

**DETEKSI MAGNETIK LABEL *GREEN SYNTHESIZED* $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CHITOSAN}$
MENGUNAKAN SENSOR *GIANT MAGNETORESISTANCE* (GMR)**

Skripsi

Oleh:

Fanny Dwi Agustin

2117041023



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

DETEKSI MAGNETIK LABEL *GREEN SYNTHESIZED* Fe₃O₄/CHITOSAN MENGUNAKAN SENSOR *GIANT MAGNETORESISTANCE* (GMR)

Oleh

FANNY DWI AGUSTIN

Penelitian ini bertujuan mengetahui kemampuan nanopartikel Fe₃O₄/*chitosan* yang disintesis melalui metode *green synthesis* menggunakan ekstrak *Moringa oleifera* sebagai label magnetik pada sensor *Giant Magnetoresistance* (GMR). Sintesis dilakukan dengan memanfaatkan senyawa aktif *Moringa oleifera* sebagai agen pereduksi alami. Karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM) dilakukan untuk menganalisis struktur kristal dan sifat magnetik, sedangkan uji GMR digunakan untuk mengetahui sensitivitas dan linearitas sinyal terhadap variasi konsentrasi. Hasil XRD menunjukkan pelapisan Fe₃O₄ oleh *chitosan* menurunkan ukuran kristalit dan mengubah parameter kisi akibat interaksi gugus fungsional *chitosan* dengan permukaan Fe₃O₄. Nilai magnetisasi berkurang dari 48,9 emu/g menjadi 28,3 emu/g, sementara koersivitas menurun dari 59,2 Oe menjadi 57,9 Oe, menandakan bahwa material masih memiliki sifat magnetik lunak (*soft magnetic*) yang sesuai. Uji GMR memperlihatkan hubungan linier yang kuat dengan koefisien determinasi (R^2) 0,9787, menunjukkan sensitivitas tinggi sistem sensor. Dengan demikian, Fe₃O₄/*chitosan* hasil *green synthesis* berpotensi sebagai label magnetik ramah lingkungan untuk biosensor berbasis GMR.

Kata kunci: Fe₃O₄/*chitosan*, *green synthesis*, *Moringa oleifera*, XRD, VSM, GMR.

ABSTRACT

MAGNETIC DETECTION OF GREEN SYNTHESIZED Fe₃O₄/CHITOSAN LABELS USING GIANT MAGNETORESISTANCE (GMR) SENSOR

By

FANNY DWI AGUSTIN

This research aims to determine the capability of Fe₃O₄/chitosan nanoparticles synthesized through the green synthesis method using *Moringa oleifera* extract as a magnetic label on a Giant Magnetoresistance (GMR) sensor. The synthesis is carried out by utilizing the active compounds of *Moringa oleifera* as natural reducing agents. Characterization was performed using X-Ray Diffraction (XRD) and Vibrating Sample Magnetometer (VSM) to analyze the crystal structure and magnetic properties. Meanwhile, the GMR test was used to determine the sensitivity and linearity of the signal to variations in concentration. The XRD results showed that the Fe₃O₄ coating by chitosan reduced the crystallite size and changed the lattice parameters due to the interaction of the functional groups of chitosan with the Fe₃O₄ surface. The magnetization value decreased from 48.9 emu/g to 28,3 emu/g, while the coercivity decreased from 59,2 Oe to 57,9 Oe, indicating that the material still exhibited soft magnetic properties suitable for the application. The GMR test showed a strong linear relationship with a determination coefficient (R^2) of 0,9787, indicating high sensitivity of the sensor system. Thus, Fe₃O₄/chitosan produced by green synthesis has the potential to be an environmentally friendly magnetic label for GMR-based biosensors.

Keywords: Fe₃O₄/chitosan, green synthesis, *moringa oleifera*, XRD, VSM, GMR.

**DETEKSI MAGNETIK LABEL *GREEN SYNTHESIZED*
 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CHITOSAN}$ MENGGUNAKAN SENSOR *GIANT*
MAGNETORESISTANCE (GMR)**

Oleh
FANNY DWI AGUSTIN

Skripsi
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS

Pada
Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam UNIVERSITAS LAMPUNG



JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026

Judul Skripsi

Deteksi Magnetik Label Green
Synthesized $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$
Menggunakan Sensor Giant
Magnetoresistance (GMR)

Fanny Dwi Agustin

Nama Mahasiswa

2117041023

Nomor Pokok Mahasiswa

Fisika

Jurusan

Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Fakultas

MENYETEKUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing II

Pembimbing I

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

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

2. PLt. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

Dr. Junaidi, S.Si., M. Sc.
NIP. 198206182008121001

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, M.Si., Ph.D.**

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

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

Tanggal Ujian Skripsi: 22 Januari 2026

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “**Deteksi Magnetik Label Green Synthesized $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ Menggunakan Sensor Giant Magnetoresistance (GMR)**” ini sepenuhnya karya dari saya sendiri. Tidak ada bagian yang didalamnya terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepengetahuan saya tidak ada karya atau pendapat yang dituliskan atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam skripsi ini sebagaimana disebutkan dalam Daftar Pustaka. Apabila ada pernyataan saya yang tidak benar, maka saya bersedia diberi sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 22 Januari 2026



Fanny Dwi Agustin
NPM. 2117041023

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Fanny Dwi Agustin, lahir di Sungai Langka pada tanggal 06 Agustus 2003. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Jarwo dan Ibu Siti Fatimah. Penulis memulai pendidikan di Sekolah Dasar di SD N 54 Sungai Langka yang diselesaikan pada tahun 2015. Kemudian melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 1 Gedong Tataan dan lulus pada tahun 2018. Setelah itu, penulis menempuh pendidikan menengah atas di SMAN 1 Gedong Tataan dengan Jurusan Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) yang diselesaikan pada tahun 2021. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan perkuliahan. Penulis terdaftar sebagai mahasiswi Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN dengan mengambil konsentrasi pada bidang Fisika Material.

Selama menjadi mahasiswi, penulis aktif dalam beberapa kegiatan organisasi maupun kepanitian. Penulis menjadi pengurus Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) sebagai anggota bidang Kaderisasi pada tahun 2021-2023. Tak hanya itu, penulis juga aktif sebagai pengurus Forum Komunikasi Bidikmisi/KIP-K Universitas Lampung sejak tahun 2021 hingga 2024, dimana penulis turut berperan dalam berbagai kegiatan yang mendukung pengembangan *soft skill* dan solidaritas antar penerima beasiswa. Penulis juga pernah menjadi asisten praktikum pada mata kuliah Fisika Eksperimen. Pada tahun 2024 penulis

melakukan pengabdian masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung Periode II di Desa Kedaton, Kecamatan Batang Hari Nuban, Kabupaten Lampung Timur, Lampung. Penulis telah menyelesaikan kegiatan Praktik Kerja Lapangan (PKL) dengan judul “**Deteksi Nanopartikel Magnetik *Green Synthesized* Fe₃O₄ Menggunakan Sensor *Giant Magnetoresistance* Berbasis Lapisan Tipis *Spin-Valve*”** di Laboratorium Fisika Material dan Instrumentasi UGM pada tahun 2023. Kemudian melanjutkan penelitian Tugas Akhir di tempat yang sama pada tahun 2024 di bidang Material dengan judul “**Deteksi Magnetik Label *Green Synthesized* Fe₃O₄/*chitosan* Menggunakan Sensor *Giant Magnetoresistance* (GMR)”**”.

MOTTO

“Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah nasib suatu kaum, sehingga mereka mengubah keadaan yang ada pada diri mereka sendiri.”

(Q.S Ar-Ra’d:11)

“Keberhasilan bukanlah milik orang pintar, keberhasilan adalah milik mereka yang senantiasa berusaha”

(BJ Habibie)

“Tidak ada rasa bersalah yang dapat mengubah masa lalu, dan tidak ada rasa khawatir yang dapat mengubah masa depan”

(Umar Bin Khattab)

“You’re always one decision away from a completely different life. Dalam momen apapun itu kita itu selalu bisa mengubah hidup kita secara besar hanya dengan satu perubahan atau satu langkah kecil”

(Maudy Ayunda)

"Hard work is important, but there is something even more important... believing in yourself."

(Harry Potter)

“Akan ada kesempatan untuk orang yang ingin berusaha”

Penulis

PERSEMBAHAN

Segala puji hanya untuk Allah SWT atas rahmat-Nya, karya ini dapat terselesaikan dan penulis persembahkan

Kepada

KEDUA ORANG TUA KU TERCINTA
BAPAK JARWO DAN IBU SITI FATIMAH

“Terimakasih yang mendalam kepada Bapak dan Ibu tercinta atas doa, kasih sayang, sehingga penulis berhasil menyelesaikan pendidikan di Universitas Lampung sebagai seorang Sarjana Sains”

KERABAT
KELUARGA BESAR MBAH PAERAN DAN MBAH MUSINI

“Terimakasih atas segala do’a, motivasi dan semangat yang selalu diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan di Universitas Lampung”

TEMAN TEMAN SEPERJUANGAN
FORKOM BIDIKMISI/KIP-K 2021 & FISIKA ANGKATAN 2021

“Terimakasih untuk bantuan, dukungan dan kebersamaan selama perkuliahan”

ALMAMATER TERCINTA
UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya sampai saat ini penulis diberikan kesehatan, kekuatan, dan hikmah sehingga dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Deteksi Magnetik Label *Green Synthesized Fe₃O₄/chitosan* Menggunakan Sensor *Giant Magnetoresistance (GMR)*”** dengan baik. Shalawat dan salam semoga tercurah kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan para sahabatnya yang telah membawa kita ke jalan ilmu dan pengetahuan. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada bidang Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwasanya penyajian skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Maka dari itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak demi perbaikan dan penyempurnaan skripsi ini. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat menjadi rujukan untuk penelitian selanjutnya agar lebih sempurna dan dapat memperkaya ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 22 Januari 2026

Penulis,

Fanny Dwi Agustin

SANWACANA

Puji Syukur saya panjatkan ke hadirat Allah SWT. Karena berkat Rahmat dan karunia-Nya sampai saat ini penulis diberikan Kesehatan, kekuatan, dan hikmah sehingga dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Deteksi Magnetik Label *Green Synthesized Fe₃O₄/chitosan* Menggunakan Sensor *Giant Magnetoresistance (GMR)*”**. Terwujudnya skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan rasa hormat, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Pertama yang telah banyak memberikan bimbingan, ilmu, nasihat dan masukan dalam penulisan skripsi juga selama masa studi di Jurusan Fisika.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Edi Suharyadi, S.Si., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing Kedua yang telah banyak memberikan saran, fasilitas dan arahan dalam penelitian dan penulisan skripsi ini.
3. Bapak Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D., selaku Pembahas yang telah memberi masukan dan saran dalam penulisan skripsi sehingga penulisan skripsi ini dapat menjadi lebih baik.
4. Bapak Drs. Pulung Karo Karo, M.Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik.
5. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
6. Seluruh Dosen Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan bekal ilmu yang bermanfaat selama masa studi di S1 Fisika FMIPA Universitas Lampung.

7. Seluruh pegawai administrasi dan staf Jurusan Fisika FMIPA yang telah membantu dalam urusan administrasi selama studi di S1 Fisika.
8. Kedua orang tua tercinta, Bapak Jarwo dan Ibu Siti Fatimah yang selalu memberikan do'a, nasihat, motivasi, kasih sayang dan dukungan moral untuk keberhasilan studi penulis.
9. Kakak-kakakku tercinta Basteo dan Fadila Agustyani yang selalu mendengarkan, memberi semangat dan menghibur penulis.
10. Seluruh teman-teman ES-Club atas bantuan, arahannya selama penelitian. terutama kepada Mbak Shania Garcia yang telah sabar membimbing dan menemani penulis selama penelitian
11. Kepada sahabat-sahabat tersayang Nirmala, Faris serta Parana Mahardika yang memberikan penguat emosional, *support*, motivasi dan bantuan selama penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP.....	vii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR.....	xi
SANWACANA.....	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL	xiii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Masalah	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Nanopartikel	7
2.2 Magnetit Fe ₃ O ₄	9
2.3 <i>Moringa oliefera</i> (MO)	11
2.4 Polimer <i>Chitosan</i>	13
2.5 <i>Giant Magnetoresistance</i> (GMR)	15

2.6	Karakterisasi dan Analisis Data.....	17
2.6.1	Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	17
2.6.2	Karakterisasi <i>Vibrating Sample Magnetometer</i> (VSM).....	20
III.	METODE PENELITIAN	22
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	22
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	22
3.2.1	Alat Penelitian	22
3.2.2	Bahan Penelitian	23
3.3	Prosedur Penelitian	23
3.3.1	Sintesis <i>Moringa oliefera</i> (MO)	24
3.3.2	Sintesis Nanopartikel Fe ₃ O ₄	24
3.3.3	Modifikasi Nanopartikel Fe ₃ O ₄ dengan <i>chitosan</i>	25
3.3.4	Pengujian Sensor	26
3.3.4.1	Pengujian Kalibrasi Sensor.....	26
3.3.4.2	Pengujian Nanopartikel Magnetit dengan Sampel Fe ₃ O ₄ / <i>chitosan</i>	27
3.3.5	Diagram Alir.....	28
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1	Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	29
4.2	Hasil Karakterisasi <i>Vibrating Sample Magnetometer</i> (VSM).....	32
4.3	Hasil Pengujian Sistem Sensor GMR dengan <i>Chip</i> NVE AAL024	33
4.3.1	Pengaruh Berulang Fe ₃ O ₄ / <i>chitosan</i>	33
4.3.2	Pengaruh Konsentrasi Fe ₃ O ₄ / <i>chitosan</i> terhadap Keluaran Sinyal Sensor GMR.....	35
4.3.3	Standar Deviasi Sinyal Fe ₃ O ₄ / <i>chitosan</i> Pada Sensor GMR	36
V.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	39
5.1	Kesimpulan.....	39
5.2	Saran.....	40
	DAFTAR PUSTAKA.....	41
	LAMPIRAN	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur kristal spinel Fe_3O_4 ,	10
Gambar 2.2 Sinar-X pada bidang (Bragg., 1913)	17
Gambar 3.1 Skematik sintesis nanopartikel (a) Pembuatan larutan MO (b) Pembuatan nanopartikel Fe_3O_4 (c) Modifikasi permukaan Fe_3O_4 dengan <i>chitosan</i>	26
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian.....	28
Gambar 4.1 Grafik XRD Fe_3O_4 dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$	29
Gambar 4.2 Kurva histerisis Fe_3O_4 dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$	32
Gambar 4.3 Pengukuran berulang $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ pada sensor GMR.....	34
Gambar 4.4 Pengaruh konsentrasi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ terhadap sinyal sensor GMR	35
Gambar 4.5 Standar deviasi sinyal $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ pada sensor GMR.....	37

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Alat Penelitian	22
Tabel 3.2 Bahan Penelitian	23
Tabel 4.1 Hasil Analisis XRD Sampel Fe_3O_4 dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$	31
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Parameter Magnetik Sampel Fe_3O_4 dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$	32

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Biosensor adalah alat yang mendeteksi zat tertentu dengan menganalisis bahan biologis. Biosensor bekerja dengan mendeteksi perubahan fisik atau kimia yang terjadi ketika zat yang diukur berinteraksi dengan sensor. Secara umum, biosensor menggunakan berbagai jenis teknologi seperti sensor berbasis elektrokimia, magnetik, optik, dan kalorimeter (Lim dan Ahmed., 2016). Biosensor sangat bermanfaat, khususnya dalam bidang kesehatan karena memungkinkan pendeteksian yang cepat, akurat, dan murah. Ada beberapa jenis sensor yang cocok untuk mendeteksi zat biologis, yaitu: *Giant Magnetoresistance* (GMR), *Anisotropic Magnetoresistance* (AMR), *Magnetic Tunnel Junction*, *Superconducting Quantum Interference Device*, *Flux Gate*, dan *Hall Effect* (Sun *et al.*, 2016).

Pada awalnya, sensor GMR digunakan dalam teknologi penyimpanan data, seperti: *hard drive* dan memori magnetik. Namun, sejak tahun 1998, sensor GMR telah diterapkan pada biosensor karena kemampuannya mendeteksi zat biomolekul dalam biosensor (Baselt *et al.*, 1998). Sensor GMR memiliki banyak keunggulan jika digunakan sebagai biosensor, seperti: sensitivitasnya yang tinggi sehingga mampu mendeteksi zat dalam jumlah yang sangat kecil, portabilitas (mudah dibawa dan digunakan di berbagai tempat), biaya produksi rendah, stabilitas termal yang baik, tidak mudah rusak oleh perubahan suhu, mampu mendeteksi biomolekul secara cepat, secara *real time*, konsumsi daya rendah dan dapat diproduksi dalam jumlah banyak (Lee *et al.*, 2002).

Dibandingkan dengan sensor AMR dan sensor *hall effect*, sensor GMR memiliki keunggulan karena mampu beroperasi pada medan magnet yang lebih rendah dan tetap menghasilkan sinyal keluaran yang lebih kuat (Djamal dan Ramli, 2017). Sebagai biosensor, sensor GMR bekerja dengan cara mendeteksi medan magnet yang dihasilkan nanopartikel Fe_3O_4 yang ditempatkan pada permukaan sensor (Wang *et al.*, 2014).

Medan magnet eksternal yang mempengaruhi lapisan magnet di sensor GMR yang disebut “*free layer*”. Ketika medan magnet berinteraksi dengan lapisan bebas, maka resistansi pada *chip* sensor akan meningkat. Sensor GMR sangat sensitif terhadap medan magnet yang sejajar dengan lapisan magnet, sehingga dapat mendeteksi perubahan kecil medan magnet secara efektif. Dengan kata lain, sensor GMR dapat mendeteksi medan magnet yang sangat kecil dengan akurasi tinggi, menjadikannya alat yang ampuh untuk aplikasi biosensor (Zhang *et al.*, 2019).

Nanopartikel Fe_3O_4 (magnetit) dikembangkan sebagai label dalam biosensor karena memiliki sifat magnetik yang sangat baik. Fe_3O_4 mempunyai ukuran yang kecil, magnetisasi saturasi yang tinggi (kemampuan mencapai tingkat magnetisasi maksimum) (M_s), dan magnetisasi remanen yang termasuk tinggi untuk feromagnetik (kemagnetan sisa setelah medan magnet luar dihilangkan) (M_r) (Xu Jie *et al.*, 2016). Ukurannya yang kecil juga membuat nanopartikel Fe_3O_4 sebanding dengan molekul biologis, dan memiliki toksisitas rendah serta aman digunakan. Namun, karena sifat kemagnetan Fe_3O_4 yang tinggi, nanopartikel Fe_3O_4 juga mempunyai kelemahan yaitu rentan terhadap penggumpalan (*aglomerasi*) dan oksidasi sehingga mengakibatkan kurangnya dispersi atau kurangnya penyebaran material, yang pada akhirnya mengurangi efektivitasnya dalam berbagai aplikasi (Morgunov *et al.*, 2020).

Hal ini dapat mengurangi efektivitasnya dalam beberapa aplikasi. Untuk mengatasi masalah penggumpalan (*aglomerasi*), nanopartikel Fe_3O_4 perlu dimodifikasi permukaannya agar partikel terdispersi lebih baik (Morgunov *et al.*, 2020). Salah satunya adalah dengan melapisi permukaan nanopartikel Fe_3O_4 ,

terdapat berbagai macam bahan yang dapat digunakan untuk melapisi nanopartikel Fe_3O_4 , seperti: logam (emas (Au) dan perak (Ag) (Norouz *et al.*, 2015)), polimer (*chitosan*, *polietilen glikol* (PEG), *polivinil alkohol*, dan *polivinil asetat* (Haddad *et al.*, 2016).

Bahan-bahan yang ditambahkan berfungsi sebagai agen stabilitas, untuk mencegah partikel saling menempel dan memastikan partikel tetap tersebar merata dalam suatu medium. Dengan meningkatkan dispersi (penyebaran) partikel, membantu nanopartikel Fe_3O_4 tetap dalam ukuran nano yang optimal, sehingga lebih efisien dalam aplikasinya, misalnya dalam mendeteksi atau interaksi dengan target biologis (Song *et al.* 2022).

Sebelumnya, nanopartikel Fe_3O_4 dibuat menggunakan metode konvensional. Namun, metode ini memiliki banyak kelemahan, seperti: penggunaan bahan kimia atau bahan pereduksi yang mahal dan menghasilkan limbah berbahaya. Seiring berjalannya waktu, para peneliti mencari cara yang lebih ramah lingkungan untuk membuat nanopartikel Fe_3O_4 . Salah satu alternatif yang muncul adalah penggunaan metode *green synthesis*. Metode *green synthesis* menggunakan bahan-bahan alami, seperti: ekstrak tumbuhan, jamur dan bakteri untuk menghasilkan nanopartikel (Singh *et al.*, 2018).

Metode *green synthesis* tidak hanya lebih ramah lingkungan, tetapi juga dapat menjadi solusi yang lebih aman dan ekonomis untuk pembuatan nanopartikel Fe_3O_4 (Zhu *et al.*, 2019). Metode ini memiliki beberapa keunggulan seperti tidak beracun, berbiaya rendah, dan mengurangi limbah produksi. Oleh karena itu, metode ini merupakan pilihan tepat untuk menghasilkan nanopartikel Fe_3O_4 yang ramah lingkungan, namun tetap memiliki daya magnet tinggi (Ramesh *et al.*, 2018).

Penelitian Garcia *et al.*, (2024) berhasil mengembangkan biosensor inovatif berbasis nanopartikel Fe_3O_4 /*chitosan* menggunakan metode *green synthesis*.

Biosensor ini memanfaatkan sensor GMR dengan konfigurasi *spin valve* dan rangkaian Jembatan Wheatstone, yang secara signifikan meningkatkan sensitivitas dalam mendeteksi biomolekul melalui perubahan medan magnet yang dihasilkan oleh nanopartikel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor GMR mampu mendeteksi nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ dengan sensitivitas tinggi dan akurasi yang sangat baik. Selain itu, biosensor berbasis GMR ini juga memiliki stabilitas pengukuran yang luar biasa, karena gangguan medan magnet eksternal berhasil diminimalkan. Dengan keunggulan tersebut, biosensor ini menawarkan potensi besar untuk aplikasi di bidang biomedis, terutama dalam diagnosis penyakit berbasis magnetik. Teknologi ini tidak hanya efisien dan akurat, tetapi juga lebih ramah lingkungan, menjadikannya solusi berkelanjutan untuk kebutuhan medis masa depan (Garcia *et al.*, 2024).

Pada penelitian ini melakukan karakterisasi sensor dengan variasi konsentrasi 5, 10, 15, 20, dan 25 mg/ml pada $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ pada nanopartikel Fe_3O_4 yang diperoleh melalui metode *green synthesis* menggunakan ekstrak *Moringa oleifera* (MO). Nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ sebagai penanda magnetik (label magnetik) untuk mendeteksi konsentrasi biomolekul tertentu melalui perubahan medan magnet yang dapat dideteksi oleh sensor GMR. Selain itu, penelitian ini didukung oleh karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk menganalisis struktur kristal nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ dan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM) untuk mengukur sifat magnetik dari nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$. Uji sensor GMR sendiri dilakukan untuk menguji kinerja sensor dalam mendeteksi perubahan medan magnet yang dihasilkan oleh interaksi dengan biomolekul target, serta untuk memastikan bahwa metode *green synthesis* yang digunakan menghasilkan kemampuan aplikasi yang memiliki nilai sensitivitas dan linieritas yang tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana struktur kristal dan sifat kemagnetan material nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ hasil sintesis berdasarkan karakterisasi menggunakan XRD dan VSM?
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ terhadap linieritas?
3. Bagaimana pengaruh konsentrasi nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ terhadap sensitivitas?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui struktur kristal dan sifat kemagnetan material nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ hasil sintesis berdasarkan karakterisasi menggunakan XRD dan VSM.
2. Mengetahui pengaruh konsentrasi nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ terhadap linieritas.
3. Mengetahui pengaruh konsentrasi nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ terhadap sensitivitas.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini menggunakan sensor GMR model NVE AAL024 untuk mengevaluasi performa deteksi nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$.
2. Perubahan resistansi listrik pada sensor GMR hanya dianalisis berdasarkan interaksi medan magnet yang dihasilkan oleh lachibel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$, tanpa mempertimbangkan faktor eksternal seperti: gangguan medan magnet lingkungan atau suhu.
3. Karakterisasi pendukung dilakukan menggunakan XRD untuk menganalisis struktur kristal dan VSM untuk menentukan sifat magnetik nanopartikel.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Mengembangkan teknologi deteksi berbasis GMR yang efisien dan presisi tinggi untuk aplikasi biomolekul, mendorong metode *green synthesis* yang ramah lingkungan dalam produksi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$, serta memperdalam pemahaman struktur kristal dan sifat magnetiknya melalui karakterisasi XRD dan VSM.
2. Sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.
3. Sebagai tambahan referensi di Jurusan Fisika FMIPA di Universitas Lampung, terutama bidang KBK Fisika Material.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Nanopartikel

Nanopartikel merupakan partikel yang memiliki ukuran dalam rentang 1-100 nm dan memiliki sifat unik yang berbeda dari bahan skala makro, terutama karena rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat tinggi dan efek kuantum. Nanopartikel dapat diklasifikasikan berdasarkan asalnya menjadi nanopartikel alami, *Incidental*, dan *engineered* (buatan). Nanopartikel alami terbentuk secara biologis atau geologis seperti partikel debu vulkanik atau virus. Nanopartikel *incidental* yang dihasilkan sebagai produk sampingan dari proses industri, seperti: asap kendaraan atau pembakaran bahan bakar fosil. Nanopartikel *engineered* sengaja dibuat dan dirancang untuk aplikasi tertentu, seperti dalam bidang kedokteran, elektronik, dan lingkungan. Berbagai jenis nanopartikel *engineered* termasuk nanopartikel logam (emas dan perak), logam oksida (ZnO dan TiO₂) dan nanopartikel polimer (Jeevandam *et al.*, 2018).

Sifat fisik, kimia dan mekanik nanopartikel seperti: reaktivitas kimia, kekuatan mekanik, dan sifat optik sering kali berbeda signifikan dibandingkan dengan material bulk, menjadikannya sangat berharga dalam berbagai aplikasi inovatif. Sifat unik nanopartikel, seperti: ukuran kecil, luas permukaan besar, dan reaktivitas tinggi, membuka peluang untuk berbagai aplikasi dalam ilmu material, farmasi, elektronik, dan lingkungan. Dalam bidang biomedis, nanopartikel digunakan sebagai agen pembawa obat (*drug delivery system*), agen kontras untuk pencitraan dan dalam terapi kanker melalui metode *photothermal* atau *photodynamic therapy* (Farokhzad dan Langer, 2009).

Dalam industri elektronik, nanopartikel diterapkan pada pembuatan transistor *miniature*, sensor dan komponen elektronik lainnya berkat kemampuan nanopartikel untuk meningkatkan performa dan efisiensi perangkat. Selain itu, nanopartikel logam oksida seperti titanium dioksida dan seng oksida digunakan dalam kosmetik dan produk perawatan kulit sebagai agen pelindung sinar UV. Dalam konteks lingkungan, nanopartikel memiliki potensi besar untuk remedi polusi air dan udara, seperti: penyerapan logam berat dan degradasi senyawa organik berbahaya (Zhang *et al.*, 2023).

Nanopartikel memiliki sifat multifungsi yang menjadikannya komponen penting dalam pengembangan masa depan. Dengan potensi aplikasinya yang di berbagai bidang, seperti: biomedis, energi, dan lingkungan, nanopartikel menawarkan solusi inovatif. Namun, tantangan utama yang perlu di atas adalah memastikan keamanan penggunaan bagi manusia dan lingkungan. Salah satu isu utama adalah toksisitas nanopartikel terhadap organisme hidup dan lingkungan, yang bergantung pada ukuran bentuk, komposisi kimia, dan kecenderungan aglomerasi nanopartikel untuk berkumpul menjadi partikel yang lebih besar (Fadeel *et al.*, 2013).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa nanopartikel tertentu dapat menembus membran sel dan mengganggu fungsi biologis, menyebabkan stress oksidatif, peradangan, dan bahkan kerusakan genetik. Oleh karena itu, penting untuk melakukan evaluasi risiko yang menyeluruh sebelum penggunaan komersial nanopartikel dalam produk konsumen atau aplikasi lingkungan. Prospek penggunaan nanopartikel akan sangat bergantung pada kemampuan ilmuwan untuk mengembangkan metode sintesis yang ramah lingkungan dan aman serta pemahaman yang lebih baik tentang interaksi nanopartikel dengan sistem biologis dan ekosistem. Dengan regulasi yang tepat dan penelitian lanjutan, nanopartikel memiliki potensi untuk merevolusi berbagai industri sambil meminimalkan dampak negatifnya terhadap kesehatan lingkungan (Nel, 2006).

Sintesis dan karakterisasi nanopartikel merupakan langkah penting dalam menentukan sifat dan aplikasinya. Metode sintesis nanopartikel yang secara

umum dapat dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu: metode *top-down* dan *bottom up*. Metode *top-down* melibatkan pengurangan ukuran material *bulk* menjadi nanopartikel melalui teknik seperti: milling, *lithography*, dan laser ablation. Sementara itu, metode *bottom-up* mengandalkan pembentukan nanopartikel dari atom atau molekul melalui proses seperti: presipitasi, sol-gel, dan reduksi kimia (Khan dan Khan, 2017).

Pemilihan metode sintesis dalam pembuatan nanopartikel, sangat bergantung pada jenis nanopartikel yang ingin dihasilkan. Metode yang dipilih akan mempengaruhi ukuran, distribusi ukuran partikel dan sifat permukaan nanopartikelnya. Setelah sintesis, karakterisasi nanopartikel menjadi langkah penting untuk memahami morfologi (bentuk dan struktur), ukuran, komposisi, dan sifat-sifat permukaan nanopartikel. Teknik karakterisasi yang sering digunakan adalah: *Transmission Electron Microscope* (TEM), *Scanning Electron Microscope* (SEM), dan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk struktur kristal (Bhattacharje, 2016).

2.2 Magnetit Fe_3O_4

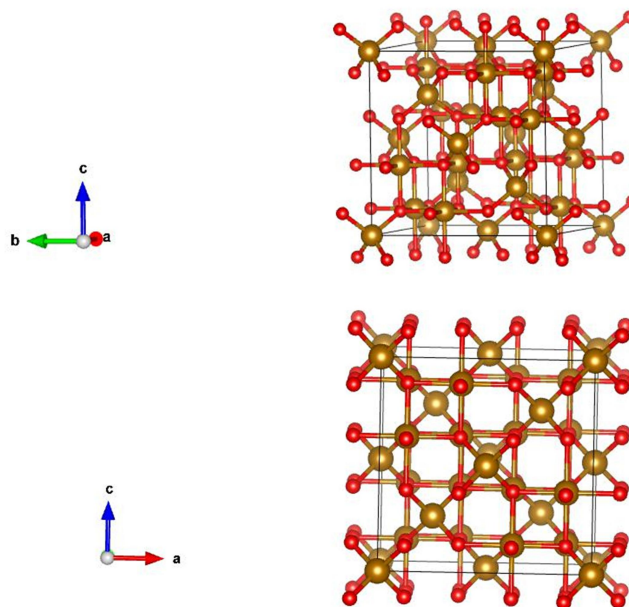
Magnetit Fe_3O_4 adalah oksida besi yang dikenal sebagai salah satu mineral dengan sifat feromagnetik yang paling kuat. Partikel magnetit memiliki struktur kristal spinel invers dimana ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} tersusun sedemikian rupa sehingga memberikan sifat magnet yang kuat. Fe_3O_4 menunjukkan feromagnetisme pada suhu di bawah titik Curiannya, sekitar 858 K, yang berarti dapat mempertahankan sifat magnetiknya dalam berbagai kondisi suhu (Cornell dan Schwertmann, 2003).

Magnetit juga memiliki sifat unik seperti konduktivitas listrik yang tinggi dibandingkan dengan oksida besi lainnya, menjadikannya material yang ideal untuk aplikasi dalam bentuk elektronik dan magnetik. Selain itu, Fe_3O_4 sering ditemukan dalam bentuk nanopartikel, dimana partikel hanya menunjukkan magnetisasi ketika ada medan magnet eksternal dan kembali non-magnetik ketika medan dihilangkan. Sifat ini sangat berguna untuk aplikasi di bidang biomedis dan sensorik (Basenard *et al.*, 2020). Nanopartikel magnetit dapat disintesis melalui berbagai metode, antara lain: metode presipitasi kimia, sol gel, dan

thermal decomposition. Presipitasi kimia termasuk metode yang paling umum digunakan karena ion besi (Fe^{2+} dan Fe^{3+}) direaksikan dengan basa seperti amonia atau natrium hidroksida dalam kondisi terkontrol untuk menghasilkan Fe_3O_4 (Wang *et al.*, 2014).

Keuntungan dari metode ini adalah kesederhanaannya, efisiensi biaya, dan kemampuan untuk mengontrol ukuran partikel melalui penyesuaian pH, suhu, dan konsentrasi prekursor. Metode lain seperti: sol gel memungkinkan pembentukan partikel dengan ukuran yang sangat seragam dan kontrol yang lebih baik atas morfologi. Karakterisasi nanopartikel magnetit sering dilakukan menggunakan teknik. seperti: XRD untuk menganalisis struktur kristal, TEM untuk melihat morfologi partikel, dan VSM untuk menentukan sifat magnetik (Laurent *et al.*, 2008).

Pengendalian yang baik atas proses sintesis memungkinkan pengembangan nanopartikel magnetit yang dioptimalkan untuk berbagai aplikasi teknologi. Nanopartikel magnetit telah menemukan aplikasi luas dalam bidang biomedis, termasuk sebagai agen kontras dalam pencitraan resonansi magnetik (MRI), pembawa obat dalam terapi kanker, dan dalam teknologi hipertermia magnetik, dimana partikel dipanaskan untuk membunuh sel kanker (Gupta dan Gupta. 2005)



Gambar 2.1 Struktur kristal spinel Fe_3O_4 .

Fe_3O_4 memiliki struktur kristal spinel terbalik dengan ion O^{2-} membentuk kisi *face centered cubic* (FCC). Satu unit sel terdiri dari 32 ion O^{2-} dengan panjang unit sel. Fe_3O_4 berbeda dari kebanyakan ion besi oksida lainnya karena mengandung besi divalen dan trivalent, yang dapat dirumuskan sebagai $[\text{Fe}^{3+}]_A [\text{Fe}^{2+} \text{Fe}^{3+}]_B \text{O}_4$. Setengah dari Fe^{3+} menempati posisi tetrahedral sementara setengah lainnya, bersama dengan Fe^{2+} , menempati posisi oktahedral. seperti diilustrasikan pada Gambar 2.1. Oleh karena itu, struktur Fe_3O_4 terdiri dari gabungan antara tetrahedral dan oktahedral (Cornell dan Schwertmann, 2006).

2.3 *Moringa oleifera* (MO)

Moringa oleifera atau dikenal juga sebagai pohon kelor adalah tumbuhan tropis yang berasal dari India dan telah tersebar luas di berbagai negara tropis dan subtropis. Tumbuhan ini dikenal sebagai “pohon kehidupan” karena semua bagiannya (daun, biji, kulit batang, dan akar) dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, mulai dari pangan hingga pengobatan tradisional, daun MO sangat kaya akan nutrisi, seperti: vitamin A, vitamin C, kalsium, dan zat besi, serta memiliki sifat antioksidan, anti-inflamasi, dan antimikroba (Anwar *et al.*, 2007).

Moringa oleifera memiliki kandungan minyak yang tinggi dan kaya akan asam lemak esensial, sementara polipeptida dalam biji diketahui memiliki kemampuan untuk mengklarifikasi air dengan mengendapkan partikel tersuspensi. Ekstrak dari berbagai bagian pohon MO digunakan dalam produk kesehatan dan kecantikan, serta dalam pengobatan herbal untuk kondisi, seperti: malnutrisi, infeksi, dan peradangan. Keanekaragaman komponen bioaktif dalam MO membuatnya menjadi subjek penelitian intensif untuk mengembangkan aplikasi baru dalam biomedis dan teknologi lingkungan (Fahey, 2005).

Ekstraksi senyawa bioaktif dari MO dilakukan melalui berbagai metode, seperti: ekstraksi pelarut, ekstraksi, ultrasonik, dan ekstraksi, *supercritical* CO_2 untuk mendapatkan senyawa dengan kemurnian tinggi. Ekstrak daun MO kaya akan flavonoid, polifenol, dan asam fenolik yang berperan sebagai antioksidan dan

memiliki potensi untuk menghambat radikal bebas. Ekstrak MO mengandung protein keunggulan yang efektif dalam proses pemurnian air, yang bekerja dengan mengurangi kekeruhan dan menghilangkan bakteri patogen (Vergara-Jimenez *et al.*, 2017). Minyak MO yang dikenal sebagai minyak ben, memiliki kandungan asam foleat yang tinggi dan digunakan dalam industri kosmetik serta sebagai minyak makan yang sehat. Polimer alami dan senyawa aktif dari MO juga telah dieksplorasi untuk aplikasi biomedis, seperti: pengobatan kanker, diabetes, dan penyakit kardiovaskular karena efek sitotoksik dan regulasi metabolismenya. Inovasi dalam pemrosesan dan pemurnian ekstrak MO terus berkembang untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas produk, memperluas aplikasi potensial dalam farmasi, Makanan, dan *nutraceutical* (Leone *et al.*, 2016).

Moringa oleifera memiliki peran penting dalam aplikasi lingkungan, terutama dalam teknologi pemurnian air. Biji MO mengandung protein kationik yang dapat mengikat partikel koloid bermuatan negatif dalam air, sehingga menyebabkan flokulasi dan mempermudah proses pengendapan partikel. Teknologi ini telah digunakan secara luas di negara berkembang sebagai solusi yang efektif dan ramah lingkungan untuk memurnikan air minum dari kekeruhan, bakteri, dan kontaminan organik (Muyibi dan Evison, 1995).

Selain itu, residu dari proses ekstraksi minyak MO juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan pakan ternak atau pupuk organik, mendukung konsep *zero waste* dan pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan. Dalam aplikasinya sebagai adsorben serbu MO yang efektif dalam mengadsorpsi logam berat, seperti: timbal, kadmium, dan arsenik dari air tercemar. Sifat multifungsi dan kemudahan penggunaannya menjadikan MO sebagai bahan yang menarik untuk diterapkan dalam solusi teknologi berkelanjutan yang dapat mengatasi tantangan lingkungan global, seperti: akses terhadap air bersih dan pengolahan limbah (Ndabigengsere *et al.*, 1995).

Baru baru ini, ekstrak dan bahan dari MO mulai dieksplorasi untuk aplikasi dalam teknologi sensor, termasuk sensor GMR. GMR adalah teknologi sensor yang mendeteksi perubahan resistansi listrik sebagai respons terhadap medan magnet,

digunakan dalam aplikasi, seperti: pembacaan data digital dan biosensor. Dalam konteks GMR, bahan organik seperti: polimer dari MO dapat digunakan sebagai matriks untuk imobilisasi nanopartikel magnetik Fe_3O_4 , meningkatkan stabilitas dan biokompatibilitas sensor (Matshediso *et al.*, 2015).

Ekstrak polipeptida dari MO, yang memiliki sifat pengikatan yang baik, dapat digunakan untuk fungsionalisasi permukaan sensor, meningkatkan selektivitas dan sensitivitas deteksi target biomolekul, seperti: protein atau patogen. Penggunaan material berbasis MO dalam sensor GMR menawarkan solusi ramah lingkungan dan hemat biaya, dengan potensi pengembangan dalam diagnostik medis dan aplikasi pemantauan lingkungan. Integrasi teknologi bahan alami dalam sensor GMR tidak hanya meningkatkan kinerja perangkat tetapi juga mendukung pengembangan teknologi yang lebih hijau dan berkelanjutan (Vongsak *et al.*, 2016).

2.4 Polimer *Chitosan*

Chitosan adalah polimer alami yang diperoleh melalui deasetilasi kitin, bahan utama *eksoskeleton crustacea* dan dinding sel jamur, serta polimer kedua terbanyak di alam setelah selulosa. Dengan struktur unit glukosamin yang terhubung melalui ikatan $\beta - (1 \rightarrow 4)$, *chitosan* memiliki sifat yang ramah terhadap tubuh (biokompatibel), dapat terurai secara alami (*biodegradable*), dan tidak beracun, menjadikannya ideal untuk aplikasi biomedis dan industri (Rinaudo, 2006).

Sifat multifungsi dari polimer *chitosan*, seperti: mampu membentuk film, *hydrogel*, nanopartikel, sifat antimikroba, serta mampu sebagai adsorben, membuatnya sangat bernilai. Modifikasi *chitosan*, seperti: penambahan gugus karboksimetil atau sulfat, meningkatkan kelarutannya dalam larutan asam dan aktivitas biologisnya. Muatan positif *chitosan* pada pH rendah memungkinkan berinteraksi dengan molekul bermuatan negative, seperti: *Deoxyribonucleic Acid* (DNA), menjadikannya unggul untuk penghantaran obat dan pemasaran (Kumar, 2000).

Sintesis *chitosan* dari kitin melibatkan proses deasetilasi yang menghilangkan gugus *asetil* dari unit *N-asetilglukosamin kitin*, menghasilkan struktur dengan amina bebas. Proses ini dilakukan dengan perlakuan basa kuat, seperti: natrium hidroksida, pada suhu tinggi, dan derajat deasetilasi (DD) yang dihasilkan mempengaruhi sifat fisik dan kimia *chitosan*. Semakin tinggi DD, semakin banyak gugus amina yang tersedia. *Chitosan* memiliki kelarutan tinggi dalam larutan asam, memungkinkan interaksi elektrostatik yang kuat dengan molekul bermuatan negatif, seperti: DNA atau protein (Domard, 2011).

Modifikasi kimia *chitosan* dapat dilakukan melalui berbagai reaksi, seperti: *grafting*, *cross-linking*, dan konjugasi dengan polimer lain atau nanopartikel untuk memperluas aplikasinya. Salah satu modifikasi penting adalah pembentukan nanopartikel *chitosan*, yang dapat dilakukan melalui teknik ionik gelation menggunakan agen pengikat silang, seperti: tripolifosfat (TPP). Nanopartikel *chitosan* menunjukkan ukuran partikel yang kecil, distribusi ukuran yang sempit, dan muatan permukaan positif (Kulkarni *et al.*, 2022). Modifikasi lebih lanjut dengan zat, seperti: magnetit Fe_3O_4 dapat meningkatkan sifat fungsional *chitosan* untuk aplikasi teknologi canggih, seperti: sensor. *Chitosan* telah digunakan luas dalam aplikasi biomedis, termasuk penghantar obat, pembalut luka, dan rekayasa jaringan, karena sifat biokompatibilitas dan kemampuannya untuk mendukung pertumbuhan sel (Dash *et al.*, 2011).

Chitosan juga dapat membentuk kompleks dengan DNA atau RNA untuk terapi gen. *Chitosan* juga digunakan sebagai bahan anti-bakteri dalam kemasan makanan dan aplikasi agrikultur karena aktivitas antimikroba inherennya. Kombinasi sifat *adsorptive*, Antimikroba, dan biodegradabilitas *chitosan* menjadikannya bahan yang sangat berguna untuk solusi berkelanjutan dalam pengelolaan lingkungan dan kesehatan masyarakat (Shukla *et al.*, 2013).

Chitosan telah menunjukkan potensi besar dalam aplikasi sensor, terutama dalam sensor berbasis GMR. Dalam sensor berbasis GMR, *chitosan* dapat digunakan sebagai matriks untuk imobilisasi nanopartikel magnetik, seperti: Fe_3O_4 ,

menciptakan bahan komposit yang mampu mendeteksi perubahan medan magnet dengan sensitivitas tinggi. *Chitosan* berfungsi sebagai pembawa nanopartikel magnetik yang menyediakan interaksi elektrostatik yang kuat dengan target biomolekul, seperti: protein atau antigen, memungkinkan deteksi yang sangat spesifik dan sensitif (Negm *et al.*, 2020).

Nanopartikel Fe_3O_4 yang terdispersi dalam matriks *chitosan* berinteraksi dengan target biologis yang diberi label magnetik, dan perubahan medan magnet lokal diukur oleh sensor GMR, menghasilkan sinyal listrik yang berbanding lurus dengan konsentrasi target. Penggunaan *chitosan* dalam sensor GMR juga memanfaatkan biokompatibilitas dan sifat biodegradabilitasnya, menjadikannya pilihan yang aman untuk aplikasi biosensor di lingkungan medis. Inovasi ini memungkinkan pengembangan perangkat diagnostik yang lebih akurat dan cepat, dengan potensi penggunaan luas dalam deteksi penyakit, analisis lingkungan dan pemantauan keamanan makanan (Zhang *et al.*, 2010).

2.5 Giant Magnetoresistance (GMR)

Sensor GMR adalah jenis sensor magnetik yang memanfaatkan fenomena perubahan besar dalam resistansi listrik akibat perubahan medan magnet. Efek GMR pertama kali ditemukan pada akhir tahun 1980-an oleh Albert Fert dan Peter Grünberg, yang kemudian memenangkan hadiah Nobel Fisika pada tahun 2007 untuk penemuan ini. Fenomena GMR terjadi ketika lapisan tipis material feromagnetik dan nonmagnetik disusun secara bergantian dalam struktur multilayer. Ketika medan magnet diterapkan, orientasi magnetisasi dari lapisan feromagnetik berubah, yang mempengaruhi hambatan elektron melalui lapisan tersebut. Perubahan dalam orientasi magnetisasi dari paralel menjadi antiparalel dapat menghasilkan perubahan resistansi listrik hingga 50%, tergantung pada material dan struktur lapisan (Baibich *et al.*, 1998).

GMR memiliki sensitivitas yang sangat tinggi terhadap medan magnet rendah, membuatnya ideal untuk aplikasi dalam pembacaan data magnetik, biosensor, dan perangkat elektronik lainnya. Sensor GMR bekerja dengan mendeteksi perubahan

dalam resistansi listrik sebagai respon terhadap variasi medan magnet eksternal, yang kemudian dikonversi menjadi sinyal listrik yang dapat diukur. Prinsip ini memungkinkan GMR digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti: *hard disk drive*, sensor posisi, dan deteksi bahan biologis (Spaldin, 2010).

Sensor GMR telah diintegrasikan ke dalam berbagai teknologi modern, mulai dari perangkat penyimpanan data hingga aplikasi medis. Salah satu aplikasi utama GMR adalah dalam teknologi pembacaan data pada *hard disk drive* (HDD). Sensor GMR digunakan untuk mendeteksi perubahan dalam medan magnet yang disebabkan oleh bit data magnetik yang tersimpan pada *platter hard disk*, memungkinkan peningkatan kapasitas penyimpanan data secara signifikan (Daughton, 1999).

Di bidang otomotif, sensor GMR digunakan untuk mendeteksi posisi dan kecepatan roda, serta dalam sistem kontrol mesin, GMR juga digunakan dalam aplikasi keamanan, seperti: deteksi logam dan sistem identifikasi. Di bidang medis, sensor GMR dikembangkan untuk aplikasi biosensor, di mana partikel magnetik digunakan sebagai label untuk mendeteksi biomolekul target, seperti: DNA, protein dan pathogen. Partikel ini menginduksi sinyal yang sangat sensitif dan spesifik. Sensor GMR menawarkan keunggulan dibandingkan teknologi sensor magnetik lainnya, seperti: AMR atau *hall effect* karena memiliki sensitivitas yang lebih tinggi, resolusi yang baik, dan kemampuan untuk mendeteksi medan magnet yang sangat rendah (Pokroy *et al.*, 1990).

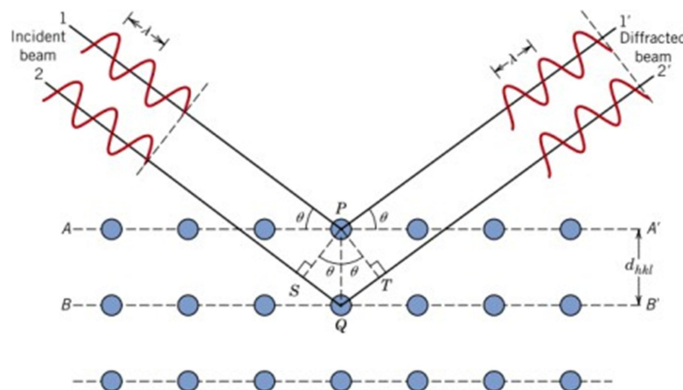
NVE Corporation adalah salah satu produsen utama *chip* GMR yang memanfaatkan teknologi GMR untuk aplikasi sensorik dan pemrosesan data. *Chip* NVE Corporation merupakan satu produk unggulan yang menggunakan teknologi GMR untuk memberikan kinerja tinggi dalam deteksi medan magnet. *Chip* ini dirancang untuk aplikasi yang memerlukan pengukuran presisi tinggi dari medan magnet, seperti dalam sistem navigasi, deteksi posisi, dan aplikasi robotik. NVE AAL04 menawarkan keunggulan berupa: sensitivitas tinggi, respon cepat, dan kemampuan untuk aplikasi industri dan otomotif (Cubilles *et al.*, 2016).

2.6 Karakterisasi dan Analisis Data

Setiap penelitian yang menggunakan metode *green synthesized* akan menghasilkan nanopartikel yang distabilkan dan dianalisis berdasarkan berbagai karakterisasi. Karakterisasi yang dilakukan melalui XRD (untuk analisis struktur kristal) dan VSM (untuk mengatur sifat kemagnetan material).

2.6.1 Karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD)

XRD merupakan salah satu metode karakterisasi non-destruktif yang banyak digunakan untuk menganalisis untuk kristal dari suatu bahan. XRD mengidentifikasi fasa kristalin, menentukan parameter kisi, menghitung ukuran kristalit, serta mengenali bidang-bidang kristal melalui Indeks Miller. Prinsip dasar XRD adalah interaksi antara sinar-X dan struktur kristal dari material, dimana pada sinar-X akan mengalami pembelokan atau difraksi saat bertemu dengan bidang bidang atom dalam kisi kristal. Hasil interaksi ini menghasilkan pola difraksi yang dapat dianalisis lebih lanjut untuk mendapatkan informasi mengenai struktur internal material, Gambar 2.2 menunjukkan prinsip kerja XRD terhadap bidang kristal (Cullity, 2001).



Gambar 2.2 Sinar-X pada bidang (Bragg, 1913).

Gambar 2.2 menunjukkan prinsip difraksi sinar-X pada bidang kristal berdasarkan hukum Bragg. Proses kerja XRD melibatkan empat tahap utama: produksi sinar-X, interaksi sinar-X dengan sampel, deteksi sinyal difraksi, dan interpretasi data.

Pada tahap produksi terjadi beda tegangan antara filamen (katoda) dan logam target (anoda) di dalam tabung sinar-X. Elektron yang dipercepat dari katoda menumbuk anoda dan menghasilkan radiasi sinar-X. Radiasi ini keluar dari tabung sinar-X dan diarahkan ke permukaan sampel. Jika struktur sampel tersusun secara periodik, seperti: kristal, maka akan terjadi pemebelokan gelombang sinar-X oleh bidang-bidang atom dalam material tersebut. Dasar teori dari fenomena difraksi ini dijelaskan melalui Hukum Bragg, yang menyatakan bahwa difraksi terjadi ketika gelombang sinar-X yang dipantulkan oleh dua bidang atom sejajar mengalami interferensi konstruktif. Interferensi ini hanya akan terjadi jika perbedaan lintasan antara dua gelombang tersebut adalah kelipatan bilangan bulat dari panjang gelombang sinar-X. Hukum Bragg secara matematis dapat dijabarkan seperti Persamaan (2.1) (Suryanarayana dan Norton, 1998).

$$n\lambda = 2d \sin \theta \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana λ adalah panjang gelombang sinar-X, d adalah jarak antar bidang kristal (*interplanar spacing*), dan θ adalah sudut datang sinar-X terhadap bidang kristal. Untuk difraksi orde pertama ($n = 1$), perbedaan lintasan adalah satu panjang gelombang. Sedangkan untuk difraksi orde lebih tinggi ($n > 1$), perbedaan lintasan merupakan kelipatan dari panjang gelombang. Namun dalam banyak analisis, orde pertama ($n = 1$) biasanya dianggap cukup untuk perhitungan awal karena orde yang lebih tinggi cenderung memiliki intensitas yang lebih kecil dan lebih sulit untuk diidentifikasi secara eksak. Parameter penting yang dapat diperoleh dari hasil pengukuran XRD adalah parameter kisi (*lattice parameter*) (Puri dan Babbar, 1997). Parameter ini menggambarkan panjang sisi dari unit sel kristal dan dapat dihitung dari jarak antar bidang d yang diperoleh melalui persamaan Hukum Bragg, pada Persamaan (2.2).

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan diketahui nilai d dan Indeks Miller (h, k, l), maka parameter kisi a dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.3) (Cullity, 1978).

$$a = d\sqrt{(h^2 + k^2 + l^2)} \dots \dots \dots (2.3)$$

Parameter kisi a menunjukkan ukuran unit sel kristal dan sangat bergantung pada simetri serta struktur kristal material tersebut. Nanopartikel Fe_3O_4 memiliki struktur kristal *face-centered cubic* (FCC) sehingga nilai Indeks Miller umum yang digunakan mengacu pada struktur tersebut. Untuk memperoleh d dan a yang akurat, dilakukan proses *peak fitting* menggunakan metode Gaussian terhadap puncak difraksi dengan intensitas tertinggi menggunakan perangkat lunak OriginLab Pro21. Selain parameter kisi, Indeks Miller juga dapat dihitung dari data XRD untuk mengidentifikasi bidang-bidang kristal yang berkontribusi pada pola difraksi. Penentuan indeks miller dilakukan dengan mengaitkan posisi sudut θ terhadap struktur kristal menggunakan Persamaan (2.4) (Cullity dan Graham, 2009).

$$a^2 = \frac{\lambda^2}{4 \sin^2 \theta} (h^2 + k^2 + l^2) \dots \dots \dots (2.4)$$

Setiap puncak difraksi dapat diidentifikasi berasal dari kristal tertentu. Data ini kemudian dicocokkan dengan pola referensi, misalnya dari *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS), untuk memastikan keberadaan fasa Fe_3O_4 pada sampel yang telah disintesis. Ukuran kristalit (*crystallite size*) juga dapat dihitung dari data XRD menggunakan persamaan *Debye Scherrer*, ukuran kristalit menggambarkan ukuran partikel terkecil dalam struktur kristal yang masih menunjukkan sifat kristalin. Persamaan *Debye Scherrer* dapat dilihat pada Persamaan (2.5) (Waren, 1990).

$$t = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana t adalah ukuran rata-rata kristalit dalam nanometer, k adalah konstanta *Scherrer* (umumnya 0.9), λ adalah panjang gelombang sinar-X, β adalah lebar puncak setengah maksimum (FWHM) dalam radian yang diperoleh dari hasil

fitting, dan θ adalah sudut difraksi. Persamaan ini berlaku dengan asumsi bahwa pelebaran puncak difraksi hanya disebabkan oleh ukuran kristalit, tanpa memperhitungkan tegangan internal atau cacat kital. Dengan menganalisis pola difraksi dan menggunakan persamaan fisika yang relevan, seperti: hukum Bragg dan *Debye Scherrer*, kita dapat memahami karakteristik kristalografi dari nanopartikel Fe_3O_4 , termasuk identifikasi fasa, ukuran partikel, dan struktur kisi (Klug dan Alexander, 1974).

2.6.2 Karakterisasi *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM)

Pengukuran momen magnet menggunakan karakterisasi VSM didasarkan pada hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik. Dalam metode ini, gerakan terkontrol dari sampel magnetik menghasilkan perubahan medan magnet yang terinduksi dalam kumparan *pick-up*, yang kemudian mengukur momen magnetik sampel. Mekanisme deteksi momen magnetik ini dikenal sebagai induktif, dimana sensitivitas serta kinerja VSM sangat bergantung pada konfigurasi *coil pick-up*, dimensi fisik dan penampang koil. Karakterisasi menggunakan VSM dilakukan untuk menentukan sifat kemagnetan nanopartikel Fe_3O_4 dengan tiga indikator, seperti: nilai koersivitas (H_c), magnetisasi saturasi (M_s), dan magnetisasi remanen (M_r) (Amirov *et al.*, 2019).

H_c , M_s , dan M_r merupakan parameter penting dalam karakterisasi sifat magnetik material. H_c menggambarkan kekuatan medan magnet yang diperlukan untuk menghilangkan magnetisasi material, mencerminkan kekerasan magnetiknya. M_s menunjukkan nilai maksimum magnetisasi yang dapat dicapai material saat berada dalam medan magnet eksternal yang kuat, mengidentifikasi kapasitas material untuk menyimpan energi magnetik. M_r adalah nilai magnetisasi yang tersisa pada material setelah medan magnet eksternal dihilangkan, yang menggambarkan sifat retensi magnetiknya. Kombinasi dari parameter ini membantu menentukan aplikasi spesifik material, misalnya dalam perangkat atau sensor (Toniolo *et al.*, 2007).

Posisi optimal pada sampel dikenal sebagai “titik pelana”, ditentukan melalui kalibrasi posisi sebelum pengukuran dimulai. Selama pengukuran, sampel diberikan getaran secara *vertical* dengan frekuensi tetap ω . Hasil pengujian karakterisasi VSM akan diolah untuk mendapatkan nilai H menggunakan Persamaan (2.6) dan nilai M menggunakan Persamaan (2.7) yang kemudian menghasilkan kurva histerisis (Marcel *et al.*, 2022).

$$H = \frac{M_{terukur}}{10.000} \times H_{maksimum} = \frac{M_{terukur}}{10.000} \times 15.000 \text{ (Oe)} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$M = \frac{M_{terukur}}{10.000} \times M_{maksimum} \times \frac{1}{m_{sampel}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Persamaan (2.6) digunakan untuk menghitung nilai medan magnet (H) yang diukur dalam satuan *oersted* (Oe) berdasarkan data magnetisasi relatif yang diukur oleh VSM. Nilai ini diperoleh dengan mengalikan nilai magnetisasi terukur yang telah dinormalisasi dengan maksimum medan magnet yang digunakan selama pengukuran (misalnya 15.000 Oe). Sedangkan Persamaan (2.7) digunakan untuk menghitung nilai magnetisasi spesifik (M) dalam satuan emu/g (*electromagnetic unit per gram*), yang merepresentasikan respon material terhadap medan magnet eksternal. Nilai ini diperoleh dengan mengonversi magnetisasi relatif terhadap nilai maksimum alat dan dibagi dengan masa sampel, sehingga menunjukkan seberapa kuat suatu material dapat termagnetisasi per satuan massa (Cullity dan Graham., 2011).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada Bulan Mei 2024 sampai Bulan Desember 2024. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fisika Material dan Instrumentasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Alat Penelitian.

No.	Alat Penelitian	Fungsi
1.	Gelas Beaker	Untuk mencampur. mengaduk, memanaskan bahan yang digunakan.
2.	Furnace	Untuk memanaskan bahan yang digunakan.
3.	Labu Erlenmeyer	Untuk mencampur larutan MO.
4.	Kertas Saring Whatman 01	Untuk memisahkan zat padat dari cairan dalam proses filtrasi.
5.	Hot Plate	Untuk memanaskan beaker.
6.	Cawan Petri	Untuk wadah nanopartikel ketika proses pengeringan.
7.	Power Supply	Untuk membangkitkan medan magnet.
8.	Multimeter	Untuk mengukur arus dari power supply.

No.	Alat Penelitian	Fungsi
9.	Kabel Penghubung	Untuk menghubungkan komponen.
10.	Resistor	Untuk menghambat aliran listrik dalam rangkaian.
11.	<i>Helmholtz Coil</i>	Untuk menghasilkan medan magnet eksternal dengan jumlah lilitan 169 untuk masing masing <i>coil</i> .
12.	<i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	Untuk menganalisis struktur kristal dari sampel Fe_3O_4 dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$
13.	<i>Vibrating Sample Magnetometer (VSM)</i>	Untuk mengukur sifat kemagnetan dari sampel Fe_3O_4 dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam sintesis nanopartikel adalah *ferrous sulfate* ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 98%, *ferric chloride hexahydrate* ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 99%, *silver nitrate* (AgNO_3) 99%, *3-aminopropyl trimethoxysilane* (APTMS) 99% dan bubuk MO. Sedangkan bahan tambahan yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Bahan- bahan Penelitian.

No.	Bahan Penelitian	Fungsi
1.	NH_4OH (99%)	Untuk mengatur pH.
2.	Akuades	Untuk melarutkan berbagai bahan.
3.	<i>Chitosan</i>	Untuk memodifikasi permukaan nanopartikel magnetik Fe_3O_4 .
4.	<i>Bovine Serum Albumin</i> (BSA) (98%)	Untuk mengujian biomolekul.

3.3 Prosedur Penelitian

Pengembangan perangkat melibatkan beberapa tahapan yaitu: sintesis MO, sintesis nanopartikel Fe_3O_4 , sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$, karakterisasi dan analisis data.

3.3.1 Sintesis *Moringa oliefera* (MO)

Proses sintesis MO dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Ekstrak MO disiapkan sebanyak 5gram dan dilarutkan dalam 60 ml akuades, diaduk selama 30 menit pada suhu 60°C.
2. Larutan MO yang sudah dilarutkan didiamkan hingga mencapai suhu ruang, disaring menggunakan kertas saring Whatman 01 untuk memperoleh larutan ekstrak MO.
3. Larutan MO disimpan dalam lemari pendingin untuk proses selanjutnya.

3.3.2 Sintesis Nanopartikel Fe₃O₄

Proses sintesis nanopartikel Fe₃O₄ menggunakan ekstrak MO dilakukan dengan langkah - langkah sebagai berikut:

1. Larutan FeCl₃.6H₂O dan FeSO₄.7H₂O masing-masing ditimbang sebanyak 4,054 gram dan 2,085 gram, dilarutkan dalam 7,5 ml akuades dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 15 menit.
2. Larutan FeCl₃.6H₂O dan FeSO₄.7H₂O dicampurkan menjadi satu sehingga menghasilkan larutan baru, dan diaduk kembali selama 15 menit pada suhu 60°C sehingga menghasilkan larutan yang homogen.
3. Larutan MO sebanyak 10 ml ditambahkan ke dalam larutan Fe dan diaduk selama 30 menit pada suhu 60°C.
4. Larutan MO dititrasi menggunakan larutan NH₄OH 10% sambil terus diaduk selama 90 menit.
5. Larutan *green-synthesized* Fe₃O₄ yang dihasilkan, diendapkan dan dilanjutkan dengan pencucian menggunakan akuades sebanyak 7 kali.
6. Hasil endapan Fe₃O₄ dikeringkan menggunakan *furnace* selama 2 jam pada suhu 100°C hingga diperoleh serbuk nanopartikel *green-synthesized* Fe₃O₄.

3.3.3 Modifikasi Nanopartikel Fe_3O_4 dengan *Chitosan*

Setelah diperoleh serbuk Fe_3O_4 melalui metode *green synthesis*, langkah selanjutnya adalah mensintesis nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ dengan ekstrak MO menggunakan variasi konsentrasi bahan sebesar 5, 10, 15, 20, dan 25 mg/ml. Langkah – langkah modifikasi nanopartikel Fe_3O_4 dengan *chitosan* sebagai berikut:

1. Sebanyak 0,8 gram nanopartikel didispersikan ke dalam 20 ml akuades dan diultrasonikasi selama 30 menit.
2. Serbuk *chitosan* dilarutkan dalam 25 ml asam asetat (CH_3COOH) 2% dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 30 menit pada suhu ruang.
3. Sebanyak 10 ml larutan MO dicampurkan ke dalam larutan *chitosan*, dan diaduk kembali selama 30 menit.
4. Larutan *chitosan* dicampurkan ke dalam nanopartikel Fe_3O_4 yang telah diultrasonikasi dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 60 menit.
5. Fe_3O_4 dan *chitosan* dicampurkan, lalu dicuci dengan akuades sebanyak 7 kali.
6. Endapan yang dihasilkan kemudian dikeringkan menggunakan *furnace* selama 2 jam pada suhu 80°C .
7. Padatan yang dihasilkan digerus dan disimpan dalam wadah.

Skema sintesis MO, sintesis nanopartikel Fe_3O_4 , dan modifikasi permukaan nanopartikel Fe_3O_4 dengan *chitosan* pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1 (a), (b), dan (c).

2. Arus dari *power supply* dialirkan ke kumparan untuk membangkitkan medan magnet. *Probe* yang telah disterilisasi dipasang pada rangkaian Jembatan *Wheatstone*.
3. Magnetisasi lapisan tipis dipastikan sudah searah dengan medan magnet eksternal, yang disebut sebagai posisi *easy direction*.
4. Arus konstan sebesar 10 mA dialirkan ke rangkaian menggunakan *Keithley 2401*.
5. Besar medan luar dihasilkan oleh *Helmholtz coil*.
6. Medan magnet sebesar 0-63 Gauss diterapkan selama 60 detik.
7. Ketika medan magnet sama dengan nol, potensiometer diputar hingga *Keithley* menunjukkan tegangan nol.
8. Tegangan keluaran dari *quarter* dan *half* Jembatan *Wheatstone* diukur secara *real-time* setiap terjadi peningkatan medan magnet.
9. Instrumen *Keithley 2401* digunakan untuk pengaturan sumber arus, pengukuran tegangan, dan pengaturan lainnya, yang dikendalikan oleh program *labview* yang dipasang pada laptop.
10. Hasil tegangan keluaran dan grafik yang dihasilkan selama pengukuran direkam dan disimpan secara langsung dalam format Excel.

3.3.4.2 Pengujian Nanopartikel Magnetit dengan Sampel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$

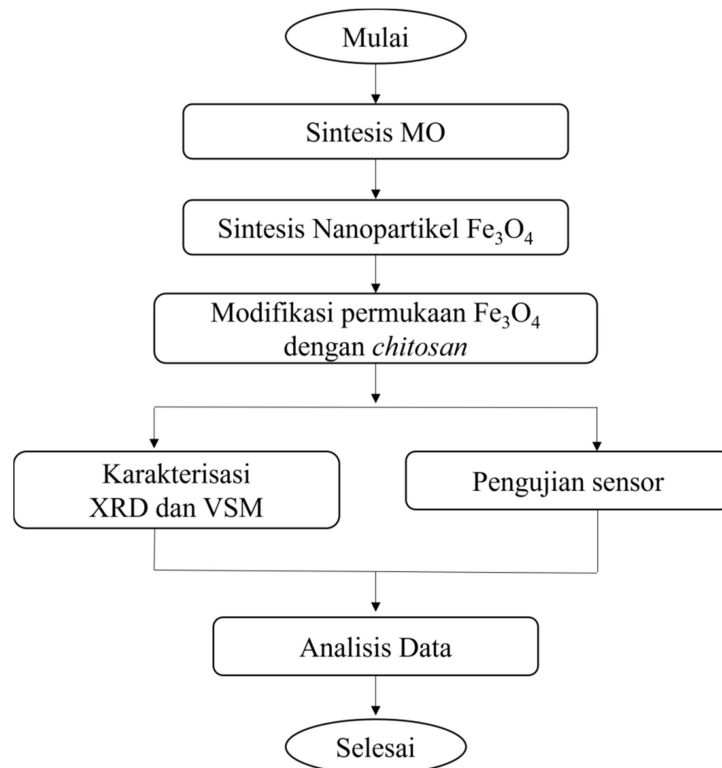
Proses pengujian nanopartikel magnetit Fe_3O_4 dari ekstrak MO dilakukan dengan langkah-langkah berikut:

1. Nanopartikel magnetik ditimbang sesuai dengan konsentrasi, kemudian dilarutkan dalam etanol 2 ml di dalam vial kaca kapasitas 10 ml.
2. Vial kaca ditutup dan digetarkan dalam *ultrasonic cleaner* untuk memperoleh larutan yang homogen selama 15 menit.
3. Sebanyak 10 μl larutan nanopartikel yang sudah homogen ditetaskan di atas permukaan *chip* menggunakan mikropipet dan ditunggu selama kurang lebih 3 menit hingga terjadi penguapan.

4. Setelah penguapan dan hanya tersisa nanopartikel magnetik, pendeteksian segera dilakukan dengan menerapkan medan magnet eksternal di sekitar sensor.

3.3.5 Diagram Penelitian

Secara garis besar, tahapan yang dilakukan pada penelitian ini disajikan dalam diagram alir pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan pada penelitian ini, maka dapat disimpulkan, sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa sampel Fe_3O_4 memiliki struktur kristal dengan intensitas dan ukuran kristalit yang lebih besar dibandingkan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$. Ukuran kristalit berkurang dari 6,3 nm menjadi 6,1 nm setelah penambahan *chitosan*. Pengurangan ukuran kristalit ini menunjukkan bahwa *chitosan* berhasil menghalangi pertumbuhan kristal magnetit secara signifikan, sesuai dengan peningkatan yang diamati pada parameter kisi dari 8,4 Å menjadi 8,3 Å. Sedangkan, hasil VSM menunjukkan bahwa penambahan *chitosan* juga mengakibatkan penurunan sifat kemagnetan material. Nilai M_s Fe_3O_4 mencapai 48,9 emu/g, tetapi menurun menjadi 37,7 emu/g setelah dikompositkan. Penurunan ini disebabkan oleh sifat diamagnetik *chitosan* yang mengurangi proporsipartikel magnetik per satuan berat dalam komposit, lapisan *chitosan* juga memisahkan partikel magnetit, yang menghambat interaksi antar partikel dan menurunkan M_s .
2. Pada pengujian variasi konsentrasi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ dari 5, 10, 15, 20, dan 25 mg/ml, semakin besar konsentrasi yang digunakan, semakin tinggi sinyal output yang dihasilkan oleh sensor. Nilai koefisien determinasi sebesar 0,9787 yang menunjukkan bahwa hubungan antara konsentrasi dan sinyal bersifat linier dan konsisten, menandakan bahwa sensor GMR memiliki kemampuan deteksi kuantitatif yang baik dalam rentang tersebut.

3. Pada pengujian sensitivitas, semakin besar konsentrasi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ yang diberikan, maka semakin tinggi dan stabil sinyal yang dihasilkan oleh sensor GMR. Pengukuran berulang menunjukkan konsistensi respons dengan nilai RSD antara 0,6% hingga 9,7% yang mencerminkan sensitivitas tinggi serta deviasi sinyal yang masih berada dalam batas akseptabel untuk kinerja sensor.

5.2 SARAN

Untuk penelitian selanjutnya menfokuskan pada validasi aplikasi sensor GMR yang melibatkan penentuan batas deteksi (LOD) dan sensitivitas terhadap label magnetik. Sebagai nilai tambah, mengevaluasi stabilitas fungsionalitas $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{chitosan}$ di bawah kondisi lingkungan ekstrem, seperti: perubahan suhu dan pH sangat kursial untuk memastikan keandalan jangka panjang sensor.

DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, F., Latif, S., Ashraf, M., dan Gilani, A.H. 2007. Moringa oliefera: A food plant with multiple medicinal uses. *Phytotherapy Research*, 21 (1), 17-25.
- Appu, M., Lian, Z., Zhao, D., dan Huang, J. 2021. Biosynthesis of chitosan-coated iron oxide (Fe₃O₄) hybrid nanocomposites from leaf extracts of Brassica oleracea L, and study on their antibacterial potentials. *3 Biotech* 11(5), 271. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02820-w>
- Baibich, M.N., Broto, JM., Fert, A., Van Dau, F. N., Petroff, F., Etienne, P., D'Avitaya, F. N., dan Chazelas, J. 1988. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Physical Review Letters*, 61(21), 2472-2475. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2472>
- Baselt, D. R., Lee, G. U., Natesan, M., Metzger, S. W., Sheenhan, P. E., dan Colton, R. J. 1998. Biosensor based on magnetoresistance technology. *Biosensors and Bioelectronics*, 13(7-8), 731-739. [https://doi.org/10.1016/S0956-5663\(98\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0956-5663(98)00037-2)
- Basenhard, M. O., LaGrow, A. P., Hodzic, A., Kriechbaum, M., Panariello, L., Bais, G., dan Gavrilidis, A. 2020. Co-precipitation synthesis of stable iron oxide nanoparticles with NaOH: New insights and continuous production via flow chemistry. *Chemical Engineering Journal*, 399, Article 125740. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125740>
- Bhattacharjee, S. 2016. DLS and zeta potential-What they are and what they are not. *Journal of Controlled Release*, 235, 337-351. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>
- Bragg, W. H. 1913. The reflection of X-rays by crystals. *Nature*, 91 (2352), 477. <https://doi.org/10.1038/13390s17102300>

- Cornell, R. M., dan Schwertmann, U. 2003. *The iron oxides: Structure, properties, reactions, occurrences, and uses* (2nd ed). Wiley-VCH.
- Cornell, R. M., dan Schwertmann, U. 2006. *The iron oxides: Structure, properties, reactions, occurrences and uses* (3rd ed). Willey.
- Cubelles-Beltrán, M. –D., Reig, C., Madrenas, J., De Marcellis, A., Santos, J., Cardoso, S., dan Freitas, P. P. 2016. Integration of GMR sensors with different technologies. *Sensors*, 16(6), Article 939. <https://doi.org/10.3390/s16060939>
- Cullity, B. D. 1978. *Element of X-ray diffraction* (2nd ed). Addison-Wesley.
- Cullity, B. D., dan Stock, S.R. 2001. *Element of X-ray diffraction* (3rd ed). Prentice Hall.
- Cullity, B. D., dan Graham, C. D. 2009. *Introduction to magnetic materials* (2nd ed). Wiley-IEEE Press.
- Dash, M., Chiellini, F., Ottenbrite, R. M., dan Chiellini, E. 2011. Chitosan-A versatile semi-synthetic polymer in biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 36(8), 981-1014. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.02.001>
- Daughton, J. M. 1999. GMR applications. *Journal of Magnetism and Manetic Materials*, 192(2), 334-342. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(98\)00376-X](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(98)00376-X)
- Djamal, M., dan Ramlo, R. 2017. Giant magnetoresistance sensors based on ferrite material and its applications. In *Magnetic sensors-Development trends and applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70548>
- Domard, A. 2011. A perspective on 30 years research on chitin and chitosan. *Carbohydrate Polymers*, 84(2), 696-703. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.04.083>
- Fadeel, B., Feliu, N., Vogt, C., Abdelmonem, A. M., dan Parak, W. J. 2013. Bridge over troubled waters: Understanding the synthetic and biological identities of engineered nanomaterials. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 5(2), 111-129. <https://doi.org/10.1002/wman.1206>

- Fahey, J. W. 2005. Moringa oliefera: A review of the medical evidence for its nutritional, therapeutic, and prophylactic properties. Part 1. *Trees for Life Journal*, 1(5),5.
- Farokhzad, O. C., dan Langer, R. 2009. Impact of nanotechnology on drug delivery. *ACS Nano*, 3(1), 16-20. <https://doi.org/10.1021/nn900002m>
- Garcia, S., Mabarroh, N., Cuana, R., Ardiyanti, H., Istiqomah, N. I., dan Suharyadi, E. 2024. Detection of green-synthesized Fe_3O_4 /chitosan using spin valve GMR sensor with Wheatstone bridge circuit. *Materials Science Forum*, 1114, 9-14. <https://doi.org/10.4028/p-abc123>
- Gaster, R. S., Hall, D. A., Nielsen, C. H., Osterfeld, S. J., Yu, H., Mach, K. E., Wilson R. J., Murmann, B., Liao, J. C., Gambhir, S. S., dan Wang, S. X. 2009. Matrix-insensitive protein assays push the limits of biosensors in medicine. *Nature Medicine*, 15(11), 1327-1332. <https://doi.org/10.1038/nm.1881>
- Ger, T. -R., Wu, P. S., Wang, W. -J., Chen, C. -A., Abu, P. A. R., dan Chen, S. -L. 2023. Development of a microfluidic chip system with giant magnetoresistance sensor for high-sensitivity detection of magnetic nanoparticles in biomedical applications. *Biosensors*, 13(8), Article 807. <https://doi.org/10.3390/bios13080807>
- Gupta, A. K., dan Gupta, M. 2005. Synthesis dan surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. *Biomaterials*, 26(18) 3995-4021. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.10.012>
- Haddad, P. S., Santos, M. C., Cassago, C. A., Bernardes, J. S., Jesus, M. B., dan Seabra, A. B. 2016. Synthesis, characterization, and cytotoxicity of glutathione-PEG-iron magnetic nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, 18(12), Article 336. <https://doi.org/10.1007/s1105-016-3680-y>
- Hajjar, N., Post, P. A., dan Hajjar, M. C. 2017. Structural and magnetic properties of spinel magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles synthesized by a co-precipitation method. *Materials Chemistry and Physics*, 193, 318-325. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.02.045>
- Jeevanandam, J., Barhoum, A., Chan, Y. S., Dufresne, A., dan Danquah, M. K. 2018. Review on nanoparticles and nanostructured materials: History, sources, toxicity and regulations. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 9, 1050-1074. <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.98>

- Khan, I., Saed, K., dan Khan, I. 2019. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908-1074. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- Kim, S., Kim, J., I, J., Kim, M., Wang, S. X., dan Lee, J. 2002. Magnetic supercluster particles for highly sensitive giant magnetoresistance (GMR) biosensors. *Analitycal and Bioanalytical Chemistry* 414(16), 3459-3469. <https://doi.org/10.1007/s00216-022-04-29-5>
- Klug, H. P., dan Alexander, L. E. 1974. *X-ray diffraction procedures: For polycrystalline and amorphous materials* (2nd ed). Willey.
- Kulkarni, N., Jani, P., Shindikar, A., Suryawanshi, P., dan Thorat, N. 2022. Advances in the colon-targeted chitosan based multiunit drug delivery systems for the treatment of inflammatory bowel disease. *Carbohydrate Polymers*, 288, Article 119351. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119351>
- Kumar, M. N. V. R. 2000. A review of chitin and chitosan applications. *Reactive and Functional Polymers*, 46(1), 1-27. [https://doi.org/10.1016/S1381-5148\(00\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S1381-5148(00)00038-9)
- Laurent, S., Forge, D., Port, M., Roch, A., Robic, C., Vander Elst, L., dan Muller, R. N. 2008. Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications. *Chemical Reviews*, 108(6), 2064-2110. <https://doi.org/10.1021/cr068445f>
- Lee, H., Yoon, H. J., Kim, J., dan Prak, J. 2016. Magnetic nanoparticle-based biosensors for detection of biomarkers. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 224, 287-299. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.10.078>
- Lee, J. R., Huh, Y. M., Jun, Y. W., Kim, S., dan Cheon, J. 2016. Experimental and theoretical investigation of the precise transduction mechanism in giant magnetoresistive biosensors. *Scientific Reports*, 6, Article 18692. <https://doi.org/10.1038/srep18692>
- Lee, S., Myers, W. R., Grossman, H. L., Cho, H. -M., Chemia, Y. R., dan Clarke, J. 2002. Magnetic gradiometer based on a high-transition temperature superconducting quantum interference device for improved sensitivity of a biosensor. *Applied Physics Letters*, 8(16), 12791-12835. <https://doi.org/10.1063/1.1515122>
- Leone, A., Speda, A., Battezzati, A., Scihiraldi, A., Aristil, J., dan Bertoli, S. 2015. Moringa oliefera seeds and oil: Characteristics and uses for human health.

International Journal of Molecular Sciences, 16(7)12791-12835.
<https://doi.org/10.3390/ijms160712791>

- Li, Z., Li, X., Zhang, L., Zhang, J., dan Li, X. 2012. Chitosan-based magnetic nanoparticles: Synthesis and biomedical applications. *Journal of Materials Chemistry*, 22(17), 8426-8433. <https://doi.org/10.1039/C2JM00012A>
- Lim, S. A., dan Ahmed, M. U. 2016. Electrochemical immunosensors and their recent nanomaterial-based signal amplification strategies: A review. *RSC Advances*, 6(30), 24995-25014. <https://doi.org/10.1039/C6RA00333H>
- Ma, Z., Guan, Y., dan Zhang, Z. 2012. Magnetic properties of chitosan-coated Fe₃O₄ nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, 111(7), Article 07B529. <https://doi.org/10.1063/1.4754273>
- Mardila, V. T., Sabarudin, A., dan Santjojo, D. J. H. 2016. Pembuatan nanopartikel kitosan-Fe₃O₄ secara ko-presipitasi in-situ menggunakan tripolifosfat/sitrat sebagai crosslinker dan karakterisasinya menggunakan XRD. *Natural B*, 3(3), 299-307.
- Marsel Tumbelaka, R. 2022. *Green synthesis fotokatalis nanopartikel core-shell Fe₃O₄/TiO₂ menggunakan ekstrak Moringa oliefera dan karakterisasinya* [Tesis S2, Program Studi Fisika, Universitas Gadjah Mada]. <https://etd.repository.ugm.ac.id/>
- Matshediso, P. G., Cukrowska, E., dan Chimuka, L. 2015. Development of pressurised hot water extraction (PHWE) for essential compounds from Moringa oliefera leaf extracts. *Food Chemistry*, 172, 423-427. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.127>
- Morgunov, R., Koplak, O. V., Allayarov, R. S., Kunitsyna, E. I., dan Mangin, S. 2020. Effect of the stray field of Fe/Fe₃O₄ nanoparticles on the surface of the CoFeB thin films. *Applied Surface Science*, 527, Article 146836
- Muyibi, S. A., dan Evison, L. M. 1995. Optimizing physical parameters affecting coagulation of turbid water with moringa oliefera seeds. *Waters Research*, 29(12), 2689-2695. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(95\)00123-F](https://doi.org/10.1016/0309-1708(95)00123-F)
- Ndabigengesere, A., Narasiah, K. S., dan Talbot, B. G. 1995. Active agents and mechanisms of coagulation of turbid waters using moringa oliefera. *Water Research*, 29(2), 703-710. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00161-Y](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00161-Y)
- Negm, N. A., Abubshait, H. A., Abubshait, S. A., Abou Kana, M. T. H., Mohamed, E. A., dan Betiha, M. M. 2020. Performance of chitosan polymer as platform during sensors fabrication and sensing applications. *International*

Journal of Biological Macromolecules, 165(Pt B), 402-435.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.199>

Nel, A. E., Madler, L., Velegol, D., Xia, T., Hoek, E. M. V., Somasundaran, P., Klaessig, F., Castranova, V., dan Thompson, M. 2009. Understanding biophysicochemical interactions at the nano-bio interface. *Nature Materials*, 8(7), 543-557. <https://doi.org/10.1038/nmat2442>

Norouz Dizaji, A., Yilmaz, M., dan Piskin, E. 2015. Silver or gold deposition onto magnetite nanoparticles by using plant extracts as reducing and stabilizing agents. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 43(5), 1-7. <https://doi.org/10.3109/21691401.2015.1019672>

Pokroy, B., Quintana, J. P., Caspi, E. N., Berner, A., dan Zolotoyabko, E. 2004. Anisotropic lattice distortions in biogenic aragonite. *Nature Materials*, 3(12), 900-902. <https://doi.org/10.1038/nmat1263>

Puri, K., dan Babbar, A. 1997. X-ray diffraction techniques. *Journal of Materials Science*, 32(24), 6389-6393. <https://doi.org/10.1023/A:1018674819278>

Ramesh, A. V., Rama Deva, D., Mohan Botsa, S., dan Basavaiah, K. 2018. Facile green synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles using aqueous leaf extract of *Zanthoxylum armatum* DC for efficient adsorption of methylene blue. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 6(2), 145-155. <https://doi.org/10.1080/21870764.2018.1459335>

Rinaudo, M. 2006. Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 31(7), 603-632. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>

Shukla, S. K., Mishra, A. K., Arotiba, O. A., dan Mamba, B. B. 2013. Chitosan-based nanomaterials: A state-of-the-art review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 59, 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.01.026>

Singh, J., Dutta, T., Kim, K. -H., Rawat, M., Samddar, P., dan Kumar, P. 2018. "Green" synthesis of metals and their oxide nanoparticles: Applications for environmental remediation. *Journal of Nanobiotechnology*, 16(1), Article 84. <https://doi.org/10.1186/s129951-018-0408-4>

Song, Y., Chen, J., Yang, X., Zhang, D., Zou, Y., Ni, D., Ye, J., Yu, Z., Chen, Q., Jin, S., dan Liang, P. 2022. Fabrication of Fe₃O₄/Ag magnetic nanoparticles for highly active SERS enhancement and paraquat detection. *Microchemical Journal*, 173, Article 107019. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.107019>

- Spaladin, N. A. 2010. *Magnetic Fundamentals and applications* (2nd ed). Cambridge University Press.
- Sun, X., Lei, C., Guo, L., dan Zhou, Y. 2016. Separable detection of *Escherichia coli* O157:H7 by a giant magneto-resistance-based bio-sensing system.. *Sensors and Actuators B:Chemical*, 234, 485-492. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.04.183>
- Suryanarayana, C., dan Norton, M. G. 1998. *X-ray diffraction: A practical approach*. Plenum Press.
- Tanamaha, C. R., Muldoon, J. J., Carroll, C. V., Custer, M. A., dan Whitman, L. J. 2008. Magnetic labelling, detection, and system integration. *IEEE Transactions on Magnetism*, 44(7), 1713-1724. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007914795>
- Tiam, T. M., Ismail, A. M., Elhaes, H., dan Ibrahim, M. A. 2023. Structural and spectroscopic studies for chitosan/Fe₃O₄ nanocomposite as glycine biosensors. *Bionterface Research in Applied Chemistry*, 13(6), 547. <https://doi.org/10.33263/BRIAC36.547>
- Vergara-Jimenez, M., Almatrafi, M. M., dan Fernandes, M. L. 2017. Bioactive components in moringa oliefera leaves protect against chronic disease. *Antioxidants*, 6(4), Article 91. <https://doi.org/10.3390/antiox6040091>
- Vongsak, B., Sithisarn, P., Mangmool, S., Thongpraditchote, S., Wongkrajang, Y., dan Gritsanapan, W. 2013. Maximing totak phenolics, totak flavonoids contents and antioxidant activity of moringa oliefera leaf extract by the appropriate extraction method. *Industrial Crops and Products*, 44, 566-571. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.09.021>
- Wang, S. X., dan Li, G. 2008. Advances in giant magnetoresistance biosensors with magnetic nanoparticles tags: Review and outlook. *IEEE Transactions on Magnetism*, 44(7), 1687-1702. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.920245>
- Wang, W., Wang, Y., Tu, L., Zhang, D., dan Li, Y. 2014. Magnetoresistive performance and comparison of supermagnetic nanoparticles on giant magnetoresistive sensor-based detection system. *Scientific Reports*, 4(1), Articles 5716. <https://doi.org/10.1038/srep05716>
- Wang, Y., Wu, H., Ma, X., Xu, H., dan Zhang, X. 2015. Magnetic nanocomposites for biosensing and bioseparation applications. *Biosensors and Bioelectronics*, 74, 1020-1030. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.07.021>

- Warren, B. E. 1990. X-ray diffraction patterns of liquids. In G. S. Cargill III & R. W. Chan (Eds.), *Physical metallurgy* (pp.201-225). North-Holland.
- Wu, K., Liu, J., Sha, R., Su, D., dan Wang, J. P. 2022. Giant magnetoresistance biosensors in biomedical applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 354, Article 131243. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.131243>
- Xu, J., Li, Q., Zong, W., Zhang, Y., dan Li, S. 2016. Ultra-wide detection concentration range of GMR biosensors using Fe_3O_4 microspheres. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 417, 25-29. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.05.059>
- Zhang, X., Niu, S., Li, C., dan Wang, Y. 2013. Magnetic nanoparticles: Synthesis, surface modification, and applications in biomedicine. *Chemical Society Reviews*, 42(3), 1015-1028. <https://doi.org/10.1029/C2CS35201E>
- Zhang, J., Xia, W., Liu, P., Cheng, Q., Tahirou, T., Gu, W., dan Li, B. 2010. Chitosan modification and pharmaceutical/biomedical applications. *Marine Drugs*, 8(7), 1962-1987. <https://doi.org/10.33390/md8071962>
- Zhang, M., Li, Y., Huang, Y., Zhao, J., dan Lin, Z. 2023. Ball-Milling of Titanium dioxide and zinc oxide for enhanced UV protection. *Frontiers in Materials*, 10 Article 12773659. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1273659>
- Zhang, P., Chen, Y., Li, Y., Zhao, Y., Wang, W., Li, S., dan Huang, L. 2019. Flexible piezoresistive sensor with the microarray structure based on self-assembly of multi-walled carbon nanotubes. *Sensors*, 19(22), Article 4985. <https://doi.org/10.3390/s19224985>
- Zhu, X., Pathakoti, K., dan Hwang, H. 2019. Green synthesis of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles and their usage for antimicrobial applications and environmental remediation. In *Green synthesis, characterization and applications of nanoparticles* (pp. 453-468). Elsevier.