

**DISERTASI**

**KOMPOSIT NANOPARTIKEL CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>  
TERDOPPING SURFAKTAN SDS DAN POLIMER PDA  
UNTUK ADSORPSI Fe<sup>3+</sup> DAN Mn<sup>2+</sup>  
PADA AIR ASAM TAMBANG**



**WIDIA PURWANINGRUM**

**NIM 08013682126005**

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU MIPA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

**2024**

## HALAMAN PENGESAHAN

KOMPOSIT NANOPARTIKEL  $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$  TERDOPPING SURFAKTAN SDS  
DAN POLIMER PDA UNTUK ADSORPSI  $\text{Fe}^{3+}$  DAN  $\text{Mn}^{2+}$  PADA AIR ASAM TAMBANG

DISERTASI

Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Doktor Bidang Ilmu MIPA

Oleh  
WIDIA PURWANINGRUM  
08013682126005

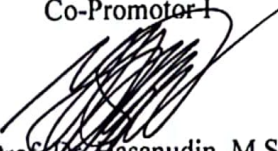
Palembang, 19 Pebruari 2024

Promotor



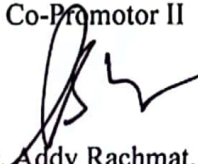
Prof. Dr. Poedji Loekitowati Hariani, M.Si  
NIP. 196808271994022001

Co-Promotor I



Prof. Dr. Masanudin, M.Si  
NIP. 197205151997021003

Co-Promotor II



Dr. Addy Rachmat, M.Si  
NIP. 197409282000121001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

## HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Disertasi dengan judul “Komposit Nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Terdoping Surfaktan SDS dan Polimer PDA Untuk Adsorpsi Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> Pada Air Asam Tambang” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Ilmiah Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Program Studi Doktor Ilmu Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 19 Pebruari 2024.

Palembang, 19 Januari 2024

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Berupa Disertasi

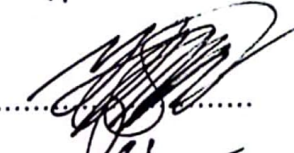
Ketua:

Prof. Dr. Poedji Loekitowati Hariani, M.Si  
NIP. 196808271994022001

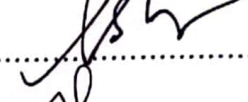
.....  


Anggota:

1. Prof. Dr. Hasanudin, M.Si  
NIP. 197205151997021003

.....  


2. Dr. Addy Rachmat, M.Si  
NIP. 197409282000121001

.....  


3. Dr. Suheryanto, M.Si  
NIP. 196006251989031006

.....  


4. Dr. Zainal Fanani, M.Si  
NIP. 196708211995121001

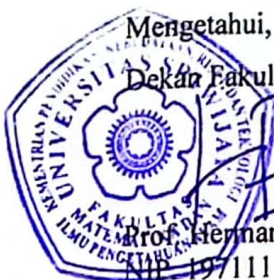
.....  


5. Prof. Dr. Buhani, S.Pd., M.Si  
NIP. 196904161994032003

.....  


Mengetahui,

Dekan Fakultas MIPA UNSRI



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

Koordinator Program Studi



Prof. Dr. Hary Widjajanti, M.Si  
NIP. 196112121987102001

## HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama Mahasiswa : Widia Purwaningrum  
NIM : 08013682126005  
Fakultas/Program Studi : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam/Doktor  
Ilmu MIPA

Menyatakan bahwa disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri dan karya ilmiah ini belum pernah diajukan sebagai pemenuhan persyaratan untuk memperoleh gelar Doktor dari Universitas Sriwijaya maupun perguruan tinggi lain. Semua informasi yang dimuat dalam disertasi ini yang berasal dari penulis lain baik yang dipublikasikan atau tidak, telah diberikan penghargaan dengan mengutip nama sumber penulis secara benar. Semua isi dari disertasi sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya sebagai penulis.

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Indralaya, 1 Maret 2024

Penulis



Widia Purwaningrum

NIM 08013682126005

## SUMMARY

### SDS SURFACTANT AND PDA POLYMER DOPPED CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> NANOPARTICLES COMPOSITE FOR ADSORPTION OF Fe<sup>3+</sup> AND Mn<sup>2+</sup> IN ACID MINE DRAINAGE (AMD)

Widia Purwaningrum: Supervised by Prof. Dr. Poedji Loekitowati Hariani, M.Si, Prof. Dr. Hasanudin, M.Si, Dr. Addy Rachmat, M.Si

The sustainable exploitation of mineral resources necessitates careful consideration of their environmental impact, notably Acid Mine Drainage (AMD). AMD, a byproduct of mining activities, poses a significant threat to water sources, including both groundwater and surface water and poses a risk to the ecological balance, particularly in the vicinity of mining operations. AMD can result in the depletion of biodiversity and aquatic habitats. It exhibits distinctive traits such as low pH levels, salinity, suspended solids, and elevated concentrations of heavy metals, notably iron (Fe) and manganese (Mn) ions. The synthesis of CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> begins with the preparation of CaO from green mussel shells (*Perna viridis*) using the HCl-NaOH, HCl-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> extraction method and calcination at 800, 900, and 1000°C. The XRD and BET characterization results show that CaO prepared by the 800°C calcination method has the greatest purity, crystallinity, and surface area. The CaO prepared by the 800°C calcination method was then used as material for the synthesis of CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS and CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA nanoparticle composites were synthesized from CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> with the addition of SDS surfactant (Sodium Dodecyl Sulfate) and PDA polymer (Polylidopamine) with a weight ratio of 2:1:0.2. The effect of adding SDS and PDA to CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> causes changes in the characteristics of the composite, namely a decrease in surface area and pore volume. Nanoparticle composites CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS, and CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA adsorb Fe<sup>3+</sup> and Mn<sup>2+</sup>. The adsorption process of Fe<sup>3+</sup> and Mn<sup>2+</sup> by CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA nanoparticle composites follows the Langmuir isotherm model and pseudo-second order kinetic model. The results showed that the addition of SDS and PDA to CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> could increase the adsorption capacity for Fe<sup>3+</sup> and Mn<sup>2+</sup>, namely from 56.18 to 294.118 and 294.118 mg/g for Fe<sup>3+</sup> and from 53.192 to 166.667 and 175.439 mg/g for Mn<sup>2+</sup>. The Fe<sup>3+</sup> adsorption process by CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS, and CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA nanoparticle composites was spontaneous and endothermic in the range of 298-328 K. The Mn<sup>2+</sup> adsorption process by CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS, and CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA nanoparticle composites was spontaneous at higher temperatures and endothermic in the range of 298-328 K. The application of CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS, and CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA nanoparticle composites to the adsorption of Fe<sup>3+</sup> and Mn<sup>2+</sup> in acid mine drainage has %removal of Fe<sup>3+</sup> was 93%, 100%, 100% and %removal against Mn<sup>2+</sup> respectively 97.71%, 99.95% and 98.80%. CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS, and CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA nanoparticle composites can reduce Fe<sup>3+</sup> and Mn<sup>2+</sup> levels simultaneously in acid mine drainage so that they meet environmental quality standards for coal industry waste. According to the analysis utilizing Response Surface Methodology (RSM) with the Central Composite Design (CCD) model involving three adsorption parameters, namely solution pH, concentration, and contact time, it is evident that solution pH and concentration exert a considerable influence on the removal percentage. The ANOVA results indicate that the quadratic

model is suitable for elucidating the adsorption mechanism of  $\text{Fe}^{3+}$  ions employing  $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ .

Keywords: Acid Mine Drainage, Response Surface Methodology,  $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ ,  $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$

## RINGKASAN

### KOMPOSIT NANOPARTIKEL CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> TERDOPPING SURFAKTAN SDS DAN POLIMER PDA UNTUK ADSORPSI Fe<sup>3+</sup> DAN Mn<sup>2+</sup> PADA AIR ASAM TAMBANG (AAT)

Widia Purwaningrum: Dibimbing oleh Prof. Dr. Poedji Loekitowati Hariani, M.Si, Prof. Dr. Hasanudin, M.Si, Dr. Addy Rachmat, M.Si

Pengembangan sumber daya mineral jangka panjang harus memperhatikan aspek lingkungan yang ditimbulkan, salah satunya adalah Air Asam Tambang (AAT). AAT yang dihasilkan dalam proses penambangan sangat mencemari sumber daya air baik air tanah dan air permukaan, serta membahayakan lingkungan ekologis terutama di sekitar area penambangan. AAT dapat menyebabkan hilangnya keanekaragaman hayati dan ekosistem perairan. AAT memiliki karakteristik seperti pH rendah, salinitas, *suspended solid* dan konsentrasi logam berat yang tinggi. Penelitian ini bertujuan mensintesis CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS dan CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA yang digunakan untuk mengadsorpsi ion logam berat pada AAT. Sintesis CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dimulai dengan preparasi CaO dari cangkang kerang hijau (*Perna viridis*) dengan metode ekstraksi HCl-NaOH, HCl-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dan kalsinasi pada temperatur 800, 900, 1000°C. Hasil karakterisasi XRD dan BET menunjukkan bahwa CaO hasil preparasi metode kalsinasi 800°C memiliki kemurnian, kristalinitas dan luas permukaan yang paling besar. CaO hasil preparasi metode kalsinasi 800°C selanjutnya digunakan untuk bahan sintesis CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Komposit nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS dan CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA disintesis dari CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dengan penambahan surfaktan SDS (Sodium Dodesil Sulfat) dan polimer PDA (Polidopamin) dengan perbandingan berat 2:1:0,2. Pengaruh penambahan SDS dan PDA pada CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> menyebabkan terjadinya perubahan karakteristik komposit yaitu turunnya luas permukaan dan volume pori. Ketiga komposit nanopartikel yaitu CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS dan CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA digunakan untuk menyerap Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup>. Proses adsorpsi Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> oleh komposit nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA mengikuti model isotherm Langmuir dan model kinetika *pseudo second order*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan SDS dan PDA pada CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> yaitu dari 56,18 menjadi 294,118 dan 294,118 mg/g untuk Fe<sup>3+</sup> dan dari 53,192 menjadi 166,667 dan 175,439 mg/g untuk Mn<sup>2+</sup>. Proses adsorpsi Fe<sup>3+</sup> oleh komposit nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA bersifat spontan dan endotermis pada rentang temperatur 298-328 K. Proses adsorpsi Mn<sup>2+</sup> oleh komposit nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA bersifat spontan pada suhu yang lebih tinggi dan endotermis pada rentang temperatur 298-328 K. Aplikasi komposit nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS dan CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA terhadap penyerapan Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> pada air asam tambang memiliki % *removal* terhadap Fe<sup>3+</sup> masing-masing sebesar 93%, 100%, 100% dan % *removal* terhadap Mn<sup>2+</sup> masing-masing sebesar 97,71%, 99,95% dan 98,80%. Komposit nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA dapat menurunkan kadar Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> secara bersamaan pada air asam tambang sehingga memenuhi baku mutu lingkungan pada limbah industri batubara. Berdasarkan analisis RSM (*Response Surface Methodology*) menggunakan model *Central Composite Design* (CCD) dari 3 variabel adsorpsi yaitu pH larutan,

konsentrasi dan waktu kontak, menunjukkan bahwa pH larutan dan konsentrasi berpengaruh secara signifikan terhadap % *removal*. Hasil analisis ANOVA, model kuadratik merupakan model yang sesuai menggambarkan proses adsorpsi ion  $\text{Fe}^{3+}$  menggunakan  $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ .

Kata kunci: air asam tambang, RSM,  $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ ,  $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$



## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena atas berkat rahmat, dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan Disertasi yang berjudul “Komposit Nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Terdopping Surfaktan SDS dan Polimer PDA Untuk Adsorpsi Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> Pada Air Asam Tambang”. Pada penelitian dan penulisan Disertasi ini, penulis banyak mendapatkan bantuan, arahan, dan saran dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada yang terhormat :

1. Rektor Universitas Sriwijaya, Bapak Prof. Dr. Taufiq Marwa, S.E., M.Si yang telah memberikan bantuan Uang Kuliah Tunggal selama menempuh Pendidikan Doktor.
  2. Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya, Bapak Prof. Hermansyah, M.Si., Ph.D yang telah memberikan izin untuk menempuh Pendidikan Doktor.
  3. Koordinator Program Studi Doktor Ilmu MIPA, Ibu Prof. Dr. Hary Widjajanti, M.Si yang selalu memberikan dukungan dan semangat kepada seluruh mahasiswa Program Studi Doktor Ilmu MIPA.
  4. Promotor, Ibu Prof. Dr. Poedji Loekitowati Hariani, M.Si., Co-Promotor Bapak Prof. Dr. Hasanudin, M.Si., Co-Promotor Bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si yang telah memberikan ilmu, bimbingan, saran dan waktu dalam penelitian, penulisan disertasi dan artikel.
  5. Tim Penguji, Ibu Prof. Dr. Buhani, S.Pd., M.Si; Bapak Dr. Suheryanto, M.Si., dan Bapak Dr. Zainal Fanani, M.Si
  6. PT Bukit Asam yang telah mengizinkan penulis untuk mengambil sampel air asam tambang
  7. Keluarga besar, yaitu suami, ayah, ibu, kedua ananda kami, beserta kakak-adik kami yang telah mendukung dan mendoakan kelancaran studi selama menempuh Pendidikan Doktor.
- Semoga Disertasi ini dapat bermanfaat dan menjadi keberkahan bagi pembaca, masyarakat maupun penulis.

Palembang, Pebruari 2024

Penulis

## DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul .....	i
Halaman Pengesahan .....	ii
Halaman Persetujuan .....	iii
Summary .....	iv
Ringkasan .....	vi
Kata Pengantar .....	viii
Daftar Isi .....	ix
Daftar Gambar .....	xiv
Daftar Tabel .....	xix
Daftar Singkatan .....	xxi
<b>BAB 1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	5
1.3. Tujuan Penelitian .....	5
1.4. Manfaat Penelitian .....	6
1.5. Kebaruan .....	6
1.6. Hipotesis .....	9
1.7. Kerangka Pikir Penelitian .....	11
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>12</b>
2.1. Air Asam Tambang .....	12
2.2. Logam Berat Besi dan Mangan .....	13
2.3. Metode Adsorpsi .....	14
2.3.1. Teori Isoterm Adsorpsi .....	16
2.3.1.1. Isoterm Langmuir .....	17
2.3.1.2. Isoterm Freundlich .....	18
2.3.2. Studi Kinetika Adsorpsi .....	19

2.3.3. Studi Termodinamika .....	19
2.4. Kerang Hijau ( <i>Perna viridis</i> ) .....	20
2.5. CaO .....	21
2.6. Nanopartikel Magnetit Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .....	23
2.7. Komposit Nanopartikel CaO .....	26
2.8. X-Ray Diffraction (XRD) .....	27
2.9. Brunaur-Emmet-Teller (BET) .....	31
2.10. Scanning Electron Microscope- Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS) .....	32
2.11. Vibrating Sample Magnetometer (VSM) .....	34
2.12. Fourier Transform Infra Red (FTIR) .....	36
2.13. Response Surface Methodology (RSM) .....	38
2.14. Literature Review .....	40
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>50</b>
3.1. Waktu dan Tempat .....	50
3.2. Alat dan Bahan .....	50
3.2.1. Alat .....	50
3.2.2. Bahan .....	50
3.3. Skema Kerja .....	51
3.4. Cara Kerja .....	52
3.4.1. Tahap Pertama	
Sintesis dan Karakterisasi Komposit Nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA .....	52
3.4.1.1. Preparasi Cangkang Kerang Hijau ( <i>Perna viridis</i> .....	52
3.4.1.2. Preparasi CaO dari Kerang Hijau ( <i>Perna viridis</i> ) .....	52
3.4.1.3. Karakterisasi CaO yang Diperoleh dari Metode Ekstraksi dan Kalsinasi .....	52
3.4.1.4. Sintesis Komposit Nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .....	53
3.4.1.5. Sintesis Komposit Nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS ...	53

3.4.1.6. Sintesis Komposit Nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA .....	54
3.4.1.7. Karakterisasi Komposit Nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA .....	54
3.4.1.8. Penentuan pH <sub>pzc</sub> Komposit Nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA .....	55
3.4.2. Tahap Kedua Aplikasi Komposit Nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA Pada Fe <sup>3+</sup> Dalam Larutan Standar .....	55
3.4.2.1. Variasi pH Larutan Fe <sup>3+</sup> .....	55
3.4.2.2. Variasi Waktu Kontak Adsorben dengan Larutan Fe <sup>3+</sup>	56
3.4.2.3. Variasi Konsentrasi Larutan Fe <sup>3+</sup> .....	56
3.4.2.4. Variasi Temperatur Adsorpsi Fe <sup>3+</sup> .....	56
3.4.3. Aplikasi Komposit Nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA Pada Mn <sup>2+</sup> Dalam Larutan Standar .....	56
3.4.3.1. Variasi pH Larutan Mn <sup>2+</sup> .....	57
3.4.3.2. Variasi Waktu Kontak Adsorben dengan Larutan Mn <sup>2+</sup>	57
3.4.3.3. Variasi Konsentrasi Larutan Mn <sup>2+</sup> .....	57
3.4.3.4. Variasi Temperatur Adsorpsi Mn <sup>2+</sup> .....	58
3.4.4. Aplikasi Komposit Nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA Pada Fe <sup>3+</sup> dan Mn <sup>2+</sup> Dalam Air Asam Tambang .....	58
3.4.5. Aplikasi Komposit Nanopartikel Terbaik pada Fe <sup>3+</sup> dan Mn <sup>2+</sup> menggunakan RSM ( <i>Response Surface Methodology</i> ) .....	59
3.5. Kerangka Kerja Penelitian .....	61
3.6. Analisis Data .....	62
3.6.1. Karakterisasi material menggunakan metode XRD .....	62

3.6.2. Karakterisasi material menggunakan metode BET .....	62
3.6.3. Karakterisasi material menggunakan metode VSM .....	62
3.6.4. Karakterisasi material menggunakan metode SEM -EDS.....	63
3.6.5. Karakterisasi material menggunakan metode FTIR.....	63
3.6.6. Aplikasi komposit pada proses adsorpsi $Fe^{3+}$ dan $Mn^{2+}$ .....	63
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>66</b>
4.1. Hasil Preparasi CaO dari Cangkang Kerang Hijau ( <i>Perna viridis</i> ).....	66
4.2. Hasil Karakterisasi CaO Hasil Sintesis .....	70
4.2.1. Hasil Karakterisasi CaO Hasil Sintesis menggunakan XRD .....	70
4.2.2. Hasil Karakterisasi CaO Hasil Sintesis menggunakan BET.....	73
4.3. Hasil Sintesis Komposit .....	74
4.3.1. Hasil Sintesis Komposit CaO/ $Fe_3O_4$ .....	74
4.3.2. Hasil Sintesis Komposit CaO/ $Fe_3O_4$ /SDS.....	75
4.3.3. Hasil Sintesis Komposit CaO/ $Fe_3O_4$ /PDA.....	77
4.3.4. Hasil Karakterisasi Komposit .....	80
4.3.4.1. Hasil Karakterisasi XRD Komposit Hasil Sintesis.....	80
4.3.4.2. Hasil Karakterisasi BET Komposit Hasil Sintesis.....	82
4.3.4.3. Hasil Karakterisasi SEM-EDS Komposit Hasil Sintesis.....	85
4.3.4.4. Hasil Karakterisasi VSM Komposit Hasil Sintesis.....	87
4.3.4.5. Penentuan pH <sub>pzc</sub> Komposit Hasil Sintesis.....	88
4.3.4.6. Hasil Karakterisasi FTIR Komposit Nanopartikel Sebelum Dan Sesudah Adsorpsi .....	89
4.4. Adsorpsi $Fe^{3+}$ dan $Mn^{2+}$ Menggunakan Komposit Nanopartikel.....	92
4.4.1. Pengaruh pH Terhadap Daya Serap Komposit Nanopartikel .....	92
4.4.2. Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Daya Serap Komposit Nanopartikel.....	95
4.4.3. Pengaruh Konsentrasi Adsorbat Terhadap Daya Serap Komposit Nanopartikel.....	96
4.4.4. Pengaruh Temperatur Terhadap Daya Serap Komposit Nanopartikel.....	97

4.5. Isoterm Adsorpsi Komposit Nanopartikel Terhadap $\text{Fe}^{3+}$ dan $\text{Mn}^{2+}$ .....	98
4.5.1. Isoterm Adsorpsi Komposit Nanopartikel Terhadap $\text{Fe}^{3+}$ ... ..	98
4.5.2. Isoterm Adsorpsi Komposit Nanopartikel Terhadap $\text{Mn}^{2+}$ .....	100
4.5.3. Kapasitas Adsorpsi Beberapa Adsorben Terhadap $\text{Fe}^{3+}$ dan $\text{Mn}^{2+}$ .....	101
4.6. Kinetika Adsorpsi Komposit Nanopartikel Terhadap $\text{Fe}^{3+}$ dan $\text{Mn}^{2+}$ .....	103
4.6.1. Kinetika Adsorpsi Komposit Nanopartikel Terhadap $\text{Fe}^{3+}$ ... ..	103
4.6.2. Kinetika Adsorpsi Komposit Nanopartikel Terhadap $\text{Mn}^{2+}$ .....	104
4.7. Besaran Termodinamika Adsorpsi Komposit Nanopartikel Terhadap $\text{Fe}^{3+}$ dan $\text{Mn}^{2+}$ .....	106
4.7.1. Besaran Termodinamika Adsorpsi Komposit Nanopartikel Terhadap $\text{Fe}^{3+}$ ... ..	106
4.7.2. Besaran Termodinamika Adsorpsi Komposit Nanopartikel Terhadap $\text{Mn}^{2+}$ .....	108
4.8. Aplikasi Komposit Nanopartikel Pada Air Asam Tambang.....	110
4.8.1. Aplikasi Komposit Nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ Pada Air Asam Tambang.....	110
4.8.2. Aplikasi Komposit Nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ dan $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$ Pada Air Asam Tambang Pada pH Optimum $\text{Fe}^{3+}$ (pH 3).....	110
4.8.3. Aplikasi Komposit Nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ dan $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$ Pada Air Asam Tambang Pada pH Optimum $\text{Mn}^{2+}$ (pH 4).....	112
4.9. Aplikasi RSM (Response Surface Methodology) Pada Adsorpsi $\text{Fe}^{3+}$ Menggunakan Komposit Nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ .....	113
4.10. Jawaban Hipotesa.....	119
<b>BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>121</b>
5.1. Kesimpulan.....	121
4.2. Saran.....	122
<b>BAB 6. CAPAIAN LUARAN .....</b>	<b>123</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>129</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>138</b>

## DAFTAR GAMBAR

		<b>Halaman</b>
Gambar 1	Ilustrasi proses adsorpsi dari (a) <i>monolayer</i> dan (b) <i>multilayer</i> (Ragadhita <i>et al.</i> , 2021)	15
Gambar 2	Penggambaran interaksi fisisorpsi dan kemisorpsi antara permukaan substrat (adsorben) dan molekul adsorbat (Kennedy <i>et al.</i> , 2018)	15
Gambar 3	Struktur kristal CaO dari cangkang kerang hijau ( $a=b=c = 4,81140$ dan $\alpha=\beta=\gamma = 90^\circ$ )(Usman, <i>et al.</i> , 2020)	22
Gambar 4	(a) Larutan $Pb^{2+}$ dengan komposit $Fe_3O_4@SiO_2$ terdispersi mikrosfer dan (b) Larutan $Pb^{2+}$ setelah pemisahan magnetik menggunakan medan magnet luar (Yang <i>et al.</i> , 2019)	24
Gambar 5	Diagram Pourbaix menunjukkan kestabilan termodinamika besi oksida dan besi hidroksida dalam berbagai variasi pH	25
Gambar 6	Difraktogram kristal CaO dari (a) AMCSD No. 0017989; (b) cangkang kerang hijau; dan (c) cangkang kerang batik	28
Gambar 7	Analisis XRD dari (a) CaO, (b) CaO/ $Fe_3O_4$ /SDS	30
Gambar 8	Analisis XRD CaO (atas) dan CaO/ $Fe_3O_4$ (bawah)	31
Gambar 9	Kurva tipe isotherm adsorpsi fisika	32
Gambar 10	Analisis EDS dari CaO/ $Fe_3O_4$ /SDS	33
Gambar 11	SEM images dari (a) CaO, (b) CaO/ $Fe_3O_4$ /SDS, (c) CaO/ $Fe_3O_4$ /SDS + $Cr^{3+}$	34
Gambar 12	Histerisis Ferromagnetik, Paramagnetik dan Superparamagnetik	35
Gambar 13	Kurva VSM Komposit HAP-PEG/ $Fe_3O_4$	36
Gambar 14	Analisis FTIR (a) CaO, (b) CaO/ $Fe_3O_4$ /SDS, (c) CaO/ $Fe_3O_4$ /SDS + $Cr^{3+}$ .	37
Gambar 15	(A) Cangkang kerang hijau, (B) Proses penggerusan cangkang kerang hijau, (C) Pengayakan serbuk cangkang kerang hijau menggunakan ayakan 200 mesh	66

Gambar 16	Preparasi CaO menggunakan metode kalsinasi dan ekstraksi	67
Gambar 17	Proses ekstraksi HCl-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , (A) serbuk cangkang kerang ditambah HCl, (B) CaCl <sub>2</sub> , filtrat dari (A), (C) CaCl <sub>2</sub> ditambah Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , (D) CaCO <sub>3</sub> hasil ekstraksi metode HCl-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , (E) CaO hasil kalsinasi dari metode HCl-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .	68
Gambar 18	Proses ekstraksi HCl-NaOH, (A) serbuk cangkang kerang ditambah HCl, (B) CaCl <sub>2</sub> , filtrat dari (A), (C) CaCl <sub>2</sub> ditambah NaOH, (D) CaCO <sub>3</sub> hasil ekstraksi metode HCl-NaOH, (E) CaO hasil kalsinasi dari metode HCl-NaOH.	69
Gambar 19	CaO dari kerang hijau hasil kalsinasi pada variasi temperatur.	69
Gambar 20	Difraktogram CaO hasil ekstraksi dari cangkang kerang hijau (JCPDS CaO : 82- 1690, JCPDS Ca(OH) <sub>2</sub> : 85 -1108)	70
Gambar 21	(A) Larutan FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O (B) Larutan FeCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O (C) Larutan FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O + FeCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O (D) Campuran FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O + FeCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O + CaO, (E) Campuran CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> hasil sintesis (F) Padatan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> hasil pencucian, (G) Serbuk padatan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> yang telah digerus dan diayak menggunakan ayakan 200 mesh ketika didekatkan pada magnet eksternal.	75
Gambar 22	Struktur senyawa sodium dodesil sulfat (SDS) (Niraula <i>et.al</i> , 2014).	77
Gambar 23	(A) Campuran FeCl <sub>3</sub> .9H <sub>2</sub> O + FeCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O + CaO+SDS, (B) Campuran CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS	77
Gambar 24	(A) Komposit CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS sebelum digerus, (B) Komposit CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS ketika didekatkan pada magnet eksternal.	77
Gambar 25	(A) Campuran komposit CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA sebelum dipisahkan menggunakan sentrifuse, (B) Pencucian komposit CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA menggunakan sentrifuse.	78
Gambar 26	Komposit CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA ketika didekatkan pada magnet eksternal.	78
Gambar 27	Reaksi polimerisasi Dopamine dengan tris-Cl.	79
Gambar 28	Langkah awal dalam autooksidasi dopamin untuk membentuk polidopamin <i>nanocoating</i> pada pH basa	79
Gambar 29	Difraktogram Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO, CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS, dan	81



CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA (JCPDS Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> : 00- 019-0629, JCPDS CaO : 82-1690, JCPDS NaCl : 5-0628).

Gambar 30	Grafik adsorpsi desorpsi CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .	83
Gambar 31	Grafik adsorpsi desorpsi CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS	83
Gambar 32	Grafik adsorpsi desorpsi CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA.	84
Gambar 33	Hasil karakterisasi SEM-EDS mapping (A) CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , (B) CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS, (C) CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA.	85
Gambar 34	Hasil karakterisasi SEM perbesaran 3.000x (A) CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , (B) CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS, (C) CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA.	86
Gambar 35	Grafik histerisis Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS, dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA.	87
Gambar 36	Grafik penentuan pH <sub>pzc</sub> komposit CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS, dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA.	89
Gambar 37	Spektra FTIR CaO, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -Fe <sup>3+</sup> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -Mn <sup>2+</sup>	90
Gambar 38	Spektra FTIR CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA, CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA-Fe <sup>3+</sup> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA-Mn <sup>2+</sup>	91
Gambar 39	Spektra FTIR CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS, CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS-Fe <sup>3+</sup> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS-Mn <sup>2+</sup>	92
Gambar 40	Grafik variasi pH proses adsorpsi Fe <sup>3+</sup> dan Mn <sup>2+</sup> menggunakan komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA	93
Gambar 41	Grafik variasi waktu kontak proses adsorpsi Fe <sup>3+</sup> dan Mn <sup>2+</sup> menggunakan komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA	95
Gambar 42	Grafik variasi konsentrasi proses adsorpsi Fe <sup>3+</sup> dan Mn <sup>2+</sup> menggunakan komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA	97
Gambar 43	Grafik variasi temperatur proses adsorpsi Fe <sup>3+</sup> dan Mn <sup>2+</sup> menggunakan komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA	98

Gambar 44	Garafik isoterm Langmuir adsorpsi $\text{Fe}^{3+}$ menggunakan komposit nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ dan $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$	99
Gambar 45	Garafik isoterm Freundlich adsorpsi $\text{Fe}^{3+}$ menggunakan komposit nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ dan $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$	99
Gambar 46	Garafik isoterm Langmuir adsorpsi $\text{Mn}^{2+}$ menggunakan komposit nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ dan $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$	100
Gambar 47	Garafik isoterm Freundlich adsorpsi $\text{Mn}^{2+}$ menggunakan komposit nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ dan $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$	101
Gambar 48	Grafik pseudo first order adsorpsi $\text{Fe}^{3+}$ menggunakan komposit nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ dan $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$	104
Gambar 49	Grafik pseudo second order adsorpsi $\text{Fe}^{3+}$ menggunakan komposit nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ dan $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$	104
Gambar 50	Grafik pseudo first order adsorpsi $\text{Mn}^{2+}$ menggunakan komposit nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ dan $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$	105
Gambar 51	Grafik pseudo second order adsorpsi $\text{Mn}^{2+}$ menggunakan komposit nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ dan $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$	106
Gambar 52	Grafik termodinamika adsorpsi $\text{Fe}^{3+}$ menggunakan komposit nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ dan $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$	107
Gambar 53	Grafik termodinamika adsorpsi $\text{Mn}^{2+}$ menggunakan komposit nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ dan $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PDA}$	109
Gambar 54	Grafik hubungan antara nilai <i>actual</i> kapasitas adsorpsi dan nilai prediksi kapasitas adsorpsi $\text{Fe}^{3+}$ menggunakan komposit nanopartikel $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$	115
Gambar 55	Grafik 3 dimensi hubungan antara pH vs konsentrasi terhadap kapasitas adsorpsi $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SDS}$ pada adsorpsi $\text{Fe}^{3+}$	117

Gambar 56	Grafik 3 dimensi hubungan antara konsentrasi vs waktu terhadap kapasitas adsorpsi CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS pada adsorpsi Fe <sup>3+</sup>	118
Gambar 57	Grafik 3 dimensi hubungan antara pH vs waktu terhadap kapasitas adsorpsi CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS pada adsorpsi Fe <sup>3+</sup>	118

## DAFTAR TABEL

		<b>Halaman</b>
Tabel 1	Perbedaan antara penelitian yang telah dilakukan peneliti terdahulu dengan penelitian yang akan dilakukan	7
Tabel 2	Penentuan ukuran partikel kristal CaO	29
Tabel 3	Komposisi unsur nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS	33
Tabel 4	Informasi gugus fungsi analisis FTIR dari CaO, CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS, and CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS + Cr <sup>3+</sup> .	36
Tabel 5	Penelitian tentang kerang hijau	40
Tabel 6	Penelitian tentang adsorpsi Fe <sup>3+</sup> dan Mn <sup>2+</sup> pada air asam tambang	42
Tabel 7	Penelitian tentang adsorpsi Fe <sup>3+</sup> dan Mn <sup>2+</sup>	43
Tabel 8	Penelitian tentang komposit CaO	44
Tabel 9	Penelitian tentang komposit Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	45
Tabel 10	Penelitian tentang komposit CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	47
Tabel 11	Penelitian tentang komposit CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS.	49
Tabel 12	Desain penelitian dengan variabel waktu kontak (10-70 menit), pH (1-4) dan konsentrasi ion (100-500 ppm).	59
Tabel 13	Sudut 2θ hasil analisis XRD CaO hasil ekstraksi dan kalsinasi.	71
Tabel 14	Ukuran kristal CaO hasil ekstraksi variasi metode.	72
Tabel 15	Hasil analisis BET pada CaO hasil ekstraksi.	73
Tabel 16	Ukuran kristal komponen penyusun komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA.	82
Tabel 17	Hasil analisis BET pada komposit CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS, dan CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA.	84
Tabel 18	Komposisi unsur penyusun komposit.	87
Tabel 19	Kapasitas adsorpsi beberapa adsorben terhadap Fe <sup>3+</sup> dan Mn <sup>2+</sup>	102

Tabel 20	Data termodinamika adsorpsi komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> terhadap Fe <sup>3+</sup>	107
Tabel 21	Data termodinamika adsorpsi komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS terhadap Fe <sup>3+</sup>	108
Tabel 22	Data termodinamika adsorpsi komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA terhadap Fe <sup>3+</sup>	108
Tabel 23	Data termodinamika adsorpsi komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> terhadap Mn <sup>2+</sup>	108
Tabel 24	Data termodinamika adsorpsi komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS terhadap Mn <sup>2+</sup>	109
Tabel 25	Data termodinamika adsorpsi komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA terhadap Mn <sup>2+</sup>	109
Tabel 26	Karakteristik AAT sebelum dan sesudah adsorpsi menggunakan komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	110
Tabel 27	Karakteristik AAT sebelum dan sesudah adsorpsi menggunakan komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS pada kondisi optimum Fe <sup>3+</sup> (pH 3)	111
Tabel 28	Karakteristik AAT sebelum dan sesudah adsorpsi menggunakan komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA pada kondisi optimum Fe <sup>3+</sup> (pH 3)	111
Tabel 29	Karakteristik AAT sebelum dan sesudah adsorpsi menggunakan komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS pada kondisi optimum Mn <sup>2+</sup> (pH 4)	112
Tabel 30	Karakteristik AAT sebelum dan sesudah adsorpsi menggunakan komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PDA pada kondisi optimum Mn <sup>2+</sup> (pH 4)	112
Tabel 31	Hasil desain penelitian adsorpsi Fe <sup>3+</sup> menggunakan metode RSM dengan variable pH (1-4), konsentrasi ion (100-500 ppm), waktu kontak (10-60 menit), berat komposit CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS 0,1 g	113
Tabel 32	Data statistik RSM hasil proses adsorpsi Fe <sup>3+</sup> menggunakan komposit nanopartikel CaO/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SDS	116

## DAFTAR SINGKATAN

AAT	: Air Asaam Tambang
AD	: <i>Acid Drainage</i>
AMCSD	: <i>American Mineralogist Crystal Structure Database</i>
AMD	: <i>Acid Mine Drainage</i>
BET	: <i>Brunaur-Emmet-Teller</i>
BJH	: <i>Barrett-Joyner-Halenda</i>
BS-12	: Dodecyl dimethyl Betain
CCD	: <i>Central Composite Design</i>
CTAB	: <i>Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide</i>
DA	: Dopamin
DAL	: Leukodopaminokrom
DHI	: 5,6 Dihidroksiindol
DQ	: Dopamin Quinon
DSQ	: Dopamin Semiquinon
FM3M	: Computer modeling jenis struktur kristal berbentuk kubik, spektrum Fm3m adalah (2100***0**) dimana * menunjukkan bahwa posisi khusus mengandung parameter bebas dan dapat ditempati oleh atom sebanyak yang diperlukan.
FWHM	: <i>Full Width at Half Maximum</i>
Hap	: Hidroksiapatit
JCPDS	: <i>Joint Committee on Powder Diffraction Standart</i>
MBET	: <i>Multy Brunaur-Emmet-Teller</i>
PDA	: Polidopamin
PEG	: <i>Poly Ethylen Glycol</i>
pHpzc	: <i>pH potential of zero charge</i>
PVA	: <i>Poly Vinyl Alcohol</i>
PVP	: <i>Poly Vinyl Pyrrolidone</i>

RSM	: <i>Response Surface Methodology</i>
SDS	: <i>Sodium Dodecil Sulfate</i>
SEM-EDS	: <i>Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>
TPA	: Tempat Pembuangan Akhir
VESTA	: Nama aplikasi/ <i>software</i> untuk membuat visual struktur kristal
VSM	: <i>Vibrating Sample Magnetometer</i>
XRD	: <i>X-Ray Diffraction</i>
XRF	: <i>X-Ray Fluorescence</i>

# BAB 1. PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang

Batubara merupakan sumber energi yang paling besar. Saat ini sekitar 30% dari energi listrik yang dihasilkan dunia berasal dari batubara. Berdasarkan laju pertumbuhan ekonomi negara-negara Asia, diperkirakan penggunaan batubara untuk pemenuhan kebutuhan energi listrik di Asia akan mencapai 7 milyar ton pada tahun 2030 (Said, 2014). Indonesia adalah salah satu negara penghasil batubara yang cukup besar. Jumlah sumber daya batubara Indonesia berdasarkan perhitungan Pusat Sumber Daya Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral tahun 2005 adalah sebesar 61,366 miliar ton. Produksi batubara Indonesia mencapai 178,8 juta metrik ton per tahun, dengan konsumsi domestik sebesar 38,8 juta metrik ton dan ekspor sebesar 140 juta ton. Penambangan batubara merupakan kegiatan dengan daya ubah lingkungan yang sangat besar. Selain membawa manfaat, kegiatan pertambangan juga berdampak negatif, terutama pada lingkungan sekitar area pertambangan. Kegiatan ini dapat mengakibatkan terjadinya perubahan lingkungan yang dapat memicu terjadinya perubahan kimiawi yang berdampak pada kualitas air tanah dan air permukaan (Said, 2018; Utami *et al.*, 2020)

Air asam tambang merupakan limbah utama yang dihasilkan dari kegiatan penambangan baik pada tahap penambangan maupun pada tahap pengolahan. Limbah ini merupakan limbah cair yang terbentuk akibat pemaparan mineral sulfida (umumnya pirit) ke air dan udara yang mengakibatkan oksidasi belerang dan menghasilkan keasaman yang tinggi serta peningkatan konsentrasi belerang, besi dan logam lainnya (Utami *et al.*, 2020). Asam adalah kontaminan yang menjadi perhatian utama karena dapat melarutkan logam beracun dari batuan di lokasi tambang seperti logam besi, belerang, mangan, dan aluminium (Gaikwad & Gupta, 2008). Dalam penelitiannya tentang air asam tambang, Nguyen *et al* (2022) menyatakan bahwa pada air asam tambang terdapat berbagai kandungan logam berat seperti Fe, Ca, Mg, Zn, Na, Mn, Cu, Cd, Pb, As, K dan Al. Kebijakan tentang baku mutu kadar air limbah cair batubara di Indonesia dituangkan dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 113 Tahun 2003, yang menyatakan bahwa kadar total Fe dan Mn masing-masing maksimum 7 mg L<sup>-1</sup> dan 4 mg L<sup>-1</sup> (Hidup, 2003).

Permenkes No 32 Tahun 2017 menyatakan bahwa parameter kimia dalam standar baku mutu kesehatan lingkungan untuk media air untuk keperluan higiene sanitasi mensyaratkan bahwa kadar maksimum untuk Fe dan Mn masing-masing adalah 1 mg L<sup>-1</sup> dan 0,5 mg L<sup>-1</sup>. Hasil penelitian Imani *et al* (2021) menunjukkan bahwa kadar Fe dan Mn pada limbah air asam tambang masing-



masing sebesar 22,1 mg L<sup>-1</sup> dan 10,3 mg L<sup>-1</sup>. Kandungan Fe dan Mn pada air tanah hasil pengeboran geoteknik di tambang batubara diteliti oleh Suhernomo dkk, hasilnya menunjukkan bahwa kadar Fe pada 10 lokasi dari 15 lokasi pengambilan sampel melebihi ambang batas baku mutu yang ditetapkan oleh Permenkes No 32 Tahun 2017 (Suhermono *et al.*, 2014). Tingginya kadar logam berat Fe dan Mn dalam air limbah cair batubara dapat menyebabkan terganggunya kesehatan manusia maupun makhluk hidup lainnya. Konsentrasi Fe dan Mn yang lebih tinggi dapat merusak kualitas air dan kesehatan manusia. Oksidasi ion Fe (II) dan Mn(II) menyebabkan terjadinya pembentukan suspensi hidroksida yang menimbulkan warna yang tidak sedap dipandang mata, rasa, dan kekeruhan air. Hidroksida yang terbentuk tidak larut dan dapat menghasilkan senyawa turunannya yang bersifat racun dalam tubuh yang menyebabkan berbagai penyakit seperti neoplasia, kardiomiopati, artropati, anoreksia, oliguria, syok bifasik, dan gangguan neurologis. Organisasi Kesehatan Dunia menetapkan 0,3 dan 0,1 mg/L sebagai batas maksimum untuk konsentrasi Fe dan Mn dalam air. Uni Eropa telah merekomendasikan masing-masing 0,2 dan 0,05 mg/L sebagai batas yang diterima untuk zat besi dan mangan dalam air (Shaban, Hassouna, *et al.*, 2017). Oleh karena itu, diperlukan suatu langkah untuk mengurangnya dengan tujuan agar kadar Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> setelah pengolahan berada pada batas baku mutu yang diizinkan.

Beberapa metode konvensional seperti koagulasi (Bora *et al.*, 2017), flokulasi (Johnson *et al.*, 2008; Sylwan & Thorin, 2021), ko-presipitasi (Yazid & Joon, 2019), membran filtrasi (Kowalska & Klimonda, 2017) dan pertukaran ion (Elfeghe *et al.*, 2022; Zewail & Yousef, 2015) telah terbukti mampu untuk menghilangkan ion logam dari air limbah. Namun demikian, metode-metode tersebut di atas memerlukan peralatan biaya tinggi, membutuhkan bahan kimia mahal dalam jumlah banyak, dan komplikasi operasi dalam skala besar. Adsorpsi telah terbukti sebagai metode yang efektif dan dapat diandalkan untuk penghilangan ion logam dari air limbah (Maneechakr & Karnjanakom, 2019). Adsorpsi oleh nanopartikel merupakan teknologi ramah lingkungan yang dianggap sebagai metode yang efisien, sederhana, berbiaya rendah dan bersifat *reversible* untuk penghilangan ion logam. Material dalam ukuran nano (<100 nm) memiliki luas permukaan yang besar. Diantara berbagai nanopartikel, penggunaan CaO menguntungkan karena biaya rendah, kelimpahan tinggi, sebagai material yang aman bagi manusia, kinetika cepat, dan berfungsi sebagai adsorben yang efektif untuk menghilangkan ion logam berat dari air limbah (Tamjidi & Esmaeili, 2019).

CaO dapat disintesis melalui kalsinasi  $\text{CaCO}_3$ . Salah satu sumber  $\text{CaCO}_3$  yang mudah diperoleh dan murah adalah cangkang kerang. Cangkang kerang (*Ctenocardia fornicate*) telah digunakan sebagai *precursor* nano CaO yang dimodifikasi (Islam *et al.*, 2014). Analisis kimia serbuk cangkang kerang yang dilakukan pada kerang batik (*aphia undulata*), kerang hijau (*Perna Viridis*) dan kerang simping (*Amusium pleuronectes*), menunjukkan kandungan mineral Ca terbesar terdapat pada serbuk cangkang kerang hijau dengan nilai kadar Ca mencapai 29,35% (Abidin *et al.*, 2016). Hsieh, *et al.*, dalam penelitiannya melakukan variasi metode untuk mendapatkan CaO dari cangkang telur ayam. Metode tersebut adalah kalsinasi 900 °C selama 2 jam dan ekstraksi dengan pelarut HCl dengan variasi pengendap NaOH dan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola difraksi ketiga CaO hasil sintesis sama dengan data CaO standar. Kapasitas CaO dengan pengendap NaOH, memiliki nilai 3x lebih besar daripada CaO hasil kalsinasi, dan CaO dengan pengendap  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  memiliki kapasitas yang lebih rendah daripada CaO hasil kalsinasi. Dalam penelitiannya, Hsieh, *et al.*, menambahkan surfaktan (SDS-CaO, CTAB-CaO dan BS-12-CaO) dan polimer (Tris-CaO, PEI-CaO, dan PDA-CaO), masing untuk memodifikasi struktur dan struktur pori CaO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan surfaktan dan polimer memberikan efek adsorpsi yang berbeda terhadap  $\text{CO}_2$  (Hsieh *et al.*, 2021).

Kerang hijau (*Perna Viridis*) merupakan salah satu jenis kerang yang banyak digemari masyarakat. Kerang hijau memiliki nilai ekonomis dan kandungan zat gizi yang baik untuk dikonsumsi. Sebagian besar masyarakat hanya memanfaatkan daging kerangnya saja sedangkan limbah cangkang kerang belum dimanfaatkan secara optimal (Hutami *et al.*, 2015; Wulandari *et al.*, 2020). Limbah padat cangkang kerang hijau yang dihasilkan, memerlukan upaya serius untuk menanganinya agar dapat bermanfaat dan mengurangi dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. CaO dari kerang hijau digunakan untuk sediaan *Effervescent* (Usman *et al.*, 2020). Fajarwati, dkk telah melakukan kalsinasi pada variasi suhu (300-900 °C) terhadap serbuk cangkang kerang hijau untuk mendapatkan CaO. CaO yang diperoleh, digunakan untuk mengadsorpsi zat warna metilen biru dan metil orange. Hasil penelitian menunjukkan bahwa %adsorpsi tertinggi untuk metilen biru jika menggunakan CaO kalsinasi suhu 500 °C dan %adsorpsi tertinggi metil orange diperoleh jika menggunakan CaO kalsinasi suhu 900 °C (Fajarwati *et al.*, 2020).

Metode yang ramah lingkungan dan ekonomis dapat dioptimalkan untuk lebih lanjut mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan kinerja adsorpsi bahan yang dihasilkan. Untuk menanggulangi permasalahan limbah cangkang kerang hijau, maka fokus penelitian ini adalah pemanfaatan cangkang kerang hijau sebagai sumber CaO dan sebagai adsorben  $\text{Fe}^{3+}$  dan  $\text{Mn}^{2+}$ . Untuk meningkatkan sifat adsorpsi CaO, maka dilakukan modifikasi CaO dengan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  sehingga membentuk komposit nanomagnetik  $\text{CaO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$  dimana nano-adsorben yang dihasilkan memiliki karakteristik magnet yang kuat dan mudah dipisahkan dari air oleh medan magnet eksternal (Tamjidi & Esmaili, 2019). Penelitian partikel magnetik telah mendapatkan perhatian khusus dalam pengolahan air, karena kesederhanaan, potensi tinggi, luas permukaan tinggi dan efisiensi tinggi untuk menghilangkan ion logam berat dari air limbah. Diantara partikel magnetik,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  adalah partikel yang banyak digunakan dalam pengolahan air limbah; karena sangat aktif, hidrofilik, stabil secara kimia, tidak beracun dan sifat magnetis terbesar. Selain itu,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  adalah adsorben ramah lingkungan, murah dan tersedia (Shakerian & Esmaili, 2018).

Salah satu masalah serius dalam penggunaan nanopartikel adalah kecenderungan mereka untuk presipitasi dan aglomerasi, yang dapat mengurangi tingkat efektivitas nanopartikel dan berakibat pada menurunnya efisiensi adsorpsi. Untuk mengatasi masalah ini, aplikasi surfaktan, partikel mikro-silika, polimer, zeolit, dan bahan organik dapat digunakan sebagai *coating*. Di antara surfaktan ionik, sodium dodesil sulfat (SDS) yang merupakan surfaktan anionik, bereaksi dengan permukaan nanopartikel magnetit dan meningkatkan karakteristik permukaannya dalam menyerap ion. Pelapisan permukaan nanopartikel, menggunakan SDS dapat mengontrol akumulasi nanopartikel, proporsionalitas dalam ukuran partikel, dan meningkatkan efisiensi penghilangan partikel logam berat dari air limbah (Tamjidi & Esmaili, 2019). Surfaktan jenis zwitter ion, dodesil dimetil betaine (BS-12) telah ditambahkan pada adsorben CaO untuk mengetahui pengaruhnya pada pembentukan nanopartikel dan kinerjanya untuk menyerap  $\text{CO}_2$  (Islam *et al.*, 2014). Pada struktur SDS terdapat gugus fungsi sulfat yang terdiri dari atom oksigen yang kaya akan elektron mandiri sehingga dapat meningkatkan kinerja adsorben dalam proses adsorpsi  $\text{Fe}^{3+}$  dan  $\text{Mn}^{2+}$ . Selain surfaktan, polimer PDA (Polidopamin) telah banyak digunakan dalam komposit untuk mengadsorpsi ion-ion logam. Penambahan PDA difungsikan selain untuk mencegah terjadinya aglomerasi, polimer PDA dapat meningkatkan kinerja adsorben dalam proses adsorpsi  $\text{Fe}^{3+}$  dan  $\text{Mn}^{2+}$ . Hal ini dikarenakan pada struktur polimer PDA terdapat gugus -NH yang mempunyai elektron mandiri yang dapat berinteraksi dengan  $\text{Fe}^{3+}$  dan  $\text{Mn}^{2+}$ .

Berdasarkan uraian tersebut, maka dalam penelitian ini disintesis komposit nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Surfaktan dan CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Polimer, menggunakan prekursor CaCO<sub>3</sub> dari cangkang kerang hijau (*Perna Viridis*), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, surfaktan anionik yaitu SDS dan polimer PDA. Selanjutnya dilakukan uji pengaruh penambahan surfaktan dan polimer terhadap kinerja adsorben pada proses adsorpsi Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> pada air asam tambang.

## 1.2. Perumusan Masalah

Sumatera Selatan merupakan propinsi yang memiliki tambang batubara yang tersebar di beberapa kabupaten. Tingginya kadar Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> pada air asam tambang batubara, dapat menyebabkan permasalahan kesehatan manusia dan lingkungan. Untuk mengatasi tingginya kadar Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> pada air asam tambang batubara diperlukan adanya solusi yang ramah lingkungan sehingga ketika dibuang ke lingkungan, kadarnya dapat memenuhi standar yang ditetapkan oleh pemerintah. Limbah cangkang kerang hijau merupakan sumber CaCO<sub>3</sub> yang merupakan *precursor* CaO. Untuk mendapatkan CaO, dapat dilakukan melalui proses kalsinasi dan ekstraksi pelarut. Berdasarkan literatur, terdapat perbedaan karakteristik dan kinerja adsorben pada CaO yang dihasilkan pada variasi temperatur kalsinasi dan perbedaan pengendap pada proses ekstraksi. Untuk mengetahui perbedaan karakteristik dan kinerja adsorben CaO dari kerang hijau, maka pada penelitian ini dilakukan sintesis CaO melalui proses kalsinasi dengan variasi temperatur 800-1000 °C dan proses ekstraksi pelarut HCl dengan variasi pengendap NaOH dan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Untuk meningkatkan kinerja CaO sebagai adsorben, CaO dikompositkan dengan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dan untuk mencegah terjadinya aglomerasi, ditambahkan surfaktan SDS serta polimer PDA. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan sintesis dan karakterisasi komposit nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS dan CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA, dengan prekursor CaO dari limbah cangkang kerang hijau (*Perna viridis*) serta aplikasinya sebagai adsorben Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> pada air asam tambang. Komposit nanopartikel hasil sintesis kemudian diuji kinerjanya sebagai adsorben Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> dalam larutan standar dan air asam tambang. Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Apakah metode preparasi (ekstraksi HCl-NaOH, ekstraksi HCl-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, kalsinasi pada temperatur 800, 900 dan 1000 °C mempengaruhi kemurnian, kristalinitas dan luas permukaan dari CaO yang dihasilkan?

2. Apakah penambahan surfaktan SDS (*Sodium Dodecyl Sulfate*) dan polimer PDA (*Polydopamine*) pada komposit nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dapat mencegah aglomerasi dan dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> ?
3. Apakah komposit nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS dan CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA memiliki kemampuan maksimal dalam menyerap Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> dalam air asam tambang (AAT) sehingga menjadi memenuhi baku mutu lingkungan pada industri batubara?

### 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan umum penelitian ini adalah :

Mensintesis adsorben unggul berbahan dasar CaO dari cangkang kerang hijau (*Perna viridis*) yang dikomposit dengan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, surfaktan SDS dan polimer PDA serta aplikasinya pada limbah air asam tambang.

Tujuan khusus penelitian ini adalah sbb :

1. Mensintesis CaO dari cangkang kerang hijau (*Perna viridis*) menggunakan metode ekstraksi HCl-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, ekstraksi HCl-NaOH dan kalsinasi (800 °C, 900 °C dan 1000 °C).
2. Memodifikasi CaO hasil preparasi membentuk komposit menggunakan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, surfaktan SDS dan polimer PDA.
3. Mengkaji pengaruh pH, waktu kontak, konsentrasi dan suhu pada proses adsorpsi Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup>.
4. Menentukan isoterm adsorpsi, kinetika adsorpsi dan studi termodinamika komposit nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS dan CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA pada proses adsorpsi terhadap Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup>.
5. Mengaplikasikan komposit nanopartikel CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS dan CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA pada proses adsorpsi terhadap Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> pada air asam tambang pada kondisi optimum serta menentukan % *removal* (% adsorpsi).

#### 1.4. Manfaat Penelitian

1. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi alternatif pengolahan limbah  $Fe^{3+}$  dan  $Mn^{2+}$  dari air asam tambang batubara menggunakan komposit  $CaO/Fe_3O_4$ ,  $CaO/Fe_3O_4/SDS$  dan  $CaO/Fe_3O_4/PDA$  sehingga memenuhi baku mutu lingkungan pada limbah industri batubara.
2. Pengembangan komposit  $CaO/Fe_3O_4$ ,  $CaO/Fe_3O_4/SDS$  dan  $CaO/Fe_3O_4/PDA$  berbahan  $CaO$  dari limbah cangkang kerang hijau (*Perna viridis*), sebagai material adsorben  $Fe^{3+}$  dan  $Mn^{2+}$  pada air asam tambang diharapkan dapat memiliki peranan menunjang kelestarian lingkungan.

#### 1.5. Kebaruan

Pada penelitian ini terdapat kebaruan :

1. Menggunakan surfaktan SDS dan PDA pada komposit nanopartikel  $CaO/Fe_3O_4$ .
2. Modifikasi pada metode sintesis komposit nanopartikel  $CaO/Fe_3O_4/SDS$  dan  $CaO/Fe_3O_4/PDA$ .
3. Menggunakan  $CaO$  yang berasal dari cangkang kerang hijau (*Perna viridis*) sebagai bahan komposit yang dihasilkan dari berbagai metode yaitu kalsinasi ( $800\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $900\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ) dan ekstraksi ( $HCl-NaOH$ ,  $HCl-Na_2CO_3$ ).
4. Mengaplikasikan komposit nanopartikel  $CaO/Fe_3O_4/SDS$  dan  $CaO/Fe_3O_4/PDA$  untuk adsorpsi  $Fe^{3+}$  dan  $Mn^{2+}$  pada air asam tambang.

Kebaruan yang terdapat pada penelitian ini, dapat dilihat pada Tabel 1 .

Tabel 1. Perbedaan antara penelitian yang telah dilakukan peneliti terdahulu dengan penelitian ini

No	Peneliti	Perbedaan (Kebaruan)	
		Peneliti Lain	Penelitian ini
1	Fajarwati, <i>et al</i> , 2020	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kalsinasi cangkang kerang hijau pada suhu <math>300\text{ }^\circ\text{C}</math>, <math>500\text{ }^\circ\text{C}</math>, <math>700\text{ }^\circ\text{C}</math>, dan <math>900\text{ }^\circ\text{C}</math> selama 5 jam.</li> <li>2. Digunakan untuk adsorpsi metilen biru dan metil orange.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kalsinasi cangkang kerang hijau pada suhu <math>800\text{ }^\circ\text{C}</math>, <math>900\text{ }^\circ\text{C}</math> dan <math>1000\text{ }^\circ\text{C}</math> selama 6 jam.</li> <li>2. Ekstraksi <math>CaO</math> dari cangkang kerang hijau</li> </ol>

2	Usman, dkk, 2020	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kalsinasi cangkang kerang hijau pada suhu 900 °C selama 4 jam.</li> <li>2. Digunakan untuk tablet sediaan Ca</li> </ol>	<p>menggunakan pelarut HCl-NaOH dan pelarut HCl-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>3. Sintesis komposit CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS dan CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA. SDS (Sodium dodesil sulfat) adalah surfaktan anionik. PDA (Polidopamin) adalah polimer.</li> </ol>
3	Imani, dkk, 2021	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Karbon aktif ampas tahu</li> <li>2. Digunakan untuk adsorpsi Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> dari limbah air asam tambang.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. Perbandingan berat CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> adalah 2:1</li> <li>5. Perbandingan berat CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS adalah 2:1:0,2</li> </ol>
4	Islam, <i>et al</i> , 2014	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sintesis CaO/BS-12. BS-12 (Dodesil dimetil betain) adalah surfaktan zwitterion.</li> <li>2. CaO yang digunakan merupakan cangkang kerang darah (<i>Ctenocardia fornicata</i>).</li> <li>3. CaCO<sub>3</sub>/BS-12 dikalsinasi pada 850 °C selama 4 jam.</li> <li>4. Digunakan untuk adsorpsi CO<sub>2</sub>.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>6. Perbandingan berat CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA adalah 2:1:0,2</li> <li>7. Semua komposit yang disintesis diaplikasikan untuk adsorpsi Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> dari limbah air asam tambang.</li> </ol>
5	Jamrunroj, <i>et al</i> , 2019	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sintesis CaO/SDS dan CaO/Surfaktan Gemini.</li> <li>2. Menggunakan Ca(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub> sebagai bahan CaCO<sub>3</sub>/SDS dan CaCO<sub>3</sub>/Gemini.</li> <li>3. Digunakan untuk adsorpsi CO<sub>2</sub>.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>8. Menggunakan metode RSM untuk optimasi kinerja adsorpsi adsorben.</li> </ol>
6	Fang, <i>et al</i> , 2017	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sintesis Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA.</li> <li>2. Digunakan untuk adsorpsi Eu(III).</li> </ol>	
7	Foroutan, <i>et al</i> , 2021	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sintesis Hap/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDA.</li> <li>2. Sintesis Hap/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> menggunakan metode kopresipitasi.</li> <li>3. Setelah terbentuk baru ditambahkan dopamine klorida.</li> <li>4. Digunakan untuk adsorpsi Zn<sup>2+</sup>.</li> </ol>	
8	Khoo and Esmaceli, 2018	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sintesis CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.</li> <li>2. CaO diperoleh dari cangkang telur ayam menggunakan metode kalsinasi pada suhu 800</li> </ol>	

		°C selama 4 jam.
		3. Digunakan untuk adsorpsi Pb(II) dan Co(II).
9	Helwani, <i>et al</i> , 2020	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sintesis Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CaO.</li> <li>2. CaO yang digunakan berasal dari cangkang telur ayam.</li> <li>3. Digunakan sebagai katalis reaksi transesterifikasi minyak kelapa sawit untuk biodiesel.</li> </ol>
10	Tamjidi and Esmaeili, 2019	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sintesis CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS menggunakan CaO murni</li> <li>2. Perbandingan berat CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS adalah 1:1:0,5.</li> <li>3. Menggunakan metode kopresipitasi.</li> <li>4. Digunakan untuk adsorpsi Cr(III).</li> <li>5. Adsorpsi hanya dilakukan menggunakan menggunakan CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SDS tanpa dibandingkan dengan CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.</li> </ol>

## 1.6.Hipotesis

Limbah *seafood* seperti kerang terutama kerang hijau mengandung 95% - 98% kalsium karbonat (CaCO<sub>3</sub>). Kalsium karbonat dikenal sebagai senyawa polar yang dapat mendukung fungsi cangkang kerang hijau sebagai adsorben yang baik (Fajarwati *et al.*, 2020). Metode kalsinasi pada suhu tinggi dapat mengubah struktur dan komposisi senyawa kalsium karbonat (CaCO<sub>3</sub>) menjadi senyawa kalsium oksida (CaO). Kalsium oksida yang dihasilkan dapat digunakan sebagai adsorben untuk mengadsorpsi logam berat, senyawa organik dan pewarna (Fajarwati *et al.*, 2020). CaO banyak digunakan sebagai sorben karena melimpah di alam. Studi telah menunjukkan bahwa kinerja sorben berbasis CaO tergantung pada luas permukaan, ukuran pori, volume pori, dan ukuran partikel. Salah satu teknik yang digunakan untuk mengontrol morfologi dan sifat CaO tersebut adalah dengan penambahan aditif atau agen pengarah struktur pada tahap sintesis. Aditif



yang digunakan untuk menegakkan struktur  $\text{CaCO}_3$  atau  $\text{CaO}$  diantaranya polimer, surfaktan, atau senyawa organik.

Perkembangan nanoteknologi di bidang material maju telah banyak dilaporkan para peneliti saat ini, diantaranya adalah dalam pembuatan nanopartikel besi oksida (magnetik) yang memiliki kemampuan tinggi menjadi adsorben limbah zat warna dan beberapa logam berat dalam waktu singkat (Kustomo & Santosa, 2019). Pada skala nano, material sering menunjukkan beberapa sifat khusus, seperti efek permukaan, efek ukuran kecil, efek kuantum, dan efek terowongan kuantum makro. Sifat-sifat ini berkontribusi pada kapasitas adsorpsi dan reaktivitas yang luar biasa, dimana kedua sifat tersebut menguntungkan untuk menghilangkan ion logam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bahan nanomagnetik pada pengolahan air limbah memiliki potensi yang besar sebagai alternatif untuk menyerap logam berat dari air limbah (Yang *et al.*, 2019).

Nanopartikel magnetik memiliki kegunaan dalam menghilangkan polutan ion dari larutan cair. Nanopartikel magnetik telah dipelajari untuk menghilangkan ion logam beracun dari air karena memiliki sifat magnet, stabilitas kimia yang tinggi, kemudahan dalam sintesis, dan memiliki kemampuan daur ulang yang baik (Guo *et al.*, 2020). Salah satu material nanopartikel magnetik adalah  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (*ferrite*). Dalam penggunaannya, penambahan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dapat meningkatkan kinerja adsorben pada proses adsorpsi dan mempermudah pemisahan adsorben dari larutan setelah proses adsorpsi.

Salah satu kelemahan senyawa nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  adalah ketika bereaksi dengan udara maka akan teroksidasi dan bisa membentuk agregat di dalam sistem *liquid*. Dengan demikian, untuk mendapatkan kestabilan nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  perlu dilakukan modifikasi pelapisan permukaan nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dengan material pendukung lainnya (Kustomo, 2020). Beberapa senyawa yang pernah digunakan untuk stabilisasi  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dari oksidasi oleh udara dan atau mencegah pembentukan agregat di dalam sistem berair diantaranya adalah: dextran, polietilen glikol (PEG), polivinil alkohol (PVA), alginat, kitosan, asam glutamat dan asam humat (Kustomo, 2020).

Hipotesis 1 :

*Proses kalsinasi pada sintesis CaO dari cangkang kerang hijau (Perna viridis) akan memberikan kemurnian, kristalinitas dan luas permukaan yang lebih baik jika dilakukan pada temperatur optimal tertentu.*

Hipotesis 2 :

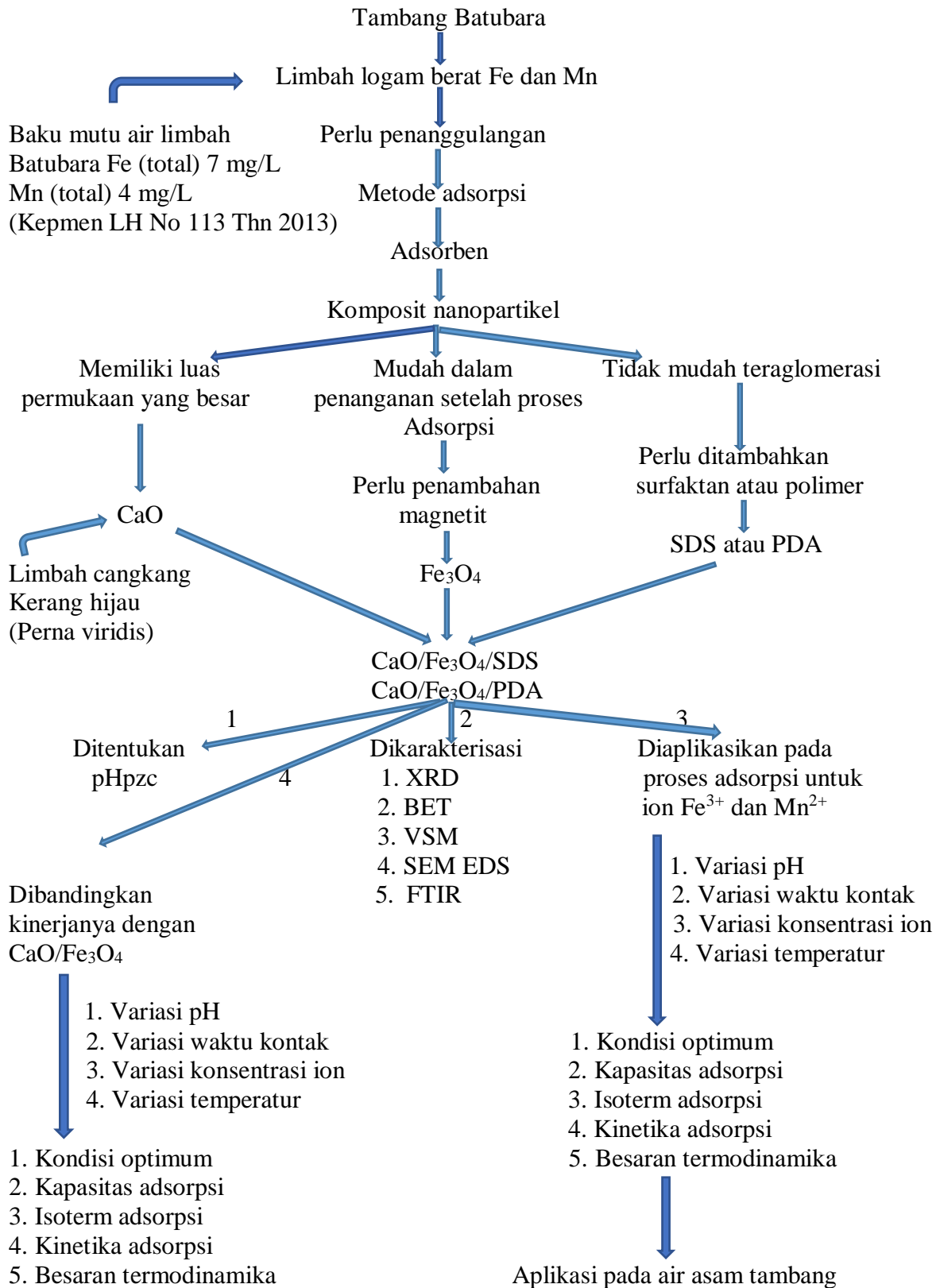
*Penambahan surfaktan SDS dan polimer PDA pada komposit CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> akan menghasilkan adsorben unggul yang tidak teraglomerasi dan memiliki situs aktif lebih banyak sebagai adsorben Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup>.*

Hipotesis 3 :

*Dengan material adsorben yang unggul akan dapat mengurangi kadar Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> dan meningkatkan pH pada air asam tambang secara maksimal.*

*Dengan meningkatnya kinerja adsorpsi, komposit memiliki kemampuan maksimal dalam menyerap Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> dalam air asam tambang sehingga kadar Fe<sup>3+</sup> dan Mn<sup>2+</sup> berkurang dan menjadi memenuhi baku mutu lingkungan pada limbah industri batubara.*

## 1.7. Kerangka Pikir Penelitian



## DAFTAR PUSTAKA

- Abdeen, Z., Mohammad, S. G., & Mahmoud, M. S. (2015). Adsorption of Mn (II) ion on polyvinyl alcohol/chitosan dry blending from aqueous solution. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 3, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2014.10.001>
- Abidin, H., Darmanto, Y. S., & Romadhon, R. (2016). Fortifikasi Berbagai Jenis Tepung Cangkang Kerang Pada Proses Pembuatan Roti Tawar. *Jurnal Pengolahan dan Bioteknologi Hasil Perikanan*, 5(2), 28–34. <http://files/220/Abidin and Darmanto - 2016 - Fortifikasi Berbagai Jenis Tepung Cangkang Kerang .pdf>
- Abugazleh, M. K., Rougeau, B., & Ali, H. (2020). Adsorption of catechol and hydroquinone on titanium oxide and iron (III) oxide. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104180>
- Agboola, O. D., & Benson, N. U. (2021). Physisorption and Chemisorption Mechanisms Influencing Micro (Nano) Plastics-Organic Chemical Contaminants Interactions: A Review. *Frontiers in Environmental Science*, 9(May), 1–27. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.678574>
- Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 393(February), 122383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>
- Allouss, D., Essamlali, Y., Amadine, O., Chakir, A., & Zahouily, M. (2019). Response surface methodology for optimization of methylene blue adsorption onto carboxymethyl cellulose-based hydrogel beads: adsorption kinetics, isotherm, thermodynamics and reusability studies. *RSC Advances*, 9(65), 37858–37869. <https://doi.org/10.1039/C9RA06450H>
- ALothman, Z. A., Habila, M. A., Al-Shalan, N. H., Alfadul, S. M., Ali, R., Rashed, I. G. A. alm, & Alfarhan, B. (2016). Adsorptive removal of Cu(II) and Pb(II) onto mixed-waste activated carbon: kinetic, thermodynamic, and competitive studies and application to real wastewater samples. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4). <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2350-9>
- Ambroz, F., Macdonald, T. J., Martis, V., & Parkin, I. P. (2018). Evaluation of the BET theory for the characterization of meso and microporous MOFs. *Small Methods*, 2(11), 1–17. <https://doi.org/10.1002/smt.201800173>
- An, Y., Zhang, X., Wang, X., Chen, Z., & Wu, X. (2018). Nano@lignocellulose intercalated montmorillonite as adsorbent for effective Mn(II) removal from aqueous solution. *Scientific Reports*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29210-2>
- Anshar, A. M., Taba, P., & Raya, I. (2016). Kinetic and thermodynamics studies on the adsorption of phenol on activated carbon from rice husk activated by ZnCl<sub>2</sub>. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 1(1), 47–60. <https://doi.org/10.17509/ijost.v1i1.2213>
- Aziz, R. A., Li, C. K., Salleh, M. N., & Saleh, M. (2021). Removal of iron and manganese from Palm Oil Mill Effluent (POME) using activated clinoptilolite zeolite. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 765(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/765/1/012029>
- Bakatula, E. N., Richard, D., Neculita, C. M., & Zagury, G. J. (2018). Determination of point

- of zero charge of natural organic materials. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(8), 7823–7833. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1115-7>
- Bakr, A. A., Sayed, N. A., Salama, T. M., Ali, I. O., Abdel Gayed, R. R., & Negm, N. A. (2018). Kinetics and thermodynamics of Mn(II) removal from aqueous solutions onto Mg-Zn-Al LDH/montmorillonite nanocomposite. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 1215–1220. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.05.003>
- Bora, A. J., Mohan, R., & Dutta, R. K. (2017). Simultaneous removal of arsenic, iron and manganese from groundwater by oxidation-coagulation-adsorption at optimized pH. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(1), 60–70. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.092>
- Cappenberg, H. A. W. (2008). Beberapa Aspek Biologi Kerang Hijau Perna viridis Linnaeus 1758. *Oseana*, 33(1), 33–40. [www.oseanografi.lipi.go.id](http://www.oseanografi.lipi.go.id)
- Chatterjee, S., Guha, N., Krishnan, S., Singh, A. K., Mathur, P., & Rai, D. K. (2020). Selective and Recyclable Congo Red Dye Adsorption by Spherical Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles Functionalized with 1,2,4,5-Benzenetetracarboxylic Acid. *Scientific Reports*, 10(1), 111. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57017-2>
- Dewi, S. H., & Ridwan. (2012). Magnetik Untuk Adsorpsi Kromium Heksavalen Penentuan pH Point Zero Charge. *Jurnal Sains Materi Indonesia Indonesian Journal of Materials Science*, 13(2), 136–140.
- Ehiomogue, P., Ahuchaogu, I. I., & Ahaneku, I. E. (2021). Review of Adsorption Isotherms Models. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, 14(4).
- Elfeghe, S., Sheng, Q., & Zhang, Y. (2022). Separation of Lead and Copper Ions in Acidic Media Using an Ion-Exchange Resin with a Thiourea Functional Group. *ACS Omega*, 7(15), 13042–13049. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00417>
- Fahrudin, F., Haedar, N., Abdullah, A., Wahab, A., & Rifaat, R. (2020). Deteksi Unsur Logam Dengan Xrf Dan Analisis Mikroba Pada Limbah Air Asam Tambang Dari Pertambangan Di Lamuru - Kabupaten Bone. *Jurnal Geoelebes*, 4(1), 7. <https://doi.org/10.20956/geoelebes.v4i1.7831>
- Fajarwati, F. I., Ika Yandini, N., Anugrahwati, M., & Setyawati, A. (2020). Adsorption Study of Methylene Blue and Methyl Orange Using Green Shell (Perna Viridis). *EKSAKTA: Journal of Sciences and Data Analysis*, 1(1), 92–97. <https://doi.org/10.20885/eksakta.voll.iss1.art14>
- Fang, Q., Duan, S., Zhang, J., Li, J., & Leung, K. C. F. (2017). Dual shelled Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/polydopamine hollow microspheres as an effective Eu(III) adsorbent. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(6), 2947–2958. <https://doi.org/10.1039/c6ta09968h>
- Fato, F. P., Li, D. W., Zhao, L. J., Qiu, K., & Long, Y. T. (2019). Simultaneous Removal of Multiple Heavy Metal Ions from River Water Using Ultrafine Mesoporous Magnetite Nanoparticles. *ACS Omega*, 4(4), 7543–7549. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00731>
- Fiol, N., & Villaescusa, I. (2009). Determination of sorbent point zero charge: Usefulness in sorption studies. *Environmental Chemistry Letters*, 7(1), 79–84. <https://doi.org/10.1007/s10311-008-0139-0>
- Foroutan, R., Peighambaroust, S. J., Hemmati, S., Ahmadi, A., Falletta, E., Ramavandi, B., & Bianchi, C. L. (2021). Zn<sup>2+</sup> removal from the aqueous environment using a polydopamine/hydroxyapatite/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic composite under ultrasonic waves †.

<https://doi.org/10.1039/d1ra04583k>

- Gaikwad, R. W., & Gupta, D. V. (2008). Review on removal of heavy metals from acid mine drainage. *Applied Ecology and Environmental Research*, 6(3), 79–96. [https://doi.org/10.15666/aeer/0603\\_081098](https://doi.org/10.15666/aeer/0603_081098)
- Gawande, S. M., Belwalkar, N. S., & Mane, A. A. (2017). Adsorption and its Isotherm – Theory. *International Journal of Engineering Research*, 6(6), 312. <https://doi.org/10.5958/2319-6890.2017.00026.5>
- Ghaedi, M., Hajati, S., Zare, M., Zare, M., & Shajaripour Jaber, S. Y. (2015). Experimental design for simultaneous analysis of malachite green and methylene blue; derivative spectrophotometry and principal component-artificial neural network. *RSC Advances*, 5(49), 38939–38947. <https://doi.org/10.1039/C5RA02531A>
- Guo, W., Fu, Z., Zhang, Z., Wang, H., Liu, S., Feng, W., Zhao, X., & Giesy, J. P. (2020). Synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles coated with cationic surfactants and their applications in Sb(V) removal from water. *Science of the Total Environment*, 710, 136302. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136302>
- Handayani, L., & Syahputra, F. (2017). Isolation and characterization of nanocalcium from oyster shell (*crassostrea gigas*). *Indonesian Journal of Fishery Products Processing*, 20(3), 515–523.
- Hariani, P. L., Said, M., Rachmat, A., & Sari, S. P. (2021). Hydroxyapatite-peg/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite for adsorption of phenol from aqueous solution. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(2), 1621–1629. <https://doi.org/10.15244/pjoes/125769>
- Haryono, Natanael, C. L., Rukiah, & Yulianti, Y. B. (2018). Kalsium oksida mikropartikel dari cangkang telur sebagai katalis pada sintesis biodiesel dari minyak goreng bekas. *Jurnal Material Dan Energi Indonesia*, 8(1), 8–15.
- Hegazi, H. A. (2013). Removal of heavy metals from wastewater using agricultural and industrial wastes as adsorbents. *HBRC Journal*, 9(3), 276–282. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.08.004>
- Helwani, Z., Ramli, M., Saputra, E., Bahruddin, B., Yolanda, D., Fatra, W., Idroes, G. M., Muslem, M., Mahlia, T. M. I., & Idroes, R. (2020). Impregnation of CaO from eggshell waste with magnetite as a solid catalyst (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CaO) for transesterification of palm oil off-grade. *Catalysts*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/catal10020164>
- Hidup, K. N. L. (2003). Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Dan Atau Kegiatan Pertambangan Batu Bara. *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Dan Atau Kegiatan Pertambangan Batu Bara*, 53(9), 1689–1699.
- HS, S., Ramayana, R., & Ramadani, K. (2017). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Hijau (*Perna Viridis*) Menjadi Kitin Sebagai Biokoagulan Air Sungai. *Al-Kimia*, 5(1), 89–99. <https://doi.org/10.24252/al-kimia.v5i1.2859>
- Hsieh, S. S.-L. L., Li, F.-Y. Y., Lin, P.-Y. Y., Beck, D. E., Kirankumar, R., Wang, G.-J. J., & Hsieh, S. S.-L. L. (2021). CaO recovered from eggshell waste as a potential adsorbent for greenhouse gas CO<sub>2</sub>. *Journal of Environmental Management*, 297(July), 113430. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113430>
- Hu, P., Kang, L., Chang, T., Yang, F., Wang, H., Zhang, Y., Yang, J., Wang, K. she, Du, J., &

- Yang, Z. (2017). High saturation magnetization Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles prepared by one-step reduction method in autoclave. *Journal of Alloys and Compounds*, 728, 88–92. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.290>
- Hutami, F. E., Supriharyono, & Haeruddin. (2015). Filtration Rate Green Mussel (*Perna viridis*) to *Skeletonema costatum* on Various of Salinity Level. *Aquares*, 4(1), 125–130. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/maquares/article/view/7823>
- Ijdamaka, E. C., Christian, O. C., Fabian, O. O., MaryJane, I. I., & Joseph, K. T. (2018). Isotherm Studies of Adsorption of Cr (VI) Ions onto Coconut Husk. *International Journal of Biochemistry, Biophysics & Molecular Biology*, 3(2), 38. <https://doi.org/10.11648/j.ijbbmb.20180302.13>
- Imani, A., Sukwika, T., & Febrina, L. (2021). Karbon Aktif Ampas Tebu sebagai Adsorben Penurun Kadar Besi dan Mangan Limbah Air Asam Tambang. *Jurnal Teknologi*, 13(1), 33–42. [http://files/262/Imani et al. - 2021 - KARBON AKTIF AMPAS TEBU SEBAGAI ADSORBEN PENURUN K.pdf](http://files/262/Imani%20et%20al.%20-%202021%20-%20KARBON%20AKTIF%20AMPAS%20TEBU%20SEBAGAI%20ADSORBEN%20PENURUN%20K.pdf)
- Inyinbor, A. A., Adekola, F. A., & Olatunji, G. A. (2016). Kinetics, isotherms and thermodynamic modeling of liquid phase adsorption of Rhodamine B dye onto *Raphia hookeri* fruit epicarp. *Water Resources and Industry*, 15, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.06.001>
- Islam, A., Teo, S. H., Chan, E. S., & Taufiq-Yap, Y. H. (2014). Enhancing the sorption performance of surfactant-assisted CaO nanoparticles. *RSC Advances*, 4(110), 65127–65136. <https://doi.org/10.1039/c4ra11653d>
- Istinanda, R., Harlia, & Alimuddin, A. H. (2018). Sintesis Dan Karakterisasi Komposit Zeolit-Selulosa Dari Serat Daun Nanas (*Ananas comosus*) Sebagai Bahan Pengisi Cat Tembok Emulsi Akrilik. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 7(3), 1–9.
- Jamrunroj, P., Wongsakulphasatch, S., Maneedaeng, A., Cheng, C. K., & Assabumrungrat, S. (2019). Surfactant assisted CaO-based sorbent synthesis and their application to high-temperature CO<sub>2</sub> capture. *Powder Technology*, 344, 208–221. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.011>
- Jaymand, M. (2014). Conductive polymers/zeolite (nano-)composites: Under-exploited materials. *RSC Advances*, 4(64), 33935–33954. <https://doi.org/10.1039/c4ra03067b>
- Jitjamnong, J., Luengnaruemitchai, A., Samanwonga, N., & Chuaykarn, N. (2019). Biodiesel production from canola oil and methanol using ba impregnated calcium oxide with microwave irradiation-assistance. *Chiang Mai Journal of Science*, 46(5), 987–1000.
- Johnson, P. D., Girinathannair, P., Ohlinger, K. N., Ritchie, S., Teuber, L., & Kirby, J. (2008). Enhanced Removal of Heavy Metals in Primary Treatment Using Coagulation and Flocculation. *Water Environment Research*, 80(5), 472–479. <https://doi.org/10.2175/106143007x221490>
- Kalesaran, O. J., Lumenta, C., Rompas, R., & Mamuaya, G. (2018). Komposisi mineral cangkang kerang mutiara *Pinctada margaritifera* di Sulawesi Utara. *e-Journal BUDIDAYA PERAIRAN*, 6(1), 25–30. <https://doi.org/10.35800/bdp.6.1.2018.24126>
- Kasirajan, R., Bekele, A., & Girma, E. (2022). Adsorption of lead (Pb-II) using CaO-NPs synthesized by solgel process from hen eggshell: Response surface methodology for modeling, optimization and kinetic studies. *South African Journal of Chemical Engineering*, 40(March), 209–229. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.03.008>

- Kaushal, A., & Singh. (2017). Adsorption Phenomenon and its Application in Removal of Lead from Waste Water: A Review. *International Journal of Hydrology*, 1(2). <https://doi.org/10.15406/ijh.2017.01.00008>
- Kennedy, K. K., Maseka, K. J., & Mbulo, M. (2018). Selected Adsorbents for Removal of Contaminants from Wastewater: Towards Engineering Clay Minerals. *Open Journal of Applied Sciences*, 08(08), 355–369. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2018.88027>
- Ketwong, C., Trisupakitti, S., Nausri, C., & Senajuk, W. (2018). Removal of Heavy Metal From Synthetic Wastewater using Calcined Golden Apple Snail Shells. *Naresuan University Journal: Science and Technology (NUJST)*, 26(4), 61–70.
- Khan, I. I., Saeed, K., & Khan, I. I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908–931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- Khoo, S., & Esmaili, H. (2018). Synthesis of CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic composite for the removal of Pb(II) and Co(II) from synthetic wastewater. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 83(2), 237–249. <https://doi.org/10.2298/jsc170704098s>
- Kowalska, I., & Klimonda, A. (2017). Removal of copper ions from aqueous solutions by means of micellar-enhanced ultrafiltration. *E3S Web of Conferences*, 22. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200087>
- Kragović, M., Daković, A., Marković, M., Krstić, J., Gatta, G. D., & Rotiroti, N. (2013). Characterization of lead sorption by the natural and Fe(III)-modified zeolite. *Applied Surface Science*, 283, 764–774. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.07.016>
- Kustomo. (2020). Uji karakterisasi dan mapping magnetit nanopartikel terlapisi asam humat dengan Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX). *Indonesian Journal of Chemical Science*, 9(3), 149–153.
- Kustomo, & Santosa, S. J. (2019). Studi Kinetika dan Adsorpsi Zat Warna Kation (Metilen Biru) dan Anion (Metil Orange) pada Magnetit Terlapisi Asam Humat. *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*, 1(2), 64–69. <https://doi.org/10.36873/jjms.v1i2.212>
- Lakshminarayanan, R., Madhavi, S., & Sim, C. P. C. (2018). Oxidative Polymerization of Dopamine: A High-Definition Multifunctional Coatings for Electrospun Nanofibers - An Overview. *Dopamine - Health and Disease*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81036>
- Mahini, R., Esmaili, H., & Foroutan, R. (2018). Adsorption of methyl violet from aqueous solution using brown algae *Padina sanctae-crucis*. *Turkish Journal of Biochemistry*, 43(6), 623–631. <https://doi.org/10.1515/tjb-2017-0333>
- Maneechakr, P., & Karnjanakom, S. (2019). Environmental surface chemistries and adsorption behaviors of metal cations (Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup>) on manganese dioxide-modified green biochar. *RSC Advances*, 9(42), 24074–24086. <https://doi.org/10.1039/c9ra03112j>
- Mazaheri, H., Ghaedi, M., Hajati, S., Dashtian, K., & Purkait, M. K. (2015). Simultaneous removal of methylene blue and Pb<sup>2+</sup> ions using ruthenium nanoparticle-loaded activated carbon: response surface methodology. *RSC Advances*, 5(101), 83427–83435. <https://doi.org/10.1039/C5RA06731F>
- Mohammed, B. B., Hsini, A., Abdellaoui, Y., Abou Oualid, H., Laabd, M., El Ouardi, M., Ait Addi, A., Yamni, K., & Tijani, N. (2020). Fe-ZSM-5 zeolite for efficient removal of basic Fuchsin dye from aqueous solutions: Synthesis, characterization and adsorption process optimization using BBD-RSM modeling. *Journal of Environmental Chemical*



*Engineering*, 8(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104419>

- Motitswe, M. G., Badmus, K. O., & Khotseng, L. (2022). Development of Adsorptive Materials for Selective Removal of Toxic Metals in Wastewater: A Review. *Catalysts*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/catal12091057>
- Mukminin, A. (2018). Analisis Kuantitatif Fasa Dan Parameter Kristal Abu Cangkang Keong Mas (*Pomacea canaliculata* L) Hasil Kalsinasi Suhu Tinggi Menggunakan Metode Rietveld. *Jurnal Chemurgy*, 2(2), 15. <https://doi.org/10.30872/cmg.v2i2.2233>
- Neolaka, Y. A. B., Lawa, Y., Naat, J. N., Nubatonis, Y. K., & Riwu, A. A. P. (2019). Studi Termodinamika Adsorpsi Pb (II) Menggunakan Adsorben Magnetik GO-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang disintesis dari Kayu Kusambi (*Schleichera oleosa*). *Jurnal Saintek Lahan Kering*, 2(2), 49–51.
- Permana, B., Saragi, T., Saputri, M., Safriani, L., & Rahayu, I. (2017). Sintesis Nanopartikel ZnO dengan Metode Kopresipitasi. *Jurnal Teknik POMITS*, 07(02), 1–7.
- R. Firyanto, Soebiyono, S., & Rif'an, M. (2019). Pemanfaatan Kitosan Dari Limbah Cangkang Kerang Hijau (*Perna viridis*) Sebagai Adsorben Logam Cu. *Jurnal Teknik Kimia*, 23(1), 1–6.
- Ragadhita, R., Bayu, A., Nandiyanto, D., & Nandiyanto, A. B. D. (2021). How to calculate adsorption isotherms of particles using two-parameter monolayer adsorption models and equations. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 6(1), 205–234. <https://doi.org/10.17509/ijost.v6i1.32354>
- Rahayu, I., Nazriati, N., Fajaroh, F., & Nur, A. (2019). Adsorpsi Ion Kadmium Menggunakan Silika Xerogel Berbasis Abu Bagasse. *JC-T (Journal Cis-Trans): Jurnal Kimia Dan Terapannya*, 3(1), 10–16. <https://doi.org/10.17977/um0260v3i12019p010>
- Roy, A., Gauri, S. S., Bhattacharya, M., & Bhattacharya, J. (2013). Antimicrobial activity of CaO nanoparticles. *Journal of Biomedical Nanotechnology*, 9(9), 1570–1578. <https://doi.org/10.1166/jbn.2013.1681>
- Saadi, R., Saadi, Z., Fazaeli, R., & Fard, N. E. (2015). Monolayer and multilayer adsorption isotherm models for sorption from aqueous media. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(5), 787–799. <https://doi.org/10.1007/s11814-015-0053-7>
- Sagayaraj, R., Aravazhi, S., Selva kumar, C., Senthil kumar, S., & Chandrasekaran, G. (2019). Tuning of ferrites (CoFe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles by co-precipitation technique. *SN Applied Sciences*, 1(3), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0244-7>
- Said, N. I. (2014). Teknologi Pengolahan Air Asam Tambang Batubara “Alternatif Pemilihan Teknologi” *Jai*, 7(2), 119–138.
- Said, N. I. (2018). Teknologi Pengolahan Air Asam Tambang Batubara “Alternatif Pemilihan Teknologi.” *Jurnal Air Indonesia*, 7(2). <https://doi.org/10.29122/jai.v7i2.2411>
- Saini, S., Chawla, J., Kumar, R., & Kaur, I. (2019). Response surface methodology (RSM) for optimization of cadmium ions adsorption using C16-6-16 incorporated mesoporous MCM-41. *SN Applied Sciences*, 1(8), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0922-5>
- Saragi, T. (2018). Karakteristik Optik dan Kristal Nanopartikel Magnetit. *Jurnal Ilmu Dan Inovasi Fisika*, 2(1), 53–56. <https://doi.org/10.24198/jiif.v2i1.15438>
- Sartika, D., Malis, E., & Lestari, A. S. (2020). Studi Penyerapan Logam Berat Pb Menggunakan Nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. *JPSE (Journal of Physical Science and Engineering)*, 4(1), 18–22. <https://doi.org/10.17977/um024v4i12019p018>

- Saruchi, & Kumar, V. (2019). Adsorption kinetics and isotherms for the removal of rhodamine B dye and  $Pb^{+2}$  ions from aqueous solutions by a hybrid ion-exchanger. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(3), 316–329. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.11.009>
- Sepehr, M. N., Al-Musawi, T. J., Ghahramani, E., Kazemian, H., & Zarrabi, M. (2017). Adsorption performance of magnesium/aluminum layered double hydroxide nanoparticles for metronidazole from aqueous solution. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(5), 611–623. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.07.003>
- Shaban, M., AbuKhadra, M. R., Nasief, F. M., & Abd El-Salam, H. M. (2017). Removal of Ammonia from Aqueous Solutions, Ground Water, and Wastewater Using Mechanically Activated Clinoptilolite and Synthetic Zeolite-A: Kinetic and Equilibrium Studies. *Water, Air, and Soil Pollution*, 228(11). <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3643-7>
- Shaban, M., Hassouna, M. E. M. M., Nasief, F. M., & AbuKhadra, M. R. (2017). Adsorption properties of kaolinite-based nanocomposites for Fe and Mn pollutants from aqueous solutions and raw ground water: kinetics and equilibrium studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(29), 22954–22966. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9942-0>
- Shakerian, K., & Esmaeili, H. (2018). Synthesis of  $CaO/Fe_3O_4$  magnetic composite for the removal of Pb(II) and Co(II) from synthetic wastewater. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 83(2), 237–249. <https://doi.org/10.2298/JSC170704098S>
- 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. *Polymers*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/polym11030410>
- Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A. W., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquerol, J., & Siemieniewska, T. (1985). Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure and Applied Chemistry*, 57(4), 603–619. <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
- Stella, C., Soundararajan, N., & Ramachandran, K. (2014). Structural, optical, dielectric and magnetic properties of Mn 1-xCoxO<sub>2</sub> nanowires. *Superlattices and Microstructures*, 71(July), 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2014.03.044>
- Suhermono, Mursyid, A., Mahreda, E. S., Chairuddin, G., Athailah, M., & Gt, C. (2014). Analisis Kandungan Besi(Fe), Mangan(Mn), dan pH Air Tanah Hasil Pemboran Geoteknik di Tambang Batubara PT Adaro Indonesia kabupaten Tabalong dan Balangan Provinsi Kalimantan Selatan. *EnviroScienteeae*, 10(2), 103–112. [http://files/252/Mursyid and Mahreda - 2014 - Analisis Kandungan Besi \(Fe\), Mangan \(Mn\), Dan pH .pdf](http://files/252/Mursyid%20and%20Mahreda%20-%202014%20-%20Analisis%20Kandungan%20Besi%20(Fe),%20Mangan%20(Mn),%20Dan%20pH.pdf)
- Sylwan, I., & Thorin, E. (2021). Removal of heavy metals during primary treatment of municipal wastewater and possibilities of enhanced removal: A review. *Water (Switzerland)*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/w13081121>
- Taberima, S., Junaedi, E., Sarwom, R., Lindongi, L. E., & Mulyanto, B. (2020). The acid mine drainage (AMD) impact of tailings and non-tailings on the ecosystem changes in the ModADA sedimentation area, Timika. *J. Degrade. Min. Land Manage*, 7(2), 2085–2094. <https://doi.org/10.15243/jdmlm>
- Tadjarodi, A., Moazen Ferdowsi, S., Zare-Dorabei, R., & Barzin, A. (2016). Highly efficient ultrasonic-assisted removal of Hg(II) ions on graphene oxide modified with 2-pyridinecarboxaldehyde thiosemicarbazone: Adsorption isotherms and kinetics studies. *Ultrasonics Sonochemistry*, 33, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.04.030>

- Taman, R., Ossman, M., Manssour, M., & Farag, H. (2015). Metal Oxide Nano-particles as an Adsorbent for Removal of Heavy Metals. *Journal of Advanced Chemical Engineering*, 5(3). <https://doi.org/10.4172/2090-4568.1000125>
- Taman, R., R, T., Taman, R., Ossman, M., Manssour, M., Farag, H., & R, T. (2015). Metal Oxide Nano-particles as an Adsorbent for Removal of Heavy Metals. *Journal of Advanced Chemical Engineering*, 5(3). <https://doi.org/10.4172/2090-4568.1000125>
- Tamjidi, S., & Esmaeili, H. (2019). Chemically Modified CaO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposite by Sodium Dodecyl Sulfate for Cr(III) Removal from Water. *Chemical Engineering and Technology*, 42(3), 607–616. <https://doi.org/10.1002/ceat.201800488>
- Tebriani, S. (2019). Analisis Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Pada Hasil Elektrodeposisi Lapisan Tipis Magnetite Menggunakan Aruscontinue Direct Current. *Natural Science Journal*, 5(1), 9.
- Tebriani, S., Syukri, S., & Dahlan, D. (2013). Pengaruh Pemanasan dan Ethylen Glycol pada Elektrodeposisi Lapisan Tipis Magnetite menggunakan Continue Direct Current. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 9(2), 73. <https://doi.org/10.12962/j24604682.v9i2.844>
- Thakur, S., Singh, S., & Pal, B. (2021). Superior adsorption removal of dye and high catalytic activity for transesterification reaction displayed by crystalline CaO nanocubes extracted from mollusc shells. *Fuel Processing Technology*, 213, 106707. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106707>
- Touqeer, T., Mumtaz, M. W., Mukhtar, H., Irfan, A., Akram, S., Shabbir, A., Rashid, U., Nehdi, I. A., & Yaw Choong, T. S. (2020). Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-PDA-lipase as surface functionalized nano biocatalyst for the production of biodiesel using waste cooking oil as feedstock: Characterization and process optimization. *Energies*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/en13010177>
- Tripathi, A., & Rawat Ranjan, M. (2015). Heavy Metal Removal from Wastewater Using Low Cost Adsorbents. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 06(06). <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000315>
- Tyo, A., Welch, S., Hennenfent, M., Kord Fooroshani, P., Lee, B. P., & Rajachar, R. (2019). Development and Characterization of an Antimicrobial Polydopamine Coating for Conservation of Humpback Whales. *Frontiers in Chemistry*, 7(September), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00618>
- Usman, M. R., Nabila, R., & Hakiki, L. N. (2020). Ekstraksi Kalsium dari Cangkang Kerang Hijau (*Perna viridis* L.) dan Kerang Batik (*Paphia undulata* B.) dengan Metode Kalsinasi sebagai Sediaan Effervescent. *Indo. J. Chem. Res.*, 8(2), 101–107. <https://doi.org/10.30598//ijcr.2020.8-mru>
- Utami, U. B. L., Susanto, H., & Cahyono, B. (2020). Neutralization Acid Mine Drainage (AMD) using NaOH at PT. Jorong Barutama Grestone, Tanah Laut, South Borneo. *IJCA (Indonesian Journal of Chemical Analysis)*, 3(1), 17–21. <https://doi.org/10.20885/ijca.vol3.iss1.art3>
- Wei, Y., Han, B., Hu, X., Lin, Y., Wang, X., & Deng, X. (2012). Synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and their magnetic properties. *Procedia Engineering*, 27(April 2014), 632–637. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.12.498>
- Wulandari, W. T., Nurzaman, Pratita, A. T. K., & Idacahyati, K. (2020). Pengaruh Variasi Konsentrasi NaOH Terhadap Nilai Derajat Deasetilasi Kitosan dari Limbah Cangkang Kerang Hijau (*Perna viridis* L.). *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 6(3), 171–176.

<https://doi.org/10.22487/kovalen.2020.v6.i3.15277>

- Yan, E., Cao, M., Ren, X., Jiang, J., An, Q., Zhang, Z., Gao, J., Yang, X., & Zhang, D. (2018). Synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles functionalized polyvinyl alcohol/chitosan magnetic composite hydrogel as an efficient adsorbent for chromium (VI) removal. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 121(October 2017), 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2018.05.028>
- Yang, J., Hou, B., Wang, J., Tian, B., Bi, J., Wang, N., Li, X., & Huang, X. (2019). Nanomaterials for the removal of heavy metals from wastewater. *Nanomaterials*, 9(3), 424. <https://doi.org/10.3390/nano9030424>
- Yazid, N. A., & Joon, Y. C. (2019). Co-precipitation synthesis of magnetic nanoparticles for efficient removal of heavy metal from synthetic wastewater. *AIP Conference Proceedings*, 2124(August). <https://doi.org/10.1063/1.5117079>
- Zewail, T. M., & Yousef, N. S. (2015). Kinetic study of heavy metal ions removal by ion exchange in batch conical air spouted bed. *Alexandria Engineering Journal*, 54(1), 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.11.008>
- Zhao, H., & Zhang, M. (2020). Research progress of CaO-based absorbents prepared from different calcium sources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 474(5), 52058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/474/5/052058>