

TESIS

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLIT-MAGNETIT UNTUK
PENYERAPAN LOGAM BERAT (Pb DAN Cu) DALAM PENGOLAHAN
AIR LIMBAH**

**Sebagai salah syarat mendapatkan gelar Magister Sains di bidang
Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



Oleh:

Mita Fitriani

NIM. 08072622327004

**PROGRAM PASCASARJANA JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
PALEMBANG
2024**

LEMBAR PENGESAHAN

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLIT-MAGNETIT UNTUK
PENYERAPAN LOGAM BERAT (Pb DAN Cu) DALAM PENGOLAHAN AIR
LIMBAH**

Sebagai salah satu syarat mendapatkan gelar Magister Sains di bidang
Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Oleh :
Mita Fitriani
NIM. 08072622327004

Palembang, 25 November 2024

Pembimbing I

Dr. Ramlan
NIP. 196604101993031003

Pembimbing II

Prof. Dr. Yohanes Edi Gunanto, M.Si.
NIDN : 0325066707

Mengetahui,
Koordinator Program Studi
Magister Fisika FMIPA Unsri

Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.
NIP. 197211252000122001


HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah pada tesis yang berjudul “Sintesis Dan Karakterisasi Zeolit-Magnetit Untuk Penyerapan Logam Berat (Pb dan Cu) Dalam Pengolahan Air Limbah” telah diseminarkan dihadapan tim penguji seminar sidang Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 25 November 2024 dan dinyatakan sah untuk melakukan penelitian lebih lanjut.

Palembang, 25 November 2024

Ketua :

Dr. Idha Royani, M.Si
NIP. 197105151999032001

()

Pembimbing :

1. Dr. Ramlan
NIP. 196604101993031003


()

2. Prof. Dr. Yohanes Edi Gunanto, M.Si.
NIDN : 0325066707

()

Penguji :

1. Dr. Akhmad Aminuddin Bama, M.Si
NIP. 197009141997021004

()

2. Dr. Akmal Johan, M.Si
NIP. 197312211999031003

()

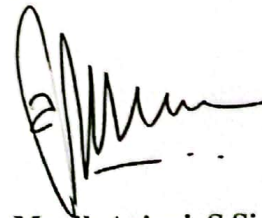
Mengetahui,

Dekan Fakultas Matematika dan
Ilmu Pengetahuan Alam



Prof. Hermansyah, S.Si, M.Si, Ph.D
NIP. 197111191997021001

Koordinator Program Studi
Magister Fisika FMIPA Unsri

()

Dr. Menik Ariani, S.Si, M.Si.
NIP. 197211252000122001

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Mita Fitriani

NIM : 08072622327004

Judul : Sintesis Dan Karakterisasi Zeolit-Magnetit Untuk Penyerapan Logam Berat (Pb dan Cu) Dalam Pengolahan Air Limbah

Menyatakan bahwa tesis ini merupakan hasil karya saya sendiri didampingi oleh tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan atau plagiat. Apabila ditemukan unsur pemjiplakan/plagiat dalam tesis ini maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Dengan demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa adanya paksaan dari siapapun.

Palembang, 25 November 2024

Yang menyatakan



A handwritten signature in black ink, appearing to be "Mita Fitriani".

Mita Fitriani

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Mita Fitriani

NIM : 08072622327004

Judul : Sintesis Dan Karakterisasi Zeolit-Magnetit Untuk Penyerapan Logam Berat (Pb dan Cu) Dalam Pengolahan Air Limbah

Memberikan izin kepada pembimbing dan Universitas Sriwijaya untuk mempublikasi hasil penelitian saya untuk kepentingan akademik apabila dalam waktu 1 tahun tidak mempublikasi penelitian saya. Dalam kasus ini saya setuju untuk menempatkan pembimbing sebagai penulis korespondensi (corresponding author)

Dengan demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa adanya paksaan dari siapapun.

Palembang, 25 November 2024

Yang menyatakan




Mita Fitriani

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur marilah kita panjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya serta memberikan kesehatan jasmani dan rohani sehingga penulis dapat membuat dan menyelesaikan tesis ini. Tesis ini dibuat untuk memenuhi persyaratan Tugas Akhir, Magister Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya. Tugas Akhir ini dilakukan di Pusat Riset Material Maju (PRMM), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan. Tesis dengan judul **“Sintesis dan Karakterisasi Zeolit-Magnetit untuk Penyerapan Logam Berat (Pb dan Cu) dalam Pengolahan Air Limbah”**. Saya ucapkan terima kepada Bapak Dr. Ramlan dan Bapak Prof. Dr. Yohanes Edi Gunanto, M.Si selaku Dosen Pembimbing I dan Dosen Pembimbing II yang banyak memberikan arahan, masukan, bantuan, dan waktu selama pelaksanaan tugas akhir. Tesis ini tidak dapat terwujud tanpa adanya bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Allah SWT yang selalu memberikan limpahan berkat dan rahmatnya kepada penulis.
2. Kedua Orang Tua dan Adik tercinta yang telah selalu memberikan do'a dan dukungan dalam berbagai hal.
3. Bapak Dr. Jan Setiawan, S.Si, M.Si selaku Peneliti Ahli Madya di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah membimbing dan membantu menyelesaikan penelitian tugas akhir.
4. Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah memberikan pendanaan beasiswa Bantuan Riset bagi Talenta Riset dan Inovasi (BARISTA) kepada penulis.
5. Bapak Dr. Hermansyah, M.Si., Ph.D., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya.

6. Ibu Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si., selaku Koordinator Program Studi Magister Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya.
7. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen beserta Staf di Magister Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu dan bantuan kepada penulis selama ini.
8. Seluruh teman-teman Magister Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya angkatan 2022, angkatan 2023, dan teman-teman seperjuangan Tugas Akhir di Pusat Riset Material Maju (PRMM), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tesis ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan bantuan berupa kritik dan saran yang sifatnya membangun dan dapat membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini dengan baik dan maksimal. Penulis sangat berharap semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca.

Palembang, 25 November 2024

Mita Fitriani

NIM. 08072622327004

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLIT-MAGNETIT UNTUK
PENYERAPAN LOGAM BERAT (Pb DAN Cu) DALAM PENGOLAHAN
AIR LIMBAH**

Mita Fitriani

*Program Studi Magister Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Sriwijaya, Sumatera selatan, Indonesia*

ABSTRAK

Kebutuhan air bersih semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kegiatan ekonomi. Meningkatnya pembangunan industri memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pencemaran melalui pembuangan limbah industri. Logam berat dapat masuk dan terakumulasi di dalam tubuh manusia melalui konsumsi biota yang dapat menimbulkan dampak buruk bagi kesehatan. Metode adsorpsi dapat digunakan dalam pengolahan air limbah yang mengandung logam berat. Zeolit-magnetit disintesis menggunakan *coal fly ash* (CFA) PLTU Tanjung Enim dengan waktu hidrotermal 24 jam dan pasir besi, yang menunjukkan adanya fasa sodalit, magnetit, dan fasa kuarsa. Morfologi zeolit-magnetit memiliki bentuk yang tidak beraturan dan permukaan yang kasar. Ukuran butir zeolit-magnetit mulai dari 3,7-9,5 μm . Persentase kandungan unsur tertinggi terdapat pada O, Na, Al, Si, dan Fe yang membuktikan bahwa terbentuknya senyawa zeolit-magnetit. Proses adsorpsi dilakukan pada ion tunggal dan campuran. Pada ion tunggal, kandungan timbal (Pb) dalam air limbah mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu kontak. Pada ion campuran (Pb dan Cu), kandungan timbal (Pb) meningkat pada menit ke-90 karena proses adsorpsi melambat, dan kandungan tembaga (Cu) terus meningkat seiring berjalannya waktu karena selektivitas adsorpsi timbal (Pb) lebih besar dibandingkan dengan tembaga (Cu). Penurunan kemampuan adsorpsi pada waktu kontak yang lama disebabkan oleh interaksi adsorben dengan ion logam yang melemah.

Kata Kunci: Zeolit-magnetit, adsorben, adsorpsi, tembaga, timbal

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZEOLITE-MAGNETITE FOR SOLUTION OF HEAVY METALS (Pb AND Cu) IN WASTEWATER TREATMENT WASTE WATER

Mita Fitriani

Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Science, University of Sriwijaya, South Sumatera, Indonesia

ABSTRACT

The need for clean water is increasing in line with the increase in economic activities. Increasing industrial development contributes significantly to pollution through industrial waste disposal. Heavy metals can enter and accumulate in the human body through the consumption of biota, which can cause adverse health effects. Adsorption methods can be used in the treatment of wastewater containing heavy metals. Zeolite-magnetite was synthesized using coal fly ash (CFA) PLTU Tanjung Enim with a hydrothermal time of 24 hours and iron sand, which showed the presence of sodalite, Fe_3O_4 , and quartz phases. The morphology of zeolite-magnetite has an irregular shape and a rough surface. The grain size of zeolite-magnetite starts from 3.7-9.5 μm . The highest percentage of elemental content is found in O, Na, Al, Si, and Fe, which proves the formation of zeolite-magnetite compounds. The adsorption process was carried out on single and mixed ions. In single ion, the lead (Pb) content in wastewater decreased as the contact time increased. In mixed ions (Pb and Cu), the lead (Pb) content increased at the 90 minutes because the adsorption process slowed down, and the copper (Cu) content continued to increase over time because the selectivity of lead (Pb) adsorption was greater than copper (Cu). The decrease in adsorption ability at long contact times is due to the weakened interaction of the adsorbent with metal ions.

Keywords: Zeolite-magnetite, adsorbent, adsorption, copper, lead

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	2
HALAMAN PERSETUJUAN	3
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS	4
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	5
KATA PENGANTAR.....	6
ABSTRAK	8
ABSTRACT	9
DAFTAR ISI.....	10
DAFTAR GAMBAR.....	12
DAFTAR TABEL	13
DAFTAR SINGKATAN.....	14
BAB I PENDAHULUAN.....	16
1.1 Latar Belakang	16
1.2 Rumusan Masalah.....	18
1.3 Tujuan Penelitian	18
1.4 Manfaat Penelitian	18
1.5 Batasan Masalah	19
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	20
2.1. Adsorpsi	20
2.2. Logam Berat.....	21
2.2.1 Tembaga.....	21
2.2.2 Timbal	22
2.3. Adsorben	22
2.3.1 Zeolit	22
2.3.2 <i>Coal Fly Ash</i> (CFA)	25
2.3.3 Magnetit	27
2.4. Metode Kopresipitasi	28
2.5. Metode Hidrotermal.....	29
2.6. Karakterisasi	29
2.6.1 X-ray Flourescence (XRF).....	29
2.6.2 X-Ray Diffraction (XRD)	30
2.6.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)	32
2.6.4 Fourier transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	33
2.6.5 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)	34
BAB III METODE PENELITIAN	36
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	36
3.2. Bahan Peralatan Penelitian.....	36
3.3. Prosedur Penelitian	37

3.4. Diagram Alir Penelitian	41
3.5. Karakterisasi Material	50
3.5.1 Pengujian XRD (X-ray Diffraction)	50
3.5.2 Pengujian XRF (X-Ray Fluoresence)	50
3.5.3 Pengujian SEM-EDX (<i>Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray</i>)	50
3.5.4 Pengujian FTIR (<i>Fourier-transform Infrared Spectroscopy</i>)	50
3.5.5 Karakterisasi AAS (<i>Atomic Absorbtion Spectrophotometer</i>)	50
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	51
4.1 Karekterisasi <i>Coal Fly Ash</i> PLTU Tanjung Enim	51
4.2 Sintesis Zeolit.....	53
4.3 Sintesis Zeolit-Magnetit.....	60
4.4 Adsorpsi Pb dan Cu	64
BAB V PENUTUP.....	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	67
DAFTAR PUSTAKA.....	68
LAMPIRAN.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi dari Adsorpsi	20
Gambar 2. 2 Tetrahedral AlO_4 dan SiO_4 bergabung dengan atom oksigen yang membentuk struktur retikuler zeolit.....	23
Gambar 2. 3 Struktur Zeolit LTA	25
Gambar 2. 4 Abu Layang (fly ash) PLTU Tanjung Enim	27
Gambar 2. 5 Struktur kristal pada magnetit.....	28
Gambar 2. 6 Alat Uji XRF.....	29
Gambar 2. 7 Ilustrasi difraksi sinar-X.....	31
Gambar 2. 8 Pola XRD Fly Ash dan Bottom Ash	32
Gambar 2. 9 Morfologi Abu Layang (fly ash).....	33
Gambar 2. 10 Gambar Analisis Morfologi SEM Fe_3O_4	33
Gambar 2. 11 Alat Uji Karakterisasi FTIR.....	34
Gambar 3. 1 Proses Adsorpsi Menggunakan Adsorben Zeolit-Magnetit	42
Gambar 3. 2 Proses Preparasi Sampel CFA.....	43
Gambar 3. 3 Proses Peleburan Alkali.....	44
Gambar 3. 4 Proses Pembuatan Larutan Natrium Alumina.....	45
Gambar 3. 5 Proses Hidrotermal.....	45
Gambar 3. 6 Proses Ekstraksi Pasir Besi.....	46
Gambar 3. 7 Proses Sintesis Fe_3O_4	47
Gambar 3. 8 Proses Sintesis Zeolit-Magnetit.....	48
Gambar 3. 9 Proses Adsorpsi Zeolit Magnetit.....	49
Gambar 4. 1 Puncak XRD zeolit sintesis penelitian sebelumnya	54
Gambar 4. 2 Pola Difraksi Sinar-X Zeolit	55
Gambar 4. 3 Morfoligi Zeolit sintesis.....	58
Gambar 4. 4 Bilangan gelombang zeolit sintesis.....	59
Gambar 4. 5 (a) zeolit sintesis, (b) zeolit-magnetit sintesis.....	60
Gambar 4. 6 Morfologi pada zeolit-magnetit.....	61
Gambar 4. 7 Pola Difraksi Sinar-X Zeolit-Magnetit	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Sintesis zeolit	24
Tabel 2. 2 Komposisi Kimia Abu Layang (<i>fly Ash</i>).....	26
Tabel 2. 3 XRF Komposisi Abu Layang Batubara.....	30
Tabel 4. 1 Komposisi Kimia CFA PLTU Tanjung Enim.	51
Tabel 4. 2 Komposisi Kimia CFA setelah Pencucian dengan HCl.....	52
Tabel 4. 3 Ukuran Kristal Pada Zeolit Sintesis Waktu Hidrotermal 15 Jam.	56
Tabel 4. 4 Ukuran Kristal Pada Zeolit Sintesis Waktu Hidrotermal 24 Jam.	57
Tabel 4. 5 Hasil EDX zeolit-magnetit.....	62
Tabel 4. 6 Ukuran kristal pada sampel zeolit-magnetit.	64
Tabel 4. 7 Hasil karakterisasi AAS air limbah yang mengandung Pb.	65
Tabel 4. 8 Hasil karakterisasi AAS air limbah yang mengandung Pb dan Cu.	65

DAFTAR SINGKATAN

Al	: Aluminium
AAS	: Atomic Absorption Spectrophotometer
Al ₂ O ₃	: Aluminium Oksida atau Alumina
Al(OH) ₃	: Aluminium Hidroksida
BARISTA	: Bantuan Riset bagi Talenta Riset dan Inovasi
BRIN	: Badan Riset dan Inovasi Nasional
C	: Karbon
Ca	: Kalsium
CaO	: Kalsium Oksida
CBA	: coal Bottom Ash
Cd	: Cadmium
CFA	: Coal Fly Ash
Cl	: Klorin
Cr	: Kromium
Cu	: Tembaga
FCC	: Face Center Cubic
Fe	: Besi
Fe ₂ O ₃	: Iron(III) Oxide atau Oksida besi(III)
Fe ₃ O ₄	: Iron(II,III) Oxide atau Besi(II,III) Oksida
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spectroscopy
FWHM	: Full Width Half Maximum
H	: Hidrogen
HCl	: Hidrogen Klorida
HEM	: High Energy Milling
Hg	: Merkuri
ICDD	: International Center for Diffraction Data
IR	: Infra-red
K	: Kalium
K ₂ O	: Kalium Oksida
L	: Liter

Mg	: Magnesium
MgO	: Magnesium Oksida
Na	: Natrium
NaOH	: Natrium Hidroksida
NaAlO ₂	: Natrium Aluminat
Na ₂ SiO ₃	: Natrium Silikat
Ni	: Nikel
nm	: Nanometer
O	: Oksigen
Pb	: Timbal
pH	: Potential of Hydrogen atau Power of Hydrogen
PLTU	: Pembangkit Listrik Tenaga Uap
PRMM	: Pusat Riset Material Maju
PUSPIPTEK	: Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi
P ₂ O ₅	: Fosfor Pentoksida
rpm	: Rotasi Per Minute atau Putaran per Menit
SEM-EDX	: Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray
Si	: Silikon
SiO ₂	: Silika Dioksida
Sr	: Strontium
TiO ₂	: Titanium Dioksida
wt	: Weight
XRD	: X-ray Diffraction
XRF	: X-ray Fluorescence
Zn	: Zinc

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air termasuk dalam sumber daya alam yang penting untuk kehidupan di bumi. Kebutuhan air bersih semakin meningkat selaras dengan meningkatnya kegiatan ekonomi (Israr et al., 2017). Air adalah mineral kompleks yang dapat ditemukan di alam dalam wujud gas, cair, dan padat. Pada permukaan bumi terdiri dari 70% permukaan yang tertutup oleh air, akan tetapi sebagian besar air tawar berbentuk gletser, sehingga tidak dapat dikonsumsi (De Magalhães et al., 2022). Sumber daya air tawar terbesar berasal dari sungai, air tersebut termasuk dalam salah satu yang cocok untuk dapat dikonsumsi (Hartuno et al., 2014; Rismiarti et al., 2016; Tri et al., 2020). Perkembangan industri yang semakin meningkat pada semua bidang memberikan kontribusi yang signifikan dalam pencemaran melalui pembuangan limbah industri. Keberadaan beberapa unsur pencemar yang terdapat dalam air limbah, seperti logam berat (misalnya, timbal, arsenik, kromium, dan merkuri), senyawa berbasis nitrogen dan fosfor, pewarna, dan berbagai senyawa organik. Semua bahan tersebut, jika dibuang tanpa diolah dapat mencemari air, tanah, tanaman, dan hewan, dan pada akhirnya dapat mencapai manusia (De Magalhães et al., 2022).

Air bersih yang dapat digunakan harus dapat memenuhi baku mutu fisik, kimia, dan biologi (Permenkes RI, 2010). Permintaan konsumsi masyarakat tersebut akan menginisiasikan pada limbah yang dapat dihasilkan. Keberadaan beberapa unsur pencemar di air seperti yaitu Tembaga (Cu), Nikel (Ni), Merkuri (Hg), Timbal (Pb), Kadmium (Cd), Kromium (Cr), dan Zinc (Zn), pewarna, dan berbagai senyawa organik. Unsur-unsur tersebut jika dibuang tanpa diolah akan mencemari lingkungan termasuk air (Abdelrahman, 2018; Collins et al., 2020a; Pabilang et al., 2023). Timbal (Pb) dan Tembaga (Cu) termasuk logam berat yang jika masuk ke dalam tubuh manusia melalui konsumsi biota dapat berpotensi menimbulkan efek negatif terhadap kesehatan (Siringoringo et al., 2022). Sehingga dibutuhkan penghilangan logam-logam berat atau pengolahan air yang tercemar logam berat dalam air sangat dibutuhkan.

Pengolahan air limbah telah banyak dilakukan dan dikembangkan dalam beberapa dekade, yang berfungsi untuk menghilangkan pengotor (unsur pencemar air)

dari air limbah. Banyak metode yang telah digunakan seperti presipitasi kimia, elektrodialisis, fotokatalisis, dan adsorben (Saleh et al., 2022). Metode-metode yang digunakan memiliki beberapa kekurangan seperti biaya yang tinggi dan efisiensi yang terbatas. Oleh karena itu, pengolahan air limbah dapat dilakukan dengan cara adsorpsi (De Magalhães et al., 2022; Peng et al., 2021; Santoso et al., 2020). Beragam material telah digunakan sebagai adsorben dalam pengolahan air limbah. Zeolit menjadi salah satu pilihan karena memiliki luas permukaan yang besar serta struktur berpori yang mendukung proses adsorpsi (Imessaoudene et al., 2022; Kouser et al., 2022; Velarde et al., 2023). Zeolit mempunyai kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dalam pengolahan air. Namun, pemisahan partikel zeolit terdispersi setelah digunakan dalam pengolahan dari media berair cukup sulit. Metode konvensional seperti filtrasi dan sentrifugasi dinilai rumit dan tidak efisien untuk pemisahan adsorben dan adsorbat (Y. Yang et al., 2018). Magnetit (Fe_3O_4) merupakan oksida besi dan mempunyai sifat magnetik (Wroblewski et al., 2020; S. Xu & Lee, 2021). Magnetit sebagai bahan yang bersifat magnetik, memiliki luas permukaan yang tinggi, sehingga dapat dimanfaatkan untuk proses adsorpsi sebagai material adsorben untuk menghilangkan logam berat. Namun, terdapat kelemahan dari adsorben magnetik yaitu mudah mengalami oksidasi (Cao et al., 2017; Maharana & Sen, 2021), sehingga dibutuhkan bahan material tambahan untuk dapat membantu permasalahan tersebut.

Zeolit dapat diperoleh secara alami dan dapat melalui proses sintesis (M. Król, 2020). Zeolit dapat disintesis menggunakan kaolin (Lim et al., 2021), *coal fly ash* (CFA) (Al-dahri et al., 2022; J. Zhang et al., 2022), *coal bottom ash* (CBA) (Sunarti, 2021), chitosan (Hidayat et al., 2022), dan sekam padi (Syarifie et al., 2019). CFA merupakan limbah proses pembakaran batubara, CFA akan dapat menjadi masalah besar jika menumpuk atau bahkan dibiarkan di lingkungan sekitar yang bisa menimbulkan pencemaran lingkungan hidup (Andarini et al., 2018). Provinsi Sumatera Selatan melalui PT. Bukit Asam Tbk menjadi penghasil produksi batubara sejak 1950 (Pataras et al., 2023). Abu batubara PLTU Tanjung Enim untuk saat ini banyak digunakan untuk campuran semen PT. Semen Baturaja (Pataras et al., 2023) dan media tanam (Ali et al., 2023). CFA memiliki kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 lebih dari 80% (Kementerian Negara Lingkungan Hidup, 2018), oleh karena itu CFA dapat dimanfaatkan sebagai pengganti natrium silikat dan natrium aluminat, yang biasa

digunakan dalam produksi zeolit. Sintesis zeolit menggunakan bahan baku CFA dapat menggunakan beberapa metode seperti metode hidrotermal, ultrasonik, dan hidrotermal dengan gelombang mikro (Setiawan et al., 2021). Metode hidrotermal banyak digunakan dalam sintesis zeolit, karena konsumsi energi yang rendah, menghasilkan sedikit polusi udara, dan kontrol terhadap kelarutan yang mudah (Foroughi et al., 2021; Gougazeh & Buhl, 2014; Rendo, 2021; P. Wang et al., 2019).

Pada penelitian memiliki tujuan untuk dapat menganalisis karakteristik dan sifat fisik pada zeolit-magnetit yang berasal dari *coal fly ash* PLTU Tanjung Enim dan pasir besi, serta mengetahui pengaruh waktu kontak pada saat proses adsorpsi logam Pb dan Cu. Sintesis zeolit-magnetit telah banyak dilakukan (Abdullah et al., 2017; Maharana & Sen, 2021; Y. Yang et al., 2018), sehingga penulis ingin membuat suatu keterbaruan dalam sintesis tersebut menggunakan bahan baku dari *coal fly ash* PLTU Tanjung Enim dan pasir besi. Penelitian ini mempelajari sintesis zeolit dari *coal fly ash* menggunakan metode hidrotermal, sintesis magnetit dari pasir besi, sintesis zeolit-magnetit, dan karakterisasinya.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik dan sifat fisik pada zeolit-magnetit yang berasal dari *coal fly ash* PLTU Tanjung Enim dan pasir besi?
2. Bagaimana pengaruh waktu kontak pada proses adsorpsi logam timbal (Pb) dan tembaga (Cu) menggunakan adsorben zeolit-magnetit?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mendapatkan dan menganalisis karakteristik dan sifat fisik zeolit-magnetit yang berasal dari *coal fly ash* PLTU Tanjung Enim dan pasir besi.
2. Mengetahui dan menganalisa pengaruh waktu kontak pada proses adsorpsi logam timbal (Pb) dan tembaga (Cu) menggunakan adsorben zeolit-magnetit.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Mendapatkan rekomendasi sintesis zeolit yang terbuat dari *coal fly ash* PLTU Tanjung Enim.

2. Mendapatkan rekomendasi sintesis zeolit-magnetit untuk aplikasi adsorben dalam pengolahan air limbah.
3. Pengelolaan limbah *coal fly ash* agar mempunyai nilai ekonomis serta ramah lingkungan.

1.5 Batasan Masalah

Dalam penelitian untuk mempermudah menganalisa permasalahan diperlukan batasan masalah. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bahan yang digunakan dalam sintesis berupa *coal fly ash* yang berasal dari PLTU Tanjung Enim dan pasir besi.
2. Proses hidrotermal dilakukan dengan suhu 100 °C.
3. Karakterisasi yang dilakukan berupa karakterisasi XRF, XRD, SEM, SEM-EDX, AAS, dan FTIR.

DAFTAR PUSTAKA

- Abas, K. M., & Fathy, N. A. (2024). Sodalite zeolitic materials produced from coal fly ash for removal of congo red dye from aqueous solutions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(5), 5165–5184. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05347-0>
- Abdelrahman, E. A. (2018). Synthesis of zeolite nanostructures from waste aluminum cans for efficient removal of malachite green dye from aqueous media. *Journal of Molecular Liquids*, 253(2017), 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.038>
- Abdullah, N. H., Shameli, K., Etesami, M., Chan Abdullah, E., & Abdullah, L. C. (2017). Facile and green preparation of magnetite/zeolite nanocomposites for energy application in a single-step procedure. *Journal of Alloys and Compounds*, 719, 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.05.028>
- Al-dahri, T., AbdulRazak, A. A., & Rohani, S. (2022). Preparation and characterization of Linde-type A zeolite (LTA) from coal fly ash by microwave-assisted synthesis method: its application as adsorbent for removal of anionic dyes. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42(7), 2064–2077. <https://doi.org/10.1080/19392699.2020.1792456>
- Alfarisa, S., Rifai, D. A., & Toruan, P. L. (2018). Studi Difraksi Sinar-X Struktur Nano Seng Oksida (ZnO). *Risalah Fisika*, 2(2), 53–57. <https://doi.org/10.35895/rf.v2i2.114>
- Ali, F., Sri Widayati, & Dudi Nasrudin Usman. (2023). Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) sebagai Campuran Media Tanam di PT Bukit Asam, Tbk Tanjung Enim Sumatera Selatan. *Bandung Conference Series: Mining Engineering*, 3(2), 500–509. <https://doi.org/10.29313/bcsme.v3i2.8858>
- ALYATIKAH, E., Siswo, Riaa Safitri, Tety Wahyuningsih Manurung, & Rendy Muhamad Iqbal. (2022). Chemical characteristic of Fly ash and Bottom ash as potential source for synthesis of Aluminosilicate-based materials. *Rafflesia Journal of Natural and Applied Sciences*, 2(2), 160–166. <https://doi.org/10.33369/rjna.v2i2.23935>
- Andarini, N., Lutfia, Z., & Haryati, T. (2018). Sintesis Zeolit A dari Abu Terbang (Fly Ash) Batubara Variasi Rasio Molar Si/Al. *Jurnal Ilmu Dasar*, 19(2), 105.
- Anggraini, N., Agustina, T. E., & Hadiyah, F. (2022). Pengaruh pH dalam Pengolahan

Air Limbah Laboratorium Dengan Metode Adsorpsi untuk Penurunan Kadar Logam Berat Pb, Cu, dan Cd. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 345–355. <https://doi.org/10.14710/jil.20.2.345-355>

Buzukashvili, S., Sommerville, R., Hu, W., Brooks, O., Kökkılıç, O., Ouzilleau, P., Rowson, N. A., & Waters, K. E. (2024). Zeolite synthesis from coal fly ash and its application to heavy metals remediation from water contaminated with Pb, Cu, Zn and Ni ions. *Minerals Engineering*, 209, 108619.

Buzukashvili, S., Sommerville, R., Rowson, N. A., & Waters, K. E. (2024). An overview of zeolites synthesised from coal fly ash and their potential for extracting heavy metals from industrial wastewater. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 63(1), 130–152. <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2160576>

Cao, R., Fan, M., Hu, J., Ruan, W., Xiong, K., & Wei, X. (2017). Optimizing low-concentration mercury removal from aqueous solutions by reduced graphene oxide-supported Fe₃O₄ composites with the aid of an artificial neural network and genetic algorithm. *Materials*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/ma10111279>

Collins, F., Rozhkovskaya, A., Outram, J. G., & Millar, G. J. (2020a). A critical review of waste resources, synthesis, and applications for Zeolite LTA. *Microporous and Mesoporous Materials*, 291(July 2019), 109667. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109667>

Collins, F., Rozhkovskaya, A., Outram, J. G., & Millar, G. J. (2020b). A critical review of waste resources, synthesis, and applications for Zeolite LTA. *Microporous and Mesoporous Materials*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109667>

De Magalhães, L. F., Da Silva, G. R., & Peres, A. E. C. (2022). Zeolite Application in Wastewater Treatment. *Adsorption Science and Technology*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4544104>

Demirbas, A. (2008). Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 157(2–3), 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.024>

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>

- Foroughi, M., Salem, A., & Salem, S. (2021). Characterization of phase transformation from low grade kaolin to zeolite LTA in fusion technique: Focus on quartz melting and crystallization in presence of NaAlO₂. *Materials Chemistry and Physics*, 258(October 2020), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123892>
- Ghina Afrilia, C. (2019). Studi proses sintesis serbuk nano ZnO beserta karakterisasi. *Jurnal Ilmu Dan Inovasi Fisika*, 3(2), 105–113. <https://doi.org/10.24198/jiif.v3i2.23063>
- Ginting, S. B. (2020). Sintesis dan karakterisasi zeolit LTA dari coal bottom ash teraktivasi dengan aging system. *Jurnal Teknologi Dan Inovasi Industri (JTII)*, 1(1). <https://doi.org/10.23960/jtii.v1i1.10>
- Ginting, S., Sari, D. P., Iryani, D. A., Darmansyah, D., Hanif, M., & Wardono, H. (2019). Sintesis Zeolit Lynde Type-A (LTA) Dari Zeolit Alam Lampung (ZAL) Menggunakan Metode Step Change Temperature Of Hydrothermal Dengan Variasi SiO₂/Al₂O₃ Diaplikasikan Untuk Dehidrasi Etanol. *Journal of Chemical Process Engineering*, 4(1), 31–44. <https://doi.org/10.33536/jcpe.v4i1.324>
- Gonjol, S., Sayung, K., Demak, K., Cahyani, M. D., Tn, R. A., & Yulianto, B. (2012). *2022-3951-1-Sm. 1*, 73–79.
- Gougazeh, M., & Buhl, J. C. (2014). Synthesis and characterization of zeolite A by hydrothermal transformation of natural Jordanian kaolin. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 15(1), 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2013.03.007>
- Gupta, A., Sharma, V., Sharma, K., Kumar, V., Choudhary, S., Mankotia, P., Kumar, B., Mishra, H., Moulick, A., Ekielski, A., & Mishra, P. K. (2021). A review of adsorbents for heavy metal decontamination: Growing approach to wastewater treatment. *Materials*, 14(16), 1–45. <https://doi.org/10.3390/ma14164702>
- Halida Sophia, Muhdarina, M., Mahadin T, E., & Ardelia E, D. (2022). Penentuan Situs Asam Bronsted-Lewis dari ZSM-5 yang Disintesis Menggunakan Silika Amorphous dari Fly Ash Sawit. *Photon: Jurnal Sain Dan Kesehatan*, 12(2), 164–170. <https://doi.org/10.37859/jp.v12i2.3701>
- Hartuno, T., Udiantoro, & Agustina, L. (2014). Desain Water Treatment Menggunakan Karbon Aktif Dari Cangkang Kelapa Sawit Pada Proses Pengolahan Air Bersih Di Sungai Martapura. *Ziraa'ah*, 39(3), 1–23.

- Hidayat, E., Yonemura, S., Mitoma, Y., & Harada, H. (2022). Methylene Blue Removal by Chitosan Cross-Linked Zeolite from Aqueous Solution and Other Ion Effects: Isotherm, Kinetic, and Desorption Studies. *Adsorption Science and Technology*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1853758>
- Imessaoudene, A., Cheikh, S., Bollinger, J. C., Belkhiri, L., Tiri, A., Bouzaza, A., El Jery, A., Assadi, A., Amrane, A., & Mouni, L. (2022). Zeolite Waste Characterization and Use as Low-Cost, Ecofriendly, and Sustainable Material for Malachite Green and Methylene Blue Dyes Removal: Box–Behnken Design, Kinetics, and Thermodynamics. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/app12157587>
- Irawati, U., Sunardi, S., & Suraida, S. (2013). Sintesis Dan Karakterisasi Gamma Alumina (γ -Al₂O₃) Dari Kaolin Asal Tatakan, Selatan Berdasarkan Variasi Temperatur Kalsinasi. *Molekul*, 8(1), 31. <https://doi.org/10.20884/1.jm.2013.8.1.123>
- Israr, M., Faraz, A., & Ahmad, S. (2017). Determinants of Safe Drinking Water Supply in Nowshera District of Khyber Pakhtunkhwa. *American Journal of Water Resources*, Vol. 5, 2017, Pages 63-71, 5(3), 63–71. <https://doi.org/10.12691/ajwr-5-3-2>
- Jahan, N., Roy, H., Reaz, A. H., Arshi, S., Rahman, E., Firoz, S. H., & Islam, M. S. (2022). A comparative study on sorption behavior of graphene oxide and reduced graphene oxide towards methylene blue. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100239>
- Joseph, I. V, Tosheva, L., & Doyle, A. M. (2020). Simultaneous removal of Cd(II), Co(II), Cu(II), Pb(II), and Zn(II) ions from aqueous solutions via adsorption on FAU-type zeolites prepared from coal fly ash. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103895. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103895>
- Julinawati, Marlina, Rosnani Nasution, & Sheilatina. (2015). Applying Sem-Edx Techniques To Identify Types of Mineral of Jades (Giok) Takengofying theon, Aceh. *Jurnal Natural*, 15(2), 45–48.
- Jumaeri, Sutarno, Kunarti, E. S., & Santosa, S. J. (2009). Pengaruh Konsentrasi NaOH Dan Temperatur Pada Sintesis Zeolit Dari Abu Layang Secara Alkali Hidrotermal. *Journal of Indonesia Zeolites*, 8(1), 1411–6723.

- Kastanaki, E., Rovithi, A., Iatrou, E., Stratakis, A., & Giannis, A. (2024). Conversion of lignite fly ash into synthetic zeolite by hydrothermal, fusion-hydrothermal, and hydrothermal-sonochemical processes. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 99(1), 70–80. <https://doi.org/10.1002/jctb.7511>
- Kementerian Negara Lingkungan Hidup. (2018). *Lembar Operasional Teknis Lot 2-003*. 3(Limbah B3), 3. http://perpustakaan.menlhk.go.id/pustaka/images/docs/FLY_ASH.pdf
- Khaleque, A., Alam, M. M., Hoque, M., Mondal, S., Haider, J. Bin, Xu, B., Johir, M. A. H., Karmakar, A. K., Zhou, J. L., Ahmed, M. B., & Moni, M. A. (2020). Zeolite synthesis from low-cost materials and environmental applications: A review. *Environmental Advances*, 2(October). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100019>
- Kobayashi, Y., Ogata, F., Nakamura, T., & Kawasaki, N. (2020). Synthesis of novel zeolites produced from fly ash by hydrothermal treatment in alkaline solution and its evaluation as an adsorbent for heavy metal removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103687. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103687>
- Kouser, S., Hezam, A., Khadri, M. J. N., & Khanum, S. A. (2022). A review on zeolite imidazole frameworks: synthesis, properties, and applications. *Journal of Porous Materials*, 29(3), 663–681. <https://doi.org/10.1007/s10934-021-01184-z>
- Król, M. (2020). *Zeolites*.
- Król, M. K., & Jeleń, P. (2021). The effect of heat treatment on the structure of zeolite a. *Materials*, 14(16), 1–9. <https://doi.org/10.3390/ma14164642>
- Krongkrachang, P., Thungngern, P., Asawaworarit, P., Hounkamhang, N., & Eiad-Ua, A. (2019). Synthesis of Zeolite Y from Kaolin via hydrothermal method. *Materials Today: Proceedings*, 17, 1431–1436. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.164>
- Kustomo. (2020). Uji karakterisasi dan mapping magnetit nanopartikel terlapis asam humat dengan Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX). *Indonesian Journal of Chemical Science*, 9(3), 149–153.
- Lim, W. R., Lee, C. H., & Hamm, S. Y. (2021). Synthesis and characteristics of Na-A zeolite from natural kaolin in Korea. *Materials Chemistry and Physics*, 261(October 2020), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124230>
- Liu, J., McCauley, L., Yan, C., Shen, X., & Pinto-Martin, J. A. (2012). Low blood lead levels and hemoglobin concentrations in preschool children in China.

Toxicological and Environmental Chemistry, 94(2), 423–426.
<https://doi.org/10.1080/02772248.2011.628001>

Liu, Y., Han, S., Guan, D., Chen, S., Wu, Y., Yang, Y., & Jiang, N. (2019). Rapid green synthesis of ZSM-5 zeolite from leached illite clay. *Microporous and Mesoporous Materials*, 280(February), 324–330.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.02.027>

Liu, Y., Luo, Q., Wang, G., Li, X., & Na, P. (2018). Synthesis and characterization of zeolite from coal fly ash. *Materials Research Express*, 5(5), 55507.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/aac3ae>

Lolo, A., Patandean, C. F., & Ruslan, E. (2020). Karakterisasi Air Daerah Panas Bumi Pencong Dengan Metode Aas (Atomic Absorption Spectrophotometer) Di Kecamatan Biringbulu, Kabupaten Gowa Propinsi Sulawesi Selatan. *Jurnal Geocelebes*, 4(2), 102–110. <https://doi.org/10.20956/geocelebes.v4i2.8928>

Lubis, K. (2015). Manajemen Sumber Daya Manusia. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 21(79), 50–55.

Ma, Y. K., Rigolet, S., Michelin, L., Paillaud, J. L., Mintova, S., Khoerunnisa, F., Daou, T. J., & Ng, E. P. (2021). Facile and fast determination of Si/Al ratio of zeolites using FTIR spectroscopy technique. *Microporous and Mesoporous Materials*, 311.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110683>

Maharana, M., & Sen, S. (2021). Magnetic zeolite: A green reusable adsorbent in wastewater treatment. *Materials Today: Proceedings*.
Magnetic zeolite: A green reusable adsorbent in wastewater treatment. Materials Today: Proceedings, May.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.370>

Mashkoo, F., & Nasar, A. (2020). Magsorbents: Potential candidates in wastewater treatment technology – A review on the removal of methylene blue dye. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 500(September 2019).
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166408>

Mastinu, A., Kumar, A., Maccarinelli, G., Bonini, S. A., Premoli, M., Aria, F., Gianoncelli, A., & Memo, M. (2019). Zeolite clinoptilolite: Therapeutic virtues of an ancient mineral. *Molecules*, 24(8). <https://doi.org/10.3390/molecules24081517>

Molina, A., & Poole, C. (2004). A comparative study using two methods to produce zeolites from fly ash. *Minerals Engineering*, 17(2), 167–173.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.10.025>

- Moradi, O., & Sharma, G. (2021). Emerging novel polymeric adsorbents for removing dyes from wastewater: A comprehensive review and comparison with other adsorbents. *Environmental Research*, 201(June), 111534. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111534>
- Munajad, A., Subroto, C., & Suwarno. (2018). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy analysis of transformer paper in mineral oil-paper composite insulation under accelerated thermal aging. *Energies*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/en11020364>
- Murukutti, M. K., & Jena, H. (2022). Synthesis of nano-crystalline zeolite-A and zeolite-X from Indian coal fly ash, its characterization and performance evaluation for the removal of Cs⁺ and Sr²⁺ from simulated nuclear waste. *Journal of Hazardous Materials*, 423(PA), 127085. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127085>
- Ningsih, S. K. W. (2016). Sintesis Anorganik. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- Nordin, N., Abdullah, M. M. A. B., Tahir, M. F. M., Sandu, A. V., & Hussin, K. (2016). Utilization of fly ash waste as construction material. *International Journal of Conservation Science*, 7(1), 161–166.
- Pabilang, H., Hamzah, B., Studi, P., Perencanaan, T., Universitas, P., Teknik, F., & Hasanuddin, U. (2023). *Jurnal Darma Agung Analysis Of The Need For Clean Water Supply In The*.
- Pataras, M., Arliansyah, J., Kadarsa, E., Fatimah, N. S., & Diningrum, N. A. K. (2023). *Material Substitution for Flexible Pavement Using Waste Material Fly Ash and Bottom Ash from Bukit Asam Electric Steam Power Plant* (Vol. 1). Atlantis Press International BV. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-118-0_24
- Peng, Z. dong, Lin, X. ming, Zhang, Y. long, Hu, Z., Yang, X. jian, Chen, C. yu, Chen, H. yi, Li, Y. tao, & Wang, J. jin. (2021). Removal of cadmium from wastewater by magnetic zeolite synthesized from natural, low-grade molybdenum. *Science of the Total Environment*, 772, 145355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145355>
- Permenkes RI. (2010). Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 492/Menkes/Per/IV/2010 Tentang Persyaratan Kualitas Air Minum. In *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia* (p. MENKES).

- Petrus, H. T. B. M., Olvianas, M., Suprpta, W., Setiawan, F. A., Prasetya, A., Sutijan, & Anggara, F. (2020). Cenospheres characterization from Indonesian coal-fired power plant fly ash and their potential utilization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104116. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104116>
- Pratiwi, D. Y. (2020). Dampak Pencemaran Logam Berat (Timbal, Tembaga, Merkuri, Kadmium, Krom) Terhadap Organisme Perairan Dan Kesehatan Manusia. *Jurnal Akuatek*, 1(1), 59–65.
- Puspita, E., Naibaho, M., Ramlan, R., & Ginting, M. (2023). Morphological, Elemental Content, and Physical Properties of Cleaned Clinoptilolite Zeolite (10X) Using Sonication and Microwave. *Indonesian Physical Review*, 6(1), 95–104. <https://doi.org/10.29303/ipr.v6i1.204>
- Putra, A. Y., & Mairizki, F. (2020). Penentuan Kandungan Logam Berat Pada Air Tanah Di Kecamatan Kubu Babussalam, Rokan Hilir, Riau. *Jurnal Katalisator*, 5(1), 47. <https://doi.org/10.22216/jk.v5i1.5277>
- Rafieizonooz, M., Khankhaje, E., & Rezanian, S. (2022). Assessment of environmental and chemical properties of coal ashes including fly ash and bottom ash, and coal ash concrete. *Journal of Building Engineering*, 49(November 2021), 104040. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104040>
- Rahmayanti, M. (2020). Sintesis Dan Karakterisasi Magnetit (Fe₃O₄): Studi Komparasi Metode Konvensional Dan Metode Sonokimia. *Al Ulum: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 6(1), 26. <https://doi.org/10.31602/ajst.v6i1.3659>
- Rendo, D. (2021). *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi Adsorption of Methylene Blue Dye using Fe 304 Magnetized Natural H*). 24(2), 51–57.
- Rismiarti, Z., Yuniati, Y., & Alfanaar, R. (2016). Penerapan Metode Sonikasi terhadap Adsorpsi Fe(III) pada Zeolit Alam Teraktivasi. *Alchemy*, 5(2), 63. <https://doi.org/10.18860/al.v5i2.3673>
- Rizkiana, L., Karina, S., Studi Ilmu Kelautan, P., Kelautan dan Perikanan, F., Syiah Kuala, U., Studi Budidaya Perairan, P., Syiah Kuala Darussalam, U., & Aceh, B. (2017). Analisis Timbal (Pb) Pada Sedimen Dan Air Laut Di Kawasan Pelabuhan Nelayan Gampong Deah Glumpang Kota Banda Aceh Analysis Of Lead (Pb) In Sediment And Seawater At Fishing Port Of Gampong Deah Glumpang, Banda Aceh. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Kelautan Dan Perikanan Unsyiah*, 2(1), 89–96.

- Rosyidah, A. K., & Suyanta, S. (2021). Sintesis Dan Karakterisasi Komposit Zeolit Magnetit Dan Aplikasinya Sebagai Adsorben Ni(II). *Jurnal Sains Dan Terapan Kimia*, 15(1), 37. <https://doi.org/10.20527/jstk.v15i1.9609>
- Rouchalová, K., Rouchalová, D., Čablík, V., & Matýsek, D. (2024). Microwave-Assisted Hydrothermal Synthesis of Pure-Phase Sodalite (>99 wt.%) in Suspension: Methodology Design and Verification. *Materials*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/ma17010269>
- Saleh, T. A., Mustaqeem, M., & Khaled, M. (2022). Water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 17(November 2020), 100617. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100617>
- Santoso, E., Ediati, R., Kusumawati, Y., Bahruji, H., Sulistiono, D. O., & Prasetyoko, D. (2020). Review on recent advances of carbon based adsorbent for methylene blue removal from waste water. *Materials Today Chemistry*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2019.100233>
- Saputri, C. A. (2020). Kapasitas Adsorpsi Serbuk Nata De Coco (Bacterial Sellulose) Terhadap Ion Pb²⁺ Menggunakan Metode Batch. *Jurnal Kimia*, 14(1), 71. <https://doi.org/10.24843/jchem.2020.v14.i01.p12>
- Sari, M. E. F., Suprpto, & Prasetyoko, D. (2018). Direct synthesis of sodalite from kaolin: The influence of alkalinity. *Indonesian Journal of Chemistry*, 18(4), 607–613. <https://doi.org/10.22146/ijc.25191>
- Setiabudi, A. R. H. A. M. (2012). Karakterisasi Material: Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia. In *UPI Press* (Vol. 1).
- Setiawan, A., Rahmadania, A. N., & Mayangsari, N. E. (2021). Adsorpsi Cu(Ii) Menggunakan Zeolit Sintesis Kombinasi Abu Terbang Dan Abu Dasar Dengan Variasi Waktu Aging Cu(Ii) Adsorption By Using Synthetic Zeolite Combination Of Fly Ash And Bottom Ash With Aging Time Variation. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 15(1), 113–124.
- Shi, W., Bai, J., Kong, L., Li, H., Bai, Z., Vassilev, S. V., & Li, W. (2021). An overview of the coal ash transition process from solid to slag. *Fuel*, 287(August), 119537. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119537>
- Shubair, T., Tahara, A., & Khandaker, S. (2022). Optimizing the magnetic separation of strontium ion using modified zeolite with nano iron particles. *Case Studies in*

Chemical and Environmental Engineering, 6(June), 100243.
<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100243>

- Sirait, R. A., Salomo, S., Muhammad, J., & Taer, E. (2022). Sintesis Dan Karakterisasi Nanopartikel Oksida Besi Menggunakan Metode Ball Milling Dan Kopresipitasi. *Komunikasi Fisika Indonesia*, 19(2), 91. <https://doi.org/10.31258/jkfi.19.2.91-98>
- Siringoringo, V. T., Pringgenies, D., & Ambariyanto, A. (2022). Kajian Kandungan Logam Berat Merkuri (Hg), Tembaga (Cu), dan Timbal (Pb) pada Perna viridis di Kota Semarang. *Journal of Marine Research*, 11(3), 539–546. <https://doi.org/10.14710/jmr.v11i3.33864>
- Sriatun, S. (2004). Sintesis Zeolit A dan Kemungkinan Penggunaannya Sebagai Penukar Kation. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 7(3), 61–67. <https://doi.org/10.14710/jksa.7.3.61-67>
- Sunarti, S. (2021). Sintesis Zeolit a Dari Abu Dasar Batubara (Coal Bottom Ash) Dengan Metode Peleburan Dan Hidrotermal. *Molluca Journal of Chemistry Education (MJoCE)*, 11(1), 8–16. <https://doi.org/10.30598/mjocev011iss1pp8-16>
- Supriyanto, C., Samin, & Kamal, Z. (2007). Analisis Cemaran Logam Berat Pb, Cu, dan Cd pada Ikan Air Tawar dengan Metode Spektometri Nyala Serapan Atom (SSA). *Seminar Nasional III SDM Teknologi Nuklir, November*, 147–152.
- Surya, I., Purwandari, V., & Khodijah, A. (2022). Pengaruh Kadar Silika Dari Fly Ash Batu Bara Sebagai Bahan Pengisi Hidrogel Berbahan Dasar Selulosa Bakteri (Hsb). *Jurnal Kimia Saintek Dan Pendidikan*, 6(1), 36–46.
- Syaifie, P. H., Ayu, G., Kusumah, P., & Taufiq, A. (2019). Abu Sekam Padi Karawang Synthesis and Characterization of Zeolite from Karawang Rice Husk Ash Sintesis Dan Karakterisasi Zeolit Berbahan Dasar Abu Sekam Padi ... (Putri H . Syaifie , dkk .). *Sains Dan Terapan Kimia*, 13(2), 89–98.
- Tahir, D., Rauf, N., & Sari, H. (2010). Karakterisasi Sifat Strukturnya Dengan Memvariasikan Konsentrasi NH₄OH (Amonium Hidroksida) Synthesis of Fe₃O₄ (Magnetite) Using Coprecipitation Method And Structure Characterization By Variation The Concentration of NH₄OH (Ammonium Hydroxide. *Jurusan Fisika FMIPA UNHAS*, 4, 3–5.
- Tamjidi, S., Esmaili, H., & Kamyab Moghadas, B. (2019). Application of magnetic adsorbents for removal of heavy metals from wastewater: A review study. *Materials Research Express*, 6(10). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3ffb>

- Tran, N. B. T., Duong, N. B., & Le, N. L. (2021). Synthesis and Characterization of Magnetic Fe₃O₄/Zeolite NaA Nanocomposite for the Adsorption Removal of Methylene Blue Potential in Wastewater Treatment. *Journal of Chemistry*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6678588>
- Tri, N. L. M., Thang, P. Q., Van Tan, L., Huong, P. T., Kim, J., Viet, N. M., Phuong, N. M., & Al Tahtamouni, T. M. (2020). Removal of phenolic compounds from wastewaters by using synthesized Fe-nano zeolite. *Journal of Water Process Engineering*, 33(November 2019), 101070. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101070>
- Velarde, L., Nabavi, M. S., Escalera, E., Antti, M. L., & Akhtar, F. (2023). Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review. *Chemosphere*, 328(February), 138508. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508>
- Vunain, E., Mishra, A. K., & Mamba, B. B. (2016). Dendrimers, mesoporous silicas and chitosan-based nanosorbents for the removal of heavy-metal ions: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 86, 570–586. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.02.005>
- Wang, L., Wang, G., Li, X., & Liu, Y. (2018). Synthesis and characterization of Y-type zeolite from coal fly ash by hydrothermal method. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 12(2), 618–624. <https://doi.org/10.12030/j.cjee.201706100>
- Wang, P., Sun, Q., Zhang, Y., & Cao, J. (2019). Hydrothermal synthesis of magnetic zeolite P from fly ash and its properties. *Materials Research Express*, 7(1). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab609c>
- Warzybok, M. (2018). *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska I Architektury Journal Of Civil Engineering, Environment And Architecture Magdalena Warzybok 1 Jolanta Warchol 2 Synthesis Of Kaolin-Based Zeolite Y And Its Application For Adsorption Of Two Carbonyl Compound Gase*. 65, 13–26. <https://doi.org/10.7862/rb.2018.2>
- Widodo, L. U., Najah, S., & Istiqomah, C. (2020). Pembuatan Adsorben Berbahan Baku Tanah Liat Dari Limbah Industri Pencucian Pasir Silika Dengan Perbedaan Konsentrasi HCl dan Waktu Aktivasi. *Journal of Research and Technology*, 6(1), 10–15. <https://doi.org/10.55732/jrt.v6i1.134>
- Wijayanto, S. ., & A.P Bayuseno. (2014). Wijayanto_Analisis SEM. *Jurnal Teknik Mesin*, 2(4), 33–39.

- Winarno, H., Muhammad, D., & Wibowo, Y. G. (2019). Pemanfaatan Limbah Fly Ash Dan Bottom Ash Dari Pltu Sumsel-5 Sebagai Bahan Utama Pembuatan Paving Block. *Jurnal Teknik*, *11*(1), 1067. <https://doi.org/10.30736/jt.v11i1.288>
- Worch, E. (2012). Adsorption Technology in Water Treatment. In *Adsorption Technology in Water Treatment*. <https://doi.org/10.1515/9783110240238>
- Wroblewski, C., Volford, T., Martos, B., Samoluk, J., & Martos, P. (2020). High yield synthesis and application of magnetite nanoparticles (Fe₃O₄). *Magnetochemistry*, *6*(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6020022>
- Wu, W., Wu, Z., Yu, T., Jiang, C., & Kim, W. S. (2015). Recent progress on magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis, surface functional strategies and biomedical applications. *Science and Technology of Advanced Materials*, *16*(2), 23501. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/2/023501>
- Xu, J. K., Zhang, F. F., Sun, J. J., Sheng, J., Wang, F., & Sun, M. (2014). Bio and nanomaterials based on Fe₃O₄. *Molecules*, *19*(12), 21506–21528. <https://doi.org/10.3390/molecules191221506>
- Xu, J., Song, X., Yu, G., & Du, C. (2020). Investigating the Effect of Flux on Ash Fusibility of High-Calcium Coal. *ACS Omega*, *5*(20), 11361–11368. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00320>
- Xu, S., & Lee, T. R. (2021). Fe₃O₄ Nanoparticles : Structures , Synthesis , Magnetic Properties , Surface Functionalization , and. *Appl. Sci.*, *11*, 11301.
- Yang, G., Ren, Q., Xu, J., & Lyu, Q. (2021). Co-melting properties and mineral transformation behavior of mixtures by MSWI fly ash and coal ash. *Journal of the Energy Institute*, *96*, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.03.008>
- Yang, H., Liu, M., & Ouyang, J. (2010). Novel synthesis and characterization of nanosized γ -Al₂O₃ from kaolin. *Applied Clay Science*, *47*(3–4), 438–443. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.12.021>
- Yang, L., Tian, J., Meng, J., Zhao, R., Li, C., Ma, J., & Jin, T. (2018). Modification and characterization of Fe₃O₄ nanoparticles for use in adsorption of alkaloids. *Molecules*, *23*(3). <https://doi.org/10.3390/molecules23030562>
- Yang, Y., Zhang, P., Jiang, J., Dai, Y., Wu, M., Pan, Y., & Ni, L. (2018). Synthesis and properties of magnetic zeolite with good magnetic stability from fly ash. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, *87*(2), 408–418. <https://doi.org/10.1007/s10971->

- Yoldi, M., Fuentes-Ordoñez, E. G., Korili, S. A., & Gil, A. (2019). Zeolite synthesis from industrial wastes. In *Microporous and Mesoporous Materials* (Vol. 287, Issue March, pp. 183–191). <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.06.009>
- Zhang, J., Tang, X., Yi, H., Yu, Q., Zhang, Y., Wei, J., & Yuan, Y. (2022). Synthesis, characterization and application of Fe-zeolite: A review. *Applied Catalysis A: General*, 630(December 2021), 118467. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2021.118467>
- Zhang, X., Cheng, T., Chen, C., Wang, L., Deng, Q., Chen, G., & Ye, C. (2020). Synthesis of a novel magnetic nano-zeolite and its application as an efficient heavy metal adsorbent. *Materials Research Express*, 7(8). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abab43>
- Zhou, H., Bhattarai, R., Li, Y., Si, B., Dong, X., Wang, T., & Yao, Z. (2022). Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth. *Science of the Total Environment*, 804, 149985. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149985>