

**DETEKSI NANOMAGNETIK Fe_3O_4 /KITOSAN HASIL *GREEN SYNTHESIS* MENGGUNAKAN SENSOR CHIP KOMERSIAL
*GIANT MAGNETORESISTANCE (GMR)***

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika



Diajukan Oleh :

Azka Hidayatu Sholihin

21106020016

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

2025

PENGESAHAN TUGAS AKHIR



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1890/Un.02/DST/PP.00.9/08/2025

Tugas Akhir dengan judul : Deteksi Nanomagnetik Fe₃O₄/Chitosan Hasil Green Synthesis Menggunakan Sensor Chip Komersial Giant Magnetoresistance (GMR).

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : AZKA HIDAYATU SHOLIHIN
Nomor Induk Mahasiswa : 21106020016
Telah diujikan pada : Selasa, 19 Agustus 2025
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Dr. Widayanti, S.Si. M.Si.
SIGNED

Valid ID: 68a72ad228d85



Penguji I

Asih Melati, S.Si., M.Sc., Ph.D.
SIGNED

Valid ID: 68a67105d0dc2



Penguji II

Sri Hidayati, M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 68a71397ca27e



Yogyakarta, 19 Agustus 2025

UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 68a7d1c521086

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Azka Hidayatu Sholihin
NIM : 21106020016
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Deteksi Nanomagnetik $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Chitosan}$ Hasil *Green Synthesis* Menggunakan Sensor Chip Komersial *Giant Magnetoresistance* (GMR).” merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjana di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Yogyakarta, 11 Agustus 2025

Penulis



Azka Hidayatu Sholihin

NIM. 21106020016

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan skripsi
Lamp : -

Kepada
Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : AZKA HIDAYATU SHOLIHIN
NIM : 21106020016
Judul Skripsi : Deteksi Nanomagnetik Fe_3O_4 /Chitosan Hasil Green Synthesis Menggunakan Sensor Chip Komersial Giant Magnetoresistance (GMR)

Sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami berharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 04 Agustus 2025

Pembimbing I

Pembimbing II


Dr. Widayanti, S.Si., M.Si.
NIP. 19760526 200604 2 005


Prof. Dr. Eng. Edy Suharyadi, M. Eng.
NIP: 197503151999031003

MOTTO

“Bebaskan dirimu dari beban hidup yang tak perlu.”

“Hidup bukanlah tentang siapa yang paling kaya, tapi siapa yang paling bahagia.” - Squidward Tentacles



HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini dipersembahkan untuk:

Allah SWT.

Diri Saya Sendiri

Kedua Orang Tua, Bapak Bunyamin Dan Ibu N. Oyok,

Saudara - Saudara Penulis

Fisika 2021

Study Club Fisika Material Dan Study Club Instrumentasi

Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Deteksi Nanomagnetik Fe_3O_4 /kitosan Hasil *Green Synthesis* Menggunakan Sensor Chip Komersial *Giant Magnetoresistance* (GMR).” dengan baik. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW, semoga kita semua mendapat syafaat beliau di hari akhir nanti.

Skripsi ini disusun sebagai bentuk tanggung jawab akademik dalam rangka menyelesaikan studi dan memenuhi salah satu syarat kelulusan, dengan harapan dapat memberikan manfaat serta keberkahan bagi semua pihak yang terlibat, baik secara langsung maupun tidak langsung. Dalam proses penyusunan dan pelaksanaan tugas akhir ini, penulis telah menerima banyak dukungan, bantuan, serta doa dari berbagai pihak, sehingga dengan penuh rasa hormat dan terima kasih, penulis ingin menyampaikan penghargaan kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Bunyamin dan Ibu N. oyok, serta saudara - saudara penulis. Terima kasih atas cinta, doa, dan dukungan yang tiada henti dalam setiap langkah penulis.
2. Bapak Prof. Noorhaidi, M.A., M.Phil., Ph.D., selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Ibu Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.

4. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si., selaku Ketua Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
5. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing akademik sekaligus pembimbing utama dalam penyusunan tugas akhir ini. Terima kasih atas arahan dan dukungan yang sangat berarti.
6. Prof. Dr. Eng. Edi Suharyadi, M. Eng., selaku pembimbing kedua. Terima kasih atas waktu, kesabaran, bimbingan, nasihat, dan motivasi yang begitu tulus dan terus-menerus diberikan.
7. Dosen Study Club Fisika Material yang selalu membimbing penulis
8. Teman-teman terdekat yang selalu memberi semangat dan kebahagiaan: Faisal, Latif, Priyo, Annas, Khoir, Nurul, Nabila, Fany, Diza .
9. Study Club Fisika Material dan Study Club Instrumentasi, tempat bertumbuh dan belajar bersama.
10. Seluruh teman-teman Fisika angkatan 2021 yang luar biasa.
11. Teman-teman seperjuangan saat mendaki yang telah menjadi rumah saat penulis merasa tertekan dengan skripsi.
12. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, namun telah memberikan bantuan, doa, dan dukungan dalam bentuk apa pun.

Semoga segala bantuan dan kebaikan yang telah diberikan menjadi amal jariyah dan mendapat balasan terbaik dari Allah SWT.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

DETEKSI NANOMAGNETIK Fe_3O_4 /KITOSAN HASIL *GREEN SYNTHESIS* MENGGUNAKAN SENSOR CHIP KOMERSIAL GIANT MAGNETORESISTANCE (GMR)

INTISARI

Nanopartikel Fe_3O_4 banyak digunakan sebagai label magnetik pada biosensor karena sifat superparamagnetiknya, namun Fe_3O_4 murni memiliki kelemahan berupa kecenderungan aglomerasi dan kestabilan rendah sehingga diperlukan modifikasi dengan bahan biokompatibel. Chitosan dipilih sebagai matriks pendukung karena mampu meningkatkan stabilitas dispersi, sedangkan metode *green synthesis* dengan ekstrak *Moringa oleifera* digunakan sebagai pendekatan ramah lingkungan untuk menghasilkan material yang aman bagi aplikasi biomedis dan sensor. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi nanokomposit Fe_3O_4 /Chitosan hasil *green synthesis* menggunakan ekstrak daun kelor, serta mengevaluasi performanya sebagai label magnetik menggunakan sensor Giant Magnetoresistance (GMR) tipe AAL024. Sintesis dilakukan dengan rasio Fe_3O_4 :Chitosan sebesar 2:1. Karakterisasi XRD menunjukkan bahwa material memiliki struktur spinel kubik dengan puncak difraksi terdeteksi pada bidang (220), (311), (400), (511), dan (440), masing-masing pada sudut $30,2^\circ$, $35,5^\circ$, $43,0^\circ$, $56,8^\circ$, dan $62,7^\circ$, tanpa adanya puncak tambahan dari fasa pengotor seperti $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ atau $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Ukuran kristalit meningkat dari 5,654 nm (Fe_3O_4) menjadi 11,226 nm (Fe_3O_4 /Chitosan). Hasil VSM mengungkapkan penurunan magnetisasi saturasi dari 12,096 emu/g menjadi 5,049 emu/g akibat pelapisan chitosan, sementara FTIR mengonfirmasi adanya interaksi antara gugus fungsi chitosan dengan permukaan Fe_3O_4 . Evaluasi sensor menunjukkan bahwa baik Fe_3O_4 maupun Fe_3O_4 /Chitosan menghasilkan sinyal tegangan yang meningkat secara linier terhadap kenaikan konsentrasi. Sensor dengan label Fe_3O_4 memiliki sensitivitas $6,090 \pm 0,310$ mV/(mg/mL), linearitas $R^2 = 0,986$, dan LOD 3,780 mg/mL. Sedangkan Fe_3O_4 /Chitosan menunjukkan sensitivitas $3,650 \pm 0,519$ mV/(mg/mL), linearitas $R^2 = 0,961$, dan LOD 6,420 mg/mL, tetapi dengan kestabilan sinyal deteksi yang lebih baik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nanokomposit Fe_3O_4 /Chitosan hasil *green synthesis* berpotensi sebagai label magnetik ramah lingkungan untuk aplikasi biosensor berbasis GMR.

Kata kunci: *Green synthesis*, Fe_3O_4 /kitosan, GMR, *Moringa oleifera*, sensor magnetik, biosensor.

DETEKSI NANOMAGNETIK Fe_3O_4 /KITOSAN HASIL GREEN SYNTHESIS MENGGUNAKAN SENSOR CHIP KOMERSIAL GIANT MAGNETORESISTANCE (GMR)

ABSTRACT

*Magnetite nanoparticles (Fe_3O_4) are widely used as magnetic labels in biosensors due to their superparamagnetic properties; however, pure Fe_3O_4 suffers from aggregation and poor stability, requiring modification with biocompatible materials. Chitosan was selected as a stabilizing matrix to improve dispersion, while a green synthesis approach using *Moringa oleifera* extract was employed as an eco-friendly and safe method for biomedical and sensor applications. This study aims to synthesize and characterize Fe_3O_4 /Chitosan nanocomposites via green synthesis and evaluate their performance as magnetic labels using a commercial Giant Magnetoresistance (GMR) sensor chip AAL024. The synthesis was carried out at a Fe_3O_4 :Chitosan ratio of 2:1. XRD analysis confirmed a cubic spinel structure with diffraction peaks observed at planes (220), (311), (400), (511), and (440) corresponding to 2θ values of 30.2° , 35.5° , 43.0° , 56.8° , and 62.7° , without any additional peaks from impurity phases such as $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ or $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. The crystallite size increased from 5.654 nm (Fe_3O_4) to 11.226 nm (Fe_3O_4 /Chitosan). VSM results showed a decrease in saturation magnetization from 12.096 emu/g to 5.049 emu/g after chitosan coating, while FTIR analysis confirmed interactions between chitosan functional groups and Fe_3O_4 surfaces. Sensor evaluation revealed that both Fe_3O_4 and Fe_3O_4 /Chitosan produced voltage signals that increased linearly with particle concentration. The Fe_3O_4 label exhibited a sensitivity of 5.99 ± 0.31 mV/(mg/mL), linearity of $R^2 = 0.99$, and LOD of 3.78 mg/mL. Meanwhile, Fe_3O_4 /Chitosan showed a sensitivity of 3.65 ± 0.52 mV/(mg/mL), linearity of $R^2 = 0.96$, and LOD of 6.42 mg/mL, but with more stable detection signals. These findings demonstrate that Fe_3O_4 /Chitosan nanocomposites synthesized via green synthesis hold great potential as eco-friendly magnetic labels for GMR-based biosensor applications.*

Keywords: Green synthesis, Fe_3O_4 /Kitosan, GMR, *Moringa oleifera*, magnetic sensor, biosensor.

DAFTAR ISI

COVER	i
PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR.....	iv
MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
INTISARI	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR ISTILAH	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Batasan Penelitian	7
1.5 Manfaat Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1. Studi Pustaka	8
2.1.1. Material Nano Magnetik Fe_3O_4 /Kitosan	8
2.1.2. <i>Giant Magnetoresistance</i> (GMR) dalam Biosensing.....	9
2.1.3. <i>Green Synthesis of Fe_3O_4/Kitosan</i>	10
2.1.4. Pengaruh Suhu Sintesis terhadap Sifat Magnetik Fe_3O_4	11
2.1.5. Pengaruh Penambahan Kitosan terhadap Kinerja Sensor GMR Berbasis Fe_3O_4	12
2.1. Landasan Teori.....	14
2.2.1. Konsep Dasar Kemagnetan Material, dan Domain.....	14
2.2.2. Kurva Histeresis.....	17
2.2.3. <i>Giant Magnetoresistance</i> (GMR)	21
2.2.4. Biosensor GMR.....	23
2.2.5. Helmholtz Coil.....	26
2.2.6. <i>Exchange Bias</i> (EB)	27
2.2.7. <i>Magnetite</i> (Fe_3O_4)	30
2.2.8. <i>Moringa Oleifera</i> (MO)	32
2.2.9. Kitosan dan Sumbernya	34
2.2.10. <i>Green synthesis Fe_3O_4</i>	35
2.2.11. <i>Vibrating Sample Magnetometer</i> (VSM).....	36
2.2.12. <i>X-ray Diffraction</i> (XRD).....	37
2.2.13. <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR)	40
BAB III METODE PENELITIAN	42
3.1. Lokasi dan Waktu Penelitian.....	42
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	42

3.2.1.	Sintesis Fe ₃ O ₄ /Kitosan	42
3.2.2.	Alat dan Perangkat Lunak Karakterisasi.....	43
3.2.3.	Pengukuran Magnetoresistansi dan Output Voltage	44
3.3.	Prosedur Kerja.....	44
3.3.1.	Sintesis Fe ₃ O ₄ /Kitosan	45
3.3.2.	Pengujian Deteksi Nanokomposit Magnetik Menggunakan Chip Sensor GMR AAL024.....	50
3.3.3.	Olah Data Karakterisasi	54
3.3.4.	Analisis Sinyal Sensor serta Evaluasi Sensitivitas, Linieritas, dan <i>Limit of Detection</i> (LOD)	58
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		63
4.1.	Hasil Penelitian	63
4.1.1.	Hasil Sintesis Material Fe ₃ O ₄ dan Fe ₃ O ₄ /Kitosan	63
4.1.2.	Data Karakterisasi XRD.....	66
4.1.3.	Data Karakterisasi VSM	67
4.1.4.	Data Karakterisasi FTIR	68
4.1.5.	Analisis Sinyal Sensor serta Evaluasi Sensitivitas, Linieritas, dan <i>Limit of Detection</i> (LOD)	70
4.2.	Pembahasan.....	73
4.2.1.	Analisis Hasil Sintesis.....	73
4.2.2.	Data XRD.....	75
4.2.3.	Data FTIR	76
4.2.4.	Data VSM	77
4.2.5.	Evaluasi Performa Sensor GMR	78
BAB V KESIMPULAN.....		83
DAFTAR PUSTAKA.....		85
LAMPIRAN.....		92
CURICULUM VITAE (CV)		98

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Dua jenis gerakan elektron (a) elektron yang mengorbit dan (b) elektron yang berputar (Callister dan Rethwisch, 2018).....	15
Gambar 2.2 (a) Skema dari domain dalam material feromagnetik atau ferrimagnetik dan (b) perubahan arah dipol magnetik sepanjang dinding domain (Callister & Rethwisch, 2018).....	16
Gambar 2.3 Kurva Histerisis (Rambey, 2017).....	18
Gambar 2.4 Konfigurasi momen magnetik pada diamagnetik (Callister dan Rethwisch, 2018).....	19
Gambar 2.5 Konfigurasi momen magnetik pada paramagnetik (Callister dan Rethwisch, 2018).....	19
Gambar 2.6 Konfigurasi momen magnetik pada ferroamagnetik, antiferromanetik, ferrimagnetik. (Sarjana, 2011).	20
Gambar 2.7 a) fenomena GMR, b) mekanisme kerja GMR (Rambey, 2017)	22
Gambar 2.8 Konfigurasi arus GMR: (a) CPP dan (b) CIP (Ennen dkk., 2016)....	24
Gambar 2.9 Mekanisme spin-valve: (a) konfigurasi parallel dan (b) antiparallel (Ennen dkk., 2016).....	25
Gambar 2.10 Skematik Helmholtz coil dengan dua kumparan identik yang dialiri arus searah dan terpisah sejauh jari-jarinya (Shirzadfar, 2014).	27
Gambar 2.11 <i>Interface</i> ferromagnetik dan antiferromagnetik (a) ideal (b) kasar (Getzlaff, 2008)	29
Gambar 2.12 (a) medan positif menyaturasi FM, (b) saat medan dibalik, FM tetap terpin oleh AFM, (c) hanya medan cukup besar yang membalikkan FM (Getzlaff, 2008).	30
Gambar 2.13 Daun dan serbuk <i>Moringa oleifera</i> (Hospitals, 2024).....	32
Gambar 2.14 Difraksi sinar x (Callister dan Rethwisch, 2018)	38
Gambar 2.15 Skema Alat Spektroskopi FT-IR. (1) Sumber inframerah. (2) Pembagi berkas (<i>beam splitter</i>). (3) Kaca pemantul. (4) Sensor inframerah. (5) Sampel (6) Display (Hardiko dkk., 2024).....	40
Gambar 3.1 Diagram alir prosedur kerja.....	44
Gambar 3.2 Diagram alir prosedur kerja sintesis Fe ₃ O ₄ /kitosan.....	45
Gambar 3.3 Prosedur sintesis Fe ₃ O ₄ : a) pembuatan ekstrak MO, b) <i>green synthesis</i> Fe ₃ O ₄ , c) <i>green synthesis</i> Fe ₃ O ₄ /Kitosan.....	49
Gambar 3.4 Diagram alir prosedur kerja deteksi Fe ₃ O ₄ /kitosan menggunakan chip sensor GMR AAL024	50
Gambar 3.5 Foto chip GMR komersial AAL024 yang diproduksi oleh NVE Corporation (Ardiyanti, 2023).....	51
Gambar 3.6 <i>Set up</i> alat GMR (Zurnansyah, 2024).....	53
Gambar 3.7 Pola puncak difraksi hasil karakterisasi XRD (Artauli H dkk., 2015)	55
Gambar 3.8 Contoh hasil karakterisasi VSM dari sampel Fe ₃ O ₄ (Garcia, 2024) 57	
Gambar 3.9 Contoh hasil analisis gmr yang diperoleh dari NPM Fe ₃ O ₄ (Ardiyanti dkk., 2023).....	59
Gambar 4.1 Hasil ekstrak MO	63
Gambar 4.2 Hasil <i>green synthesis</i> Fe ₃ O ₄ : (a) Endapan Fe ₃ O ₄ (b) Serbuk Fe ₃ O ₄ ..	64

Gambar 4.3 Larutan kitosan.....	65
Gambar 4.4 Serbuk hasil <i>green synthesis</i> Fe ₃ O ₄ /Kitosan	65
Gambar 4.5 Pola grafik XRD dari <i>green synthesis</i> : a) Fe ₃ O ₄ , b) Fe ₃ O ₄ /Kitosan	66
Gambar 4.6 Kurva histerisis <i>green synthesis</i> : a) Fe ₃ O ₄ , b) Fe ₃ O ₄ /kitosan.....	68
Gambar 4.7 Spektrum FTIR : a) MO, b) Kitosan c) Fe ₃ O ₄ , d) Fe ₃ O ₄ /kitosan.....	69
Gambar 4.8 Nilai sinyal sensor : a) Fe ₃ O ₄ , b) Fe ₃ O ₄ /kitosan.....	71
Gambar 4.9 Analisis linieritas sensor & sensitivitas sensor : a) Fe ₃ O ₄ , b) Fe ₃ O ₄ /kitosan	72
Gambar 4.10 a) Fe ₃ O ₄ , b) Fe ₃ O ₄ /kitosan.....	73
Gambar 4.11 Ilustrasi (a) deteksi label magnetik menggunakan chip sensor GMR AAL024 dan (b) ketergantungan perubahan resistansi sensor terhadap <i>stray field</i> label magnetik	78
Gambar L1 Pola Grafik XRD hasil <i>green synthesis</i> barupa : a) Fe ₃ O ₄ , b) Fe ₃ O ₄ /kitosan.....	92
Gambar L2. Perhitungan LOD pada pengujian sinyal untuk sampel Fe ₃ O ₄ pada <i>software origin</i>	95
Gambar L3. Perhitungan LOD pada pengujian sinyal untuk sampel Fe ₃ O ₄ /Kitosan pada <i>software origin</i>	96
Gambar L4. a) Set up alat uji gmr, b) chip sensor GMR AAL024, c) olah data GMR	97



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Daftar Alat Sintesis	42
Tabel 3. 2 Daftar Bahan Sintesis.....	43
Tabel 3.3 Daftar Spesifikasi Perangkat keras komputer	43
Tabel 3.4 Daftar perangkat lunak karakterisasi.....	43
Tabel 3.5 Daftar Alat Pada Rangkaian GMR.....	44
Tabel 3.6 Nilai koefisien korelasi dan interpretasinya (Iskandar dkk., 2017)	60
Tabel L1. Perhitungan ukuran kristalit beserta ralat	93
Tabel L2. Perhitungan parameter kisi beserta ralatnya	94
Tabel L3. Datasheet sinyal sensor dan deviasi untuk sampel Fe_3O_4	94
Tabel L4. Datasheet sinyal sensor dan deviasi untuk sampel Fe_3O_4 /Kitosan	95



DAFTAR ISTILAH

<i>Chelating Agent</i>	senyawa kimia yang dapat membentuk ikatan kompleks dengan ion logam, "menjepit" logam tersebut dan mencegahnya berinteraksi dengan komponen lain dalam suatu sistem
Oersted (Oe)	satuan turunan untuk mengukur kekuatan medan magnet (H)
Medan Koersivitas (H _c)	ukuran kekuatan medan magnet yang diperlukan untuk menghilangkan magnetisasi pada suatu bahan feromagnetik
Magnetisasi Remanen (M _r)	magnetisasi yang tersisa pada suatu bahan setelah medan magnet eksternal dihilangkan
Magnetisasi Saturasi (M _s)	kondisi ketika suatu material feromagnetik atau ferrimagnetik telah mencapai magnetisasi maksimumnya, dan medan magnet eksternal tambahan tidak dapat lagi meningkatkan magnetisasi material tersebut
<i>Relative Standard Deviation</i> (RSD)	ukuran statistik yang menunjukkan seberapa tersebar data dalam suatu kumpulan data relatif terhadap rata-ratanya, biasanya dinyatakan dalam persen
<i>Limit Of Detection</i> (LOD)	konsentrasi terendah suatu zat yang dapat dibedakan secara akurat dari pengukuran kosong atau latar belakang dengan tingkat keyakinan tertentu

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Nanoteknologi mengalami perkembangan pesat selama beberapa dekade terakhir, khususnya di bidang biomedis dan sensor berbasis nanomaterial. Perkembangan ini turut mendorong inovasi signifikan dalam teknologi material guna memenuhi kebutuhan di berbagai sektor, seperti biomedis, energi, dan lingkungan (Sahu dkk., 2023). Dalam bidang biomedis, diperlukan sistem penghantaran obat yang lebih efisien dan spesifik (Garcia dkk., 2024), serta material yang dapat digunakan sebagai label biomolekuler dalam biosensor (Ardiyanti dkk., 2023).

Material magnetik dengan sifat fungsional telah menjadi fokus utama dalam penelitian terbaru karena potensinya dalam berbagai aplikasi. Sifat fungsional ini mencakup kemampuannya untuk merespons medan magnet dengan perubahan resistansi listrik (magnetoresistansi) (Fert, 2008), perubahan suhu (efek magnetokalorik) (Gschneidner dkk., 2005), dan perubahan polarisasi cahaya (sifat magneto-optik) (Kirilyuk dkk., 2010). Salah satu material yang banyak dikembangkan adalah nanopartikel magnetik (NPM), yang memiliki berbagai aplikasi, seperti deteksi molekuler (Hendrian dan Munasir, 2023), penghantaran obat dan terapi hipertermia (Kurniasih, 2021), pencitraan resonansi magnetik (MRI) (Suharyadi, 2024), serta bioteknologi (Devkota dkk., 2014). Untuk dapat diaplikasikan secara optimal dalam bidang biomedis, NPM harus memenuhi beberapa persyaratan, seperti biokompatibilitas, non-toksisitas, stabilitas dalam

medium koloid, distribusi ukuran yang seragam, serta momen magnetik tinggi dengan medan remanen yang minimal (Tuny dkk., 2020). Modifikasi permukaan dan konjugasi dengan biopolimer fungsional dapat meningkatkan karakteristik NPM agar sesuai dengan kebutuhan medis tertentu.

Menariknya, unsur besi yang merupakan komponen utama dalam banyak material magnetik telah disebutkan dalam Al-Qur'an sebagai elemen yang memiliki kekuatan besar dan manfaat luas bagi manusia. Allah berfirman:

وَأَنْزَلْنَا الْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ وَمَنَافِعُ لِلنَّاسِ

"Dan Kami menurunkan besi yang padanya terdapat kekuatan yang hebat dan berbagai manfaat bagi manusia." (QS. Al-Hadid [57]: 25)

Tafsir Ibnu Katsir menjelaskan bahwa besi memiliki peran penting dalam kehidupan manusia, termasuk dalam perkembangan teknologi dan kesehatan. Tafsir Al-Muyassar menambahkan bahwa besi bukan hanya bahan konstruksi, tetapi juga memiliki kegunaan yang luas dalam berbagai aspek peradaban manusia. Dalam konteks penelitian modern, senyawa berbasis besi, seperti Fe_3O_4 (magnetit), telah menjadi bahan utama dalam pengembangan material magnetik untuk keperluan medis dan industri. Hal ini menunjukkan bahwa manfaat besi yang disebutkan dalam Al-Qur'an sejalan dengan temuan ilmiah masa kini, di mana material berbasis besi terus dikembangkan untuk teknologi canggih, termasuk bidang biomedis dan nanoteknologi.

Magnetit (Fe_3O_4) merupakan salah satu material magnetik yang memiliki potensi besar dalam berbagai aplikasi teknologi, terutama dalam bidang sensor dan biomedis (Ruíz-Baltazar dkk., 2019). Fe_3O_4 memiliki sifat magnetik tinggi,

konduktivitas listrik yang baik, serta stabilitas kimia yang cukup tinggi, menjadikannya ideal untuk berbagai aplikasi berbasis medan magnet. Dalam skala nanometer, nanopartikel Fe_3O_4 (NP Fe_3O_4) telah dimanfaatkan dalam berbagai bidang, seperti bioteknologi (Suharyadi, 2024), biosensing (Ardiyanti dkk., 2018), katalisis, cairan magnetik, teknik pemisahan (Setyawan, 2018), dan penyimpanan energi (Issa, 2019). Dalam bidang biomedis, NP Fe_3O_4 memainkan peran penting dalam penghantaran obat atau gen tertarget (Garcia dkk., 2024), pencitraan MRI bioteknologi (Suharyadi, 2024), peningkatan kontras pencitraan, serta biofotonik. Selain itu, material ini juga banyak digunakan dalam deteksi, diagnosis, dan terapi kanker berbasis medan magnet. Keunggulan Fe_3O_4 NPs pada skala nanometer terutama disebabkan oleh rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi, yang berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi reaksi kimia, khususnya dalam aplikasi katalisis (Setyawan, 2018). Namun, Fe_3O_4 NPs juga memiliki keterbatasan, seperti kecenderungan mengalami aglomerasi dan oksidasi, yang dapat menurunkan stabilitas serta mengurangi efektivitasnya dalam berbagai aplikasi (Wu dkk., 2015). Oleh karena itu, diperlukan strategi yang tepat untuk mengatasi tantangan ini agar Fe_3O_4 NPs dapat lebih optimal dalam aplikasinya.

Salah satu metode yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan stabilitas dan kinerja Fe_3O_4 adalah dengan melapisi material ini menggunakan polimer alami seperti Kitosan. Kitosan merupakan biopolimer yang diperoleh melalui proses deasetilasi kitin, yakni komponen utama dari eksoskeleton hewan Crustacea seperti udang dan kepiting. Polimer ini memiliki rumus kimia umum $(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{O}_4)_n$ dan dikenal sebagai poli (N-amino-2-deoksi- β -D-glukopiranos) (Garcia dkk., 2024).

(Mahardika dkk., 2020). Kitosan memiliki berbagai sifat unggul yang menjadikannya menarik untuk aplikasi biomedis dan lingkungan, antara lain biokompatibilitas, biodegradabilitas (Widyastuti, 2023), serta kemampuan berinteraksi dengan biomolekul (Purwanti dkk., 2021). Pelapisan Fe_3O_4 dengan Kitosan telah terbukti meningkatkan stabilitas dispersi dalam media cair, mengurangi toksisitas, serta memperbaiki sifat permukaan, sehingga lebih optimal untuk aplikasi biomedis (Reddy dkk., 2012).

Seiring meningkatnya kesadaran akan pentingnya pendekatan ramah lingkungan, metode sintesis nanomaterial berbasis tanaman, yang dikenal sebagai *green synthesis*, terus dikembangkan (Hendrian dan Munasir, 2023). Metode ini memanfaatkan ekstrak tanaman sebagai agen pereduksi dan penstabil, sehingga dapat menggantikan penggunaan reagen kimia berbahaya pada sintesis konvensional. Salah satu tanaman yang memiliki potensi besar dalam *green synthesis* adalah *Moringa oleifera* (MO), karena kandungan metabolit sekundernya seperti *flavonoid* dan *polifenol* yang berperan penting dalam proses reduksi dan stabilisasi nanopartikel (Sankhalkar dan Vernekar, 2016). Selain itu, daun kelor memiliki keunggulan berupa ketersediaan yang melimpah, biaya produksi rendah, serta kemampuan menghasilkan nanopartikel stabil, sehingga menjadikannya material yang ideal untuk meningkatkan kinerja Fe_3O_4 dalam sistem sensor. Penelitian sebelumnya juga melaporkan bahwa kandungan flavonoid pada daun kelor mencapai 7,79 mg/g, yang semakin mendukung potensinya sebagai agen pereduksi alami (Pradana dan Wulandari, 2019).

Sensor *Giant Magnetoresistance* (GMR) merupakan salah satu teknologi sensor yang banyak digunakan dalam berbagai bidang, termasuk penyimpanan data, deteksi biomolekul, dan pemantauan medan magnet. Sejak ditemukan pada tahun 1988, sensor GMR telah banyak diterapkan dalam teknologi penyimpanan data, seperti *hard disk drive* (HDD) dan *magnetoresistive random-access memory* (MRAM). Seiring perkembangan teknologi, pada tahun 1998, sensor GMR mulai digunakan sebagai biosensor dalam deteksi biomolekul (Baselt dkk., 1998). Modifikasi sensor GMR dengan Fe_3O_4 /Kitosan terbukti meningkatkan stabilitas dispersi, mengurangi aglomerasi, serta meningkatkan daya magnetisasi, yang pada akhirnya meningkatkan sensitivitas sensor dalam mendeteksi biomolekul target.

Dalam penelitian sebelumnya, penggunaan label magnetik dikaji sebagai upaya untuk meningkatkan sensitivitas deteksi sensor GMR (Ardiyanti dkk., 2023). Label magnetik umumnya berupa nanopartikel magnetik, seperti Fe_3O_4 , yang telah dimodifikasi agar dapat berinteraksi dengan target biomolekul, seperti protein, DNA, atau bakteri. Dalam sistem sensor GMR, label magnetik berfungsi sebagai penanda yang menghasilkan respons magnetik ketika berikatan dengan target, sehingga memungkinkan deteksi dengan resolusi tinggi. Keunggulan penggunaan label magnetik dibandingkan metode deteksi lainnya terletak pada kemampuannya untuk bekerja dalam lingkungan cair tanpa memerlukan proses pencucian yang kompleks, serta kemampuannya menghasilkan sinyal yang stabil dan dapat direproduksi dengan baik.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis Fe_3O_4 /Kitosan menggunakan metode *green synthesis* dengan ekstrak

MO sebagai agen pereduksi dan penstabil, serta mengevaluasi kinerjanya dalam sistem sensor GMR. Dengan memanfaatkan Fe_3O_4 /Kitosan sebagai label magnetik, penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan sensitivitas dan efisiensi sensor berbasis GMR untuk aplikasi biosensor, serta memberikan kontribusi terhadap pengembangan material magnetik yang lebih ramah lingkungan dalam teknologi canggih masa depan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, penelitian ini berusaha menjawab beberapa pertanyaan utama, yaitu:

1. Bagaimana proses sintesis nanokomposit Fe_3O_4 /Kitosan dengan rasio komposisi 2:1 menggunakan ekstrak MO sebagai agen pereduksi dan penstabil?
2. Bagaimana pengaruh penambahan Kitosan terhadap struktur kristal, sifat magnetik, dan gugus fungsi pada Fe_3O_4 hasil sintesis?
3. Bagaimana performa sensor GMR AAL024 dalam mendeteksi nanokomposit Fe_3O_4 /Kitosan ditinjau dari sensitivitas, linearitas, batas deteksi, dan standar deviasi relatif ?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian yang dilakukan memiliki beberapa tujuan diantaranya adalah sebaai berikut:

1. Mensintesis nanokomposit Fe_3O_4 /Kitosan dengan rasio 2:1 melalui metode *green synthesis* menggunakan ekstrak MO sebagai agen reduksi dan penstabil.

2. Menganalisis struktur kristal, sifat magnetik, dan gugus fungsi dari nanokomposit Fe_3O_4 /Kitosan hasil sintesis.
3. Menentukan dan menganalisis parameter sensitivitas, linearitas, dan standar deviasi relatif Fe_3O_4 /Kitosan dengan sensor GMR.

1.4 Batasan Penelitian

Agar penelitian ini lebih terarah, beberapa batasan telah ditetapkan:

1. Sintesis nanokomposit Fe_3O_4 / Kitosan dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan metode *green synthesis* dengan ekstrak MO.
2. Karakterisasi material meliputi analisis struktur kristal menggunakan XRD, sifat magnetik menggunakan VSM, serta gugus fungsi menggunakan FTIR.
3. Pengujian performa sensor dibatasi pada penggunaan chip sensor GMR AAL024 produksi NVE.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan biosensor berbasis nanomaterial yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, dan efisien. Secara akademik, penelitian ini memperkaya wawasan mengenai sintesis Fe_3O_4 /Kitosan melalui metode *green synthesis* serta interaksinya dalam meningkatkan stabilitas dan performa sensor GMR. Dari segi aplikasi, hasil penelitian ini berpotensi dalam pengembangan biosensor magnetik yang lebih portabel dan sensitif untuk deteksi biomolekul dalam bidang medis dan diagnostik.

BAB V

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nanokomposit Fe_3O_4 /kitosan berhasil disintesis dengan rasio 2:1 menggunakan metode *green synthesis*. Hasil sintesis menunjukkan terbentuknya serbuk Fe_3O_4 /kitosan berwarna coklat gelap dengan sifat magnetik yang masih terjaga.
2. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan pola difraksi khas struktur spinel kubik dengan puncak pada bidang (220), (311), (400), (511), dan (440), yang masing-masing terdeteksi pada sudut $30,2^\circ$, $35,5^\circ$, $43,0^\circ$, $56,8^\circ$, dan $62,7^\circ$, tanpa munculnya puncak tambahan dari fasa pengotor. Ukuran kristalit Fe_3O_4 meningkat dari 5,654 nm menjadi 11,226 nm setelah dilapisi kitosan. Hasil FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus fungsi khas kitosan dan ikatan Fe–O, serta menunjukkan adanya interaksi antara Fe_3O_4 dengan kitosan. Karakterisasi VSM memperlihatkan penurunan nilai magnetisasi saturasi dari 55,317 emu/g (Fe_3O_4) menjadi 42,440 emu/g (Fe_3O_4 /kitosan), yang menandakan keberhasilan proses pelapisan.
3. Pengujian sensor GMR menunjukkan bahwa baik Fe_3O_4 maupun Fe_3O_4 /kitosan memberikan sinyal yang meningkat seiring bertambahnya konsentrasi. Sensor Fe_3O_4 memiliki sensitivitas $6,090 \pm 0,310 \text{ mV}/(\text{mg/mL})$ dengan linearitas $R^2=0,986$ dan LOD sebesar 3,780 mg/mL. Sensor

Fe_3O_4 /kitosan memiliki sensitivitas $3,650 \pm 0,519 \text{ mV}/(\text{mg}/\text{mL})$ dengan linearitas $R^2 = 0,961$ dan LOD sebesar $6,420 \text{ mg}/\text{mL}$. Meskipun sensitivitas dan LOD sedikit menurun akibat penambahan kitosan, keberadaan chitosan memberikan kestabilan dispersi dan potensi integrasi material untuk aplikasi biosensor.

SARAN

1. Perlu dilakukan variasi rasio Fe_3O_4 :Kitosan (misalnya 1:1, 3:1, dan 4:1) untuk mengoptimalkan sensitivitas, linearitas, dan LOD sensor GMR.
2. Disarankan untuk menambahkan karakterisasi TEM dan SEM lebih detail untuk mengamati distribusi nanopartikel Fe_3O_4 dalam matriks kitosan.
3. Untuk meningkatkan sensitivitas dan menurunkan LOD, dapat dilakukan modifikasi proses sintesis, seperti variasi suhu atau waktu sintesis, serta pemurnian ekstrak MO.
4. Penelitian lanjutan dapat mengintegrasikan sistem sensor dengan aplikasi berbasis IoT untuk pemantauan real-time.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajinkya, N., Yu, X., Kaithal, P., Luo, H., Somani, P., dan Ramakrishna, S. (2020). Magnetic iron oxide nanoparticle (Ionp) synthesis to applications: Present and future. *Materials*, 13(20), 1–35. <https://doi.org/10.3390/ma13204644>
- Antarnusa, G., Esmawan, A., Dwi Jayanti, P., Rizki Fitriani, S., Suherman, A., Kinarya Palupi, E., Umam, R., dan Ardimas. (2022). Synthesis of Fe₃O₄ at different reaction temperatures and investigation of its magnetic properties on giant magnetoresistance (GMR) sensors for bio-detection applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 563. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169903>
- Antarnusa, P. E. S. and E. S. (2018). Wheatstone bridge-giant magnetoresistance (GMR) sensors based on Co/Cu multilayers for bio-detection applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 1011(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1011/1/012061>
- Ardiyanti, H., Mabarroh, N., Wibowo, N. A., Istiqomah, N. I., Tumbelaka, R. M., Ulil Absor, M. A., dan Suharyadi, E. (2023). New design of a commercial chip-based GMR sensor with magnetite nanoparticles for biosensing applications. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 8(2). <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2023.100556>
- Ardiyanti, H., Puspitarum, D., Maryana, O., dan Pujakesuma, W. (2018). Synthesis And Bonding Analysis Of Magnetite Composite Based On Sugarcane Bagasse. *Journal of Science and Applicative Technology SYNTHESIS*, 197–200. <https://doi.org/https://doi.org/10.35472/281425>
- Artauli H, F., Pardede, I., dan Suharyadi, E. (2015). Kajian Magnetoresistansi pada Nanopartikel Magnetite (Fe₃O₄) yang Dientkapsulasi dengan Polyethylene Glycole (PEG) dan Biomaterial dengan Sensor Lapisan Tipis Co/Cu Multilayer Berbasis Giant Magnetoresistance (GMR) (Halaman 13 s.d. 19). *Jurnal Fisika Indonesia*, 19(56), 13–19. <https://doi.org/10.22146/jfi.24352>
- Baselt, D. R., Lee, G. U., Natesan, M., Metzger, S. W., Sheehan, P. E., dan Colton, R. J. (1998). A biosensor based on magnetoresistance technology. *Biosensors and Bioelectronics*, 13(7–8), 731–739. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956566398000372>
- Callister, W. D. J., dan Rethwisch, D. G. (2018). Materials Science And Engineering an Introduction. In *Physical Basis of Plasticity in Solids* (10 th). NJ: John Wiley & Son.
- Cullity, B. D., dan Graham, C. D. (2011). *Introduction to Magnetic Materials* (2nd ed.). Wiley-IEEE Press.

- Devkota, J., Mai, T. T. T., Stojak, K., Ha, P. T., Pham, H. N., Nguyen, X. P., Mukherjee, P., Srikanth, H., dan Phan, M. H. (2014). Synthesis, inductive heating, and magnetoimpedance-based detection of multifunctional Fe₃O₄ nanoconjugates. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 190, 715–722. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.09.033>
- Ennen, I., Kappe, D., Rempel, T., Glenske, C., dan Hütten, A. (2016). Giant Magnetoresistance: Basic concepts, microstructure, magnetic interactions and applications. *Sensors (Switzerland)*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/s16060904>
- Fatimah, S., Sri, A., Wahyuni, H., Industri, T., Palopo, D., Palopo, K., Malang, U. N., Malang, K., dan Fe, S. (2023). *Green Synthesis Nanopartikel Fe₃O₄ Berbasis Pasir Alam sebagai Degradator Metilen Biru dengan Metode Elektrokoagulasi* *Green Synthesis of Fe₃O₄ Nanoparticles Based on Natural Sand as Methylene Blue Degradation by Electrocoagulation Method*. 13(1), 86–94. <https://doi.org/10.26418/positron>.
- Fert, A. (2008). Nobel lecture: Origin, development, and future of spintronics nobel lecture: Origin, development, and future of spintronics. *Reviews of Modern Physics*, 80(4), 1517–1530. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.80.1517>
- Garcia, S., Mabarroh, M., Cuana, R., Ardiyanti, H., Istiqomah, N. I., dan Suharyadi, E. (2024). Detection of Green-Synthesized Fe₃O₄/Chitosan Using Spin Valve GMR Sensor with Wheatstone Bridge Circuit. *Materials Science Forum*, 1114. <https://doi.org/https://doi.org/10.4028/p-7ulYDW>
- Garcia, S., Mabarroh, N., Darmawan, M. Y., Wibowo, N. A., Ardiyanti, H., Tumbelaka, R. M., Istiqomah, N. I., dan Suharyadi, E. (2023). Two spin-valve GMR thin films on half wheatstone bridge circuit for detecting green-synthesized Fe₃O₄@Ag nanoparticles-labeled biomolecule. *Materialia*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101930>
- Getzlaff, M. (2008). *Fundamentals of magnetism*. Springer.
- Gschneidner, A., Pecharsky, V. K., dan Tsokol, A. O. (2005). Recent developments in magnetocaloric materials. *Reports on Progress in Physics*, 68(6), 1479–1539. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/6/R04>
- Hardiko, M. H., Ridwan, M., dan Nuraliyah, A. (2024). Studi pengaruh waktu dan suhu recovery limbah katalis nikel terpakai (spent catalyst) pasca proses hidrogenasi RBDPO dengan metode kalsinasi. *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering*, 1(2), 140–161. <https://doi.org/10.61511/jimese.v1i2.2024.562>
- Hendrian, E., dan Munasir,). (2023). Green synthesis of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles (MNPs) using plant extract and Biomedicine Applications: Targeted Anticancer Drug Delivery System. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia*

- (IFI), 12, 30–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.26740/ifi.v12n2.p30-46>
- Heriyanto, H., Intansari, H., dan Anggietisna, A. (2012). Pembuatan membran kitosan berikatan silang. *Teknika: Jurnal Sains dan Teknologi*, 8(2), 114–123. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.36055/tjst.v9i2.6694>
- Hospitals, T. M. S. (2024). *Mengenal Berbagai Manfaat Daun Kelor untuk Kesehatan*. siloamhospitals.com. <https://www.siloamhospitals.com/informasi-siloam/artikel/manfaat-daun-kelor-untuk-kesehatan>
- Huq, T., Khan, A., Brown, D., Dhayagude, N., dan He, Z. (2022). Sources , production and commercial applications of fungal chitosan : A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 7(2), 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.01.002>
- Iskandar, D., Suprpto, Y. K., dan Purnama, I. K. E. (2017). Determination of priority parameter for classification of poverty using chi-square method and crammer's V correlation. *Proceedings - 2016 International Seminar on Application of Technology for Information and Communication, ISEMANTIC 2016*, 247–252. <https://doi.org/10.1109/ISEMANTIC.2016.7873846>
- Kirilyuk, A., Kimel, A. V., dan Rasing, T. (2010). Ultrafast optical manipulation of magnetic order. *Reviews of Modern Physics*, 82(3), 2731–2784. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.2731>
- Kiwumulo, H. F., Muwonge, H., Ibingira, C., Lubwama, M., Kirabira, J. B., dan Ssekitoaleko, R. T. (2022). Green synthesis and characterization of iron-oxide nanoparticles using Moringa oleifera: a potential protocol for use in low and middle income countries. *BMC Research Notes*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s13104-022-06039-7>
- Kong, J., dan Yu, S. (2007). Fourier transform infrared spectroscopic analysis of protein secondary structures. *Acta Biochimica et Biophysica Sinica*, 39(8), 549–559. <https://doi.org/10.1111/j.1745-7270.2007.00320.x>
- Kurniasih, T. R. (2021). Review : Penggunaan Teknologi Nanopartikel Sebagai Agen Teranostik Review : the Use of Nanoparticle Technology As. *Diseminasi Hasil Penelitian Dosen Program Studi Keperawatan dan Farmasi*, 3, 1–6. <http://eprints.stikes-notokusumo.ac.id/id/eprint/83>
- 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/cr068445e>
- Mahardika, R. G., Jumnahdi, M., dan Widyaningrum, Y. (2020). Deasetilasi Kitin

- Cangkang Rajungan (*Poturnus pelagicus*) Menjadi Kitosan Menggunakan Iradiasi Microwave. *Al-Kimia*, 8(2), 149–158. <https://doi.org/10.24252/al-kimiav8i2.7999>
- Nalle, F. C., Wahid, R., Wulandari, I. O., dan Sabarudin, A. (2019). Synthesis And Characterization Of Magnetic Fe₃O₄ Nanoparticles Using Oleic Acid As Stabilizing Agent. *Rasayan J. Chem*, 12(1), 14–21. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.31788/RJC.2019.1214082>
- Nolting, W., dan Ramakanth, A. (2009). *Quantum Theory of Magnetism*. Springer.
- Pari, R. F., Mayangsari, D., dan Hardiningtyas, S. D. (2022). Depolymerization of Chitosan from Shrimp Shell Using Papain Enzyme and Ultraviolet Light Irradiation. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 25(1), 118–131. <https://doi.org/10.17844/jphpi.v25i1.40311>
- Pradana, D. L. C., dan Wulandari, A. A. (2019). Uji TOTAL FLAVONOID DARI EKSTRAK AIR AUN KELOR (*Moringa oleifera*) DAN SECANG (*Caesalpinia sappan* L.). *Jurnal Insan Farmasi Indonesia*, 2(2), 271–277. <https://doi.org/10.36387/jifi.v2i2.407>
- Prasetyowati, R., Widiawati, D., Swastika, E., dan Ariswan, W. (2021). Synthesis And Characterization Of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles Based On Iron Sands At Glagah Beach Kulon Progo With Coprecipitation Methods At Various Nh₄oh Concentrations. *J. Sains Dasar*, 10(2), 57–61. <https://doi.org/10.21831/jsd.v10i2.43043>
- Prayoga, G. A., Oktarisa, Y., Antarnusa, G., dan Fitriani, N. S. (2024). The Effect of Chitosan Addition on Phase Composition and Detection Sensitivity of Fe₃O₄ / Chitosan Magnetic Label Nanoparticles Based on Giant Magnetoresistance Sensor. *Journal Of Energy, Materials, And Instrumentation Technology*, 5(4). <https://doi.org/10.23960/jemit.v5i4.282>
- Purwanti, A., Sulistyaningsih, E., Alika, K., Indradi, S., Saraswaty, C., dan Bunganaen, P. (2021). Pembuatan Kitosan dari Kulit Udang dengan Ekstraksi Menggunakan Microwave. *Teknologi Industri dan Informasi*, 2021(November), 29–034.
- Putra, A. A. G. R. Y. (2016). *Optimasi Metode Ekstraksi Daun Binahong (Anredera Scandens (L.) Moq) Untuk Mendapatkan Ekstrak Yang Terstandar*. Katalog Repositori Penelitian. <https://e-perpus.unud.ac.id/repositori/penelitian?nip=1975010220140822001&tahun=2016#:~:text=Metode ekstraksi panas merupakan metode,contohnya adalah refluks dan sokletasi.>
- Putri dkk. (2021). Perbandingan Metode Ekstraksi Senyawa Aktif Daun Kelor

- (Moringa Oleifera): Metode Maserasi Dan Microwave-Assisted Extraction (Mae). *Dalton : Jurnal Pendidikan Kimia dan Ilmu Kimia*, 4(2), 25–33. <https://doi.org/10.31602/dl.v4i2.5931>
- Rambey, M. F. (2017). *Deskripsi singkat kurva histerisis*. 27 December 2017. <https://medium.com/@m.faizrambey/deskripsi-singkat-kurva-histerisis-4543360d287c>
- Reddy, L. H., Arias, J. L., Nicolas, J., dan Couvreur, P. (2012). Magnetic nanoparticles: Design and characterization, toxicity and biocompatibility, pharmaceutical and biomedical applications. *Chemical Reviews*, 112(11), 5818–5878. <https://doi.org/10.1021/cr300068p>
- Reis, M. (2013). *Fundamentals of Magnetism and Magnetic Materials*. Academic Press.
- Rizqi, A., Tabrani, H., Guntara, Y., Antarnusa, G., dan Firdaus, F. (2024). Sonar : Jurnal Multidisiplin Crystal Structure Analysis of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles By Green Synthesis Method Using Moringa Oleifera Extracts. *SONAR: Jurnal Multidisiplin*, 1(2), 74–80. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100999>
- Ruíz-Baltazar, Á. de J., Reyes-López, S. Y., Mondragón-Sánchez, M. de L., Robles-Cortés, A. L., dan Pérez, R. (2019). Eco-friendly synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles: Evaluation of their catalytic activity in methylene blue degradation by kinetic adsorption models. *Results in Physics*, 12(December 2018), 989–995. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.12.037>
- Sahu, M. K., Yadav, R., dan Tiwari, S. P. (2023). Recent advances in nanotechnology. *International Journal of Nanomaterials, Nanotechnology and Nanomedicine*, 9, 1–281. <https://doi.org/10.17352/2455-3492.000053>
- Sakuraba, Y., Izumi, K., Iwase, T., Bosu, S., Saito, K., Takanashi, K., Miura, Y., Futatsukawa, K., Abe, K., dan Shirai, M. (2010). Mechanism of large magnetoresistance in Co₂ MnSi/Ag/ Co₂ MnSi devices with current perpendicular to the plane. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 82(9), 1–5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.094444>
- Sankhalkar, S., dan Vernekar, V. (2016). Quantitative and Qualitative analysis of Phenolic and Flavonoid content in Moringa oleifera Lam and Ocimum tenuiflorum L. *Pharmacognosy Research*, 8(1), 16–21. <https://doi.org/10.4103/0974-8490.171095>
- Saptari, S. A. (2014). *Disain Material Absorber Gelombang Mikro Senyawa Dasar (La, Ba)(Mn, Ti)O₃ Melalui Proses Penghalusan Mekanik dan Sonikasi Daya Tinggi*. <http://repository.uinjkt.ac.id/dspace/handle/123456789/32214>

- Sarjana, B. (2011). *Sifat Magnetik Suatu Batuan*. WordPress.com. <https://poetrafic.wordpress.com/2011/01/18/sifat-magnetik-suatu-batuan/>
- Setyawan, H. (2018, Juli 24). *Inovasi teknologi partikel untuk menciptakan produk yang bermanfaat*. Laboratorium Elkimkor. <https://elkimkor.com/2018/07/24/inovasi-teknologi-partikel-untuk-menciptakan-produk-yang-bermanfaat/>
- Shirzadfar, H. (2014). Design And Evaluation Of A GMR-Biosensor For Magnetic Characterization Of Biological Medium. *Thesis, January*, 149. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2350.7361>
- Spaldin, N. (2010). *Magnetic Materials: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press.
- Sudarmono, Istiqomah, N. I., Budianti, S. I., Cuana, R., Puspitarum, D. L., Mahardhika, L. J., Chotimah, dan Suharyadi, E. (2024). Magnetically separable and reusable Fe₃O₄/chitosan nanocomposites green synthesized utilizing Moringa oleifera extract for rapid photocatalytic degradation of methylene blue. *Results in Chemistry*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.101245>
- Suharyadi, E. (2024). Perkembangan Bidang Nanomaterial Magnetik dan Aplikasinya. In *naskah pidato pengukuhan guru besar*.
- Taib, S., dan Suharyadi, E. (2015). Sintesis Nanopartikel Magnetite (Fe₃O₄) dengan Template silika (SiO₂) dan Karakterisasi Sifat Kemagnetannya. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 5(01), 23. <https://doi.org/10.13057/ijap.v5i01.256>
- Tuny, M. T., Putra, R. A., Suharyadi, E., Kato, T., dan Iwata, S. (2020). Synthesis , Characterization , And Application Of Fe₃O₄ Nanoparticles As A Signal Amplifier Element In Surface Plasmon Resonance Biosensing. *JOURNAL ONLINE OF PHYSICS*, 5(2), 65–74. <https://doi.org/10.22437/jop.v5i2.8259>
- Wibowo, N. A., dan Suharyadi, E. (2023). *Giant Magnetoresistance Sebagai Bio Sensor*. Nas Media Pustaka.
- Widyastuti, W. (2023). Perbandingan Karakteristik Dan Kualitas Kitosan Dari Kulit Udang Jerbung (*Penaeus merguensis* De Man) Dan Udang Windu (*Penaeus monodon* Fabricius). *SITAWA : Jurnal Farmasi Sains dan Obat Tradisional*, 2(1), 1–14. <https://doi.org/10.62018/sitawa.v2i1.24>
- Wu, K., Tonini, D., Liang, S., Saha, R., Chugh, V. K., dan Wang, J. P. (2022). Giant Magnetoresistance Biosensors in Biomedical Applications. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 14(8), 9945–9969. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c20141>

- Wu, W., Jiang, C., dan Roy, V. A. L. (2015). Recent progress in magnetic iron oxide-semiconductor composite nanomaterials as promising photocatalysts. *Nanoscale*, 7(1), 38–58. <https://doi.org/10.1039/c4nr04244a>
- Yang, Q., Zhou, Z., Sun, N. X., dan Liu, M. (2017). Perspectives of voltage control for magnetic exchange bias in multiferroic heterostructures. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, 381(14), 1213–1222. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.01.065>
- Yoga, M., Imani, N., dan Adrianto, N. (2023). Results in Chemistry Green synthesis of Fe₃O₄ / Ag composite nanoparticles using Moringa oleifera : Exploring microstructure , optical , and magnetic properties for magnetic hyperthermia applications. *Results in Chemistry*, 6(March), 100999. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100999>
- Zulaicha S, A., Syahjoko Saputra, I., Puspita S, I., dan Annas, D. (2020). Sintesis dan Karakterisasi Modifikasi Mikropartikel Magnetit (Fe₃O₄) Dalam Pemanfaatan Karat dengan Ekstrak Daun Ilalang (Imperata Cylindrica L). *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*, 2(2), 51–55. <https://doi.org/10.36873/jjms.2020.v2.i2.405>
- Zurnansyah. (2024). Biosensor Berbasis Giant Magnetoresistance Dengan Green-Synthesized Nanokomposit Fe₃O₄/Rgo Sebagai Label Magnetik. In *Universitas Gadjah Mada*. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.