengan memodifikasi permukaannya menggunakan material lain meliputi zeolit, tanah liat, biopolimer, serta material berbasis karbon (Mehrabi *et al.*, 2019).

Penelitian penghilangan logam berat dalam air masih banyak memanfaatkan zeolit alam sebagai pendukung. Di sisi lain, material ini memiliki keterbatasan berupa keterbatasan pasokan, serta dampak lingkungan dari aktivitas penambangan (Ketut *et al.*, 2022; Senila & Cadar, 2024; Suwardi & Mulyanto, 2006). Seperti yang dilaporkan dalam penelitian yang dilakukan Salih *et al.* (2020), Zeolit *Clinoptilolite* digunakan sebagai adsorben untuk mereduksi kontaminan Cu(II). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi terbaik pada konsentrasi 400 mg/l dan massa adsorben 8 gram, kapasitas adsorpsi mencapai 2,30 mg/g. Namun demikian, pada pH sangat rendah (<4), zeolit dapat larut atau rusak, sedangkan pada pH tinggi (>7), struktur kristalnya dapat berubah, mengurangi kemampuan adsorpsi.

Pemanfaatan *fly ash* sebagai zeolit sintesis mendapatkan perhatian signifikan karena memiliki potensi dalam mengatasi tantangan lingkungan secara berkelanjutan (Mlonka-Mędrala, 2023). Peningkatan produksi *fly ash* dipengaruhi oleh meningkatnya kebutuhan listrik. Pada tahun 2021, diperkirakan produksi *fly ash* mencapai 12 juta ton dan akan bertambah menjadi 16,2 juta ton jika diproyeksikan hingga tahun 2027 (Abinawa & Alieftiyani, 2024). Di Indonesia, pemanfaatan *fly ash* masih kurang maksimal dibandingkan negara lain, dimana hanya tiga PLTU nasional yang mengantongi izin pemanfaatan *fly ash* dan *bottom-ash* (FABA), yaitu PLTU Suralaya, Labuan dan Indramayu (Ekaputri *et al.*, 2020, dikutip dalam Olii *et al.*, 2023). Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, *fly ash* dari proses pembakaran boiler pada PLTU diklasifikasikan sebagai limbah Non-B3 terdaftar berkode N106, yang memungkinkan dilakukan pemanfaatan kembali, salah satunya sebagai material adsorben.

Fly ash memiliki struktur kristal fasa kuarsa dan *mullite*. *Fly ash* mengandung unsur kimia seperti silika 57,82% (SiO₂), alumina 22,10% (Al₂O₃), dan besi oksida 8,33% (Fe₂O₃) dan sisanya adalah kandungan kalsium, karbon dan magnesium (Febrianti *et al.*, 2022). Kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ dalam *fly ash* dapat dimanfaatkan sebagai komponen pembentukan zeolit

sintetis (Rieswana *et al.*, 2024). Zeolit alami memiliki kandungan kation lemah, molekul air, oksida bebas yang dapat menurunkan kapasitas adsorpsi maupun sifat katalis sehingga perlu dilakukan aktivasi terlebih dahulu (Mukaromah *et al.*, 2014).

Pemanfaatan *fly ash* sebagai zeolit buatan menjadi perhatian karena memiliki potensi ekonomi yang tinggi (Mlonka-Mędrala, 2023). Penelitian yang dilakukan oleh Buema *et al.*, (2020) melaporkan bahwa pemurnian partikel *fly ash* meningkatkan luas permukaan yang berdampak pada peningkatan kemampuan adsorpsi Cd(II). Uji EDX membuktikan munculnya unsur Cd setelah proses adsorpsi sebesar 3,0207%. Disisi lain, penggunaan adsorben berlebih menyebabkan aglomerasi sehingga kapasitas adsorpsi menurun. Upaya yang dapat dilakukan untuk meminimalkan aglomerasi yakni dengan pengompositan unsur pendukung seperti nZVI.

Penelitian yang dilakukan Yang *et al.* (2022) menyatakan bahwa zeolit 5A hasil sintesis dari *fly ash* yang dikompositkan dengan nZVI menunjukkan performa adsorpsi terhadap As(V). Material ini memiliki luas permukaan spesifik mencapai 283 m²/g, hampir 10 kali lebih besar dibandingkan zeolit 5A murni. Kapasitas adsorpsi maksimum Zeolit 5A@nZVI mencapai 72,09 mg/g. Di samping itu, jumlah nZVI yang terlalu banyak justru menutupi situs aktif zeolit 5A, menurunkan laju adsorpsi karena permukaan zeolit tertutupi oleh partikel besi.

Dengan demikian, perlu penelitian pemanfaatan limbah *fly ash* sebagai zeolit sintetis yang dikompositkan dengan *Nano Zero Valent Iron* (nZVI). Komposit Z@nZVI digunakan sebagai adsorben untuk mereduksi logam berat Cu(II) dengan mempertimbangkan pH, massa adsorben, waktu kontak dan konsentrasi larutan serta reusabilitas adsorben. Penelitian ini diharapkan menjadi solusi efektif pengolahan air limbah sesuai baku mutu, sekaligus memaksimalkan pemanfaatan *fly ash* PLTU yang memiliki karakteristik yang berbeda agar memiliki potensi pemanfaatan keberlanjutan dan mengatasi permasalahan lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

Dari kondisi yang menjadi latar belakang penelitian tugas akhir ini, dapat dirumuskan beberapa permasalahan, yaitu:

1. Bagaimana karakteristik komposit Z@nZVI yang akan digunakan sebagai bahan adsorben logam berat Cu(II)?
2. Bagaimana pengaruh komposit Z@nZVI pada massa adsorben, waktu kontak, konsentrasi dan pH larutan serta reusabilitas adsorben terhadap kemampuan penyerapan logam berat Cu(II) pada proses adsorpsi?
3. Bagaimana isoterm dan kinetika adsorpsi logam berat Cu(II) pada proses adsorpsi?
4. Bagaimana mekanisme proses penghilangan logam berat Cu(II) menggunakan Z@nZVI?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disusun, maka penelitian ini memiliki tujuan untuk:

1. Mengidentifikasi karakteristik komposit Z@nZVI yang akan digunakan sebagai bahan adsorben logam berat Cu(II).
2. Menganalisis pengaruh komposit Z@nZVI pada massa adsorben, waktu kontak, konsentrasi dan pH larutan serta reusabilitas adsorben terhadap kemampuan penyerapan logam berat Cu(II) pada proses adsorpsi.
3. Mengidentifikasi isoterm dan kinetika adsorpsi logam berat Cu(II) pada proses adsorpsi.
4. Mengidentifikasi mekanisme proses penghilangan logam berat Cu(II) menggunakan Z@nZVI

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian yang telah ditetapkan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Bagi Industri

Sebagai bahan pertimbangan pengolahan limbah logam berat Cu(II) menggunakan komposit Z@nZVI

2. Bagi Perguruan Tinggi

Sebagai bahan literatur atau referensi bagi mahasiswa dalam proses penelitian pengolahan limbah logam berat Cu(II) menggunakan komposit Z@nZVI

3. Bagi Mahasiswa

Sebagai bahan informasi dan pengaplikasian zeolit yang dikompositkan dengan nZVI dalam menurunkan logam berat Cu(II).

1.5 Batasan Masalah

Dalam analisis adsorpsi logam berat Cu(II) menggunakan *fly ash* sebagai zeolit sintetis yang dikompositkan dengan nZVI memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. *Fly ash* yang digunakan sebagai zeolit sintetis berasal dari PLTU Paiton Plant 3 dan 7.
2. Pengujian reusabilitas komposit dilakukan 5 kali siklus dengan mempertimbangkan pH, massa adsorben, waktu kontak dan konsentrasi larutan dalam kondisi terbaik.
3. Keseimbangan adsorpsi yang digunakan *Langmuir* dan *Freundlich*.
4. Kinetika adsorpsi yang digunakan *pseudo-first-order* dan *pseudo-second-order*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Logam Berat Cu(II)

Logam berat tembaga pada dasarnya merupakan komponen alami lingkungan dan termasuk logam ketiga paling banyak digunakan di dunia. Secara fisik, logam tembaga memiliki warna khas kuning kemerahan dan diklasifikasikan kedalam golongan 1B dengan bilangan atom 29. Logam tembaga memiliki bentuk oksidasi seperti Cu^0 (logam), Cu^{1+} (ion kuprus) dan Cu^{2+} (ion tembaga). Logam Cu(II) merupakan bentuk paling *toxic* dan paling umum ditemukan dalam lingkungan. Ion Cu(II) yang memiliki jari-jari ion sebesar 0,96 Å digunakan dalam sektor industri, seperti elektroplating, industri cat dan warna, industri baja dan sebagainya (Y. Liu et al., 2023; Tasya agustina et al., 2024). Meskipun tergolong komponen alami, konsentrasi logam berat tembaga meningkat pada lingkungan secara signifikan akibat aktivitas manusia yang menghasilkan air limbah (Hakim A, Subekti S, 2016; Setyaningrum et al., 2018).

Logam berat tidak dapat terurai dan bersifat *non-biodegradable*. Pencemaran logam berat tembaga pada badan air menimbulkan ancaman serius bagi ekosistem perairan dan kesehatan manusia (Setyaningrum *et al.*, 2018). Apabila logam berat tembaga tertelan atau terhirup berlebih ke dalam tubuh, unsur tersebut akan mengalami bioakumulasi. Logam berat tembaga umumnya masuk kedalam tubuh manusia melalui rantai makanan sehingga menyebabkan akumulasi logam pada organ manusia seperti ginjal, hati dan organ lainnya hingga menyebabkan kematian. Manusia berada pada puncak tertinggi dalam rantai makanan sehingga akumulasi logam meningkat seiring tingginya rantai makanan dan menyebabkan dampak besar (Briffa *et al.*, 2020).

Status pencemaran logam berat Cu(II) telah diidentifikasi sebagai kontaminan logam berat utama akibat banyaknya laporan nasional dan internasional mengenai kontaminasi Cu(II) dalam perairan (Y. Liu et al., 2023). Penyesuaian kadar logam berat Cu(II) dengan standar yang telah ditetapkan

perlu dilakukan menggunakan teknik penghilangan tembaga seperti teknologi adsorpsi. Namun, metode adsorpsi sangat dipengaruhi oleh pH air yang diolah, dengan pH optimum dilaporkan berada pada kisaran pH 2 hingga pH 6 (Hafizah *et al.*, 2022).

2.2 Adsorpsi

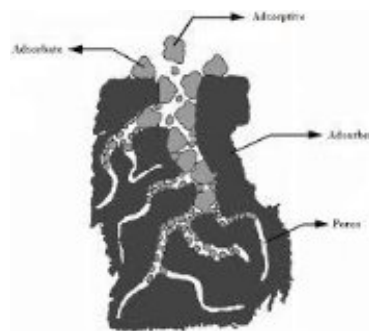
Teknologi adsorpsi adalah proses penyerapan substansi terlarut terhadap luas permukaan zat atau benda penyerap dimana terjadi ikatan kimia-fisika (Purwitasari *et al.*, 2022). Daya tarik elektrostatis mengakibatkan polutan bermuatan melekat pada permukaan adsorben yang memiliki muatan sebaliknya (Kagalkar *et al.*, 2025). Klasifikasi adsorpsi pada suatu substrat akan dibedakan melalui interaksi antara substrat dan adsorbat (Sims *et al.*, 2019). Menurut Raji *et al.*, (2023) adsorpsi diklasifikasikan menjadi dua jenis, yakni:

1. Adsorpsi Fisik

Adsorpsi fisik adalah pelekatan adsorbat pada permukaan adsorben akibat adanya gaya *Van der Waals* yang tidak bergantung pada sifat material. Ikatan ini dianggap interaksi lemah karena ikatan dapat mudah putus. Pembentukan interaksi adsorpsi fisik berkisar 0,2 hingga 4 kJ/mol.

2. Adsorpsi Kemisorpsi

Adsorpsi kemisorpsi atau kimia merupakan adsorpsi yang terjadi akibat adanya ikatan kimia yang menyebabkan gaya tarik yang kuat. Mekanismenya adsorbat terikat secara kovalen pada adsorben melalui transfer elektron dengan interaksi dua orde magnitude lebih kuat daripada adsorpsi fisik.



Gambar 2. 1 Proses Adsorpsi

Sumber: (Ningsih & Said, 2016)

Dalam proses adsorpsi terdapat peranan penting yang perlu diperhatikan, yakni adsorben. Adsorben yang baik memiliki luas permukaan tinggi untuk memudahkan penyerapan adsorbat. Berdasarkan definisi *International of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) ukuran pori adsorben digolongkan sebagai berikut (Suryadi Ismadji *et al.*, 2021):

- a. Mikropori: $d < 20$ angstrom
- b. Mesopori: $20 < d < 500$ angstrom
- c. Makropori: $d > 500$ angstrom

2.2.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Adsorpsi

Metode adsorpsi memiliki keunggulan pengoperasian sederhana, tingkat penghilangan kontaminan tinggi, dan minim menimbulkan polutan sekunder (Purwitasari *et al.*, 2022). Menurut Youssif *et al.*, (2024) terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi penyerapan adsorbat dalam proses adsorpsi di antaranya:

1. Waktu Kontak

Waktu kontak merupakan faktor dalam mempelajari kondisi kesetimbangan proses adsorpsi. Peningkatan waktu kontak mengakibatkan jumlah ion polutan terserap oleh adsorben secara bertingkat hingga mencapai kondisi setimbang.

2. Suhu

Meningkatnya suhu dalam proses adsorpsi mengakibatkan laju adsorpsi semakin meningkat dikarenakan reaksi endotermik. Suhu yang lebih tinggi memberikan banyak energi untuk proses adsorpsi sehingga reaksi kimia terjadi cepat akibat adsorbat dapat ditransfer ke situs aktif adsorben. Selain itu, suhu tinggi juga dapat membentuk situs aktif baru pada permukaan adsorben sehingga adsorpsi dapat dengan optimal.

3. Nilai pH

Nilai pH dalam proses adsorpsi memengaruhi muatan permukaan adsorben dan derajat ionisasi larutan. Pada kondisi pH rendah, ion

hidrogen dalam larutan bersaing untuk melekat pada permukaan adsorben mengakibatkan penurunan jumlah ion yang terserap. Sebaliknya, pada pH tinggi ion hidroksida bermuatan negatif akan membantu mengikat adsorbat dan terjadi presipitasi, sehingga penghilangan adsorbat juga meningkat.

4. Ukuran Partikel Adsorben

Ukuran partikel yang kecil justru menyajikan luas permukaan yang tinggi pada permukaan adsorben. Penurunan kinerja adsorpsi logam berat terjadi ketika partikel adsorben cenderung besar, sehingga luas permukaan dan situs aktif yang dihasilkan kecil (Fauzia & Purnama, 2021).

5. Dosis Adsorben

Peningkatan dosis adsorben dalam proses adsorpsi berbanding lurus dengan luas permukaan yang dihasilkan sehingga proses adsorpsi memiliki performa unggul dalam menyerap logam berat.

6. Konsentrasi Awal

Konsentrasi awal yang tinggi dapat meningkatkan kapasitas adsorben untuk ion logam berat secara bertahap mencapai titik jenuh. Kondisi ini dikaitkan dengan gradien konsentrasi dan gaya dorong meningkat, menyebabkan kejenuhan pada situs aktif adsorben.

2.2.2 Efisiensi Removal

Efisiensi removal dalam proses adsorpsi digunakan untuk menganalisis efektivitas adsorben dalam penjerapan adsorbat. Parameter ini menyatakan persentase penurunan kadar adsorbat dalam larutan setelah proses adsorpsi. Nilai efisiensi tertinggi dinyatakan sebagai kinerja adsorben dalam kondisi terbaik pada proses reduksi adsorbat (Indah *et al.*, 2022). Berikut merupakan perhitungan untuk menentukan efisiensi removal sesuai pada Persamaan 2.1

$$\%Removal = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad 2.1$$

Dengan:

C_0 = Konsentrasi Logam Cu(II) awal (mg/L)

C_e = Konsentrasi Logam Cu(II) akhir (mg/L)

2.2.3 Kapasitas Adsorpsi

Kapasitas adsorpsi dilakukan untuk menganalisis kapasitas adsorben dalam mereduksi adsorbat. Kapasitas adsorpsi maksimum didapatkan dari parameter dalam kondisi terbaik (Asnawati *et al.*, 2017). Berikut merupakan perhitungan untuk menentukan kapasitas adsorpsi sesuai pada Persamaan 2.2

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad 2.2$$

Dengan:

q_e = Kapasitas Adsorpsi (mg/g)

C_0 = Konsentrasi Logam Cu(II) awal (mg/L)

C_e = Konsentrasi Logam Cu(II) akhir (mg/L)

V = Volume larutan (L)

M = Massa adsorben (g)

2.2.4 Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi merupakan hubungan kesetimbangan antara jumlah adsorbat yang tereduksi pada permukaan adsorben dan konsentrasi adsorbat pada larutan dengan kondisi setimbang dan suhu konstan. Isoterm adsorpsi diterapkan untuk merepresentasikan kemampuan adsorben dalam mendispersikan adsorbat dalam situs aktif pada keadaan setimbang (Al-Harby *et al.*, 2021). Isoterm adsorpsi memiliki empat model untuk menggambarkan kemampuan adsorben, diantaranya:

2.2.4.1 Isoterm Langmuir

Model Isoterm langmur digambarkan dengan pembentukan lapisan tunggal (*monolayer*) pada permukaan homogen. Model ini dipakai saat

permukaan adsorben seragam (Chen, 2015). Isoterm ini dinyatakan dengan Persamaan 2.3

$$q_e = \frac{q_{\max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad 2.3$$

Dengan:

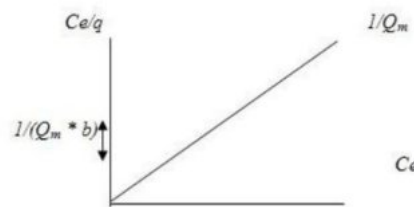
q_e = Kapasitas adsorpsi pada keadaan setimbang (mg.g^{-1})

C_e = Konsentrasi adsorbat larutan pada kesetimbangan (mg.L^{-1})

K_L = Konstanta Langmuir yang berkaitan dengan afinitas adsorpsi (L.mg^{-1})

$q_{\max}$ = Kapasitas adsorpsi maksimum (mg.g^{-1})

Plot nilai antara C_e/q_e dan C_e akan memperoleh hubungan linier. Nilai kapasitas adsorpsi ($q_{\max}$) dan konstanta *Langmuir* (K_L) dapat ditentukan masing-masing dari kemiringan kurva ($1/q_{\max}$) dan titik perpotongan ($1/(q_{\max} K_L)$). Grafik *langmuir* disajikan pada **Gambar 2.1**



Gambar 2. 2 Grafik Isoterm Langmuir

Sumber: (Miri & Narimo, 2022)

2.2.4.2 Isoterm Freundlich

Model *Isoterm Freundlich* digunakan untuk menggambarkan adsorpsi dengan membentuk interaksi antar molekul menjadi multi lapisan (*multilayer*) pada permukaan heterogen. Selain itu, pelekatan adsorbat pada adsorben akibat perbedaan energi adsorpsi (Chen, 2015; Vigdorowitsch *et al.*, 2021). *Isoterm Freundlich* dinyatakan pada Persamaan 2.4 maupun Persamaan 2.5

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad 2.4$$

Atau bentuk linear:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad 2.5$$

Dengan:

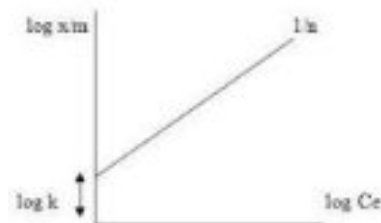
q_e = Kapasitas adsorpsi pada keadaan setimbang (mg.g^{-1})

C_e = Konsentrasi adsorbat larutan pada keadaan setimbang (mg.L^{-1})

K_F = Konstanta Freundlich yang merepresentasikan kapasitas adsorpsi (mg.g^{-1})

$1/n$ = Parameter intensitas Freundlich

Nilai konstanta *Freundlich* ditentukan menggunakan garis linear dengan persamaan $y = a + bx$, dimana slope merupakan nilai $1/n$ dan nilai intersep (a) merupakan $\log K_F$. Kurva *isotherm Freundlich* dapat ditentukan dengan nilai $\log q_e$ sebagai sumbu y dan $\log C_e$ sebagai sumbu x.



Gambar 2. 3 Grafik Isoterm Freundlich

Sumber: (Miri & Narimo, 2022)

2.2.5 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi merepresentasikan mekanisme penjerapan ion logam berat oleh adsorbent dan menentukan laju adsorpsi selama mereduksi kadar adsorbat dalam larutan. Kinetika adsorpsi menggunakan sejumlah model dalam menggambarkan nilai kinetika proses adsorpsi dan efisiensi penyerapan logam berat (Raji *et al.*, 2023). Model kinetika yang umum digunakan adalah sebagai berikut:

2.2.5.1 Model Kinetika Orde Satu Semu (*Pseudo-First-Order*)

Model kinetika orde satu semu atau *pseudo-first-order* (PFO) digunakan untuk menggambarkan laju adsorpsi dengan anggapan laju reduksi adsorbat sebanding dengan selisih antara kapasitas setimbang dan kapasitas pada waktu tertentu. Model kinetika orde satu dinyatakan sebagai Persamaan 2.6

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad 2.6$$

Dengan:

q_t = Kapasitas adsorpsi pada waktu t (mg.g^{-1})

q_e = Kapasitas adsorpsi pada kondisi setimbang (mg.g^{-1})

k_1 = Konstanta laju *pseudo-first-order* (min^{-1})

Apabila digabungkan dengan kondisi limit ($t = 0$; $q_e = 0$; $t = t$; $q_t = q_t$) maka kondisi pada Persamaan 2.6 akan berubah menjadi Persamaan 2.7

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 \cdot t \quad 2.7$$

Berdasarkan kondisi diatas didapatkan kurva dengan $\ln(q_e - q_t)$ sebagai sumbu y dengan nilai waktu (t) sebagai sumbu x. Nilai slope = $-k_1$ dengan $\ln q_e$ sebagai intersep.

2.2.5.2 Model Kinetika Orde Dua Semu (*Pseudo-Second-Order*)

Model kinetika orde satu semu atau *pseudo-second-order* (PSO) digunakan untuk menggambarkan laju adsorpsi dengan asumsi laju adsorpsi berbanding lurus dengan kuadrat kapasitas adsorpsi pada waktu setimbang dan kapasitas pada waktu tertentu. Model kinetika orde dua semu dinyatakan pada Persamaan 2.8

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad 2.8$$

Dengan:

q_t = Kapasitas adsorpsi pada waktu t (mg.g^{-1})

q_e = Kapasitas adsorpsi pada kondisi setimbang (mg.g^{-1})

k_2 = Konstanta laju *pseudo-second-order* (min^{-1})

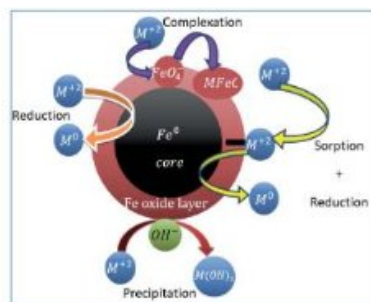
Apabila digabungkan dengan kondisi limit ($t = 0$; $q_e = 0$; $t = t$; $q_t = q_t$) maka kondisi pada Persamaan 2.8 akan berubah menjadi Persamaan 2.9

$$\frac{t}{q_t} = \left(\frac{1}{k_2 q_e^2} \right) + \left(\frac{1}{q_e} \right) t \quad 2.9$$

Berdasarkan kondisi diatas, kurva *pseudo-second-order* diperoleh dengan memplot nilai t/q_t terhadap waktu t . Nilai *slope* adalah q_e dengan k_2 sebagai intersep.

2.3 Nano Zero Valent Iron (nZVI)

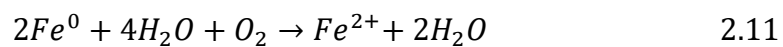
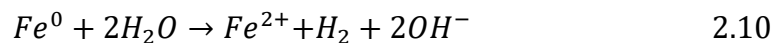
Nano zero valent iron (nZVI) merupakan salah satu teknologi nano yang menjanjikan dalam remediasi air karena memiliki kinetika reaksi cepat akibat luas permukaan dan reaktivitas tinggi (Toli *et al.*, 2024). Luas permukaan spesifik menyebabkan kapasitas sorpsi nZVI dapat mereduksi kontaminan lebih tinggi dalam satuan gram. Apabila dibandingkan dengan besi nol valent (ZVI), reaktivitas nZVI dapat 10 hingga 1000 kali lebih tinggi. Oleh sebab itu, keunggulan utama nZVI terletak pada kemampuannya dalam degradasi polutan dengan waktu remediasi yang singkat (Adusei-gyamfi & Acha, 2016). Di sisi lain, nZVI menghadapi tantangan akibat aktivitas reduksi yang tinggi. Tantangan tersebut berkaitan dengan aglomerasi nanopartikel sehingga diperlukan bahan pendukung untuk meminimalkan terjadinya penggumpalan (Mehrabi *et al.*, 2019).



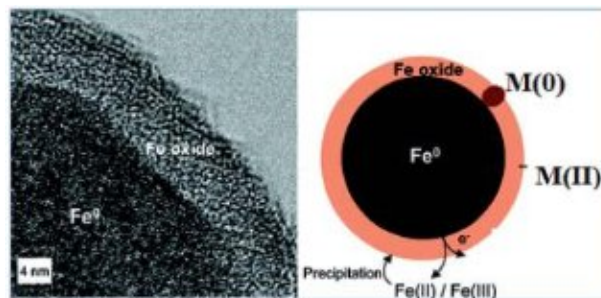
Gambar 2. 4 Mekanisme nZVI dalam Media Larutan

Sumber: (Tarekegn *et al.*, 2021)

Besi (Fe) sebagai unsur utama penyusun nZVI menunjukkan keunggulan dalam donor elektron yang efektif tanpa bergantung pada ukuran partikel akibat memiliki potensial reduksi standar sebesar -0,440 V. Berdasarkan hal tersebut, Fe mampu mendegradasi polutan yang memiliki potensial lebih tinggi dari -0,440 V (Tarekegn *et al.*, 2021; Toli *et al.*, 2024). Namun, dalam sistem akuatik, nZVI umumnya beraksi dengan air dan oksigen terlarut, sebagaimana disajikan pada Persamaan 2.10 dan Persamaan 2.11



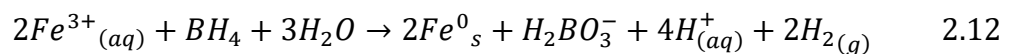
Oksidasi Fe^0 bereaksi dengan H^+ dan menghasilkan produk ion OH^- (Persamaan 2.10 dan 2.11), akibatnya terjadi peningkatan pH larutan menjadi kondisi basa. Lapisan oksida pasif terbentuk dari kecenderungan nZVI dalam bereaksi dengan air maupun oksigen terlarut sebelum berinteraksi dengan polutan. Meskipun demikian, lapisan tersebut merupakan salah pendukung terjadinya (ko)presipitasi pada polutan. Struktur nZVI terdiri dari inti yang bersifat sebagai reduktan (melepaskan elektron) untuk mereduksi polutan serta selubung (*shell*) yang berperan sebagai sorben dalam mengadsorpsi ion logam ataupun anion (Tarekegn *et al.*, 2021). Logam berat seperti Cu(II) dan Pb(II) dapat dihilangkan dengan larutan melalui reduksi menjadi Cu^0 dan Pb^0 , serta adsorpsi kation-anion pada lapisan selubung. Disamping itu, Pb(II) akan mengalami presipitasi menjadi $Pb(OH)_2$ menjadi endapan. Mekanisme adsorpsi logam berat bergantung pada sifat kimia logam dalam fase cair (S. Li *et al.*, 2024; Tarekegn *et al.*, 2021).



Gambar 2. 5 Struktur nZVI

Sumber: (Tarekegn *et al.*, 2021)

Nano Zero Valent Iron (nZVI) disintetis dengan mereaksikan garam atau senyawa besi dengan agen pereduksi, seperti natrium borohidra (NaBH_4). Besi sulfat heptahidrat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) sebagai prekursor akan melepaskan 2^+ elektron menjadi 0 dikarenakan muatan unsur besi bereaksi dengan unsur boron dan membentuk senyawa metaborat (Wardiyati *et al.*, 2013). Menurut Aduseigyamfi & Acha, (2016) reaksi senyawa kimia antara besi sulfat heptahidrat dan natrium borohidra dipaparkan pada Persamaan 2.12



2.4 Fly Ash

Fly ash merupakan salah satu produk samping dari hasil pembakaran batu bara industri ataupun pembangkit (Sinardi, 2022). Pada tahun 2019, produksi batubara mencapai 610 juta dengan asumsi 5% terakumulasi menjadi residu sebesar 6,648 juta ton *fly ash* karena 10-20% sisanya merupakan *bottom ash* (Wijaya *et al.*, 2021). Meskipun *fly ash* telah ditetapkan sebagai limbah non-B3 terdaftar, pemanfaatannya di Indonesia masih berada di kisaran 1% (Syawalani & Utomo, 2024). *Fly ash* merupakan material kompleks tidak seragam yang didominasi mineral seperti silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3). Selain itu, *fly ash* juga kaya akan logam berat besi, seng, mangan dan boron (Febrianti *et al.*, 2022).

Timbulan *fly ash* yang tidak terkelola dengan baik akan memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Selama proses penumpukan terbuka, zat yang terkandung dalam *fly ash* akan larut terbawa air hujan dan masuk kedalam tanah maupun badan air (Z. Zhang *et al.*, 2022). Mengatasi hal tersebut, *fly ash* memiliki potensi dimanfaatkan karena memiliki unsur penyusun utama seperti silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3).

2.4.1 Klasifikasi Fly Ash

Menurut standar SNI 2460:2014 Spesifikasi Abu Terbang Batubara Dan Pozolan Alam Mentah Atau Yang Telah Dikalsinasi Untuk Digunakan Dalam Beton, (2014) *fly ash* diklasifikasikan dalam 3 kelas sebagai berikut:

(1) Kelas N

Kelas N merupakan *pozzolan* alami sehingga karakteristik kimia tergantung jenis material seperti abu vulkanik, diatomit dan sebagainya. Pada umumnya, kelas N kaya akan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3)

(2) Kelas F

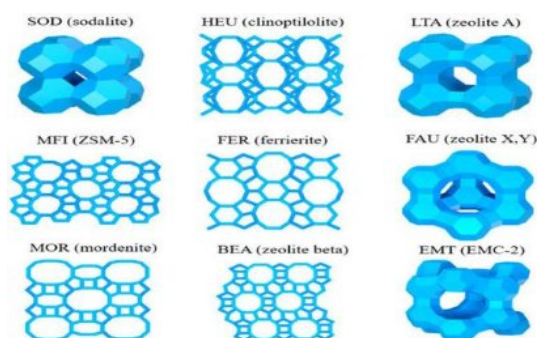
Fly ash kelas F berasal dari pembakaran batu bara tipe *anthracite* atau *bituminous*. Senyawa kimia yang dimiliki fly ash kelas F adalah $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3 > 70\%$. Kandungan CaO yang dimiliki relatif rendah.

(3) Kelas C

Fly ash kelas C berasal dari pembakaran batu bara tipe *lignite* atau *subbituminous* yang memiliki senyawa kimia $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3 > 50\%$. Fly ash tipe C mengandung kadar kalsium lebih tinggi.

2.5 Zeolit

Zeolit adalah kristalin aluminosilikat yang dibentuk oleh unit tetrahedral silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang dihubungkan oleh atom oksigen. Zeolit berasal dari kata Yunani (*zein*), “mendidih,” dan (*lithos*) “batu,” dan secara harfiah berarti “batu mendidih”. Struktur zeolit menghasilkan jaringan berpori dengan rongga yang saling terhubung, yang umumnya dapat menampung kation yang dapat ditukar dengan kation lain. Kation tersebut berfungsi untuk menetralkan muatan negatif pada struktur aluminosilikat (Alotaibi, 2025). Struktur zeolit disajikan pada **Gambar 2.5**



Gambar 2. 6 Struktur Zeolit

Sumber: (Alotaibi, 2025)

Penggunaan zeolit dapat mendukung keberlanjutan dikarenakan dapat dilakukan metode regenerasi. Menurut Kuldeyev *et al.*, (2023) metode regenerasi yang dapat dilakukan antara lain:

(1) Regenerasi Kimia

Regenerasi kimia mengacu pada pemberian reagen organik maupun anorganik cair atau gas pada suhu tidak melebihi 100°C.

(2) Regenerasi Termal

Regenerasi termal dilakukan dengan penambahan uap gas dengan rentang suhu 100-400°C dikarenakan nilai entalpi yang tinggi.

2.5.1 Zeolit Alam

Zeolit alam paling umum adalah klinoptilolit, *analcime*, *laumontite*, dan modernit. Menurut Mambetova *et al.*, (2024), Zeolit diklasifikasikan dalam tiga jenis, yakni:

- (1) Kandungan silika rendah dimana rasio Si/Al sebesar 1-2.
- (2) Kandungan silika menengah dengan rasio Si/Al sebesar 3-10.
- (3) Kandungan silika tinggi dengan rasio Si/Al >10.

Semakin tinggi nilai rasio Si/Al maka zeolit memiliki sifat material dengan stabilitas termal, hidrofobisitas, kekuatan situs asam, afinitas terhadap senyawa non-polar, serta ketahanan terhadap lingkungan asam. Sebaliknya, memiliki sifat material dengan hidrofilisitas, kapasitas pertukaran ion, jumlah kation ekstra-kerangka, serta intensitas interaksi dengan molekul polar (Kordala & Wyszowski, 2024). Berikut merupakan jenis-jenis zeolit alami, di antaranya:

Tabel 2. 1 Jenis-Jenis Zeolit Alami

No	Jenis Zeolit	Jenis Struktur	Rumus Kimia	Simetri
1	Klinoptilolit	HEU	$(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})_6[\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{24}].12\text{H}_2\text{O}$	Monoklinik
2	Mordenit	MOR	$(\text{Na}, \text{K})_8[\text{Al}_{12}\text{Si}_{24}\text{O}_8].24\text{H}_2\text{O}$	Ortorombik
3	Kabazit	CHA	$(\text{Ca}, \text{Na})_2[\text{Al}_6\text{Si}_{12}\text{O}_{24}].6\text{H}_2\text{O}$	Fombohedral
4	Philipsite	PHI	$(\text{K}_2, \text{Na}_2, \text{Ca})\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{24}.12\text{H}_2\text{O}$	Monoklinik
5	Analcime	ANA	$\text{Na}[\text{AlSi}_2\text{O}_6].\text{H}_2\text{O}$	Kubik

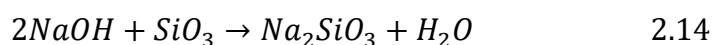
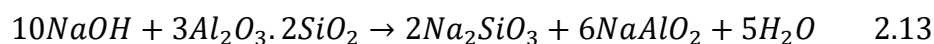
No	Jenis Zeolit	Jenis Struktur	Rumus Kimia	Simetri
6	Erionit	ERI	$\text{Na,K,Ca}1-x[\text{Al}_{12}\text{Si}_{24}\text{O}_{88}].6\text{H}_2\text{O}$	Heksagonal
7	Stilbite	STI	$(\text{Na,Ca})_4\text{Al}_9\text{Si}_{20}\text{O}_{188}.7\text{H}_2\text{O}$	Monoklinik
8	Laumontite	LAU	$(\text{Ca}_2\text{Al}_{10}\text{Si}_{12}\text{O}_{20}).4\text{H}_2\text{O}$	Monoklinik
9	Ferrierit	FER	$(\text{K,Ca})1-x[\text{Al}_{12}\text{Si}_{24}\text{O}_{188}].6\text{H}_2\text{O}$	Ortorombik

Sumber : (Mambetova et al., 2024)

2.5.2 Zeolit Buatan

Zeolit buatan disintetis dengan berbagai sumber silikon dan alumunium melalui beberapa proses (Indira & Abhitha, 2022). Metode aktivasi zeolit meliputi pemanasan di suhu tinggi, perlakuan asam dan peleburan alkali (Febrianti *et al.*, 2022; Suryani, 2021). Pilihan metode aktivasi zeolit berdasarkan unsur penyusun material dan disesuaikan kebutuhan. Pada metode alkali fusi, bahan baku direaksikan dengan alkali, seperti natrium hidroksida padat, yang berfungsi sebagai aktivator proses zeolitisasi. Tahap awal sintesis melibatkan aktivasi termal material awal pada suhu sekitar 500–650°C dengan bantuan gelombang mikro (microwave). Dalam metode ini, bertujuan untuk mengurangi waktu reaksi dan konsumsi energi (Makgabutlane et al., 2020). Selanjutnya, campuran reaksi mengalami proses penuaan (aging) pada suhu 20–50°C. Selama proses fusi, ion natrium (apabila menggunakan NaOH) dalam menstabilkan struktur kristal subunit zeolit, sehingga meningkatkan jumlah zeolit yang terbentuk selama proses sintesis kimia (Kordala & Wyszowski, 2024).

Alkali fusi merupakan salah satu proses aktivasi termal melalui kalsinasi campuran abu terbang batubara dan bahan alkali untuk meningkatkan reaktivitas silika dan alumina. Dibandingkan KOH, penggunaan natrium hidroksida (NaOH) lebih efektif karena mampu mengonversi fase inert seperti kuarsa dan mullit menjadi silikat dan aluminat yang mudah larut. Spesies reaktif ini berperan sebagai prekursor penting dalam pembentukan struktur zeolit pada tahap sintesis selanjutnya (Paramitha, 2020). Berikut adalah reaksi alkali antara natrium hidroksida dengan alumina dan silikat (Paramitha, 2020).



Berbagai penelitian telah mengembangkan metode sintesis zeolit yang lebih ramah lingkungan, seperti ultrasonik dan *microwave*, untuk mengurangi waktu reaksi, temperatur, dan konsumsi energi. Metode ultrasonik terbukti mampu mempercepat kristalisasi dan menurunkan temperatur pembentukan zeolit dibandingkan metode hidrotermal konvensional. Sementara itu, metode hidrotermal berbantuan *microwave* memanfaatkan energi *microwave* untuk mempercepat pelarutan komponen *fly ash* sebelum proses kristalisasi. Namun, sintesis zeolit menggunakan *microwave* secara penuh, yaitu pada tahap pelarutan dan kristalisasi, masih jarang dilakukan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa iradiasi *microwave* tanpa pemanasan konvensional belum berhasil membentuk fase zeolit, sehingga diperlukan optimasi kondisi proses untuk menghasilkan zeolit secara efektif dengan metode *microwave* (Makgabutlane et al., 2020).

2.6 Komposit Zeolit Sintetis - *Nano Zero Valent Iron* (nZVI)

Komposit merupakan pengembangan teknologi adsorben dalam proses adsorpsi dengan menggabungkan dua atau lebih material yang berbeda untuk memperoleh sifat yang baik dibandingkan masing-masing material penyusunnya (Sharma *et al.*, 2020). Dalam penelitian ini, dilakukan pengompositan zeolit sintetis dengan nZVI untuk menggabungkan keunggulan masing-masing material. *Nano Zero Valent Iron* (nZVI) memiliki kemampuan reduksi yang tinggi karena reaktivitasnya yang tinggi. Namun, nZVI memiliki kendala dalam penerapannya secara tunggal yakni mengalami penggumpalan atau aglomerasi. Oleh karena itu, nZVI umumnya digunakan sebagai prekursor yang dikombinasikan dengan material lain untuk meningkatkan kestabilannya dalam adsorpsi (S. Li *et al.*, 2024; Stefaniuk *et al.*, 2016).

Sementara itu, zeolit berfungsi sebagai material penyangga karena memiliki struktur berpori yang stabil dan mempertahankan sifat dasarnya apabila dilakukan regenerasi (Gharbani, 2024). Apabila zeolit digunakan sebagai bahan

tunggal, kemampuan zeolit dalam melakukan penjerap adsorbat masih terbatas (Z. Li *et al.*, 2018). Zeolit dalam penelitian ini berasal dari pemurnian *fly ash* sehingga didapatkan zeolit sintetis untuk material penyangga nZVI. Penggunaan zeolit sintetis berbasis *fly ash* bertujuan untuk pemanfaatan limbah guna memaksimalkan sumberdaya yang berkelanjutan (Gharbani, 2024; Liang *et al.*, 2024).

2.7 Spektrofotometri UV-Vis

Spektrofotometer UV-Vis digunakan untuk mengukur menyerap cahaya suatu sampel berupa larutan pada rentang sinar ultraviolet, sehingga dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi senyawa Analisis kuantitatif dilakukan menggunakan metode kurva kalibrasi, yaitu dengan menentukan konsentrasi sampel berdasarkan persamaan regresi linear dari larutan standar (Sulistiyani *et al.*, 2023). Penentuan konsentrasi menggunakan spektrofotometri UV-Vis didasarkan pada Hukum *Beer-Lambert* yang menyatakan bahwa serapan cahaya berbanding lurus dengan konsentrasi dan panjang lintasan cahaya. Zona dekat UV memiliki panjang gelombang 200-400 nm, sebaliknya pada wilayah tampak memiliki panjang gelombang sebesar 400-800 nm (Dubey *et al.*, 2024).



Gambar 2. 7 Spektrofotometri UV-Vis

2.8 Pengujian Karakteristik

Karakteristik adsorben dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan kimia material yang berperan penting dalam proses adsorpsi. Berikut adalah pengujian karakteristik adsorben dalam proses adsorpsi.

2.8.1 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) digunakan untuk memberikan ikatan molekuler dan gugus fungsional yang memiliki momen dipol. Dalam proses adsorpsi, analisis FTIR digunakan untuk membedakan puncak serapan spesifik yang sesuai dengan berbagai gugus fungsional, sehingga menandakan keterlibatan dalam reduksi ion logam (Pasieczna-Patkowska et al., 2025).

FTIR merupakan metodologi spektral yang digunakan berdasarkan getaran dan rotasi atom. Berkas cahaya inframerah dengan panjang gelombang kontinu diterapkan pada molekul target, cahaya dengan bilangan gelombang tertentu memberikan perbedaan energi sehingga menghasilkan nilai serapan spektrum (Gong et al., 2024).



Gambar 2. 8 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*

2.8.2 *Brunauer–Emmett–Teller (BET)*

Brunauer–Emmett–Teller (BET) merupakan metode untuk menganalisis luas permukaan spesifik material padat. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan gas N₂ pada suhu 77 K. Pengujian karakteristik BET dilakukan pendekatan dengan proses adsorpsi-desorpsi sehingga dapat diketahui porositas seperti diameter pori, luas permukaan (m²/g) dan volume pori (cc/g). Dalam proses reduksi adsorbat, karakterisasi ini berkaitan dengan elemen utama adsorpsi yakni adsorben. Kinerja adsorben berkaitan langsung dengan luas permukaan, volume pori dan diameter pori (Macchi et al., 2025; Verma et al., 2024)



Gambar 2.9 *Quantachrome Quadrasorb-Evo Surface Area & Pore Size Analyzer*

2.8.3 X-Ray Fluorescence (XRF)

X-Ray Fluorescence adalah metode analisis komposisi unsur suatu material. Hasil uji dari XRF didapatkan nilai komposisi berupa persentase. Mekanisme pengujian ini berkaitan dengan sinar-X, sehingga energi dan intensitas pancaran dapat diketahui unsur penyusun dalam suatu material. Alat menghasilkan spektrum puncak energi/panjang gelombang. Setiap puncak mewakili unsur tertentu, sedangkan tinggi/luas puncak mewakili terkait nilai persentase unsur penyusun (Jamaludin & Adiantoro, 2012).



Gambar 2.10 *X-Ray Fluorescence*

2.8.4 X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) digunakan untuk menganalisis struktur kristal/fase kristalin suatu material. Hasil uji dari XRD didapatkan struktur kristalin berupa persentase. Metode karakterisasi XRD menggunakan analisis pola difraksi sinar-X Ketika mengenai sampel material sehingga dapat mengidentifikasi fase/mineral, dan tingkat kristalinitas. Sinar X menghasilkan puncak unak pada sudut tertentu sesuai dengan Hukum Bragg (A. Ali et al., 2022; Omid et al., 2017). Berikut merupakan persamaan hukum bragg ditampilkan pada Persamaan 2.15

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad 2.15$$

Dengan :

- n = Orde difraksi (bilangan bulat: 1, 2, 3, ...)
- λ = Panjang gelombang sinar-X (nm)
- d = Jarak antar bidang kisi kristal (nm)
- θ = Sudut Bragg ($^{\circ}$)



Gambar 2.11 *X-Ray Diffraction*

2.8.5 pH Point Zero Charge (pHpzc)

pH Point Zero Charge (pHpzc) bertujuan untuk menganalisis mekanisme adsorpsi pada permukaan adsorben. Penentuan pHpzc adsorben dilakukan menggunakan larutan elektrolit NaCl 0,1 M dan rentang pH menggunakan NaOH dan HCl 0,1 M (A. Salama & Sakhawy, 2023).

2.9 Analysis of Variance (ANOVA)

Analysis of Variance (ANOVA) merupakan salah satu pengujian untuk menganalisis perbedaan rata-rata dari 2 kelompok atau lebih. Pengujian hipotesis dilaksanakan untuk mendefinisikan suatu dasar sehingga bukti data dalam menentukan sesuatu dapat diterima atau ditolak kebenarannya. Tiga syarat utama ANOVA adalah: data independen, varians homogen, dan distribusi normal (Lestari *et al.*, 2025). Uji ANOVA dibagi menjadi tiga, yaitu:

1. Analisis Varian Satu-Arah (*One-Way ANOVA*)

One-Way ANOVA menganalisis satu variabel tunggal dengan membandingkan hasil pengukuran dari beberapa sampel guna menguji hipotesis nol bahwa populasi memiliki rata-rata yang sama. Variabel yang dianalisis bersifat kuantitatif dan merupakan variabel terikat (*dependent variable*) (Lestari *et al.*, 2025).

2. Analisis Dua-Arah (*Two-Way* ANOVA)

Two-Way ANOVA digunakan untuk mengidentifikasi dua faktor yang berpotensi menyebabkan perbedaan pada variabel terikat (*dependent variable*) (Talakua *et al.*, 2018).

3. Analisis Tiga-Arah (*Three-Way* ANOVA)

Three-Way ANOVA digunakan untuk mengidentifikasi tiga faktor yang berpotensi menyebabkan perbedaan pada variabel terikat (*dependent variable*) (Sundari *et al.*, 2025).

2.10 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu

No	Material	Kontaminan	Konsentrasi	pH	Dosis	Suhu	Waktu Kontak	Kapasitas Adsorben	Removal	Reusability	Sumber
1.	Fly Ash	Cu(II)	1000 mg/L	5,5	50 g/L	25°C	480 min	44,90 mg/g	90%	-	(Ulatowska et al., 2020)
2.	Natural Zeolit	Cu(II)	400 mg/L	5	5 g/100 mL (50 g/L)	25°C	480 min	2,1 mg/g	92%	-	(Elboughdiri, 2020)
3.	Greek Fly Ash	Cu(II)	200 mg/L	5.5	1,5 g/L	25°C	60 min	310 mg/g	80%	-	Vavouraki & Bartzas, 2020)
4.	Fly Ash Nort Romania	Cd(II)	120 mg/L	5	0,2 g/25 mL (8 g/L)	25°C	30 min	28,09 mg/g	-	-	(Buema et al., 2020)
5.	Zeolite Natural @nZVI	As(V)	100 mg/L	4	0,2 g/50mL (4 g/L)	25°C	175 min	21,56 mg/g	84,23%	6 siklus (97%; 96%; 95%; 90%; 85%; 60%)	(Yang et al., 2022)
6.	Zeolite Clinoptilolite @nZVI	Cu(II)	60 mg/L	8	0,1 g/50 mL (2 g/L)	25°C	30 min	61,72 mg/g	94,75%	5 siklus, (98,7%; 90,7%; 89,8%; 87,6%); 84,4%)	(Gharbani, 2024)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

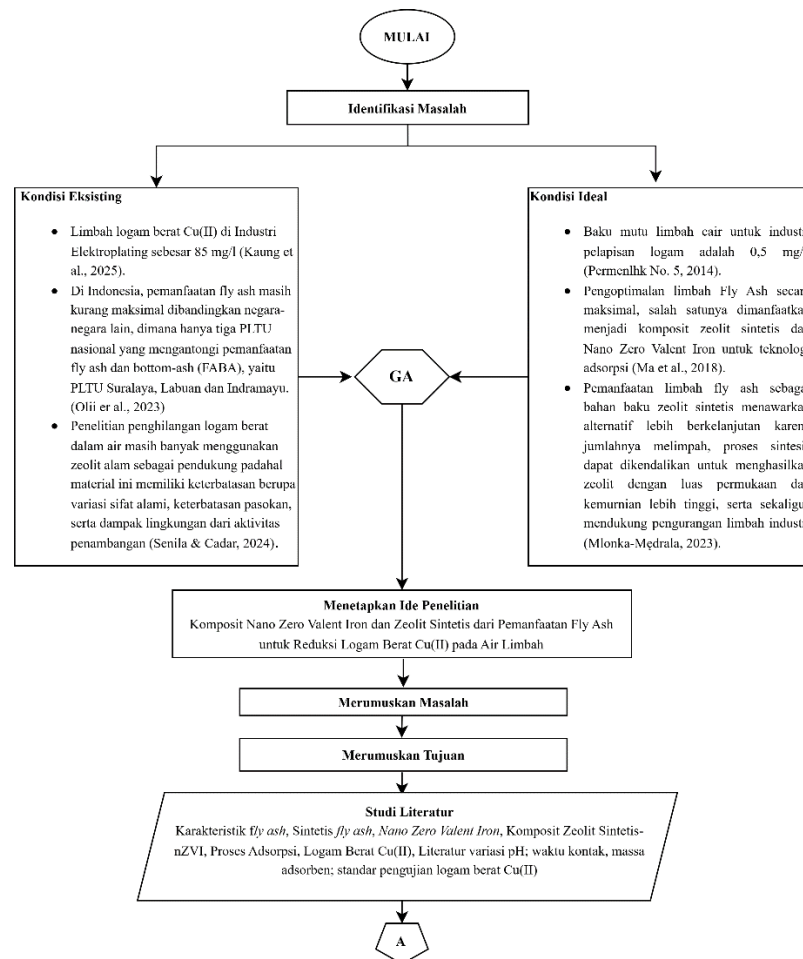
BAB III

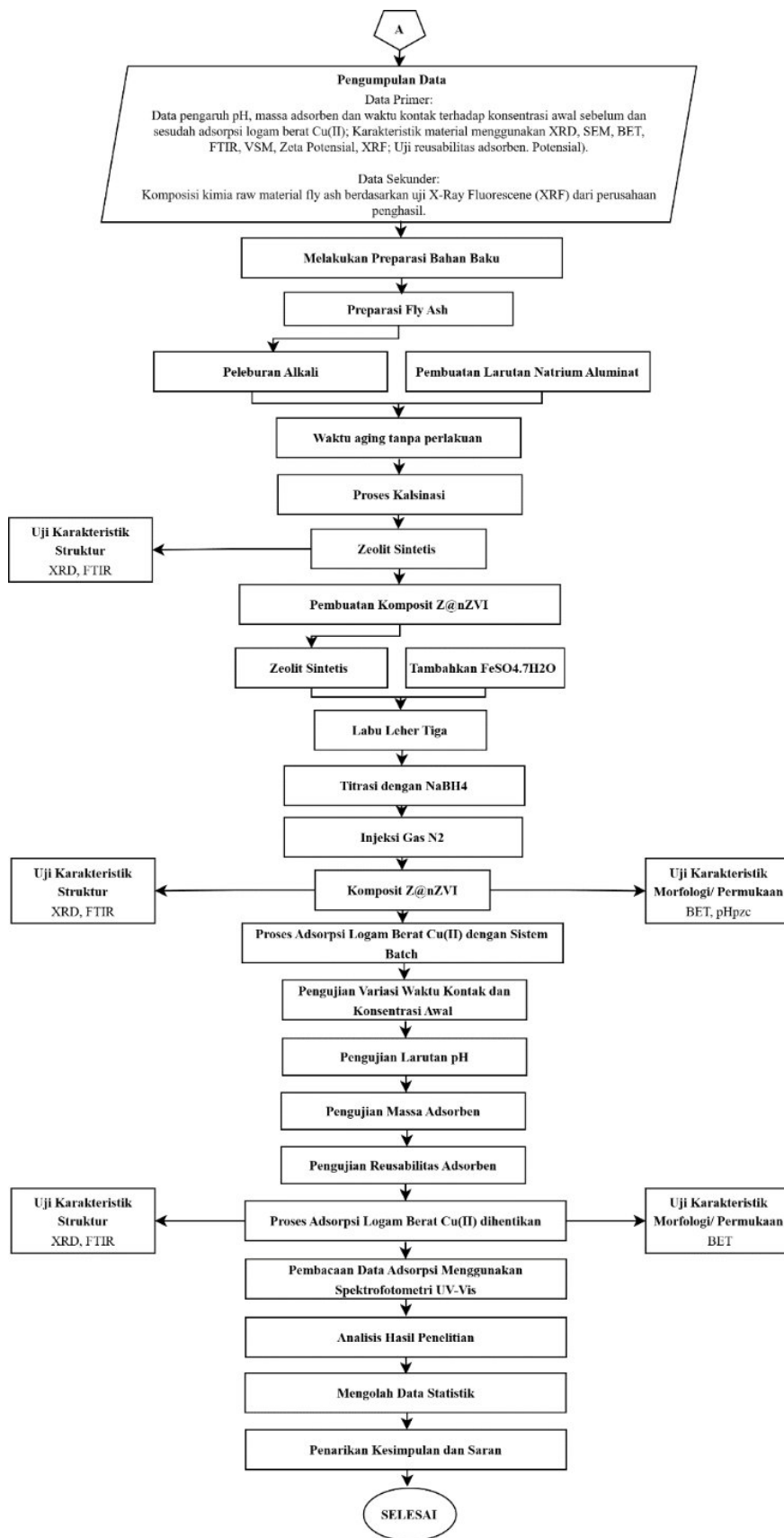
METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian tugas akhir ini menganalisis terkait adsorpsi menggunakan zeolit sintetis dari pemanfaatan *fly ash* yang dikompositkan dengan *Nano Zero Valent Iron* (nZVI) untuk mereduksi parameter logam berat Cu(II). Penelitian ini disusun secara terencana dan sistematis sehingga memerlukan metodologi penelitian untuk menyelesaikan permasalahan yang menjadi dasar penelitian ini sehingga diharapkan mendapat hasil penelitian yang komprehensif.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan komposit Zeolit Sintetis - *Nano Zero Valent Iron* (nZVI) untuk mereduksi kandungan logam berat Cu(II) secara *batch*. Kerangka penelitian akan disajikan pada **Gambar 3.1**





Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Identifikasi Masalah

Peneliti mengidentifikasi masalah dengan melakukan pengukuran dan pengujian di laboratorium. Timbulan *fly ash* yang diperkirakan terus meningkat signifikan apabila penggunaan batu bara digunakan secara masif untuk operasional Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) tentu menjadi salah satu tantangan di Indonesia. Di samping itu, permasalahan terkait air limbah yang dihasilkan dari proses industri elektroplating turut menjadi kontributor meningkatnya pencemaran di badan air akibat tingginya kandungan logam berat Cu(II).

3.3 Studi Literatur

Penelusuran literatur oleh peneliti digunakan sebagai landasan dasar penelitian berdasarkan sumber yang relevan dan kredibel sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan dalam mengatasi permasalahan. Referensi yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya buku, artikel ilmiah, prosiding konferensi ilmiah, laporan penelitian lembaga resmi, SNI dan peraturan-peraturan terkait dengan penelitian. Studi literatur variasi pH; waktu kontak; massa adsorben; standar pengujian logam berat Cu(II); penelitian terdahulu mengenai sintesis adsorben; dan penyerapan logam Cu(II) terhadap *fly ash*, zeolit, maupun komposit zeolite-nZVI serta *Nano Zero Valent Iron* (nZVI).

3.4 Penetapan Rumusan dan Batasan Masalah

Penetapan rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian berdasarkan identifikasi masalah dan studi literatur. Peneliti juga menentukan batasan masalah untuk membatasi ruang lingkup penelitian sehingga penelitian dapat selaras dan terarah.

3.5 Penetapan Tujuan dan Manfaat Penelitian

Penetapan tujuan penelitian selaras dengan rumusan masalah yang diangkat. Peneliti juga menetapkan manfaat penelitian diharapkan dapat menjadi kontribusi ilmiah dari hasil penelitian yang telah didapatkan.

3.6 Pengumpulan Data

Sumber data dalam penelitian ini meliputi data primer dan data sekunder sebagai sumber data utama untuk mendukung penelitian dalam memperoleh informasi yang komprehensif untuk menjawab rumusan masalah dan mendukung capaian tujuan penelitian. Berikut merupakan data-data yang diperlukan meliputi:

3.6.1 Data Primer

Data pengaruh pH, massa adsorben dan waktu kontak terhadap konsentrasi awal sebelum dan sesudah adsorpsi logam berat Cu(II); Karakteristik material menggunakan XRF, XRD, BET, FTIR, pH_{pzc} dan Uji reusabilitas adsorben.

3.6.2 Data Sekunder

Data sekunder yang digunakan meliputi komposisi kimia *raw material fly ash* berdasarkan uji *X-Ray Fluorescence* (XRF) dari perusahaan penghasil.

3.7 Penentuan Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di beberapa tempat dan waktu yang dapat menunjang berjalannya penelitian ini.

3.7.1 Penentuan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di beberapa tempat meliputi:

- 1) Laboratorium Limbah PPNS
- 2) Laboratorium Polimer dan Membran UBAYA
- 3) Laboratorium UBAYA-Life
- 4) Laboratorium Terpadu UII
- 5) Laboratorium Energi dan Lingkungan ITS

3.7.2 Penentuan Waktu Penelitian

Waktu penelitian akan dilaksanakan pada bulan Januari 2026 sampai dengan bulan Juni 2026 (6 bulan).

3.8 Metode Penelitian

Metode penelitian adsorpsi menggunakan komposit Zeolit Sintetis – *Nano Zero Valent Iron (Z@nZVI)* untuk mereduksi logam berat Cu(II) dilakukan secara *batch* pada skala laboratorium. Ion Cu(II) dipilih sebagai target adsorbat karena merupakan salah satu kontaminan utama yang umum dijumpai dalam air limbah industri elektroplating. Namun demikian, penelitian ini difokuskan secara spesifik pada perilaku adsorpsi Cu(II) sebagai model kontaminan, sehingga pengujian dilakukan menggunakan larutan artifisial dengan larutan induk 500 ppm dan sistem batch guna mengontrol variabel percobaan secara lebih terukur.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan parameter adsorpsi dengan kondisi terbaik sehingga diperoleh efisiensi penyerapan Cu(II) yang paling efektif. Analisis kadar logam berat Cu(II) mengacu pada SNI 6989.6:2009 *Air dan Air Limbah – Bagian 6: Cara Uji Tembaga (Cu) secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) – Nyala* (2009) sebagai referensi. Namun, dalam penelitian ini menggunakan reagen Na-dietilditiokarbamat dan alat Spektrofotometer UV-Vis sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Pratiwi dan Sunarto, (2018).

3.9 Populasi dan Sampel Penelitian

Penelitian ini melibatkan populasi dan sampel, di mana populasi merepresentasikan keseluruhan ruang lingkup objek penelitian, sedangkan sampel merupakan bagian dari populasi yang dipilih untuk mewakili karakteristik populasi tersebut.

3.9.1 Populasi Penelitian

Populasi dalam penelitian ini adalah air limbah artifisial mengandung logam berat Cu(II).

3.9.2 Sampel Varian

Sampel varian pada penelitian ini adalah air limbah artifisial Cu(II) menggunakan larutan induk sebesar 500 mg/L yang diencerkan untuk penelitian pengaruh konsentrasi logam berat sebesar 50; 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450 mg/L.

3.10 Penentuan Variabel dan Parameter Bebas

Dalam penelitian ini terdapat 3 (tiga) variabel penelitian yakni variabel bebas, variabel terikat dan variabel kontrol.

3.10.1 Variabel Bebas

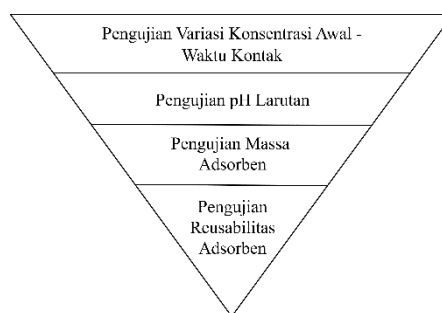
Variabel bebas merupakan variabel independen yang berarti dapat berdiri sendiri tanpa dipengaruhi oleh variabel lainnya. Berdasarkan rumusan masalah pada penelitian, didapatkan variabel bebas yang akan digunakan pada penelitian. Variabel bebas dapat dilihat pada **Tabel 3.1**

Tabel 3. 1 Variabel Bebas Penelitian

No	Variabel	Deskripsi Operasional	Satuan	Alat Ukur
1.	pH	Pengujian pH untuk mengetahui pH dalam kondisi terbaik dalam mereduksi parameter logam berat Cu(II).	-	pH meter
2.	Massa Adsorben	Pengujian massa adsorben untuk mengetahui massa adsorben dalam kondisi terbaik dalam mereduksi parameter logam berat Cu(II).	gram	Timbangan analitik
3.	Waktu Kontak	Pengujian waktu kontak untuk mengetahui waktu kontak dalam kondisi terbaik dalam mereduksi parameter logam berat Cu(II).	menit	Stopwatch
4.	Konsentrasi logam Cu(II)	Pengujian konsentrasi logam Cu(II) untuk mengetahui konsentrasi dalam kondisi terbaik yang ditangkap oleh adsorben.	mg/L	Spektrofotometri UV-Vis
5.	Reusabilitas Komposit	Pengujian reusabilitas komposit untuk mengevaluasi performa komposit setelah digunakan secara berulang dalam beberapa siklus.	%	Spektrofotometri UV-Vis

Penelitian ini dilakukan meliputi optimasi parameter adsorpsi secara sistematis melalui pendekatan bertahap. Tahap pertama melibatkan penentuan variasi waktu kontak optimum dan konsentrasi logam berat

Cu(II) pada kondisi pH 5 dan dosis adsorben optimal sebesar 1 g/L dengan menurut penelitian yang dilakukan oleh Sheikhassani *et al.*, (2024). Jika dikonversikan terhadap volume larutan sebesar 50 mL, massa adsorben yang ditambahkan adalah 0,05 g. Parameter waktu kontak dan konsentrasi logam berat Cu(II) terbaik yang diperoleh kemudian diintegrasikan dalam pengujian pengaruh pH larutan. Selanjutnya, kondisi optimum dari ketiga parameter tersebut diterapkan untuk mengevaluasi pengaruh massa adsorben. Rangkaian penelitian ini diakhiri dengan uji reusabilitas untuk menilai stabilitas dan efisiensi regenerasi adsorben. Skema penelitian variable bebas disajikan pada **Gambar 3.2**



Gambar 3. 2 Skema Penelitian Variabel Bebas

Berikut adalah variasi dari variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini:

1) Pengaruh Konsentrasi Logam Cu(II) terhadap Waktu Kontak

Pengujian mengenai pengaruh konsentrasi logam Cu(II) terhadap waktu kontak menggunakan pH 5 dan massa adsorben sebesar 0,05 gram. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan waktu kontak optimum serta konsentrasi terbaik Cu(II) yang dapat diserap oleh adsorben. Variasi pengujian konsentrasi logam Cu(II) terhadap waktu kontak yang diteliti akan disajikan pada **Tabel 3.2**

Tabel 3. 2 Uji Pengaruh Konsentrasi Logam Cu(II) terhadap Waktu Kontak

No	Konsentrasi Larutan (mg/L) [A]	Waktu Kontak (menit) [B]				
		30	60	90	120	150
1	50	A1B1	A1B2	A1B3	A1B4	A1B5
2	100	A2B1	A2B2	A2B3	A2B4	A2B5
3	150	A3B1	A3B2	A3B3	A3B4	A3B5

No	Konsentrasi Larutan (mg/L) [A]	Waktu Kontak (menit) [B]				
		30	60	90	120	150
4	200	A4B1	A4B2	A4B3	A4B4	A4B5
5	250	A5B1	A5B2	A5B3	A5B4	A5B5
6	300	A6B1	A6B2	A6B3	A6B4	A6B5
7	350	A7B1	A7B2	A7B3	A7B4	A7B5
8	400	A8B1	A8B2	A8B3	A8B4	A8B5
9	450	A9B1	A9B2	A9B3	A9B4	A9B5
Total Sampel		AxB = 45				

2) Pengaruh Variasi pH

Pengujian mengenai pengaruh pH menggunakan massa adsorben 0,05 gram dengan konsentrasi logam Cu(II) dan waktu kontak pada kondisi terbaik. Pengujian variasi pH bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi pH yang optimal, dengan mempertimbangkan terjadinya presipitasi Cu(II) serta perubahan muatan permukaan adsorben yang memengaruhi mekanisme adsorpsi. Variasi pengujian terhadap pH yang diteliti akan disajikan pada **Tabel 3.3**

Tabel 3. 3 Uji Pengaruh Variasi pH

No	Adsorben	pH	Kode Sampel
1	Komposit Z@nZVI	2	A1B1
2		4	A2B1
3		6	A3B1
4		7	A4B1
5		10	A5B1
6		12	A6B1
Total Sampel		A	A = 6

3) Pengaruh Variasi Massa Adsorben

Pengujian variasi massa adsorben menggunakan pH dengan konsentrasi logam Cu(II) dan waktu kontak dalam kondisi terbaik. Pengujian variasi massa adsorben dilakukan untuk menentukan dosis adsorben yang optimum, dengan mempertimbangkan

pencegahan terjadinya aglomerasi partikel serta efisiensi pemanfaatan adsorben dalam proses adsorpsi. Variasi pengujian terhadap massa adsorben yang akan diteliti akan disajikan pada **Tabel 3.4**

Tabel 3. 4 Uji Pengaruh Variasi Massa Adsorben

No	Adsorben	Massa Adsorben (g)	Konversi Massa Adsorben (g/l)	Kode Sampel
1	Komposit Z@nZVI	0,015	0,15	A1B2
2		0,025	0,25	A2B2
3		0,05	0,5	A3B2
4		0,075	0,75	A4B2
Total Sampel		A		A = 4

4) Reusabilitas Komposit

Pengujian mengenai reusabilitas komposit Z@nZVI menggunakan pH, massa adsorben, konsentrasi dan waktu kontak dalam kondisi terbaik. Variasi pengujian reusabilitas komposit yang akan diteliti disajikan pada **Tabel 3.5**

Tabel 3. 5 Uji Reusabilitas Komposit

No	Adsorben	Siklus	Kode Sampel
1	Komposit Z@nZVI	1	A1B3
2		2	A2B3
3		3	A3B3
4		4	A4B3
5		5	A5B3
Total Sampel		A	A = 5

3.10.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah konsentrasi akhir parameter logam berat Cu(II). Variabel terikat dalam penelitian ini disajikan pada **Tabel 3.6**

Tabel 3. 6 Variabel Terikat

No	Variabel	Deskripsi Operasional	Satuan	Alat Ukur
1	Konsentrasi akhir logam berat Cu(II)	Konsentrasi akhir air limbah artifisial dengan kandungan logam berat Cu(II) setelah dilakukan proses adsorpsi menggunakan komposit zeolit sintetis – <i>Nano Zero Valent Iron</i> (nZVI).	mg/L	Spektrofotometri UV-Vis
2	Kapasitas Adsorpsi	Kapasitas adsorpsi dilakukan setelah proses adsorpsi menggunakan komposit zeolit sintetis – <i>Nano Zero Valent Iron</i> (nZVI).	mg/g	Spektrofotometri UV-Vis
3	Gugus fungsi komposit	Gugus fungsi pada yang terbentuk pada adsorben dilakukan sebelum dan sesudah proses adsorpsi menggunakan komposit zeolit sintetis – <i>Nano Zero Valent Iron</i> (nZVI).	cm ⁻¹	Thermo Scientific Nicolet iS10
4	Struktur kristalin komposit	Struktur kristalin yang terbentuk pada adsorben dilakukan sebelum dan sesudah proses adsorpsi menggunakan komposit komposit zeolit sintetis – <i>Nano Zero Valent Iron</i> (nZVI).	nm	X'Pert PRO PANalytical
5	Ukuran dan luas partikel komposit	Ukuran dan luas partikel komposit dilakukan sebelum dan sesudah proses adsorpsi menggunakan komposit zeolit sintetis – <i>Nano Zero Valent Iron</i> (nZVI).	m ² /g	TMAXCN BSD-PS 1
6	Muatan nol pada komposit	Muatan nol pada komposit dilakukan sebelum proses adsorpsi menggunakan komposit zeolit sintetis – <i>Nano Zero Valent Iron</i> (nZVI).	-	pHmeter

3.10.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol merupakan variabel yang diatur atau dikendalikan supaya tidak memengaruhi variabel yang tengah diteliti. Variabel kontrol spesifik yang digunakan untuk masing masing pengujian variasi dipaparkan sebagai berikut:

- 1) Penelitian Pengaruh Konsentrasi Logam Cu(II) dan Waktu Kontak
 - a. Nilai pH yang digunakan merupakan pH 5.
 - b. Massa adsorben komposit Z@nZVI yang digunakan sebanyak 0,05g
- 2) Penelitian Pengaruh pH Larutan
 - a. Konsentrasi logam Cu(II) yang digunakan dalam analisis ini merupakan konsentrasi logam Cu(II) dalam kondisi terbaik dari hasil uji pengaruh konsentrasi logam dan waktu kontak.
 - b. Waktu kontak adsorpsi yang digunakan dalam analisis ini merupakan waktu kontak dalam kondisi terbaik pengaruh konsentrasi logam dan waktu kontak.
 - c. Massa adsorben komposit Z@nZVI yang digunakan sebanyak 0,05g
- 3) Penelitian Pengaruh Massa Adsorben
 - a. pH yang digunakan merupakan pH dalam kondisi terbaik dari hasil uji pengaruh pH.
 - b. Konsentrasi logam Cu(II) yang digunakan dalam analisis ini merupakan konsentrasi logam Cu(II) dalam kondisi terbaik pengaruh konsentrasi logam dan waktu kontak.
 - c. Waktu kontak adsorpsi yang digunakan dalam analisis ini merupakan waktu kontak dalam kondisi terbaik pengaruh konsentrasi logam dan waktu kontak.
- 4) Penelitian Reusabilitas Komposit
 - a. pH yang digunakan merupakan pH dalam kondisi terbaik dari hasil uji pengaruh pH.
 - b. Massa adsorben yang digunakan merupakan massa adsorben dalam kondisi terbaik dari hasil uji pengaruh massa adsorben.

- c. Waktu kontak yang digunakan merupakan waktu kontak dalam kondisi terbaik dari hasil uji pengaruh variasi waktu kontak dan konsentrasi logam berat Cu(II).
- d. Konsentrasi larutan yang digunakan merupakan konsentrasi kondisi terbaik dari hasil uji pengaruh variasi waktu kontak dan konsentrasi logam berat Cu(II).

Berdasarkan ketiga pengujian di atas ditetapkan kondisi operasi standar sebagai variabel kontrol umum yang ditampilkan spada **Tabel 3.7**

Tabel 3. 7 Variabel Kontrol Umum

No	Parameter	Jumlah	Satuan	Sumber
1	Volume larutan logam berat Cu(II)	100	mL	(Elboughdiri, 2020)
2	Kecepatan pengadukan	200	rpm	(Elboughdiri, 2020)
3	Suhu proses adsorpsi	25	°C	(Gharbani, 2024)
4	Dosis adsorben pada pengujian variasi konsentrasi dan waktu kontak serta pH larutan.	1	g/L	(Kim et al., 2013)
5	pH larutan pada pengujian variasi konsentrasi dan waktu kontak	5	-	(Shirendev et al., 2022)

3.11 Persiapan Penelitian

Tahap persiapan penelitian dilakukan dengan penyediaan alat dan bahan guna menunjang berjalannya pelaksanaan penelitian. Adapun alat dan bahan yang dipersiapkan dijabarkan sebagai berikut:

3.11.1 Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya:

1. Glassware
2. Cawan Crusible
3. Forsep Crucible
4. Karet hisap
5. Statif
6. Neraca digital (Shimadzu Corporatlogam AY220)
7. Oven (MERMMET)

8. Oven Vacuum (MERMMET)
9. Furnance (Thermo scientific Thermolyne Benchtop)
10. Vacum filter
11. Autoclave Hidrothermal
12. Hot plate (Thermo Scientific C1C0000809)
13. Magnetic stirrer
14. Kuvet
15. Stopwatch
16. Kertas saring
17. Kertas pH (Merck)
18. Ayakan 200 mesh
19. Spektrofotometer UV-Vis (Agiilent Cary 60 Spectrophotometer)
20. Alat uji FTIR (Thermo Scientific Nicolet iS10)
21. Alat uji XRD (X'Pert PRO PANalytical)
22. Alat uji BET (TMAXCN BSD-PS 1)

3.11.2 Bahan

Bahan yang dibutuhkan dalam penelitian ini antara lain:

1. *Fly ash* dari PLTU Paiton *Plant* 3 dan 7
2. Besi (II) Sulfat Heptahidrat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (Merck)
3. Natrium Borohidrat (NaBH_4) (Merck)
4. Aquadest
5. Asam Klorida 37% (HCl) (Merck)
6. Asam Sulfat 98% (H_2SO_4) (Merck)
7. Natrium Hidroksida (NaOH) (Merck)
8. Alumunium Hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$) (Merck)
9. Gas Nitrogen (N_2)
10. Tembaga (II) Sulfat Pentahidrat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (Merck)
11. Na-dietilditiokarbamat (Merck)
12. Amonium Hidroksida (NH_4OH) (Merck)
13. Ethanol 96% (Merck)

3.12 Prosedur Penelitian

3.12.1 Preparasi Sampel *Fly Ash*

Preparasi sampel *fly ash* yang akan digunakan sebagai pembuatan adsorben zeolit sintetis. Preparasi sampel *fly ash* merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Vilakazi & Shemi (2025), Berikut merupakan metode preparasi sampel *fly ash*:

1. Mengambil sampel *fly ash*, kemudian diayak menggunakan ayakan 200 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam.
2. *Fly ash* hasil ayakan diseparasi menggunakan magnet untuk menghilangkan kandungan besi.
3. Keringkan *fly ash* menggunakan oven pada suhu 100°C.
4. Hilangkan kembali kandungan besi pada *fly ash* menggunakan separasi magnetik.

3.12.2 Peleburan Alkali pada *Fly Ash*

Peleburan alkali bertujuan untuk melarutkan fase kristalin *fly ash* dengan mengubah menjadi fase aluminosilikat. Peleburan alkali pada *fly ash* mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh oleh Fitriani *et al.*, (2025) dengan penyesuaian rasio alkali dan *fly ash*. Berikut merupakan prosedur peleburan alkali pada *fly ash*:

1. Ambil *fly ash* hasil preparasi sebesar 10 gram.
2. *Fly ash* hasil preparasi dicampur NaOH yang telah digerus dengan perbandingan massa NaOH dan *fly ash* adalah 1,2:1 (Izidoro *et al.*, 2013) menggunakan cawan *crucible*.
3. Lebur campuran *fly ash* dan NaOH menggunakan microwave pada suhu 350°C selama 20 menit dengan metode ON-OFF dengan repetisi waktu 2 menit menyala, 1 menit mati.
4. Gerus hasil leburan menggunakan mortar dan timbang.

3.12.3 Persiapan Larutan Natrium Aluminat

Larutan natrium aluminat digunakan sebagai sumber aluminium (Al) untuk meningkatkan rasio Si/Al pada *fly ash*. Persiapan larutan natrium

aluminat berdasarkan penelitian oleh Fitriani et al., (2025) serta penyesuaian rasio Si/Al. Berikut merupakan prosedur persiapan larutan natrium aluminat:

1. Padatan NaOH dilarutkan dalam aquadest dengan kelebihan (*excess*) sehingga menyediakan kondisi basa untuk melarutkan $\text{Al}(\text{OH})_3$ secara sempurna.
2. Larutan NaOH ditambahkan secara bertahap pada serbuk $\text{Al}(\text{OH})_3$ sebanyak 6,318 gram hingga larut dan diperoleh rasio Si/Al sebesar 1 (Ren et al., 2018).
3. Campuran diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 100°C selama 30 menit untuk membentuk larutan natrium aluminat.

3.12.4 Pembentukan Nukleasi Melalui Waktu Aging

Waktu aging digunakan untuk pembentukan nukleasi sebelum proses hidrotermal. Pembentukan nukleasi mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Makgabutlane *et al.*, (2020) yakni sebagai berikut:

1. Larutan aluminat ditambahkan sebanyak 28 mL ke dalam hasil peleburan alkali.
2. Campuran diaduk selama 24 jam dengan suhu ruang menggunakan *magnetic stirrer*.
3. Setelah pengadukan, sampel didiamkan selama 16 jam tanpa perlakuan dalam suhu ruang.

3.12.5 Pembentukan Zeolit Sintetis Melalui Proses Kalsinasi

Pembentukan zeolite sintetis melalui proses kalsinasi bertujuan untuk membentuk struktur kristal zeolit. Proses pembentukan zeolit melalui kalsinasi mengadaptasi metode yang telah dilaporkan oleh Makgabutlane *et al.*, (2020) yakni sebagai berikut:

1. Keringkan sampel dari proses aging pada suhu 125°C selama 1 jam menggunakan oven.
2. Diamkan sampel selama 17 jam 30 menit untuk menghasilkan sampel yang kering.

3. Gerus sampel hingga menjadi bubuk halus, lalu timbang padatan yang dihasilkan.
4. Kalsinasi sampel kering pada *cawan crucible* menggunakan *furnance* pada suhu 400°C selama 1 jam.
5. Sampel hasil kalsinasi digerus dan ditimbang.

3.12.6 Komposit Zeolit Sintetis – Nano Zero Valent Iron (nZVI)

Berdasarkan metode yang telah dilaporkan oleh Yang *et al.*, (2022) berikut merupakan prosedur persiapan komposit zeolit sintetis – *Nano Zero Valent Iron* (nZVI) yakni sebagai berikut:

1. Zeolit sintetis dan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ditambahkan dengan perbandingan rasio 2:1 kedalam 300 mL aquadest.
2. Tambahkan 10 mL ethanol untuk membantu proses dispersi menjadi homogen.
3. pH larutan awal diatur menjadi 4 menggunakan larutan H_2SO_4 0,1 M bertujuan untuk mencegah pengendapan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ pada pH tinggi.
4. Campuran diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 30 menit.
5. Selanjutnya, dilakukan pengadukan ultrasonik (ultrasonikasi) selama 10 menit menggunakan sonikator untuk meningkatkan homogenitas campuran.
6. Larutan yang telah homogen dimasukkan kedalam labu leher tiga.
7. Mengalirkan gas Nitrogen (N_2) selama 1 menit untuk mengeluarkan udara (oksigen).
8. Selama proses reduksi, aliran gas N_2 dipertahankan secara berkala untuk mencegah oksidasi nZVI.
9. Tambahkan larutan NaBH_4 1 M sebanyak 50 mL kedalam campuran menggunakan buret.
10. Penambahan dilakukan secara tetes demi tetes dengan lain 20-30 tetes per menit disertai pengadukan secara *magnetic*.
11. Setelah seluruh NaBH_4 ditambahkan, campuran diaduk Kembali selama 5 menit untuk memastikan reduksi berlangsung sempurna.
12. Komposit zeolit sintetis – Nano Zero Valent Iron (nZVI) yang telah

terbentuk dicuci menggunakan aquadest dan etanol.

3.12.7 Pembuatan Larutan Artifisial Cu(II)

Pembuatan sampel larutan induk artifisial Cu(II) 500 mg/L digunakan sebagai larutan uji untuk mengkaji kemampuan adsorpsi Zeolit Sintetis – Nano Zero Valent Iron (nZVI). Pembuatan larutan induk mengacu pendekatan teoritis stokiometri sesuai **Lampiran 1**. Berikut merupakan metode pembuatan larutan induk artifisial Cu(II) sebagai berikut:

1. Timbang sebanyak 1,97 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dan dimasukkan ke dalam labu ukur 1000 mL.
2. Larutkan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dengan akuades hingga tanda batas, sehingga didapatkan konsentrasi larutan induk Cu(II) sebesar 500 mg/L.
3. Dari larutan Cu(II) 500 mg/L tersebut selanjutnya diencerkan sesuai dengan konsentrasi yang ditetapkan untuk membuat larutan standar.
4. Hitung volume larutan induk Cu(II) yang dibutuhkan sesuai dengan pendekatan stokiometri.
5. Pipet larutan induk Cu(II) sesuai dengan pendekatan stokiometri lalu masukkan larutan kedalam labu ukur.
6. Tambahkan akuades kedalam labu ukur hingga tanda batas.
7. Larutan dihomogenkan untuk memperoleh larutan Cu(II) dengan konsentrasi yang diinginkan

3.12.8 Preparasi Sampel untuk Pembacaan Spektrofotometri UV-Vis

Preparasi pembacaan sampel menggunakan alat Spektrofotometri UV-Vis menggunakan Na-dietilditiokarbamat sebagai reagen berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Pratiwi dan Sunarto, (2018). Berikut merupakan prosedur preparasi sampel untuk pembacaan Spektrofotometri UV-Vis sebagai berikut:

1. Ambil 2,5 mL larutan Cu(II) dengan konsentrasi yang telah ditetapkan pada nomor 1 dan dimasukkan kedalam labu ukur 25 mL.
2. Tambahkan 2,5 mL NH_4OH 5%.
3. Tambahkan 2,5 mL Na-dietilditiokarbamat 1%.

4. Tambahkan aquadest hingga tanda batas dan diamkan selama 3 menit untuk mencapai kestabilan.

3.12.9 Pembuatan Kurva Kalibrasi Logam Berat Cu(II)

Pembuatan kurva kalibrasi logam berat Cu(II) mengacu SNI 6989.6:2009 tentang Cara Uji Tembaga Cu(II) secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) sebagai referensi. Namun, dalam penelitian ini menggunakan reagen Na-dietilditiokarbamat dan alat Spektrofotometer UV-Vis sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Pratiwi dan Sunarto, (2018). Berikut merupakan metode pembuatan kurva kalibrasi logam berat Cu(II) sebagai berikut:

1. Siapkan larutan Cu(II) sebesar 1; 3; 5; 7; 9; dan 11 mg/L serta blanko sebanyak 50 mL.
2. Operasikan alat dan optimasikan sesuai dengan petunjuk penggunaan alat untuk pengukuran Cu(II). Atur panjang gelombangnya pada 450 nm.
3. Ukur serapan blanko kedalam Spektrofotometri UV-Vis dan atur serapan hingga nol.
4. Ukur serapan masing-masing larutan kerja kemudian catat adsorbansi larutan.
5. Buat kurva kalibrasi dari data di atas dengan nilai adsorbansi sebagai sumbu y dan konsentrasi larutan sebagai sumbu x serta tentukan persamaan garis lurusnya.

3.12.10 Variasi Konsentrasi Logam Cu(II) dan Waktu Kontak

Pengujian pengaruh variasi konsentrasi logam dan waktu kontak dilaksanakan untuk mengetahui konsentrasi dan waktu kontak dalam kondisi terbaik dalam mereduksi kadar logam berat Cu(II). Berikut merupakan prosedur pengujian pengaruh variasi konsentrasi logam dan waktu kontak terhadap efektifitas penyerapan logam berat Cu(II):

1. Siapkan 50 mL larutan logam berat Cu(II) dengan konsentrasi yang telah ditetapkan.

2. Atur pH masing-masing larutan menjadi pH 5.
3. Tambahkan komposit Z@nZVI pada masing-masing gelas beaker sebesar 0,05 gram.
4. Aduk larutan dengan kecepatan 200 rpm dan suhu pengadukan 25°C dengan waktu kontak sesuai yang telah ditetapkan
5. Setelah proses adsorpsi selesai, lakukan penyaringan menggunakan kertas saring untuk memisahkan antara komposit dan larutan Cu(II).
6. Lakukan analisis filtrat menggunakan Spektrofotometer UV-Vis dengan Panjang gelombang 450 nm untuk mengetahui kinerja reduksi komposit Z@nZVI terhadap kadar konsentrasi Cu(II) dalam massa adsorben tertentu.

3.12.11 Pengukuran Pengaruh pH

Pengujian pengaruh pH dilaksanakan untuk mengetahui pH dalam kondisi terbaik dalam mereduksi kadar logam berat Cu(II). Berikut merupakan prosedur pengujian pengaruh pH terhadap efektifitas penyerapan logam berat Cu(II):

1. Siapkan 50 mL larutan logam berat Cu(II) dengan konsentrasi kondisi terbaik pada 5 gelas beaker.
2. pH larutan diatur sesuai variasi yang ditentukan dengan penambahan H₂SO₄ 0,1 M atau NaOH 1 M hingga mencapai pH target.
3. Tambahkan komposit Z@nZVI pada masing masing gelas beaker sebesar 0,05 gram.
4. Aduk larutan dengan kecepatan 200 rpm dan suhu pengadukan 25°C dengan waktu kontak pada kondisi terbaik.
5. Setelah proses adsorpsi selesai, lakukan penyaringan untuk memisahkan antara komposit dan larutan Cu (II).
6. Lakukan analisis filtrat menggunakan Spektrofotometer UV-Vis dengan Panjang gelombang 450 nm untuk mengetahui kinerja reduksi komposit Z@nZVI terhadap kadar konsentrasi Cu(II) dalam pH tertentu.

3.12.12 Pengukuran Pengaruh Massa Adsorben

Pengujian pengaruh massa adsorben dilaksanakan untuk mengetahui massa adsorben dalam kondisi terbaik dalam mereduksi kadar logam berat Cu(II). Berikut merupakan prosedur pengujian pengaruh massa adsorben terhadap efektifitas penyerapan logam berat Cu(II):

1. Siapkan 50 mL larutan logam berat Cu(II) dengan konsentrasi kondisi terbaik pada 4 gelas beaker.
2. Atur pH masing-masing larutan sesuai dengan pH dalam kondisi terbaik yang didapatkan pada penelitian pengaruh pH.
3. Tambahkan komposit Z@nZVI pada masing-masing gelas beaker sesuai dengan variasi yang telah ditetapkan.
4. Aduk larutan dengan kecepatan 200 rpm dan suhu pengadukan 25°C dengan waktu kontak pada kondisi terbaik.
5. Setelah proses adsorpsi selesai, lakukan penyaringan untuk memisahkan antara komposit dan larutan Cu (II).
6. Lakukan analisis filtrat menggunakan Spektrofotometer UV-Vis dengan Panjang gelombang 450 nm untuk mengetahui kinerja reduksi komposit Z@nZVI terhadap kadar konsentrasi Cu(II) dalam massa adsorben tertentu.

3.12.13 Pengukuran Pengaruh Reusabilitas Adsorben

Pengujian pengaruh reusabilitas adsorben dilaksanakan untuk mengetahui kinerja penggunaan ulang adsorben dalam mereduksi kadar logam berat Cu(II). Metode desorpsi adsorben mengadaptasi penelitian yang dilakukan oleh (Gharbani, 2024). Berikut merupakan prosedur pengujian pengaruh reusabilitas adsorben terhadap efektifitas penyerapan logam berat Cu(II):

1. Siapkan 50 mL larutan logam berat Cu(II) dengan konsentrasi kondisi terbaik pada gelas beaker.
2. Atur pH sesuai dengan pH dalam kondisi terbaik yang didapatkan pada penelitian pengaruh pH.

3. Tambahkan komposit Z@nZVI dalam kondisi terbaik yang didapatkan pada penelitian pengaruh massa adsorben.
4. Aduk larutan dengan kecepatan 200 rpm dan suhu pengadukan 25°C dengan waktu kontak pada kondisi terbaik.
5. Setelah proses adsorpsi selesai, lakukan penyaringan untuk memisahkan antara komposit dan larutan Cu (II).
6. Lakukan analisis filtrat menggunakan Spektrofotometer UV-Vis dengan Panjang gelombang 450 nm untuk mengetahui kinerja reduksi komposit Z@nZVI terhadap kadar konsentrasi Cu(II) dalam massa adsorben tertentu.
7. Cuci residu menggunakan larutan HCl 0,1 M sebanyak tiga kali.
8. Kemudian, cuci residu dengan aquadest sebanyak tiga kali.
9. Keringkan sampel menggunakan oven selama hingga kering.
10. Ulangi Langkah 1-9 hingga 5 kali siklus untuk mengetahui reusabilitas adsorben.

3.13 Pengujian Karakteristik

3.13.1 *X-Ray Diffraction (XRD)*

Uji *X-Ray Diffraction* (XRD) merupakan pengujian yang bertujuan untuk menganalisis fasa material menggunakan difraksi sinar X. Dalam penelitian ini, digunakan untuk menganalisis fasa yang terdapat pada komposit Zeolit Sintetis dan *Nano Zero Valent Iron* (nZVI) baik sebelum dan sesudah proses adsorpsi. Pola yang dihasilkan dari difraksi sinar X akan dicocokkan dan dilakukan *refine* data.

3.13.2 *Fourier Transform-Infrared Spectroscopy (FTIR)*

Uji *Fourier Transform-Infrared Spectroscopy* (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang muncul pada partikel komposit. Penelitian ini dilakukan pada komposit Zeolit Sintetis – *Nano Zero Valent Iron* (nZVI) baik sebelum dan sesudah proses adsorpsi. Sampel pasca adsorpsi menggunakan komposit dengan kemampuan reduksi maksimum dalam penyerapan logam berat Cu(II).

3.13.3 Brunauer–Emmett–Teller (BET)

Uji *Brunauer–Emmett–Teller* (BET) digunakan menganalisis luas permukaan dan pori-pori dari adsorben. Penelitian ini dilakukan pada komposit Zeolit Sintetis – *Nano Zero Valent Iron* (nZVI) baik sebelum dan sesudah proses adsorpsi. Sampel pasca adsorpsi menggunakan komposit dengan kemampuan reduksi maksimum dalam penyerapan Cu(II).

3.13.4 pH Point Zero Charger (pHpzc)

Pengujian pH_{pzc} dilakukan untuk mengidentifikasi mekanisme adsorpsi pada permukaan adsorben. Penelitian ini dilakukan pada komposit Zeolit Sintetis – *Nano Zero Valent Iron* (nZVI) sebelum proses adsorpsi.

3.14 Analisis Data

3.14.1 Efisiensi Removal

Analisis data dilakukan perhitungan persentasi kehilangan kandungan zat logam berat Cu(II) pada limbah artifisial untuk menganalisis efektivitas adsorben dalam mereduksi logam berat Cu(II). Berikut merupakan perhitungan untuk menentukan efisiensi removal sesuai pada Persamaan 3.1

$$\%Removal = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad 3.1$$

Dengan :

C_0 = Konsentrasi Logam Cu(II) awal (mg.L⁻¹)

C_e = Konsentrasi Logam Cu(II) akhir (mg.L⁻¹)

3.14.2 Kapasitas Adsorpsi

Kapasitas adsorpsi dilakukan untuk menganalisis kapasitas adsorben dalam mereduksi logam berat Cu(II) pada limbah artifisial. Berikut merupakan perhitungan untuk menentukan kapasitas adsorpsi sesuai pada Persamaan 3.2

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad 3.2$$

Dengan :

- q_e = Kapasitas adsorpsi (mg.g^{-1})
- C_0 = Konsentrasi Logam Cu(II) awal (mg.L^{-1})
- C_e = Konsentrasi Logam Cu(II) akhir (mg.L^{-1})
- V = Volume larutan (L)
- M = Massa adsorben (g)

3.14.3 Isoterm Adsorpsi

Analisis *isotherm* adsorpsi dilakukan menggunakan dua model isotherm yakni model *Langmuir* dan *Freundlich*. Persamaan isotherm *Langmuir* dapat dilihat pada Persamaan 3.3

$$q_e = \frac{q_{\max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad 3.3$$

Dengan :

- q_e = Kapasitas adsorpsi pada keadaan setimbang (mg.g^{-1})
- C_e = Konsentrasi adsorbat larutan pada kesetimbangan (mg.L^{-1})
- K_L = Konstanta *Langmuir* yang berkaitan dengan afinitas adsorpsi (L.mg^{-1})
- $q_{\max}$ = Kapasitas adsorpsi maksimum (mg.g^{-1})

Persamaan *isotherm freundlich* dapat dilihat pada Persamaan 3.4 dan Persamaan 3.5

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad 3.4$$

Atau bentuk linear:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad 3.5$$

- q_e = Kapasitas adsorpsi pada keadaan setimbang (mg.g^{-1})
- C_e = Konsentrasi adsorbat larutan pada keadaan setimbang (mg.L^{-1})
- K_F = Konstanta *Freundlich* yang merepresentasikan kapasitas adsorpsi (mg.g^{-1})
- $1/n$ = Parameter intensitas *Freundlich*

3.14.4 Kinetika Adsorpsi

Analisis kinetika adsorpsi dilakukan menggunakan dua model isotherm yakni model *pseudo-first-order* dan *pseudo-second-order*. Persamaan kinetika adsorpsi model *pseudo-first-order* dapat dilihat pada Persamaan 3.6

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad 3.6$$

Dengan:

q_t = Kapasitas adsorpsi pada waktu t (mg.g^{-1})

q_e = Kapasitas adsorpsi pada kondisi setimbang (mg.g^{-1})

k_1 = Konstanta laju *pseudo-first-order* (min^{-1})

Apabila digabungkan dengan kondisi limit ($t = 0$; $q_e = 0$; $t = t$; $q_t = q_t$) maka kondisi pada Persamaan 3.6 berubah menjadi Persamaan 3.7

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 \cdot t \quad 3.7$$

Berdasarkan kondisi diatas didapatkan kurva dengan $\ln(q_e - q_t)$ sebagai sumbu y dengan nilai waktu (t) sebagai sumbu x. Nilai slope = $-k_1$ dengan $\ln q_e$ sebagai intersep. Selanjutnya, persamaan kinetika adsorpsi model *pseudo-second-order* dapat dilihat pada Persamaan 3.8

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad 3.8$$

Dengan:

q_t = Kapasitas adsorpsi pada waktu t (mg.g^{-1})

q_e = Kapasitas adsorpsi pada kondisi setimbang (mg.g^{-1})

k_2 = Konstanta laju *pseudo-second-order* (min^{-1})

Apabila digabungkan dengan kondisi limit ($t = 0$; $q_e = 0$; $t = t$; $q_t = q_t$) maka kondisi pada Persamaan 3.8 akan berubah menjadi Persamaan 3.9

$$\frac{t}{q_t} = \left(\frac{1}{k_2 q_e^2} \right) + \left(\frac{1}{q_e} \right) t \quad 3.9$$

Berdasarkan kondisi diatas, kurva *pseudo-second-order* diperoleh dengan memplot nilai t/q_t terhadap waktu t . Nilai *slope* adalah q_e dengan k_2 sebagai intersep.

3.15 Uji Statistika

Pengujian statistika diperlukan untuk menganalisis pengaruh antarvariabel selama pengujian adsorpsi dalam mereduksi logam berat Cu(II) dengan repetisi data yang dilakukan secara *triplo*. Metode pengujian statistika dilakukan beberapa uji, sebagai berikut:

1. Uji Normalitas

Uji normalitas pada penelitian ini dilakukan dengan metode Kolmogorov-Smirnov pada pengaruh variasi waktu kontak dan konsentrasi larutan. Sebaliknya, pengaruh pH, massa adsorben dan reusabilitas menggunakan metode Shapiro-Wilk karena jumlah sampel kurang dari 50. Data dinyatakan terdistribusi normal apabila nilai signifikansi (p) > 0,05.

2. Uji Homogenitas

Uji homogenitas dilakukan menggunakan software SPSS dengan metode Levene untuk mengevaluasi homogenitas varian antarkelompok. Varian dinyatakan homogen apabila nilai signifikansi (p) > 0,05. Apabila varian data dinyatakan tidak homogen dengan kondisi data terdistribusi normal, maka asumsi *One-way* ANOVA tidak terpenuhi sehingga analisis dilanjutkan menggunakan uji Welch dengan nilai signifikansi (p) < 0,05 apabila data dinyatakan memiliki pengaruh.

3. Uji Kruskal-Wallis

Uji Kruskal-Wallis merupakan metode statistik non parametrik yang dilakukan untuk analisis perbedaan median (peringkat data). Uji ini dilakukan apabila data tidak memenuhi asumsi parametrik ANOVA. Nilai signifikansi (p -value) < 0,05 sehingga data dinyatakan H_0 ditolak dan H_1 diterima.

4. Uji ANOVA (*Analysis of Variance*)

Uji ANOVA dilakukan menganalisis perbedaan rata-rata antar kelompok perlakuan sehingga memuat hipotesis penelitian. Nilai signifikansi (*p-value*) < 0,05 sehingga data dinyatakan H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hipotesis penelitian dirumuskan sebagai berikut:

a. Hipotesis ANOVA Two-Way pada Konsentrasi Logam Berat Cu(II) dan Waktu Kontak

H_0 = Tidak terdapat pengaruh konsentrasi logam Cu(II) dan waktu kontak terhadap % penjerapan konsentrasi logam Cu(II).

H_1 = Terdapat pengaruh konsentrasi logam Cu(II) dan waktu kontak terhadap % penjerapan konsentrasi logam Cu(II).

b. Hipotesis ANOVA One-Way pada pH Larutan Cu(II)

H_0 = Tidak terdapat pengaruh pH larutan Cu(II) terhadap % penjerapan konsentrasi logam Cu(II).

H_1 = Terdapat pengaruh pH larutan Cu(II) terhadap % penjerapan konsentrasi logam Cu(II).

c. Hipotesis ANOVA One-Way pada Massa Adsorben

H_0 = Tidak terdapat pengaruh massa adsorben terhadap % penjerapan konsentrasi logam Cu(II).

H_1 = Terdapat pengaruh massa adsorben terhadap % penjerapan konsentrasi logam Cu(II).

d. Hipotesis ANOVA One-Way pada Reusabilitas Adsorben

H_0 = Tidak terdapat pengaruh reusabilitas adsorben terhadap % penjerapan konsentrasi logam Cu(II).

H_1 = Terdapat pengaruh reusabilitas adsorben terhadap % penjerapan konsentrasi logam Cu(II).

3.16 Kesimpulan dan Saran

Penarikan kesimpulan ditujukan menjawab rumusan penelitian serta memastikan ketersesuaian dengan tujuan dari penelitian yang telah ditetapkan. Sebaliknya, perumusan saran disusun untuk menjelaskan arah pengembangan maupun evaluasi kekurangan riset yang diperoleh selama kegiatan penelitian berlangsung.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh adsorben dari komposit zeolit-*nano zero-valent iron* terhadap reduksi logam berat Cu(II). Adsorben zeolit sintetis dari pemanfaatan *fly ash* dilakukan uji karakteristik XRD untuk menganalisis fase kristalisasi zeolit. Komposit zeolit-*nano zero-valent iron* dilakukan uji karakteristik XRD, FTIR, BET, dan pH_{pzc} pada sebelum adsorpsi. Setelah proses adsorpsi, juga dilakukan uji karakteristik pada komposit zeolit-*nano zero-valent iron* yakni BET, FTIR dan XRD.

4.1 Uji Karakteristik

4.1.1 X-ray Fluorescence (XRF)

Karakteristik XRF dilakukan untuk menganalisis komposisi kimia *fly ash* dalam bentuk oksida penyusunnya. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi kandungan oksida utama, seperti SiO₂, Al₂O₃, dan oksida lainnya dalam evaluasi potensi *fly ash* sebagai bahan baku pembuatan adsorben. Berikut merupakan data komposisi oksida dalam *fly ash* disajikan pada **Tabel 4.1**

Tabel 4. 1 Komposisi Oksida dalam Fly Ash

Komposisi Material	Unit	Hasil
SiO ₂	%	48,93
Al ₂ O ₃	%	23,34
Fe ₂ O ₃	%	9,02
CaO	%	7,02

Sumber: Data Paiton, 2025

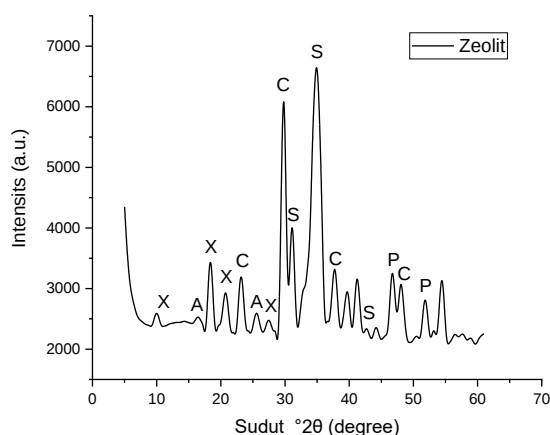
Berdasarkan **Tabel 4.1**, SiO₂ dan Al₂O₃ teridentifikasi sebagai oksida dominan dalam *fly ash* sebesar 48,93% dan 23,34%. Hasil komposisi oksida secara lengkap disajikan pada **Lampiran 2**. Kandungan kedua oksida ini menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki kandungan silika dan alumina untuk pembentukan kerangka aluminosilikat pada zeolit (Rieswana *et al.*, 2024). Menurut penelitian yang dilakukan oleh Alotaibi (2025), zeolit

merupakan kristalin aluminosilikat yang dibentuk oleh unit tetrahedral silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang dihubungkan oleh atom oksigen. Struktur berpori pada zeolit akan menampung kation yang dapat ditukar dengan kation lain sehingga dapat menetralkan muatan negatif pada struktur aluminosilikat. Penelitian yang dilakukan oleh Faustino *et al.*, (2024) memberikan indikasi bahwa kapasitas tukar dipengaruhi oleh rasio silika dan alumina (Si/Al), penurunan rasio Si/Al menunjukkan adanya muatan negatif lebih tinggi.

Berdasarkan data komposisi oksida **Tabel 4.1** rasio Si/Al *fly ash* sebesar 1,78 dengan rincian perhitungan pada **Lampiran 2**. Namun, rasio tersebut dapat disesuaikan dengan penambahan natrium aluminat (NaAlO_2) sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Makgabutlane *et al.*, (2020). Semakin banyak kandungan Al dalam kerangka zeolit maka muatan yang terbentuk pada kerangka adalah negatif. Hal tersebut terjadi karena ion Al^{3+} dapat menggantikan posisi Si^{4+} dalam kerangka zeolite melalui ikatan dengan atom oksigen. Perbedaan muatan antara Al^{3+} dan Si^{4+} menyebabkan kerangka zeolit memiliki muatan negatif yang kemudian diseimbangkan oleh kation penyeimbang seperti Na^+ , K^+ atau H^+ (J. Li *et al.*, 2023).

4.1.2 X-ray Diffraction (XRD)

Puncak yang dihasilkan pengujian XRD digunakan untuk menganalisis struktur kristal/fase kristalin pada zeolit dan komposit Z@nZVI baik sebelum maupun sesudah proses adsorpsi (Omidi *et al.*, 2017). Analisis dilakukan pada rentang sudut (2θ) $5-90^\circ$. Identifikasi pola difraksi XRD yang diperoleh akan membandingkan posisi sudut (2θ) dengan intensitas relatif puncak terhadap *Joint Committee for Powder Diffraction Standards* (JCPDS) atau penelitian terdahulu.



Gambar 4. 1 Pola Difraksi Zeolit
(X = Zeolit FAU; A = Zeolit LTA; S = Sodalit; C = Calcite; P = Portlandite)
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Gambar 4.1 menunjukkan sebagian puncak beririsan dengan pola difraksi zeolit, namun beberapa puncak dominan juga menunjukkan kemungkinan adanya fase non-zeolit. Pola puncak difraksi sampel pada **Gambar 4.1** pada posisi 2θ $9,98^\circ$; $16,26^\circ$; $18,36^\circ$; $20,86^\circ$; $23,13^\circ$; $29,68^\circ$; $30,01^\circ$; $31,02^\circ$; $32,91^\circ$; $33,76^\circ$; $34,65^\circ$; $35,35^\circ$; $39,67^\circ$; $46,83^\circ$; $47,74^\circ$; $48,18^\circ$; dan $54,3^\circ$. Puncak dengan intensitas relatif tertinggi terdapat pada $2\theta = 29,68^\circ$ dengan intensitas relatif 100%, diikuti $2\theta = 34,65^\circ$ dengan intensitas relatif 94,97% dan $2\theta = 31,02^\circ$ dengan intensitas relatif 45,04%. Data hasil uji XRD secara lengkap dapat dilihat pada **Lampiran 3**. Identifikasi difraksi sampel dilakukan dengan membandingkan beberapa fase yang mungkin terbentuk, seperti FAU, LTA, SOD, *calcite* dan *portlandite*.

Tabel 4. 2 Identifikasi Posisi 2θ pada uji XRD

Fase	Peak fingerprint referensi ($^\circ 2\theta$)	Peak fingerprint sampel ($^\circ 2\theta$) ^{1*}	Sumber
Zeolit X (FAU)	6,1 $^\circ$; 9,97 $^\circ$; 11,76 $^\circ$; 15,4 $^\circ$; 18,46 $^\circ$; 20,1 $^\circ$; 26,6 $^\circ$; 30,9 $^\circ$	9,9 $^\circ$; 16,2 $^\circ$; 18,36 $^\circ$; 20,5 $^\circ$; 31,02 $^\circ$	(Yao <i>et al.</i> , 2018)
Zeolit A (LTA)	7,25 $^\circ$; 10,2 $^\circ$; 12,4 $^\circ$; 16,1 $^\circ$; 21,6 $^\circ$; 26,18 $^\circ$; 30,7 $^\circ$; 34,2 $^\circ$	16,2 $^\circ$; 20,8 $^\circ$; 30,01 $^\circ$; 34,1 $^\circ$	(Khasanah <i>et al.</i> , 2025)

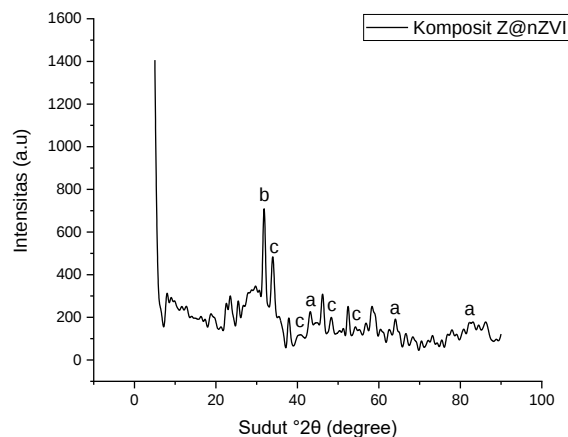
Fase	Peak fingerprint referensi ($^{\circ}2\theta$)	Peak fingerprint sampel ($^{\circ}2\theta$) ^{1*}	Sumber
Sodalit (SOD)	13,89°; 24,30°; 31,74°; 34,83°; 43,06°	23,8°; 31,02°; 34,65°; 42,81°	(B. Liu <i>et al.</i> , 2018)
<i>Calcite</i> (CaCO ₃)	23,1°; 29,4°; 36,0°; 39,4°; 43,2°; 47,5°; 48,5°	23,1°; 29,68°; 35,83°; 42,81°; 47,7°; 48,14°	(Luo <i>et al.</i> , 2020)
<i>Portlandite</i> (Ca(OH) ₂)	18,0°; 28,7°; 34,1°; 47,1°; 50,8°	18,36°; 34,1°; 46,83°; 50,45°	(Tryfon <i>et al.</i> , 2024)

Sumber: Data analisis, 2026

Tabel 4.2 menunjukkan perbandingan puncak 2θ pada referensi masing-masing fase. Pada posisi puncak 9,9°; 16,2°; 18,36°; 20,5°; 31,02° menunjukkan kedekatan dengan posisi puncak Zeolit X (FAU) berdasarkan JCPDS 38-0237 yang dilaporkan oleh Yao *et al.*, (2018). Pada posisi puncak 16,2°; 20,8°; 30,01°; 34,1° menunjukkan kedekatan dengan posisi puncak Zeolit A (LTA) berdasarkan JCPDS 39-0222 yang dilaporkan oleh Khasanah *et al.*, (2025). Namun, baik pada fase zeolit X maupun A puncak utama tidak teridentifikasi secara jelas pada posisi 6,1° dan 7,2° sehingga belum dapat dinyatakan sebagai zeolit X maupun zeolit A sebagai fase utama. Puncak tertinggi pada $2\theta = 29,68^{\circ}$ sesuai dengan puncak utama calcite yang dilaporkan oleh Luo *et al.*, (2020) pada posisi 29,4°. Pada literatur juga menyatakan bahwa pola *calcinate* berada pada posisi 23,1°; 29,4°; 36,0°; 39,4°; 43,2°; 47,5°; 48,5° yang memiliki kemiripan dengan pola sampel 23,1°; 29,68°; 35,83°; 42,81°; 47,7°; 48,14°. Disisi lain, menurut penelitian yang dilakukan Tryfon *et al.*, (2024) menyatakan bahwa pola portlandite pada posisi 18,0°; 28,7°; 34,1°; 47,1°; 50,8° yang juga memiliki kemiripan dengan pola sampel 18,36°; 34,1°; 46,83°; 50,45°. Keberadaan fase *calcinate* dan *portlandite*, kemungkinan turut berkontribusi dalam pola difraksi. Sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Längauer *et al.*, (2021) melaporkan bahwa material pengotor seperti Fe₂O₃ dan CaO dapat memberikan pengaruh negatif terhadap pembentukan kerangka zeolit.

Pola difraksi menunjukkan indikasi adanya fase aluminosilikat, karena terdapat beberapa puncak Zeolit X (FAU), Zeolit A (LTA), dan Sodalit (SOD). Namun, puncak utama dari Zeolit X dan Zeolit A tidak muncul secara lengkap, sehingga belum dipastikan. Pembentukan zeolit dengan fase lebih dari satu diakibatkan oleh material residu, komposisi bahan dan ukuran partikel tidak homogen selama proses sintesis. Pembentukan fase tunggal atau multifase juga dipengaruhi oleh konsentrasi unsur Si, Al, dan NaOH (Sousa *et al.*, 2025). Selain itu, puncak tertinggi lebih sesuai dengan fase *calcinate* dan *portlandite*. Oleh karena itu, sampel mengandung sedikit fase zeolit, tetapi fase kristalin yang lebih dominan berada dari senyawa kalsium. Menurut penelitian yang dilaporkan oleh Ma *et al.*, (2023) kandungan kalsium yang diubah menjadi zeolit akan menghambat pembentukan zeolit.

Puncak difraksi zeolit dapat diindeks terhadap struktur zeolit x menggunakan (111), (220), (311), (331), dan (533) (Pei *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2022). Sehingga, didapatkan nilai parameter kisi $a = b = c$ rata-rata zeolit X sebesar 25,07 Å yang mendekati nilai parameter kisi yang dilaporkan oleh Madhu *et al.*, (2022) sebesar 24,99 Å. Ukuran kristalit dari persamaan *Scherrer* yang didapatkan pada penelitian ini adalah sebesar 50,6 nm. Sementara itu, indeks struktur zeolit A menggunakan (200), (220), (222), (420), (442), (622), (642), (644) dan (664) (De Oliveira *et al.*, 2023). Sehingga, didapatkan nilai parameter kisi $a = b = c$ rata-rata zeolit A sebesar 24,76 Å dengan ukuran kristalit dari persamaan *Scherrer* yang didapatkan pada penelitian ini adalah sebesar 33,53 nm. Nilai parameter kisi zeolit A mendekati penelitian yang dilakukan oleh Madhu *et al.*, (2022) sebesar 24,61 Å.



Gambar 4. 2 Pola Difraksi Komposit Z@nZVI Sebelum Adsorpsi
(a = Fe⁰; b = FeOOH; c = Fe₂O₃)
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Gambar 4.2 pola puncak difraksi komposit Z@nZVI menunjukkan posisi 9,92°; 22,55°; 23,53°; 25,48°; 31,79°; 33,96°; 37,85°; 44,70°; 46,26°; 52,43°; 58,23°; 59,06°; 63,97°; 65,04°; 82,31°. Menurut kajian yang dilakukan oleh melaporkan X. Zhang *et al.*, (2025) Fe⁰/nZVI memiliki puncak difraksi 2θ = 44,7°; 65,0°; 82,3°, yang memiliki bidang kristal (110), (200), dan (211) dari *metallic iron*. Literatur lain juga melaporkan bahwa keberadaan Fe logam (Fe⁰) memiliki pola puncak pada posisi 44,67°; 65,02°; 82,33° (Parnis *et al.*, 2022). Pola puncak difraksi komposit Z@nZVI didominasi oleh intensitas puncak besi, sementara puncak-puncak karakteristik zeolit mengalami penurunan intensitas akibat deposisi partikel nZVI pada permukaan zeolit. Kondisi ini sejalan dengan penelitian yang dilaporkan oleh Zeng *et al.*, (2016), puncak karakteristik zeolit tidak teridentifikasi dikarenakan menyerupai pola nZVI. Hal tersebut menunjukkan bahwa prekursor telah terdistribusi ke dalam struktur zeolit. Berikut adalah hasil identifikasi posisi pola difraksi komposit Z@nZVI disajikan pada **Tabel 4.3**

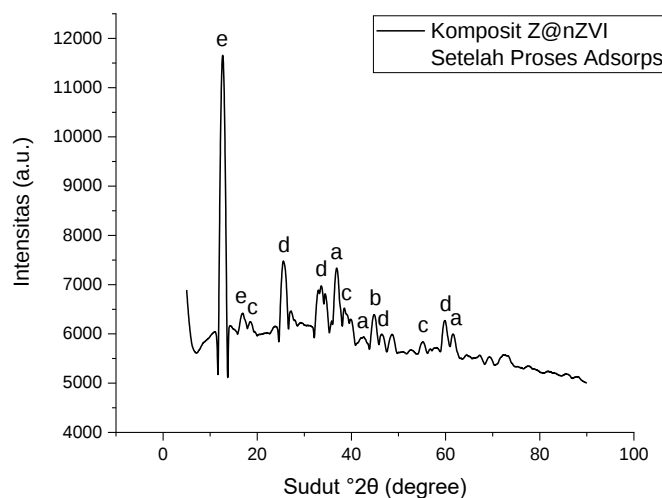
Tabel 4. 3 Identifikasi pola difraksi komposit Z@nZVI sebelum Adsorpsi

Fase	Peak fingerprint sampel (°2θ)	Peak fingerprint referensi (°2θ)	Sumber
Fe ⁰	44,70°; 65,04°; dan 82,31°	44,7°; 65,0°; dan 82,3°	(X. Zhang et al., 2025)

Fase	Peak fingerprint sampel ($^{\circ}2\theta$)	Peak fingerprint referensi ($^{\circ}2\theta$)	Sumber
		44,67 $^{\circ}$; 65,02 $^{\circ}$; dan 82,33 $^{\circ}$	(Parnis et al., 2022).
FeOOH	31,79 $^{\circ}$	31,82 $^{\circ}$	(Tesnim et al., 2024)
Fe ₂ O ₃ (Hematit)	23,53 $^{\circ}$; 33,96 $^{\circ}$; 58,23 $^{\circ}$; dan 63,97 $^{\circ}$	24,13 $^{\circ}$; 33,14 $^{\circ}$; 35,60 $^{\circ}$; 40,85 $^{\circ}$; 49,43 $^{\circ}$; 54,04 $^{\circ}$; 57,57 $^{\circ}$; 62,41 $^{\circ}$; dan 63,98 $^{\circ}$	(Qureshi et al., 2022)

Sumber: Data analisis, 2026

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) juga dilakukan pada komposit yang telah mengikat logam berat Cu(II). Keberhasilan pengikatan logam berat Cu(III) ditinjau melalui perubahan pola difraktogram. Pola difraksi sinar-X (XRD) komposit Z@nZVI setelah adsorpsi disajikan pada **Gambar 4.3**



Gambar 4. 3 Pola Difraksi Komposit Z@nZVI Setelah Adsorpsi
(a = Cu₂O; b = Fe⁰; c = Fe₂O₄; d = Fe₂O₃; e = zeolit)

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Gambar 4.3 menunjuknya terbentuknya puncak $^{\circ}2\theta$ pada 36,39 $^{\circ}$; 42,30 $^{\circ}$; 61,3 $^{\circ}$ yang sesuai dengan fase cuprite. Posisi puncak tersebut sesuai dengan data referensi yang dilaporkan oleh Regis et al., (2024) pada puncak 36,4 $^{\circ}$; 42,3 $^{\circ}$; dan 61,4 $^{\circ}$ sehingga mengonfirmasi terbentuknya fase Cu₂O pada

komposit setelah proses adsorpsi. Literatur yang diidentifikasi oleh Anang *et al.*, (2023) mengindikasikan bahwa ion Cu(II) berinteraksi dengan prekursor nZVI sehingga terjadinya transfer elektron dari Fe⁰ kepada Cu²⁺. Hal ini terjadi akibat Fe⁰ memiliki potensial reduksi lebih rendah (-0,44 V) dibandingkan Cu²⁺ (+0,34), sehingga Cu²⁺ mengalami reduksi menjadi Cu⁰ maupun Cu₂O. Lapisan Fe₂O₃ (hematit) dan Fe₃O₄ yang teridentifikasi setelah adsorpsi dapat berasal dari lapisan oksida yang telah terbentuk pada permukaan nZVI selama sintesis, maupun penyimpanan akibat kontak dengan oksigen. Validasi atas fenomena ini juga dapat ditemukan pada studi Boonruam *et al.*, (2020) mendeteksi keberadaan struktur Fe₂O₃ pada permukaan nZVI dan membentuk lapisan tipis

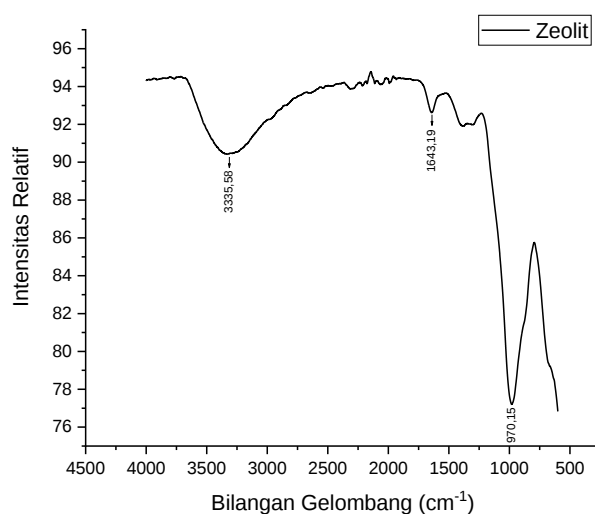
Tabel 4. 4 Identifikasi pola difraksi komposit Z@nZVI setelah Adsorpsi

Fase	Peak fingerprint sampel (°2θ)	Peak fingerprint referensi (°2θ)	Sumber
Cuprite (Cu ₂ O)	36,39°; 42,30°; 61,3°	36,4°; 42,3°; dan 61,4°	(Regis Correa da Silva et al., 2024)
nZVI	44,81°	44,8°	(Shao & Yu, 2018)
Fe ₃ O ₄	18,24°; 34,22°; 37,04°; 42,30°; 52,68°; 56,84°; 61,91°	18,23°; 30,0°; 35,36°; 37,0°; 42,99°; 53,37°; 56,87°; and 62,45°	(Scaffolds et al., 2023)
Fe ₂ O ₃ (Hematit)	25,59°; 33,10°; 36,39°; 48,60°; 55,15°; 58,05°; 61,91°	24,13°; 33,14°; 35,60°; 40,85°; 49,43°; 54,04°; 57,57°; 62,41°; dan 63,98°	(Qureshi et al., 2022)
CuO	38,63° dan 48,60°	35,47°; 38,63°; 48,72°	(Alam et al., 2025)
Cu(OH) ₂	16,84°; 34,22°; 38,49°; 39,78°	16,81°; 23,89°; 34,09°; 38,24°; 39,77°	(Eisavi & Karimi, 2019)

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

4.1.3 Fourier Transform Infrared (FTIR)

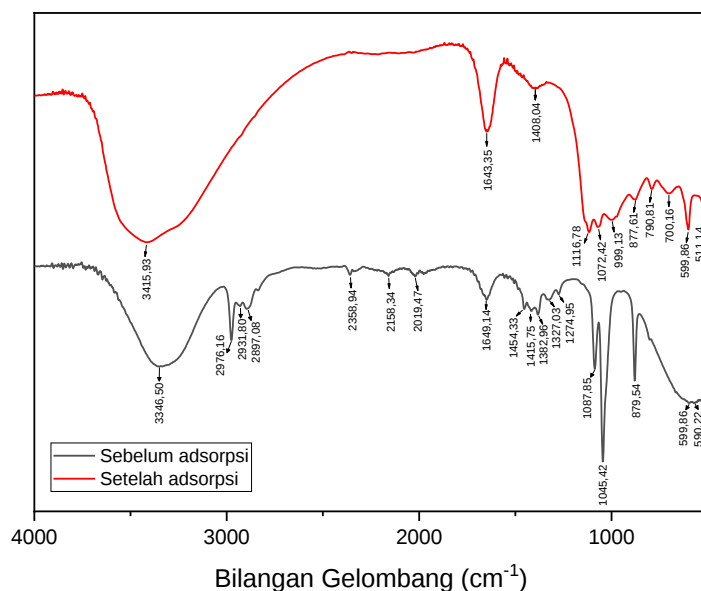
Karakterisasi FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsional pada zeolit dan komposit Z@nZVI baik sebelum maupun sesudah proses adsorpsi. Selain itu, karakterisasi FTIR digunakan untuk membedakan puncak serapan spesifik yang sesuai dengan berbagai gugus fungsional, sehingga menandakan keterlibatan dalam reduksi ion logam (Pasiieczna-Patkowska *et al.*, 2025). Analisis FTIR dilakukan pada rentang panjang serapan gelombang sebesar $4000 - 500 \text{ cm}^{-1}$.



Gambar 4. 4 Spektrum FTIR dari Zeolit
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Gambar 4.4 menyajikan bilangan gelombang yang terdeteksi pada sampel zeolit yakni 3335,597; 2175,065; 2108,969; 2050,619; 1978,265; 1962,858; 1643,189; 1385,332 dan $970,155 \text{ cm}^{-1}$. Data hasil uji FTIR secara lengkap dapat dilihat pada **Lampiran 4**. Pita lebar $3335,597 \text{ cm}^{-1}$ diindikasikan dengan regangan O-H sedangkan pita lebar $1643,189 \text{ cm}^{-1}$ merupakan regangan H-O-H. Kondisi ini menunjukkan daerah bilangan gelombang berdekatan dengan penelitian yang dilaporkan oleh Madhu *et al.*, (2022) menyatakan bahwa pada pita 3453 cm^{-1} dikaitkan dengan vibrasi regangan molekul air. Disisi lain, pita 1634 cm^{-1} merupakan vibrasi deformasi molekul air. Pada pita lebar $970,155 \text{ cm}^{-1}$ terindikasi sebagai regangan asimetris dari Si-O-T. Kondisi ini selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Farro *et al.*, (2023) melaporkan bahwa pada sampel zeolit A

dan X terjadi regangan asimetris pada bilangan gelombang 995 cm^{-1} dan 971 cm^{-1} . Secara keseluruhan, hasil FTIR menunjukkan sampel memiliki gugus O-H; H-O-H; dan Si-O-T.



Gambar 4. 5 Spektrum FTIR dari Komposit Z@nZVI

Gambar 4.5 menyajikan spektrum gugus fungsi komposit Z@nZVI baik sebelum maupun sesudah proses adsorpsi. Data hasil uji FTIR secara lengkap dapat dilihat pada **Lampiran 4**. Pada grafik sebelum adsorpsi, Pita lebar $3346,50\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi regangan O-H akibat molekul air (H_2O) yang teradsorpsi pada permukaan komposit. Secara teoritis, karakteristik vibrasi dari ikatan hidroksil teramati pada rentang $3200\text{--}3650\text{ cm}^{-1}$ (R. Ali et al., 2020). Disisi lain, terjadi vibrasi deformasi molekul air pada pita $1649,14\text{ cm}^{-1}$ (Madhu et al., 2022). Pada pita serapan $2976,16$; $2931,8$; $2897,08$; $2358,94$; $2158,34$; dan $2019,47\text{ cm}^{-1}$ merupakan karakteristik dari vibrasi ikatan organik karbon C-H pada rentang $2900\text{--}1625\text{ cm}^{-1}$ (Alterary & Marei, 2020). Kehadiran gugus C-H berkorelasi dengan fasa karbon tak terbakar (*unburned carbon*) yang divalidasi oleh data karakteristik komposisi *fly ash* (**Lampiran 2**) sebesar 0,315%.

Spektrum FTIR juga memperlihatkan serapan minor pada bilangan gelombang $1454,33$ dan $1415,75\text{ cm}^{-1}$. Berdasarkan literatur, pita repan

yang terjadi di sekitar 1420 cm^{-1} mengindikasikan gugus karbonat akibat terbentuknya senyawa natrium karbonat (Na_2CO_3) dari reaksi sisa aktivator NaOH dan udara (Mishra *et al.*, 2022). Hal ini didukung pula oleh penelitian X. Ma *et al.*, (2022) yang menyatakan bahwa serapan pada angka sekitar 1450 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi karbonat akibat terjadinya proses karbonasi secara langsung pada permukaan material oleh paparan gas CO_2 . Selanjutnya, pada rentang $1420 - 1360\text{ cm}^{-1}$ mengonfirmasi bahwasanya pita serapan $1382,96\text{ cm}^{-1}$ merupakan spesi borat (B–O) akibat sisa reaksi dari reduksi pembentukan nZVI (Hameed *et al.*, 2016). Pada pita $1274,95$; $1087,85$; dan $1045,42\text{ cm}^{-1}$ merupakan serapan kerangka silikat (Si–O–T). Selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh X. Ma *et al.*, (2022) menyatakan bahwa pita serapan rentang ~ 1023 hingga $\sim 1263\text{ cm}^{-1}$ merupakan vibrasi regangan asimetris ikatan Si–O–T. Pada serapan yang terdeteksi pada gelombang $879,54\text{ cm}^{-1}$ merepresentasikan vibrasi regangan simetris dari ikatan Si–O atau T–O. Pita serapan rentang ~ 450 hingga $\sim 800\text{ cm}^{-1}$ merupakan vibrasi bending bidang dari ikatan Si–O atau Al–O (X. Ma *et al.*, 2022). Pada pita serapan $599,86$ dan $590,22\text{ cm}^{-1}$ merupakan indikasi vibrasi ikatan Fe–O pada struktur nZVI. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Ersöz *et al.* (2025), menyatakan bahwa pada pita serapan 668 cm^{-1} merupakan vibrasi regangan dari ikatan Fe–O. Sementara itu pada 590 cm^{-1} menunjukkan vibrasi regangan ikatan Fe–O cm^{-1} . Pada penelitian yang dilakukan oleh Apriliani (2022) puncak-puncaknya pada $443,63$; $511,14$; dan $619,5\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan keberadaan ikatan Fe–O yang masing-masing berasal dari Fe_3O_4 dan Fe_2O_3 . Pembentukan ikatan Fe–O terjadi akibat nZVI telah teroksidasi menjadi oksida besi.

Grafik setelah adsorpsi, terjadi pergeseran pita serapan gugus hidroksil (O–H) dari $3346,50\text{ cm}^{-1}$ menjadi $3415,93\text{ cm}^{-1}$, serta peningkatan intensitas yang tajam pada pita H–O–H ($1643,35\text{ cm}^{-1}$). Hal ini mengindikasikan bahwa molekul yang semula terikat kuat pada permukaan material mengalami penataan ulang sehingga mengalami pergeseran pita akibat masuknya molekul lain (adsorbat). Frekuensi pita regangan O–H dan pita tekuk H–O–H memiliki hubungan yang berlawanan. Apabila pita H–O–

H mengalami penurunan angka yang ditandai dengan kenaikan angka pada pita O-H merupakan tanda bahwa ikatan hidrogen antar-molekul sedang melemah atau merenggang (Seki et al., 2020). Pada gugus Si-O-T terjadi pergeseran pita dari 1087,85 cm^{-1} dan 1045,42 cm^{-1} berubah menjadi beberapa puncak baru seperti 1116,78; 1072,42 dan 999,13 cm^{-1} . Pada pita gugus Fe-O pada pita gelombang 590,22 cm^{-1} , terjadi pergeseran pita gugus dan pita serapan baru pada 511,14 cm^{-1} . Menurut Flores-Valenzuela *et al.* (2023), kondisi ini dikaitkan dengan adanya gangguan pada gugus kimia zeolit akibat eksistensi ion tembaga sehingga perubahan struktur molekulnya dapat menyebabkan interaksi atau pembentukan pita baru. Perubahan spektrum FTIR juga ditandai dengan hilangnya puncak-puncak minor gugus C-H, B-O dan karbonat.

Tabel 4. 5 Identifikasi Spektrum FTIR Komposit Z@nZVI

Bilangan Gelombang (cm^{-1})		Bilangan Gelombang Referensi (cm^{-1})	Gugus Fungsi	Referensi
Komposit Z@nZVI sebelum adsorpsi	Komposit Z@nZVI setelah adsorpsi			
3346,50	3415,93	3200-3650	O-H	(R. Ali <i>et al.</i> , 2020)
1649,14	1643,35		H-O-H	(Madhu <i>et al.</i> , 2022)
2976,16	-	2900 – 1625	C-H	(Alterary & Marei, 2020)
2931,8				
2897,08				
2358,94				
2158,34				
2019,47				
1454,33	-	1420	-CO ₃	(X. Ma <i>et al.</i> , 2022; Mishra <i>et al.</i> , 2022)
1415,75		1450		
1382,96	-	1420 – 1360	B-O	(Hameed <i>et al.</i> , 2016)
1274,95	1116,78	~1023 hingga ~1263	Si-O-T	(X. Ma <i>et al.</i> , 2022)
1087,85	1072,42			

Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)		Bilangan Gelombang Referensi (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi	Referensi
Komposit Z@nZVI sebelum adsorpsi	Komposit Z@nZVI setelah adsorpsi			
1045,42	999,13			
599,86	599,86	590	Fe-O	(Apriliani, 2022; Ersöz <i>et al.</i> , 2025)
590,22	511,14	443,63; 511,14; dan 619,5		

Sumber: Data analisis, 2026

4.1.4 Brunauer–Emmett–Teller (BET)

Salah satu faktor yang berperan penting dalam proses adsorpsi logam berat adalah luas permukaan adsorben. Semakin tinggi luas permukaan yang tersedia, semakin banyak situs aktif yang dapat berinteraksi dengan adsorbat sehingga proses penyerapan dapat berlangsung efektif (Suryadi Ismadji *et al.*, 2021). Uji karakterisasi BET digunakan untuk menganalisis luas permukaan spesifik pada komposit Z@nZVI baik sebelum maupun sesudah proses adsorpsi yang disajikan pada **Tabel 4.6**

Tabel 4. 6 Hasil Analisis Karakterisasi BET pada Komposit Z@nZVI

Sampel	Kondisi	BET (m ² /g)	V _{pore} (cc/g)	Pore Size (nm)
Z@nZVI	sebelum adsorpsi	35,93	0,102	5,69
	setelah adsorpsi	19,28	0,081	8,41

Sumber: Data analisis, 2026

Tabel 4.6 menunjukkan bahwa komposit Z@nZVI memiliki luas permukaan spesifik sebesar 35,93 m²/g. Nilai ini menunjukkan bahwa komposit yang dihasilkan memiliki pori dan area aktif sehingga dapat menunjang proses adsorpsi ion Cu(II). Pembuktian kemampuan adsorpsi telah disajikan pada **Gambar 4.8** yang menghasilkan kapasitas adsorpsi sebesar 93,43 mg/g. Meskipun demikian, luas permukaan tersebut tergolong lebih rendah dibandingkan dengan beberapa penelitian terdahulu. Penelitian oleh Gharbani, (2024) berhasil memperoleh nilai luas permukaan komposit zeolit alami tipe klinoptilolit dan nZVI sebesar 132,14 m²/g, sedangkan penelitian oleh Yang *et al.*, (2022) mencatat komposit nZVI-Zeolit 5A

sebesar 238 m²/g. Namun, nilai luas permukaan pada penelitian ini masih berada dalam kisaran yang sebanding dengan penelitian oleh Dada *et al.*, (2021) yakni memiliki luas permukaan spesifik sebesar 20,86 m²/g dengan kapasitas adsorpsi sebesar 82,82 mg/g. Sebaliknya, apabila dibandingkan dengan luas permukaan spesifik yang dilaporkan oleh Koshlak, (2023) yakni sebesar 77,95 mg²/g. Kondisi tersebut sejalan dengan hasil karakterisasi XRD pada **Gambar 4.1** yang menunjukkan bahwa puncak utama dari Zeolit X dan Zeolit A tidak muncul secara lengkap, sehingga belum dipastikan. Selain itu, puncak tertinggi lebih sesuai dengan fase *calcinat* dan *portlandite*. Oleh karena itu, sampel mengandung sedikit fase zeolit, tetapi fase kristalin yang lebih dominan berada dari senyawa kalsium. **Gambar 4.2** juga menunjukkan bahwa pola puncak difraksi komposit Z@nZVI didominasi oleh intensitas puncak besi, sementara puncak-puncak karakteristik zeolit mengalami penurunan intensitas.

4.1.5 pH Point Zero Charge (pHpzc)

Penentuan titik pH_{pzc} diatur pada pH 2, 4, 6, 7, 10, 12 dengan larutan NaCl 0,01 M sebagai elektrolit. Penyesuaian pH larutan diatur menggunakan larutan NaOH dan HCl 0,01 M. Pengujian pH_{pzc} bertujuan untuk menganalisis muatan permukaan komposit dalam larutan. Nilai ΔpH positif menunjukkan permukaan adsorben bermuatan positif. Sebaliknya, nilai ΔpH negatif menunjukkan muatan negatif pada permukaan adsorben. Muatan permukaan adsorben dapat berubah seiring dengan perubahan pH dalam larutan. pH_{pzc} bernilai nol disebut sebagai kondisi muatan partikel tampak netral (A. Salama & Sakhawy, 2023). Rincian perhitungan ΔpH dipaparkan pada **Lampiran 5**. Nilai perubahan pH dihitung menggunakan persamaan 4.1

$$\Delta pH = pH_f - pH_i \quad 4.1$$

Dengan:

ΔpH = Selisih antara pH setelah dan sebelum kontak dengan adsorben

pH_i = Kondisi pH awal sebelum kontak dengan adsorben

pH_f = Kondisi pH akhir setelah kontak dengan adsorben

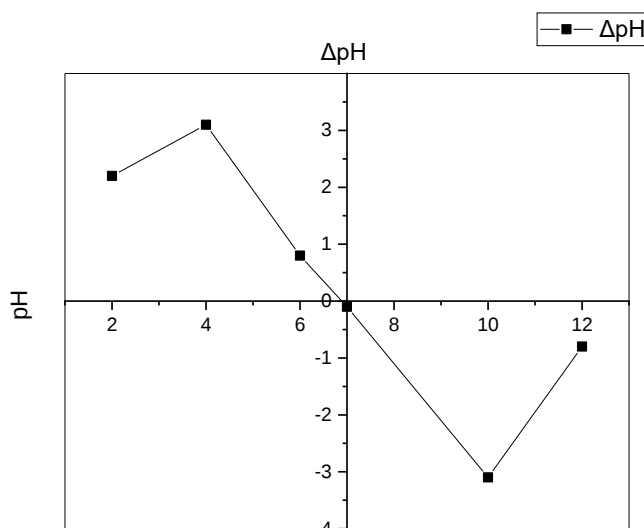
Berikut merupakan hasil pengukuran pH awal, pH akhir, ΔpH serta hasil identifikasi muatan pada permukaan adsorben disajikan pada **Tabel 4.7**

Tabel 4. 7 Analisis Titik Muatan Nol (pH_{pzc}) Komposit Z@nZVI

Variasi pH	pH Aktual		ΔpH	Keterangan
	pH awal (pH_i)	pH akhir (pH_f)		
2	2,1	4,3	2,2	Muatan Positif
4	4,1	7,2	3,1	Muatan Positif
6	6,1	6,7	0,6	Muatan Positif
7	7,1	7,0	-0,1	Muatan Negatif
10	6,9	6,9	-3,1	Muatan Negatif
12	11,1	11,1	-0,8	Muatan Negatif

Sumber: Data analisis, 2026

Grafik hubungan antara pH dan ΔpH digunakan untuk menentukan nilai pH_{pzc} komposit Z@nZVI. Grafik pH_{pzc} disusun dengan menempatkan variasi pH larutan sebagai sumbu X dan nilai ΔpH pada sumbu Y. Grafik pH_{pzc} disajikan pada **Gambar 4.6**



Gambar 4. 6 Analisis Titik Muatan Nol (pH_{pzc}) dari Komposit Z@nZVI

Sumber: Data analisis, 2026

Berdasarkan **Gambar 4.6**, diperoleh nilai pH_{pzc} komposit Z@nZVI sebesar 6,68. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pada pH 6,68 permukaan komposit Z@nZVI berada dalam kondisi netral atau memiliki muatan nol.

Pada $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$ menunjukkan permukaan komposit memiliki muatan yang sama dengan adsorbat berupa kation sehingga terjadi tolakan elektrostatis (Muscarella *et al.*, 2025). Kondisi ini kurang mendukung proses adsorpsi Cu(II) secara optimal karena ion Cu(II) berada dalam bentuk kation pada $\text{pH} < 7$ (Guo *et al.*, 2021). Pada $\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$, muatan negatif pada komposit menunjukkan bahwa muatan negatif pada komposit mendukung penjerapan logam berat Cu(II) bermuatan positif melalui daya tarik elektrostatis. Namun, menurut Powell *et al.* (2007), pada pH mendekati 7 spesies Cu^{2+} menurun tajam, sedangkan padatan Cu(OH)_2 meningkat sangat cepat. Akibatnya, penyisihan Cu(II) tidak hanya dipengaruhi oleh proses adsorpsi, tetapi dapat disertai oleh proses presipitasi sebagai Cu(OH)_2 .

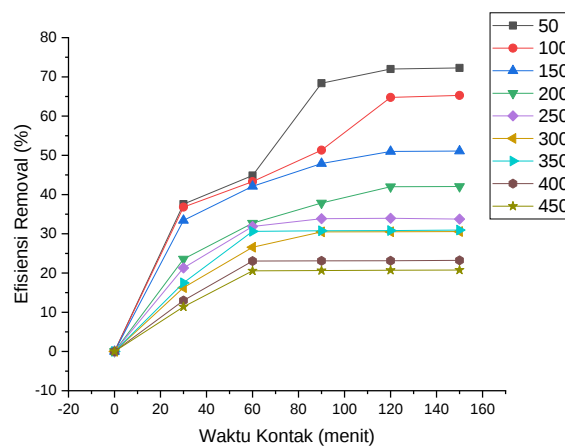
4.2 Efektivitas Proses Adsorpsi

Evaluasi efektivitas adsorpsi dilakukan untuk menganalisis kinerja adsorben dalam mereduksi ion logam berat dari larutan. Pada proses adsorpsi menggunakan komposit Z@nZVI dengan rasio 2:1 pada variasi massa 1 g/L. Komposit diinteraksikan dengan limbah artifisial Cu(II) pada konsentrasi 50; 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450 mg/L selama kurun waktu 30; 60; 90; 120; 150 menit. Pada proses adsorpsi juga dilakukan variasi pH 2; 4; 6; 7; 10; 12 dengan konsentrasi maksimum dan waktu kontak terbaik. Tahap berikutnya, proses adsorpsi dilakukan variasi massa adsorben 0,015; 0,025; 0,05; 0,075 gram dengan konsentrasi maksimum, waktu kontak terbaik dan kondisi pH terbaik. Analisis dilanjutkan pada proses reusabilitas dari komposit Z@nZVI dengan konsentrasi maksimum, waktu kontak terbaik, kondisi pH terbaik dan massa adsorben kondisi terbaik.

4.2.1 Pengaruh Konsentrasi dan Waktu Kontak terhadap Proses Adsorpsi Logam Cu(II)

Pengujian pengaruh konsentrasi larutan Cu(II) dan waktu kontak terhadap proses adsorpsi dilakukan untuk mengevaluasi kinerja adsorben dalam penjerapan ion logam berat. Konsentrasi dalam kondisi terbaik digunakan pada konsentrasi maksimum yang dapat diserap oleh komposit Z@nZVI . Sebaliknya, waktu kontak pada kondisi terbaik ditentukan pada reduksi logam berat Cu(II) terbaik pada konsentrasi maksimum. Variasi

kontak pada penelitian ini adalah 30; 60; 90; 120; 150 menit dengan variasi konsentrasi larutan Cu(II) sebesar 50; 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450 mg/L. Massa adsorben yang digunakan pada penelitian ini sebesar 1 g/L dengan volume larutan 50 mL dan pH larutan sebesar 5. Nilai efisiensi removal diperoleh berdasarkan perhitungan konsentrasi awal dan konsentrasi akhir larutan logam Cu(II), rincian perhitungan tercantum pada **Lampiran 7**. Variasi pengaruh waktu kontak dan konsentrasi larutan Cu(II) terhadap efisiensi removal disajikan pada **Gambar 4.7**

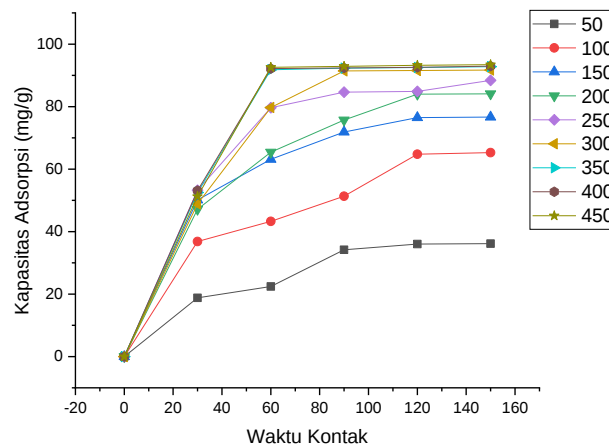


Gambar 4. 7 Pengaruh Variasi Konsentrasi dan Waktu Kontak terhadap Efisiensi Removal
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa pada rentang waktu 0 hingga 30 menit terjadi peningkatan efisiensi removal pada setiap variasi konsentrasi. Pada konsentrasi 50 dan 100 mg/L mencapai *equilibrium* pada menit ke-120 karena ketersediaan situs aktif relatif lebih besar daripada jumlah adsorbat dalam larutan, sehingga adsorbat lebih mudah berikatan dengan permukaan adsorben (Tan *et al.*, 2020). Pada konsentrasi 150 hingga 250 mg/L terjadi kondisi kesetimbangan pada menit ke-120. Sementara itu, pada konsentrasi 300 dan 350 mg/L terjadi kondisi *equilibrium* pada menit ke-90. Pada konsentrasi yang lebih tinggi, yaitu 400 dan 450 mg/L kondisi kesetimbangan terjadi pada menit ke-60. Pola ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi awal, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi terbaik cenderung lebih singkat. Hal ini selaras dengan penelitian yang dilaporkan oleh A. H. Ali *et al.* (2023) menyatakan bahwa persentase

penghilangan ion logam menurun secara signifikan dengan meningkatnya konsentrasi ion logam dikaitkan dengan gaya penggerak transfer rendah akibat perbedaan antara konsentrasi larutan dengan ketersediaan situs aktif yang lebih sedikit.

Kondisi terbaik diperoleh pada 450 mg/L dengan waktu kontak optimum selama 60 menit. Pada kondisi tersebut, efisiensi penyisihan mencapai 20,57%, kemudian mengalami sedikit kenaikan dan cenderung konstan pada menit ke-90 sebesar 20,64%. Penelitian yang dilakukan oleh Ameha *et al.* (2024), melaporkan bahwa efisiensi penyerapan hanya meningkat sedikit dan kemudian cenderung konstan mengindikasikan bahwa sistem mulai mencapai titik kesetimbangan adsorpsi. Hal ini berkaitan dengan kapasitas adsorben yang terbatas; akibatnya, adsorben hanya mampu mengikat adsorbat dalam jumlah waktu tertentu. Uraian kapasitas adsorpsi pada masing-masing variasi konsentrasi dan waktu tercantum pada **Lampiran 7**. Variasi pengaruh waktu kontak dan konsentrasi logam berat Cu(II) terhadap kapasitas adsorben disajikan pada **Gambar 4.8**



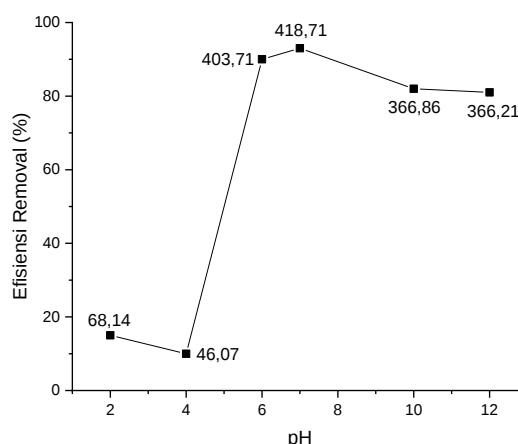
Gambar 4. 8 Pengaruh Variasi Konsentrasi dan Waktu Kontak terhadap Kapasitas Adsorpsi
 Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa pada logam berat Cu(II) dengan konsentrasi rendah, yaitu 50 dan 100 mg/L memiliki efisiensi tinggi. Sebaliknya, **Gambar 4.8** memaparkan bahwa kapasitas adsorpsi yang dihasilkan cenderung rendah secara berturut-turut sebesar 36,14 dan 65,29

mg/g akibat jumlah adsorbat awal dalam larutan terbatas. Penelitian yang dilaporkan oleh Qian *et al.* (2023) menyatakan bahwa konsentrasi yang lebih tinggi menunjukkan penyerapan ion yang lebih tinggi sehingga kapasitas adsorpsi cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi yang rendah. Pada penelitian ini, kapasitas adsorpsi tertinggi yang dicapai adalah sebesar 93,43 mg/g pada konsentrasi 450 mg/L. Namun, seiring bertambahnya waktu kontak, laju adsorpsi mengalami penurunan. Keseimbangan adsorpsi pada konsentrasi 450 mg/L terjadi pada menit ke-90. Kondisi ini berkaitan dengan akibat kejenuhan situs aktif pada permukaan adsorben, sehingga proses pengikatan adsorbat menjadi kurang optimal (Phonlakan et al., 2023). Selanjutnya, pengisian situs aktif menjadi lebih sulit karena adanya gaya tolak elektrostatis antara ion Cu(II) yang telah teradsorpsi pada permukaan adsorben dan ion Cu(II) bebas dalam larutan (Xu et al., 2017).

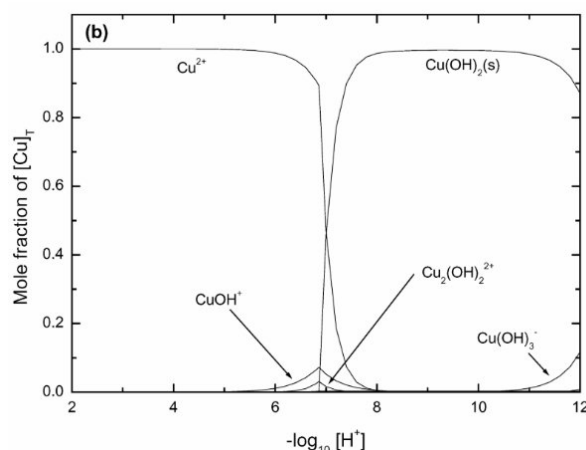
4.2.2 Pengaruh pH Larutan terhadap Proses Adsorpsi Logam Cu(II)

Pengaruh pH larutan Cu(II) terhadap proses adsorpsi dikaji karena berperan dalam menentukan muatan permukaan adsorben dan ion logam, sehingga penentuan efektivitas adsorpsi dapat diukur. Pengujian pengaruh pH larutan terhadap adsorpsi berkaitan erat dengan pH *point of zero charge*. Penelitian ini akan mengevaluasi kesesuaian kondisi adsorpsi dengan nilai pH_{pzc} adsorben sekaligus menganalisis perubahan efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi pada rentang pH 2; 4; 6; 7; 10; 12 dengan konsentrasi maksimum sebesar 450 mg/L dan waktu kontrak terbaik pada menit ke-60. Rincian perhitungan efisiensi removal dan kapasitas tercantum pada **Lampiran 7**. Berikut merupakan grafik pengaruh variasi pH terhadap efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi dipaparkan pada **Gambar 4.9**



Gambar 4. 9 Pengaruh Variasi pH terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

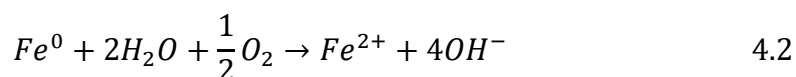
Gambar 4.9 menunjukkan pada kondisi asam, yakni pH 2 dan 4 sebesar 15% dan 12% dengan kapasitas sebesar 68,14 mg/g dan 46,07 mg/g. Kondisi ini dikaitkan dengan nilai pH larutan < p_{Hpzc} sehingga permukaan adsorben cenderung bermuatan positif. Akibatnya, interaksi antara ion Cu(II) dan permukaan adsorben menjadi kurang optimal karena gaya tolak elektrostatis (Muscarella *et al.*, 2025). Penelitian Abrrham & Šimek, (2024) yang dilaporkan menyatakan bahwa pada pH rendah, efisiensi adsorpsi Cu(II) cenderung rendah karena tingginya konsentrasi ion H⁺ yang berkompetisi dengan ion Cu(II) dalam situs aktif permukaan adsorben yang terprotonasi sehingga meningkatkan muatan kationik pada permukaan. Efisiensi removal meningkat tajam pada pH 6 dan 7, yakni sebesar 90% dan 93%, dengan kapasitas sebesar 403,71 mg/g dan 418,71 mg/g. Pada kondisi ini terbentuk padatan tersuspensi di dasar larutan. Kondisi ini disebabkan oleh jumlah H⁺ yang berkurang akibat peningkatan pH sehingga kompetisi dengan ion Cu(II) juga semakin berkurang (Elboughdiri, 2020). Namun, menurut Powell *et al.* (2007), pada pH mendekati 7, spesies Cu²⁺ menurun tajam, sedangkan padatan Cu(OH)₂ meningkat sangat cepat. Akibatnya, penyisihan Cu(II) tidak hanya dipengaruhi oleh proses adsorpsi, tetapi juga dapat disertai oleh proses presipitasi sebagai Cu(OH)₂. Berikut merupakan grafik kesetimbangan hidrolisis Cu(II) disajikan pada **Gambar 4.10**



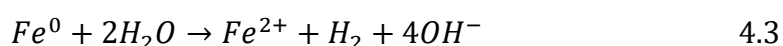
Gambar 4. 10 Kestimbangan Hidrolisis Cu(II) terhadap pH
Sumber: (Powell et al., 2007)

Penelitian yang dilakukan oleh Gharbani (2024) melaporkan bahwa komposit Z@nZVI tidak hanya memiliki mekanisme adsorpsi, tetapi juga melalui reaksi redoks antara Fe^0 dan Cu^{2+} serta presipitasi. Ion Cu^{2+} memiliki potensial reduksi lebih tinggi daripada Fe^0 , sehingga Cu^{2+} lebih mudah direduksi menjadi Cu^0 , sementara Fe^0 sudah teroksidasi menjadi Fe^{2+} . Berikut merupakan reaksi yang terjadi disajikan pada Persamaan 4.2 dan 4.3

Pada kondisi basa



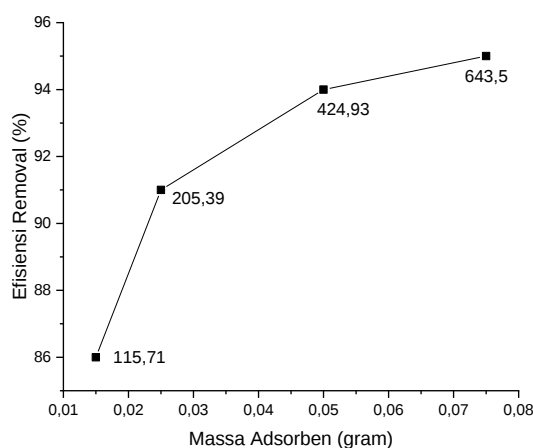
Pada kondisi asam



Pada kondisi basa yakni pH 10 dan 12, terjadi penurunan efisiensi removal sebesar 82% dan 81%. Kondisi ini dikaitkan dengan nilai pH larutan < pH_{pzc} sehingga permukaan adsorben cenderung bermuatan negatif. Apabila dibandingkan dengan **Gambar 4.10** pada pH 10, kondisi spesies larutan menjadi padatan $Cu(OH)_2$. Sementara pada pH 12 dengan kapasitas sebesar 366,86 mg/g dan 366,21 mg/g, kondisi spesies larutan berubah menjadi $Cu(OH)_3^-$. Kondisi ini kurang mendukung proses adsorpsi Cu(II) secara optimal karena ion Cu(II) berada dalam bentuk anion. Efisiensi removal yang masih cukup tinggi diduga dipengaruhi oleh proses presipitasi sesuai pada **Gambar 4.10**

4.2.3 Pengaruh Massa Adsorben terhadap Proses Adsorpsi Logam Cu(II)

Pada proses adsorpsi, massa adsorpsi dikaji untuk menganalisis permukaan aktif yang tersedia dalam penyisihan logam berat Cu(II). Penelitian ini menganalisis variasi massa adsorben 0,015; 0,025; 0,05; dan 0,075 gram pada kondisi pH 7, konsentrasi 450 mg/L dan waktu kontak selama 60 menit. Rincian perhitungan pengaruh massa adsorben terhadap efisiensi dan kapasitas adsorpsi disajikan pada **Lampiran 7**. Berikut merupakan analisis pengaruh massa adsorben terhadap efisiensi dan kapasitas adsorpsi dipaparkan pada **Gambar 4.11**



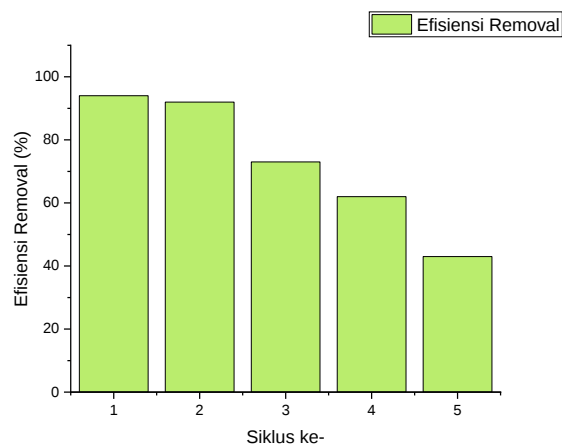
Gambar 4. 11 Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Removal dan Kapasitas Adsorpsi
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa peningkatan massa adsorben menyebabkan peningkatan efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi. Kondisi ini disebabkan oleh bertambahnya luas permukaan dan jumlah situs aktif yang tersedia, sehingga peluang antara adsorbat dan permukaan adsorben menjadi lebih besar untuk saling berikatan (Hady et al., 2023). Pada massa 0,015gram terjadi penyisihan paling rendah, yakni sebesar 86% dengan kapasitas 115,71 mg/g. Hal ini disebabkan oleh ketersediaan situs aktif pada permukaan adsorben yang terbatas. Akibatnya, logam berat tidak tereduksi dengan baik. Pada massa 0,075 gram terjadi penyisihan paling tinggi, yakni sebesar 95% dengan kapasitas 643,5 mg/g. Hal ini selaras dengan penelitian yang dilaporkan oleh Nguyen *et al.*, (2024) menyatakan

peningkatan efisiensi penghilangan seiring peningkatan massa adsorben disebabkan oleh peningkatan jumlah situs adsorpsi aktif dan situs kosong pada permukaan adsorben.

4.2.4 Reusabilitas Adsorben dalam Proses Adsorpsi Logam Berat Cu(II)

Pengujian reusabilitas adsorpsi digunakan untuk mengevaluasi kemampuan adsorben dalam mempertahankan kinerja penyisihan dalam beberapa siklus adsorpsi. Parameter ini penting untuk menganalisis stabilitas, efektivitas penghilangan tinggi, dan potensi adsorben dalam penggunaan berulang untuk mendukung *sustainability* (Andrunik & Smol, 2025; Moustafa, 2023). Pengujian ini dilakukan dalam 5 kali siklus dengan waktu kontak baik dalam adsorpsi maupun desorpsi selama 1 jam serta konsentrasi sebesar 450 mg/L dalam kondisi pH 7 dan massa adsorben sebesar 0,075 gram. Rincian perhitungan pengaruh reusabilitas adsorben terhadap efisiensi dan kapasitas adsorpsi disajikan pada **Lampiran 7**. Berikut merupakan analisis pengaruh massa adsorben terhadap efisiensi dan kapasitas adsorpsi dipaparkan pada **Gambar 4.12**



Gambar 4. 12 Pengaruh Reusabilitas Adsorben terhadap Efisiensi Removal
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Kemampuan komposit Z@nZVI dalam reusabilitas tergolong baik, karena mampu mempertahankan efisiensi penyisihan yang cukup tinggi setelah beberapa siklus penggunaan. **Gambar 4.12** menunjukkan bahwa efisiensi pada siklus pertama dan kedua menunjukkan performa yang tinggi

dan stabil, yakni 94% dan 92%. Hal ini berkaitan dengan tersedianya situs aktif pada permukaan adsorben dalam mengikat kontaminan (E. Salama et al., 2022). Pada siklus ke-3 hingga ke-5, terjadi penurunan efisiensi secara signifikan dan laju penghilangan logam berat Cu(II) hanya mencapai 43%. Penelitian yang dilakukan oleh Xiang *et al.*, (2022) menyatakan bahwa ion H^+ menempati situs pengikatan permukaan selama desorpsi asam. Meskipun telah dilakukan pencucian berulang untuk mencapai kondisi netral selama proses desorpsi, hal ini menyebabkan perubahan yang bersifat ireversibel pada permukaan adsorben. Selain itu, proses desorpsi asam tidak berlangsung secara sempurna. Akibatnya, molekul logam berat masih menempati situs adsorpsi sehingga jumlah situs adsorpsi yang tersedia juga berkurang. Temuan ini konsisten dengan penelitian Ghorbani *et al.*, (2021) yang menunjukkan bahwa penurunan efisiensi adsorpsi setelah beberapa kali penggunaan ulang diduga terjadi karena ion adsorbat tidak luruh bersamaan dengan proses desorpsi, sehingga sebagian ion masih menempel pada permukaan adsorben dan menutupi situs aktif.

4.3 Analisis Isoterm Adsorpsi dan Kinetika Adsorpsi

Analisis isoterm dan kinetika adsorpsi dilakukan untuk menganalisis proses penjerapan antara adsorpsi dan adsorben. Analisis isoterm berperan dalam mengevaluasi kapasitas adsorpsi pada kondisi setimbang. Sementara itu, analisis kinetika adsorpsi menganalisis laju penjerapan adsorpsi selama waktu kontak berlangsung.

4.3.1 Kinetika Adsorpsi

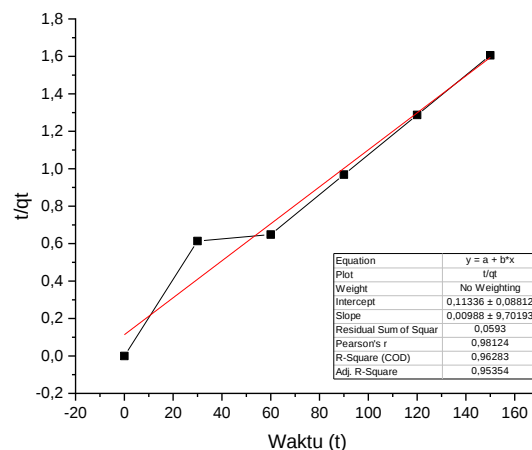
Analisis isoterm pada penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kemampuan komposit $Z@nZVI$ dalam menyerap adsorbat seiring bertambahnya waktu kontak hingga sistem mencapai kesetimbangan. Dalam studi kinetika adsorpsi, dua reaksi yang digunakan untuk memodelkan data eksperimen adalah reaksi orde satu semu (*pseudo-first order*) dan orde dua semu (*pseudo-second order*) (Tran, 2023). Variasi waktu yang digunakan untuk kinetika adsorpsi adalah 30, 60, 90, 120, dan 150 menit dengan konsentrasi larutan logam berat Cu(II) 450 mg/L. Rincian perhitungan kinetika adsorpsi disajikan pada **Lampiran 8**. Berikut

merupakan perbandingan nilai R^2 antara orde satu semu dan dua semu dijabarkan pada **Tabel 4.8**

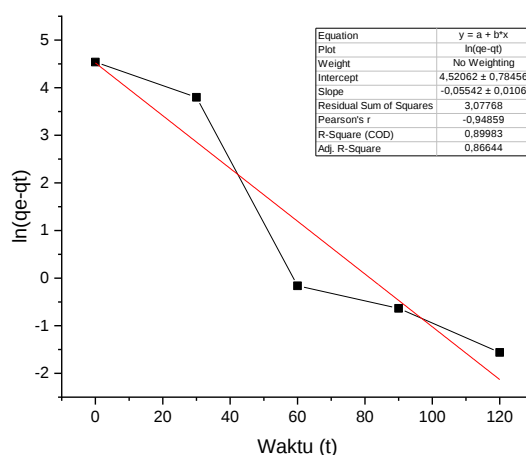
Tabel 4. 8 Identifikasi Kinetika Adsorpsi Model Orde Satu Semu dan Orde Dua Semu

Jenis Orde	Konstanta Kinetika	q_e Teoritis	R^2	Persamaan Linear	
				Intercept	Slope
Orde satu semu	0,0549	89,3	0,9005	4,4921	-0,0549
Orde dua semu	0,000318	112,35	0,9551	0,2381	0,0087

Berdasarkan hasil analisis yang disajikan pada **Tabel 4.8**, model kinetika orde satu semu menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9005. Sementara itu, model kinetika orde dua semu menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9648. Nilai R^2 orde dua semu mendekati satu dibandingkan dengan orde satu semu, maka model orde dua semu dinilai sesuai untuk menggambarkan kinetika adsorpsi Cu(II) oleh komposit Z@nZVI. Model orde dua semu mengasumsikan bahwa laju adsorpsi dipengaruhi oleh jumlah situs aktif yang tersedia pada permukaan adsorben. Kesesuaian data dengan model tersebut mengindikasikan bahwa proses adsorpsi dikaitkan dengan interaksi adsorbat dan situs aktif adsorben (Vareda, 2023). Kapasitas teoritis yang diperoleh dari model kinetika orde satu semu sebesar 89,30 mg/g. Sebaliknya, model kinetika orde dua semu didapatkan nilai sebesar 112,35 mg/g.



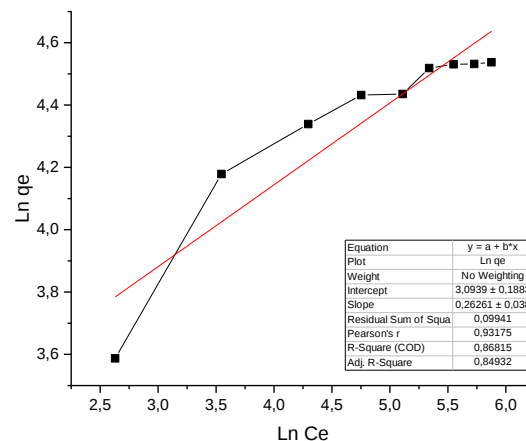
Gambar 4. 13 Kinetika Adsorpsi Model Orde Dua Semu
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026



Gambar 4. 14 Kinetika Adsorpsi Model Orde Satu Semu
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

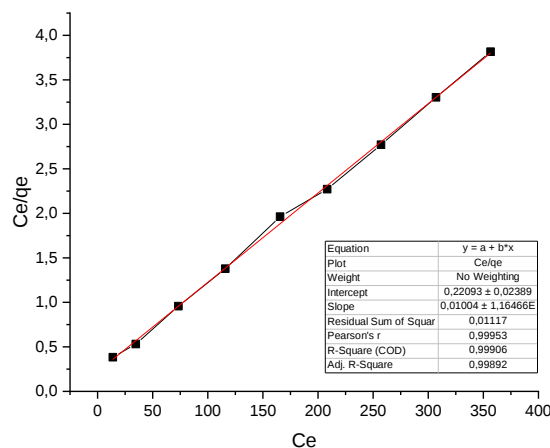
4.3.2 Isoterm Adsorpsi

Analisis isoterm pada penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kapasitas komposit Z@nZVI dalam mengikat adsorbat pada permukaan dalam kondisi yang berbeda yakni konsentrasi awal logam berat (Biswal & Balasubramanian, 2023). Model adsorpsi yang digunakan yakni isoterm Langmuir dan Freundlich. Persamaan model isoterm Langmuir diasumsikan bahwa reaksi adsorpsi terjadi pada lapisan Tunggal (Shi et al., 2023). Disisi lain, model isoterm Freundlich menggambarkan adsorpsi multilayer pada permukaan heterogen (Danat et al., 2026). Variasi konsentrasi yang digunakan adalah 50; 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; dan 450 mg/L dengan waktu kontak selama 60 menit. Rincian perhitungan isotherm adsorpsi disajikan pada **Lampiran 8**. Berikut merupakan hubungan linear antara $\ln q_e$ dan $\ln C_e$ disajikan pada **Gambar 4.15**



Gambar 4. 15 Isoterm Adsorpsi Model Freundlich
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Berdasarkan model isotherm Freundlich didapatkan persamaan regresi $y = 0,2626x + 3,0939$ dengan nilai R^2 sebesar 0,87. Intensitas adsorpsi didapatkan nilai sebesar 3,81 dengan nilai KF sebesar 22,06. Nilai slope ($1/n$) yang diperoleh dari model Freundlich sebesar 0,2626. Indikasi ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi berjalan secara *favorable*. Selain itu, nilai $1/n$ yang relative mendekati nol mengindikasikan bahwa permukaan adsorben bersifat heterogen (Elshafei *et al.*, 2025). Kondisi ini berkaitan dengan situs aktif adsorben memiliki energi yang berbeda sehingga proses penjerapan adsorbat tidak terbatas pada pembentukan lapisan tunggal (Yuan *et al.*, 2019). Seiring dengan meningkatnya tingkat pengisian situs adsorpsi, energi ikatan yang tersedia juga semakin menurun. Isoterm Freundlich berdasarkan asumsi distribusi situs aktif secara eksponensial terhadap energi adsorpsi (Danat *et al.*, 2026). Selain menggunakan model Freundlich, data kesetimbangan adsorpsi juga dianalisis menggunakan model Langmuir. Berikut merupakan hubungan linear antara C_e/q_e sebagai y dan C_e sebagai x disajikan pada **Gambar 4.16**



Gambar 4. 16 Isoterm Adsorpsi Model Langmuir
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Berdasarkan model isotherm Langmuir didapatkan persamaan regresi $y = 0,01x + 0,2209$ dengan nilai R^2 sebesar 0,9991. Nilai R^2 mendekati 1 menunjukkan bahwa model Langmuir memiliki tingkat linearitas yang baik. Berdasarkan nilai slope dan intercept yang diperoleh, nilai Q_{max} dan K_F didapatkan sebesar 100 mg/g dan 0,04527 L/mg. Nilai K_L merepresentasikan afinitas atau interaksi antara adsorben dan adsorbat. Semakin besar nilai K_L , maka semakin kuat afinitas proses adsorpsi sehingga dapat berlangsung lebih efektif (Kalaba et al., 2022).

4.4 Analisis Mekanisme Penghilangan Cu(II)

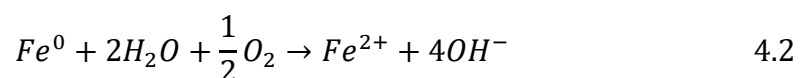
Dalam proses penyisihan logam berat Cu(II) dengan komposit Z@nVI melibatkan serangkaian proses yang terjadi antara lain adsorpsi, reduksi-oksidasi, dan presipitasi. Mekanisme adsorpsi dilakukan untuk mengidentifikasi jenis interaksi antara logam berat dan komposit Z@nZVI. Klasifikasi adsorpsi pada suatu substrat akan dibedakan melalui interaksi antara substrat dan adsorbat, yakni fisorpsi dan kemisorpsi (Sims *et al.*, 2019). Hasil ini juga divalidasi melalui analisis BET (**Tabel 4.6**). Berdasarkan analisis kinetika dan isotherm adsorpsi, mekanisme adsorpsi pada penelitian ini merupakan penggabungan mekanisme kemisorpsi dan fisorpsi. Pada analisis isotherm, model Langmuir memberikan nilai koefisien determinasi tertinggi ($R^2 = 0,9991$) dibandingkan dengan model Freundlich ($R^2 = 0,87$). Hal ini menunjukkan bahwa penelitian ini lebih sesuai dengan model Langmuir yang

mengasumsikan adsorpsi relatif homogen dan membentuk lapisan tunggal. Sementara itu, kinetika adsorpsi model orde dua semu memberikan nilai ($R^2 = 0,9648$) dibandingkan dengan model orde satu semu ($R^2 = 0,9005$). Hasil ini menunjukkan bahwa laju adsorpsi sesuai dengan model orde dua semu yang merepresentasikan bahwa interaksi antara adsorben dan adsorbat berperan penting dalam proses adsorpsi.

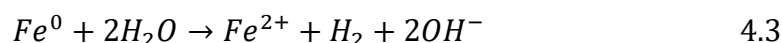
Kondisi ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ghorbani et al. (2021), bahwa komposit zeolit klinoptilolit dan nZVI merujuk pada mekanisme kemisorpsi dan fisorpsi. Analisis ini dilakukan dengan mempertimbangkan model isotherm Langmuir dan Freundlich. Model Langmuir memiliki nilai yang lebih tinggi daripada model Freundlich, sehingga diasumsikan memiliki monolayer. Sementara itu, analisis kinetika model orde dua semu menunjukkan kecocokan yang lebih baik daripada model orde satu semu. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme adsorpsi juga melibatkan mekanisme kemisorpsi. Temuan ini konsisten dengan berbagai studi sebelumnya oleh Arancibia-Miranda *et al.* (2016), menyatakan bahwa komposit Z-nZVI memiliki mekanisme penyisihannya melalui proses kemisorpsi dan fisorpsi dengan nilai konstanta defisiensi sebesar 0,95. Pada analisis isotherm, komposit Z-nZVI sesuai dengan model Langmuir. Sebaliknya, terlihat adanya *multi-linearity* pada analisis difusi di dalam partikel.

Bersamaan dengan proses penjerapan tersebut, keberadaan material seperti nZVI berperan melibatkan proses reduksi-oksidasi. Penelitian yang dilakukan oleh Gharbani (2024) melaporkan bahwa komposit Z@nZVI tidak hanya memiliki mekanisme adsorpsi, tetapi juga melalui reaksi redoks antara Fe^0 dan Cu^{2+} serta presipitasi. Ion Cu^{2+} memiliki potensial reduksi lebih tinggi daripada Fe^0 , sehingga Cu^{2+} lebih mudah direduksi menjadi Cu^0 , sementara Fe^0 sudah teroksidasi menjadi Fe^{2+} . Berikut merupakan reaksi yang terjadi disajikan pada Persamaan 4.2 dan 4.3

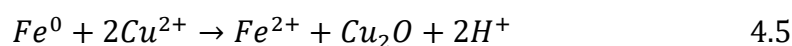
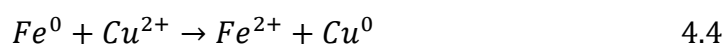
Pada kondisi basa



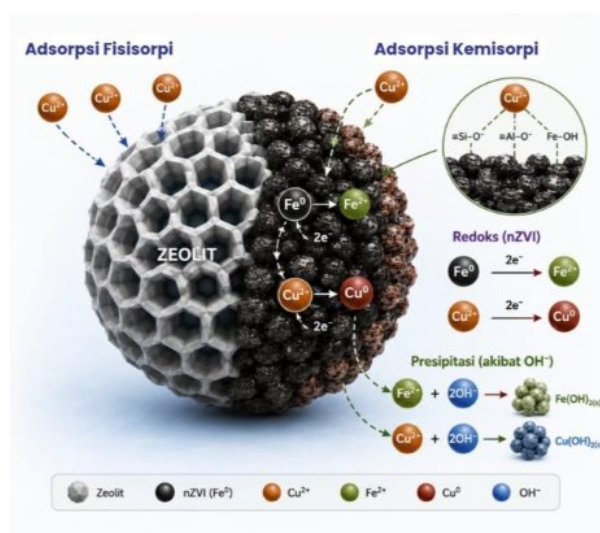
Pada kondisi asam



Penelitian yang dilakukan oleh Anang et al., (2023) melaporkan bahwa mekanisme penyisihan ion logam berat oleh nZVI bergantung pada nilai potensial redoks dari kedua spesies yang terlibat dalam reaksi yakni Fe(0) dan Cu(II). Dalam proses ini, Fe⁰ berperan sebagai agen pereduksi, sedangkan Cu²⁺ bertindak sebagai agen pengoksidasi. Kemampuan reduksi Fe⁰ memiliki nilai yang lebih tinggi (-0,34 V) sehingga memfasilitasi reduksi spesies ion Cu²⁺ menjadi Cu⁰ (Persamaan 4.4) dan Cu₂O (Persamaan 4.5). Hasil ini juga divalidasi melalui analisis XRD (**Gambar 4.3** dan **Tabel 4.4**).



Selain itu, proses presipitasi turut mendukung proses penghilangan logam berat Cu(II). Proses presipitasi terjadi akibat spesies ion OH⁻ berikatan dengan ion Cu(II) sehingga membentuk endapan padat Cu(OH)₂. Proses presipitasi ini berlangsung paling optimal Ketika pH larutan berada pada diatas nilai diatas pH_{pzc} dimana spesies OH⁻ di dalam larutan menjadi jauh lebih melimpah sehingga pembentukan endapan. Hasil ini juga divalidasi melalui analisis XRD (**Gambar 4.3** dan **Tabel 4.4**). Ilustrasi mekanisme penghilangan logam berat Cu(II) disajikan sebagai berikut,



Gambar 4. 17 Mekanisme Penghilangan Logam Berat Cu(II)
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

4.5 Komparasi Performa Adsorpsi terhadap Logam Berat

Kinerja suatu adsorben perlu dievaluasi secara komprehensif melalui perbandingan dengan hasil penelitian lain yang relevan. Oleh karena itu, performa komposit Z@nZVI pada penelitian ini dibandingkan dengan berbagai adsorben yang telah dilaporkan dalam literatur untuk penyisihan Cu(II). Berikut komparasi data performa adsorpsi terhadap logam berat disajikan pada **Tabel 4.9**

Tabel 4. 9 Komparasi Performa Adsorpsi dengan Penelitian Terdahulu

Adsorben	Polutan	C ₀ (mg/L)	t (min)	pH	Dosis (g/L)	Q _e (mg/g)	Efisiensi Removal	Sumber
<i>Fly ash</i>	Cu(II)	1000	480	5,5	50	44,90	90%	(Ulatowska et al., 2020)
Zeolit natural	Cu(II)	400	480	5	50	2,1	92%	(Elboughdiri, 2020)
<i>Greek fly ash</i>	Cu(II)	200	60	5,5	1,5	310	80%	(Vavouraki et al., 2020)
Fly ash	Cd(II)	120	30	5	8	28,09	-	(Buema et al., 2020)
Zeolit Natural @nZVI	As(V)	100	175	4	4	21,56	84,23%	(Yang et al., 2022)
Zeolit Klinoplite @nZVI	Cu(II)	60	30	8	2	61,72	94,75%	(Gharbani, 2024)
Z@nZVI	Cu(II)	450	60	7	0,75	643,5	95%	<i>This work</i>

Tabel 4.9 menunjukkan bahwa Z@nZVI memiliki performa adsorpsi Cu(II) yang jauh lebih unggul dibandingkan dengan adsorben berbasis zeolit dan *fly ash* pada penelitian terdahulu. Pada kondisi konsentrasi 450 mg/L, waktu kontak 60 menit, pH 7, dan dosis adsorben 0,75 g/L, Z@nZVI mencapai kapasitas adsorpsi sebesar 643,5 mg/g dengan efisiensi removal 95%. Nilai ini sekitar 306 kali lebih tinggi dibandingkan zeolit natural yang hanya mencapai kapasitas adsorpsi 2,1 mg/g (Elboughdiri, 2020) dan sekitar 14

kali lebih tinggi dibandingkan *fly ash* dengan kapasitas adsorpsi 44,90 mg/g (Ulatowska et al., 2020), meskipun kedua adsorben tersebut menggunakan dosis jauh lebih besar (50 g/L) dibandingkan Z@nZVI. Dibandingkan dengan *Greek fly ash* yang mencapai kapasitas adsorpsi 310 mg/g pada dosis 1,5 g/L (Vavouraki et al., 2020), kapasitas adsorpsi Z@nZVI masih lebih tinggi sekitar 2 kali lipat meskipun dosis yang digunakan sekitar dua kali lebih rendah.

Perbandingan dengan adsorben hasil modifikasi nZVI juga menegaskan superioritas Z@nZVI pada penelitian ini. Zeolit Natural@nZVI untuk adsorpsi As(V) hanya menghasilkan kapasitas adsorpsi 21,56 mg/g (Yang et al., 2022) sehingga kapasitas adsorpsi Z@nZVI hampir 30 kali lebih tinggi, sedangkan Zeolit Klinoptilolit@nZVI untuk Cu(II) mencapai kapasitas adsorpsi 61,72 mg/g pada dosis 2 g/L (Gharbani, 2024), menjadikan kapasitas adsorpsi Z@nZVI sekitar 10 kali lebih tinggi meskipun dosis yang digunakan hanya sepertiga dari dosis tersebut. Tingginya kapasitas adsorpsi Z@nZVI diduga berasal dari sinergi antara struktur berpori zeolit sebagai penyangga dan nanopartikel *zero-valent iron* yang memperluas situs aktif adsorpsi, sehingga mekanisme adsorpsi dan reduksi Cu(II) berlangsung jauh lebih efektif meskipun dosis adsorben yang digunakan jauh lebih rendah dibandingkan dengan seluruh adsorben pembanding.

4.6 Uji Statistika

Berdasarkan data hasil penelitian yang telah diperoleh, dilakukan analisis statistik untuk menganalisis pengaruh variabel bebas dalam reduksi logam berat Cu(II). *Software* yang digunakan untuk analisis statistik adalah SPSS dengan analisis normalitas baik dengan metode Kolmogorov-Smirnov maupun Shapiro-Wilk serta homogenitas. Berikutnya, analisis pengaruh variabel bebas dilakukan dengan metode *One-way ANOVA* dan *Two-way ANOVA*.

4.6.1 Pengaruh Waktu Kontak dan Konsentrasi Larutan

Analisis statistik mengenai pengaruh waktu kontak dan konsentrasi larutan Cu(II) dilakukan dengan metode *Two-way ANOVA* dan dilakukan

uji normalitas dengan metode Kolmogorov-Smirnov dan homogenitas untuk menganalisis distribusi data. merata. Hasil uji normalitas yang menunjukkan pengaruh waktu kontak dan konsentrasi larutan terhadap penyisihan logam Cu(II) dapat dilihat pada **Tabel 4.10**

Tabel 4. 10 Analisis Uji Normalitas terhadap Variasi Waktu Kontak dan Konsentrasi

Variabel Bebas		Kolmogorov-Smirnov Test		
		Nilai Sig. (<i>p-value</i>)	$\alpha =$ 0,05	Keputusan
Waktu Kontak	0	0,126	Sig. < α	Data terdistribusi normal
	30	0,177	Sig. < α	Data terdistribusi normal
	60	0,201	Sig. < α	Data terdistribusi normal
	90	0,152	Sig. < α	Data terdistribusi normal
	120	0,177	Sig. < α	Data terdistribusi normal
	150	0,174	Sig. < α	Data terdistribusi normal
Konsentrasi Larutan	50	0,003	Sig. < α	Data tidak terdistribusi normal
	100	0,043	Sig. < α	Data tidak terdistribusi normal
	150	0,003	Sig. < α	Data tidak terdistribusi normal
	200	0,010	Sig. < α	Data tidak terdistribusi normal
	250	<0,001	Sig. < α	Data tidak terdistribusi normal
	300	<0,001	Sig. < α	Data tidak terdistribusi normal
	350	<0,001	Sig. < α	Data tidak terdistribusi normal
	400	<0,001	Sig. < α	Data tidak terdistribusi normal
	450	<0,001	Sig. < α	Data tidak terdistribusi normal

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Tabel 4.10 menunjukkan bahwa variabel bebas berupa pengaruh waktu kontak terdistribusi secara normal sedangkan konsentrasi larutan tidak terdistribusi secara normal. Kondisi ini berkaitan dengan nilai *lep-value* pada waktu kontak memiliki nilai lebih besar dari 0,05. Sebaliknya, pada konsentrasi larutan memiliki nilai *p-value* lebih kecil dari 0,05 sehingga belum memenuhi asumsi normalitas. Berikutnya, uji ANOVA *Two-way* tidak dapat dilakukan dikarenakan salah satu data tidak memenuhi asumsi uji parametrik sehingga analisis dilanjutkan dengan uji non parametrik Kruskal-Wallis. Uji Kruskal-Wallis dilakukan secara bertahap untuk menganalisis pengaruh masing-masing faktor terlebih dahulu

sebelum melihat pengaruh seluruh kombinasi perlakuan. Hasil uji non parametrik Kruskal-Wallis disajikan pada **Tabel 4.11**

Tabel 4. 11 Analisis Uji Kruskal-Wallis terhadap Variasi Waktu Kontak dan Konsentrasi

Variabel bebas	Kruskal-Wallis		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
Konsentrasi Larutan	<0,001	Sig. < α	H ₁ diterima dan H ₀ ditolak
Waktu Kontak	<0,001	Sig. < α	H ₁ diterima dan H ₀ ditolak
Interaksi antara Konsentrasi Larutan dan Waktu Kontak	<0,001	Sig. < α	H ₁ diterima dan H ₀ ditolak

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Berdasarkan **Tabel 4.11**, diperoleh nilai signifikansi sebesar < 0,001 sehingga hipotesis alternatif (H₁) dapat diterima. Kondisi ini disebabkan oleh nilai signifikansi yang lebih kecil dari 0,05 yang menandakan bahwa terdapat pengaruh signifikan dari variasi konsentrasi dan waktu kontak terhadap penyisihan logam Cu(II). Data ini mengindikasikan bahwa variasi pengaruh variasi konsentrasi dan waktu kontak larutan memiliki pengaruh terhadap efisiensi penyisihan logam Cu(II) yang ditunjukkan nilai Sig. < α .

4.6.2 Pengaruh pH Larutan

Pengaruh pH larutan dianalisis secara statistik dengan metode *One-Way ANOVA* dan dilakukan uji normalitas dengan metode Shapiro-Wilk dan homogenitas untuk memastikan data telah terdistribusi merata. Hasil uji normalitas yang menunjukkan pengaruh pH larutan terhadap penyisihan logam Cu(II) dapat dilihat pada **Tabel 4.12**

Tabel 4. 12 Analisis Uji Normalitas terhadap Pengaruh pH

pH	Shapiro-Wilk Test		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
2	1,000	Sig. > α	Data terdistribusi normal
4	0,194	Sig. > α	Data terdistribusi normal
6	0,826	Sig. > α	Data terdistribusi normal
7	0,075	Sig. > α	Data terdistribusi normal
10	0,567	Sig. > α	Data terdistribusi normal

pH	Shapiro-Wilk Test		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
12	0,637	Sig. > α	Data terdistribusi normal

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Tabel 4.12 menunjukkan bahwa variabel bebas berupa pengaruh pH terhadap penyisihan logam Cu(II) terdistribusi secara normal. Kondisi ini dibuktikan dengan nilai *p-value* lebih besar dari 0,05 sehingga memenuhi asumsi normalitas. Berikutnya, uji homogenitas dapat dilakukan untuk menganalisis keseragaman varians antarkelompok data. Hasil uji homogenitas disajikan pada **Tabel 4.13**

Tabel 4. 13 Analisis Uji Homogenitas terhadap Pengaruh pH

Variabel bebas	Levene Test		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
pH	0,02	Sig. < α	Data tidak terdistribusi secara homogen

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Tabel 4.13 menyatakan bahwa data variabel bebas berupa pengaruh pH terhadap penyisihan logam Cu(II) tidak terdistribusi secara homogen karena memiliki nilai *p-value* lebih kecil dari 0,05, sehingga belum memenuhi asumsi homogenitas. Pengambilan keputusan homogenitas didasarkan pada nilai rata-rata kelompok data (*Based on mean*). Berdasarkan analisis uji Levene yang menunjukkan varians tidak homogen, maka pengujian hipotesis tidak dapat dilanjutkan menggunakan ANOVA standar (*One-Way ANOVA*), melainkan menggunakan Welch's ANOVA. Berikut merupakan hasil analisis welch disajikan pada **Tabel 4.14**

Tabel 4. 14 Analisis Uji Welch terhadap Pengaruh pH

Variabel Bebas	Welch's Test		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
pH	<0,001	Sig. < α	H ₁ diterima dan H ₀ ditolak

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Berdasarkan **Tabel 4.14**, diperoleh nilai signifikansi sebesar < 0,001 sehingga hipotesis alternatif (H₁) dapat diterima. Kondisi ini disebabkan

oleh nilai signifikansi yang lebih kecil dari 0,05 yang menandakan bahwa terdapat pengaruh signifikan dari variasi pH larutan terhadap penyisihan logam Cu(II). Data ini mengindikasikan bahwa variasi pengaruh pH memiliki pengaruh terhadap efisiensi penyisihan logam Cu(II) yang ditunjukkan oleh nilai $\text{Sig.} < \alpha$.

4.6.3 Pengaruh Massa Adsorben

Pengaruh massa adsorben turut dianalisis secara statistik untuk menganalisis data yang terdistribusi normal dan merata dengan uji normalitas metode Shapiro-Wilk dan homogenitas. Selanjutnya, dilakukan analisis ANOVA menggunakan metode *one-way*. Hasil uji normalitas yang menunjukkan pengaruh massa larutan terhadap penyisihan logam Cu(II) dapat dilihat pada **Tabel 4.15**

Tabel 4. 15 Analisis Uji Normalitas terhadap Pengaruh Massa Adsorben

Massa Adsorben	Shapiro-Wilk Test		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
0,015	0,637	Sig. $> \alpha$	Data terdistribusi normal
0,025	0,363	Sig. $> \alpha$	Data terdistribusi normal
0,050	1,000	Sig. $> \alpha$	Data terdistribusi normal
0,075	0,567	Sig. $> \alpha$	Data terdistribusi normal

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Tabel 4.15 menyatakan bahwa variabel bebas berupa pengaruh massa adsorben terhadap penyisihan logam Cu(II) terdistribusi secara normal. Kondisi ini dibuktikan dengan nilai *p-value* lebih besar dari 0,05 sehingga memenuhi asumsi normalitas. Berikutnya, uji homogenitas dapat dilakukan untuk menganalisis keseragaman varians antarkelompok data. Hasil uji homogenitas disajikan pada **Tabel 4.16**

Tabel 4. 16 Analisis Uji Homogenitas terhadap Pengaruh Massa Adsorben

Variabel bebas	Levene Test		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
Massa Adsorben	0,312	Sig. $> \alpha$	Data terdistribusi secara homogen

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Tabel 4.16 menyatakan bahwa data variabel bebas berupa pengaruh massa adsorben terhadap penyisihan logam Cu(II) terdistribusi secara homogen dikarenakan memiliki nilai p-value lebih besar dari 0,05 sehingga sudah memenuhi asumsi homogenitas. Pengambilan keputusan didasarkan pada nilai rata-rata kelompok data (*Based on mean*). Berikutnya, analisis statistik dapat dilanjutkan menggunakan metode anova *one-way*. Hasil analisis statistik metode one-way disajikan pada **Tabel 4.17**

Tabel 4. 17 Pengaruh Uji *One-Way* ANOVA terhadap Pengaruh Massa Adsorben

Variabel Bebas	ANOVA One-Way		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
Massa Adsorben	<0,001	Sig. < α	H ₁ diterima dan H ₀ ditolak

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Berdasarkan **Tabel 4.17**, diperoleh nilai signifikansi sebesar $< 0,001$ sehingga hipotesis alternatif (H₁) dapat diterima. Kondisi ini disebabkan oleh nilai signifikansi yang lebih kecil dari 0,05 yang menandakan bahwa terdapat pengaruh signifikan dari variasi pH larutan terhadap penyisihan logam Cu(II). Data ini mengindikasikan bahwa variasi pengaruh massa adsorben memiliki pengaruh terhadap efisiensi penyisihan logam Cu(II) yang ditunjukkan oleh nilai Sig. < α .

4.6.4 Pengaruh Reusabilitas Adsorben

Analisis statistik pada pengaruh reusabilitas adsorben dilakukan dengan metode *One-way* dan dilakukan uji normalitas metode Shapiro-Wilk serta homogenitas. Hasil uji normalitas yang menunjukkan pengaruh massa larutan terhadap penyisihan logam Cu(II) dapat dilihat pada **Tabel 4.18**

Tabel 4. 18 Analisis Uji Normalitas terhadap Pengaruh Reusabilitas Adsorben

Siklus Reuse	Shapiro-Wilk Test		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
1	0,637	Sig. > α	Data terdistribusi normal
2	0,463	Sig. > α	Data terdistribusi normal
3	0,157	Sig. > α	Data terdistribusi normal
4	0,235	Sig. > α	Data terdistribusi normal

Siklus <i>Reuse</i>	Shapiro-Wilk Test		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
5	0,871	Sig. > α	Data terdistribusi normal

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Tabel 4.18 menunjukkan bahwa variabel bebas berupa pengaruh reusabilitas adsorben terhadap penyisihan logam Cu(II) terdistribusi secara normal. Kondisi ini dibuktikan dengan nilai *p-value* lebih besar dari 0,05 sehingga memenuhi asumsi normalitas. Berikutnya, uji homogenitas dapat dilakukan untuk menganalisis keseragaman varians antarkelompok data. Hasil uji homogenitas disajikan pada **Tabel 4.19**

Tabel 4. 19 Analisis Uji Homogenitas terhadap Pengaruh Reusabilitas Adsorben

Variabel bebas	Levene Test		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
Siklus <i>Reuse</i>	0,054	Sig. > α	Data terdistribusi secara homogen

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Tabel 4.19 menyatakan bahwa data variabel bebas berupa pengaruh reusabilitas adsorben terhadap penyisihan logam Cu(II) terdistribusi secara homogen dikarenakan memiliki nilai *p-value* lebih besar dari 0,05 sehingga sudah memenuhi asumsi homogenitas. Pengambilan keputusan didasarkan pada nilai rata-rata kelompok data (*Based on mean*). Berikutnya, analisis statistik dapat dilanjutkan menggunakan metode ANOVA *one-way*. Hasil analisis statistic metode *one-way* disajikan pada **Tabel 4.20**

Tabel 4. 20 Analisis Uji *One-Way* ANOVA terhadap Pengaruh Reusabilitas Adsorben

Variabel Bebas	ANOVA One-Way		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
Siklus <i>Reuse</i>	<0,001	Sig. < α	H ₁ diterima dan H ₀ ditolak

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026

Berdasarkan **Tabel 4.20**, diperoleh nilai signifikansi sebesar < 0,001 sehingga hipotesis alternatif (H₁) dapat diterima. Kondisi ini disebabkan oleh nilai signifikansi yang lebih kecil dari 0,05 yang menandakan bahwa

terdapat pengaruh signifikan dari variasi pH larutan terhadap penyisihan logam Cu(II). Data ini mengindikasikan bahwa variasi pengaruh reusabilitas adsorben memiliki pengaruh terhadap efisiensi penyisihan logam Cu(II) yang ditunjukkan oleh nilai Sig. $< \alpha$.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan penelitian dan hasil analisis data yang telah dilakukan, maka dapat ditarik Kesimpulan sebagai berikut:

1. Analisis XRF menunjukkan kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 masing-masing sebesar 48,93% dan 23,34% dengan rasio Si/Al yang diperoleh sebesar 1,78. Analisis XRD zeolit menunjukkan beberapa puncak zeolit, namun didominasi oleh fase kalsit dan portlandit. Komposit Z@nZVI menunjukkan keberadaan nZVI dengan penurunan kristalinitas zeolit. Setelah adsorpsi Cu(II), terdeteksi fase kuprit (Cu_2O). Analisis FTIR zeolit menunjukkan gugus Si-O-T, sedangkan komposit Z@nZVI menunjukkan gugus Si-O-T dan Fe-O. Setelah adsorpsi Cu(II), terjadi pergeseran pita O-H, Si-O-T dan Fe-O, peningkatan intensitas pita H-O-H, serta munculnya pita baru gugus Si-O-T dan Fe-O. Analisis BET menunjukkan penurunan luas permukaan spesifik dari 35,93 m^2/g menjadi 19,28 m^2/g dan volume pori dari 0,102 cm^3/g menjadi 0,081 cm^3/g setelah adsorpsi Cu(II), disertai peningkatan ukuran pori dari 5,69 nm menjadi 8,41 nm. Analisis pH_{pzc} menunjukkan nilai pH_{pzc} sebesar 6,68, di mana permukaan adsorben bermuatan positif pada $\text{pH} < 6,68$ dan bermuatan negatif pada $\text{pH} > 6,68$.
2. Pengaruh komposit Z@nZVI pada massa adsorben, waktu kontak, koponsentrasi dan pH larutan serta reusabilitas adsorben terhadap kemampuan penyerapan logam berat Cu(II) sebagai berikut:
 - a. Variasi waktu kontak dan konsentrasi awal Cu(II) berpengaruh terhadap kinerja adsorpsi. Konsentrasi awal yang lebih tinggi mempercepat tercapainya kesetimbangan, tetapi menurunkan efisiensi penyisihan akibat keterbatasan situs aktif. Peningkatan waktu kontak meningkatkan adsorpsi hingga tercapai kondisi jenuh, yang ditandai oleh laju adsorpsi yang relatif konstan. Kondisi terbaik

- penyerapan terjadi pada waktu kontak 60 menit dan konsentrasi awal 450 mg/L dengan kapasitas adsorpsi sebesar 92,57 mg/g
- b. pH larutan berpengaruh signifikan terhadap adsorpsi Cu(II). Efisiensi adsorpsi meningkat seiring kenaikan pH karena berkurangnya kompetisi ion H^+ dengan Cu^{2+} , sedangkan pada pH tinggi efisiensi dipengaruhi oleh pembentukan presipitat akibat interaksi dengan ion OH^- . Kondisi adsorpsi terbaik tercapai pada pH 7 dengan efisiensi removal sebesar 93% dan kapasitas adsorpsi sebesar 418,71 mg/g.
 - c. Peningkatan massa adsorben meningkatkan efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi seiring bertambahnya luas permukaan serta jumlah situs aktif yang tersedia. Kondisi adsorpsi terbaik tercapai pada massa adsorben sebesar 0,075 gram per 100 mL (0,75 g/L) dengan efisiensi removal sebesar 95% dan kapasitas adsorpsi sebesar 643 mg/g.
 - d. Reusabilitas adsorben selama lima siklus berpengaruh terhadap penurunan kinerja adsorpsi, yang ditunjukkan oleh penurunan efisiensi dari 94%, 92%, 73%, 62%, hingga 43%. Penurunan ini disebabkan oleh desorpsi yang tidak sempurna dan perubahan irreversibel pada permukaan adsorben.
3. Isoterm adsorpsi logam berat Cu(II) lebih sesuai dengan model Langmuir yang mengasumsikan adsorpsi relatif homogen dan membentuk lapisan tunggal. Sementara itu, kinetika adsorpsi lebih sesuai dengan model orde dua semu yang merepresentasikan bahwa laju adsorpsi dipengaruhi oleh jumlah situs aktif yang tersedia pada permukaan adsorben.
 4. Mekanisme penghilangan logam berat Cu(II) melibatkan serangkaian proses yang terjadi antara lain adsorpsi, reduksi-oksidasi, dan presipitasi. Mekanisme adsorpsi pada penelitian ini merupakan penggabungan kemisorpsi dan fisisorpsi. Dalam proses redoks, Fe^0 berperan sebagai agen pereduksi, sedangkan Cu^{2+} bertindak sebagai agen pengoksidasi. Kemampuan reduksi Fe^0 memiliki nilai yang lebih tinggi (-0,34 V) sehingga memfasilitasi reduksi spesies ion Cu^{2+} menjadi Cu^0 . Proses

presipitasi terjadi akibat spesies ion OH^- berikatan dengan ion Cu(II) sehingga membentuk endapan padat Cu(OH)_2 .

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Melakukan penerapan *pre-treatment* pada *fly ash* untuk menurunkan kadar pengotor, terutama pada kadar kalsium (Ca) yang berpotensi menghambat pembentukan fase zeolit.
2. Sumber aluminium untuk penyesuaian rasio Si/Al disarankan menggunakan NaAlO_2 komersial, dibandingkan dengan hasil sintetis antara NaOH dan Al(OH)_3 dikarenakan memiliki kelarutan yang rendah.
3. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengevaluasi adsorpsi menggunakan polutan anionik pada kondisi pH asam ($\text{pH} < 6,68$) atau polutan kationik pada kondisi pH basa ($\text{pH} > 6,68$) berdasarkan nilai pH_{pzc} adsorben.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Adusei-gyamfi, J., & Acha, V. (2016). *Carriers for nano zerovalent iron (nZVI): synthesis, application and efficiency.* 91025–91044. <https://doi.org/10.1039/C6RA16657A>
- Al-Harby, N. F., Albahly, E. F., & Mohamed, N. A. (2021). Kinetics , Isotherm and Thermodynamic Studies for Efficient Adsorption of Congo Red Dye from Aqueous Solution onto. *Polymers* 2021, 13(4446), 24. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym13244446>
- Alam, M. A., Ahmed, S., Sarkar, D., Bishwas, R. K., & Jahan, S. A. (2025). Preferred crystallographic design of monoclinic tenorite (CuO) nanocrystals by powder X-ray line diffraction. *Chemistry of Inorganic Materials*, 7(September), 100119. <https://doi.org/10.1016/j.cinorg.2025.100119>
- Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). *X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization : A Review for Engineers of the Fundamentals , Applications , and Research Directions.*
- Ali, A. H., Kareem, A. B., Al-rawi, U. A., Khalid, U., Zhang, S., Zafar, F., Hatshan, M. R., & Sher, F. (2023). *Kinetic and equilibrium study of graphene and copper oxides modified nanocomposites for metal ions adsorption from binary metal aqueous solution article.*
- Ali, R., Aslam, Z., Shawabkeh, R. A., Asghar, A., & Hussein, I. A. (2020). BET, FTIR, and RAMAN characterizations of activated carbon from waste oil fly ash. *Turkish Journal of Chemistry*, 44(2), 279–295. <https://doi.org/10.3906/KIM-1909-20>
- Alotaibi, A. M. (2025). *An Overview of Zeolites : From Historical Background to Diverse Applications.*
- Alterary, S., & Marei, N. H. (2020). The Impact of Coal Fly Ash Purification on Its Antibacterial Activity. *Minerals*, 10(1002).

<https://doi.org/10.3390/min10111002>

Ameha, B., Nadew, T. T., Tedla, T. S., Getye, B., Mengie, D. A., & Ayalneh, S. (2024). RSC Advances The use of banana peel as a low-cost adsorption material for removing hexavalent chromium from tannery wastewater : optimization , kinetic and. *RSC Advances*, 14, 3675–3690. <https://doi.org/10.1039/D3RA07476E>

Anang, E., Liu, H., & Fan, X. (2023). An insight into the fate of Cu²⁺ and zero-valent iron during removal of Cu²⁺ by nanoscale zero-valent iron. *Water Emerging Contaminants and Nanoplastics*, 2(1). <https://doi.org/10.20517/wecn.2023.04>

Andrunik, M., & Smol, M. (2025). *Life After Adsorption : Regeneration , Management , and Sustainability of PFAS Adsorbents in Water Treatment*.

Apriliani, N. (2022). *Green Synthesis of Nanoscale Zero-Valent Iron and Its Activity as an Adsorbent for Ni (II) and Cr (VI)*. 1(3), 71–76.

Arancibia-Miranda, N., Baltazar, S. E., García, A., Muñoz-Lira, D., Sepúlveda, P., Rubio, M. A., & Altbir, D. (2016). Nanoscale zero valent supported by Zeolite and Montmorillonite: Template effect of the removal of lead ion from an aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 301, 371–380. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.09.007>

Asnawati, A., Kharismaningrum, R. R., & Andarini, N. (2017). PENENTUAN KAPASITAS ADSORPSI SELULOSA TERHADAP RHODAMIN B DALAM SISTEM DINAMIS. *Jurnal Kimia Riset*, 2(1), 23–29.

Biswal, B. K., & Balasubramanian, R. (2023). Journal of Environmental Chemical Engineering Use of biochar as a low-cost adsorbent for removal of heavy metals from water and wastewater : A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110986. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110986>

Boonruam, P., Soisuwan, S., Wattanachai, P., Morillas, H., & Upasen, S. (2020). Solvent effect on zero-valent iron nanoparticles (nZVI) preparation and its

- thermal oxidation characteristic. *ASEAN Engineering Journal*, 10(2), 1–12.
<https://doi.org/10.11113/aej.v10.16525>
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9), e04691.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Buema, G., Lupu, N., Chiriac, H., Roman, T., Porcescu, M., Ciobanu, G., Burghila, D. V., & Harja, M. (2020). Eco-Friendly materials obtained by fly ash sulphuric activation for cadmium ions removal. *Materials*, 13(16), 1–15.
<https://doi.org/10.3390/MA13163584>
- Chen, X. (2015). *Modeling of Experimental Adsorption Isotherm Data*. 14–22.
<https://doi.org/10.3390/info6010014>
- Chinara, A., & Alieftiyani, P. G. (2024). Studi Pengolahan Limbah Fly Ash Batubara dalam Upaya Peningkatan Konsentrasi Silika Menggunakan Asam Sitrat. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, 3(3), 288–296.
<https://doi.org/10.55123/insologi.v3i3.3519>
- Dada, A. O., Adekola, F. A., Odebunmi, E. O., Ogunlaja, A. S., & Bello, O. S. (2021). Two–three parameters isotherm modeling, kinetics with statistical validity, desorption and thermodynamic studies of adsorption of Cu(II) ions onto zerovalent iron nanoparticles. *Scientific Reports*, 11(1), 1–15.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-95090-8>
- Danat, B. T., Wuana, R. A., Chahul, H. F., & Iorungwa, M. S. (2026). Review of adsorption isotherms models. *Applied Water Science*, 1.
- De Oliveira, L. H., Pereira, M. V., Meneguim, J. G., De Barros, M. A. S. D., Do Nascimento, J. F., & Arroyo, P. A. (2023). Influence of regeneration conditions on cyclic CO₂ adsorption on NaA zeolite at high pressures. *Journal of CO₂ Utilization*, 67(April 2022).
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102296>
- Dubey, R., Kumar, A., & Gupta, B. K. (2024). A REVIEW OF UV-VISIBLE SPECTROSCOPY: 9(10), 412–423.

- Eisavi, R., & Karimi, A. (2019). CoFe₂O₄/Cu(OH)₂ magnetic nanocomposite: An efficient and reusable heterogeneous catalyst for one-pot synthesis of β -hydroxy-1,4-disubstituted-1,2,3-triazoles from epoxides. *RSC Advances*, 9(51), 29873–29887. <https://doi.org/10.1039/c9ra06038c>
- Elboughdiri, N. (2020). The use of natural zeolite to remove heavy metals Cu (II), Pb (II) and Cd (II), from industrial wastewater. *Cogent Engineering*, 7(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1782623>
- Elshafei, M. F., Mostafa, M. R., Khalf-alla, P. A., & Mohamed, G. G. (2025). *Kinetic and isotherm study of Ni- MOF / Magnetite nanoparticles adsorption capacity as green synthesized adsorbent towards rhodochrome (Kammererite).* 1–27.
- Ersöz, K., Bayrak, B., Gündüz, F., & Karaca, H. (2025). Synthesis of an innovative SF / NZVI catalyst and investigation of its effectiveness on bio - oil production in liquefaction process alongside other parameters. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(19), 27913–27934. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32981-z>
- Farro, N. W., Reyes, W., Mendoza, J. L., Veleza, L., Azamar, J. A., & Aguilar, D. (2023). *Characterization by XRD and FTIR of Zeolite A and Zeolite X Obtained from Fly Ash.* 99(80), 679–684. <https://doi.org/10.3303/CET2399114>
- Faustino, B., Cobo, D. M., Vequizo, R., & Candidato, R. (2024). Enhanced heavy metal adsorption capacity of surface-functionalized Philippine natural zeolite in simulated wastewater. *Open Ceramics*, 18(May), 100612. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2024.100612>
- Fauzia, E. A., & Purnama, H. (2021). The Effect Of Particle Size On The Characterization Of Activated Carbon From Tropical Black Bamboo (*Gigantochloa Atroviolacea*). *Techno (Jurnal Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Purwokerto)*, 22(2), 99. <https://doi.org/10.30595/techno.v22i2.10350>

- Febrianti, R. F., Zahara, T. A., & Adhitiyawarman, A. (2022). Sintesis Zeolit a Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash) Limbah Pt. Indonesia Chemical Alumina (Ica) Menggunakan Metode Alkali Hidrotermal (Synthesis of Zeolite a Base on Fly Ash Waste Pt. Indonesia Chemical Alumina (Ica) Using Hydrothermal Alkaline Method). *Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry*, 5(1), 28. <https://doi.org/10.26418/indonesian.v5i1.53072>
- Fitriani, M., Gunanto, Y. E., & Setiawan, J. (2025). *Synthesis and Characterization of Zeolites from Coal Fly Ash Waste*. 08(01), 62–71.
- Flores-Valenzuela, J., Leal-Perez, J. E., Almaral-Sanchez, J. L., Hurtado-Macias, A., Borquez-Mendivil, A., Vargas-Ortiz, R. A., Garcia-Grajeda, B. A., Duran-Perez, S. A., & Cortez-Valadez, M. (2023). *Structural Analysis of Cu + and Cu 2+ Ions in Zeolite as a Nanoreactor with Antibacterial Applications*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03869>
- Gharbani, P. (2024). Zero-Valent Iron Nanoparticles (NZVI) Supported by Zeolite Clinoptilolite-Supported for Removal of Cu(II) Ions by Adsorption: A Optimization Study by Response Surface Methodology (RSM). *Physical Chemistry Research*, 12(2), 429–440. <https://doi.org/10.22036/pcr.2023.407645.2379>
- Ghorbani, F., Kamari, S., Askari, F., Molavi, H., & Fathi, S. (2021). *Production of nZVI – Cl nanocomposite as a novel eco – friendly adsorbent for efficient As (V) ions removal from aqueous media : Adsorption modeling by response surface methodology*. 21(February), 1–11.
- Gong, Y., Chen, X., & Wu, W. (2024). Advances in Sample Preparation Application of fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in sample preparation : Material characterization and mechanism investigation. *Advances in Sample Preparation*, 11(April), 100122. <https://doi.org/10.1016/j.sampre.2024.100122>
- Guo, T., Bulin, C., Ma, Z., Li, B., Zhang, Y., Zhang, B., & Xing, R. (2021). *Mechanism of Cd (II) and Cu (II) Adsorption onto Few-Layered Magnetic*

Graphene Oxide as an Efficient Adsorbent. II.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01770>

Hady, E. E. A., Mohamed, H. F. M., Hafez, S. H. M., Fahmy, A. M. M., Magdy, A., Mohamed, A. S., Ali, E. O., Abdelhamed, H. R., Mahmoud, O. M., & Crystal, C. V. (2023). Textural properties and adsorption behavior of Zn – Mg – Al layered double hydroxide upon crystal violet dye removal as a low cost , effective , and recyclable adsorbent. *Scientific Reports*, 1–19.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-33142-x>

Hafizah, N., Hamid, A., Iqbal, M., Tahir, M., Chowdhury, A., Nordin, A. H., Alshaikh, A. A., Suid, M. A., Nazaruddin, N. I., Nozaizeli, N. D., Sharma, S., & Rushdan, A. I. (2022). *The Current State-Of-Art of Copper Removal from Wastewater : A Review*.

Hakim A, Subekti S, S. N. E. N. (2016). STUDI PENURUNAN LOGAM BERAT Cu²⁺ dan Cd²⁺ DENGAN MENGGUNAKAN LIMBAH KULIT PISANG KEPOK (Musa acuminata). *Jurnal Biosains Pascasarjana*, 18(1), 24–36.

Hameed, A. K., Dewayanto, N., Dongyun, D., & Nordin, M. R. (2016). *Kinetic and Thermodynamics of Methylene Blue Adsorption onto Zero Valent Iron Supported on Mesoporous Silica*. 11(2), 250–261.
<https://doi.org/10.9767/bcrec.11.2.443.250-261>

Indah, S., Herald, D., & Lathifatuzzahrah, S. (2022). Removal of phosphate from laundry wastewater using maize husk as adsorbent. *Jurnal Litbang Industri*, 12(1), 33–40.

Indira, V., & Abhitha, K. (2022). A review on recent developments in Zeolite A synthesis for improved carbon dioxide capture: Implications for the water-energy nexus. *Energy Nexus*, 7(June), 100095.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100095>

Izidoro, J. D. C., Fungaro, D. A., Abbott, J. E., & Wang, S. (2013). Synthesis of zeolites X and A from fly ashes for cadmium and zinc removal from aqueous solutions in single and binary ion systems. *Fuel*, 103, 827–834.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.07.060>

Jamaludin, A., & Adiantoro, D. (2012). *ANALISIS KERUSAKAN X-RAY FLUORESCENCE (XRF)*. 19–28.

Kagalkar, A., Dharaskar, S., Chaudhari, N., Vakharia, V., & Karri, R. R. (2025). Enhanced metal ion adsorption using ZnO-MXene nanocomposites with machine learning-based performance prediction. *Scientific Reports*, 15(1), 1–25. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00324-8>

Kalaba, G., Nyirenda, J., & Munyati, O. (2022). *Characterisation of activated carbons for removal of organic and heavy metal pollutants from water in resource limited countries*. 261, 224–233. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28531>

Ketut, C. N. I., Agung, S., & Mekro, P. (2022). *Pemanfaatan Zeolit Bayah sebagai Pemurni Biogas*. 13–14.

Khasanah, M., Widati, A. A., Fadillah, T., Ummah, N. W., Puspitasari, E., Zuhriyyah, V. A., & Budiastanti, T. A. (2025). Modification of Carbon Paste Electrode with Imprinted Zeolite A as a Sensor for Potentiometric and Voltammetric Amitriptyline Analysis. *Pakistan Journal of Analytical and Environmental Chemistry*, 26(1), 15–26. <https://doi.org/10.21743/pjaec/2025.06.02>

Kim, S. A., Kamala-Kannan, S., Lee, K. J., Park, Y. J., Shea, P. J., Lee, W. H., Kim, H. M., & Oh, B. T. (2013). Removal of Pb(II) from aqueous solution by a zeolite-nanoscale zero-valent iron composite. *Chemical Engineering Journal*, 217, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.11.097>

Kordala, N., & Wyszowski, M. (2024). Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications. *Molecules*, 29(5). <https://doi.org/10.3390/molecules29051069>

Koshlak, H. (2023). Synthesis of Zeolites from Coal Fly Ash Using Alkaline Fusion and Its Applications in Removing Heavy Metals. *Heat and Mass Transfer in Porous Materials*, 2. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma16134837>

- Kuldeyev, E., Seitzhanova, M., Tanirbergenova, S., Tazhu, K., Doszhanov, E., Mansurov, Z., Azat, S., Nurlybaev, R., & Berndtsson, R. (2023). Modifying Natural Zeolites to Improve Heavy Metal Adsorption. *Water (Switzerland)*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/w15122215>
- Längauer, D., Čablík, V., Hredzák, S., Zubrik, A., Matik, M., & Danková, Z. (2021). Preparation of synthetic zeolites from coal fly ash by hydrothermal synthesis. *Materials*, 14(5), 1–25. <https://doi.org/10.3390/ma14051267>
- Lestari, A. W., Marlita, Z., Sefiya, V., & Prasetyo, I. A. (2025). Analysis of Variance (ANOVA): Concept, Steps, and Its Application in Data Analysis. *Sintesis*, 6(1), 178–182.
- Li, J., Gao, M., Yan, W., & Yu, J. (2023). *Chemical Science zeolites and their impact on properties*. 1935–1959. <https://doi.org/10.1039/d2sc06010h>
- Li, S., Li, L., & Zhang, W. (2024). Nanoscale Zero-Valent Iron (nZVI) for Heavy Metal Wastewater Treatment: A Perspective. *Engineering*, 36, 16–20. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.08.012>
- Li, Z., Wang, L., Meng, J., Liu, X., Xu, J., Wang, F., & Brookes, P. (2018). Zeolite-supported nanoscale zero-valent iron: New findings on simultaneous adsorption of Cd(II), Pb(II), and As(III) in aqueous solution and soil. *Journal of Hazardous Materials*, 344(Ii), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.036>
- Liang, Z., Liu, Z., Yu, L., & Wang, W. (2024). Fly ash-based zeolites: from waste to value- A comprehensive overview of synthesis, properties, and applications. *Chemical Engineering Research and Design*, 212, 240–260.
- Liu, B., Sun, H., Peng, T., & He, Q. (2018). One-step synthesis of hydroxysodalite using natural bentonite at moderate temperatures. *Minerals*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/min8110521>
- Liu, Y., Wang, H., Cui, Y., & Chen, N. (2023). Removal of Copper Ions from Wastewater: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5). <https://doi.org/10.3390/ijerph20053885>

- Luo, X., Song, X., Cao, Y., Song, L., & Bu, X. (2020). Investigation of calcium carbonate synthesized by steamed ammonia liquid waste without use of additives. *RSC Advances*, 10(13), 7976–7986. <https://doi.org/10.1039/c9ra10460g>
- Ma, W., Yi, Y., Fang, M., Li, C., Li, J., & Liu, W. (2023). Study on the synthesis mechanism of sodalite, gismondine, and zeolite-P1 zeolite materials from ladle furnace slag and fly ash. *Scientific Reports*, 13(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30282-y>
- Ma, X., Zhao, M., Chen, D., Liao, Y., & Chao, Y. (2022). Preparation of a novel composite geopolymer based on calcium carbide slag-fly ash and its characterization, mechanism and adsorption properties. *Water Science and Technology*, 85(8), 2389–2397. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.122>
- Macchi, S., Nemer, M., Mills, M. M., Meyerson, M. L., Papenguth, H. W., Taphouse, J. H., & Schorr, N. B. (2025). *Comparing Methods for Pyrite Surface Area Measurement Through Optical , Aqueous , and Gaseous Approaches*. 1–17.
- Madhu, J., Santhanam, A., Natarajan, M., & Velauthapillai, D. (2022). CO₂ adsorption performance of template free zeolite A and X synthesized from rice husk ash as silicon source. *RSC Advances*, 12(36), 23221–23239. <https://doi.org/10.1039/d2ra04052b>
- Makgabutlane, B., Nthunya, L. N., Nxumalo, E. N., Musyoka, N. M., & Mhlanga, S. D. (2020). Microwave Irradiation-Assisted Synthesis of Zeolites from Coal Fly Ash: An Optimization Study for a Sustainable and Efficient Production Process. *ACS Omega*, 5(39), 25000–25008. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00931>
- Mambetova, M., Dossumov, K., Baikhamurova, M., & Yergaziyeva, G. (2024). Sorbents Based on Natural Zeolites for Carbon Dioxide Capture and Removal of Heavy Metals from Wastewater: Current Progress and Future Opportunities. *Processes*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/pr12102071>

- Mehrabi, N., Masud, A., Afolabi, M., Hwang, J., Calderon Ortiz, G. A., & Aich, N. (2019). Magnetic graphene oxide-nano zero valent iron (GO-nZVI) nanohybrids synthesized using biocompatible cross-linkers for methylene blue removal. *RSC Advances*, 9(2), 963–973. <https://doi.org/10.1039/C8RA08386J>
- Miri, N. S. S., & Narimo. (2022). Review : Kajian Persamaan Isoterm Langmuir dan Freundlich pada Adsorpsi Logam Berat Fe (II) dengan Zeolit dan Karbon Aktif dari Biomassa. *Jurnal Kimia dan Rekayasa*, 2(II).
- Mishra, J., Nanda, B., Patro, S. K., & Krishna, R. S. (2022). *Sustainable Fly Ash Based Geopolymer Binders : A Review on Compressive Strength and Microstructure Properties*.
- Mlonka-Mędrala, A. (2023). Recent Findings on Fly Ash-Derived Zeolites Synthesis and Utilization According to the Circular Economy Concept. *Energies*, 16(18). <https://doi.org/10.3390/en16186593>
- Moustafa, M. T. (2023). Preparation and characterization of low - cost adsorbents for the efficient removal of malachite green using response surface modeling and reusability studies. In *Scientific Reports*. Nature Publishing Group UK. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31391-4>
- Mukaromah, A. H., Amin, M., Buchari, Mukti, R. R., & Zulfikar, M. A. (2014). *Pengaruh Variasi Mol H₂O Terhadap Kristalinitas Zeolit Zsm-5 Effectiveness Of The Mol H₂O Variation To Cristalinity Zsm-5*. 1–5.
- Muscarella, S. M., Badalucco, L., & Laudicina, V. A. (2025). *Surface Charge and Phosphorus Retention in Metal-Activated Biochars from Different Pyrolysis Temperatures*. 1–18.
- Nguyen, T. Van, Nguyen, L. T., Nguyen, H. Th. T., & Le, T.-H. (2024). *Adsorption Studies of Ternary Metal Ions (Cs⁺, Sr²⁺, and Co²⁺) from Water Using Zeolite@Magnetic Nanoparticles (Z@Fe₃O₄ NPs)*.
- Ningsih, D. A., & Said, I. (2016). *ADSORPSI LOGAM TIMBAL (Pb) DARI LARUTANNYA DENGAN MENGGUNAKAN ADSORBEN DARI TONGKOL JAGUNG Adsorption of Lead (Pb) from Its Solution by using Corncob as an*

Adsorbent. 5(May), 55–60.

- Olii, M. R., Wahab, A. A., Ichsan, I., Abdul Djau, R., & Nento, S. (2023). Beton Hijau Menggunakan Fly ash sebagai Substitusi Parsial Semen. *Siklus : Jurnal Teknik Sipil*, 9(1), 11–20. <https://doi.org/10.31849/siklus.v9i1.11101>
- Omidi, M., Fatehinya, A., Farahani, M., Akbari, Z., Shahmoradi, S., Yazdian, F., Tahriri, M., Moharamzadeh, K., Tayebi, L., & Vashae, D. (2017). Characterization of biomaterials. In *Biomaterials for Oral and Dental Tissue Engineering*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100961-1.00007-4>
- Paramitha, T. (2020). *Conversion of Coal Fly Ash to Zeolite by Alkaline Fusion-Hydrothermal Method : A Review*. 198(Issat), 407–414.
- Parnis, M., García, F. E., Toledo, M. V., Montesinos, V. N., & Quici, N. (2022). Zerovalent Iron Nanoparticles-Alginate Nanocomposites for Cr(VI) Removal in Water—Influence of Temperature, pH, Dissolved Oxygen, Matrix, and nZVI Surface Composition. *Water (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/w14030484>
- Pasieczna-Patkowska, S., Cichy, M., & Flieger, J. (2025). Application of Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy in Characterization of Green Synthesized Nanoparticles. *Molecules*, 30(3), 1–36. <https://doi.org/10.3390/molecules30030684>
- Pei, Y., Zhong, Y., Xie, Q., & Chen, N. (2022). Two-step hydrothermal synthesis and conversion mechanism of zeolite X from stellerite zeolite. *RSC Advances*, 12(6), 3313–3321. <https://doi.org/10.1039/d1ra07798h>
- Phonlakan, K., Meetam, P., Chonlaphak, R., Kongseng, P., Chantara, S., & Budsombat, S. (2023). *Poly(acrylic acid-co-2-acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid)-grafted chitosan hydrogels for effective adsorption and photocatalytic degradation of dyes*. 31002–31016. <https://doi.org/10.1039/d3ra05596e>
- Powell, K. J., Brown, P. L., Byrne, R. H., Gajda, T., Hefter, G., & Wanner, H.

- (2007). *Chemical speciation of environmentally significant metals with inorganic ligands. Part 2: The Cu^{2+} – OH^- , Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , and PO_4^{3-} systems (IUPAC Technical Report)*. 79(5), 895–950. <https://doi.org/10.1351/pac200779050895>
- Pratiwi, N. A., & Sunarto. (2018). PERBANDINGAN VALIDASI METODE ANALISIS ION TEMBAGA(II) TANPA PENGOMPLEKS DAN DENGAN PENGOMPLEKS Na- DIETILDITIOKARBAMAT SECARA SPEKTROFOTOMETRI UV-VIS COMPARISON. *Jurnal Kimia Dasar*, 7(Ii), 96–105.
- Purwitasari, D. G., Tussania, R., & Fathoni, R. (2022). ADSORPSI LOGAM KADMIUM (Cd) PADA KADMIUM SULFAT (CdSO_4) MENGGUNAKAN BATANG POHON PISANG SEBAGAI ADSORBEN. *Jurnal Chemurgy*, 6(1), 52. <https://doi.org/10.30872/cmg.v6i1.7905>
- Qureshi, A. A., Javed, S., Javed, H. M. A., Jamshaid, M., Ali, U., & Akram, M. A. (2022). Systematic Investigation of Structural, Morphological, Thermal, Optoelectronic, and Magnetic Properties of High-Purity Hematite/Magnetite Nanoparticles for Optoelectronics. *Nanomaterials*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/nano12101635>
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). *Adsorption of Heavy Metals : Mechanisms , Kinetics , and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation — A Review*. 775–805.
- Regis Correa da Silva, D., Cely-Pinto, M., & Scaiano, J. C. (2024). Color-Coordinated Photocatalysis of the One-Pot Synthesis of Schiff Bases from Benzyl Alcohol and Nitro Compounds Using a Hybrid Magnetic Catalyst. *Catalysts*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/catal14090612>
- Ren, X., Xiao, L., Qu, R., Liu, S., Ye, D., Song, H., Wu, W., Zheng, C., Wu, X., & Gao, X. (2018). Synthesis and characterization of a single phase zeolite A using coal fly ash. *RSC Advances*, 8(73), 42200–42209. <https://doi.org/10.1039/c8ra09215j>

- Rieswana, Y., Aisyah, A. N., Sani, & Suprihatin. (2024). Sintesis dan Karakterisasi Zeolit X dari Fly Ash Batu Bara Menggunakan Metode Sintesis pada Suhu Rendah. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 10(2), 104–113. <https://doi.org/10.22487/kovalen.2024.v10.i2.17028>
- Salama, A., & Sakhawy, M. El. (2023). Synthesis and adsorption performance of functionalized chitosan and carboxyethylsilanetriol hybrids. *BMC Chemistry*, 1–9. <https://doi.org/10.1186/s13065-023-00943-0>
- Salama, E., Samy, M., Shokry, H., Subruiti, G. El, Sharkawy, A. El, Hamad, H., & Elkady, M. (2022). The superior performance of silica gel supported nano zero-valent iron for simultaneous removal of Cr (VI). *Scientific Reports*, 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26612-1>
- Salih, A. M., Khanaqa, P., & Williams, C. D. (2020). *Kinetic Studies of Heavy Metal Removal from Industrial Wastewater by Using Natural Zeolite*. July 2021, 18–25. <https://doi.org/10.25079/ukhjse.v5n1y2021.pp18-25>
- Scaffolds, H. E. P. V., Botvin, V., Fetisova, A., Mukhortova, Y., Wagner, D., Kazantsev, S., Surmeneva, M., Kholkin, A., & Surmenev, R. (2023). *Effect of Fe₃O₄ Nanoparticles Modified by Citric and Oleic Acids on the Physicochemical and Magnetic Properties of*.
- Seki, T., Chiang, K. Y., Yu, C. C., Yu, X., Okuno, M., Hunger, J., Nagata, Y., & Bonn, M. (2020). The bending mode of water: A powerful probe for hydrogen bond structure of aqueous systems. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 11(19), 8459–8469. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.0c01259>
- Senila, M., & Cadar, O. (2024). Modification of natural zeolites and their applications for heavy metal removal from polluted environments: Challenges, recent advances, and perspectives. *Heliyon*, 10(3), e25303. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25303>
- Setyaningrum, E. W., Tri, A., Dewi, K., Yuniartik, M., & Dewi, E. (2018). ANALISIS KANDUNGAN LOGAM BERAT Cu , Pb , Hg DAN Sn TERLARUT DI PESISIR KABUPATEN BANYUWANGI. *Prosiding*

- Seminar Nasional Kelautan dan Perikanan IV, 04*(September), 144–153.
- Shao, J., & Yu, X. (2018). *Nanoscale Zero-Valent Iron Decorated on Bentonite / Graphene Oxide for Removal of Copper Ions from Aqueous Solution*. 1–14.
<https://doi.org/10.3390/ma11060945>
- Sharma, A. K., Bhandari, R., & Aherwar, A. (2020). *Materials Today : Proceedings Matrix materials used in composites : A comprehensive study*. 21, 1559–1562.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.086>
- Sheikhassani, H., Ghahremani, A., Manteghian, M., & Alinejad-Mir, A. (2024). Lead Removal from Aqueous Solution by a Superior Accessible Nanoscale Zero-Valent Iron/NaY Zeolite Adsorbent: Isotherm, Kinetic, and Thermodynamic Studies. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 43(7), 2705–2720.
<https://doi.org/10.30492/ijcce.2024.2012920.6255>
- Shi, Y., Chen, W., Yang, S., Feng, C., & Wang, X. (2023). *Comparison of Two Types of Modified Zeolites and the Key Factors for Cd (II) Adsorption Processes in Micropolluted Irrigation Water. Ii*, 1–17.
- Shirendev, N., Bat-Amgalan, M., Kano, N., Kim, H. J., Gunchin, B., Ganbat, B., & Yunden, G. (2022). A Natural Zeolite Developed with 3-Aminopropyltriethoxysilane and Adsorption of Cu(II) from Aqueous Media. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(22).
<https://doi.org/10.3390/app122211344>
- Sims, R. A., Harmer, S. L., & Quinton, J. S. (2019). *The Role of Physisorption and Chemisorption in the Oscillatory Adsorption of Organosilanes on Aluminium Oxide*. <https://doi.org/10.3390/polym11030410>
- Sinardi. (2022). Adsorben Fly Ash : Studi Aplikasi Fly Ash pada Limbah Cair Cold Storage. In *OSF Prints*.
- SNI 2460:2014 Spesifikasi abu terbang batubara dan pozolan alam mentah atau yang telah dikalsinasi untuk digunakan dalam beton, 16 (2014).

- SNI 6989.6:2009 Air dan air limbah – Bagian 6: Cara uji tembaga (Cu) secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) – nyala (2009).
- Sousa, P. B. F., Bieseki, L., & Pergher, S. B. C. (2025). Seed-Assisted Crystallization in the Hydrothermal Synthesis of FAU Zeolite from Acid-Treated Residue Glass Powder. *Materials*, 18(7). <https://doi.org/10.3390/ma18071393>
- Stefaniuk, M., Oleszczuk, P., & Ok, Y. S. (2016). Review on Nano Zero Valent Iron (nZVI): From Synthesis to Enviromental Applications. *Chemical Engineering Journal*, 287, 618–632.
- Sulistiyani, M., Huda, N., Prasetyo, R., & Alauhdin, M. (2023). Calibration of Microplate Uv-Vis Spectrophotometer for Quality Assurance Testing of Vitamin C using Calibration Curve Method. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 12(2).
- Sundari, A. S., Kusumawati, A., & Rimantho, D. (2025). Analysis of Factors Affecting Air Pollution Levels Using the Three-Way Analysis of Variance Method. *JRST (Jurnal Riset Sains dan Teknologi)*, 9(2), 111–119. <https://doi.org/10.30595/jrst.v9i2.23381>
- Suryadi Ismadji, Felycia Edi Soetaredjo, Shella PermatasariSantoso, Jindrayani Nyoo Putro, Maria Yuliana, Wenny I rawaty, Sandy Budi Hartono, & Valentino Bervia Lunardi. (2021). *Adsorpsi Pada Fase CairKeseimbangan, Kinetika, DanTermodinamika*. <http://www.ukwms.ac.id/>
- Suryani, P. E. (2021). Aplikasi Metode Aktivasi Secara Kimia dan Fisika, Pada Zeolit Alam Sebagai Penejrap Logam Dalam Proses Pemurnian Air. *Simetris*, 15(2), 5–7. <https://doi.org/10.51901/simetris.v15i2.202>
- Suwardi, & Mulyanto, B. (2006). Prospek Zeolit sebagai Bahan Penjerap dalam Remediasi Lahan Bekas Tambang. *Jurnal Zeolit Indonesia*, 76–84.
- Svobodová, E., Tišler, Z., Peroutková, K., Strejcová, K., Abrham, J., Šimek, J., Gholami, Z., & Vakili, M. (2024). Adsorption of Cu(II) and Ni(II) from Aqueous Solutions Using Synthesized Alkali-Activated Foamed Zeolite

- Adsorbent: Isotherm, Kinetic, and Regeneration Study. *Molecules*, 29(10). <https://doi.org/10.3390/molecules29102357>
- Syawaliani, W., & Utomo, S. (2024). Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) sebagai Solusi Inovasi Pengolahan Limbah dalam Mendukung Keberlangsungan UMKM dalam Bidang Pembuatan Batako, Paving Blok dan Pengecoran. *Jurnal Bisnis dan Pembangunan*, 13(01), 97–108.
- Talakua, M. W., Abrahams, H., & Lesnussa, Y. A. (2018). Kajian Tentang Pendapat Pelanggan Pln Di Desa Passo Dan Desa Rumah Tiga Terhadap Listrik Prabayar Dengan Metode Analisis Variansi. *Barekeng: Jurnal Ilmu Matematika Dan Terapan*, 12(1), 17. <https://doi.org/10.30598/vol12iss1pp17-26ar360>
- Tan, T. L., Krusnamurthy, P. A. P., & Abdul, S. (2020). Adsorptive, kinetics and regeneration studies of fluoride removal from water using zirconium-based metal organic frameworks. *RSC Advances*, 10, 18740–18752. <https://doi.org/10.1039/D0RA01268H>
- Tarekegn, M. M., Hiruy, A. M., & Dekebo, A. H. (2021). Nano zero valent iron (nZVI) particles for the removal of heavy metals (Cd^{2+} , Cu^{2+} and Pb^{2+}) from aqueous solutions. *RSC Advances*, 11(30), 18539–18551. <https://doi.org/10.1039/d1ra01427g>
- Tasya agustina, Pane, E. R., & Legasari, L. (2024). Analisis Kadar Logam Tembaga (Cu) pada Tanah Menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA). *Sains: Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, 13(1), 17–21. <https://doi.org/10.36709/sains.v13i1.57>
- Tesnim, D., Hédi, B. A., Ridha, D., & Cid-Samamed, A. (2024). Green low-cost synthesis of zero-valent iron nanoparticles from Palm Petiole Extract for Cr(VI) removal from water. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(31), 44272–44288. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34092-1>
- Toli, A., Mystrioti, C., & Papassiopi, N. (2024). From Nano Zero-Valent Iron to Nanocomposite Materials for Sustainable Water Treatment. *Sustainability*

(Switzerland) , 16(7). <https://doi.org/10.3390/su16072728>

- Tran, H. N. (2023). Applying Linear Forms of Pseudo-Second-Order Kinetic Model for Feasibly Identifying Errors in the Initial Periods of Time-Dependent Adsorption Datasets. *Water*, 15(1231). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w15061231>
- Tryfon, P., Sperdouli, I., Moustaka, J., Adamakis, I. D. S., Giannousi, K., Dendrinou-Samara, C., & Moustakas, M. (2024). Hormetic Response of Photosystem II Function Induced by Nontoxic Calcium Hydroxide Nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(15), 1–22. <https://doi.org/10.3390/ijms25158350>
- Ulatowska, J., Legawiec, K. J., Drzyzga, J., & Polowczyk, I. (2020). Studies on removal of Cu (II) from aqueous solution by adsorption on fly ash agglomerates. *Desalination and Water Treatment*, 207, 287–299. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26438>
- Vareda, J. P. (2023). On validity , physical meaning , mechanism insights and regression of adsorption kinetic models. *Journal of Molecular Liquids*, 376, 121416. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121416>
- Vavouraki, A., Bartzas, G., & Komnitsas, K. (2020). Synthesis of zeolites from greek fly ash and assessment of their copper removal capacity. *Minerals*, 10(10), 1–18. <https://doi.org/10.3390/min10100844>
- Verma, S., Jha, A. K., Shivam, S., & Samanta, S. K. (2024). Studies on Adsorption Isotherms of N₂ on Bentonite. *Rasayan Journal of Chemistry*, 17(3), 1340–1347. <https://doi.org/10.31788/RJC.2024.1738784>
- Vigdorowitsch, M., Pchelintsev, A., Tsygankova, L., & Tanygina, E. (2021). *Applied Sciences Freundlich Isotherm : An Adsorption Model Complete Framework*. 1–7.
- Vilakazi, A. Q., & Shemi, A. (2025). *Dry Magnetic Separation and the Leaching Behaviour of Aluminium , Iron , Titanium , and Selected Rare Earth Elements (REEs) from Coal Fly Ash*. 1–27.

- Wardiyati, S., Wardiyati, S., Fisli, A., Saeful Yusuf Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir, D., Kawasan Puspipstek, B., & Selatan, T. (2013). *Sintesis dan Karakterisasi Nano Zero Valent Iron SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANO ZERO VALENT IRON (NZVI) DENGAN METODE PRESIPITASI (SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF NANO ZERO VALENT IRON (NZVI) BY PRECIPITATION METHOD)*. 37–44.
- Wijaya, R. A., Wijayanti, S., & Astuti, Y. (2021). Fly Ash Limbah Pembakaran Batubara sebagai Zat Mineral Tambahan (Additive) untuk Perbaikan Kualitas dan Kuat Tekan Semen. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 27(1), 127–134.
- Xiang, G., Long, S., & Dang, A. (2022). *Fabrication of the Ordered Mesoporous nZVI / Zr-Ce-SBA-15 Composites Used for Crystal Violet Removal and Their Optimization Using RSM and ANN – PSO*. Cv.
- Xu, J., Zhu, S., Liu, P., Gao, W., Li, J., & Mo, L. (2017). *Adsorption of Cu (II) ions in aqueous solution by aminated lignin from enzymatic hydrolysis residues*. 44751–44758. <https://doi.org/10.1039/c7ra06693g>
- Yang, L., Gao, M., Wei, T., & Nagasaka, T. (2022). Synergistic removal of As (V) from aqueous solution by nanozero valent iron loaded with zeolite 5A synthesized from fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 424(PB), 127428. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127428>
- Yao, G., Lei, J., Zhang, X., Sun, Z., & Zheng, S. (2018). *One-Step Hydrothermal Synthesis of Zeolite X Powder from Natural Low-Grade Diatomite*. <https://doi.org/10.3390/ma11060906>
- Youssif, M. M., El-Attar, H. G., Hessel, V., & Wojnicki, M. (2024). Recent Developments in the Adsorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions Using Various Nanomaterials. *Materials*, 17(21). <https://doi.org/10.3390/ma17215141>
- Yuan, L., Yan, M., Huang, Z., He, K., Zeng, G., Chen, A., Hu, L., Li, H., Peng, M., Huang, T., & Chen, G. (2019). Influences of pH and metal ions on the interactions of oxytetracycline onto nano-hydroxyapatite and their co-

- adsorption behavior in aqueous solution. *Journal of Colloid And Interface Science*, 541, 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.01.078>
- Zeng, Y., Walker, H., & Zhu, Q. (2017). Reduction of nitrate by NaY zeolite supported Fe, Cu/Fe and Mn/Fe nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, 324, 605–616. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.032>
- Zhang, X., Yang, Z., Bi, X., Zhang, Y., Liu, Y., Zhao, Y., Chen, J., Yu, L., & Zou, X. (2025). Synthesis of nanoscale zero-valent iron by one-pot route and study of its potential in passivating coexistent heavy metal anions and cations in soil. *RSC Advances*, 15(38), 31005–31018. <https://doi.org/10.1039/d5ra02186c>
- Zhang, Z., Cai, W., Hu, Y., Yang, K., Zheng, Y., & Fang, C. (2022). *Ecological Risk Assessment and Influencing Factors of Heavy-Metal Leaching From Coal-Based Solid*. 10(July), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.932133>
- Zheng, D., Zhang, Y., Liu, T., Huang, J., & Cai, Z. (2022). *Selective Leaching of Valuable Metals from Spent Fluid Catalytic Cracking Catalyst with Oxalic Acid*. 1–13.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 PERHITUNGAN STOIKIOMETRI	121
LAMPIRAN 2 HASIL UJI XRF	133
LAMPIRAN 3 HASIL UJI XRD	137
LAMPIRAN 4 HASIL UJI FTIR.....	149
LAMPIRAN 5 HASIL UJI PH POINT ZERO CHARGE	153
LAMPIRAN 6 HASIL UJI BET	157
LAMPIRAN 7 HASIL UJI ADSORPSI	161
LAMPIRAN 8 KINETIKA DAN ISOTERM ADSORPSI	175
LAMPIRAN 9 HASIL ANALISIS STATISTIKA.....	183
LAMPIRAN 10 DOKUMENTASI KEGIATAN	189
LAMPIRAN 11 VALIDASI DATA	201

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN 1

PERHITUNGAN STOIKIOMETRI

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

1. Pembuatan Larutan HCl 1 M

a. Perhitungan Molaritas HCl 37%

Diketahui:

$$\begin{aligned}\% \text{ HCl} &= 37\% \\ \rho \text{ HCl } 37\% &= 1,18 \text{ g/mL} \\ \text{Mr HCl} &= \text{Ar H} + \text{Ar Cl} \\ &= 1 \text{ g/mol} + 35,5 \text{ g/mol} \\ &= 36,5 \text{ g/mol}\end{aligned}$$

Molaritas HCl 37% :

$$\begin{aligned}\text{M HCl } 37\% &= \frac{\rho \text{ HCl } 37\% \times \% \times 10}{\text{Mr}} \\ &= \frac{1,18 \text{ g/mL} \times 37\% \times 10}{36,5 \text{ g/mol}} \\ &= 12 \text{ M}\end{aligned}$$

b. Perhitungan Larutan HCl 1 M

Diketahui :

Molaritas 2 = 1 M

Volume 2 = 100 mL

Pengenceran HCl 12 M menjadi 1 M :

$$\begin{aligned}M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ 12 \text{ M} \times V_1 &= 1 \text{ M} \times 100 \text{ mL} \\ &= \frac{1 \text{ M} \times 100 \text{ mL}}{12 \text{ M}} \\ &= 8,3 \text{ mL} \approx 8 \text{ mL}\end{aligned}$$

2. Pembuatan Larutan Natrium Aluminat

a. Perhitungan Mol Al pada Rasio Si/Al

Diketahui :

Massa FA = 10 gram

%w.t SiO₂ = 48,93%

$$\begin{aligned}\text{Mr SiO}_2 &= \text{Ar Si} + 2 \times \text{Ar O} \\ &= 28 \text{ g/mol} + 2(16) \text{ g/mol}\end{aligned}$$

$$= 28 \text{ g/mol} + 32 \text{ g/mol}$$

$$= 60 \text{ g/mol}$$

$$\text{Rasio Si/Al} = 1$$

Perhitungan Massa SiO_2

$$\text{Massa SiO}_2 = \text{Massa Fly Ash} \times \% \text{SiO}_2$$

$$= 10 \text{ gram} \times 48,93\%$$

$$= 4,893 \text{ gram}$$

Perhitungan Mol Si

$$n \text{ Si} = \frac{\text{Massa SiO}_2}{\text{Mr}}$$

$$= \frac{4,893 \text{ gram}}{60 \text{ g/mol}}$$

$$= 0,081 \text{ mol}$$

Perhitungan Mol Al

$$\frac{n \text{ Si}}{n \text{ Al}} = \frac{1}{1}$$

$$\frac{0,081 \text{ mol}}{\text{Mol Al}} = \frac{1}{1}$$

$$\text{Mol Al} = 0,081 \text{ mol} \times 1$$

$$= 0,081 \text{ mol}$$

b. Perhitungan Massa Al(OH)_3

Diketahui :

$$\text{Mr Al(OH)}_3 = \text{Ar Al} + 3 \times \text{Ar O} + 3 \times \text{Ar H}$$

$$= 27 \text{ g/mol} + 3(16) \text{ g/mol} + 3(1) \text{ g/mol}$$

$$27 \text{ g/mol} + 48 \text{ g/mol} + 3 \text{ g/mol}$$

$$= 78 \text{ g/mol}$$

Massa Al(OH)_3 yang diperlukan :

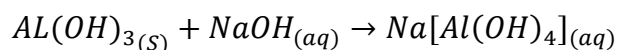
$$\text{Massa Al(OH)}_3 = \text{Mol Al} \times \text{Mr}$$

$$= 0,081 \text{ mol} \times 78 \text{ g/mol}$$

$$= 6,318 \text{ gram}$$

c. Perhitungan NaOH untuk reaksi

Diketahui:



Excess = 5%

M NaOH = 5 M

$$\begin{aligned} Mr \text{ NaOH} &= Ar \text{ Al} + Ar \text{ O} + Ar \text{ H} \\ &= 27 \text{ g/mol} + 16 \text{ g/mol} + 1 \text{ g/mol} \\ &= 44 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

Perbandingan NaOH dan $Al(OH)_3 = 1:18$

Mencari Massa NaOH

$$\begin{aligned} n \text{ NaOH} &= n \text{ Al(OH)}_3 \times (1 + \text{excess}) \\ \frac{m}{Mr} \text{ NaOH} &= n \text{ Al(OH)}_3 \times (1 + \text{excess}) \\ m \text{ NaOH} &= n \text{ Al(OH)}_3 \times (1 + \text{excess}) \times Mr \text{ NaOH} \\ &= 0,081 \text{ mol} \times (1 + 0,05) \times 44 \text{ g/mol} \\ &= 3,842 \text{ gram} \end{aligned}$$

Mencari Volume NaOH

$$\begin{aligned} M &= \frac{m}{Mr} \times \frac{1000}{V} \\ 5 \text{ M} &= \frac{3,842 \text{ gram}}{44 \text{ g/mol}} \times \frac{1000}{V} \\ V &= 17,01 \text{ mL} \approx 17 \text{ mL} \end{aligned}$$

3. Pembuatan Larutan H_2SO_4 0,1 M

e. Phitungan Molaritas H_2SO_4 98% :

Diketahui

$$\begin{aligned} Mr \text{ H}_2\text{SO}_4 &= 2 \times Ar \text{ H} + Ar \text{ S} + 4 \times Ar \text{ O} \\ &= 2(1) \text{ g/mol} + 32 \text{ g/mol} + 4(16) \text{ g/mol} \\ &= 2 \text{ g/mol} + 32 \text{ g/mol} + 64 \text{ g/mol} \\ &= 98 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

% H_2SO_4 = 98%

$\rho \text{ H}_2\text{SO}_4$ 98% = 1,8361 g/mL

Phitungan Molaritas H_2SO_4 98% :

$$\begin{aligned}
 M \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ 98\%} &= \frac{\rho \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ 98\%} \times \% \times 10}{M_r} \\
 &= \frac{18,361 \text{ g/mL} \times 98\% \times 10}{98 \text{ g/mol}} \\
 &= 1,8 \text{ M}
 \end{aligned}$$

f. Perhitungan H_2SO_4 0,1 M

Diketahui :

Molaritas 1 = 1,8 M

Molaritas 2 = 0,1 M

Volume 1 = 100 mL

Pengenceran H_2SO_4 1,8 M ke 0,1 M

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 1,8 \text{ M} \times V_1 &= 1 \text{ M} \times 100 \text{ mL} \\
 &= \frac{0,1 \text{ M} \times 100 \text{ mL}}{1,8 \text{ M}} \\
 &= 5,5 \text{ mL} \approx 6 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

4. Pembuatan Larutan NaBH_4 1 M

$M \text{ NaBH}_4 = 1 \text{ M}$

$$\begin{aligned}
 M_r \text{ NaBH}_4 &= A_r \text{ Na} + A_r \text{ B} + 4 \times A_r \text{ H} \\
 &= 23 \text{ g/mol} + 11 \text{ g/mol} + 4(1) \text{ g/mol} \\
 &= 23 \text{ g/mol} + 11 \text{ g/mol} + 4 \text{ g/mol} \\
 &= 38 \text{ g/mol}
 \end{aligned}$$

Volume $\text{NaBH}_4 = 50 \text{ mL}$

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{m}{M_r} \times \frac{1000}{V} \\
 1 \text{ M} &= \frac{m}{38 \text{ g/mol}} \times \frac{1000}{50 \text{ mL}} \\
 m &= 1,9 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

5. Pembuatan Larutan Artifisial Cu(II)

a. Pembuatan Larutan Induk

Larutan induk 500 ppm $\rightarrow$ 0,5 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dilarutkan hingga 1 L aquadest

$M_r \text{ Cu} = 64 \text{ g/mol}$

$$\begin{aligned} M_r \text{ CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} &= A_r \text{ Cu} + A_r \text{ S} + 4 \times A_r \text{ O} + 5[(2 \times A_r \text{ H}) + (1 \times A_r \text{ O})] \\ &= 64 \text{ g/mol} + 32 \text{ g/mol} + 4(16) \text{ g/mol} + 5[2(1) \text{ g/mol} + 1(16) \text{ g/mol}] \\ &= 250 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

n Cu dalam 1 gram :

$$\begin{aligned} n \text{ Cu} &= \frac{m}{M_r \text{ Cu}} \\ &= \frac{0,5 \text{ g}}{64 \text{ g/mol}} \\ &= 0,00781 \text{ mol} \end{aligned}$$

Massa $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dengan kandungan Cu 00 ppm :

$$\begin{aligned} \text{Massa} &= n \text{ Cu} \times M_r \text{ CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} \\ &= 0,00781 \text{ mol} \times 250 \text{ g/mol} \\ &= 1,95 \text{ gram} \end{aligned}$$

***Catatan penyimpanan:** letakkan pada lemari bahan kimia pada suhu ruang 25°C pada botol kaca tertutup rapat.

b. Pembuatan Larutan Standar

1) Pembuatan Larutan Standar 50 ppm

$$\begin{aligned} M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ 500 \text{ ppm} \times V_1 &= 50 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\ V_1 &= \frac{50 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}}{500 \text{ ppm}} \\ &= 10 \text{ mL} \end{aligned}$$

2) Pembuatan Larutan Standar 100 ppm

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

$$\begin{aligned}
 500 \text{ ppm} \times V_1 &= 100 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{100 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}}{500 \text{ ppm}} \\
 &= 20 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

3) Pembuatan Larutan Standar 150 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 500 \text{ ppm} \times V_1 &= 150 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{150 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}}{500 \text{ ppm}} \\
 &= 30 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

4) Pembuatan Larutan Standar 200 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 500 \text{ ppm} \times V_1 &= 200 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{200 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}}{500 \text{ ppm}} \\
 &= 40 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

5) Pembuatan Larutan Standar 250 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 500 \text{ ppm} \times V_1 &= 250 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{250 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}}{500 \text{ ppm}} \\
 &= 50 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

6) Pembuatan Larutan Standar 300 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 500 \text{ ppm} \times V_1 &= 300 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{300 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}}{500 \text{ ppm}} \\
 &= 60 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

7) Pembuatan Larutan Standar 350 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 500 \text{ ppm} \times V_1 &= 350 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \frac{350 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}}{500 \text{ ppm}} \\
 &= 70 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

8) Pembuatan Larutan Standar 400 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 500 \text{ ppm} \times V_1 &= 200 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{200 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}}{500 \text{ ppm}} \\
 &= 80 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

9) Pembuatan Larutan Standar 450 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 500 \text{ ppm} \times V_1 &= 200 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{200 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}}{500 \text{ ppm}} \\
 &= 90 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

10) Pembuatan Larutan Standar 11 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 100 \text{ ppm} \times V_1 &= 11 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{11 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}}{100 \text{ ppm}} \\
 &= 11 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

11) Pembuatan Larutan Standar 9 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 100 \text{ ppm} \times V_1 &= 9 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{9 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}}{100 \text{ ppm}} \\
 &= 9 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

12) Pembuatan Larutan Standar 7 ppm

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 100 \text{ ppm} \times V_1 &= 7 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{7 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}}{100 \text{ ppm}}
 \end{aligned}$$

$$= 7 \text{ mL}$$

13) Pembuatan Larutan Standar 5 ppm

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

14) Pembuatan Larutan Standar 3 ppm

$$\begin{aligned} M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ 100 \text{ ppm} \times V_1 &= 3 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL} \\ V_1 &= \frac{3 \text{ ppm} \times 100 \text{ mL}}{100 \text{ ppm}} \\ &= 3 \text{ mL} \end{aligned}$$

15) Pembuatan Larutan Standar 1 ppm

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

6. Pembuatan Larutan NH_4OH 5%

Diketahui :

$$\% \text{NH}_4\text{OH 1} = 25\%$$

$$\% \text{NH}_4\text{OH 2} = 5\%$$

$$\text{Volume 2} = 150 \text{ mL}$$

Pengenceran larutan NH_4OH 5%

$$\begin{aligned} M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ 1,8 \text{ M} \times V_1 &= 1 \text{ M} \times 150 \text{ mL} \\ &= \frac{5\% \times 100 \text{ mL}}{25\%} \end{aligned}$$

$$= 30 \text{ mL}$$

***Catatan penyimpanan:** letakkan pada lemari bahan kimia pada suhu ruang 25°C pada botol kaca tertutup rapat.

7. Pembuatan Larutan Na-dietilditiokarbamat 1%

Diketahui :

$$\% \text{Na-dietil} = 1\%$$

$$\text{Volume} = 150 \text{ mL}$$

Massa Na-dietilditiokarbamat :

$$\% \text{ persentase (b/v)} = \frac{\text{Massa zat terlarut (g)}}{\text{Volume larutan (mL)}} \times 100\%$$

$$1\% = \frac{\text{Massa}}{150 \text{ mL}} \times 100\%$$

$$\text{Massa} = 1,5 \text{ g}$$

***Catatan penyimpanan:** didinginkan pada suhu 2-8°C pada botol gelap (amber), waktu simpan singkat sebaiknya dibuat langsung sebelum eksperimen.

8. Pembuatan Larutan NaOH 1 M

Diketahui :

$$\begin{aligned} \text{Mr NaOH} &= \text{Ar Al} + \text{Ar O} + \text{Ar H} \\ &= 23 \text{ g/mol} + 16 \text{ g/mol} + 1 \text{ g/mol} \\ &= 40 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

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

$$\text{Volume} = 100 \text{ mL}$$

Massa NaOH

$$\text{M} = \frac{m}{\text{Mr}} \times \frac{1000}{V}$$

$$1 \text{ M} = \frac{m}{40 \text{ g/mol}} \times \frac{1000}{100}$$

$$V = 4 \text{ gram}$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN 2

HASIL UJI XRF

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Preliminary Report of Analysis

Report No : SCI-FABA-009
 Customer : PT. POMI
 Date of Sampling (User) : 02-Des-25
 Date of Receive : 03/12/2025
 Date of Analysis : 04/12/2025
 Ref No :
 Standard Method : ASTM
 PIC CCR P3 : SAIFUL
 PIC MCR P7 : JIWO
 PIC MCR P8 : HOFI

Sample Code				FLY ASH P3 + P7	FLY ASH P 8	BOTTOM ASH P3	BOTTOM ASH P7	BOTTOM ASH P8
				02 Des 2025	02 Des 2025	02 Des 2025	02 Des 2025	02 Des 2025
Analysis	Standard Method	Unit	Basis	Result	Result	Result	Result	Result
LOI	ASTM D7348-13	%	AR	0.33	0.30	0.40	2.40	2.22
SO ₃	ASTM D5016-16	%	DB	1.28	1.21	0.141	0.350	0.349
SiO ₂	ASTM D3682-21	%	DB	48.93	47.96	53.45	50.2	49.73
Al ₂ O ₃	ASTM D3682-21	%	DB	23.34	23.76	19.59	17.9	18.74
Fe ₂ O ₃	ASTM D3682-21	%	DB	9.02	8.9	13.13	12.58	11.66
CaO	ASTM D3682-21			7.02	7.7	5.3	7.91	8.49
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ +CaO	ASTM D3682-21	%	DB	89.59	89.53	91.61	88.94	88.97
Unburned Carbon	ASTM D6316-17	%	AR	0.315	0.286	0.375	1.93	1.96
Moisture Content	ASTM D3173M-17a	%	-	0.02	0.02	17.25	21.82	27.32
Fines +75 micron	ASTM D4749-87 (R2019)e1	%	-	5.28	6.32	98.35	96.35	98.48
Fines -75 micron	ASTM D4749-87 (R2019)e1	%	-	94.72	93.68	1.65	3.65	1.52

Note :

This report is issued without prejudice. Our liability is limited to the exercise of due care and diligence. This report is not intended to relieve the buyers and sellers from their contractual obligations and only reflects our findings at the time, place and date of attendance only.
 All services are rendered in accordance with Bureau Veritas Commodities Division General Conditions of Service, available on request at https://www.bureauveritas.com/terms_and_conditions

L.5.1 Perhitungan Si/Al Eksisting

Diketahui :

$$\%SiO_2 = 48,93\%$$

$$Mr SiO_2 = 60,084$$

$$\%Al_2O_3 = 23,34\%$$

$$Mr Al_2O_3 = 101,961$$

Perhitungan Si/Al

$$\begin{aligned} Si/Al &= \frac{\%SiO_2 / Mr SiO_2}{2(\%Al_2O_3 / Mr Al_2O_3)} \\ &= \frac{\frac{48,93\%}{60, g/mol}}{2(\frac{23,34\%}{101,961 g/mol})} \\ &= 1,78 \end{aligned}$$

Jadi, rasio si/al eksisting pada fly ash adalah sebesar 1,78 yang menunjukkan bahwa komposisi bahan dengan kandungan silika relatif tinggi terhadap alumina, namun masih berada dalam kisaran yang berpotensi dalam pembentukan zeolit. Penyesuaian komposisi alumina dapat disesuaikan dengan penambahan natrium aluminat yang terbuat dari $Al(OH)_3$ yang direaksikan dengan NaOH *exces*.

LAMPIRAN 3

HASIL UJI XRD

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Hasil uji XRD Zeolit

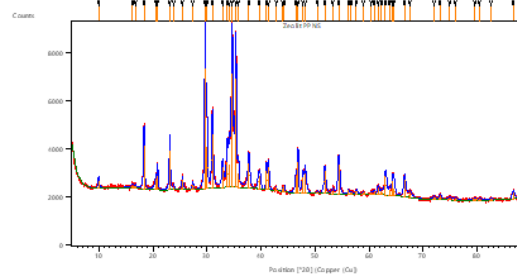
Date: 23/02/2026 Time: 15:38:04 UBAYA Life Science Integrated Facilities

Anchor Scan Parameters

Dataset Name: Zeolita PPNs
File name: D:\Eksternal\2026\No. Order 044\Zeolita PPNs\Zeolita PPNs
Sample Identification: Zeolita PPNs
Measurement Start Date/Time: 23/02/2026 14:42:31
Operator: Instrument
Raw Data Origin: XRD measurement (-XRDML)
Scan Axis: Gonio
Start Position [°2θ]: 5,0109
End Position [°2θ]: 89,9749
Step Size [°2θ]: 0,0220
Scan Step Time [s]: 29,0700
Scan Type: Continuous
PSD Mode: Scanning
PSD Length [°2θ]: 5,54
Offset [°2θ]: 0,0000
Divergence Slit Type: Fixed
Divergence Slit Size [°]: 0,4584
Specimen Length [mm]: 10,00
Measurement Temperature [°C]: 25,00
Anode Material: Cu
Intended Wavelength Type: K-α1
K-α1 [Å]: 1,54060
K-α2 [Å]: 1,54443
K-β1 [Å]: 1,39225
K-β2 [Å]: 1,38113
K-β3 [Å]: 1,39261
K-A2 / K-A1 Ratio: 0,50000
K-Alpha2 Line Shift: 0,00000
K Absorption Edge: 1,37868
Generator Settings: 15 mA, 40 kV
Diffractometer Type: 100090676
Diffractometer Number: 0
Goniometer Radius [mm]: 145,00
Dist. Focus to Sample [mm]: 95,00
Incident Beam Monochromator No: 0
Spinning: Yes

Date: 23/02/2026 Time: 15:38:04 UBAYA Life Science Integrated Facilities

Graphics



Pos. [°2θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
9,9864	314,68	0,2735	8,85020	6,29
16,2666	115,88	0,7455	5,44469	2,32
16,7801	83,46	0,1239	5,27924	1,67
18,3636	1816,78	0,2312	4,82740	36,33
20,5847	429,54	0,3355	4,31127	8,59
20,8684	596,90	0,2090	4,25329	11,94
23,1319	1645,15	0,1891	3,84197	32,90
23,8760	129,82	0,1787	3,72390	2,60
25,4666	414,87	0,1840	3,49479	8,30
27,3842	231,19	0,2569	3,25427	4,62
29,684	5000,97	0,2289	3,00717	100,00
30,0150	1731,85	0,2580	2,97475	34,67
31,0256	2252,29	0,3039	2,88012	45,04
32,9140	839,01	0,1914	2,71906	16,78
33,7622	1084,26	0,3265	2,65267	21,68
34,1185	995,91	0,1607	2,62578	19,91
34,6518	4749,62	0,2957	2,58657	94,97
35,3515	4518,67	0,2118	2,53697	90,36
35,8395	597,44	0,1708	2,50354	11,95
37,7430	1035,12	0,4074	2,38153	20,70
39,6780	528,42	0,5862	2,26974	10,57
41,0222	769,48	0,2677	2,19841	15,39

Date: 23/02/2026 Time: 15:38:04 UBAYA Life Science Integrated Facilities

41,3910	945,82	0,2002	2,17967	18,91
42,8161	172,85	0,1016	2,11036	3,46
44,0185	120,52	0,2559	2,05546	2,41
44,3377	230,83	0,1239	2,04141	4,62
46,4851	707,89	0,2773	1,95198	14,15
46,8311	1282,16	0,2312	1,93836	25,64
47,7400	653,89	0,2278	1,90356	13,08
48,1807	841,84	0,2400	1,88717	16,83
50,4541	71,70	0,2773	1,80734	1,43
51,8075	931,85	0,2724	1,76326	18,63
53,2837	131,09	0,4995	1,71784	2,62
54,3760	1226,71	0,3727	1,68588	24,53
56,2471	168,81	0,1527	1,63416	3,38
56,6986	81,55	0,3671	1,62221	1,63
57,6282	146,44	0,3746	1,59823	2,93
58,9328	88,52	0,2640	1,56593	1,77
60,3867	103,24	0,2321	1,53165	2,06
60,9137	143,14	0,2505	1,51966	2,86
61,6748	256,71	0,3504	1,50272	5,13
62,3374	128,57	0,3127	1,48833	2,57
63,0518	776,55	0,3366	1,47317	15,53
63,7438	199,60	0,1902	1,45884	3,99
64,3230	608,09	0,3070	1,44709	12,16
64,5843	308,99	0,3786	1,44187	6,18
66,5627	707,27	0,3571	1,40373	14,14
67,5387	201,30	0,4866	1,38580	4,03
72,0422	112,69	0,4921	1,30985	2,25
73,1210	155,21	0,4566	1,29316	3,10
74,9142	85,67	0,6749	1,26659	1,71
75,9604	95,41	0,5205	1,25173	1,91
79,5302	60,80	0,9173	1,20427	1,22
80,4061	70,55	0,2992	1,19334	1,41
82,5793	72,71	0,3772	1,16736	1,45
86,6303	278,80	0,4282	1,12287	5,57

L.4.1 Identifikasi Puncak Utama Zeolit X

Pos. [°2θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
9,9	314,68	0,2735	8,85	6,29
16,2	115,88	0,7455	5,44	2,32
18,36	1816,78	0,2312	4,82	36,33
20,5	429,54	0,335	4,31	8,59
31,02	2252,29	0,303	2,98	45,04

L.4.2 Parameter Kisi Zeolit X

Perhitungan parameter kisi digunakan untuk menentukan ukuran dimensi sel satuan (unit cell) pada suatu struktur kristal, tujuannya dapat menentukan jenis zeolit yang terbentuk. Persamaan parameter kisi disajikan berikut ini,

$$A = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

Dengan:

- Lattice (A) = Parameter kisi (Å)
d-spacing (d) = Jarak antar bidang (Å)
hkl = Indeks miller

Zeolit X menurut standardar JCPDS 38-0237 memiliki puncak pada 6,1°; 9,97°; 11,76°; 15,4°; 18,46°; 20,1°; 26,6°; 30,9° dengan indeks hkl (111), (220), (311), (331), dan (533) (Pei et al., 2022; Zheng et al., 2022). Berikut merupakan tabel penyesuaian antara data indeks miller dengan hasil XRD zeolit. Data tersebut disajikan pada tabel dibawah ini,

Pos. [°2θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	Indeks Miller
9,9	314,68	0,2735	8,85	6,29	220
16,2	115,88	0,7455	5,44	2,32	311
18,36	1816,78	0,2312	4,82	36,33	331
20,5	429,54	0,335	4,31	8,59	533
31,02	2252,29	0,303	2,98	45,04	751

$$A = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

Pos. 9,9°2θ

$$A = 8,85\sqrt{2^2 + 2^2 + 0^2}$$

$$A = 8,85\sqrt{8}$$

$$A = 25,03 \text{ Å}$$

Pos. 20,5°2θ

$$A = 4,31\sqrt{5^2 + 3^2 + 3^2}$$

$$A = 4,31\sqrt{43}$$

$$A = 24,38 \text{ Å}$$

Pos. 16,2°2θ

$$A = 5,54\sqrt{3^2 + 1^2 + 1^2}$$

$$A = 5,54\sqrt{11}$$

$$A = 23,71 \text{ Å}$$

Pos. 31,02°2θ

$$A = 2,98\sqrt{7^2 + 5^2 + 1^2}$$

$$A = 2,98\sqrt{75}$$

$$A = 25,81 \text{ Å}$$

Pos. 18,36°2θ

$$A = 4,82\sqrt{3^2 + 3^2 + 1^2}$$

$$A = 4,82\sqrt{19}$$

$$A = 25,05 \text{ Å}$$

Jadi, diperoleh parameter kisi rata rata zeolit sebesar 23,72 Å. Jadi, untuk hasil parameter kisi umumnya 25,07 Å

L.4.3 Ukuran Kristal

Perhitungan ukuran kristal digunakan untuk menentukan ukuran domain kristal yang tersusun dalam suatu material. Data yang digunakan merupakan posisi puncak tertinggi dan FWHM dari data pengujian XRD. Berikut merupakan perhitungan ukuran kristal melalui lamngkah berikut:

1. Puncak tertinggi derajat 2θ dan FWHM

Pos. [°2θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
9,9	314,68	0,2735	8,85	6,29
16,2	115,88	0,7455	5,44	2,32
18,36	1816,78	0,2312	4,82	36,33
20,5	429,54	0,335	4,31	8,59
31,02	2252,29	0,303	2,98	45,04

2. Konversi nilai FWHM menjadi radian

$$\beta(\text{radian}) = \frac{FWHM}{2}$$

$$\theta(\text{radian}) = \frac{\theta}{180} \times \pi$$

Dengan:

FWHM = Nilai intensitas dari titik tertinggi

β = Indeks kristalinitas

θ = Nilai intensitas dari titik ketinggian kedua

Berikut merupakan langkah dalam konversi nilai FWHM pada titik tertinggi menjadi sudut radian dalam menentukan ukuran kristal yang terbentuk dalam sampel. Hasil konversi dipaparkan sebagai berikut,

Pos. 9,9°2 θ

$$\beta(\text{radian}) = \frac{FWHM}{2}$$

$$\beta(\text{radian}) = \frac{0,273^\circ}{2}$$

$$\beta(\text{radian}) = 0,1365^\circ$$

Pos. 20,35°2 θ

$$\beta(\text{radian}) = \frac{FWHM}{2}$$

$$\beta(\text{radian}) = \frac{0,335^\circ}{2}$$

$$\beta(\text{radian}) = 0,1675^\circ$$

Pos. 16,2°2 θ

$$\beta(\text{radian}) = \frac{FWHM}{2}$$

$$\beta(\text{radian}) = \frac{0,745^\circ}{2}$$

$$\beta(\text{radian}) = 0,3725^\circ$$

Pos. 31,02°2 θ

$$\beta(\text{radian}) = \frac{FWHM}{2}$$

$$\beta(\text{radian}) = \frac{0,303^\circ}{2}$$

$$\beta(\text{radian}) = 0,1515^\circ$$

Pos. 18,36°2 θ

$$\beta(\text{radian}) = \frac{FWHM}{2}$$

$$\beta(\text{radian}) = \frac{0,231^\circ}{2}$$

$$\beta(\text{radian}) = 0,1155^\circ$$

Jadi, nilai β pada puncak tertinggi secara berturut-turut adalah 0,1365°; 0,3725°; 0,1155°; 0,1675°; 0,1515°. Berikut merupakan langkah dalam

konversi nilai FWHM pada titik tertinggi kedua menjadi sudut radian dalam menentukan ukuran kristal yang terbentuk dalam sampel. Hasil konversi dipaparkan sebagai berikut,

Pos. 9,9°2θ

$$\theta \text{ (radian)} = \frac{\theta}{180} \times \pi$$

$$\theta \text{ (radian)} = \frac{0,1365^\circ}{180} \times \pi$$

$$\theta \text{ (radian)} = 0,00238 \text{ rad}$$

Pos. 20,35°2θ

$$\theta \text{ (radian)} = \frac{\theta}{180} \times \pi$$

$$\theta \text{ (radian)} = \frac{0,1675^\circ}{180} \times \pi$$

$$\theta \text{ (radian)} = 0,00292 \text{ rad}$$

Pos. 16,2°2θ

$$\theta \text{ (radian)} = \frac{\theta}{180} \times \pi$$

$$\theta \text{ (radian)} = \frac{0,3725^\circ}{180} \times \pi$$

$$\theta \text{ (radian)} = 0,00650 \text{ rad}$$

Pos. 31,02°2θ

$$\theta \text{ (radian)} = \frac{\theta}{180} \times \pi$$

$$\theta \text{ (radian)} = \frac{0,1515^\circ}{180} \times \pi$$

$$\theta \text{ (radian)} = 0,00264 \text{ rad}$$

Pos. 18,36°2θ

$$\theta \text{ (radian)} = \frac{\theta}{180} \times \pi$$

$$\theta \text{ (radian)} = \frac{0,1155^\circ}{180} \times \pi$$

$$\theta \text{ (radian)} = 0,00202 \text{ rad}$$

Jadi, nilai θ dalam radian pada puncak tertinggi secara berturut turut adalah 0,00238 rad; 0,00650 rad; 0,00202 rad; 0,00292 rad; dan 0,00264 rad

3. Persamaan Scherrer

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

Dengan:

$$K = 0,9 \text{ (faktor pembentuk)}$$

$$\lambda = 1,5406 \text{ \AA (Cu K}\alpha\text{ radiation)}$$

β = FWHM dalam radian
 θ = Bragg angle dalam radian

Berikut merupakan langkah dalam Persamaan Scherrer yang dilakukan pada 4 titik puncak utama. Hasil konversi dpaparkan sebagai berikut,

Titik 1

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 1,5406}{0,00238 \text{ rad} \times \cos (0,218)}$$

$$D = 58,5 \text{ nm}$$

Titik 4

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 1,5406}{0,00292 \text{ rad} \times \cos (0,246)}$$

$$D = 48,2 \text{ nm}$$

Titik 2

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 1,5406}{0,00650 \text{ rad} \times \cos (0,206)}$$

$$D = 21,6 \text{ nm}$$

Titik 5

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 1,5406}{000264 \text{ rad} \times \cos (0,225)}$$

$$D = 54,8 \text{ nm}$$

Titik 3

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 1,5406}{0,00202 \times \cos (0,183)}$$

$$D = 69,7 \text{ nm}$$

Jadi, berdasarkan persamaan Scherrer didapatkan hasil pada 5 titik yakni 50,6 nm.

L.4.4 Identifikasi Puncak Utama Zeolit A

Pos. [°2 θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2 θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	Indeks Miller	Nilai hkl
16,2	115,88	0,74	5,44	2,32	420	20
20,8	496,9	0,21	4,25	11,94	442	36
30,01	1733,85	0,25	2,97	34,67	644	68
34,1	995,91	0,161	2,62	19,91	664	88

L.4.5 Parameter Kisi Zeolit A

Pos. [°2θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	Indeks Miller	Nilai hkl	Parameter Kisi [Å]
16,2	115,88	0,74	5,44	2,32	420	20	24,32
20,8	496,9	0,21	4,25	11,94	442	36	25,5
30,01	1733,85	0,25	2,97	34,67	644	68	24,49
34,1	995,91	0,161	2,62	19,91	664	88	24,57
Rata Rata Parameter Kisi							24,72

Jadi, berdasarkan persamaan diperoleh parameter kisi $a = b = c$ pada zeolit A didapatkan nilai sebesar 24,72 Å.

L.4.6 Ukuran Kristalit Zeolit A

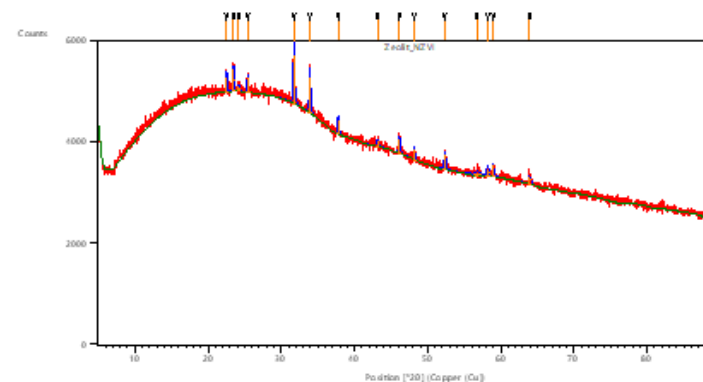
Pos. [°2θ]	FWHM Left [°2θ]	Indeks Miller	Nilai hkl	Parameter Kisi [Å]	β (rad)	θ (rad)	ukuran kristal (nm)
16,2	0,74	420	20	24,32	0,01292	0,141	10,85
20,8	0,21	442	36	25,5	0,00367	0,182	38,70
30,01	0,25	644	68	24,49	0,00436	0,262	33,10
34,1	0,161	664	88	24,57	0,00281	0,298	51,50
Rata-Rata Ukuran Kristalit							33,53

Jadi, berdasarkan persamaan Scherrer didapatkan rata-rata ukuran kristalit pada 4 titik yakni 33,54 nm.

Anchor Scan Parameters

Dataset Name [ZepiA_N2VI](#)
 File name D:\Eksternal\2026\No. Order 099\ZepiA_N2VI-XRDprl
 Sample Identification [ZepiA@N2VI](#)
 Measurement Start Date/Time 23/04/2026 13:53:11
 Operator
 Raw Data Origin XRD measurement ([*.XRDML](#))
 Scan Axis Gonio
 Start Position [2θ] 5,0109
 End Position [2θ] 89,9749
 Step Size [2θ] 0,0220
 Scan Step Time [s] 29,0700
 Scan Type Continuous
 PSD Mode Scanning
 PSD Length [2θ] 5,54
 Offset [2θ] 0,0000
 Divergence Slit Type Fixed
 Divergence Slit Size [$^{\circ}$] 0,4584
 Specimen Length [mm] 10,00
 Measurement Temperature [$^{\circ}\text{C}$] 25,00
 Anode Material Cu
 Intended Wavelength Type K- α 1
 K- α 1 [Å] 1,54060
 K- α 2 [Å] 1,54443
 K- β 1 [Å] 1,39225
 K- β 2 [Å] 1,38113
 K- β 3 [Å] 1,39261
 K-A2 / K-A1 Ratio 0,50000
 K-Alpha2 Line Shift 0,00000
 K Absorption Edge 1,37868
 Generator Settings 15 mA, 40 kV
 Diffractometer Type 100030676
 Diffractometer Number 0
 Goniometer Radius [mm] 145,00
 Dist. Focus-Detector Slit [mm] 95,00
 Incident Beam Monochromator No
 Spinning Yes

Graphics



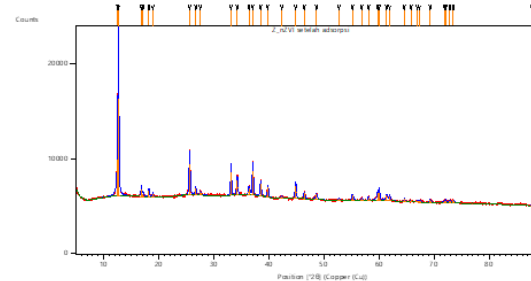
Peak List

Pos. [2θ]	Height [cps]	FWHM Left [2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
22,5472	295,02	0,1361	3,94026	30,93
23,5086	427,56	0,1004	3,78126	44,82
24,2085	97,48	0,2245	3,67349	10,22
25,4367	293,81	0,1035	3,49883	30,80
31,7682	953,94	0,1915	2,81447	100,00
33,9276	706,04	0,1564	2,64011	74,01
37,7989	277,50	0,1879	2,37814	29,09
43,1800	107,00	0,2157	2,09342	11,22
46,1610	299,87	0,1577	1,96493	31,44
48,2170	233,72	0,1004	1,88583	24,50
52,3658	295,81	0,2222	1,74577	31,01
56,7596	61,56	0,9823	1,62061	6,45
58,2038	149,88	0,2566	1,58379	15,71
59,0113	253,86	0,1169	1,56403	26,61
63,9325	156,36	0,1963	1,45499	16,39

Anchor Scan Parameters

Dataset Name Z:\ZV\setelah adsorpsi
File name D:\Eksternal\2026\No. Order 133\Z_\ZV\setelah adsorpsi.xrdm
Sample Identification Z@\ZV\setelah adsorpsi
Measurement Start Date/Time 12/05/2026 13:14:46
Operator Instrument
Raw Data Origin XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis Goni
Start Position [°2 θ] 5,0109
End Position [°2 θ] 89,9749
Step Size [°2 θ] 0,0220
Scan Step Time [s] 20,0700
Scan Type Continuous
PSD Mode Scanning
PSD Length [°2 θ] 5,54
Offset [°2 θ] 0,0000
Divergence Slit Type Fixed
Divergence Slit Size [°] 0,4584
Specimen Length [mm] 10,00
Measurement Temperature [°C] 25,00
Anode Material Cu
Intended Wavelength Type K- α 1
K- α 1 [Å] 1,54060
K- α 2 [Å] 1,54443
K- β 1 [Å] 1,39225
K- β 2 [Å] 1,38113
K- β 3 [Å] 1,39261
K- α 2 / K- α 1 Ratio 0,50000
K- α 2 Line Shift 0,00000
K Absorption Edge 1,37868
Generator Settings 15 mA, 40 kV
Diffractometer Type 100030676
Diffractometer Number 0
Goniometer Radius [mm] 145,00
Dist. Focus-Divert. slit [mm] 95,00
Incident Beam Monochromator No
Spinning Yes

Graphics



Peak List

Pos. [°2 θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2 θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12,5603	3868,55	0,2924	7,04179	37,68
12,7093	10266,62	0,1870	6,95954	100,00
16,8479	799,20	0,1556	5,25813	7,78
17,1557	298,18	0,1825	5,16448	2,90
18,2458	628,71	0,1276	4,85832	6,12
18,9371	320,86	0,1463	4,68248	3,13
25,5991	3317,29	0,2161	3,47700	32,31
26,7196	682,13	0,1122	3,33369	6,64
27,5407	343,41	0,2128	3,23614	3,34
33,1085	2530,05	0,1761	2,70353	24,64
34,2216	1497,86	0,2231	2,61810	14,59
36,3957	652,83	0,2808	2,46654	6,36
37,0438	2627,74	0,2119	2,42486	25,59
38,4990	1343,81	0,1695	2,33649	13,09
39,7830	1009,10	0,1482	2,26399	9,83
42,3017	208,27	0,2389	2,13483	2,03
44,8136	1309,65	0,2571	2,02082	12,76
46,4149	621,74	0,1792	1,95477	6,06
48,6015	573,26	0,1895	1,87181	5,58
52,6862	207,95	0,1818	1,73590	2,03
55,1532	529,31	0,1838	1,66395	5,16
56,8462	244,06	0,1939	1,61835	2,38

58,0535	323,39	0,2323	1,58753	3,15
58,7517	752,15	0,2198	1,54640	7,33
59,9936	743,88	0,1519	1,54075	7,25
61,3363	579,92	0,1877	1,51020	5,65
61,9101	444,04	0,1440	1,49757	4,33
64,5615	384,17	0,1067	1,44232	3,74
65,7764	230,03	0,1089	1,41859	2,24
66,9234	166,68	0,1452	1,39704	1,62
67,3359	156,78	0,2723	1,38948	1,53
69,2508	269,75	0,2842	1,35566	2,63
71,8966	183,29	0,2011	1,31214	1,79
72,0768	129,43	0,2082	1,30930	1,26
72,8376	196,21	0,3170	1,29749	1,91
73,4426	223,56	0,1400	1,28829	2,18
87,7228	217,46	0,1412	1,11168	2,12

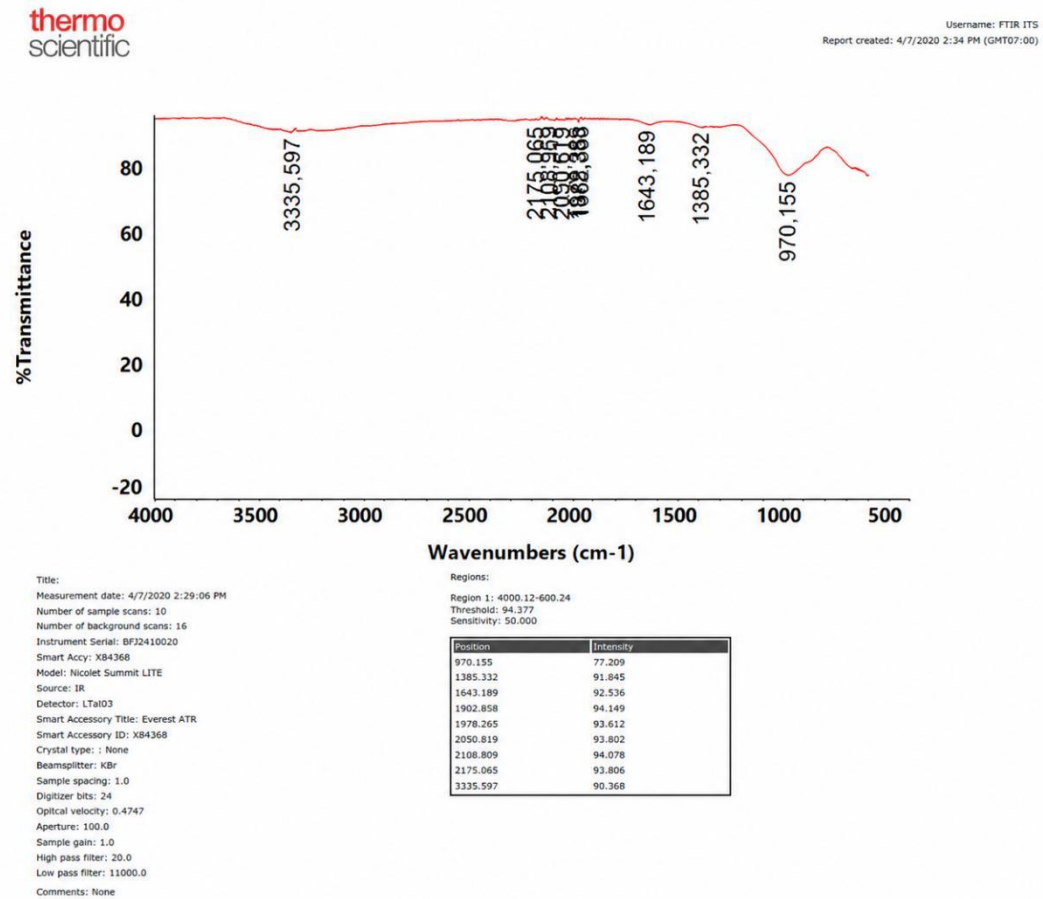
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

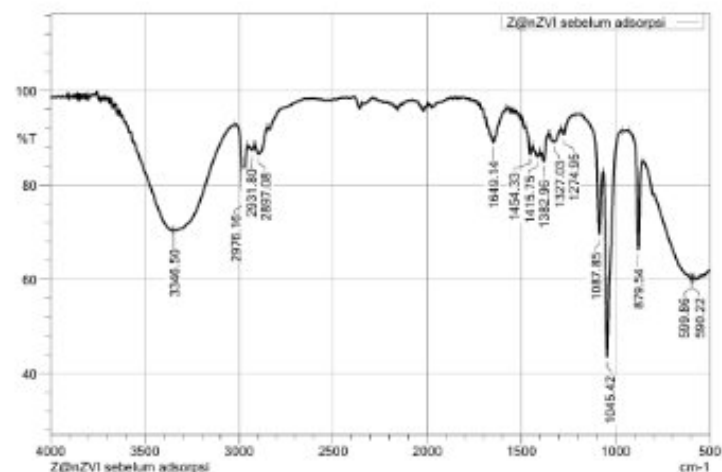
LAMPIRAN 4

HASIL UJI FTIR

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Hasil Uji FTIR Zeolit

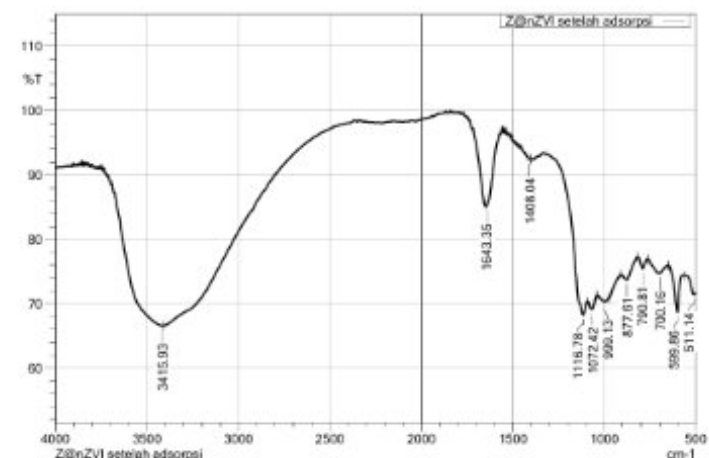




D:\K2\ZnZVI sebelum adsorpsi1.spc
Zn@nZVI sebelum adsorpsi

Item		Value
2	Sample name	Zn@nZVI sebelum adsorpsi
3	Sample ID	18853328
4	Option	CA75
5	Intensity Mode	% Transmittance
6	Apodization	Happ-Genzel
9	No. of Scans	43
10	Resolution	4 cm⁻¹

Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	590.22	60.03	0.11	592.15	588.36	230.790	0.318
2	599.86	60.02	0.12	606.51	597.33	860.176	0.858
3	879.54	66.24	20.86	895.48	854.47	1236.402	290.224
4	1045.42	43.41	41.21	1099.84	988.27	2463.529	1197.808
5	1087.85	60.66	18.33	1196.22	1046.84	1439.365	1191.484
6	1274.95	30.06	1.76	1288.42	1215.12	495.400	9.890
7	1327.03	89.14	2.06	1354.83	1288.43	943.691	79.596
8	1382.96	61.86	2.47	1400.32	1334.53	576.920	58.020
9	1415.75	85.90	1.54	1440.83	1400.32	532.739	32.267
10	1454.33	89.48	3.29	1479.40	1440.83	417.612	49.585
11	1649.14	69.03	2.08	1668.78	1676.70	568.876	60.967
12	2997.08	36.96	2.86	2916.37	2848.86	794.107	124.005
13	2931.80	87.31	1.02	2953.32	2916.37	443.520	17.816
14	2976.16	77.70	12.27	3076.87	2933.02	841.988	242.722



D:\K2\ZnZVI setelah adsorpsi2.spc
Zn@nZVI setelah adsorpsi

Item		Value
2	Sample name	Zn@nZVI setelah adsorpsi
3	Sample ID	18853328
4	Option	K0
5	Intensity Mode	% Transmittance
6	Apodization	Happ-Genzel
9	No. of Scans	43
10	Resolution	4 cm⁻¹

Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	511.14	71.43	0.80	555.56	466.54	1515.852	6.475
2	596.86	68.71	0.31	653.21	567.37	2237.296	176.241
3	700.16	74.75	1.83	783.81	696.91	2793.160	99.107
4	790.81	75.50	1.83	817.82	763.81	1275.826	48.538
5	877.61	73.75	1.75	939.47	817.82	2257.216	76.135
6	996.13	70.36	0.99	1039.63	976.94	1864.816	26.777
7	1072.42	69.14	1.59	1091.71	1028.63	1583.878	45.448
8	1118.78	69.27	4.03	1319.31	1091.71	3794.726	1390.772
9	1608.04	92.80	0.15	1619.61	1604.18	115.262	1.787
10	1643.35	85.23	0.43	1645.28	1676.34	565.865	26.876
11	3415.03	69.58	0.02	3999.83	3408.22	7981.732	1206.037

LAMPIRAN 5
HASIL UJI PH POINT ZERO CHARGE

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

L.5.1 Identifikasi pH Point Zero Charge

Identifikasi pH *point zero charge* (pHpzc) pada komposit Zeolit Sintetis - *Nano Zero Valent Iron* dilakukan pada pH 2, 4, 7, 10, dan 12 dengan pembacaan melalui pH meter. Berikut merupakan data pembacaan pH *Point Zero Charger* disajikan pada tabel dibawah ini,

Variasi pH	pH aktual	
	pH awal (pH _i)	pH akhir (pH _f)
2	2,1	4,3
4	4,1	7,2
7	7,1	7,0
10	6,9	6,9
12	11,1	11,1

$$\Delta pH = pH_f - pH_i$$

Dengan:

ΔpH = Selisih antara pH setelah dan sebelum kontak dengan adsorben

pH_i = Kondisi pH awal sebelum kontak dengan adsorben

pH_f = Kondisi pH akhir setelah kontak dengan adsorben

Berikut merupakan langkah dalam menentukan selisih pH setelah dan sebelum melakukan kontak dengan adsorben supaya dapat mengidentifikasi nilai pH_{pzc} sebesar 0. Hasil ΔpH disajikan sebagai berikut,

pH 2

$$\Delta pH = pH_f - pH_i$$

$$\Delta pH = 2,1 - 4,3$$

$$\Delta pH = 2,2$$

pH 4

$$\Delta pH = pH_f - pH_i$$

$$\Delta pH = 4,1 - 7,2$$

$$\Delta pH = 3,1$$

pH 6

$$\Delta pH = pH_f - pH_i$$

$$\Delta pH = 6,7 - 6,1$$

$$\Delta pH = 0,6$$

pH 7

$$\Delta pH = pH_f - pH_i$$

$$\Delta pH = 7,1 - 7,0$$

$$\Delta pH = -0,1$$

pH 10

$$\Delta pH = pH_f - pH_i$$

$$\Delta pH = 10 - 6,9$$

$$\Delta pH = -3,1$$

pH 12

$$\Delta pH = pH_f - pH_i$$

$$\Delta pH = 11,9 - 11,1$$

$$\Delta pH = -0,8$$

Variasi pH	pH Aktual		ΔpH	Keterangan
	pH awal (pH _i)	pH akhir (pH _f)		
2	2,1	4,3	2,2	Muatan Positif
4	4,1	7,2	3,1	Muatan Positif
6	6,1	6,7	0,6	Muatan Positif
7	7,1	7,0	-0,1	Muatan Negatif
10	6,9	6,9	-3,1	Muatan Negatif
12	11,1	11,1	-0,8	Muatan Negatif

$$pH_{pzc} = pH_1 + \frac{(0 - \Delta pH_1)(\Delta pH_2 - \Delta pH_1)}{\Delta pH_2 - \Delta pH_1}$$

Berikut merupakan langkah dalam menentukan nilai pH_{pzc} menggunakan rumus interpolasi. Hasil pH_{pzc} disajikan sebagai berikut,

$$pH_{pzc} = pH_1 + \frac{(0 - \Delta pH_1)(\Delta pH_2 - \Delta pH_1)}{\Delta pH_2 - \Delta pH_1}$$

$$pH_{pzc} = 6 + \frac{(0 - 0,6)(7 - 6)}{((-0,1) - 0,6)}$$

$$pH_{pzc} = 6,86$$

Jadi, bersamaan persamaan interpolasi didapatkan nilai pH_{pzc} sebesar 6,68. Pada pH < 6,68 didapatkan permukaan adsorben dengan muatan negatif. Sebaliknya, pH > 6,68 mekanisme pada permukaan adsorben menjadi positif.

LAMPIRAN 6

HASIL UJI BET

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kalirang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU

Quantachrome TouchWin v1.22



Report date: Thu Jun 18 2026
Filename: 04840426_4.qcuPhysIso Operator: Yusuf

Analysis Information									
Sample	ID	0484_4		Weight	0.0733g				
	Description	Zeolite/n2V1 Sebelum Ads							
Analysis	Data ID	(1d963720-8ac3-4568-a14f-a507196d03a0)							
	Operator	Yusuf		Date	2026.06.17		Duration	171.5min	
	Instrument	St 1 on NOVA touch 4LX [s/n:170170510001]					Firmware	1.07	
	Comments	description of sample							
	Ambient Temp.	30.08 °C		Void Volume Mode	NOVA mode		Cell ID	21	
	Cell Type	9mm with rod		Thermal Delay	300sec		Po Mode	Continuous	
Adsorbate	Name	Nitrogen		Molecular Weight	28.0134 g/mol		Cross Section Area	16.24 cm²	
	Non-ideality	6.580000e-05		Bath Temperature	77.35 °C				
Degas Information	Time	6.0 min		Temp	150.000000 °C				

Data Reduction Parameters				
Thermal Transpiration	no			
Temp. Comp	no			
Thickness Method	deBoer			
P-tags below 0.35	ignored			
				</

Area-Volume Summary results									
Surface Area Results									
Multipoint BET									
BJH adsorption									
BJH desorption									
Pore Volume Results									
BJH adsorption cumulative micropore volume									
BJH desorption cumulative micropore volume									
Total Pore Volume									
Pore Size Results									
BJH adsorption pore radius									
BJH desorption pore radius									
Average Pore Size									

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kalirang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU

Quantachrome TouchWin v1.22



Report date: Thu Jun 18 2026
Filename: 04840426_5.qcuPhysIso Operator: Yusuf

Analysis Information									
Sample	ID	0484_5	Weight	0.0607g					
Description	Komposit Z@n2V1								
Analysis	Data ID	(93331614-2d56-46ba-93ff-1c3a6a570240)							
Operator	Instrument	St 2 on NOVA touch 4LX [s/n:170170510001]	Date	2026.06.15	Duration	149.3 min	Cell ID	42	
Comments	description of sample				Firmware	1.07	Po Mode	Continuous	
Ambient Temp.	28.90 °C	Void Volume Mode	NOVA mode						
Cell Type	9mm with rod	Thermal Delay	300 sec						
Adsorbate	Name	Nitrogen	Molecular Weight	28.0134 g/mol	Cross Section Area	16.25 cm²			
	Non-ideality	6.580000e-05	Bath Temperature	77.35 °C					
Degas information	Time	6.0 min	Temp	150.000000 °C					

Data Reduction Parameters									
Thermal Transpiration	no								
Temp. Comp	no								
Thickness Method	deBoer								
P-tags below 0.35	ignored								

Area-Volume Summary results									
Surface Area Results									
Multipoint BET									
BJH adsorption									
BJH desorption									
Pore Volume Results									
BJH adsorption cumulative micropore volume									
BJH desorption cumulative micropore volume									
Total Pore Volume									
Pore Size Results									
BJH adsorption pore radius									
BJH desorption pore radius									
Average Pore Size									

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN 7

HASIL UJI ADSORPSI

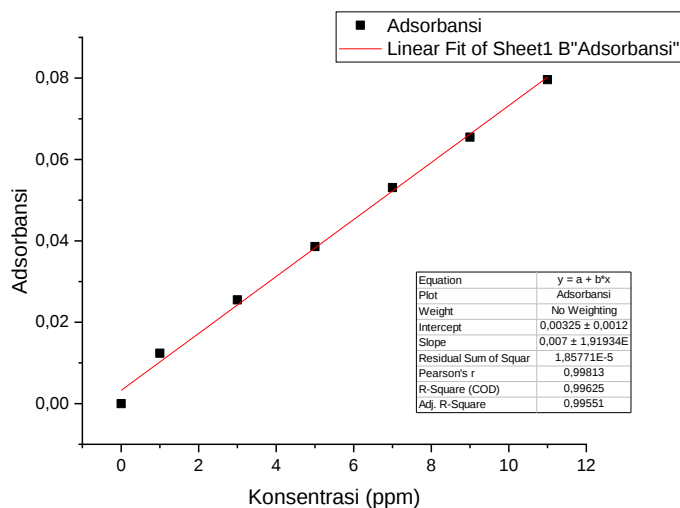
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

L.7.1 Kurva Kalibrasi

Kurva kalibrasi dibentuk berdasarkan pembacaan nilai adsorbansi larutan logam Cu(II) dengan konsentrasi 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; dan 1,1 mg/L menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Data pembacaan adsorbansi terhadap konsentrasi logam berat Cu(II) dipaparkan pada tabel berikut,

Konsentrasi (mg/L)	Adsorbansi			Rata-Rata Adsorbansi
	1	2	3	
0,1	0,0147	0,0149	0,149	0,0148
0,3	0,0172	0,0173	0,0173	0,0173
0,5	0,0232	0,0229	0,0228	0,0230
0,7	0,0272	0,0267	0,0273	0,0271
0,9	0,0320	0,0321	0,0321	0,0321
1,1	0,0356	0,357	0,0352	0,0352

DiGrafik antara konsentrasi logam berat Cu(II) sebagai x dan nilai adsorbansi masing-masing konsentrasi logam berat Cu(II) disajikan sebagai berikut



Berdasarkan kurva kalibrasi logam berat Cu(II) didapatkan koefisien R^2 sebesar 0,995. Persamaan regresi logam berat dengan konsentrasi 1; 3; 5; 7; 9; dan 11 mg/L adalah sebesar $y = 0,007x + 0,0032$.

L.7.2 Pengujian Adsorpsi Variasi Konsentrasi Larutan dan Waktu Kontak

Pembacaan hasil pengujian dengan variasi konsentrasi larutan 50; 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400 dan 450 mg/L dengan variasi waktu kontak 30; 60; 90; 120 dan 150 menit menggunakan spektrofotometri UV-Vis. Data pembacaan adsorbansi terhadap sampel dengan variasi pH dipaparkan pada tabel berikut,

C ₀ (mg/L)	Waktu Kontak (menit)	Adsorbansi	Rata-rata adsorbansi	fp	C _e (mg/L)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Removal
50	0	0,0735	0,0731	5	50	0	0%
		0,0732					
		0,0730					
	30	0,0467	0,0469	5	31,21	18,79	37,57%
		0,0469					
		0,0471					
	60	0,0417	0,0418	5	27,57	22,43	44,86%
		0,0421					
		0,0416					
	90	0,0256	0,0253	5	15,81	34,19	68,38%
		0,0252					
		0,0252					
	120	0,0226	0,0228	5	14,00	36,00	72,00%
		0,0226					
		0,0232					
	150	0,023	0,0226	5	13,86	36,14	72,29%
		0,0224					
		0,0224					
100	0	0,0731	0,0732	10	100	0	0%
		0,0731					
		0,0735					
	30	0,0473	0,0474	10	63,19	36,81	36,81%
		0,0478					
		0,0472					
	60	0,0427	0,0429	10	56,71	43,29	43,29%
		0,0427					
		0,0433					
	90	0,0376	0,0373	10	48,67	51,33	51,33%
		0,0371					
		0,0371					
	120	0,0277	0,0279	10	35,24	64,76	64,76%
		0,0282					
		0,0277					
	150	0,0277	0,0275	10	34,71	65,29	65,29%
		0,0273					

C0 (mg/L)	Waktu Kontak (menit)	Adsorbansi	Rata-rata adsorbansi	fp	Ce (mg/L)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Removal
		0,0275					
150	0	0,0735	0,0732	15	150	0	0%
		0,0732					
		0,073					
		0,073					
	30	0,0496	0,0498	15	99,86	50,14	33,43%
		0,0502					
		0,0496					
	60	0,0437	0,0437	15	86,86	63,14	42,10%
		0,044					
		0,0435					
	90	0,0395	0,0397	15	78,14	71,86	47,90%
		0,04					
		0,0395					
	120	0,0373	0,0375	15	73,50	76,50	51,00%
		0,0373					
		0,0379					
	150	0,0372	0,0374	15	73,36	76,64	51,10%
		0,0378					
		0,0373					
200	0	0,0731	0,0733	20	200	0	0%
		0,0737					
		0,0732					
	30	0,0565	0,0567	20	152,86	47,14	23,57%
		0,0571					
		0,0565					
	60	0,0501	0,0503	20	134,57	65,43	32,71%
		0,0506					
		0,0502					
	90	0,0471	0,0467	20	124,29	75,71	37,86%
		0,0465					
		0,0465					
	120	0,0436	0,0438	20	116,00	84,00	42,00%
		0,0442					
		0,0436					
	150	0,0441	0,0438	20	115,90	84,10	42,05%
		0,0436					
		0,0436					
250	0	0,0735	0,0732	25	250	0	0%
		0,073					
		0,0731					
	30	0,0582	0,0583	25	196,79	53,21	21,29%
		0,0581					

C0 (mg/L)	Waktu Kontak (menit)	Adsorbansi	Rata-rata adsorbansi	fp	Ce (mg/L)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Removal
	60	0,0586	0,0509	25	170,36	79,64	31,86%
		0,0507					
		0,0508					
		0,0512					
	90	0,0499	0,0495	25	165,36	84,64	33,86%
		0,0493					
		0,0493					
	120	0,0493	0,0494	25	165,12	84,88	33,95%
		0,0497					
		0,0493					
	150	0,0494	0,0496	25	165,60	84,40	33,76%
		0,0494					
		0,0499					
300	0	0,073	0,0732	30	300	0	0%
		0,0732					
		0,0734					
	30	0,0617	0,0618	30	251,14	48,86	16,29%
		0,0621					
		0,0616					
	60	0,0549	0,0546	30	220,29	79,71	26,57%
		0,0545					
		0,0544					
	90	0,0517	0,05187	30	208,57	91,43	30,48%
		0,0522					
		0,0517					
	120	0,0517	0,05183	30	208,43	91,57	30,52%
		0,0516					
		0,0522					
	150	0,0517	0,0518	30	208,29	91,71	30,57%
		0,0521					
		0,0516					
350	0	0,0736	0,0732	35	350	0	0%
		0,073					
		0,073					
	30	0,0625	0,0627	35	297,50	52,5	17,50%
		0,0625					
		0,0631					
	60	0,0546	0,0548	35	258,17	91,8	30,61%
		0,0547					
		0,0552					
	90	0,0546	0,0547	35	257,67	92,3	30,78%
		0,055					

C0 (mg/L)	Waktu Kontak (menit)	Adsorbansi	Rata-rata adsorbansi	fp	Ce (mg/L)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Removal
	120	0,0546	0,0547	35	257,50	92,5	30,83%
		0,0545					
		0,0546					
		0,055					
	150	0,0545	0,0546	35	257,17	92,8	30,94%
		0,0549					
		0,0545					
400	0	0,0736	0,0732	40	400	0	0%
		0,073					
		0,073					
	30	0,0641	0,0639	40	346,86	53,14	13%
		0,0639					
		0,0637					
	60	0,057	0,0571	40	307,81	92,19	23,05%
		0,0574					
		0,0568					
	90	0,0569	0,0570	40	307,62	92,38	23,10%
		0,0573					
		0,0569					
	120	0,0572	0,0570	40	307,43	92,57	23,14%
		0,0568					
		0,057					
	150	0,0573	0,0569	40	307,05	92,95	23,24%
		0,0567					
		0,0568					
450	0	0,0735	0,0732	45	450	0	0%
		0,073					
		0,0731					
	30	0,0652	0,0652	45	398,79	51,21	11,38%
		0,0655					
		0,065					
	60	0,0586	0,0588	45	357,43	92,57	20,57%
		0,0592					
		0,0586					
	90	0,0585	0,0588	45	357,43	92,57	20,57%
		0,0591					
		0,0586					
	120	0,059	0,0587	45	356,79	93,21	20,71%
		0,0585					
		0,0586					
	150	0,0584	0,0587	45	356,57	93,43	20,76%
		0,0586					

C ₀ (mg/L)	Waktu Kontak (menit)	Adsorbansi	Rata-rata adsorbansi	fp	C _e (mg/L)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Removal
		0,059					

Dari hasil pembacaan data spektrofotometri, data dapat diolah menjadi penentuan konsentrasi akhir dengan nilai rata-rata adsorbansi yang disubstitusikan ke dalam persamaan kurva kalibrasi sebagai nilai y. Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan konsentrasi akhir. Berikut merupakan tahap penentuan konsentrasi akhir,

$$y = 0,007x + 0,032$$

$$0,0469 = 0,007x + 0,032$$

$$X = \left(\frac{0,0469 - 0,032}{0,007} \right) \times \text{faktor pengencer}$$

$$X = \left(\frac{0,0469 - 0,032}{0,007} \right) \times 45$$

$$X = 31,21 \text{ mg/L}$$

Jadi, konsentrasi akhir pada variasi konsentrasi 50 mg/L pada menit ke-30 adalah sebesar 31,21 mg/L. Berikutnya, penentuan kapasitas adsorpsi. Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan kapasitas akhir. Adapun perhitungan kapasitas adsorpsi dipaparkan sebagai berikut,

$$q_e = \left(\frac{C_0 - C_e}{m} \right) \times V$$

$$q_e = \left(\frac{50 \text{ mg/L} - 31,21 \text{ mg/L}}{0,05 \text{ g}} \right) \times 50 \text{ mL}$$

$$q_e = 18,79 \text{ mg/g}$$

Jadi, kapasitas adsorpsi pada variasi konsentrasi 50 mg/L pada menit ke-30 adalah sebesar 18,79 mg/g. Selain penentuan kapasitas adsorpsi, analisis dilanjutkan dengan penentuan efisiensi penyisihan. Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan efisiensi removal. Adapun analisis efisiensi removal dipaparkan sebagai berikut,

$$\text{Efisiensi Removal (\%)} = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100\%$$

$$Efisiensi Removal (\%) = \left(\frac{50 \text{ mg/L} - 31,21 \text{ mg/L}}{50 \text{ mg/L}} \right) \times 100\%$$

$$Efisiensi Removal (\%) = 38\%$$

Jadi, efisiensi removal pada variasi konsentrasi 50 mg/L pada menit ke-30 adalah sebesar 38%.

L.7.3 Pengujian Adsorpsi Variasi Larutan pH

Pembacaan hasil pengujian dengan variasi pH 2; 4; 6; 7; 10; dan 12 menggunakan spektrofotometri UV-Vis. Data pembacaan adsorbansi terhadap sampel dengan variasi pH dipaparkan pada tabel berikut,

pH	Adsorbansi			Faktor Pengencer	Rata-Rata Adsorbansi
	1	2	3		
2	0,0623	0,0629	0,0626	45	0,0626
4	0,0658	0,0666	0,0657	45	0,0661
6	0,0103	0,0095	0,0114	45	0,01040
7	0,0065	0,0067	0,0110	45	0,00807
10	0,0161	0,0160	0,0163	45	0,01613
12	0,0158	0,0161	0,0168	45	0,01623

Dari hasil pembacaan data spektrofotometri, data dapat diolah menjadi penentuan konsentrasi akhir dengan nilai rata-rata adsorbansi yang disubsitusikan ke dalam persamaan kurva kalibrasi sebagai nilai y. Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan konsentrasi akhir. Berikut merupakan tahap penentuan konsentrasi akhir,

$$y = 0,007x + 0,032$$

$$0,0626 = 0,007x + 0,032$$

$$X = \left(\frac{0,0626 - 0,032}{0,007} \right) \times \text{faktor pengencer}$$

$$X = \left(\frac{0,0626 - 0,032}{0,007} \right) \times 45$$

$$X = 381,86 \text{ mg/L}$$

Jadi, konsentrasi akhir pada variasi pH 2 adalah sebesar 381,86 mg/L. Berikutnya, penentuan kapasitas adsorpsi. Konsentrasi larutan 450 mg/L dengan massa adsorben yang digunakan selama penelitian variasi pH larutan adalah sebesar 0,05

g dan volume larutan sebanyak 50 mL. Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan kapasitas akhir. Adapun perhitungan kapasitas adsorpsi dipaparkan sebagai berikut,

$$q_e = \left(\frac{C_0 - C_e}{m} \right) \times V$$

$$q_e = \left(\frac{450 \text{ mg/L} - 381,86 \text{ mg/L}}{0,05 \text{ g}} \right) \times 50 \text{ mL}$$

$$q_e = 68,14 \text{ mg/g}$$

Jadi, kapasitas adsorpsi pada variasi pH 2 adalah sebesar 68,14 mg/g. Selain penentuan kapasitas adsorpsi, analisis dilanjutkan dengan penentuan efisiensi penyisihan. Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan efisiensi removal. Adapun analisis efisiensi removal dipaparkan sebagai berikut,

$$\text{Efisiensi Removal (\%)} = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100\%$$

$$\text{Efisiensi Removal (\%)} = \left(\frac{450 \text{ mg/L} - 381,86 \text{ mg/L}}{450 \text{ mg/L}} \right) \times 100\%$$

$$\text{Efisiensi Removal (\%)} = 15\%$$

Jadi, efisiensi removal pada variasi pH 2 adalah sebesar 15%. Berikutnya, hasil analisis konsentrasi akhir, kapasitas adsorpsi, dan efisiensi removal akan dipaparkan pada tabel dibawah ini,

pH	Adsorbansi	Rata-rata adsorbansi	Faktor Pengenceran	Konsentrasi Akhir	Kapasitas Adsorpsi	Removal
2	0,0623	0,0626	45	381,86	68,14	15%
	0,0629					
	0,0626					
4	0,0658	0,0661	45	403,93	46,07	10%
	0,0666					
	0,0657					
6	0,0103	0,01040	45	46,29	403,71	90%
	0,0095					
	0,0114					
7	0,0065	0,00807	45	31,29	418,71	93%
	0,0067					

pH	Adsorbansi	Rata-rata adsorbansi	Faktor Pengenceran	Konsentrasi Akhir	Kapasitas Adsorpsi	Removal
	0,0110					
10	0,0158	0,01623	45	83,79	366,21	81%
	0,0161					
	0,0168					
12	0,0161	0,01613	45	83,14	366,86	82%
	0,0160					
	0,0163					

L.7.4 Pengujian Adsorpsi Variasi Massa Adsorpsi

Pembacaan hasil pengujian dengan variasi massa adsorben 0,015; 0,025; 0,05; dan 0,075 menggunakan spektrofotometri UV-Vis. Data pembacaan adsorbansi terhadap sampel dengan variasi massa adsorben dipaparkan pada tabel berikut,

Massa Adsorben	Adsorbansi			Faktor Pengencer	Rata-Rata Adsorbansi
	1	2	3		
0,015	0,0136	0,0130	0,0130	45	0,0132
0,025	0,0091	0,0092	0,0096	45	0,0093
0,05	0,0069	0,0073	0,0071	45	0,0071
0,075	0,0066	0,0069	0,0059	45	0,0065

Dari hasil pembacaan data spektrofotometri, data dapat diolah menjadi penentuan konsentrasi akhir dengan nilai rata-rata adsorbansi yang disubsitusikan ke dalam persamaan kurva kalibrasi sebagai nilai y. Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan konsentrasi akhir. Berikut merupakan tahap penentuan konsentrasi akhir,

$$\begin{aligned}
 y &= 0,007x + 0,0032 \\
 0,0132 &= 0,007x + 0,0032 \\
 X &= \left(\frac{0,0132 - 0,0032}{0,007} \right) \times \text{faktor pengencer} \\
 X &= \left(\frac{0,0132 - 0,0032}{0,007} \right) \times 45 \\
 X &= 64,29 \text{ mg/L}
 \end{aligned}$$

Jadi, konsentrasi akhir pada variasi massa adsorben 0,015gram adalah sebesar 64,29 mg/L. Berikutnya, penentuan kapasitas adsorpsi. Konsentrasi larutan 450 mg/L

dengan dengan volume larutan sebanyak 50 mL. Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan kapasitas akhir. Adapun perhitungan kapasitas adsorpsi dipaparkan sebagai berikut,

$$q_e = \left(\frac{C_0 - C_e}{m} \right) \times V$$

$$q_e = \left(\frac{450 \text{ mg/L} - 64,29 \text{ mg/L}}{0,015 \text{ g}} \right) \times 50 \text{ mL}$$

$$q_e = 115,71 \text{ mg/g}$$

Jadi, kapasitas adsorpsi pada variasi massa adsorben 0,015gram adalah sebesar 115,71 mg/g. Selain penentuan kapasitas adsorpsi, analisis dilanjutkan dengan penentuan efisiensi penyisihan. Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan efisiensi removal. Adapun analisis efisiensi removal dipaparkan sebagai berikut,

$$Efisiensi \text{ Removal } (\%) = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100\%$$

$$Efisiensi \text{ Removal } (\%) = \left(\frac{450 \text{ mg/L} - 64,29 \text{ mg/L}}{450 \text{ mg/L}} \right) \times 100\%$$

$$Efisiensi \text{ Removal } (\%) = 86\%$$

Jadi, efisiensi removal pada variasi massa adsorben 0,015gram adalah sebesar 86%. Berikutnya, hasil analisis konsentrasi akhir, kapasitas adsorpsi, dan efisiensi removal akan dipaparkan pada tabel dibawah ini,

Massa Adsorben	Adsorbansi	Rata-rata adsorbansi	Fp'	Konsentrasi Akhir	Kapasitas Adsorpsi	Removal
0,015	0,0136	0,0132	45	64,29	115,71	86%
	0,0130					
	0,0130					
0,025	0,0091	0,0093	45	39,21	205,39	91%
	0,0092					
	0,0096					
0,05	0,0069	0,0071	45	25,07	424,93	94%
	0,0073					
	0,0071					
0,075	0,0066	0,0065	45	21,00	643,50	95%
	0,0069					
	0,0059					

L.7.5 Pengujian Adsorpsi Reusabilitas Adsorben

Pembacaan hasil pengujian reusabilitas adsorben dengan 5 siklus menggunakan spektrofotometri UV-Vis. Data pembacaan adsorbansi terhadap sampel dipaparkan pada tabel berikut,

Siklus	Adsorbansi			Faktor Pengencer	Rata-Rata Adsorbansi
	1	2	3		
1	0,0080	0,0074	0,0078	45	0,0077
2	0,0094	0,0089	0,0091	45	0,0091
3	0,0214	0,0215	0,0225	45	0,0218
4	0,0301	0,0303	0,0296	45	0,0300
5	0,0439	0,0424	0,0421	45	0,0428

Dari hasil pembacaan data spektrofotometri, data dapat diolah menjadi penentuan konsentrasi akhir dengan nilai rata-rata adsorbansi yang disubstitusikan ke dalam persamaan kurva kalibrasi sebagai nilai y. Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan konsentrasi akhir. Berikut merupakan tahap penentuan konsentrasi akhir,

$$\begin{aligned}y &= 0,007x + 0,0032 \\0,0077 &= 0,007x + 0,0032 \\X &= \left(\frac{0,0077 - 0,0032}{0,007} \right) \times \text{faktor pengencer} \\X &= \left(\frac{0,0077 - 0,0032}{0,007} \right) \times 45 \\X &= 29,14 \text{ mg/L}\end{aligned}$$

Jadi, konsentrasi akhir pada variasi massa adsorben 0,075gram adalah sebesar 29,14 mg/L. Berikutnya, penentuan kapasitas adsorpsi. Konsentrasi larutan 450 mg/L dengan dengan volume larutan sebanyak 50 mL. Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan kapasitas akhir. Adapun perhitungan kapasitas adsorpsi dipaparkan sebagai berikut,

$$\begin{aligned}q_e &= \left(\frac{C_0 - C_e}{m} \right) \times V \\q_e &= \left(\frac{450 \text{ mg/L} - 29,14 \text{ mg/L}}{0,075 \text{ g}} \right) \times 50 \text{ mL} \\q_e &= 631,29 \text{ mg/g}\end{aligned}$$

Jadi, kapasitas adsorpsi pada variasi massa adsorben 0,075gram adalah sebesar 631,29 mg/g. Selain penentuan kapasitas adsorpsi, analisis dilanjutkan dengan penentuan efisiensi penyisihan. Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan efisiensi removal. Adapun analisis efisiensi removal dipaparkan sebagai berikut,

$$Efisiensi\ Removal\ (\%) = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100\%$$

$$Efisiensi\ Removal\ (\%) = \left(\frac{450\ mg/L - 29,14\ mg/L}{450\ mg/L} \right) \times 100\%$$

$$Efisiensi\ Removal\ (\%) = 94\%$$

Jadi, efisiensi removal pada variasi massa adsorben 0,075gram adalah sebesar 94%. Berikutnya, hasil analisis konsentrasi akhir, kapasitas adsorpsi, dan efisiensi removal akan dipaparkan pada tabel dibawah ini,

Siklus	Adsorbansi	Rata-rata adsorbansi	Faktor Pengenceran	Konsentrasi Akhir	Kapasitas Adsorpsi	Removal
1	0,0080	0,0077	45	29,14	631,29	94%
	0,0074					
	0,0078					
2	0,0094	0,0091	45	38,14	617,79	92%
	0,0089					
	0,0091					
3	0,0214	0,0218	45	119,57	495,64	73%
	0,0215					
	0,0225					
4	0,0301	0,0300	45	172,29	416,57	62%
	0,0303					
	0,0296					
5	0,0439	0,0428	45	254,57	293,14	43%
	0,0424					
	0,0421					

LAMPIRAN 8

KINETIKA DAN ISOTERM ADSORPSI

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

L.9.1 Kinetika Adsorpsi

L.9.1.1 Kinetika Adsorpsi Orde Satu Semu (*Pseudo First Order*)

Setelah menganalisis kapasitas adsorpsi pada variasi waktu dan konsentrasi, maka kinetika adsorpsi dapat ditentukan menggunakan model *pseudo first order* untuk mengevaluasi laju adsorpsi adsorbat oleh adsorben. Berikut merupakan hasil analisis kinetika adsorpsi model *pseudo first order*.

Waktu (t)	Konsentrasi akhir (C_e)	Kapasitas adsorpsi (q_e)	$q_e - q_t$	$\ln(q_e - q_t)$	K_1	q_e teoritis	R^2
0	450	0	93,43	-	0,0559	91,89	0,8998
30	398,79	51,21	44,22	3,7429			
60	357,43	92,57	0,86	-0,15082			
90	357,11	92,89	0,54	-0,61619			
120	356,79	93,21	0,22	-1,51413			
150	356,57	93,43	0	0			

Parameter kinetika ditentukan melalui hubungan linear antara $\ln(q_e - q_t)$ sebagai y dan waktu (t) sebagai x. Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan titik y. Berikut merupakan tahap penentuan $\ln(q_e - q_t)$ sebagai y.

Pada waktu 30 menit

$$y = \ln(q_e - q_t)$$

$$y = \ln(93,43 - 51,21)$$

$$y = \ln(44,22)$$

$$y = 3,742$$

Setelah dilakukan analisis parameter $\ln(q_e - q_t)$, dilakukan plot nilai dengan waktu (t) sebagai sumbu x. Hubungan linier yang diperoleh dari plot tersebut digunakan untuk menentukan konstanta laju adsorpsi (K_1) dan kapasitas teoritis. Berikut merupakan hubungan linear antara $\ln(q_e - q_t)$ dan waktu (t) disajikan sebagai berikut,

$$y = -0,0559x + 4,4921$$

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

Berdasarkan persamaan regresi $y = -0,0559x + 4,4921$ dengan nilai R^2 sebesar 0,9005 didapatkan nilai K_1 sebesar 0,0559. Penentuan nilai q_e didapatkan dari persamaan sebagai berikut,

$$q_e = e^{\text{intercept}}$$

$$q_e = e^{4,5206}$$

$$q_e = 89,31 \text{ mg/g}$$

L.9.1.2 Kinetika Adsorpsi Orde Dua Semu (*Pseudo Second Order*)

Kinetika adsorpsi dapat ditentukan menggunakan model *pseudo second order* untuk mengevaluasi laju adsorpsi adsorbat oleh adsorben. Berikut merupakan hasil analisis kinetika adsorpsi model *pseudo second order*.

Waktu (t)	Konsentrasi akhir (C_e)	Kapasitas adsorpsi (q_t)	t/q_t	q_e teoritis	K_2	R^2
0	450	0	0	112,35	0,000333	0,9648
30	398,79	51,21	0,585823			
60	357,43	92,57	0,648158			
90	357,11	92,89	0,968888			
120	356,79	93,21	1,287416			
150	356,57	93,43	1,60548			

Parameter kinetika ditentukan melalui hubungan linear antara t/q_t sebagai y dan waktu (t) sebagai x . Sebagai ilustrasi, salah satu data sampel digunakan untuk menunjukkan tahapan penentuan titik y . Berikut merupakan tahap penentuan $\ln(q_e - q_t)$ sebagai y .

Pada waktu 30 menit

$$y = t/q_t$$

$$y = 30/93,42$$

$$y = 0,585823$$

Setelah dilakukan analisis parameter t/q_t , dilakukan plot nilai terhadap waktu (t) sebagai sumbu x . Hubungan linier yang diperoleh dari plot tersebut digunakan untuk menentukan konstanta laju adsorpsi (K_2) dan kapasitas teoritis. Berdasarkan

persamaan regresi $y = 0,0089x + 0,2156$ dengan nilai R^2 sebesar 0,9648. Penentuan nilai q_e dan K_2 didapatkan dari persamaan sebagai berikut,

Penentuan q_e

$$q_e = \frac{1}{slope}$$

$$q_e = \frac{1}{0,0087}$$

$$q_e = 112,36 \text{ mg/g}$$

Penentuan K_2

$$q_e = \frac{1}{intercept \times q_e^2}$$

$$q_e = \frac{1}{0,0089 \times 112,35^2}$$

$$q_e = 0,000333$$

L.9.2 Isoterm Adsorpsi

L.9.2.1 Isoterm Adsorpsi model Freundlich

Setelah menganalisis kapasitas adsorpsi pada variasi waktu dan konsentrasi, maka kinetika adsorpsi dapat ditentukan menggunakan model Freundlich untuk mengevaluasi laju adsorpsi adsorbat oleh adsorben. Berikut merupakan hasil analisis kinetika adsorpsi model Freundlich.

C_0	C_e	q_e	$\ln C_e$	$\ln q_e$	K_f	$1/n$	R^2
50	13,86	36,14	2,629	3,587	22,06	3,81	0,87
100	34,71	65,29	3,547	4,178			
150	73,36	76,64	4,295	4,339			
200	115,9	84,1	4,752	4,432			
250	165,6	84,4	5,109	4,435			
300	208,29	91,71	5,338	4,518			
350	257,17	92,83	5,549	4,530			
400	307,05	92,95	5,727	4,532			
450	356,57	93,43	5,876	4,537			

Parameter isotherm Freundlich ditentukan melalui hubungan linier antara $\ln q_e$ sebagai y dan $\ln C_e$ sebagai x. Hubungan linier yang diperoleh dari plot tersebut digunakan untuk menentukan konstanta Freundlich (K_f) dan intensitas adsorpsi (n). Berdasarkan persamaan regresi $y = 0,2626x + 3,0939$ dengan nilai R^2 sebesar 0,8682. Penentuan nilai K_f dan intensitas adsorpsi didapatkan dari persamaan sebagai berikut,

Penentuan K_f ,

$$\ln K_f = \text{intercept}$$

$$K_f = e^{\text{intercept}}$$

$$K_f = e^{3,0939}$$

$$K_f = 22,06$$

Penentuan intensitas adsorpsi,

$$\frac{1}{n} = \text{slope}$$

$$\frac{1}{n} = 0,2626$$

$$n = \frac{1}{0,2626}$$

$$n = 3,81$$

L.9.2.1 Isotherm Adsorpsi model Langmuir

Setelah menganalisis kapasitas adsorpsi pada variasi waktu dan konsentrasi, maka kinetika adsorpsi dapat ditentukan menggunakan model Langmuir untuk mengevaluasi laju adsorpsi adsorbat oleh adsorben. Berikut merupakan hasil analisis kinetika adsorpsi model Langmuir.

C_0	C_e	q_e	C_e/q_e	$Q_{\max}$	K_L	R^2
50	13,86	36,14	0,383	100	0,045	0,9991
100	34,71	65,29	0,531			
150	73,36	76,64	0,957			
200	115,9	84,1	1,378			
250	165,6	84,4	1,962			
300	208,29	91,71	2,271			
350	257,17	92,83	2,770			

C ₀	C _e	q _e	C _e /q _e	Q _{max}	KL	R ²
400	307,05	92,95	3,303			
450	356,57	93,43	3,816			

Parameter isotherm Langmuir ditentukan melalui hubungan linier antara C_e /q_e sebagai y dan q_e sebagai x. Hubungan linier yang diperoleh dari plot tersebut digunakan untuk menentukan konstanta Freundlich (Kf) dan intensitas adsorpsi (n). Berdasarkan persamaan regresi $y = 0,01x + 0,2209$ dengan nilai R² sebesar 0,9991. Penentuan nilai KL dan Q_{max} didapatkan dari persamaan sebagai berikut,

Penentuan KL

$$Intercept = \frac{1}{Q_{max} \times KL}$$

$$KL = \frac{slope}{intercept}$$

$$KL = \frac{0,01}{0,2209}$$

$$KL = 0,045$$

Penentuan Q_{max}

$$Slope = \frac{1}{Q_{max}}$$

$$Q_{max} = \frac{1}{slope}$$

$$n = \frac{1}{0,01}$$

$$n = 100$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN 9

HASIL ANALISIS STATISTIKA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

L.10.1 Pengaruh Variasi Waktu Kontak dan Konsentrasi

L.10.1.1 Uji Normalitas

Tests of Normality							
	Konsentrasi	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Adsorbansi	50	.256	18	.003	.804	18	.002
	100	.205	18	.043	.827	18	.004
	150	.258	18	.003	.761	18	<.001
	200	.235	18	.010	.778	18	<.001
	250	.324	17	<.001	.713	17	<.001
	300	.284	18	<.001	.756	18	<.001
	350	.376	18	<.001	.675	18	<.001
	400	.289	18	<.001	.739	18	<.001
	450	.328	18	<.001	.745	18	<.001

a. Lilliefors Significance Correction

Tests of Normality							
	Waktu_Kontak	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Adsorbansi	0	.126	27	.200 [*]	.958	27	.330
	30	.177	27	.029	.863	27	.002
	60	.201	26	.008	.881	26	.006
	90	.152	27	.108	.900	27	.013
	120	.177	27	.029	.887	27	.007
	150	.174	27	.035	.880	27	.005

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

L.10.1.2 Uji Kruskal Wallis

a) Uji Kruskal Wallis Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Adsorbansi

Test Statistics^{a,b}

Adsorbansi	
Kruskal-Wallis H	82.546
df	5
Asymp. Sig.	<.001

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable:
Waktu_Kontak

b) Uji Kruskal Wallis Pengaruh Konsentrasi Terhadap Adsorbansi

Test Statistics^{a,b}

Adsorbansi	
Kruskal-Wallis H	62.046
df	8
Asymp. Sig.	<.001

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable:
Konsentrasi

c) Uji Kruskal Wallis Kelompok Data (Waktu Kontak & Konsentrasi) Terhadap Adsorbansi

Test Statistics^{a,b}

Adsorbansi	
Kruskal-Wallis H	159.919
df	53
Asymp. Sig.	<,.001

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable:
Kelompok

L.10.1 Pengaruh pH

L.10.1.1 Uji Normalitas Metode Shapiro-Wilk

Tests of Normality

	pH	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Adsorbansi	2	.175	3	.	1.000	3	1.000
	4	.349	3	.	.832	3	.194
	6	.208	3	.	.992	3	.826
	7	.371	3	.	.783	3	.075
	10	.269	3	.	.949	3	.567
	12	.253	3	.	.964	3	.637

a. Lilliefors Significance Correction

L.10.1.2 Uji Homogenitas

Tests of Homogeneity of Variances

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Adsorbansi	Based on Mean	7.768	5	12	.002
	Based on Median	.732	5	12	.613
	Based on Median and with adjusted df	.732	5	2.475	.654
	Based on trimmed mean	6.542	5	12	.004

L.10.1.2.1 Uji Welch

Robust Tests of Equality of Means

Adsorbansi

	Statistic ^a	df1	df2	Sig.
Welch	10377.072	5	5.185	<,.001

a. Asymptotically F distributed.

L.10.1.3 Uji Anova One-way

ANOVA

Adsorbansi					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.011	5	.002	1625.022	<.001
Within Groups	.000	12	.000		
Total	.011	17			

L.10.2 Pengaruh Massa Adsorben

L.10.2.1 Uji Normalitas metode Shapiro-Wilk

Tests of Normality

	Massa_Adsorben	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Adsorbansi	.015	.253	3	.	.964	3	.637
	.025	.314	3	.	.893	3	.363
	.050	.175	3	.	1.000	3	1.000
	.075	.269	3	.	.949	3	.567

a. Lilliefors Significance Correction

L.10.2.2 Uji Homogenitas

Tests of Homogeneity of Variances

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Adsorbansi	Based on Mean	1.398	3	8	.312
	Based on Median	.419	3	8	.744
	Based on Median and with adjusted df	.419	3	5.131	.747
	Based on trimmed mean	1.304	3	8	.338

L.10.2.3 Uji Anova One-Way

ANOVA

Adsorbansi					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.000	3	.000	247.590	<.001
Within Groups	.000	8	.000		
Total	.000	11			

L.10.4 Pengaruh Reusabilitas Adsorben

L.10.4.1 Uji Normalitas Metode Shapiro-Wilk

Tests of Normality							
	Siklus	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Adsorbansi	1	.253	3	.	.964	3	.637
	2	.292	3	.	.923	3	.463
	3	.356	3	.	.818	3	.157
	4	.340	3	.	.848	3	.235
	5	.328	3	.	.871	3	.298

a. Lilliefors Significance Correction

L.10.4.2 Uji Homogenitas

Tests of Homogeneity of Variances					
		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Adsorbansi	Based on Mean	3.379	4	10	.054
	Based on Median	.389	4	10	.812
	Based on Median and with adjusted df	.389	4	6.046	.810
	Based on trimmed mean	2.883	4	10	.079

L.10.4.3 Uji Anova One-way

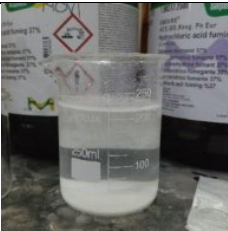
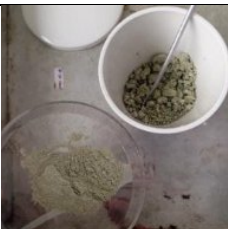
ANOVA					
Adsorbansi					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.003	4	.001	1554.794	<.001
Within Groups	.000	10	.000		
Total	.003	14			

LAMPIRAN 10

DOKUMENTASI KEGIATAN

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

No	Nama Kegiatan	Uraian Kegiatan	Dokumentasi
1.	Preparasi material fly ash	Pengayakan <i>fly ash</i> menggunakan <i>sieve shaker electric</i>	
		Separasi logam besi (Fe) pada material <i>fly ash</i> menggunakan magnet	
		Penghilangan kadar air pada material <i>fly ash</i> menggunakan oven	
		Separasi logam besi (Fe) pada material <i>fly ash</i> menggunakan magnet	
2	Pembuatan Larutan Natrium Aluminat	Menimbang $\text{Al}(\text{OH})_3$	
		Menimbang NaOH	

No	Nama Kegiatan	Uraian Kegiatan	Dokumentasi
		Pelarutan $\text{Al}(\text{OH})_3$ dengan larutan NaOH excess	
		Pembuatan Larutan Natrium Aluminat	
3	Pembuatan Zeolit	Menimbang fly ash sebanyak 20 gram	
		Menimbang NaOH dalam bentuk serbuk sebanyak 24 gram	
		Proses alkali fusi menggunakan microwave irradiation selama 20 menit dengan metode ON-OFF	
		Hasil dari proses alkali fusi	

No	Nama Kegiatan	Uraian Kegiatan	Dokumentasi
		Penambahan larutan natrium aluminat pada hasil alkali fusi	
		Proses aging dengan perlakuan diaduk selama 40 jam.	
		Proses pengeringan zeolit menggunakan oven selama	
		Hasil zeolite setelah dikeringkan menggunakan oven	
		Fly ash digerus menggunakan mortar	
		Proses kalsinasi pada suhu 500 selama 1 jam	

No	Nama Kegiatan	Uraian Kegiatan	Dokumentasi
4	Pembuatan komposit zeolit/nano zero valent iron (nZVI)	Menimbang fly ash sebanyak 10 gram	
		Menimbang $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ sebanyak 5 gram	
		Memasukkan 10 gram fly ash, 5 gram $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dan 10 mL etanol	
		Mengatur pH menjadi 4 menggunakan H_2SO_4 sekaligus melakukan homogenisasi menggunakan stirrer selama 30 menit	
		Sonikasi sampel selama 30 menit	
		Mengatur gas N_2 untuk diinjeksi kedalam larutan	

No	Nama Kegiatan	Uraian Kegiatan	Dokumentasi
		Komposit Z@nZVI setelah direduksi menggunakan NaBH_4 . Kemudian dicuci menggunakan etanol, dan disimpan.	
5	Pengujian pH _{pzc}	Penyesuaian larutan elektrolit sesuai dengan rentang pH 2; 4; 6; 7; 10; 12 dengan $\pm 0,1$	
		Menimbang adsorben sebanyak 0,5 gram	
		Aduk larutan selama 5 jam menggunakan shaker	
		Pembacaan pH setelah dilakukan pengadukan selama 5 jam	
6	Variasi Waktu Kontak dan Konsentrasi Batch 1	Variasi waktu menit ke-0 dengan variasi konsentrasi 50; 100; 150; 200 mg/L (tanpa pengenceran)	

No	Nama Kegiatan	Uraian Kegiatan	Dokumentasi
		Variasi waktu menit ke-30 dengan variasi konsentrasi 50; 100; 150; 200 mg/L	
		Variasi waktu menit ke-60 dengan variasi konsentrasi 50; 100; 150; 200 mg/L	
		Variasi waktu menit ke-90 dengan variasi konsentrasi 50; 100; 150; 200 mg/L	
		Variasi waktu menit ke-120 dengan variasi konsentrasi 50; 100; 150; 200 mg/L	
		Variasi waktu menit ke-150 dengan variasi konsentrasi 50; 100; 150; 200 mg/L	
7	Variasi Waktu Kontak dan Konsentrasi Batch 2	Variasi waktu menit ke-0 dengan variasi konsentrasi 250; 300; 350; 400; 450 mg/L (tanpa pengenceran)	

No	Nama Kegiatan	Uraian Kegiatan	Dokumentasi
		Variasi waktu menit ke-30 dengan variasi konsentrasi 250; 300; 350; 400; 450 mg/L	
		Variasi waktu menit ke-60 dengan variasi konsentrasi 250; 300; 350; 400; 450 mg/L	
		Variasi waktu menit ke-90 dengan variasi konsentrasi 250; 300; 350; 400; 450 mg/L	
		Variasi waktu menit ke-120 dengan variasi konsentrasi 250; 300; 350; 400; 450 mg/L	
		Variasi waktu menit ke-150 dengan variasi konsentrasi 50; 100; 150; 200 mg/L	
8	Variasi pH	Persiapan variasi pH 2; 4; 6; 7; 10 dan 12	

No	Nama Kegiatan	Uraian Kegiatan	Dokumentasi
		Pengendapan pada pH 6 dan 7	
		Pengadukan 200 rpm selama 60 menit	
		Variasi pH 2; 4; 6; 7; 10 dan 12 selama 60 menit dengan konsentrasi 450 mg/L	
9	Variasi massa adsorben	Persiapan larutan dengan pH 7	
		Variasi massa adsorben 0,015; 0,025; 0,035 dan 0,045gram selama 60 menit dengan konsentrasi 450 mg/L	
10	Uji Reusabilitas	Persiapan larutan konsentrasi 450 mg/L; pH 7; massa adsorben 0,075	

No	Nama Kegiatan	Uraian Kegiatan	Dokumentasi
		Pengadukan 200 ppm selama 60 menit	
		Desorpsi selama 60 menit	
		Reusabilitas adsorben 5 siklus	

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN 11

VALIDASI DATA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

HASIL UJI PENGUKURAN DI LABORATORIUM

Nama Praktikan : Indirra Yasmine Putri Santoso
 NRP : 1022040025
 Tanggal : 06 April 2026 – 30 April 2026
 Judul : Komposit Berbasis Pemanfaatan *Fly Ash* menjadi Zeolit Sintetis dan *Nano Zero Valent Iron* (nZVI) untuk Air Limbah Cair Artifisial Cu(II)

a) Pembacaan Kurva Kalibrasi Logam Berat Cu(II)

Konsentrasi (mg/L)	Adsorbansi			Rata-Rata Adsorbansi
	1	2	3	
0,1	0,0147	0,0149	0,149	0,0148
0,3	0,0172	0,0173	0,0173	0,0173
0,5	0,0232	0,0229	0,0228	0,0230
0,7	0,0272	0,0267	0,0273	0,0271
0,9	0,0320	0,0321	0,0321	0,0321
1,1	0,0356	0,357	0,0352	0,0352

b) Pengujian Variasi Waktu Kontak dan Konsentrasi

Konsentrasi (mg/L)	Waktu Kontak (menit)	Adsorbansi
50	0	0,0735
		0,0732
		0,0730
	30	0,0467
		0,0469
		0,0471
	60	0,0417
		0,0421
		0,0416
	90	0,0256
		0,0252
		0,0252
	120	0,0226
		0,0226
		0,0232
	150	0,023
		0,0224
		0,0224
100	0	0,0731
		0,0731
		0,0735
	30	0,0473
		0,0478
		0,0472
	60	0,0427
		0,0427
		0,0427

Konsentrasi (mg/L)	Waktu Kontak (menit)	Adsorbansi
	90	0,0433
		0,0376
		0,0371
		0,0371
	120	0,0277
		0,0282
		0,0277
	150	0,0277
		0,0273
		0,0275
150	0	0,0735
		0,0732
		0,073
	30	0,0496
		0,0502
		0,0496
	60	0,0437
		0,044
		0,0435
	90	0,0395
		0,04
		0,0395
	120	0,0373
		0,0373
		0,0379
	150	0,0372
		0,0378
		0,0373
200	0	0,0731
		0,0737
		0,0732
	30	0,0565
		0,0571
		0,0565
	60	0,0501
		0,0506
		0,0502
	90	0,0471
		0,0465
		0,0465
	120	0,0436
		0,0442
		0,0436
	150	0,0441
		0,0436

Konsentrasi (mg/L)	Waktu Kontak (menit)	Adsorbansi
250	0	0,0436
		0,0735
		0,073
		0,0731
	30	0,0582
		0,0581
		0,0586
	60	0,0507
		0,0508
		0,0512
	90	0,0499
		0,0493
		0,0493
	120	0,0493
		0,0497
		0,0493
	150	0,0494
		0,0494
		0,0499
300	0	0,073
		0,0732
		0,0734
	30	0,0617
		0,0621
		0,0616
	60	0,0549
		0,0545
		0,0544
	90	0,0517
		0,0522
		0,0517
	120	0,0517
		0,0516
		0,0522
	150	0,0517
		0,0521
		0,0516
350	0	0,0736
		0,073
		0,073
	30	0,0625
		0,0625
		0,0631
	60	0,0546
		0,0547

Konsentrasi (mg/L)	Waktu Kontak (menit)	Adsorbansi
	90	0,0552
		0,0546
		0,055
		0,0546
	120	0,0545
		0,0546
		0,055
	150	0,0545
		0,0549
		0,0545
400	0	0,0736
		0,073
		0,073
	30	0,0641
		0,0639
		0,0637
	60	0,057
		0,0574
		0,0568
	90	0,0569
		0,0573
		0,0569
	120	0,0572
		0,0568
		0,057
	150	0,0573
		0,0567
		0,0568
450	0	0,0735
		0,073
		0,0731
	30	0,0652
		0,0655
		0,065
	60	0,0586
		0,0592
		0,0586
	90	0,0585
		0,0591
		0,0586
	120	0,059
		0,0585
		0,0586
	150	0,0584
		0,0586

Konsentrasi (mg/L)	Waktu Kontak (menit)	Adsorbansi
		0,059

c) Pengujian Variasi pH

pH	Adsorbansi			Faktor Pengencer	Rata-Rata Adsorbansi
	1	2	3		
2	0,0623	0,0629	0,0626	45	0,0626
4	0,0658	0,0666	0,0657	45	0,0661
6	0,0103	0,0095	0,0114	45	0,01040
7	0,0065	0,0067	0,0110	45	0,00807
10	0,0161	0,0160	0,0163	45	0,01613
12	0,0158	0,0161	0,0168	45	0,01623

d) Pengujian Variasi Massa Adsorben

Massa Adsorben	Adsorbansi			Faktor Pengencer	Rata-Rata Adsorbansi
	1	2	3		
0,015	0,0136	0,0130	0,0130	45	0,0132
0,025	0,0091	0,0092	0,0096	45	0,0093
0,05	0,0069	0,0073	0,0071	45	0,0071
0,075	0,0066	0,0069	0,0059	45	0,0065

e) Pengujian Variasi Reusabilitas Adsorben

Siklus	Adsorbansi			Faktor Pengencer	Rata-Rata Adsorbansi
	1	2	3		
1	0,0080	0,0074	0,0078	45	0,0077
2	0,0094	0,0089	0,0091	45	0,0091
3	0,0214	0,0215	0,0225	45	0,0218
4	0,0301	0,0303	0,0296	45	0,0300
5	0,0439	0,0424	0,0421	45	0,0428

Surabaya, 24 Juni 2026

Mengetahui

Kepala Laboratorium Pengolahan Limbah


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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Indirra Yasmine Putri Santoso. Lahir di Tuban, 09 Desember 2003. Pendidikan formal yang ditempuh penulis diantaranya: SD Negeri Latsari Tuban (2010-2016), SMP Negeri 6 Tuban (2016-2019), dan SMA Negeri 2 Tuban (2019-2022). Penulis kemudian melanjutkan pendidikan tinggi di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya pada Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah, Jurusan Teknik Permesinan Kapal pada Tahun 2022. Selama masa perkuliahan, penulis aktif di organisasi HIMATEKPL dengan mengemban amanah di Departemen Riset dan Keilmuan, yaitu sebagai dan Kepala Departemen pada periode 2025 dan Staf Ahli pada periode 2023–2024. Selain itu, penulis juga produktif mengikuti kompetisi. Pada tahun 2024, penulis berhasil mendapatkan pendanaan Pekan Kreativitas Mahasiswa (PKM) kategori Riset Eksakta. Selanjutnya di tahun 2025, penulis lolos ke ajang KMI Expo dan meraih Juara Harapan 3 kategori Teknologi Terapan dan Manufaktur pada Program Pembinaan Mahasiswa Wirausaha. Penulis memiliki pengalaman *On the Job Training* pada 4 industri yang berbeda, seperti PT. Dowa Eco System Indonesia (Februari – April 2025), PT. Langgeng Jaya Plastindo (Mei – Juni 2025), PT. Semen Gresik (Persero) Tbk. (Juli – September 2025), dan PT. Gusse Strategic Indonesia (Oktober – November 2025). Informasi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui via e-mail: indirrayasmine@gmail.com

(Halaman ini sengaja dikosongkan)