

**PENGARUH VARIASI MASSA PADA *GREEN-SYNTHESIZED*
NANOKOMPOSIT $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ TERHADAP
APLIKASI HIPERTERMIA MAGNETIK**

(Skripsi)

Oleh

**LARASHATI SUSANDY
2117041081**



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

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI MASSA PADA *GREEN-SYNTHESIZED* NANOKOMPOSIT CoFe₂O₄/ZnS TERHADAP APLIKASI HIPERTERMIA MAGNETIK

Oleh

LARASHATI SUSANDY

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi massa ZnS pada nanokomposit CoFe₂O₄/ZnS yang disintesis secara ramah lingkungan dengan metode *green synthesis* berbasis ekstrak *Moringa oleifera* sebagai reduktor dan stabilisator. Nanokomposit CoFe₂O₄/ZnS dikembangkan sebagai kandidat agen hipertermia dalam terapi kanker berbasis medan magnet bolak-balik atau *Alternating Magnetic Field* (AMF) dengan keunggulan sifat magnetik dan kestabilan termal yang baik. Variasi massa ZnS sebesar 0,025 gram; 0,05 gram; 0,075 gram; dan 0,1 gram ditambahkan untuk mengevaluasi efisiensi pemanasan nanokomposit melalui uji *Specific Absorption Rate* (SAR) untuk menilai kemampuan hipertermia. Karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM) dilakukan untuk mengetahui karakterisasi struktur dan sifat magnetik. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan penurunan ukuran partikel dari 11,12 nm menjadi 8,98 nm dan parameter kisi dari 8,34 Å menjadi 6,76 Å. Karakterisasi VSM menunjukkan penurunan nilai magnetisasi saturasi dari 37,6 emu/g menjadi 29,4 emu/g dan medan koersivitas dari 303 Oe menjadi 90 Oe setelah pembentukan nanokomposit, mengindikasikan sifat magnetik yang lebih lunak. Nilai SAR meningkat seiring peningkatan variasi massa ZnS dengan nilai tertinggi 0,81 W/g pada massa 0,1 gram dan nilai terendah 0,41 W/g pada massa 0,025 gram. Penelitian ini menunjukkan potensi nanokomposit CoFe₂O₄/ZnS sebagai agen hipertermia magnetik berbasis nanoteknologi berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Kata kunci: CoFe₂O₄/ZnS, *green synthesis*, hipertermia magnetik, nanokomposit, SAR.

ABSTRACT

EFFECT OF MASS VARIATIONS IN GREEN-SYNTHESIZED CoFe₂O₄/ZnS NANOCOMPOSITES ON MAGNETIC HYPERTHERMIA APPLICATIONS

By

LARASHATI SUSANDY

This research aims to investigate the effect of ZnS mass variation on CoFe₂O₄/ZnS nanocomposites synthesized through an environmentally friendly green synthesis method based on *Moringa oleifera* extract as a reducing and stabilizing agent. The CoFe₂O₄/ZnS nanocomposites were developed as potential hyperthermia agents for cancer therapy utilizing an Alternating Magnetic Field (AMF), owing to their favorable magnetic properties and good thermal stability. ZnS was added in varying masses of 0,025 gram; 0,05 gram; 0,075 gram; and 0,1 gram to evaluate the heating efficiency of the nanocomposite through Specific Absorption Rate (SAR) test, assessing its hyperthermia capability. Characterization using X-Ray Diffraction (XRD) and Vibrating Sample Magnetometer (VSM) were conducted to analyze the structural and magnetic properties. XRD characterization results showed a decrease in crystallite size from 11,12 nm to 8,98 nm and lattice parameter from 8,34 Å to 6,76 Å after the addition of ZnS. VSM characterization revealed a reduction in saturation magnetization from 37,6 emu/g to 29,4 emu/g and coercivity from 303 Oe to 90 Oe, indicating a softer magnetic nature in the nanocomposite. SAR values increased with higher ZnS mass variation, with the highest value of 0,81 W/g at 0,1 gram and the lowest of 0,41 W/g at 0,025 gram. This research demonstrates the potential of CoFe₂O₄/ZnS nanocomposites as sustainable and eco-friendly nanotechnology-based agent for magnetic hyperthermia therapy.

Keywords: CoFe₂O₄/ZnS, green synthesis, magnetic hyperthermia, nanocomposites, SAR.

**PENGARUH VARIASI MASSA PADA *GREEN-SYNTHESIZED*
NANOKOMPOSIT $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ TERHADAP
APLIKASI HIPERTERMIA MAGNETIK**

Oleh

LARASHATI SUSANDY

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung**



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

Judul Penelitian : Pengaruh Variasi Massa pada *Green-synthesized* Nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ terhadap Aplikasi Hipertermia Magnetik

Nama Mahasiswa : Larashati Susandy

NPM : 2117041081

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II



Suprihatin, S.Si., M.Si.
NIP. 197304141997022001



Prof. Dr. Eng. Edi Suharyadi, S.Si., M.Eng.
NIP. 197503151999031003

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA



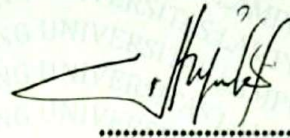
Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP. 197109092000121001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: **Suprihatin, S.Si., M.Si.**



Sekretaris

: **Prof. Dr. Eng. Edi
Suharyadi, S.Si., M.Eng.**



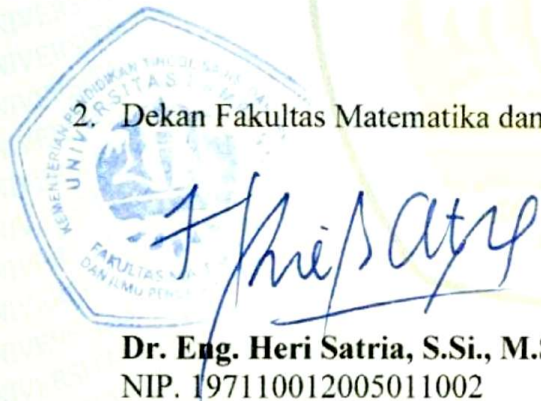
Penguji

Bukan Pembimbing

: **Prof. Drs. Posman
Manurung, B.Sc., M.Si., Ph.D.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **4 Agustus 2025**

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Larashati Susandy
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117041081
Jurusan : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya dengan judul “**Pengaruh Variasi Massa pada *Green-synthesized* Nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ terhadap Aplikasi Hipertermia Magnetik**” adalah benar hasil karya sendiri, baik ide, hasil, maupun analisisnya. Selanjutnya saya tidak keberatan jika sebagian atau keseluruhan data di dalam skripsi digunakan oleh dosen atau program studi dalam kepentingan publikasi atas persetujuan penulis dan sepanjang nama saya disebutkan sebelum dilakukan publikasi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran untuk dapat digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 4 Agustus 2025

Yang Menyatakan,



Larashati Susandy

NPM. 2117041081

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Larashati Susandy, dilahirkan di Lebak pada 4 Agustus 2003. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Susandy dan Ibu Harni Wijaya. Penulis telah menempuh pendidikan di TK dan SD Mardi Yuana Rangkasbitung (2008-2015), SMP Marsudirini Bogor (2015-2018), dan SMAN 1 Rangkasbitung (2018-2021). Pada tahun 2021, penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Unila melalui jalur SBMPTN.

Selama menjadi mahasiswa di Universitas Lampung, penulis tergabung dalam Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) FMIPA Unila Bidang Sains dan Teknologi. Selain itu, penulis juga aktif dalam Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Katolik Unila sebagai anggota maupun pengurus. Penulis dipercaya mengemban tugas sebagai Koordinator KMK FMIPA (Periode 2023) dan Bidang Internal (Periode 2024). Penulis pernah menjadi asisten Praktikum Fisika Dasar I, Fisika Dasar II, Pemrograman Komputer, dan Fisika Komputasi. Pada tahun 2023, penulis melakukan Praktik Kerja Lapangan (PKL) dengan judul **“Karakterisasi Nanokomposit Magnetik Menggunakan Material Daun Kelor dengan Kajian Hipertermia Magnetik di *Research Group of Magnetic Material and Nanostructure* Universitas Gadjah Mada Yogyakarta”**. Selanjutnya penulis melaksanakan penelitian untuk menyusun skripsi dengan judul **“Pengaruh Variasi Massa pada *Green-synthesized* Nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ terhadap Aplikasi Hipertermia Magnetik”** yang dilaksanakan di *Research Group of Magnetic Material and Nanostructure*, Laboratorium Fisika Material dan Instrumentasi, Universitas Gadjah Mada. Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Rejomulyo, Kecamatan Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan.

MOTO

“Sebab itu janganlah kamu kuatir akan hari besok, karena hari besok mempunyai kesusahannya sendiri. Kesusahan sehari cukuplah untuk sehari”

- Matius 6:34 -

“The pain that you have been feeling, does not compare to the joy that is coming”

- Romans 8 : 18 -

*“I’m a little pencil in the hand of a writing God,
who is sending a love letter to the world”*

- Mother Teresa -

PERSEMBAHAN

Dengan iringan rasa syukur dan terima kasih kepada Tuhan yang Maha Esa, karya ini dipersembahkan kepada:

Orang Tua Terkasih

Papa Susandy dan Mama Harni Wijaya

Atas rasa cinta dan kasih yang besar, yang selalu memberikan usaha terbaik dan doa yang tak henti mengiringi, sehingga menghantarkan putrinya untuk menggapai cita-cita.

Keluarga Besar

Lauw Family, Liem Family, Oey Family, dan The Family

Terkhusus

Tante Maria Sri Rohanah dan Om J. F. Bessire

Atas dukungan, motivasi, dan banyaknya bantuan yang diberikan serta selalu memastikan segala sesuatunya berjalan baik dan lancar.

Kakak dan Adik Tersayang

Eqie Restu Subagja, Andini Susandy, dan Flavia Talita Susandy

Atas semangat serta tawa dan kebahagiaan sederhana yang selalu menghibur.

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan yang Maha Esa karena berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Pengaruh Variasi Massa pada *Green-synthesized* Nanokomposit CoFe₂O₄/ZnS terhadap Aplikasi Hipertermia Magnetik**” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si.) dari Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Skripsi ini menyajikan hasil dan pembahasan mengenai adanya pengaruh variasi massa pada *green synthesized* nanokomposit CoFe₂O₄/ZnS terhadap aplikasi hipertermia magnetik menggunakan uji *Specific Absorption Rate* (SAR) serta karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM).

Penyusunan skripsi ini telah dibuat dengan sebaik mungkin. Namun, penulis menyadari terdapat kekurangan dalam isi dan susunannya. Oleh karena itu, penulis menerima kritik dan saran yang membangun. Harapannya, skripsi ini dapat bermanfaat bagi banyak orang, terutama oleh pembaca.

Bandar Lampung, 4 Agustus 2025

Penulis,

Larashati Susandy

SANWACANA

Puji syukur kepada Tuhan yang Maha Esa yang telah memberikan berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Massa pada *Green-synthesized* Nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ terhadap Aplikasi Hipertermia Magnetik”**. Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing I yang telah membimbing, mengarahkan, serta memberikan ilmu dalam proses penyusunan skripsi.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Edi Suharyadi, S.Si., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan ilmu, motivasi, dan arahan dalam proses penelitian dan penyusunan skripsi.
3. Bapak Prof. Drs. Posman Manurung, B.Sc., M.Si., Ph.D. selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan motivasi serta memberikan koreksi dan masukan dalam penyusunan skripsi.
4. Bapak Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Akademik.
5. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
7. Seluruh dosen, staff/karyawan, dan tenaga kependidikan di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, waktu, dan tenaga serta membantu penulis selama menjadi mahasiswa di Universitas Lampung.
8. Mba Dyah Ayu Larasati, S.Si. serta Mas dan Mba ES Club yang memberikan ilmu, membantu, dan menyemangati selama penelitian berlangsung.

9. Papa Susandy dan Mama Harni Wijaya selaku orang tua penulis yang selalu memberikan doa, semangat, dan dukungan sehingga menjadi motivasi dan dorongan bagi penulis.
10. Eqie Restu Subagja, Andini Susandy, dan Flavia Talita Susandy selaku kakak dan adik penulis yang selalu menghibur dan memberikan semangat.
11. Tante Maria Sri Rohanah, Om J. F. Bessire, dan Tante Susi Sarumpaet yang telah membantu penulis dalam berbagai hal dan memberikan dorongan untuk menyelesaikan studi.
12. Keluarga besar yang selalu mendukung dan menjadi motivasi penulis dalam menyelesaikan studi.
13. Stefanus Febrian Saritua Manalu, Febriyanti Angelina, dan Anisatul Mahmudah selaku sahabat seperjuangan penulis yang selalu menyemangati, mendengarkan keluh kesah, membantu, dan menghibur.
14. Pengurus KMK Unila Periode 2023 dan 2024 tanpa terkecuali yang telah menjadi bagian dalam perjalanan menempuh studi dan mengiringi banyaknya pengalaman.
15. Teman-teman mahasiswa Fisika angkatan 2021.
16. Semua pihak yang telah membantu dan tidak dapat penulis cantumkan satu per satu.

Semoga Tuhan selalu menyertai dan membalas seluruh kebaikan dan bantuan yang telah diberikan.

Bandar Lampung, 4 Agustus 2025
Penulis,

Larashati Susandy

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Daun Kelor/ <i>Moringa oleifera</i> (MO)	8
2.2 Nanokomposit	10
2.3 <i>Green Synthesis</i>	12
2.4 <i>Cobalt Ferrite</i> (CoFe ₂ O ₄)	15

	Halaman
2.5 <i>Zinc Sulfide</i> (ZnS)	19
2.6 Sifat Magnetik Material	22
2.7 Hipertermia Magnetik	25
2.7.1 <i>Eddy Currents</i> /Arus Eddy	28
2.7.2 <i>Hysteresis Loss</i> /Kerugian Histeresis	29
2.7.3 <i>Néel and Brownian Relaxation</i> /Relaksasi Néel dan Brown.....	30
2.8 <i>Spesific Absorption Rate</i> (SAR).....	31
2.9 Metode Sintesis dan Uji	33
2.9.1 <i>Co-Precipitation</i> /Kopresipitasi	33
2.9.2 Stöber	35
2.9.3 Kalorimetri	36
2.10 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	37
2.11 <i>Vibrating Sample Magnetometer</i> (VSM).....	41
III. METODE PENELITIAN	43
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	43
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	43
3.2.1 Alat.....	43
3.2.2 Bahan	44
3.3 Prosedur Penelitian	45
3.3.1 Pembuatan Larutan MO/Larutan Ekstrak Daun Kelor	45
3.3.2 <i>Green Synthesis</i> Nanopartikel CoFe ₂ O ₄	45
3.3.3 <i>Green Synthesis</i> Nanopartikel ZnS	46
3.3.4 Fabrikasi Nanokomposit CoFe ₂ O ₄ /ZnS	46
3.4 Diagram Alir Penelitian	47
3.4.1 Pembuatan Larutan MO	49
3.4.2 <i>Green Synthesis</i> CoFe ₂ O ₄	49
3.4.3 <i>Green Synthesis</i> ZnS	51
3.4.4 Fabrikasi Nanokomposit CoFe ₂ O ₄ /ZnS	52
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	53
4.1 Hasil <i>Green Synthesis</i> Nanokomposit CoFe ₂ O ₄ /ZnS.....	53
4.2 Hasil Karakterisasi Nanokomposit CoFe ₂ O ₄ /ZnS.....	53
4.2.1 Analisis Struktur Kristal	53

	Halaman
4.2.2 Analisis Sifat Magnetik.....	57
4.2.3 Analisis <i>Spesific Absorption Rate</i> (SAR)	58
V. KESIMPULAN DAN SARAN	60
5.1 Kesimpulan	60
5.2 Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	62
LAMPIRAN	75

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Struktur <i>Cobalt Ferrite</i> (CoFe_2O_4)	17
Gambar 2.2 Struktur <i>Zinc Sulfide</i> (ZnS).....	19
Gambar 2.3 Elevasi Struktur (a) <i>Zinc Blende</i> dan (b) <i>Wurtzite</i> (Wells, 1945)....	21
Gambar 2.4 Struktur (a) <i>Zinc Blende</i> dan (b) <i>Wurtzite</i> (Greenwood dan Earnshaw, 1984)	21
Gambar 2.5 Klasifikasi Sifat Magnetik Berdasarkan Perilaku Atom (Özgür <i>et al.</i> , 2009).....	24
Gambar 2.6 Mekanisme Hipertermia Magnetik (Fatima <i>et al.</i> , 2021)	28
Gambar 2.7 Prinsip Pengujian Arus Eddy (Pohl <i>et al.</i> , 2004).....	29
Gambar 2.8 <i>Loop</i> Histeresis (Ortega, 2012).....	29
Gambar 2.9 Proses Relaksasi dalam Nanopartikel Magnetik (Moya dan Bruylants, 2021)	31
Gambar 2.10 Mekanisme Pemanasan dalam Uji SAR (Larasati <i>et al.</i> , 2023)	33
Gambar 2.11 Skema Metode <i>Co-Precipitation</i> CoFe_2O_4	35
Gambar 2.12 Skema Prosedur Metode Stöber CoFe_2O_4 (Zarandi <i>et al.</i> , 2015) ..	36
Gambar 2.13 Metode Kalorimetri $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ (Larasati <i>et al.</i> , 2023).....	37
Gambar 2.14 Difraksi Sinar-X.....	38
Gambar 2.15 Metode Serbuk.....	40
Gambar 2.16 Elemen Dasar Magnetometer Foner	41
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	48
Gambar 3.2 Diagram Alir Pembuatan Larutan MO	49
Gambar 3.3 Diagram Alir <i>Green Synthesis</i> CoFe_2O_4	50
Gambar 3.4 Diagram Alir <i>Green Synthesis</i> ZnS	51
Gambar 3.5 Diagram Alir Fabrikasi Nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$	52

Halaman

Gambar 4.1 Pola XRD Nanopartikel CoFe_2O_4 dan Nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ 50%.....	54
Gambar 4.2 Kurva Histeresis CoFe_2O_4 dan $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ 50%	57
Gambar 4.3 Grafik Kenaikan Suhu terhadap Waktu $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$	59
Gambar 4.4 Histogram Nilai SAR $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ dengan Variasi Massa	59

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Analisis Risiko Metode Sintesis CoFe_2O_4	16
Tabel 4.1 Δd Hasil Perbandingan Data Observasi dengan Data Referensi Fasa CoFe_2O_4 dan $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$	55
Tabel 4.2 Analisis XRD Nanopartikel CoFe_2O_4 dan Nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$	56
Tabel 4.3 Medan Koersivitas, Magnetisasi Saturasi, dan Magnetisasi Remanensi CoFe_2O_4 dan $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ 50%.....	57
Tabel 4.4 Data Hasil Perhitungan Nilai SAR.....	58

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu penyebab utama kematian saat ini di dunia adalah kanker. Menurut *World Health Organization* (WHO), diprediksi tingkat penderita kanker pada tahun 2030 akan semakin meningkat, sebanyak 26 juta jiwa akan menderita kanker dan 17 juta jiwa di antaranya diperkirakan meninggal dunia. Kondisi di Indonesia sendiri cukup memprihatinkan karena berdasarkan Riset Kesehatan Dasar (Riskesdas) 2007, kanker menempati urutan ke-7 penyebab utama kematian di Indonesia dengan persentase 5,7%. Terdapat 4 kasus kanker ditemukan pada setiap seribu penduduk. Peningkatan kasus kanker ini disebabkan oleh kurangnya kesadaran masyarakat dan wawasan terhadap penyakit kanker (Chen dan TimCancerHelps, 2012).

Riskesdas 2018 menyatakan bahwa prevalensi penyakit tidak menular (kanker, stroke, penyakit ginjal kronis, diabetes melitus, dan hipertensi) mengalami kenaikan dibandingkan dengan Riskesdas 2013. Prevalensi kanker mulanya berada pada angka 1,4 permil (Riskesdas 2013) menjadi 1,79 permil pada tahun 2018 (Tim Riskesdas 2018, 2019). Menurut data Kementerian Kesehatan Republik Indonesia pada tahun 2022, Indonesia berada pada urutan ke-8 angka kejadian penyakit kanker terbesar di Asia Tenggara.

Kanker disebabkan oleh berbagai faktor (multifaktor), faktor utama pencetus kanker di antaranya inflamasi atau peradangan menahun yang dapat disebabkan oleh virus, bakteri, zat kimia/karsinogen, paparan sinar UV, ketegangan/stres, serta faktor genetik dan gangguan keseimbangan hormonal (TimCancerHelps, 2019). Saat ini, sebagai tindakan untuk kanker, dapat dilakukan beberapa jenis terapi. Salah satu jenis terapi kanker menggunakan radiasi yang sering dilakukan dan

sering ditemukan ialah radioterapi. Radioterapi mengalami perpindahan energi dari sumber radiasi terhadap medium lain yang dikenainya yang dapat berupa partikel, gelombang, atau cahaya. Dalam hal ini, radiasi pengion melakukan perubahan genetik sebagai upaya membunuh sel kanker (Liauw *et al.*, 2013; Baskar *et al.*, 2012).

Terapi kanker konvensional lainnya yang biasa dilakukan ialah operasi pengangkatan tumor dan kemoterapi. Akan tetapi, terapi-terapi ini dikatakan memiliki efek samping, masa pemulihan cukup lama, juga biaya yang cukup mahal. Distribusi kemoterapi kurang spesifik pada tubuh manusia, akan memberi dampak pada pembatasan dosis obat yang masuk ke dalam sel kanker. Hal ini justru menyebabkan terjadinya konsekuensi seperti rambut rontok, kelemahan, dan disfungsi organ. Oleh karena itu, terapi alternatif yang lebih selektif dan minim efek samping diperlukan. Peneliti percaya bahwa nanopartikel akan memberikan keuntungan dan mengatasi keterbatasan terapi kanker konvensional. Kemoterapi, radioterapi, dan pembedahan atau operasi menghasilkan efek samping yang tidak terduga dan mampu menimbulkan potensi risiko terhadap organ atau jaringan yang normal dan sehat (Chen dan TimCancerHelps, 2012; Khan *et al.*, 2019).

Nanoteknologi merupakan bidang dari berbagai disiplin ilmu yang telah menghasilkan material yang memiliki komponen penting dalam ukuran 1-1.000 nm yang memiliki kemungkinan memajukan status terapi kanker dan pencitraan tumor dengan cepat. Penggunaan nanopartikel dalam terapi kanker menarik karena beberapa alasan seperti nanopartikel menunjukkan farmakokinetik yang unik, rasio permukaan terhadap volume yang tinggi yang memungkinkan modifikasi dengan berbagai gugus fungsi permukaan yang menampung, menginternalisasi, atau menstabilkan, juga nanopartikel dibuat dari berbagai bahan yang mampu melarutkan atau membungkus agen terapeutik dalam pengiriman obat untuk memberikan sifat optik, magnetik, dan listrik (Amiji, 2007).

Salah satu jenis metode yang digunakan dalam nanoteknologi untuk meminimalkan pembentukan produk yang tidak diinginkan atau berbahaya melalui proses sintesis yang andal, berkelanjutan, dan ramah lingkungan ialah *green synthesis*. Metode

hijau tersebut memanfaatkan bahan alami atau mikroorganisme untuk mengurangi penggunaan dan pembuatan bahan beracun yang dihasilkan sintesis nanopartikel. Metode kimia sering kali menyebabkan polusi dan toksisitas lingkungan. Maka, nanomaterial yang diperoleh secara *green synthesis* memainkan peran utama dalam kesehatan manusia, tekstil, dan risiko lingkungan dengan cara yang lebih baik. Sintesis nanopartikel yang umum dilakukan meliputi *sol gel*, solvotermal, hidrotermal, sonokimia, reduksi kimia radiasi, dan sintesis dengan bantuan gelombang mikro. Akan tetapi, metode-metode tersebut memakan waktu, mahal, dan menggunakan senyawa berbahaya yang menyebabkan reaksi berbahaya (Sattler, 2020; Chakravarty *et al.*, 2024).

Magnet telah lekat dengan kehidupan manusia sehari-hari sejak zaman dahulu kala. Efek yang dihasilkan batu magnet pada besi telah diprediksi cukup lama. Magnet juga dipercaya oleh banyak budaya dapat menyembuhkan berbagai penyakit tertentu, bahkan digunakan untuk terapi. Dahulu, selama berabad-abad, orang-orang yang berasal dari India, Cina, dan cekungan Mediterania Timur, serta penduduk asli Australia dan Afrika sudah akrab dengan penggunaan magnet. Terdapat banyak ukiran atau lukisan yang menunjukkan bahwa orang Mesir Kuno juga menggunakan magnet dalam beberapa upacara kepercayaannya (Birla dan Hemlin, 1999).

Aplikasi dari magnet telah banyak diterapkan dan semakin bervariasi seiring dengan zaman yang semakin modern. Beberapa aplikasi dari nanopartikel magnetik, yaitu demulsifier kimia, pemisahan unsur-unsur nuklir berbahaya, pencitraan resonansi magnetik, pengantaran obat yang ditargetkan, pengobatan tumor, dan hipertermia sebagai pengobatan kanker (Hussain dan Patankar, 2022). Hipertermia magnetik menjadi aplikasi yang menarik dalam biomedis. Terapi ini menggunakan pemanfaatan nanopartikel magnetik untuk mengonversi energi magnetik menjadi energi panas. Hipertermia magnetik terdiri dari pemanasan zona tumor atau kanker secara selektif pada beberapa bagian. Keuntungan dari terapi ini adalah prinsipnya hampir seluruh jenis sel tumor dapat diobati, namun diperlukan pengendalian kenaikan suhu. Sel kanker dapat dimusnahkan secara selektif oleh panas yang dihasilkan (Fazel-Rezai, 2011).

Keberhasilan aplikasi hipertermia magnetik bergantung pada sifat magnetik dan biokompabilitas dari material yang digunakan. Nanopartikel magnetik berbasis magnetit atau oksida besi (Fe_3O_4) dan maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) menarik untuk aplikasi biomedis termasuk hipertermia magnetik, biosensing, sebagai agen kontras untuk MRI, dan pembawa obat. Hal ini dikarenakan sifat magnetiknya yang dapat disesuaikan menurut ukurannya serta biokompatibilitas dan biodegradabilitas nanopartikel oksida besi (Colombo *et al.*, 2012). Nanomaterial berbasis karbon, seperti karbon nanotube, nanodiamond, grafena, dan oksida grafena juga memiliki luas permukaan besar, ketahanan mekanis yang sangat baik, konduktivitas tinggi terhadap listrik, dan ringan. Oleh karena bentuk dan rasio aspeknya yang tinggi, karbon nanotube menunjukkan peningkatan penyerapan radiasi *Near Infrared* (NIR) (700-1.100 nm) dan dapat cepat mengubah radiasi yang diserap menjadi panas (Chen *et al.*, 2016).

Penelitian yang dilakukan oleh Manohar *et al.*, (2020), menggunakan nanopartikel CoFe_2O_4 yang meningkatkan efisiensi hipertermia nanopartikel dengan mempersempit distribusi ukurannya dan meningkatkan momen magnetiknya. Nanopartikel tersebut dikristalkan dalam struktur spinel kubik berpusat muka atau *face-centered cubic spinel* dengan parameter kisi 8,373 Å dan memiliki ukuran partikel ~10 nm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa CoFe_2O_4 menunjukkan anisotropi magnetik dan momen magnetik tinggi karena adanya ion kobalt (Co^{2+}). Kobalt merupakan satu dari tiga logam yang bersifat feromagnetik pada suhu kamar dan memiliki suhu Curie tertinggi.

Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Larasati *et al.*, (2023), menggunakan nanopartikel komposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$. Penggabungan nanopartikel magnetik dan fluoresensi sebagai mediator panas menjadi strategi yang baru dan efisien. Ukuran partikel rata-rata CoFe_2O_4 dan $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ masing-masing 12 nm dan 17 nm. Variasi $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ yang diterapkan adalah 10%, 30%, dan 50%. Nilai SAR nanopartikel CoFe_2O_4 mulanya adalah 85,7 mW/g, sedangkan pada nanopartikel $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ meningkat dari 87,8 mW/g menjadi 132,9 mW/g. Hasil yang diperoleh dari penelitian ialah nanopartikel komposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ dapat menjadi

kandidat yang menjanjikan sebagai agen hipertermia dalam pengobatan kanker di bidang biomedis.

Pada penelitian ini dilakukan sintesis nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ dalam beberapa variasi massa menggunakan daun kelor untuk mengetahui pengaruhnya. Variasi massa ZnS pada nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ yang diterapkan adalah 0,025 gram; 0,05 gram; 0,075 gram; dan 0,1 gram. Uji *Specific Absorption Rate* (SAR) dilakukan untuk menilai pengaruh dari variasi massa ZnS nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ dengan metode kalorimetri serta membuktikan bahwa penambahan material ZnS dapat meningkatkan performa dan stabilitas material sehingga menjadikan $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ sebagai agen hipertermia yang baik. Kuat medan magnet saat uji SAR diberikan sebesar 150 Oe dan frekuensi sebesar 20 kHz.

Karakterisasi yang dilakukan meliputi *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui fasa yang terbentuk, besar parameter kisi, dan ukuran partikel, serta *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM) untuk mengetahui sifat magnetik pada nanopartikel CoFe_2O_4 dan $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan material, khususnya terapi kanker yang lebih efektif, aman, dan berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penambahan ZnS terhadap ukuran partikel dan parameter kisi pada nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$?
2. Bagaimana pengaruh penambahan ZnS terhadap sifat magnetik, khususnya magnetisasi saturasi pada nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$?
3. Bagaimana pengaruh variasi massa ZnS terhadap nilai *Specific Absorption Rate* (SAR) pada nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$?
4. Apa implikasi dari perubahan struktur kristal dan sifat magnetik akibat penambahan ZnS terhadap potensi aplikasi nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ dalam hipertermia magnetik?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui pengaruh penambahan ZnS terhadap ukuran partikel dan parameter kisi pada nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$.
2. Untuk mengetahui pengaruh penambahan ZnS terhadap sifat magnetik, khususnya magnetisasi saturasi pada nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$.
3. Untuk mengetahui pengaruh variasi massa ZnS terhadap nilai *Specific Absorption Rate* (SAR) pada nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$.
4. Untuk mengetahui implikasi dari perubahan struktur kristal dan sifat magnetik akibat penambahan ZnS terhadap potensi aplikasi nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ dalam hipertermia magnetik.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Nanokomposit yang digunakan adalah $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ yang disintesis menggunakan daun kelor.
2. Karakterisasi meliputi *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM).
3. Uji yang dilakukan adalah uji *Specific Absorption Rate* (SAR).
4. Variasi massa nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$: 0,025; 0,05; 0,075; dan 0,1 gram.
5. Penilaian kemampuan agen hipertermia berdasarkan kurva dan nilai yang dihasilkan dari pengujian SAR dengan metode kalorimetri.
6. Besar kuat medan magnet adalah 150 Oe dan frekuensi sebesar 20 kHz.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Memberikan informasi pengaruh variasi massa nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ terhadap aplikasi hipertemia magnetik.
2. Menambah referensi mengenai hipertemia magnetik yang dapat semakin dikembangkan untuk berbagai aplikasi.

3. Menambah wawasan bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya dalam bidang hipertemia magnetik.
4. Sebagai tambahan referensi di bidang KBK Fisika Material Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Daun Kelor/*Moringa oleifera* (MO)

Kelor merupakan tanaman yang berasal dari India, tepatnya di kawasan kaki bukit Himalaya, Asia Selatan. Mulanya, tanaman kelor tumbuh secara liar dan kemudian menyebar. Tanaman kelor telah menjadi naturalisasi di Pakistan, India dan Nepal, Afghanistan, Bangladesh, Sri Lanka, Asia Tenggara, Asia Barat, Timur, dan Afrika Barat, Hindia Barat dan Florida, serta Amerika (Meksiko, Peru, Brazil, Paraguay). Tanaman kelor dibudidayakan dan beradaptasi dengan baik di daerah tropis. Di Indonesia, tanaman kelor banyak didapati di pinggir jalan, pekarangan, dan lahan baru untuk tempat tinggal di desa. Di Nusa Tenggara Barat (NTB), kelor tidak asing karena digunakan sebagai pagar hidup di pekarangan dan kebun serta sayuran untuk dikonsumsi (Rukmana dan Yudirachman, 2016). Di Pulau Jawa, tanaman kelor biasanya tumbuh sampai pada ketinggian 300 m di atas permukaan laut. Tanaman ini juga sanggup tumbuh di daerah panas, bahkan tanah kering, karena tidak rakus memakan pupuk atau unsur hara (Saras, 2022).

Tanaman kelor yang memiliki nama ilmiah *Moringa oleifera* L. dikatakan sebagai *superfood* atau pangan super dan *functional food* atau pangan fungsional. Hal ini dikarenakan kelor memiliki konsentrasi tinggi terhadap kadar gizi dan menguntungkan untuk kesehatan manusia. Daun kelor mengandung nutrisi, mineral, serta asam amino esensial. Kelor sangat kaya antioksidan, meliputi vitamin C, beta karoten, quercetin, dan *chlorogenic acids* atau asam klorogenat yang mampu menghambat gula. Ekstrak daun kelor menunjukkan aktivitas antioksidan terhadap radikal bebas yang merupakan senyawa ganas yang mampu mengganggu dan merusak melalui proses oksidasi. Antioksidan dari daun kelor dapat membantu mencegah kerusakan tersebut dan memberikan perlindungan yang cukup terhadap kerusakan sel tenunan akibat oksidasi (Winarno, 2018).

Penyakit kanker dapat dicegah secara alami dengan bahan pangan. Bahan pangan tersebut berasal dari sayuran, buah-buahan, dan umbi-umbian. Salah satu bahan pangan yang dapat dimanfaatkan ialah daun kelor. Selain daun kelor, dapat digunakan pula daun seledri dan daun singkong. Daun kelor memiliki ciri-ciri yaitu bersirip tidak sempurna, berbentuk lonjong, dan berukuran kecil sebesar ujung jari. Helaian daun berwarna hijau sampai hijau kecoklatan dengan bentuk lonjong, panjang sekitar 1 hingga 3 cm, dan lebar sebesar 4 mm hingga 1 cm. Ujung daun berbentuk tumpul, pangkal daun membulat, dan tepi daun rata. Daun kelor mengandung karbohidrat, protein, lemak, serat vitamin, asam amino, dan mineral. Daun kelor memiliki senyawa fitokimia yang unik pada penapisan secara kimiawi, yaitu isotiosianat, glukosinolat, karotenoid, vitamin, mineral, sterol, glikosida, alkaloid, fenolik, dan flavonoid (Nisa *et al.*, 2021).

Daun kelor memiliki kandungan potasium, karotenoid, zat niazimin, dan senyawa isothiocyanate benzil yang bermanfaat untuk mencegah dan membunuh sel kanker. Ekstrak kelor mampu mencegah pertumbuhan dan reproduksi sel-sel kanker. Daun kelor dapat menurunkan ekspresi protein tumor. Bahkan apabila mengonsumsi secara rutin, kualitas hidup penderita kanker dapat meningkat. Oleh sebab itu, kelor dikenal dengan julukan *miracle tree* atau *tree for life* (Affandi, 2019). Penelitian terdahulu terhadap ekstraksi daun kelor menunjukkan adanya aktivitas antioksidan yang tinggi dalam proses *in vivo* dan *in vitro*. Berdasarkan hasil penelitian Anwar *et al.*, (2007), bagian-bagian dari kelor mempunyai kandungan senyawa yang berfungsi sebagai antitumor, antipiretik, antipileptik, antiinflamatori, antipasmodik, diuretik, antihipertensi, menurunkan kolesterol, antioksidan, dan antidiabetik.

Daun kelor mengandung mineral, asam amino esensial, antioksidan seperti vitamin C, vitamin E, flavonoid, tanin, dan masih banyak lainnya. Selain itu, berdasarkan uji fitokimia, daun kelor mengandung steroid dan tripernoid, saponin, antarquinon, alkaloid, di mana seluruhnya merupakan antioksidan. Hasil penelitian menyatakan jika daun kelor segar memiliki kekuatan antioksidan 7 kali lebih banyak dibandingkan vitamin C. Salah satu grup flavonoid yang terkandung dalam kelor yaitu kuersetin, memiliki kekuatan antioksidan 4-5 kali lebih tinggi dibandingkan vitamin C dan vitamin E (Jusnita dan Syurya, 2019).

Apoptosis yang merupakan proses kematian sel yang penting untuk mencegah pertumbuhan kanker dipengaruhi oleh sifat antikanker yang diperoleh dari daun kelor. Mengonsumsi daun kelor dapat membuat sel kanker lebih apoptosis dan menghentikan proliferasinya. Penangkapan siklus sel dan penurunan regulasi protein yang terkait dengan siklus sel digunakan untuk menunjukkan berkurangnya pertumbuhan sel (Qanitah *et al.*, 2023). Zat fenolik dan polifenol yang terdapat pada daun kelor termasuk quercetin, campherol, luteolin, asam galat, dan asam klorogenat menjadikan daun kelor memiliki sifat antikanker (Adebayo *et al.*, 2017).

Flavonoid memiliki sifat antikanker melalui pengaturan aktivitas enzim yang dikenal sebagai spesies oksigen reaktif atau *Reactive Oxygen Species* (ROS) terlibat dalam penghentian siklus sel, apoptosis, induksi autophagy, serta penghambatan invasi dan proliferasi sel kanker (Saini *et al.*, 2016). Kelor memiliki sifat anti inflamasi juga yang menghambat proliferasi sel tumor, menginduksi apoptosis pada sel kanker, dan memperlambat perkembangan kanker melalui kemoprevensi yang ditargetkan. Aktivitas ini menghambat karsinogen dan menginduksi detoksifikasi karsinogen. Kehadiran mikroRNA dalam ekstrak minyak dan biji kelor bertanggung jawab atas kemampuannya dalam membedakan antara proliferasi sel sehat dan kanker serta mengatur apoptosis (Potestà *et al.*, 2019).

2.2 Nanokomposit

Nanoteknologi adalah cabang ilmu pengetahuan, rekayasa, dan teknologi yang menangani molekul pada skala nano (10^{-9} m) mulai dari 1 hingga 100 nm dan menggunakan nanosains untuk mengubahnya menjadi produk yang bermanfaat (Drexler, 1987; Mansoori dan Soelaiman, 2005). Dengan bekerja pada tingkat atom ke atom, nanoteknologi menemukan jalannya dalam menciptakan struktur yang lebih besar yang memiliki signifikansi yang lebih maju atau baru karena sifat fisik, kimia, dan biologis yang lebih baik dari struktur molekul senyawa. Nanopartikel telah digunakan bahkan sebelum nanoteknologi berkembang sepenuhnya. Era Mesopotamia awal memiliki bukti penggunaan nanopartikel dalam tembikar untuk memberi efek berkilau pada pot. Nanopartikel adalah objek nano yang memiliki ketiga dimensi dalam kisaran 1 hingga 100 nm (Kumar *et al.*, 2023).

Nanoteknologi ialah studi bahan pada skala nano yang memiliki sifat berbeda daripada bahan pada skala yang lebih besarnya. Nanokomposit merupakan salah satu pemanfaatan nanoteknologi material. Nanokomposit ialah komposit yang dibuat dengan material berskala 1-100 nanometer. Sedangkan komposit merupakan material yang terdiri dari dua atau lebih material dengan sifat berbeda. Komposit umumnya terbagi menjadi dua jenis, yaitu penguat (*reinforcement*) dan matriks, matriks merupakan fasa yang dominan pada komposit. Salah satu pengaplikasian nanokomposit yang sering dilakukan ialah sebagai fotokatalis guna mendegradasi logam berat maupun zat pewarna. Selain itu, nanokomposit juga dimanfaatkan sebagai agen antibakteri seperti yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya dengan nanokomposit Ag/TiO₂ yang mampu menghambat pertumbuhan bakteri *Staphylococcus aureus* sebesar 75% (Nuhaeroh *et al.*, 2022).

Komposit merupakan gabungan dari dua atau lebih material berbeda yang dicampur dengan tujuan untuk memadukan sifat terbaik dari keduanya. Maka, nanokomposit adalah materialnya. Salah satu komponennya memiliki setidaknya satu dimensi yang berukuran nanoskopik, yaitu sekitar 10^{-9} m. Teknologi canggih menerapkan nanokomposit pada media magnetik, semen tulang, membran filter, aerogel, dan sel surya. Nanokomposit ialah bidang penelitian skala nano yang telah menghasilkan produk yang dapat dipasarkan. Ilmu dan rekayasa nanokomposit telah menyentuh semua bidang material, logam, plastik, keramik, biomaterial, material elektronik, dan lainnya (Twardowski, 2007).

Nanomaterial dan nanokomposit merupakan dasar dari nanoteknologi. Nanomaterial berukuran sangat kecil dan diukur dalam nanometer. Nanomaterial setidaknya satu dimensi pada skala nano. Oleh karena ukurannya yang kecil, diperlukan teknik canggih untuk karakterisasi karena tidak dapat dilihat menggunakan mata telanjang. Nanomaterial dapat berupa material alami atau sintesis, nanomaterial sintesis diproduksi dengan ukuran, bentuk, dan sifat permukaan tertentu. Teknik-teknik seperti *Transmission Electron Microscopy* (TEM), *X-Ray Diffraction* (XRD), *X-Ray Fluorescence* (XRF), *Atomic Force Microscopy* (AFM), *Scanning Tunneling Microscopy* (STM), dan konduktivitas listrik digunakan untuk mengidentifikasi ukuran, komposisi, morfologi, struktur

kristal, dan orientasi nanopartikel. Pendekatan multiteknik diperlukan untuk karakterisasi nanomaterial yang lebih baik. Penanganan spesimen dan kondisi lingkungan juga perlu diperhatikan. Nanomaterial diklasifikasi menjadi 0-D (*quantum dots*, nanopartikel), 1-D (*carbon nanotubes*, *nanorods*, dan *nanowires*), 2-D (nanofilm), dan 3-D yang di mana nanomaterial 0-D, 1-D, dan 2-D saling berkaitan erat untuk membentuk antarmuka (bubuk, bahan berserat, lapisan, dan polikristalin). Nanomaterial memiliki sifat optik, magnetik, listrik, kimia, dan sifat lainnya yang unik sehingga dapat diterapkan pada berbagai aplikasi (Parameswaranpillai *et al.*, 2017).

Bahan nanokomposit dapat menjadi alternatif yang cocok untuk mengatasi keterbatasan mikrokompisit dan monolitik sekaligus menimbulkan tantangan persiapan terkait dengan pengendalian komposisi unsur dan stoikiometri dalam fase *nanocluster*. Bahan-bahan ini dilaporkan sebagai bahan abad ke-21 karena memiliki keunikan desain dan kombinasi sifat yang tidak ditemukan pada komposit konvensional. Bahan nanokomposit dapat diklasifikasikan menjadi *Ceramic Matrix Nanocomposites* (CMNC) seperti $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, SiO_2/Ni , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CNT}$, *Metal Matrix Nanocomposites* (MMNC) seperti $\text{Fe-Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$, Co/Cr , Fe/MgO , Al/CNT , Mg/CNT , dan *Polymer Matrix Nanocomposites* (PMNC) seperti *polyester}/\text{TiO}_2 dan *polymer}/\text{CNT}* (Camargo *et al.*, 2009).*

2.3 Green Synthesis

Green synthesis atau yang bisa disebut juga sebagai sintesis hijau dengan nanopartikel telah banyak diterapkan dalam berbagai bidang sebagai model atau metode yang andal, berkelanjutan, dan ramah lingkungan untuk mensintesis berbagai macam material atau nanomaterial, termasuk nanomaterial logam atau oksida logam, material hibrida, dan material yang terinspirasi oleh bioteknologi (Singh *et al.*, 2018). Persiapan nanopartikel yang memanfaatkan reagen yang alami seperti produk organik, mikroorganisme sebagai reduktan dan agen pelapis, polimer yang dapat terurai secara hayati (seperti kitosan), pertumbuhan hijau laut, gula, serta bagian tanaman dianggap sebagai bahan baku terbaik untuk

nanoteknologi. Selain itu, dengan adanya *green synthesis* memberikan perkembangan dan kemajuan dibandingkan strategi biasa lainnya karena tahapannya mudah, cerdas, ramah lingkungan, dan menghasilkan persiapan bahan yang lebih stabil dan relatif dapat direproduksi (Singh *et al.*, 2020; Naik *et al.*, 2019). *Green synthesis* ini dipandang sebagai suatu metode penting yang mampu mengurangi dampak destruktif atau merugikan yang berkaitan dengan metode sintesis nanopartikel tradisional yang umum digunakan. Metode *green synthesis* dibutuhkan untuk menghindari munculnya produk sampingan yang tidak diinginkan dan berbahaya. Metode sintesis ini disebut pula sebagai sintesis biologis atau biogenik (Salem dan Fouda, 2021).

Produksi nanopartikel dicapai dengan metode fisik dan kimia. Namun, kedua metode tersebut sangat mahal dan penggunaan pelarut beracun yang keras membatasi aplikasinya di bidang medis serta juga berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan (Caroling *et al.*, 2015). Hal tersebut mendorong kemajuan metode *green synthesis* yang menggunakan berbagai sumber hijau seperti bakteri, jamur, enzim, alga, dan berbagai ekstrak tanaman untuk produksi nanopartikel (Kaviya *et al.*, 2011; Mufamadi dan Mulaudzi, 2019; Salem dan Fouda, 2021). Beberapa contoh tanaman yang dimanfaatkan dalam *green synthesis* nanopartikel logam di antaranya yaitu *Cassia fistula* (daun) dan *Melia azadarach* (daun) (Naseer *et al.*, 2020), *Moringa oleifera* (daun) (Moodley *et al.*, 2018), *Microsorium punctatum* (daun) (Kedi *et al.*, 2020), *Thevetia peruviana* (daun) (Oluwaniyi *et al.*, 2016), *Galenia africana* dan *Hypoxis hemerocallidea* (seluruh bagian tanaman) (Elbagory *et al.*, 2017), *Agathosma betulina* (daun) (Chiguvare *et al.*, 2016), *Hibiscus rosa-sinensis* (bunga dan daun) (Kushwaha dan Chauhan, 2021), *Nephelium lappaceum* (kulit) (Rahmayeni *et al.*, 2019), serta *Aloe vera* (seluruh bagian tanaman) (Routray *et al.*, 2019).

Keuntungan menggunakan ekstrak tanaman dan/atau minyak nabati selama *green synthesis* nanopartikel ialah mengandung banyak senyawa seperti protein, polisakarida, asam amino dan metabolit sekunder seperti flavonoid, asam fenolik, alkaloid tanin dan terpenoid yang bertanggung jawab untuk bioreduksi dan stabilitas ion logam selama pembentukan nanopartikel. Sintesis berbasis tanaman

adalah pendekatan yang ideal karena tidak memerlukan suhu tinggi, tekanan energi, dan pelarut kimia berbahaya serta mudah ditingkatkan untuk skala besar (Aromal dan Philip, 2012; Ali *et al.*, 2020).

Belakangan ini, *green synthesis* nanopartikel dari berbagai tanaman alami dan/atau ekstrak tanaman telah menjadi sorotan dalam aplikasi medis dan farmasi (Mukherjee *et al.*, 2014; Mufamadi *et al.*, 2019). Oleh karena sifatnya yang ramah lingkungan menjadikan ekstrak tanaman kandidat yang sangat baik untuk dibuat obat-obatan atau sebagai media pengobatan lainnya. Nanopartikel hijau hasil sintesis dapat dimanfaatkan karena adanya sifat-sifat meliputi sifat optik atau fluoresensi, termal, biosensing, fotokatalis, fotodinamik, imunoterapi, antiangiogenesis, antibakteri, antijamur, antiparasit, antioksidan, antivirus, dan antikanker. Aplikasi *green synthesis* dapat diterapkan pada kesehatan manusia meliputi terapi, penghantaran obat, diagnostik, biosensing, teranostik (kombinasi terapi dan diagnosis), serta pencitraan biologis. Penelitian yang dilakukan oleh Alex *et al.*, (2020) menyatakan bahwa nanopartikel Ag yang disintesis menggunakan metode *green synthesis* dari ekstrak daun nimba memiliki sifat biosensing dan fotokatalik. Selain itu, penelitian oleh Riley dan Day, (2017) menunjukkan terapi fototermal menggunakan nanopartikel Au yang disintesis dengan metode *green synthesis* mampu menyerap foton datang dan mengubahnya menjadi panas untuk menghancurkan sel kanker dan/atau tumor.

Penerapan *green synthesis* material dalam produksi di bidang industri dikembangkan oleh karena nanomaterial rendah racun serta dampaknya bagi lingkungan dan kesehatan yang berkurang. Sintesis nanomaterial seperti nanofiber dan nanotube didorong untuk menghasilkan nanopartikel dalam jumlah besar yang bebas kontaminan (Kemp dan Never, 2017; Huguet *et al.*, 2021). Metode *green synthesis* juga tentunya mengurangi produksi gas rumah kaca seperti karbon dioksida, metana, dan nitrogen oksida di atmosfer. Sensor berbasis nanoteknologi membantu memantau kualitas makanan serta kemasan makanan agar aman dari mikroorganisme. *Green synthesis* memfasilitasi pemantauan terhadap polutan air, tanah, dan lingkungan sekitar seperti peptisida dan patogen, membantu

meningkatkan nutrisi, mengoptimalkan kadar air dan nutrisi, serta meningkatkan hasil panen di bidang pertanian (Singh *et al.*, 2021; Jain *et al.*, 2022).

Green synthesis digunakan untuk produksi bahan bakar yang dapat memenuhi ketentuan mengenai emisi yang ketat. Platinum dalam sel bahan bakar dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan kendaraan ramah lingkungan. Baru-baru ini juga muncul kendaraan hibrida dan kendaraan bertenaga hidrogen. Karbon nanotube dapat digunakan untuk memproduksi bahan bakar yang terbukti dapat meningkatkan reaktivitas dan menyimpan hidrogen (Singh, 2015). Selain itu, gawai atau *gadget* serta barang-barang elektronik lainnya juga dapat memanfaatkan *green synthesis* yang ramah akan kesehatan dan lingkungan. Gawai dengan *green synthesis* akan menggunakan biaya rendah, dapat didegradasi tanpa produk samping yang beracun, serta kompatibel dengan manusia dan lingkungan (Eisenstein dan Bimberg, 2018).

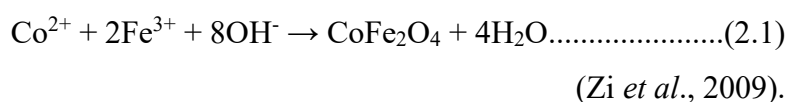
2.4 Cobalt Ferrite (CoFe₂O₄)

Di antara berbagai nanomaterial, nanopartikel magnetik adalah yang vital dan dieksploitasi secara ekstensif, salah satu yang banyak diteliti ialah *cobalt ferrite* (CoFe₂O₄) karena memiliki kelebihan seperti magnetisasi saturasi yang tinggi, stabilitas kimia yang baik, mudah dipreparasi, harga yang murah, tidak beracun pada jumlah tertentu, ketahanan korosi yang baik, dan mudah dimodifikasi (Haw *et al.*, 2010; Khosroshahi dan Ghazanfari, 2011). Nanopartikel *cobalt ferrite* adalah material dengan sifat fisikokimia dan magnetik yang dapat dikontrol dengan kemudahan metode sintesis (Ahmad dan Zhou, 2017).

Berbagai teknik preparasi diterapkan untuk sintesis nanopartikel ini, di antaranya seperti sol gel, hidrotermal, elektrokimia, dekomposisi termal, mikroemulsi, dan sonokimia. Sebagian besar metode menjelaskan bahwa nanopartikel CoFe₂O₄ dapat dicapai dalam ukuran dan mikrostruktur yang dibutuhkan, namun sulit diterapkan pada skala yang lebih besar karena prosedur metode yang mahal, rumit, suhu reaksi tinggi, waktu reaksi lama, reagen beracun, adanya produk samping, dan tidak ramah lingkungan (Kazemi *et al.*, 2018).

Cobalt ferrite (CoFe_2O_4) merupakan material magnetik keras yang dikenal memiliki koersivitas tinggi, magnetisasi menengah, serta stabilitas fisik dan kimia yang baik. Terdapat banyak kemungkinan penerapan partikel ferit biokompatibel dalam kombinasi terapi kanker, sebagai contoh yaitu hipertermia yang dikombinasikan dengan kemoterapi atau penargetan obat (Capco dan Chen, 2014).

Nanopartikel ferit CoFe_2O_4 dibuat dengan metode kopresipitasi kimia melalui pematangan. Nanopartikel tersebut dapat disintesis dari bahan material awal dengan puritas atau kemurnian tinggi, yakni $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. Selain itu natrium hidroksida atau NaOH juga digunakan sebagai agen presipitasi atau zat pengendap. Reaksi kopresipitasi (*co-precipitation*) yang umum dalam sintesis nanopartikel *cobalt ferrite* ialah seperti pada **Persamaan (2.1)**.



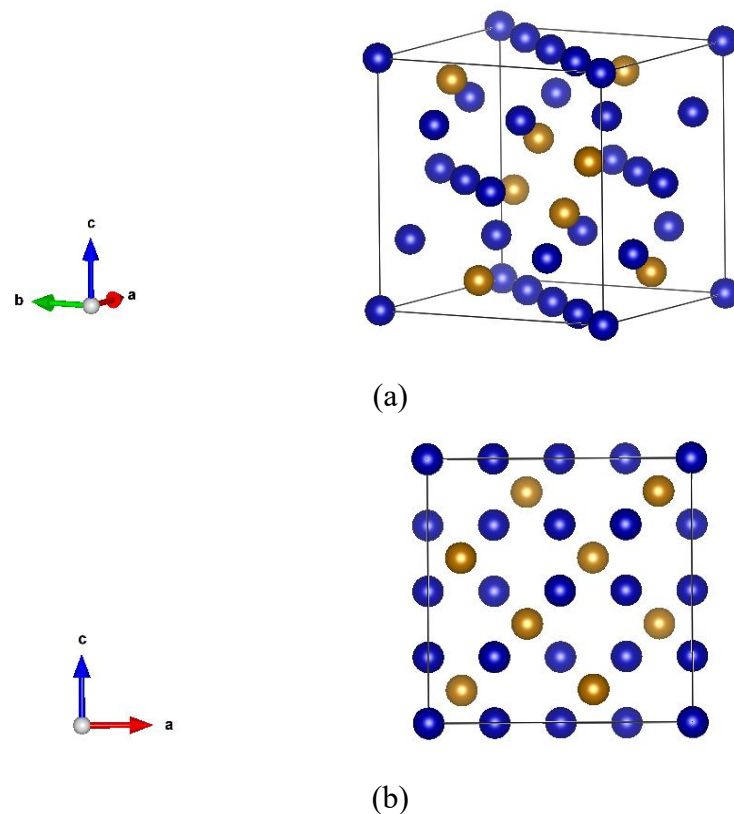
Setiap metode memiliki risikonya masing-masing dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan serta dapat dilakukan penanganan untuk mengurangi risiko tersebut seperti pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Analisis Risiko Metode Sintesis CoFe_2O_4

No	Metode	Analisis Risiko
1	Sol gel (Chae <i>et al.</i> , 2016)	Biaya tinggi, waktu lama, dan membutuhkan proses reaksi bertahap sehingga menghasilkan banyak alkohol
2	Hidrotermal (Zhang <i>et al.</i> , 2013)	Waktu lama serta suhu reaksi dan tekanan tinggi
3	Elektrokimia (Fajaroh <i>et al.</i> , 2012)	Rawan pengotor serta efisiensi rendah pada anoda dan reaksi pada katoda cukup lambat
4	Dekomposisi termal (Soundararajan dan Kim, 2014)	Suhu reaksi sangat tinggi dan menggunakan pelarut yang berbahaya yaitu difenil eter
5	Mikroemulsi (Asab <i>et al.</i> , 2020)	Waktu lama, hasil tidak baik jika suhu tidak sesuai, pelarut dibutuhkan dalam jumlah yang besar, dan biaya tinggi
6	Sonokimia (Abbas <i>et al.</i> , 2013)	Menggunakan gelombang ultrasonik dengan frekuensi yang sangat tinggi dan sulit mengontrol suhu karena rendaman ultrasonik memanaskan saat digunakan

Nanopartikel CoFe_2O_4 diaplikasikan pada berbagai perangkat elektronik, penyimpanan data, sebagai sensor dan katalis, serta dalam dunia biomedis seperti pengobatan hipertermia sebagai mediator pemanas, penghantaran obat yang ditargetkan, pencitraan resonansi magnetik atau *Magnetic Resonance Imaging* (MRI), dan biosensor (Amiri dan Shokrollahi, 2013). Namun, dalam penggunaannya, kita perlu memperhatikan berbagai hal karena nanopartikel CoFe_2O_4 dapat menembus tubuh secara tidak sengaja dengan menelan, menghirup, dan adsorpsi maupun secara sengaja misalnya ditanamkan ke dalam tubuh manusia selama diagnosis biomedis dan pengobatan. Material ini dapat saja menyebabkan terjadinya stres oksidatif, sitotoksitas, genotoksitas, inflamasi, apoptosis, dan kelainan metabolik ataupun hormonal (Ahmad dan Zhou, 2017). Sumber toksisitas lainnya adalah ion Co^{2+} dapat larut dari CoFe_2O_4 dan ion tersebut beracun. Sehingga diperlukan adanya inovasi untuk penggunaan CoFe_2O_4 dalam aplikasi medis agar tidak berbahaya bagi tubuh (Azaria *et al.*, 2011).

Struktur *cobalt ferrite* (CoFe_2O_4) ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Struktur *Cobalt Ferrite* (CoFe_2O_4)

Untuk aplikasi penyimpanan energi, di antara berbagai *spinel ferrite*, Co dan Ni memiliki sifat ramah lingkungan, hemat biaya, dan menunjukkan anisotropi magnetokristalin yang besar, serta stabilitas kimia dan kinerja elektrokimia yang unggul (Sharma *et al.*, 2023). *Cobalt ferrite* (CoFe_2O_4) memiliki sifat magnetik, mekanik (kekerasan), dan kimia (stabilitas) yang menarik, menjadikan material ini menjadi menjanjikan untuk aplikasi perangkat magnetik (Masunga *et al.*, 2019). *Cobalt ferrite* juga memiliki sifat elektrokimia yang baik sebagai superkapasitor (Kumbhar *et al.*, 2012). Penelitian sintesis nanopartikel *cobalt ferrite* yang dilakukan oleh Pawar *et al.*, (2020), menghasilkan ukuran rata-rata 23 nm dengan menggunakan metode sol gel. Kapasitansi spesifik ditemukan sebesar 15 Fg^{-1} pada rapat arus $0,6 \text{ Ag}^{-1}$ sebagaimana ditentukan dari metode pelepasan galvanostatik. Konduktivitas yang buruk dari nanopartikel CoFe_2O_4 dapat berpengaruh pada nilai kapasitansi spesifik yang lebih rendah.

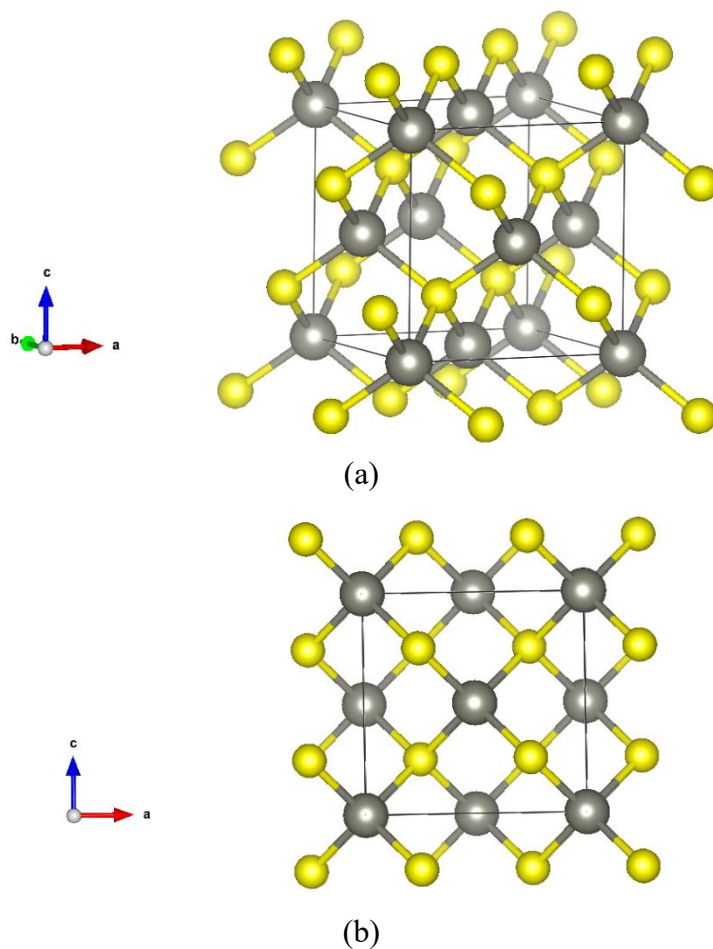
Nanopartikel CoFe_2O_4 yang disintesis menggunakan metode hidrotermal dan kopresipitasi dengan prekursor yang terdiri dari nitrat, klorida, dan asetat menghasilkan ukuran partikel rata-rata 11 hingga 26 nm dan luas permukaan $\sim 34 \text{ m}^2/\text{g}$. Nanopartikel ini menunjukkan kapasitansi spesifik yang besar yaitu sebesar 429 Fg^{-1} dalam elektrolit KOH 6 M pada $0,5 \text{ Ag}^{-1}$. Nanopartikel menunjukkan retensi kapasitansi sebesar 98,8% setelah 6000 siklus pada rapat arus 10 Ag^{-1} (Kennaz *et al.*, 2017).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Houshiar *et al.*, (2014), rata-rata ukuran nanopartikel *cobalt ferrite* yang dihasilkan melalui teknik *combustion* atau pembakaran, kopresipitasi, dan presipitasi yaitu untuk sampel pembakaran 69,5 nm, untuk sampel kopresipitasi adalah 49,5 nm, dan untuk sampel presipitasi adalah 34,7 nm. Pada ketiga sampel, analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan struktur spinel kubik terbalik dengan grup ruang Fd-3m . Selain itu data VSM menunjukkan nilai saturasi medan magnet kurang dari 15 kOe. Nilai saturasi magnetisasi (M_s) adalah 56,7 emu/g untuk sampel pembakaran, 55,8 emu/g untuk sampel kopresipitasi, dan 47,2 emu/g untuk sampel presipitasi. Koersivitas (H_c) sebesar 2002 Oe untuk sampel pembakaran, 850 Oe untuk sampel kopresipitasi, dan 233 Oe untuk sampel presipitasi. Hasil penelitian ini mengungkapkan bahwa

proses produksi nanopartikel yang berbeda akan menghasilkan ukuran partikel dan sifat magnetik yang beragam. Proses pembakaran memiliki H_c dan M_s tertinggi, sedangkan proses presipitasi menjadi yang terendah. Analisis mengungkapkan bahwa parameter proses sintering dan komposisi kimia memiliki dampak signifikan terhadap kemampuan magnetostriktif *cobalt ferrite* murni dan tersubstitusi. Pengendalian suhu sintering dan tingkat substitusi sangat penting saat memproduksi *cobalt ferrite* magnetostriktif untuk aplikasi sensor dan aktuator tertentu.

2.5 Zinc Sulfide (ZnS)

Struktur dari *zinc sulfide* atau ZnS diperoleh jika atom Zn ditempatkan pada salah satu kisi FCC dan atom S pada kisi FCC yang lain seperti pada **Gambar 2.2**. Sel konvensional *zinc sulfide* berbentuk kubus.

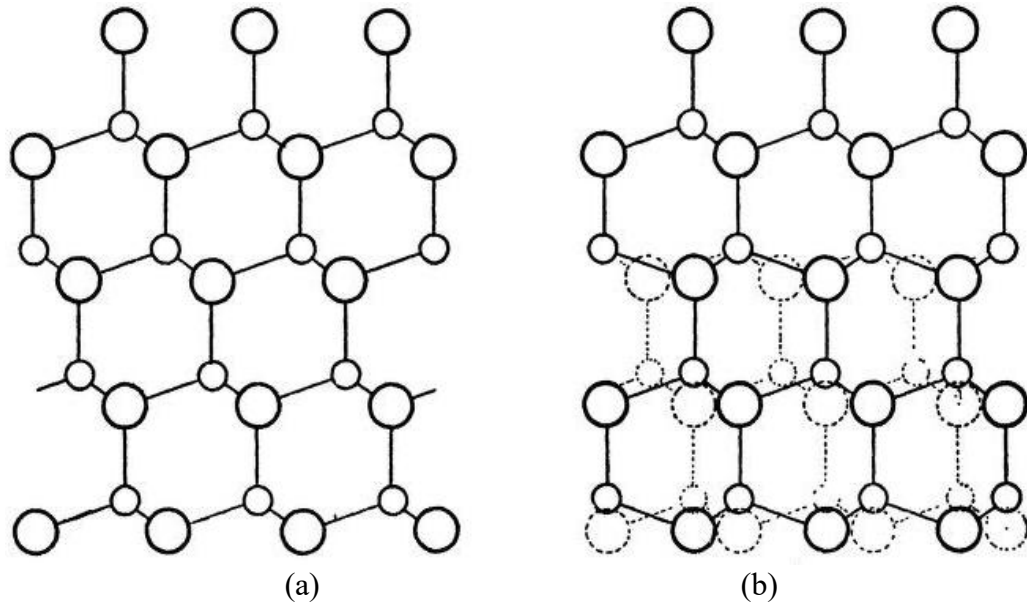


Gambar 2.2 Struktur *Zinc Sulfide* (ZnS)

Seng ditemukan di Eropa oleh Marggraf pada tahun 1746. Bijih-bijih seng yang utama adalah sphalerita (sulfida), smithsonite (karbonat), calamine (silikat), dan franklinite (zine, manganese, besi oksida). Seng alami mengandung 5 isotop. Terdapat 16 isotop seng lainnya yang labil. Seng memiliki warna putih kebiruan. Logam jenis ini rapuh pada suhu biasa tetapi mudah dibentuk pada suhu 100-150°C. Seng tidak memiliki sifat magnet. Logam ini digunakan untuk membentuk campuran logam dengan logam lain seperti kuningan, perak nikel, dan perunggu. Seng dalam jumlah besar digunakan untuk membuat cetakan dalam industri otomotif dan listrik. Seng juga digunakan untuk menyepuh logam-logam lain dengan listrik seperti besi untuk menghindari karatan. Seng sulfida banyak digunakan dalam membuat tombol bercahaya, sinar-X, kaca-kaca TV, dan lampu *fluorescent* (Evilina, 2010).

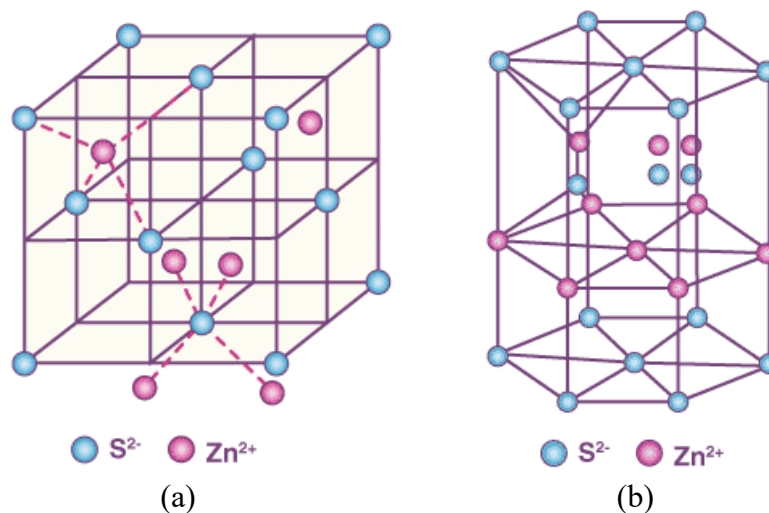
Struktur kristal ZnS dapat ditemukan dalam dua bentuk, yaitu *sphalerite/zinc blende* dan *wurtzite*. Dalam struktur sfalerit, setiap ion seng (Zn^{2+}) dikelilingi oleh 4t ion sulfida (S^{2-}) dalam susunan tetrahedral, sementara dalam struktur *wurtzite*, ion-ion tersebut membentuk susunan heksagonal (Shriver dan Atkins, 2010; Sangkota *et al.*, 2024). Kedua jenis ZnS ini memiliki ciri-ciri yang sama, yaitu 1:1 stoikiometri Zn:S, koordinasi 4 untuk setiap ion (koordinasi 4:4). ZnS merupakan semikonduktor II-VI yang memiliki celah pita optik yang lebar. Saat ini, semikonduktor dengan celah pita energi yang dapat diatur secara luas dianggap sebagai material yang semakin baik di generasi yang akan datang, seperti pada fotovoltaiik, perangkat optoelektronik, laser, sensor, dan perangkat celah pita fotonik. Saat dimensi material terus menerus dikurangi menjadi nanometer, sifat fisik dan kimia material tersebut dapat berubah drastis (Sam, 2017). Konduktivitas listrik semikonduktor juga dapat diubah secara signifikan melalui stimulus eksternal seperti tegangan, fluks, foton, dan lainnya. Hal ini menjadikan semikonduktor sebagai bagian penting dalam listrik dan optik (Sang *et al.*, 2002).

Zinc blende didasarkan pada kisi anion *Face Centered Cubic* (FCC), sedangkan *wurtzite* didasarkan pada susunan anion *Hexagonal Close Packed* (HCP) seperti pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 Elevasi Struktur (a) *Zinc Blende* dan (b) *Wurtzite* (Wells, 1945)

Zinc blende adalah bijih seng yang paling tersebar luas dan sumber utama logam tersebut. Tetapi dikenal pula bentuk lain yang terjadi secara alami namun lebih langka yaitu *wurtzite*, yang lebih stabil pada suhu tinggi. Dalam kedua struktur, setiap Zn dikoordinasikan secara tetrahedral oleh 4 S dan setiap S dikoordinasikan secara tetrahedral oleh 4 Zn. Strukturnya berbeda secara signifikan hanya dalam tipe pengemasan rapat yang terlibat, yaitu kubik dalam *zinc blende* dan heksagonal dalam *wurtzite*. Perbedaan tipe pengemasan *zinc blende* dan *wurtzite* dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4 Struktur (a) *Zinc Blende* dan (b) *Wurtzite* (Greenwood dan Earnshaw, 1984)

Zinc sulfide digunakan secara luas sebagai fosfor penting untuk perangkat fotoluminesensi, elektroluminesensi, dan katodoluminesensi karena memiliki stabilitas kimia yang lebih baik dibandingkan dengan kalkogenida lain seperti ZnSe. ZnS digunakan untuk tabung sinar katoda, tampilan emisi medan, dan sintilator. Selain itu, laser kristal ZnS telah diproduksi dengan menggunakan eksitasi streamer (Obidin *et al.*, 1988) dan lapisan tipis ZnS dapat dimanfaatkan sebagai bahan pemancar aktif dalam perangkat tersebut, yang dikenal sebagai katoda dingin elektron panas (Dalacu dan Kitai, 1991). Dalam optoelektronik, ZnS digunakan sebagai dioda pemancar cahaya, reflektor, filter dielektrik, dan bahan jendela (Borah *et al.*, 2008).

Material ZnS sering kali didoping dengan beberapa dopan seperti Mn, In, Cu, dan Co. Semikonduktor intrinsik perlu didoping untuk mengubah sifatnya. Namun, dopan tidak memengaruhi spektrum serap dan intensitas emisinya meningkat pesat. Doping dicapai dengan memasukkan dopan ke dalam campuran yang bereaksi. Energi pengikatan yang tinggi akan menghasilkan adsorpsi dan doping yang berhasil, sedangkan bila energi peningkatan rendah, berarti doping tidak disukai (Sam, 2017).

2.6 Sifat Magnetik Material

Sifat-sifat magnetik umumnya terbagi menjadi tiga jenis jika ditentukan berdasarkan besar kecilnya permeabilitas relatif μ_r dari bahan, yaitu feromagnetik ($\mu_r \gg 1$), paramagnetik ($\mu_r = 1$), dan diamagnetik ($\mu_r < 0$) (Effendi *et al.*, 2007). Sifat kemagnetan suatu benda atau bahan dapat dikelompokkan menjadi empat berdasarkan bahannya, yaitu feromagnetik, paramagnetik, diamagnetik, dan nonmagnetik. Bahan yang sifatnya mampu ditarik magnet dengan kuat disebut sebagai bahan feromagnetik. Contoh bahan feromagnetik ialah baja, besi, nikel, dan kobalt. Terdapat pula bahan feromagnetik campuran yaitu besi-silikon, aluminium-nikel-kobalt (alnico), dan besi-nikel. Sedangkan bahan paramagnetik adalah bahan yang dapat ditarik magnet namun tidak sekuat feromagnetik, seperti magnesium, aluminium, platina, dan timah. Bahan diamagnetik adalah bahan yang sifatnya tidak dapat ditarik oleh magnet dan bahkan ditolak oleh magnet. Contoh bahan

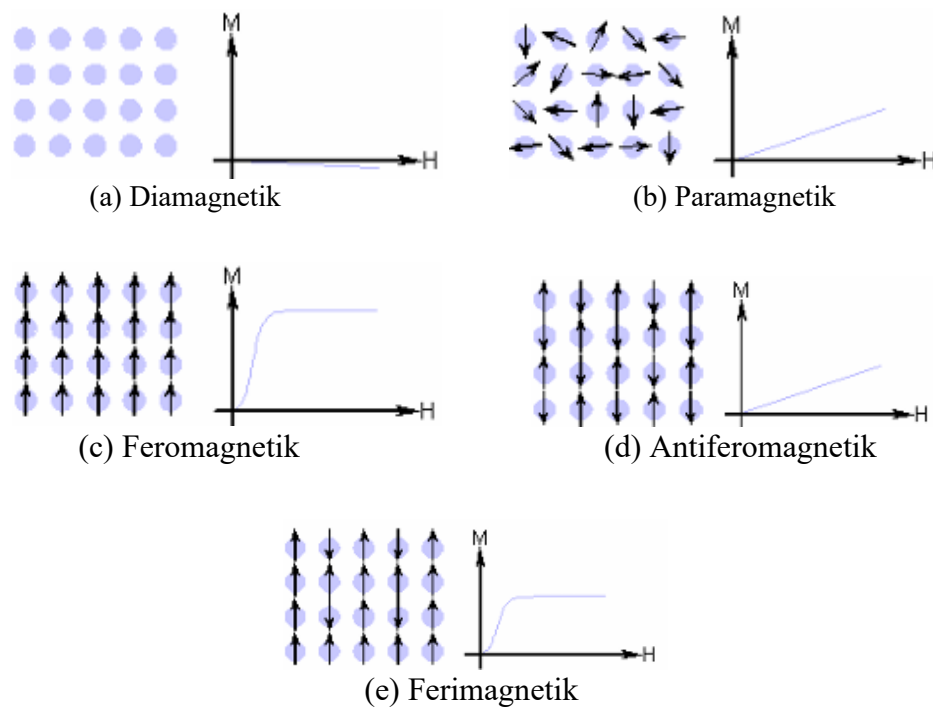
diamagnetik adalah seng murni, timbal, emas, perak, bismut, dan tembaga. Terakhir, bahan yang sifatnya tidak dipengaruhi oleh magnet dan tidak dapat dibuat menjadi magnet, disebut sebagai bahan nonmagnetik. Contoh dari bahan nonmagnetik adalah kayu, kertas karet, dan plastik. Sifat magnet dapat hilang ketika magnet dibakar. Hal ini disebabkan pemanasan magnet menyebabkan gerakan partikel-partikel magnet menjadi acak. Sifat magnet juga akan hilang ketika magnet dipukul-pukul. Akibat getaran yang lebih cepat, maka kedudukan partikel-partikel menjadi tidak teratur sehingga sifat kemagnetan akan hilang (Adinsyah, 2021).

Keberadaan konfigurasi spin-tinggi dan spin-rendah menyebabkan sifat magnetik pada berbagai senyawa koordinasi. Zat dapat digolongkan menjadi paramagnetik atau diamagnetik berdasarkan apakah zat tersebut ditarik ke dalam medan magnet atau tidak. Zat yang ditolak oleh medan magnetik nonuniform bobotnya lebih sedikit dan disebut sebagai diamagnetik. Sedangkan, zat yang ditarik oleh medan magnetik bobotnya lebih tinggi dan disebut sebagai paramagnetik. Pertimbangan ini memberikan nilai numerik untuk kerentanan magnetik atau suseptibilitas magnetik suatu zat, kecenderungannya untuk berinteraksi dengan medan magnetik. Kerentanan suatu diamagnetik adalah negatif dan kecil, sementara paramagnetik positif dan cukup besar. Paramagnetisme dikaitkan dengan atom, ion, atau molekul yang mengandung satu atau lebih elektron dengan spin yang tidak berpasangan. Zat diamagnetik mempunyai spin dengan seluruh elektronnya berpasangan (Oxtoby *et al.*, 2003).

Sifat magnetik juga terdiri dari antiferomagnetisme, feromagnetisme, dan superparamagnetisme. Antiferomagnetisme merupakan bahan yang momen magnetik antar atomnya tersusun berlawanan arah (antiparalel) dan besarnya sama sehingga saling meniadakan dan tidak menghasilkan magnetisasi total. Contoh bahan seperti ini adalah troilit FeS dan ilmenit FeTiO₂. Ketika suhu naik melewati suhu Néel (suhu batas antiferomagnetik), energi panas cukup besar untuk mengacaukan susunan momen-momen magnetik tersebut. Akibatnya, bahan kehilangan keteraturan magnetiknya dan berperilaku seperti bahan paramagnetik, yaitu semua momen magnetiknya menjadi acak. Feromagnetisme terjadi pada bahan-bahan yang susunan momen magnetik atom atau ionnya berlawanan arah

(antiparalel) tetapi tidak seimbang, sehingga masih menghasilkan magnetisasi total. Ferimagnetisme terjadi tanpa perlu adanya medan magnet luar selama suhunya berada di bawah suhu Néel. Magnetisasi bersih yang dihasilkan biasanya cukup besar karena ada perbedaan kekuatan antara dua arah yang berlawanan. Magnetisasi saturasinya lebih tinggi dibandingkan dengan bahan feromagnetik. Contoh bahan ferimagnetik ialah ferrite (misalnya Fe_3O_4) di mana kation (logam) dan anion (oksigen) tersusun dalam pola khusus di dalam struktur kristalnya. Sedangkan superparamagnetisme muncul ketika bahan magnetik dibuat dalam ukuran sangat kecil (nanopartikel), sehingga hanya terdiri dari satu domain magnetik saja. Dalam kondisi seperti ini, momen magnetiknya dapat dengan mudah berubah arah karena pengaruh panas atau medan luar. Berkebalikan dengan paramagnetisme yang terjadi saat momen magnetik pada atom dapat mudah bergerak mengikuti medan magnet luar atau energi panas, sehingga tidak ada keteraturan tetap dan magnetisasinya hanya muncul sementara saat diberi medan magnet (Mullick *et al.*, 2021).

Karakteristik dalam setiap tipe magnetisme berbeda-beda seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 Klasifikasi Sifat Magnetik Berdasarkan Perilaku Atom (Özgür *et al.*, 2009)

2.7 Hipertermia Magnetik

Hipertermia magnetik berpotensi menjadi aplikasi biomedis nanopartikel magnetik yang paling signifikan dan mengganggu secara teknis yang saat ini diketahui. Perkembangan terkini menunjukkan pemanasan jarak jauh yang sangat spesifik dan dapat ditargetkan pada jaringan tubuh dapat merevolusi praktik klinis dalam pengobatan kanker, baik sebagai tambahan untuk radioterapi atau kemoterapi maupun sebagai intervensi yang berdiri sendiri. Hipertermia magnetik mulanya dikenalkan dan diuji oleh Gilchrist pada tahun 1957 sebagai sarana untuk memanaskan kelenjar getah bening pada anjing (Ortega dan Pankhurst, 2013).

Hipertermia magnetik adalah pengobatan non-invasif yang menghancurkan sel kanker dengan memanaskan jaringan ganas yang diresapi ferrofluida dengan medan magnet AC pada saat yang sama yang menyebabkan kerusakan minimal pada jaringan sehat di sekitarnya (Kappiyoor *et al.*, 2010). Terapi jenis ini berasal dari pengamatan beberapa pasien dengan demam tinggi yang menyebabkan pengurangan atau penghancuran sel kanker. Hipertermia akan merusak, membunuh, dan membuat sel kanker sangat sensitif terhadap efek radiasi dan beberapa obat antikanker tertentu. Kebutuhan distribusi panas yang homogen dan kedalaman suhu terapeutik ($\sim 45^{\circ}\text{C}$) adalah yang utama dalam hipertermia (Hedayatnasab *et al.*, 2017; Laurent *et al.*, 2011).

Dalam hal ini, proses termal berdasarkan nanopartikel magnetik adalah kandidat yang baik untuk memecahkan masalah yang disebutkan. Kuantitas panas yang diinduksi oleh nanopartikel magnetik akan dihitung dalam kondisi kehilangan daya spesifik yang juga bergantung pada beberapa sifat fisik dan magnetik nanopartikel termasuk distribusi ukuran partikel, ukuran, serta anisotropi magnetokristalin (K) sebagai tambahan dari beberapa faktor ekstrinsik termasuk frekuensi (f) dan amplitudo medan magnet yang diterapkan secara eksternal. Nanopartikel ferrite memiliki sifat yang diperlukan karena metode sintesisnya, toksisitas rendah, serta stabilitas fisik dan kimia sesuai sebagai agen hipertermia (Sharifi *et al.*, 2012). Pada aplikasi hipertermia, rentang medan magnet rendah, sehingga *maghemite* dan *copper-ferrite* adalah bahan yang menjanjikan. Sedangkan pada amplitudo medan

tinggi, *cobalt-ferrite* adalah agen hipertermia magnetik terbaik (Sharma *et al.*, 2021).

Hipertermia tradisional mengalami tantangan saat ini meliputi pembangkitan panas yang seragam di area yang diinginkan dan meminimalkan pemanasan jaringan di sekitarnya, pengembangan metode untuk kontrol suhu yang tepat selama pengobatan, dan pemanasan yang cukup pada jaringan target. Sebagai solusi, nanoteknologi dapat dimanfaatkan, hal ini dikarenakan bahan nano mampu mengubah energi yang diserap dari sumber eksternal menjadi panas. Dalam dua dekade terakhir, nanoteknologi telah berkembang pesat dan memungkinkan nanomaterial melakukan perkembangan baru dalam nano medis dan nano bioteknologi. Nanomaterial dapat direkayasa untuk bertindak sebagai sarana penghantar obat, mengakomodasi fungsi penargetan, diagnostik, dan terapeutik dalam satu *platform* yang multifungsi (Fratila dan Fuente, 2019).

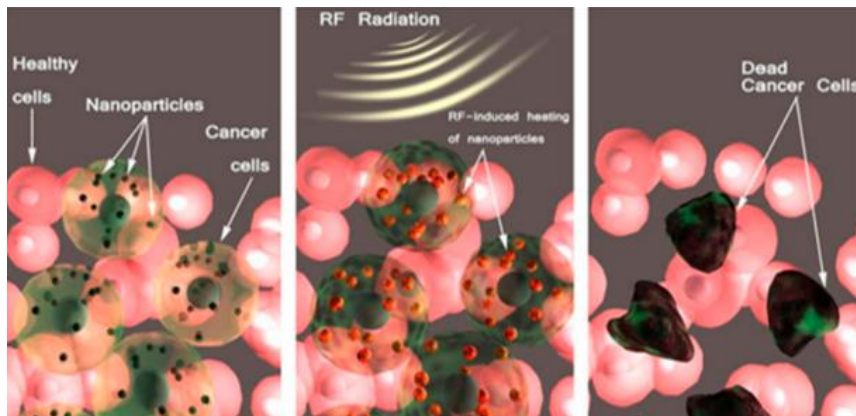
Bahan magnetik telah banyak digunakan untuk hipertermia karena didasari pada prinsip bahwa proses magnetisasi menentukan rugi-rugi magnet. Kerugian ini bergantung dengan konduktivitas termal dan kapasitas panas media di sekitarnya, dapat hilang dalam bentuk panas yang menaikkan suhu lingkungan di sekitarnya. Kerugiannya yang ditentukan oleh sifat intrinsik dan ekstrinsik serta ukuran partikel bermacam-macam jenis, yaitu kerugian histerisis, kerugian arus eddy untuk butiran yang lebih besar, dan kerugian relaksasi untuk partikel superparamagnetik (relaksasi Néel), serta kerugian gesekan partikel (gerakan Brown) telah banyak dieksploitasi untuk penerapan hipertermia (Bahadur dan Giri, 2003).

Hipertermia magnetik telah digunakan untuk mengobati berbagai jenis kanker. Selain hipertermia magnetik, energi panas dihasilkan oleh nanopartikel magnetik yang disuntikkan ke daerah kanker atau tumor di tubuh dan dipengaruhi oleh medan magnet bolak-balik atau *Alternating Magnetic Field* (AMF). Untuk membunuh sel-sel ganas di dalam tubuh, harus dilakukan secara selektif tanpa merusak sel-sel sehat di sekitarnya. Suhu umumnya dinaikkan hingga berkisar antara 42°C hingga 48°C untuk jangka waktu yang cukup, biasanya 30 hingga 60 menit. Pendekatan ini

menawarkan potensi yang menjanjikan dalam meminimalkan efek nonselektif dari pengobatan konvensional (Darmawan *et al.*, 2023).

Berdasarkan penelitian sebelumnya yaitu menggunakan nanokomposit berbasis nanopartikel *graphene oxide*-Fe₃O₄ yang banyak diselidiki dalam pengaplikasiannya di bidang biomedis seperti penghantaran obat, hipertermia magnetik, dan agen kontras *Magnetic Resonance Imaging* (MRI) menunjukkan bahwa kehadiran gugus fungsi -OH, -COOH, dan -CHO memudahkan perlekatan dan pelepasan berbagai obat antikanker (Obaidat *et al.*, 2019). Selain itu penelitian yang dilakukan oleh Ibrahim dan Elbeshir, (2018) menunjukkan bahwa nanopartikel magnetik CoFe₂O₄ yang disintesis dengan metode *co-precipitation* setelah perlakuan pada suhu 100°C yang memiliki ukuran sekitar 13 nm dengan magnetisasi saturasi sebesar 48 emu/g, magnetisasi remanensi sebesar 10,8 emu/g, serta medan koersivitas sebesar 240 Oe, dan nilai SAR sebesar 224 W/g merupakan sampel yang layak digunakan untuk aplikasi hipertermia magnetik.

Hipertermia magnetik bertujuan memberikan terapi lokal yang sesungguhnya, yaitu hanya wilayah yang mengandung partikel magnetik yang akan diberikan perlakuan. Melihat area tindakannya yang kecil, termioablasasi pada suhu yang cukup tinggi dalam kondisi yang terkontrol ketat menjadi layak untuk mengobati beberapa jenis kanker. Hal ini karena efek samping yang terkait seharusnya berkurang secara signifikan. Kemajuan pada partikel magnetik terkonjugasi untuk ditargetkan ke sel kanker akan menyelamatkan jaringan sehat sambil menghancurkan sel ganas. Terdapat tiga tingkatan panjang gelombang yang terlibat dalam mekanisme perpindahan panas AC hipertermia, yaitu skala nano yang ditentukan oleh ukuran partikel magnetik (5±10 nm), skala mikro yang ditentukan oleh ukuran sel (5±20 µm), dan skala makro yang ditentukan oleh ukuran jaringan target (biasanya hingga 20 mm). Di sisi lain, tergantung pada pilihan bahan magnetik, tetapi tidak harus pada panjang gelombangnya, panas dapat dihasilkan berdasarkan mekanisme yang terjadi karena *eddy currents* atau arus eddy (sisi), pemanasan magnetik akibat *hysteresis loss* (partikel multi-domain), dan pemanasan magnetik karena proses relaksasi Néel dan Brown (nanopartikel) (Ortega dan Pankhurst, 2013). Mekanisme hipertermia menggunakan nanopartikel magnetik dapat diamati pada **Gambar 2.6**.



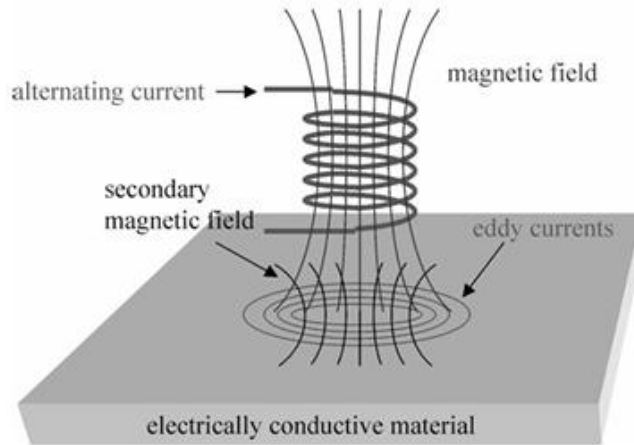
Gambar 2.6 Mekanisme Hipertermia Magnetik (Fatima *et al.*, 2021)

Untuk hipertermia magnetik yang efisien, nanoferrite harus bersifat superparamagnetik dengan momen magnetik tinggi, SAR tinggi, dan biokompatibel. Nanopartikel *cobalt ferrite* digunakan dalam banyak aplikasi biomedis karena sifat-sifatnya yang unik seperti anisotropi magnetokristalin yang besar, suhu Curie yang tinggi, koefisien magnetostriksi yang besar, tidak beracun, dan stabilitas kimia yang baik, sehingga dapat menjadi agen hipertermia yang baik. Selain itu, kecenderungan nanopartikel *cobalt ferrite* adalah membentuk rantai yang tumbuh pada penerapan medan magnet bolak-balik. Anisotropi magnetik memfasilitasi struktur seperti rantai ini. Pembentukan rantai ini bersama dengan toksisitas kobalt intrinsik dan hipertermia ringan menyebabkan regresi tumor lengkap dan menghasilkan peningkatan kelangsungan hidup (Bhargava *et al.*, 2021).

2.7.1 Eddy Currents/Arus Eddy

Berdasarkan hukum induksi elektromagnetik Faraday-Lenz, ketika medan AC menembus sampel konduktor, medan magnet fluks yang bervariasi terhadap waktu akan menyebabkan evolusi arus eddy yang berlawanan dengan medan yang diberikan. Hal ini menghasilkan pelemahan medan yang akan bergantung pada frekuensi medan, konduktivitas listrik material, dan permeabilitasnya. Arus eddy tidak eksklusif untuk material magnetik, terjadi pula pada jaringan, namun konduktivitas listrik spesifik yang rendah dari yang terakhir ($0,6 (\Omega\text{m})^{-1}$, sekitar delapan orde besaran lebih kecil daripada logam) menghasilkan efek pemanasan yang sangat jauh dari dosis terapeutik praktis. Kontribusi dari arus eddy pada

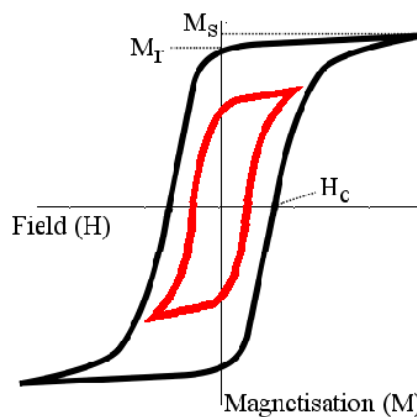
partikel kecil diasumsikan agak kecil karena daya pemanasan berkurang dengan berkurangnya ukuran partikel (Andrä dan Nowak, 2007; Ramprasad *et al.*, 2004). Prinsip pengujian dari arus eddy dapat diamati pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2.7 Prinsip Pengujian Arus Eddy (Pohl *et al.*, 2004)

2.7.2 Hysteresis Loss/Kerugian Histeresis

Struktur magnetik bahan feromagnetik terbagi secara spontan menjadi domain, yaitu daerah yang mengelompokkan momen magnetiknya dengan orientasi yang sama. Ketika bahan tersebut mengalami siklus medan magnet positif dan negatif, magnetisasi menunjukkan perilaku non-linier, yang dijelaskan oleh representasi tunggal loop histeresis seperti pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2.8 Loop Histeresis (Ortega, 2012)

Tiga parameter utama yang ditunjukkan pada **Gambar 2.8** ialah magnetisasi saturasi (M_s) yang merupakan nilai batas kecenderungan kurva dalam wilayah

medan tinggi dan tercapai ketika seluruh momen magnetik dalam material selaras dengan medan eksternal, magnetisasi remanensi (M_r) yang merupakan magnetisasi yang tertahan di medan nol dari keadaan jenuh, serta medan koersivitas (H_c) yaitu medan yang dibutuhkan untuk menghilangkan magnet pada sampel secara menyeluruh. Selama loop histeresis, terdapat dua proses yang menyebabkan kerugian histeresis, yaitu perpindahan dinding domain yang dijepit dan dilepaskan pada ketidakhomogenan dalam material yang diteliti dan adanya proses rotasi momen magnetik di dalam domain. Energi yang terkait dengan proses pembentukan domain meningkat seiring dengan penurunan skala panjang, sehingga jika ukuran material seperti feromagnetik dikurangi di bawah nilai kritis, pembentukan domain tidak lagi menguntungkan secara energetik. Dalam kondisi ini, struktur magnetik seluruh material menjadi domain tunggal. Dalam kasus partikel domain tunggal, kerugian histeresis lebih tinggi daripada kerugian lainnya (Hergt *et al.*, 1998).

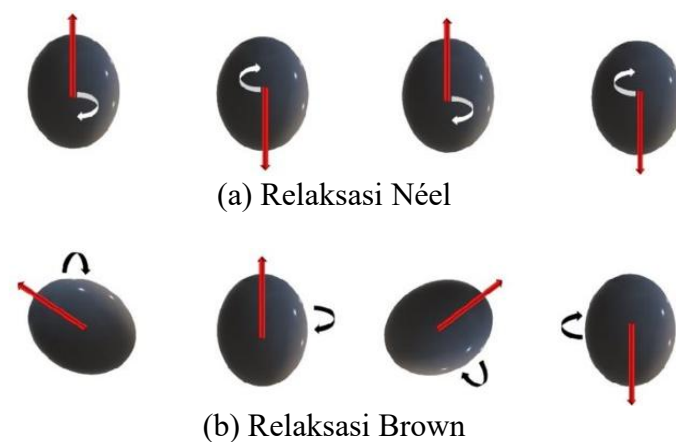
2.7.3 Néel and Brownian Relaxation/Relaksasi Néel dan Brown

Dalam model Néel-Brown mengenai pembalikan magnetisasi yang diaktifkan secara termal, partikel domain tunggal magnetik memiliki dua keadaan dasar ekuivalen dengan magnetisasi berlawanan yang dipisahkan oleh penghalang energi yang disebabkan oleh bentuk dan anisotropi kristal. Sistem dapat keluar dari satu keadaan ke keadaan lain melalui aktivitas termal melalui penghalang. Néel mengasumsikan bahwa penghalang energi antara dua keadaan kesetimbangan besar dibandingkan dengan energi termal $k_B T$, yang membenarkan perkiraan orientasi diskrit. Brown mengkritik model Néel karena sistem tidak secara eksplisit diperlakukan sebagai sistem giromagnetik. Brown menganggap vektor magnetisasi dalam partikel bergoyang-goyang di sekitar energi minimum, lalu lompat ke sekitar energi minimum lainnya, lalu digoyangkan di sana sebelum melompat lagi (Wernsdorfer, 2005).

Relaksasi magnetisasi yaitu reaksi magnetisasi terhadap perubahan kekuatan dan arah medan yang merupakan karakteristik penting untuk fluida magnetik. Prinsipnya, relaksasi magnetisasi dapat terjadi melalui dua proses yang berbeda. Di

satu sisi momen magnetik partikel dapat berelaksasi ke arah medan magnet melalui rotasi seluruh partikel dengan momen magnetik yang tetap relatif terhadap partikel. Di sisi lain relaksasi juga dapat terjadi melalui rotasi momen magnetik relatif terhadap struktur kristal partikel tanpa rotasi partikel itu sendiri. Kedua proses tersebut dicirikan oleh waktu relaksasi khas yang menggambarkan seberapa cepat relaksasi masing-masing mengarah pada reaksi magnetisasi pada perubahan arah medan. Untuk rotasi seluruh partikel dalam cairan pembawa disebut relaksasi Brown (Brown, 1963). Proses kedua disebut relaksasi Néel yang dicirikan oleh hambatan energi yang harus diatasi momen magnetik untuk membalik relatif terhadap struktur kristal. Proses relaksasi dengan waktu relaksasi yang lebih kecil akan menentukan perilaku relaksasi magnetik fluida. Maka untuk partikel kecil relaksasi akan terjadi melalui proses Néel (Néel, 1949).

Proses relaksasi dalam nanopartikel magnetik dapat diamati seperti pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2.9 Proses Relaksasi dalam Nanopartikel Magnetik (Moya dan Bruylants, 2021)

2.8 *Specific Absorption Rate (SAR)*

Untuk radiasi non-pengion, standar paparan didasarkan pada pengukuran yang disebut *Specific Absorption Rate (SAR)*. *Specific Absorption Rate* didefinisikan oleh Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) sebagai turunan waktu dari energi tambahan (dW) yang diserap atau dihamburkan oleh massa tambahan (dm)

yang terkandung dalam elemen volume (d) dengan kepadatan tertentu. *Specific Absorption Rate* juga didefinisikan oleh American National Standards Institute (ANSI) yaitu SAR adalah laju waktu di mana energi elektromagnetik frekuensi radio diberikan kepada suatu unsur atau massa suatu benda biologi. SAR dinyatakan sebagai aliran energi atau daya per satuan massa dalam satuan W/kg. Apabila mengacu pada jaringan manusia, maka SAR berarti adalah pengukuran panas yang diserap oleh jaringan manusia (Duffus *et al.*, 2009).

Bahan magnetik yang dibangun menghadirkan beberapa domain magnetik di masing-masing domain, momen magnet individu memiliki orientasi tertentu. Ketika ukuran material mengecil, jumlah domain magnetik akan berkurang. Kapasitas pemanasan adalah parameter mendasar dalam hipertermia magnetik dan biasanya dinyatakan sebagai laju penyerapan spesifik atau *Specific Absorption Rate* (SAR), beberapa literatur lain menuliskan *Specific Loss Power* (SLP), *Specific Power Absorption* (SPA), atau *Specific Heating Power* (SHP). Hal ini didefinisikan sebagai daya pemanasan (P) yang dihasilkan per satuan massa atau dinyatakan dalam **Persamaan (2.2)**.

$$SAR = \frac{P}{m} = C \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right) \left(\frac{1}{m} \right) \dots \dots \dots (2.2)$$

Di mana m ialah konsentrasi massa, C ialah kapasitas panas spesifik, dan $\left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right)$ ialah kenaikan suhu seiring waktu (Fratila dan Fuente, 2019).

Jumlah energi yang diserap selama paparan radiasi elektromagnetik biasanya diperkirakan melalui tingkat penyerapan spesifik seluruh tubuh didefinisikan juga sebagai **Persamaan (2.3)**.

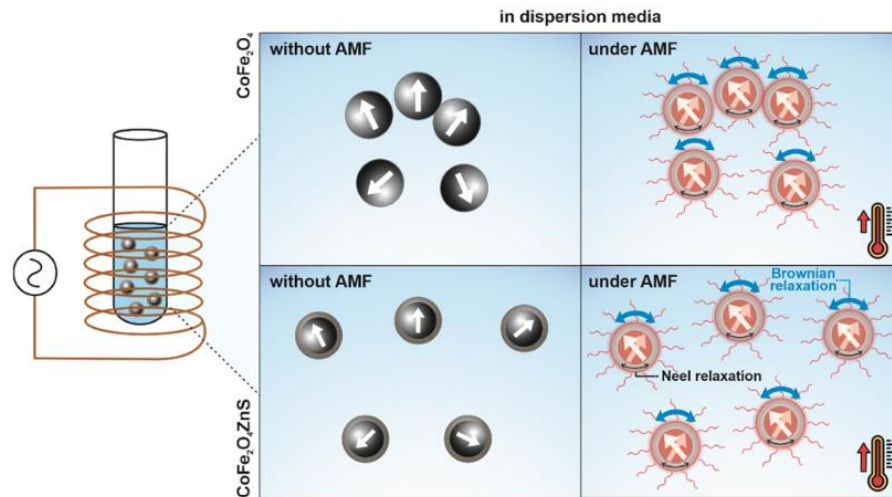
$$SAR = (\Delta T \cdot c) \cdot t^{-1} \dots \dots \dots (2.3)$$

Di mana ΔT adalah kenaikan suhu, c adalah panas spesifik, dan t adalah waktu periode pengambilan sampel (Mason *et al.*, 2000).

Nanopartikel dengan laju penerapan spesifik atau *Specific Absorption Rate* (SAR) yang tinggi merupakan kandidat terbaik dalam hipertemia magnetik. Laju

penerapan spesifik atau SAR adalah jumlah panas yang dihasilkan per satuan massa bahan magnetik di bawah medan magnet frekuensi radio. Untuk meminimalkan dosis agen hipertermia, diperlukan SAR yang tinggi. Salah satu bentuk hipertermia magnetik yang paling canggih adalah hipertermia yang dikendalikan sendiri di mana kisaran suhu Curie berada di antara 315 dan 320 K (Prasad *et al.*, 2007; Natividad *et al.*, 2012). Sel kanker dapat dihancurkan secara efektif pada kisaran suhu Curie ini dengan kerusakan nominal pada sel yang sehat. Dengan mempertahankan suhu Curie dari bahan magnetik, bahan tersebut dapat digunakan sebagai agen pemanas yang dikendalikan sendiri dalam kisaran suhu yang diantisipasi untuk menghindari segala jenis proses pemanasan. Jenis bahan magnetik tersebut memberikan lebih sedikit pemanasan dalam keadaan paramagnetik, sementara lebih banyak pemanasan dalam keadaan feromagnetik. Oleh sebab itu, suhu Curie mempertahankan arus konstan di area target tumor (Sharma dan Javed, 2020).

Mekanisme pemanasan dalam uji SAR oleh nanopartikel CoFe_2O_4 dan nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ ditunjukkan pada **Gambar 2.10**.



Gambar 2.10 Mekanisme Pemanasan dalam Uji SAR (Larasati *et al.*, 2023)

2.9 Metode Sintesis dan Uji

2.9.1 *Co-Precipitation*/Kopresipitasi

Nanopartikel dapat disintesis dengan berbagai metode seperti yang dijelaskan pada **Tabel 2.1**, akan tetapi metode-metode tersebut masih memiliki banyak kekurangan.

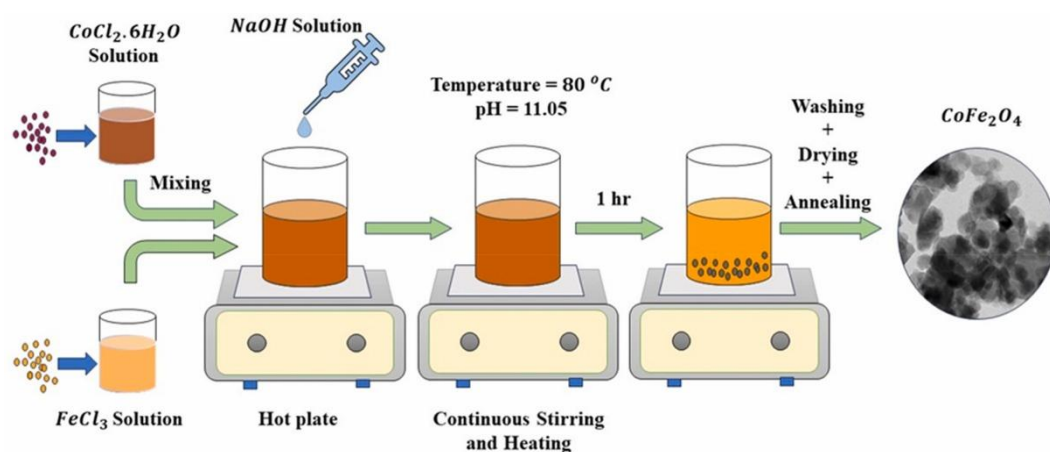
Hal ini mendorong adanya perkembangan metode lain yang lebih baik, salah satunya metode *co-precipitation* atau kopresipitasi. Metode kopresipitasi dikatakan sebagai cara yang cepat, sederhana, mudah, aman atau lebih ramah lingkungan, serta menawarkan keunggulan lainnya seperti ukuran kristal yang terkontrol, kecerahan tinggi, dan tidak ada aglomerasi partikel (Kazemi *et al.*, 2018). Metode ini tidak memerlukan peralatan untuk membentuk atmosfer nitrogen dan atmosfer argon untuk proses reaksi karena berlangsung di udara dengan suhu rendah dan reaktan memiliki volatilitas rendah serta kurang toksik apabila dibandingkan dengan reaktan yang digunakan pada metode lainnya. Selain itu, metode ini adalah metode sintesis yang paling banyak digunakan di bidang medis sebagai obat yang berukuran nano karena menghasilkan bahan magnetik yang lebih baik untuk penggunaan yang aman dalam pengobatan skala nano (Ahmad dan Zhou, 2017).

Dalam proses kimia basah kopresipitasi digunakan strategi pemindahan pelarut. Beberapa pelarut yang digunakan yaitu aseton, heksana, ethanol, dan polimer yang bersifat non-pelarut. Baik polimer alami maupun sintesis dapat dimanfaatkan sebagai komponen. Ketika campuran polimer digabungkan, sistem polimer-pelarut akan berdifusi secara cepat ke dalam medium non-pelarut polimer. Adanya tegangan antarmuka antara kedua fase kemudian akan memicu terbentuknya struktur berskala nano (Das dan Srivasatava, 2016).

Oleh karena terdapat banyak keuntungan, antara lain proses tidak terlalu lama, hemat biaya, mudah, dan dapat diandalkan, metode kopresipitasi menjadi sering digunakan untuk sintesis ferrite. Metode ini menghasilkan bubuk homogen dengan hasil tertinggi tanpa menggunakan bahan bakar organik seperti asam sitrat. Pada sebagian besar percobaan dilakukan dalam media alkali, untuk melindungi nanopartikel dari oksidasi dan penggumpalan dalam oksigen, nanopartikel biasanya dilapisi dengan surfaktan seperti natrium dodecyl sulfat (NaDS) atau asam oleat dan didispersikan dalam cairan pembawa seperti ethanol, methanol, amonia, atau cairan lainnya berdasarkan sifat bahan. Untuk membuat nanopartikel ferrite berkualitas tinggi, teknik sintesis perlu penyesuaian dan pH yang tepat. pH larutan biasanya disesuaikan menggunakan larutan amonium atau natrium hidroksida. Larutan akan diaduk dengan kuat tanpa adanya panas dalam kondisi inert. Laju

produksi nanopartikel ferrite yang tinggi menjadi keuntungannya, akan tetapi kelemahannya adalah kristalinitasnya rendah. Beberapa nanopartikel ferrite yang banyak diteliti di antaranya BiFeO_3 , CoFe_2O_4 , dan ZnFe_2O_4 (Mullick *et al.*, 2021).

Dalam metode *co-precipitation*, kation logam dibutuhkan sebagai garam yang larut (misalnya nitrat), diko-presipitasi dari media yang sama, biasanya sebagai hidroksida, karbonat, oksalat, atau sitrat. Oksida atau karbonat dapat diambil dari logam yang relevan, mencernanya dengan asam (biasanya asam nitrat), dan ke dalam larutan yang diperoleh, reagen pengendapan diberikan. Endapan akan dikeringkan dan dipanaskan hingga suhu yang dibutuhkan dalam atmosfer yang diinginkan untuk memperoleh produk akhir (Rao *et al.*, 1993). Salah satu skema penelitian dengan metode *co-precipitation* nanopartikel CoFe_2O_4 yang dilakukan oleh Roy *et al.*, (2024) ditunjukkan pada **Gambar 2.11**.



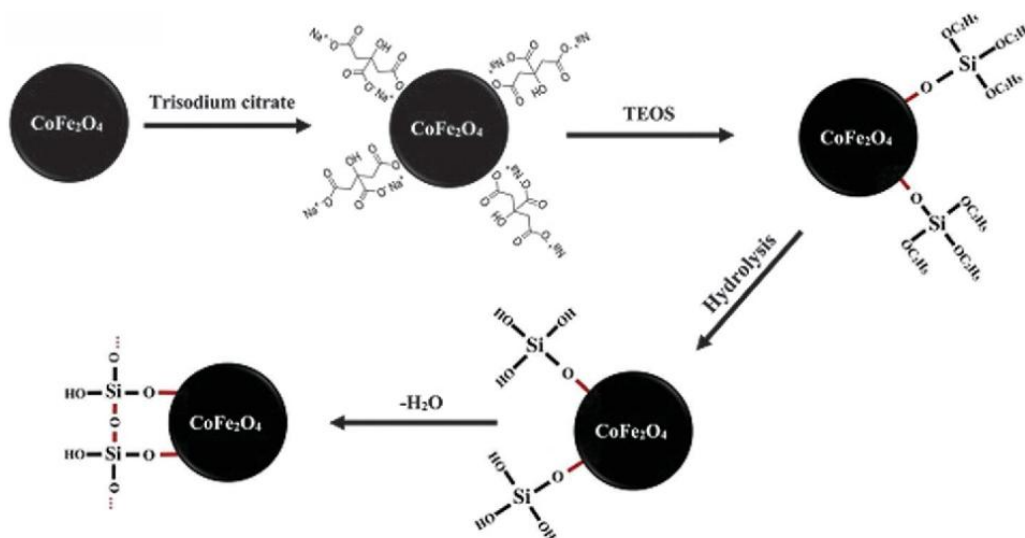
Gambar 2.11 Skema Metode *Co-Precipitation* CoFe_2O_4

2.9.2 Stöber

Metode Stöber mengacu pada modifikasi permukaan nanopartikel dengan cangkang silika. Sejak penemuannya, metode ini telah dimodifikasi dan ditingkatkan untuk digunakan pada berbagai nanopartikel dengan komposisi, ukuran, bentuk, dan kimia permukaan yang berbeda. Terdapat beberapa keuntungan menggunakan metode Stöber, yaitu sintesis dapat dilakukan dalam pelarut dengan berbagai tingkat hidrofilisitas dan hidrofobisitas. Bahan primer atau agen pendahulu dapat dimasukkan jika perlu untuk mengaktifkan permukaan

nanopartikel untuk sifat hidrofobik pelarut yang tinggi. Selain itu, pembentukan cangkang silika tidak hanya dapat mencegah nanopartikel dari koalesensi, tetapi juga menghasilkan permukaan fungsional untuk modifikasi lebih lanjut. Pelapisan silika dapat meningkatkan biokompabilitas nanopartikel karena toksisitasnya rendah (Liz-Marzán *et al.*, 1996).

Metode Stöber dilakukan untuk sintesis nanopartikel silika bulat dan monodisperse dengan ukuran mulai dari 5 hingga 2000 nm, yang disiapkan dari larutan alkohol silika alkoksida dengan adanya ammonia (sebagai katalis dan dalam kondisi basa). Namun beberapa varian metode Stöber telah diusulkan di masa lalu. Keuntungan utama dari metode Stöber adalah kemampuannya untuk mensintesis nanopartikel silika bulat monodisperse secara langsung, dibandingkan dengan prosedur multistep yang dikatalis asam, yang biasanya menghasilkan pembentukan struktur gel. Alkohol digunakan sebagai pelarut dalam hal ini (Stöber *et al.*, 1968). Contoh skema dari metode Stöber dalam pembentukan nanopartikel magnetik seperti pada **Gambar 2.12**.

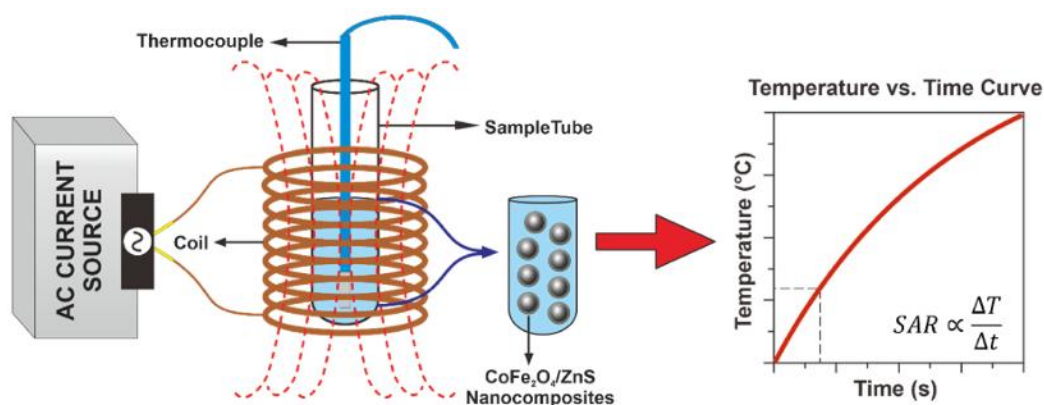


Gambar 2.12 Skema Prosedur Metode Stöber CoFe₂O₄ (Zarandi *et al.*, 2015)

2.9.3 Kalorimetri

Kalorimetri ialah suatu teknik eksperimen atau penelitian yang digunakan untuk mengukur jumlah kalor yang terlibat dalam suatu perubahan kimia atau fisika. Alat

yang digunakan dinamakan kalorimeter. Kalorimeter cukup akurat untuk reaksi larutan sederhana seperti netralisasi asam-basa atau pelarutan garam. Kalorimetri didasarkan pada prinsip perpindahan energi panas. Umumnya kalorimetri larutan atau pembakaran dilakukan dengan langkah yaitu menyiapkan kalorimeter dengan volume air terukur, mengukur suhu awal larutan, menambahkan reaktan dan mencatat suhu akhir, lalu setelahnya menentukan besar kalor yang dilepaskan atau diserap. Kalor dari reaksi atau perubahan fisika menyebabkan perubahan suhu (Keenan *et al.*, 1993; Petrucci *et al.*, 2017). Proses pemanasan kalorimetri pada nanopartikel komposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ ditunjukkan pada **Gambar 2.13**.

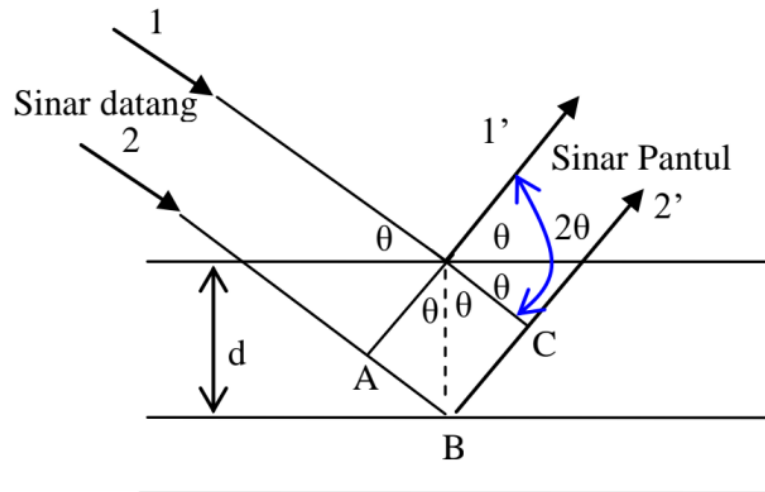


Gambar 2.13 Metode Kalorimetri $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ (Larasati *et al.*, 2023)

2.10 X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) merupakan salah satu alat terpenting untuk analisis kualitatif bahan. Difraktometer sinar-X biasanya memanfaatkan sampel serbuk, goniometer, dan detektor posisi tetap untuk mengukur pola difraksi bahan serbuk yang tidak diketahui. Sampel bubuk digunakan untuk menyediakan hampir seluruh kemungkinan orientasi kisi kristal, goniometer menyediakan berbagai sudut datang, dan detektor berfungsi mengukur intensitas sinar yang terdifraksi. Saat kristal dibombardir dengan sinar-X menggunakan panjang gelombang tetap dan pada sudut datang tertentu, sinar-X pantul yang kuat yang dihasilkan ketika panjang gelombang sinar-X akan terhambur saling berinterferensi secara konstruktif. Agar gelombang saling berinterferensi secara konstruktif, perbedaan lintas perjalanan harus sama dengan kelipatan integral panjang gelombang. Saat interferensi konstruktif terjadi, sinar-X yang terdifraksi akan meninggalkan kristal pada sudut

yang sama dengan sudut sinar datang (Kaelble, 1967; Bacon, 1966). Peristiwa difraksi sinar-X ditunjukkan pada **Gambar 2.14**.



Gambar 2.14 Difraksi Sinar-X

Difraksi sinar-X adalah suatu gejala hamburan sinar yang melibatkan sejumlah besar atom-atom yang tersusun secara periodik dan teratur pada suatu kisi sehingga hamburan yang dihasilkan atom-atom tersebut memiliki fasa tertentu yang berhubungan dengan atom-atom pada kisi tersebut. Hanya sebagian kecil hamburan yang terjadi secara konstruktif dan berkas difraksi sinar-X terbentuk. Saat berkas sinar-X berinteraksi dengan suatu material, terdapat tiga peristiwa yang mungkin terjadi, yaitu sinar-X diserap, dihamburkan, atau dipancarkan kembali dengan energi yang lebih kecil. Bragg menjelaskan bahwa interferensi konstruktif antara sinar-sinar pantul terjadi jika perbedaan lintasan sinar-X terpantul yang sefase merupakan kelipatan bulat dari panjang gelombang (λ). Selisih lintasan dua sinar datang yang terdifraksi (Δ) pada bidang-bidang kristal merupakan kelipatan bulat dari panjang gelombang yang dinyatakan dalam **Persamaan (2.4)** dan **Persamaan (2.5)**.

$$\Delta = AB + BC = d \sin \theta + d \sin \theta = 2 d \sin \theta \dots\dots\dots(2.4)$$

$$\Delta = n\lambda \dots\dots\dots(2.5)$$

Setiap bidang rotasi atom dalam kristal akan mengalami refleksi pada satu sudut (untuk sinar-X dengan panjang gelombang tetap). Hubungan umum antara panjang

gelombang sinar-X yang datang, sudut datang, dan jarak antara bidang kisi kristal atom dikenal sebagai hukum Bragg seperti yang dinyatakan pada **Persamaan (2.6)**.

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \dots\dots\dots(2.6)$$

Adapun $n = 1, 2, 3, \dots$ adalah order difraksi, λ adalah panjang gelombang, d adalah jarak antar bidang kristal, dan θ adalah sudut difraksi. Intensitas sinar-X pantul menurun seiring dengan meningkatnya nilai n atau sudut difraksi (θ). Sudut difraksi maksimum ialah 90° untuk memastikan bahwa kondisi Bragg terpenuhi.

Berdasarkan hukum Bragg yang dinyatakan dalam **Persamaan (2.6)**, jarak antar bidang kristal (d) dapat dinyatakan sebagai **Persamaan (2.7)**.

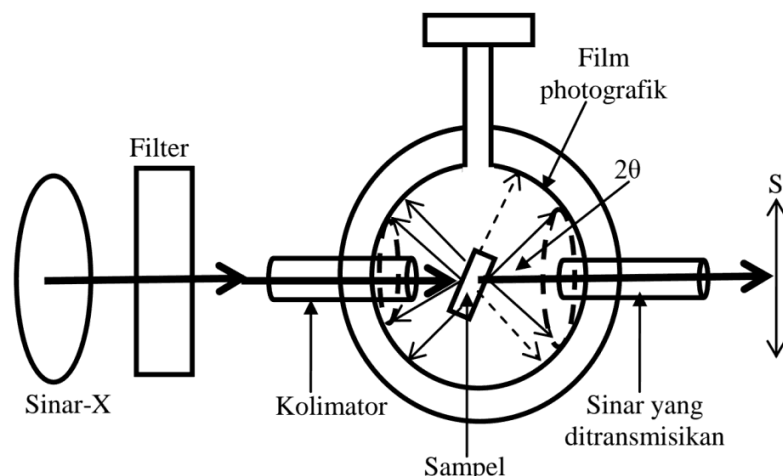
$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} \dots\dots\dots(2.7)$$

Untuk bentuk kubus, jarak antar bidang sebagai fungsi dari indeks miller (hkl) dan parameter kisi kristal (a) dinyatakan pada **Persamaan (2.8)**. Ralat pada parameter kisi partikel dapat dinyatakan dengan **Persamaan (2.9)**.

$$a = d \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\Delta a = \frac{a \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{\sin \theta} \cos \theta \cdot \Delta \theta \dots\dots\dots(2.9)$$

Terdapat tiga metode dasar dalam difraksi sinar-X, yaitu metode serbuk kristal, metode kristal berputar, dan metode laue untuk kristal tunggal. Metode serbuk dikembangkan oleh Debye dan Scherrer yang ditunjukkan pada **Gambar 2.15** (Puri dan Babbar, 2008). Sinar-X melalui penyaring atau filter dan kolimator menembaki sampel atau spesimen. Hasilnya akan direkam berupa grafik antara intensitas sinar-X dengan sudut 2θ . Pada metode ini, sudut difraksi (θ) berubah, sedangkan panjang gelombang dibuat tetap. Sudut antara sinar-X datang dan sinar-X terdifraksi adalah 2θ sehingga setiap himpunan bidang kristal menghasilkan berkas pantulan dengan setengah sudut 2θ (Culity, 1978).



Gambar 2.15 Metode Serbuk

Scherrer mengamati bahwa ukuran kristal yang kecil dari suatu material dapat meningkatkan pelebaran puncak-puncak difraksi sinar-X. Scherrer kemudian mencari hubungan antara ukuran kristal material dengan pelebaran pola-pola difraksi sinar-X yang kemudian disebut Persamaan Scherrer. Untuk menentukan ukuran kristal (L atau t) digunakan perumusan Scherrer seperti pada **Persamaan (2.10)**.

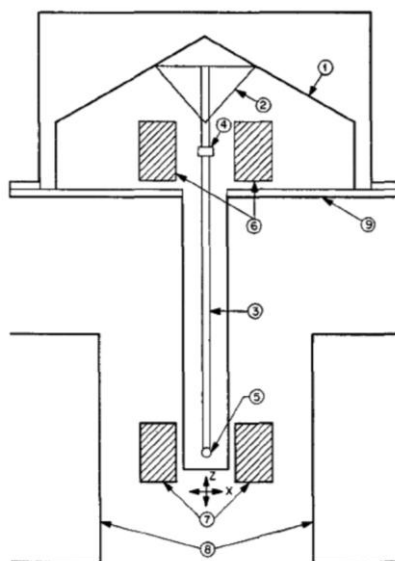
$$t = \frac{k\lambda}{D \cos \theta} \dots \dots \dots (2.10)$$

Di mana D atau *Full Width at Half Maximum (FWHM)* adalah setengah lebar puncak maksimum, k ialah konstanta Scherrer (0,9), dan λ adalah panjang gelombang sinar-X (Sam, 2017; Ngara, 2023).

Sebuah monokromator digunakan untuk memastikan panjang gelombang tertentu mencapai detektor, menghilangkan radiasi fluoresensi. Jejak yang dihasilkan terdiri dari rekaman intensitas terhadap sudut (2θ). Jejak tersebut kemudian digunakan untuk mengidentifikasi fase-fase yang ada dalam sampel. Data difraksi dari banyak bahan telah direkam dalam file *Powder Diffraction File* (file PDF/JCPDS). Dengan membandingkan data yang diamati dengan data dalam PDF, fase-fase dalam sampel dapat diidentifikasi (Cullity dan Stock, 2001).

2.11 Vibrating Sample Magnetometer (VSM)

Vibrating Sample Magnetometer (VSM) merupakan instrumen yang digunakan untuk mengukur berbagai sifat magnetik seperti magnetisasi saturasi, magnetisasi remanensi, dan medan koersivitas bahan magnetik sebagai fungsi medan magnet, suhu, dan waktu. Desain pertama VSM diajukan oleh fisikawan asal Amerika yaitu Simon Foner dan disebut sebagai magnetometer Foner sebagai penghormatannya. Elemen dasar magnetometer Foner ditunjukkan seperti pada **Gambar 2.16** di mana momen magnetik sampel diukur dalam medan magnet yang disapu secara terus-menerus dengan menggunakan elektromagnet. Sampel dipasang diujung batang panjang, terbuat dari bahan yang tidak dapat dimagnetisasi seperti sedotan dengan ujung lainnya dipasang pada mekanisme getar, seperti transduser pengeras suara. Sampel terletak di wilayah antara potongan kutub sejumlah lubang kecil, yang memungkinkan aliran air sebagai pendingin untuk bersirkulasi melalui magnet selama operasi magnet untuk menghilangkan pemanasan Joule resistif yang diciptakan oleh arus yang mengalir besar (Foner, 1959; Burgei *et al.*, 2003).



Gambar 2.16 Elemen Dasar Magnetometer Foner

Instrumen ini menggunakan hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik untuk mengukur momen magnetik absolut dari sampel magnetik. Hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik menyatakan bahwa medan magnet yang berubah akan

menginduksi *electromotive force* (emf) atau gaya gerak listrik (ggl), yang diberikan oleh **Persamaan (2.11)**.

$$\varepsilon = -N \frac{d}{dt} (BA \cos \theta) \dots \dots \dots (2.11)$$

Di mana ε adalah ggl induksi kumparan, N adalah jumlah lilitan kumparan, B adalah medan magnet yang diberikan, A adalah luas kumparan, dan θ adalah sudut antara medan magnet yang diberikan B dan arah normal ke permukaan kumparan.

$\frac{d}{dt}$ menyatakan perubahan fluks magnetik seiring waktu (Saravanan, 2023).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada Juli sampai dengan Desember 2024 di *Research Group of Magnetic Material and Nanostructure*, Laboratorium Fisika Material dan Instrumentasi, Gedung Departemen Fisika Lantai 3, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada yang beralamat di Sekip Utara, Bulaksumur, Caturtunggal, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. *Hotplate magnetic stirrer* digunakan untuk mengaduk dan memanaskan sampel agar terdispersi merata sampai menjadi homogen.
2. Gelas beaker sebagai wadah pembuatan sampel.
3. Pipet tetes digunakan untuk penetes dan penyedotan larutan.
4. Neraca digital digunakan untuk menimbang sampel.
5. *Furnace* digunakan untuk memanaskan *slurry* sehingga terbentuk serbuk nanopartikel.
6. Gelas ukur digunakan untuk menakar volume larutan-larutan yang dipakai.
7. Alat ultrasonikasi digunakan untuk mendispersi nanopartikel.
8. Labu erlenmeyer digunakan untuk menampung hasil filtrasi.
9. Meja magnet digunakan untuk mengendapkan nanopartikel.
10. *Magnetic bar* digunakan untuk menghomogenkan suatu larutan.
11. Pinset/penjepit untuk mengambil *magnetic bar* dari dalam gelas beaker.

12. Termometer digital digunakan untuk mengukur suhu sampel yang sedang dilarutkan.
13. Corong kaca digunakan untuk wadah perantara pada proses filtrasi.
14. Cawan digunakan untuk wadah *slurry* nanopartikel.
15. Kertas pH digunakan untuk mengecek pH larutan.
16. Spatula sebagai alat pengambilan prekursor dan NaOH serta alat bantu selama proses penggerusan sampel setelah dikeringkan.
17. Botol cuci/botol semprot aquades digunakan untuk membantu mengisi aquades dalam volume sedikit.
18. Lemari es digunakan untuk menyimpan larutan yang telah dibuat.
19. Power supply digunakan untuk memberikan tegangan pada saat uji SAR.
20. Multimeter digunakan untuk mengetahui besar arus dan tegangan pada saat uji SAR.
21. *Thermocouple* digunakan untuk mengetahui suhu pada sampel.
22. *Tube* sampel digunakan sebagai wadah sampel pada saat uji SAR.
23. Suntikan/spet/spuit digunakan untuk menyemprotkan aquades ke dalam *tube* sampel.
24. Rak kayu sampel *tube* digunakan sebagai penyangga *tube* sampel saat memasukkan serbuk sampel.

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Serbuk ekstrak daun kelor (Timurasa)
2. Serbuk kobalt (II) klorida heksahidrat ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 98% (Merck, Emsure)
3. Serbuk besi (III) klorida heksahidrat ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 99% (Merck, Emsure)
4. Seng asetat dihidrat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 99% (Merck, Emsure)
5. Natrium hidroksida (NaOH) 99% (Merck, Emsure)
6. Natrium sulfida ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 99% (Merck, Emsure)
7. Ethanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) 98% (Merck, Emsure)
8. Air suling/aquades
9. Kertas saring Whatmann 01
10. Aluminium foil dan plastik *wrap*

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Pembuatan Larutan MO/Larutan Ekstrak Daun Kelor

Langkah pembuatan larutan MO atau larutan ekstrak daun kelor sebagai berikut:

1. Serbuk ekstrak daun kelor ditimbang sebanyak 5 gram.
2. Air suling sebanyak 60 ml dipanaskan pada suhu 60°C menggunakan *hotplate magnetic stirrer*.
3. Serbuk ekstrak daun kelor dilarutkan ke dalam 60 ml air suling dengan kecepatan 600 rpm selama 60 menit pada suhu 60°C.
4. Larutan didiamkan pada suhu ruang/suhu kamar.
5. Larutan disaring dengan kertas Whatmann 01.
6. Larutan MO diperoleh dan disimpan dalam lemari es.

3.3.2 *Green Synthesis* Nanopartikel CoFe_2O_4

Langkah *green synthesis* CoFe_2O_4 sebagai berikut:

1. Serbuk $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ditimbang sebanyak 1 gram.
2. Serbuk $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ditimbang sebanyak 2,7 gram.
3. NaOH ditimbang sebanyak 3 gram.
4. Masing-masing didispersikan dengan 15 ml air suling selama 3 menit dengan kecepatan 600 rpm menggunakan *magnetic stirrer*. Selanjutnya larutan $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ disebut larutan X dan larutan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ disebut larutan Y.
5. Kedua larutan dicampur, diaduk selama 5 menit, larutan Y dilarutkan ke larutan X. Larutan yang diperoleh selanjutnya disebut larutan Z.
6. 20 ml larutan MO diteteskan tetes demi tetes ke dalam larutan Z sambil tetap diaduk selama 30 menit dengan kecepatan 600 rpm. Selanjutnya disebut larutan A.
7. 3 gram NaOH didispersikan pada air suling sebanyak 50 ml, diaduk selama 15 menit pada suhu 80°C dengan kecepatan 600 rpm. Larutan yang diperoleh disebut larutan B.
8. Larutan A diteteskan ke dalam larutan B pada suhu 80°C sambil diaduk selama 60 menit.
9. Larutan didiamkan pada suhu ruang/suhu kamar.

10. Larutan diendapkan, kemudian dicuci dengan air suling sebanyak 7 kali. Pengendapan dilakukan 30 menit/pencucian. Endapan dipisahkan secara magnetis hingga pH netral.
11. Hasil pencucian dipindahkan ke dalam cawan.
12. Endapan dikeringkan menggunakan furnace pada suhu 80°C selama 7 jam.
13. Hasil pengeringan digerus hingga menjadi serbuk.
14. Serbuk CoFe_2O_4 diperoleh setelah proses pengeringan dan penggerusan.
15. Serbuk CoFe_2O_4 dikalsinasi menggunakan furnace selama 5,5 jam pada suhu 600°C.
16. Serbuk CoFe_2O_4 dicek respon kemagnetannya.

3.3.3 *Green Synthesis* Nanopartikel ZnS

Langkah *green synthesis* ZnS sebagai berikut:

1. Serbuk seng asetat ditimbang sebanyak 1,3 gram.
2. Serbuk natrium sulfida ditimbang sebanyak 0,599 gram.
3. 1,3 gram seng asetat didispersikan dengan 20 ml air suling dan 10 ml larutan MO, kemudian diaduk selama 15 menit dengan kecepatan 600 rpm. Selanjutnya disebut larutan A.
4. 0,599 gram natrium sulfida didispersikan dengan 30 ml air suling, diaduk selama 15 menit dengan kecepatan 600 rpm. Selanjutnya disebut larutan B.
5. Larutan B ditetaskan tetes demi tetes (*dropwise slowly*) ke dalam larutan A sambil terus diaduk selama 5 jam pada suhu 80°C dengan kecepatan 600 rpm.
6. Larutan diendapkan, kemudian dicuci sebanyak 3 kali dengan ethanol dan air suling. Pengendapan dilakukan 30 menit/pencucian.
7. Larutan dicek pH-nya pada setiap pencucian.
8. Hasil pencucian dipindahkan ke dalam cawan.
9. Endapan dikeringkan pada suhu 80°C selama 6 jam menggunakan furnace.
10. Serbuk ZnS diperoleh setelah proses pengeringan.

3.3.4 Fabrikasi Nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$

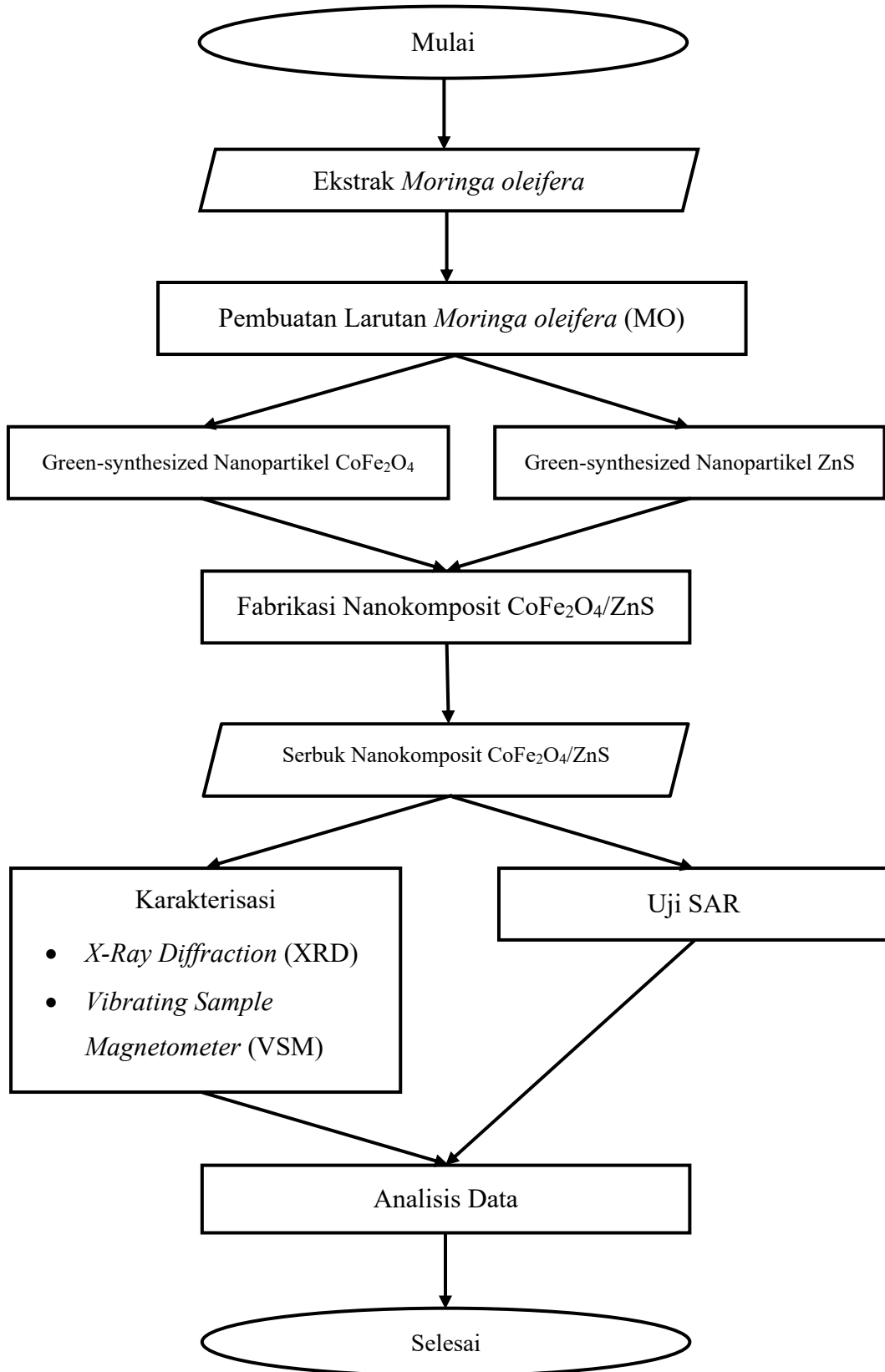
Langkah fabrikasi nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ sebagai berikut:

1. Serbuk CoFe_2O_4 ditimbang sebanyak 0,4 gram.
2. Serbuk ZnS ditimbang sebanyak 0,4 gram.
3. 0,4 gram CoFe_2O_4 didispersikan dengan 25 ml air suling menggunakan alat ultrasonikasi selama 30 menit. Selanjutnya akan disebut larutan A.
4. 0,4 gram ZnS didispersikan dengan 15 ml air suling dan 10 ml larutan MO menggunakan alat ultrasonikasi selama 30 menit. Selanjutnya akan disebut larutan B.
5. Larutan B dimasukkan ke dalam larutan A sambil diaduk selama 30 menit pada suhu 50°C . Selanjutnya disebut larutan C.
6. Larutan C disonikasi pada suhu 50°C selama 90 menit.
7. Larutan diendapkan, kemudian dicuci sebanyak 3 kali dengan ethanol dan air suling hingga pH netral. Pengendapan dilakukan 30 menit/pencucian.
8. Endapan dikeringkan pada suhu 100°C selama 4 jam menggunakan furnace.
9. Nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ berhasil diperoleh dalam bentuk serbuk.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini, langkah penelitian dimulai dengan mempersiapkan alat dan bahan yang akan digunakan. Selanjutnya dilakukan ekstrak daun kelor sebagai bahan baku utama untuk *green synthesis* nanopartikel. Tahap *green synthesis* yang dilakukan meliputi *green synthesis* nanopartikel CoFe_2O_4 dan *green synthesis* nanopartikel ZnS , keduanya menggunakan metode *co-precipitation* atau kopresipitasi. Fabrikasi nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ menggunakan metode Stöber akan dilakukan setelah nanopartikel CoFe_2O_4 dan ZnS diperoleh.

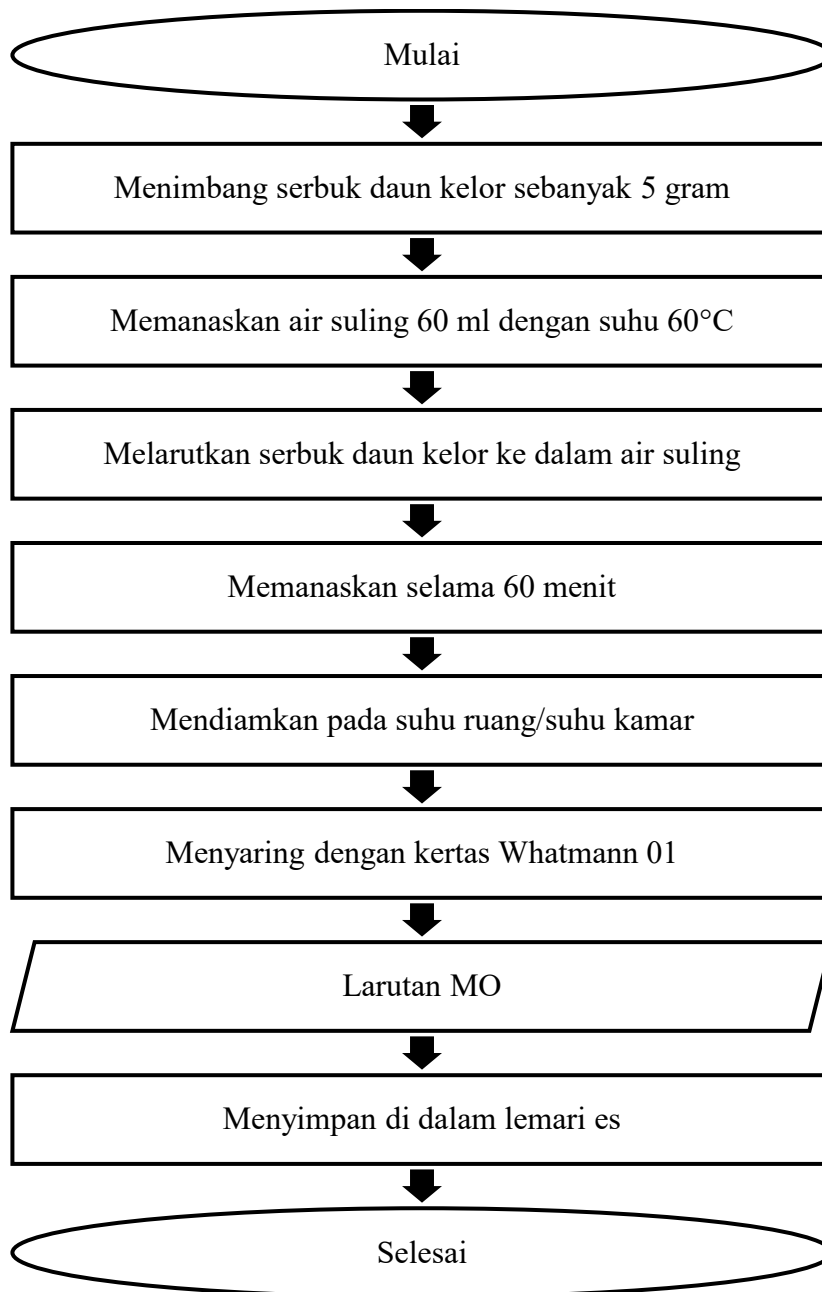
Serbuk nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ yang didapatkan sebagai hasil fabrikasi akan dilakukan karakterisasi (XRD dan VSM) serta uji SAR. Data-data yang diperoleh selanjutnya akan dianalisis. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.4.1 Pembuatan Larutan MO

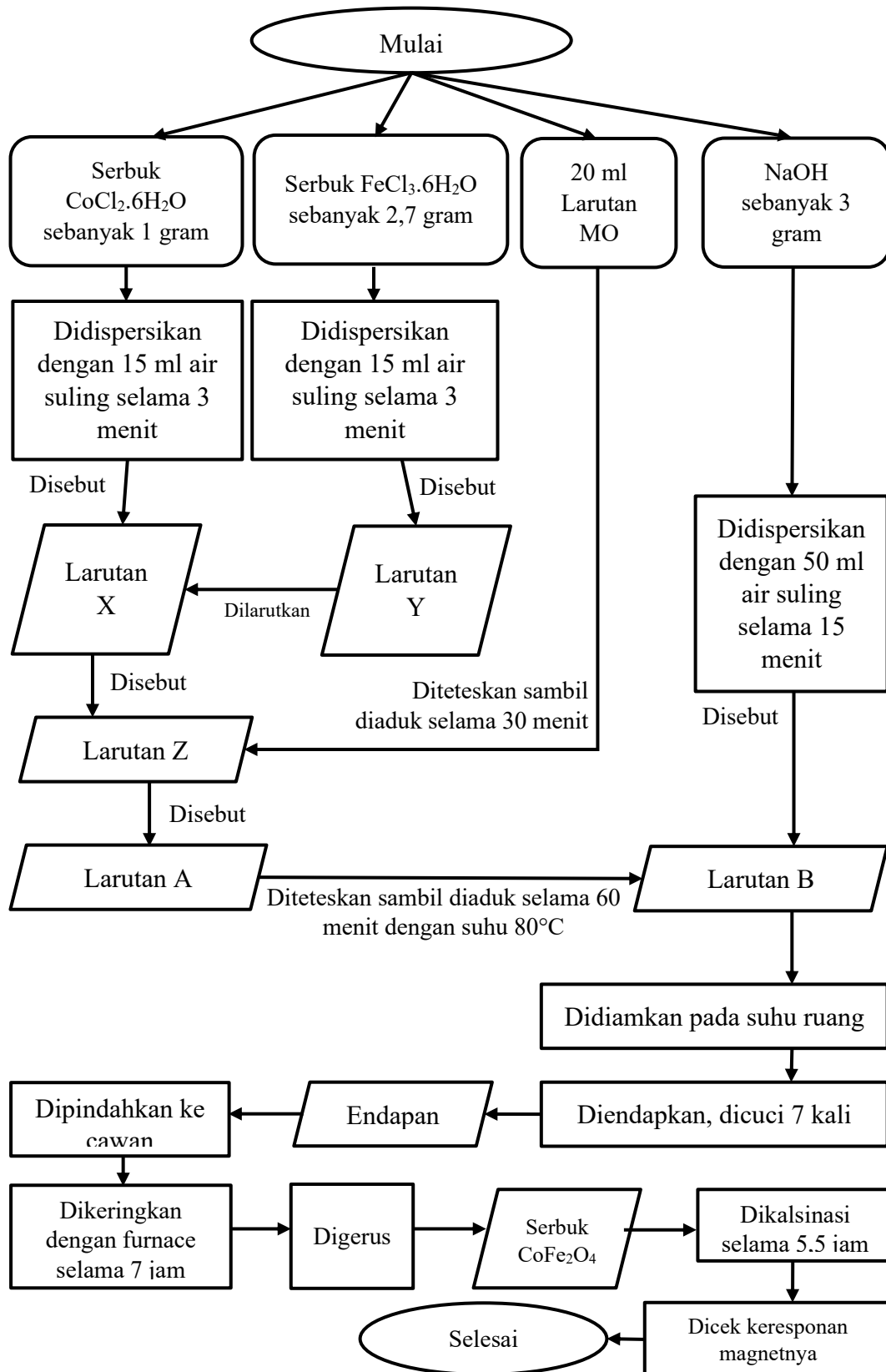
Diagram alir pembuatan larutan *Moringa oleifera* (MO) seperti pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 Diagram Alir Pembuatan Larutan MO

3.4.2 Green Synthesis CoFe_2O_4

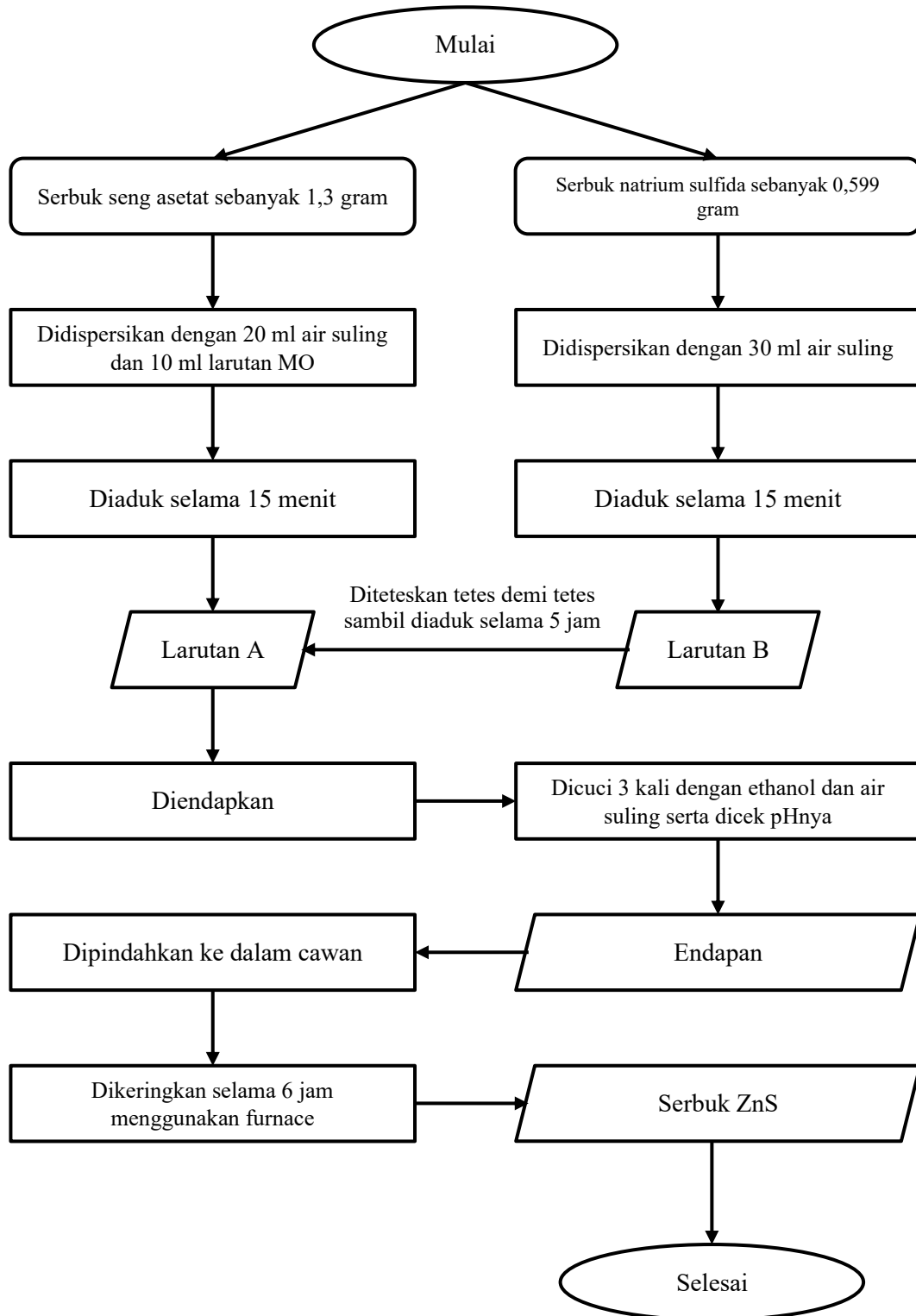
Diagram alir *green synthesis* CoFe_2O_4 ditunjukkan pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3 Diagram Alir *Green Synthesis* CoFe₂O₄

3.4.3 Green Synthesis ZnS

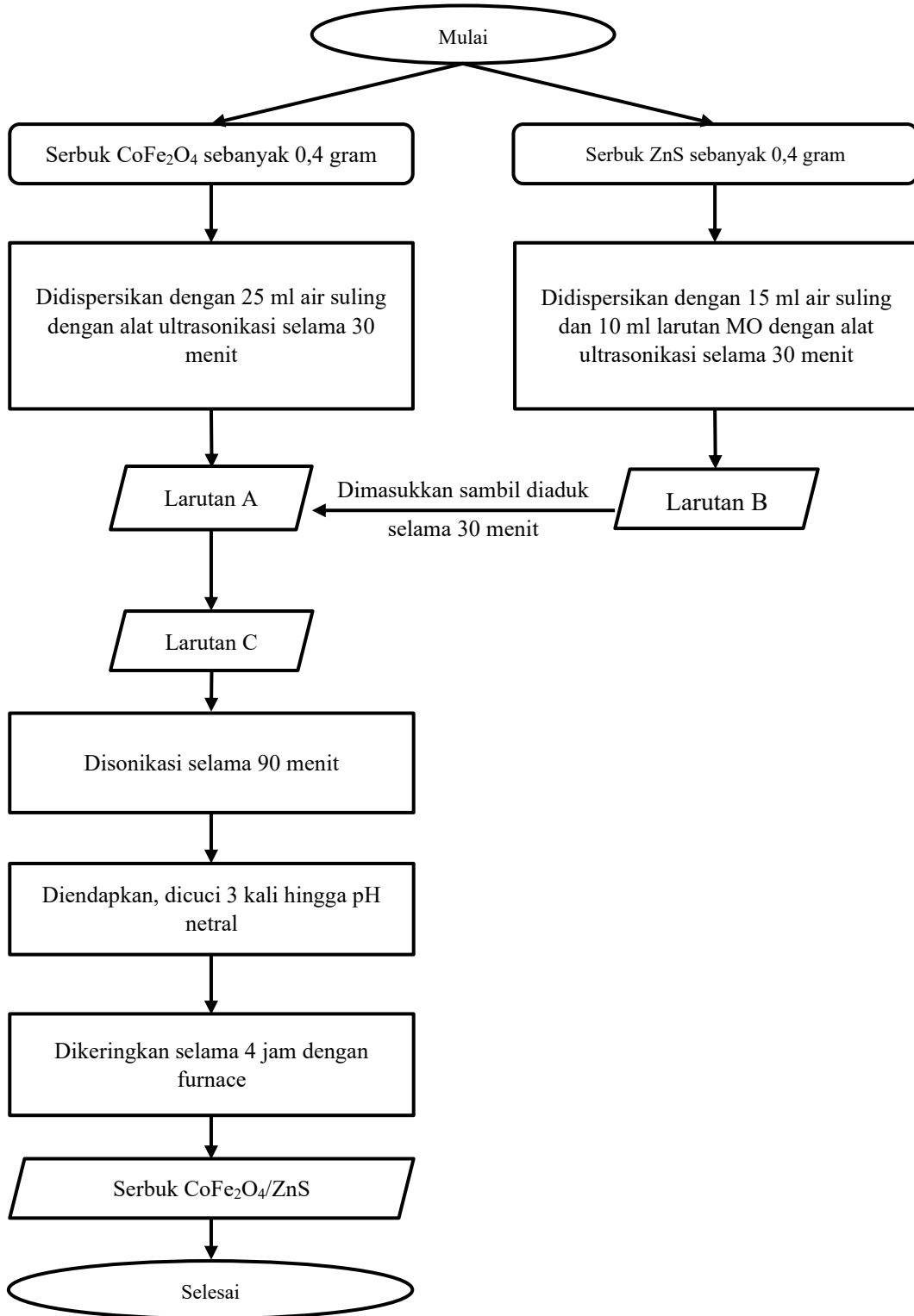
Diagram alir *green synthesis* ZnS ditunjukkan pada **Gambar 3.4**.



Gambar 3.4 Diagram Alir *Green Synthesis* ZnS

3.4.4 Fabrikasi Nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$

Diagram alir fabrikasi nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ ditunjukkan pada **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5 Diagram Alir Fabrikasi Nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan ZnS pada CoFe_2O_4 membentuk nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ yang menyebabkan penurunan ukuran partikel dari 11,12 nm menjadi 8,98 nm dan penurunan parameter kisi dari 8,34 Å menjadi 6,76 Å. Hal ini menunjukkan bahwa ZnS berperan dalam memodifikasi struktur kristal menjadi lebih halus.
2. Sifat magnetik nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ mengalami perubahan setelah penambahan ZnS, ditunjukkan dengan penurunan nilai magnetisasi saturasi dari 37,6 emu/g menjadi 29,4 emu/g. Penurunan ini mengindikasikan bahwa komponen non-magnetik ZnS menurunkan interaksi magnetik sehingga menghasilkan material dengan sifat magnetik yang lebih lunak.
3. Variasi massa ZnS memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai *Specific Absorption Rate* (SAR). Nilai SAR meningkat seiring bertambahnya massa ZnS, dengan nilai tertinggi sebesar 0,81 W/g pada massa 0,1 gram dan nilai terendah sebesar 0,41 W/g pada massa 0,025 gram. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kandungan ZnS dapat meningkatkan efisiensi pemanasan nanokomposit.
4. Perubahan struktur kristal dan sifat magnetik akibat penambahan ZnS berimplikasi positif terhadap potensi aplikasi $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ dalam hipertermia magnetik. Penurunan ukuran partikel dan sifat magnetik yang lebih lunak mendukung peningkatan efisiensi SAR, sehingga menjadikan nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ kandidat kuat sebagai agen hipertermia yang ramah lingkungan dan berbasis nanoteknologi.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperlukan penyempurnaan pada penelitian selanjutnya dalam aplikasi hipertermia magnetik, dengan mengontrol parameter seperti stabilitas suhu, pH larutan, dan rasio prekursor, guna memperoleh nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ yang lebih homogen dan distribusi ZnS yang merata, sehingga meningkatkan efisiensi pemanasan dan hasil yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, M., Takahashi, M., dan Kim, C. 2013. Facile Sonochemical Synthesis of High-moment Magnetite (Fe_3O_4) Nanocube. *Journal of Nanoparticle Research*. Vol. 15. No. 1354. Hal. 1 – 12.
- Adebayo, I. A., Balogun, W. G., dan Arsad, H. 2017. Moringa oleifera: An Apoptosis Inducer in Cancer Cells. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*. Vol. 16. No. 7. Hal. 2289 – 2296.
- Adinsyah, S. N. 2021. *Magnet dan Penerapannya*. Media Edukasi Creative. Surabaya.
- Affandi, N. N. 2019. *Kelor Tanaman Ajaib Untuk Kehidupan yang Lebih Sehat*. Deepublish Publisher. Sleman. Hal. 55 – 63, 66 – 69.
- Aftabi, A., Babakhani, A., dan Khoshlahni, R. 2025. Optimized Zn Substituted CoFe_2O_4 Nanoparticles for High Efficiency Magnetic Hyperthermia in Biomedical Applications. *Scientific Reports*. Vol. 15. No. 1. Hal. 1 – 23.
- Ahmad, F. dan Zhou, Y. 2017. Pitfalls and Challenge in Nanotoxicology: A Case of Cobalt Ferrite (CoFe_2O_4) Nanocomposites. *Chemical Research in Toxicology*. Vol. 30. No. 2. Hal. 1 – 17.
- Alex, K. V., Pavai, P. T., Rugmini, R., Prasad, M. S., Kamakshi, K., dan Sekhar, K. C. 2020. Green Synthesized Ag Nanoparticle for Bio-sensing and Photocatalytic Applications. *ACS Omega*. Vol. 5. No. 22. Hal. 13123 – 13129.
- Ali, M. A., Ahmed, T., Wu, W., Hossain, A., Hafeez, R., Masum, M. M., Wang, Y. An, Q., Sun, G., dan Li, B. 2020. Advancements in Plant and Microbe-Based Synthesis of Metallic Nanoparticles and Their Antimicrobial Activity Against Plant Pathogens. *Nanomaterials (Basel)*. Vol. 10. No. 6. Hal. 1146.
- Amiji, M. M. 2007. *Nanotechnology for Cancer Therapy*. CRC Press. Boca Raton.
- Amiri, S. dan Shokrollahi, H. 2013. The Role of Cobalt Ferrite Magnetic Nanoparticles in Medical Science. *Material Science and Engineering C*. Vol. 33. No. 1. Hal. 1 – 8.
- Andrä, W. dan Nowak, H. 2007. *Magnetism in Medicine 2nd Edition*. Wiley.

Weinheim. Hal. 550 – 570.

- Anwar, F., Latif, S., Ashraf, M., dan Gilani, A. 2007. *Moringa Oleifera: A Food Plant with Multiple Medicinal Uses. Phytotherapy Research*. Vol. 21. No. 1. Hal. 17 – 25.
- Aromal, S. A. dan Philip, D. 2012. Green Synthesis of Gold Nanoparticles Using *Trigonella foenum-graecum* and Its Size-dependent Catalytic Activity. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. Vol. 97. No. 1. Hal. 1 – 5.
- Asab, G., Zereffa, E. A., dan Seghne, T. A. 2020. Synthesis of Silica-Coated Fe₃O₄ Nanoparticles by Microemulsion Method: Characterization and Evaluation of Antimicrobial Activity. *International Journal of Biomaterials*. Vol. 2020. No. 1. Hal. 1 – 11.
- Azaria, L. H., Kirkpatrick, C. J., Korenstein, R., Marche, P. N., Maimon, O., Ponti, J., Romano, R., Rossi, F., Golla-Schindler, U., Sommer, D., Uboldi, C., Unger, R. E., dan Villiers, C. 2011. Predictive Toxicology of Cobalt Nanoparticles and Ions: Comparative In Vitro Study of Different Cellular Models Using Methods of Knowledge Discovery from Data. *Toxicology Sciences*. Vol. 122. No. 2. Hal. 489 – 501.
- Bacon, G. E. 1966. *X-Ray and Neutron Diffraction*. Pergamon Press. Oxford.
- Bahadur, D. dan Giri, J. 2003. Biomaterials and Magnetism. *Sādhana*. Vol. 28. No. 3. Hal. 639 – 656.
- Bakshi, M. S. 2015. How Surfactants Control Crystal Growth of Nanomaterials. *Crystal Growth & Design*. Vol. 16. No. 2. Hal. 1104 – 1133.
- Baskar, R., Lee, K. A., Yeo, R., dan Yeoh, K. W. 2012. Cancer and Radiation Therapy: Current Advances and Future Directions. *International Journal of Medical Sciences*. Vol. 9. No. 3. Hal. 193 – 199.
- Bhargava, G. K., Bhardwaj, S., Singh, M., dan Batoo, K. M. 2021. *Ferrites and Multiferroics*. Springer. Singapore.
- Birla, G. S. dan Hemlin, C. 1999. *Magnet Therapy: The Gentle and Effective Way to Balance Body Systems*. Healing Arts Press. Rochester. Hal. 6 – 9.
- Borah, J. P., Barman, J., dan Sarma, K. C. 2008. Structural and Optical Properties of ZnS Nanoparticles. *Chalcogenide Letters*. Vol. 5. No. 9. Hal. 201 – 208.
- Brown, W. F. 1963. Thermal Fluctuations of a Single-Domain Particle. *Journal of Applied Physics*. Vol. 34. No. 4. Hal. 1319 – 1320.
- Burgei, W., Pechan, M. J., dan Jaeger, H. 2003. A Simple Vibrating Sample

- Magnetometer for Use in a Materials Physics Course. *American Journal of Physics*. Vol. 71. No. 8. Hal. 825 – 828.
- Camargo, P. H., Satyanarayana, K. G., dan Wypych, F. 2009. Nanocomposites: Synthesis, Structure, Properties, and New Application Opportunities. *Materials Research*. Vol. 12. No. 1. Hal. 1 – 39.
- Capco, D. G. dan Chen, Y. 2014. *Nanomaterial: Impacts on Cell Biology and Medicine*. Springer. Heidelberg.
- Caroling, G., Vinodhini, E., Ranjitham, A. M., dan Shanthi, P. 2015. Biosynthesis of Copper Nanoparticles Using Aqueous Phyllanthus Embilica (Gooseberry) Extract- Characterisation and Study of Antimicrobial Effects. *International Journal of Nanomaterials and Chemistry*. Vol. 1. No. 2. Hal. 53 – 63.
- Chae, H. S., Kim, S. D., Piao, S. H., dan Choi, H. J. 2016. Core-shell Structured $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ Nanoparticles Fabricated by Sol-gel Method and their Magnetorheology. *Colloid and Polymer Science*. Vol. 294. No. 4. Hal. 647 – 655.
- Chakravarty, A., Singh, P., Ikram, S., dan Yadava, R. N. 2024. *Green Synthesis of Nanomaterials: Biological and Environmental Applications*. Wiley. Hoboken.
- Chen, R. dan Tim CancerHelps. 2012. *Solusi Cerdas Mencegah dan Mengobati Kanker*. PT. AgroMedia Pustaka. Jakarta. Hal. 1 – 7, 50.
- Chen, Y. W., Su, Y. L., Hu, S. H., dan Chen, S. Y. 2016. Functionalized Graphene Nanocomposites for Enhancing Photothermal Therapy in Tumor Treatment. *Advanced Drug Delivery Reviews*. Vol. 105. Hal. 190 – 204.
- Chiguvare, H., Oyediji, O. O., Matewu, R., Aremu, O., Oyemitan, I. A., Oyediji, A. O., Nkeh-Chungag, B. N., Songca, S. P., Mohan, S., dan Oluwafemi, O. S. 2016. Synthesis of Silver Nanoparticles Using Buchu Plant Extract and Their Analgesic Properties. *Molecules*. Vol. 21. No. 6. Hal. 1 – 7.
- Colombo, M., Romero, S. C., Casula, M. F., Gutierrez, L., Morales, M. P., Bohm, I. B., Heverhagen, J. T., Prosperi, D., dan Parak, W. J. 2012. Biological Applications of Magnetic Nanoparticles. *Chemical Society Reviews*. Vol. 41. No. 11. Hal. 4306 – 4334.
- Cullity, B. D. 1978. *Elements of X-Ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company. Boston.
- Cullity, B. D. dan Stock, S. R. 2001. *Elements of X-Ray Diffraction*. Prentice Hall. New York.
- Dalacu, N. dan Kitai, A. H. 1991. Semiconductor Hot-electron Alternating Current

Cold Cathode. *Applied Physics Letters*. Vol. 58. No. 6. Hal. 613 – 615.

- Darmawan, M. Y., Istiqomah, N. I., Adrianto, N., Tumbelaka, R. M., Nugraheni, A. D., dan Suharyadi, E. 2023. Green Synthesis of Fe₃O₄/Ag Composite Nanoparticles Using Moringa oleifera: Exploring Microstructure, Optical, and Magnetic Properties for Magnetic Hyperthermia Applications. *Results in Chemistry*. Vol. 6. Hal. 1 – 11.
- Das, S. dan Srivasatava, V. C. 2016. Synthesis and Characterization of ZnO-MgO Nanocomposite by Co-precipitation Method. *Smart Science*. Vol. 4. No. 4. Hal. 190 – 195.
- Drexler, E. 1987. *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. Anchor. New York.
- Duffus, J. H., Templeton, D. M., dan Nordberg, M. 2009. *Concepts in Toxicology*. The Royal Society of Chemistry. Cambridge.
- Duong, H. D., Nguyen, D. T., dan Kim, K. 2021. Effects of Process Variables on Properties of CoFe₂O₄ Nanoparticles Prepared by Solvothermal Process. *Nanomaterials*. Vol. 11. No. 11. Hal. 1 – 17.
- Effendi, R., Syamsudin, S., Sinambela, W. S., dan Soemarto. 2007. *Medan Elektromagnetika Terapan*. Erlangga. Jakarta.
- Eisenstein, G. dan Bimberg, D. 2018. *Green Photonics and Electronics*. Springer. Cham.
- Elbagory, A. M., Meyer, M., Cupido, C. N., dan Hussein, A. A. 2017. Inhibition of Bacteria Associated with Wound Infection by Biocompatible Green Synthesized Gold Nanoparticles from South African Plant Extracts. *Nanomaterials*. Vol. 7. No. 12. Hal. 1 – 22.
- Evilina, D. 2010. *Ensiklopedia Materi dan Kimia Unsur*. ALPRIN. Semarang.
- Fajaroh, F., Setyawan, H., Widiyastuti, W., dan Winardi, S. 2012. Synthesis of Magnetite Nanoparticles by Surfactant-free Electrochemical Method in an Aqueous System. *Advanced Powder Technology*. Vol. 23. No. 3. Hal. 328 – 333.
- Fatima, H., Charinpanitkul, T., dan Kim, K. 2021. Fundamentals to Apply Magnetic Nanoparticles for Hyperthermia Therapy. *Nanomaterials*. Vol. 11. No. 5. Hal. 1 – 20.
- Fazel-Rezai, R. 2011. *Biomedical Engineering – Frontiers and Challenges*. InTech. Rijeka. Hal. 165.
- Foner, S. 1959. Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer. *Review*

- of Scientific Instruments*. Vol. 30. No. 7. Hal. 548 – 557.
- Fratila, R. M. dan Fuente, J. M. 2019. *Nanomaterials For Magnetic and Optical Hyperthermia Applications*. Elsevier. Oxford.
- Greenwood, N. N. dan Earnshaw, A. 1984. *Chemistry of the Elements*. Pergamon Press. New York. Hal. 1404 – 1405.
- Haw, C. Y., Mohamed, F., Chia, C. H., Radiman, S., Zakaria, S., Huang, N. M., dan Lim, H. N. 2010. Hydrothermal Synthesis of Magnetite Nanoparticles as MRI Contrast Agents. *Ceramics International*. Vol. 36. No. 4. Hal. 1417 – 1422.
- Hedayatnasab, Z., Abnisa, F., dan Daud, W. M. 2017. Review on Magnetic Nanoparticles for Magnetic Nanofluid Hyperthermia Application. *Materials & Design*. Vol. 123. Hal. 174 – 196.
- Hergt, R., Andrä, W., D'Ambly, C. G., Hilger, I., Kaiser, W. A., Richter, U., dan Schmidt, H. 1998. Physical Limits of Hyperthermia Using Magnetite Fine Particles. *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 34. No. 5. Hal. 3745 – 3754.
- Houshiar, M., Zebhi, F., Razi, Z. J., Alidoust, A., dan Askari, Z. 2014. Synthesis of Cobalt Ferrite (CoFe₂O₄) Nanoparticles Using Combustion, Coprecipitation, and Precipitation Methods: A Comparison Study of Size, Structural, and Magnetic Properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Vol. 371. Hal. 43 – 48.
- Huguet-Casquero, A., Gainza, E., dan Pedraz, J. L. 2021. Towards Green Nanoscience: From Extraction to Nanoformulation. *Biotechnology Advances*. Vol. 46. Hal. 1 – 38.
- Hussain, C. M. dan Patankar, K. K. 2022. *Fundamentals and Industrial Applications of Magnetic Nanoparticles*. Elseiver. Cambridge.
- Ibrahim, E. dan Elbeshir, A. 2018. Magnetic and Thermal Properties of CoFe₂O₄ Nanoparticles for Magnetic Hyperthermia Treatment. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. Vol. 5. No. 8. Hal. 34 – 36.
- Jain, U., Saxena, K., Hooda, V., Balayan, S., Singh, A. P., Tikadar, M., dan Chauhan, N. 2022. Emerging Vistas on Pesticides Detection Based on Electrochemical Biosensors – an Update. *Food Chemistry*. Vol. 371. Hal. 131126.
- Jusnita, N. dan Syurya, W. 2019. Karakterisasi Nanoemulsi Ekstrak Daun Kelor (*Moringa oleifera* Lamk.). *Jurnal Sains Farmasi & Klinis*. Vol. 6. No. 1. Hal. 16 – 24.
- Kaelble, E. F. 1967. *Handbook of X-Rays*. McGraw-Hill. New York.

- Kappiyoor, R., Liangruksa, M., Ganguly, R., dan Puri, I. K. 2010. The Effects of Magnetic Nanoparticle Properties on Magnetic Fluid Hyperthermia. *Journal of Applied Physics*. Vol. 108. No. 9. Hal. 1 – 8.
- Kaviya, S., Santhanalakshmi, J., Viswanathan, B., Muthumary, J., dan Srinivasan, K. 2011. Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using Citrus Sinesis Peel Extract and Its Antibacterial Activity. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. Vol. 79. No. 3. Hal. 594 – 598.
- Kazemi, M., Ghobadi, M., dan Mirzaie, A. 2018. Cobalt Ferrite Nanoparticles (CoFe₂O₄ MNPs) as Catalyst and Support: Magnetically Recoverable Nanocatalysts in Organic Synthesis. *Nanotechnology Reviews*. Vol. 7. No. 1. Hal. 43 – 68.
- Kedi, P. B., Nanga, C. C., Gbambie, A. P., Deli, V., Meva, F. E., Mohamed, H. E., Ntomba, A. A., Nko'o, M. H., Kökçam-Demir, Ü., Moll, B., Michelle, H. K., Ndifon, P. T., Mpondo, E. A., Dongmo, A. B., Janiak, C., dan Maaza, M. 2020. Biosynthesis of Silver Nanoparticles from *Microsorium punctatum* (L.) Copel Fronds Extract and an In-vitro Anti-Inflammation Study. *Journal of Nanotechnology Research*. Vol. 2. No. 2. Hal. 25 – 41.
- Keenan, C. W., Kleinfelter, D. C., dan Wood J. H. 1993. *Kimia Untuk Universitas Jilid 2 Edisi 6*. Erlangga. Jakarta.
- Kemp, R. dan Never, B. 2017. Green Transition, Industrial Policy, and Economic Development. *Oxford Review of Economic Policy*. Vol. 33. No. 1. Hal. 66 – 84.
- Kennaz, H., Harat, A., Guellati, O., Momodu, D. Y., Barzegar, F., Dangbegnon, J. K., Manyala, N., dan Guerioune, M. 2017. Synthesis and Electrochemical Investigation of Spinel Cobalt Ferrite Magnetic Nanoparticles for Supercapacitor Application. *Journal of Solid State Electrochemistry*. Vol. 22. Hal. 835 – 847.
- Khan, H., Mirzaei, H. R., Amiri, A., Akkol, E. K., Halimi, S. M., dan Mirzaei, H. 2019. Glyco-nanoparticles: New Drug Delivery Systems in Cancer Therapy. *Seminars in Cancer Biology*. Vol. 69. Hal. 24 – 42.
- Khosroshahi, M. E. dan Ghazanfari, L. 2011. Amino Surface Modification of Fe₃O₄/SiO₂ Nanoparticles for Bioengineering Applications. *Surface Engineering*. Vol. 27. No. 8. Hal. 508 – 573.
- Kumar, R., Kumar, R., dan Chaudhary, S. 2023. *Advanced Functional Nanoparticles “Boon or Bane” for Environment Remediation Applications*. Springer. Cham.
- Kumbhar, V. S., Jagadale, A. D., Shinde, N. M., dan Lokhande, C. D. 2012. Chemical Synthesis of Spinel Cobalt Ferrite (CoFe₂O₄) Nano-flakes for

- Supercapacitor Application. *Applied Surface Science*. Vol. 259. Hal. 39 – 43.
- Kushwaha, P. dan Chauhan, P. 2021. Facile Green Synthesis of CoFe_2O_4 Nanoparticles Using Hibiscus Extract and Their Application in Humidity Sensing Properties. *Inorganic and Nano-metal Chemistry*. Vol. 53. No. 7. Hal. 1 – 8.
- Larasati, D. A., Puspitarum, D. L., Darmawan, M. Y., Istiqomah, N. I., Partini, J., Aliah, H., dan Suharyadi, E. 2023. Green Synthesis of $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$ Composite Nanoparticles Utilizing *Moringa Oleifera* for Magnetic Hyperthermia Applications. *Results in Materials*. Vol. 19. Hal. 1 – 11.
- Laurent, S., Dutz, S., Häfeli, U. O., dan Mahmoudi, M. 2011. Magnetic Fluid Hyperthermia: Focus on Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles. *Advances in Colloid and Interface Science*. Vol. 166. No. 1 – 2. Hal. 8 – 23.
- Liau, S. L., Connell, P. P., dan Weichselbaum, R. R. 2013. New Paradigms and Future Challenges in Radiation Oncology: An Update of Biological Targets and Technology. *Science Translational Medicine*. Vol. 5. No. 173. Hal. 1 – 32.
- Liz-Marzán, L. M., Michael, G., dan Mulvaney, P. 1996. Synthesis of Nanosized Gold-Silica Core-Shell Particles. *Langmuir*. Vol. 12. No. 18. Hal. 4329 – 4335.
- Manohar, A., Geleta, D. D., Krishnamoorthi, C., dan Lee, J. 2020. Synthesis, Characterization, and Magnetic Hyperthermia Properties of Nearly Monodisperse CoFe_2O_4 Nanoparticles. *Ceramics International*. Vol. 46. No. 18. Hal. 28035 – 28041.
- Mansoori, G. A. dan Soelaiman, T. A. 2005. Nanotechnology – An Introduction for the Standards Community. *Journal of ASTM Internasional*. Vol. 2. No. 6. Hal. 1 – 22.
- Mason, P. A., Hurt, W. D., Walters, T. J., D’Andrea, J. A., Gajsek, P., dan Ryan, K. L. 2000. Effects of Frequency, Permittivity, and Voxel Size On Predicted Specific Absorption Rate Values in Biological Tissue During Electromagnetic-field Exposure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 48. No. 11. Hal. 2050 – 2058.
- Masunga, N., Mmesesi, O. K., Kefeni, K. K., dan Mamba, B. B. 2019. Recent Advances in Copper Ferrite Nanoparticles and Nanocomposites Synthesis, Magnetic Properties and Application in Water Treatment: Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol. 7. No. 3. Hal. 1 – 16.
- Moazzen, M. A., Borghei, S. M., dan Taleshi, F. 2013. Change in the Morphology of ZnO Nanoparticles Upon Changing the Reactant Concentration. *Applied Nanoscience*. Vol. 3. Hal. 295 – 302.

- Moodley, J. S., Krishna, S. B., Pillay, K., Sershen, dan Govender, P. 2018. Green Synthesis of Silver Nanoparticles from *Moringa oleifera* Leaf Extracts and its Antimicrobial Potential. *Advance in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. Vol. 9. No. 1. Hal. 1 – 9.
- Moya, C. dan Bruylants, G. 2021. *Recent Advances in Elongated IONPs: From Preparation to Biomedical Applications*. Université Libre de Bruxelles (ULB). Brussels. Hal. 7.
- Mufamadi, M. S., George, J., Mazibuko, Z., dan Tshikalange, T. E. 2019. *Cancer Bionanotechnology: Biogenic Synthesis of Metallic Nanoparticles and Their Pharmaceutical Potency in Microbial Nanobionics*. Springer. Cham. Hal. 229 – 251.
- Mufamadi, M. S. dan Mulaudzi, R. B. 2019. Green Engineering of Silver Nanoparticles to Combat Plant and Foodborne Pathogens: Potential Economic Impact and Food Quality. *Plant Nanobionics*. Vol. 2. Hal. 451 – 476.
- Mukherjee, S., Chowdhury, D., Kotcherlakota, R., Patra, S., B. V., Bhadra, M. P., Sreedhar, B., dan Patra, C. R. 2014. Potential Theranostics Application of Bio-synthesized Silver Nanoparticles (4-in-1 System). *Theranostics*. Vol. 4. No. 3. Hal. 316 – 335.
- Mullick, S., Rana, G., Kumar, A., Sharma, G., dan Naushad, M. 2021. *Ferrites: Synthesis, Structure, Properties and Applications in Ferrite: Nanostructures with Tunable Properties and Diverse Applications*. Materials Research Forum LLC. Millersville.
- Naik, M. M., Naik, H. S., Nagaraju, G., Vinuth, M., Naika, H. R., dan Vinu, K. 2019. Green Synthesis of Zinc Ferrite Nanoparticles in *Limonia acidissima* Juice: Characterization and Their Application as Photocatalytic and Antibacterial Activities. *Microchemical Journal*. Vol. 146. No. 5. Hal. 1227 – 1235.
- Naseer, M., Aslam, U., Khalid, B., dan Chen, B. 2020. Green Route to Synthesize Zinc Oxide Nanoparticles Using Leaf Extracts of *Cassia fistula* and *Melia azadarach* and Their Antibacterial Potential. *Scientific Reports*. Vol. 10. No. 9055. Hal. 1 – 10.
- Natividad, M. D., Fiereck, K. J., dan Parker, R. 2012. Knowledge Networks for Global Health. *Global Public Health: An International Journal for Research, Policy, and Practice*. Vol. 7. No. S1. Hal. 73 – 81.
- Néel, L. 1949. Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec application aux terres cuites. *Annales de géophysique*. Vol. 5. No. 2. Hal. 99 – 136.

- Ngara, Z. S. 2023. *Fisika Zat Padat*. PT Nasya Expanding Management. Pekalongan. Hal. 78 – 101.
- Nisa, F. Z., Hidayati, M. N., Putri, A. R., dan Rahayu, P. 2021. *Bahan Pangan Pencegah Kanker*. Gadjah Mada University Press. Sleman. Hal. 56 – 58.
- Nuhaeroh, I., Anwar, D. I., dan Khumaisah, L. L. 2022. Aktivitas Antibakteri Nanokomposit TiO₂/Cu dan TiO₂/CuO terhadap Bakteri *Bacillus cereus*. *Jurnal Sains Dasar*. Vol. 11. No. 2. Hal. 95 – 100.
- Obaidat, I. M., Narayanaswamy, V., Alaabed, S., Sambasivam, S., dan Gopi, C. V. 2019. Principles of Magnetic Hyperthermia: A Focus on Using Multifunctional Hybrid Magnetic Nanoparticles. *Magnetochemistry*. Vol. 67. No. 5. Hal. 1 – 40.
- Obidin, A. Z., Pechenov, A. N., Popov, Y. M., Frolov, V. A., Korostelin, Y. V., dan Shapkin, P. V. 1998. Streamer Zinc Sulfide Laser. *Soviet Journal of Quantum Electronics*. Vol. 18. No. 9. Hal. 1100 – 1102.
- Oluwaniyi, O. O., Adegoke, H. I., Adesuji, E. T., Alabi, A. B., Bodede, S. O., Labulo, A. H., dan Oseghale, C. O. 2016. Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using Aqueous Leaf Extract of *Thevetia peruviana* Juss and its Antimicrobial Activities. *Applied Nanoscience*. Vol. 6. Hal. 903 – 912.
- Ortega, D. 2012. *Structure and Magnetism in Magnetic Nanoparticles in Magnetic Nanoparticles From Fabrication to Clinical Applications*. CRC Press. Boca Raton.
- Ortega, D. dan Pankhurst, Q. A. 2013. *Magnetic Hyperthermia*, in *Nanoscience: Volume 1: Nanostructure Through Chemistry*. Royal Society of Chemistry. Cambridge.
- Oxtoby, D. W., Gillis, H. P., dan Nachtrieb, N. H. 2003. *Kimia Modern Edisi 4 Jilid 2*. Erlangga. Jakarta.
- Özgür, Ü., Alivov, Y., dan Morkoç, H. 2009. Microwave Ferrites, Part 1: Fundamental Properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. Vol. 20. Hal. 789 – 834.
- Parameswaranpillai, J., Hameed, N., Kurian, T., dan Yu, Y. 2017. *Nanocomposite Materials: Synthesis, Properties, and Applications*. CRC Press. Boca Raton.
- Pawar, S. J., Patil, S. M., Chithra, M., Sahoo, S. C., dan Patil, P. B. 2020. Cobalt Ferrite Nanoparticles for Supercapacitor Application. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2265. Hal. 1 – 3.
- Petrucchi, R. H., Herring, F. G., Madura, J. D., dan Bissonnette, C. 2017. *General Chemistry: Principles and Modern Applications*. Pearson Education. Toronto.

- Pohl, R., Erhard, A., Montag, H. J., Thomas, H. M., dan Wüstenberg, H. 2004. NDT Techniques for Railroad Wheel and Gauge Corner Inspection. *NDT & E International*. Vol. 37. No. 2. Hal. 89 – 94.
- Potestà, M., Minutolo, A., Gismondi, A., Canuti, L., Kenzo, M., Roglia, V., Macchi, F., Grelli, S., Canini, A., Colizzi, V., dan Montesano, C. 2019. Cytotoxic and Apoptotic Effects of Different Extracts of *Moringa oleifera* Lam on Lymphoid and Monocytoid Cells. *Experimental and Therapeutic Medicine*. Vol. 18. No. 1. Hal. 1 – 13.
- Prasad, N. K., Rathinasamy, K., Panda, D., dan Bahadur, D. 2007. Mechanism of Cell Death Induced by Magnetic Hyperthermia with Nanoparticles of γ - $\text{Mn}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ Synthesized by a Single Step Process. *Journal of Materials Chemistry*. Vol. 17. No. 48. Hal. 5042 – 5051.
- Puri, R. K. dan Babbar, V. K. 2008. *Solid State Physics and Electronics*. S. Chand Publishing. New Delhi.
- Qanitah, Z., Tejasari, M., dan Islami, U. 2023. Systematic Review: Khasiat Antikanker Sediaan Daun Kelor (*Moringa oleifera*) terhadap Pertumbuhan Kanker Paru. *Bandung Conference Series: Medical Science*. Vol. 3. No. 1. Hal. 569 – 586.
- Rahmayeni, Alfina, A., Stiadi, Y., Lee, H. J., dan Zulhadjri. 2019. Green Synthesis and Characterization of $\text{ZnO-CoFe}_2\text{O}_4$ Semiconductor Photocatalysts Prepared Using Rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) Peel Extract. *Materials Research*. Vol. 22. No. 5. Hal. 1 – 10.
- Ramprasad, R., Zurcher, P., Petras, M., Miller, M., dan Renaud, P. 2004. Magnetic Properties of Metallic Ferromagnetic Nanoparticle Composites. *Journal of Applied Physics*. Vol. 96. No. 1. Hal. 519 – 529.
- Rao, C. N., Nagarajan, R., dan Vijayaraghavan, R. 1993. Synthesis of Cuprate Superconductors. *Superconductor Science and Technology*. Vol. 6. No. 1. Hal. 1 – 22.
- Riley, R. S. dan Day, E. S. 2017. Gold Nanoparticle-mediated Photothermal Therapy: Applications and Opportunities for Multimodal Cancer Treatment. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*. Vol. 9. No. 4. Hal. 1 – 16.
- Routray, K. L., Saha, S., dan Behera, D. 2019. Green Synthesis Approach for Nano Sized CoFe_2O_4 Through Aloe vera Mediated Sol-gel Auto Combustion Method for High Frequency Devices. *Materials Chemistry and Physics*. Vol. 224. Hal. 29 – 35.
- Roy, P., Hoque, S. M., Akter, S., Liba, S. I., dan Choudhury, S. 2024. Study on the Chemical Co-precipitation Synthesized CoFe_2O_4 Nanoparticle for

- Magnetocaloric Performance in the Vicinity of Superparamagnetic Blocking Temperature. *Heliyon*. Vol. 10. No. 14. Hal. 1 – 12.
- Roy, P., Hoque, S. M., Liba, S. I., dan Choudhury, S. 2018. Investigation of Various Magnetic Features of Spinel Type Cobalt Ferrite (CoFe_2O_4) Nanoparticles Tuned by Annealing Temperature. *AIP Advances*. Vol. 8. No. 10. Hal. 1 – 10.
- Rukmana, R. dan Yudirachman, H. 2016. *Budidaya Sayuran Lokal*. Nuansa Cendekia. Bandung. Hal. 60 – 67.
- Saini, R. K., Sivanesan, I., dan Keum, Y. 2016. Phytochemicals of *Moringa oleifera*: a Review of Their Nutritional, Therapeutic, and Industrial Significance. *3 Biotech*. Vol. 6. No. 203. Hal. 1 – 14.
- Salem, S. dan Fouda, A. 2021. Green Synthesis of Metallic Nanoparticles and Their Prospective Biotechnological Applications: an Overview. *Biological Trace Element Research*. Vol. 199. No. 1. Hal. 344 – 370.
- Sam, S. R. 2017. *Nano-Physics: ZnS Nanoparticles*. CSMFL Publications. Jagadhri.
- Sang, W., Qian, Y., Min, J., Li, D., Wang, L., Shi, W., dan Yinfeng, L. 2002. Microstructural and Optical Properties of ZnS:Cu Nanocrystals Prepared by an Ion Complex Transformation Method. *Solid State Communications*. Vol. 121. No. 9 – 10. Hal. 475 – 478.
- Sangkota, V. D., Nurmayanti, Y., Cengristitama, Sari, M. W., Marlina, L., Rukmana, M. D., Putri, S. D., Asni, N., Susanti, Y., dan Apolonia, M. N. 2024. *Kimia Anorganik*. Tri Edukasi Ilmiah. Agam.
- Saras, T. 2022. *Manfaat dan Khasiat Daun Kelor Untuk Kesehatan*. Tiram Media. Semarang. Hal. 1, 16.
- Saravanan, R. 2023. *Multiferroic Materials*. Materials Research Forum LLC. Millersville.
- Sattler, K. D. 2020. *21st Century Nanoscience – A Handbook Volume Two*. CRC Press. Boca Raton.
- Sharifi, I., Shokrollahi, H., dan Amiri, S. 2012. Ferrite-based Magnetic Nanofluids Used in Hyperthermia Applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Vol. 324. No. 6. Hal. 903 – 915.
- Sharma, G., Kumar, A., dan Dhiman, P. 2021. *Ferrite: Nanostructure with Tunable Properties and Diverse Applications*. Materials Research Forum LLC. Millersville.
- Sharma, P., Bhargava, G. K., Bhardwaj, S., dan Sharma, I. 2023. *Engineered*

- Ferrites and Their Applications*. Springer. Singapore.
- Sharma, S. K. dan Javed, Y. 2020. *Magnetic Nanoheterostructures: Diagnostic, Imaging, and Treatment*. Springer. Cham.
- Shriver, D. F. dan Atkins, P. W. 2010. *Inorganic Chemistry 5th Edition*. Oxford University Press. Oxford.
- Singh, A., Gautam, P. K., Verma, A., Singh, V., Shivapriya, P. M., Shivalkar, S., Sahoo, A. K., dan Samanta, S. K. 2020. Green Synthesis of Metallic Nanoparticles as Effective Alternatives to Treat Antibiotics Resistant Bacterial Infections: A Review. *Biotechnology Reports*. Vol. 25. Hal. 1 – 11.
- Singh, A. P., Balayan, S., Gupta, S., Jain, U, Sarin, R. K., dan Chauhan, N. 2021. Detection of Pesticide Residues Utilizing Enzyme-electrode Interface Via Nano-patterning of TiO₂ Nanoparticles and Molybdenum Disulfide (MoS₂) Nanosheets. *Process Biochemistry*. Vol. 108. Hal. 185 – 193.
- Singh, G. V. 2015. Various Areas of Green Chemistry and Safer Environment: an Overview. *International Journal of Research in Applied, Natural, and Social Sciences*. Vol. 3. No. 3. Hal. 87 – 94.
- Singh, J., Dutta, T., Kim, K., Rawat, M., Samddar, P., dan Kumar, P. 2018. 'Green' Synthesis of Metals and Their Oxide Nanoparticles: Applications for Environmental Remediation. *Journal of Nanobiotechnology*. Vol. 16. No. 84. Hal. 1 – 24.
- Soundararajan, D. dan Kim, K. H. 2014. Synthesis of CoFe₂O₄ Magnetic Nanoparticles by Thermal Decomposition. *Journal of Magnetism*. Vol. 19. No. 1. Hal. 5 – 9.
- Stöber, W., Fink, A., dan Bohn, E. 1968. Controlled Growth of Monodisperse Silica Spheres in the Micron Size Range. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 26. No. 1. Hal. 62 – 69.
- Tim CancerHelps. 2019. *Stop Kanker*. PT. AgroMedia Pustaka. Jakarta. Hal. 1 – 10.
- Tim Riskesdas 2018. 2019. *Laporan Nasional Riskesdas 2018*. Lembaga Penerbit Badan Penelitian dan Pengembangan Kesehatan (LPB). Jakarta. Hal. 118 – 122.
- Twardowski, T. E. 2007. *Introduction to Nanocomposite Materials: Properties, Processing, Characterization*. DEStech Publications. Lancaster.
- Wells, A. F. 1945. *Structural Inorganic Chemistry*. Clarendon Press. Oxford.
- Wernsdorfer, W. 2005. *Classical and Quantum Magnetization Reversal Studied in*

Nanometer-Sized Particles and Clusters in Handbook of Advanced Magnetic Materials. Springer. Grenoble.

Winarno, F. G. 2018. *Tanaman Kelor (Moringa Oleifera): Nilai Gizi, Manfaat, dan Potensi Usaha*. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. Hal. 11 – 6.

Zarandi, A. A., Alvani, A. A., Salimi, R., Sameie, H., Moosakhani, S., Poelman, D., dan Rosei, F. 2015. Self-organization of an Optomagnetic $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-ZnS}$ Nanocomposite: Preparation and Characterization. *Journal of Materials Chemistry C*. Vol. 3. No. 16. Hal. 3935 – 3945.

Zhang, F., Su, R., Shi, L., Liu, Y., Chen, Y., dan Wang, Z. 2013. Hydrothermal Synthesis of CoFe_2O_4 Nanoparticles and their Magnetic Properties. *Advanced Materials Research*. Vol. 821 – 822. Hal. 1358 – 1361.

Zi, Z., Sun, Y., Zhu, X., Yang, Z., Dai, J., dan Song, W. 2009. Synthesis and Magnetic Properties of CoFe_2O_4 Ferrite Nanoparticles. *Jurnal of Magnetism and Magnetic Materials*. Vol. 321. No. 9. Hal. 1251 – 1255.