

TUGAS AKHIR – TL184834

**ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI SURFAKTAN ASAM
GLUTAMAT TERHADAP KARAKTERISTIK FLUIDA
NANOPARTIKEL Fe_3O_4 SUPERPARAMAGNETIK UNTUK
APLIKASI TERAPI HIPERTERMIA**

PUTRI SAFA AILSA NUGROHO
NRP. 02511840000118

Dosen Pembimbing
Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.
NIP. 197410172006042001
Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.
NIP. 198302012008122002

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



TUGAS AKHIR – TL184834

**ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI SURFAKTAN ASAM
GLUTAMAT TERHADAP KARAKTERISTIK FLUIDA
NANOPARTIKEL Fe_3O_4 SUPERPARAMAGNETIK UNTUK
APLIKASI TERAPI HIPERTERMIA**

PUTRI SAFA AILSA NUGROHO
NRP. 02511840000118

Dosen Pembimbing
Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.
NIP. 197410172006042001
Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.
NIP. 198302012008122002

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL184834

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF GLUTAMIC ACID SURFACTANT CONCENTRATION ON THE CHARACTERISTICS OF SUPERPARAMAGNETIC Fe_3O_4 NANOPARTICLE FLUID FOR HYPERTHERMIA THERAPY APPLICATION

Putri Safa Ailsa Nugroho
NRP. 02511840000118

Advisor
Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.
NIP. 197410172006042001
Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.
NIP. 198302012008122002

Study Program of Materials Engineering
Departement of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

(This page is intentionally blank)

LEMBAR PENGESAHAN





ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI SURFAKTAN ASAM GLUTAMAT TERHADAP KARAKTERISTIK FLUIDA NANOPARTIKEL Fe_3O_4 SUPERPARAMAGNETIK UNTUK APLIKASI TERAPI HIPERTERMIA

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **PUTRI SAFA AILSA NUGROHO**
NRP. 02511840000118

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- | | | |
|--|--|---------------|
| 1. Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si. |  | Pembimbing |
| 2. Rindang Fajarin, S.Si., M.Si. |  | Ko-Pembimbing |
| 3. Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D. |  | Penguji |
| 4. Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. |  | Penguji |

SURABAYA
Juli, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET





ANALYSIS OF THE EFFECTS OF GLUTAMIC ACID SURFACTANT CONCENTRATION ON THE CHARACTERISTICS OF SUPERPARAMAGNETIC Fe₃O₄ NANOPARTICLE FLUID FOR HYPERTHERMIA THERAPY APPLICATION

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree of bachelor of engineering at
Undergraduate Study Program of Materials Engineering
Department of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **PUTRI SAFA AILSA NUGROHO**
NRP. 02511840000118

Approved by Final Project Examiner Team :

- | | | |
|--|--|------------|
| 1. Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si. |  | Advisor |
| 2. Rindang Fajarin, S.Si., M.Si. |  | Co-Advisor |
| 3. Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D. |  | Examiner |
| 4. Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. |  | Examiner |

SURABAYA
July, 2022

(This page is intentionally blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Putri Safa Ailsa Nugroho/02511840000118
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing/NIP : Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI SURFAKTAN ASAM GLUTAMAT TERHADAP KARAKTERISTIK FLUIDA NANOPARTIKEL Fe_3O_4 SUPERPARAMAGNETIK UNTUK APLIKASI TERAPI HIPERTERMIA” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 15 Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing



(Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.)
NIP. 197410172006042001

Mahasiswa



(Putri Safa Ailsa Nugroho)
NRP. 02511840000118

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student/NRP : Putri Safa Ailsa Nugroho/02511840000118
Departement : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Advisor/NIP : Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.

Hereby declare that the Final Project with the title of “ANALYSIS OF THE EFFECTS OF GLUTAMIC ACID SURFANTANT CONCENTRATION ON THE CHARACTERISTICS OF SUPERPARAMAGNETIC Fe₃O₄ NANOPARTICLE FLUID FOR HYPERTHERMIA THERAPY APPLICATION” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing..

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 15 July 2022

Acknowledged
Advisor

Student



(Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.)
NIP. 197410172006042001

(Putri Safa Ailsa Nugroho)
NRP. 02511840000118

(This page is intentionally blank)

**ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI SURFAKTAN ASAM GLUTAMAT
PADA KARAKTERISTIK FLUIDA NANOPARTIKEL Fe₃O₄
SUPERPARAMAGNETIK UNTUK APLIKASI TERAPI HIPERTERMIA**

Nama Mahasiswa / NRP : Putri Safa Ailsa Nugroho / 02511840000118
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.
Ko-Pembimbing : Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.

Abstrak

Nanoteknologi terus berkembang dari hari ke hari. Salah satu produk nanoteknologi yaitu *superparamagnetic iron oxide nanoparticles* (SPIONs) yang banyak diaplikasikan dalam bidang biomedis seperti pencitraan resonansi magnetik (MRI), agen pengantar obat dan sebagainya. Nanopartikel oksida besi yang didispersikan ke dalam cairan pembawa akan membentuk *ferrofluid* yang dapat dimanfaatkan sebagai terapi hipertermia karena *ferrofluid* mengubah energi elektromagnetik menjadi panas ketika dikenai medan magnet arus bolak-balik. Preparasi nanopartikel magnetit (Fe₃O₄) menggunakan metode ko-presipitasi yang sederhana dengan prekursor FeCl₂ dan FeCl₃ yang dititrasi dengan larutan basa kuat seperti NH₄OH serta mengontrol rasio molar Fe²⁺/Fe³⁺ pada 1:2 dapat menghasilkan SPIONs. Penambahan surfaktan ke dalam nanopartikel Fe₃O₄ dapat menghindari aglomerasi, mengontrol ukuran partikel serta memberi sifat biokompatibel. Perbandingan volume FeCl₂ dan FeCl₃ yang digunakan adalah 1:2 dan terdapat tiga variasi konsentrasi surfaktan asam glutamat (GA) yang digunakan yaitu 2:5, 3:5, 4:5. Nanopartikel Fe₃O₄ dari hasil sintesis kemudian didispersikan ke dalam cairan pembawa berupa air. Karakterisasi dilakukan menggunakan XRD, FTIR, SEM, PSA, VSM, hidrofobisitas, tegangan permukaan dan medan magnet. Pengaruh konsentrasi surfaktan GA terhadap nanopartikel Fe₃O₄ mempengaruhi peningkatan ukuran kristal dan ukuran partikel yaitu dengan ukuran kristal sebesar 8.98-9.83 nm dan ukuran partikel sebesar 58.77-955.4 nm. Penambahan surfaktan GA tidak mempengaruhi perubahan pada struktur kristal, dimana struktur yang terbentuk yaitu kubik dengan morfologi bentuk tidak beraturan (*irregular*). Penambahan konsentrasi surfaktan GA pada nanopartikel Fe₃O₄ memiliki pengaruh terhadap dispersitas saat pembentukan *ferrofluid*. Hal tersebut dibuktikan dengan sifat hidrofilik yang dimiliki oleh nanopartikel Fe₃O₄ sehingga dapat mengurangi tegangan permukaan serta dapat terdispersi ke dalam cairan pembawa air. Fluida nanopartikel Fe₃O₄ telah terbukti memiliki sifat superparamagnetik. Nilai magnetisasi saturasi tertinggi dimiliki oleh nanopartikel Fe₃O₄ murni yaitu sebesar 39.31 emu/g dan juga memperoleh nilai SAR tertinggi yaitu sebesar 155.61 W/mg. Peningkatan konsentrasi surfaktan GA pada nanopartikel Fe₃O₄ mempengaruhi penurunan terhadap nilai magnetisasi serta nilai SAR.

Kata Kunci: *Asam glutamat, Ferrofluid, Ko-presipitasi, Nanopartikel magnetit (Fe₃O₄), Superparamagnetik*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALYSIS OF THE EFFECTS OF GLUTAMIC ACID SURFACTANT
CONCENTRATION ON THE CHARACTERISTICS OF SUPERPARAMAGNETIC
Fe₃O₄ NANOPARTICLE FLUID FOR HYPERTHERMIA THERAPY APPLICATION**

Student Name / NRP : Putri Safa Ailsa Nugroho / 02511840000118
Departement : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Advisor : Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.
Co-Advisor : Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.

Abstract

Nanotechnology continues to develop everyday. One of the nanotechnology products is superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs) which are widely used in biomedical applications, such as magnetic resonance imaging (MRI), drug delivery, etc. Iron oxide nanoparticles dispersed in a liquid carrier will form a ferrofluid which can be applied as hyperthermia therapy because the ferrofluid converts electromagnetic energy into heat when subjected to an alternating current (AC) magnetic field. The synthesis of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles using a co-precipitation method due to its simplicity. The precursors used in this research are FeCl₂ and FeCl₃ which are titrated with a strong base solution such as NH₄OH and by controlling the Fe²⁺/Fe³⁺ molar ratio at 1:2 it can produce SPIONs. The addition of surfactants into Fe₃O₄ nanoparticles can avoid agglomeration, control particle size, and provide biocompatible properties. The volume ratio of FeCl₂ and FeCl₃ is used 1:2 and there are three variations of the concentration of glutamic acid (GA) surfactant which are 2:5, 3:5, 4:5. The Fe₃O₄ nanoparticles from the synthesis were dispersed into the water liquid carrier. Characterization using XRD, FTIR, SEM, PSA, VSM, hydrophobicity, surface tension and magnetic field. The effect of GA surfactant concentration on Fe₃O₄ nanoparticles affects the increase in crystal size and particle size with a crystal size of 8.98-9.83 nm and a particle size of 58.77-955.4 nm. The addition of GA surfactant did not affect changes in the crystal structure, where the structure formed was cubic with irregular shape morphology. The addition of GA surfactant concentration on Fe₃O₄ nanoparticles has an influence on the dispersion during the formation of ferrofluid. This is evidenced by the hydrophilic nature of Fe₃O₄ nanoparticles, so that it can be reduce tegangan permukaan and can be dispersed into water liquid carrier. Superparamagnetic Fe₃O₄ nanoparticle fluid has been shown to have superparamagnetic properties. Pure Fe₃O₄ nanoparticles have the highest saturation magnetization value, which is 39.31 emu/g and also obtains the highest SAR value of 155.61 W/mg. Increasing the concentration of GA surfactant in Fe₃O₄ nanoparticles affects the decrease in the magnetization value and the SAR value.

Keywords: *Co-precipitation, Ferrofluid, Glutamic acid, Magnetite nanoparticle, Superparamagnetic*

(This page is intentionally blank)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir dengan judul, “ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI SURFAKTAN ASAM GLUTAMAT TERHADAP KARAKTERISTIK FLUIDA NANOPARTIKEL Fe_3O_4 SUPERPARAMAGNETIK UNTUK APLIKASI TERAPI HIPERTERMIA”. terselesaikannya laporan tugas akhir ini tidak luput dari dukungan, bantuan, motivasi serta partisipasi dari semua pihak, untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si. dan Ibu Rindang Fajarin, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing tugas akhir atas segala ilmu dan bimbingan yang telah diberikan selama pelaksanaan tugas akhir hingga laporan selesai.
2. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D., selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FT-IRS ITS.
3. Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si., selaku dosen wali penulis yang senantiasa memberikan arahan selama masa perkuliahan.
4. Bapak/Ibu Dosen yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis.
5. Orang tua, keluarga, dan teman kuliah penulis yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan ini masih jauh dari kata sempurna. Untuk itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis dan semua pihak terkait.

Surabaya, 15 Juli 2022

Penulis



Putri Safa Ailsa Nugroho

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

.....	i
.....	iii
Abstrak	xiii
Abstract	xv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiii
1 BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
2 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Nanopartikel Oksida Besi	5
2.1.1 Preparasi Nanopartikel Oksida Besi	5
2.1.2 Sifat Fisik dan Magnetik	6
2.1.3 Aplikasi Nanopartikel Oksida Besi	6
2.2 <i>Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles</i> (SPIONs)	7
2.2.1 Magnetisasi Superparamagnetik	8
2.3 Surfaktan	9
2.4 <i>Ferrofluid</i>	10
2.4.1 Karakteristik <i>Ferrofluid</i>	10
2.4.2 Klasifikasi <i>Ferrofluid</i>	11
2.5 Terapi Hipertermia	12
2.6 Penelitian Sebelumnya	14
3 BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Diagram Alir	21
3.2 Alat Penelitian	22
3.3 Bahan penelitian	23
3.4 Metode Penelitian	23
3.4.1 Sintesis Nanopartikel Fe ₃ O ₄ yang dilapisi Surfaktan	23
3.4.2 Sintesis Fluida Nanopartikel Fe ₃ O ₄	23
3.5 Pengujian	24
3.5.1 <i>X-Ray Diffractometry</i> (XRD)	24
3.5.2 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	24
3.5.3 <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR)	25
3.5.4 Hidrofobisitas	26
3.5.5 <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA)	26
3.5.6 Tegangan permukaan	27
3.5.7 <i>Vibrating Sample Magnetometer</i> (VSM)	27
3.5.8 Medan Magnet	28
3.6 Rancangan Penelitian	29
4 BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Hasil Sintesis Nanopartikel Fe ₃ O ₄	31
4.2 Hasil karakterisasi Fluida Nanopartikel Fe ₃ O ₄ Superparamagnetik	31
4.2.1 Analisa Hasil XRD	31

4.2.2	Analisa Hasil FTIR	33
4.2.3	Analisa Hasil SEM.....	34
4.2.4	Analisa Hasil PSA.....	36
4.2.5	Analisa Hasil Hidrofobisitas	37
4.2.6	Analisa Hasil Tegangan Permukaan	38
4.2.7	Analisa Hasil VSM	38
4.2.8	Analisa Hasil Medan Magnet.....	40
5	BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1	Kesimpulan	43
5.2	Saran.....	43
	DAFTAR PUSTAKA	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Transisi keadaan magnetik dari keadaan terblokir ke superparamagnetisme nanopartikel domain tunggal yang bergantung pada waktu pengukuran dan kondisi temperatur di bawah medan magnet nol (Wallyn et al., 2019).....	7
Gambar 2.2	Skema ilustrasi hubungan koersivitas (H_c), putaran momen magnet dan sifat kurva histeresis dengan ukuran nanopartikel (d) (Mohapatra et al., 2019).....	8
Gambar 2.3	Lapisan surfaktan pada nanopartikel (Milton J. Rosen, 2012).....	9
Gambar 2.4	Skema ikatan surfaktan GA dengan partikel Fe_3O_4 (Schwaminger et al., 2017).....	10
Gambar 2.5	(a) Pola puncak hexagonal (b) Struktur menyerupai roda gigi (Zahn, 2001)	11
Gambar 2.6	(a) Ketidakstabilan labirin (b) Pandangan lebih dekat dari ketidakstabilan labirin (Zahn, 2001).....	11
Gambar 2.7	Klasifikasi ferrofluid berdasarkan cairan pembawa (Fang et al., n.d.).....	12
Gambar 2.8	Mekanisme kerja terapi hipertermia (Latorre, 2009).....	13
Gambar 2.9	Pengujian SEM nanopartikel Fe_3O_4 (Petcharoen & Sirivat, 2012).....	15
Gambar 2.10	Distribusi ukuran kristal dari kitosan-nanopartikel Fe_3O_4 dengan variasi perbandingan (Wulandari et al., 2017).....	15
Gambar 2.11	Foto TEM nanopartikel magnetik Fe_3O_4 dengan perbesaran skala 20 nm pada temperatur sintesis 25°C (a), 40°C (b), 60°C (c) dan 80°C (d) (Saragi et al., 2018).....	16
Gambar 2.12	Distribusi ukuran dari nanopartikel Fe_3O_4 dilapisi OA (Nalle et al., 2019).....	16
Gambar 2.13	Kurva temperatur vs waktu untuk dispersi koloid Fe_3O_4 berlapis GA (Rajan et al., 2020).....	18
Gambar 2.14	Perubahan temperatur vs waktu dari nanopartikel Fe_3O_4 dengan berbagai konsentrasi OA (Burnham et al., 2013).....	18
Gambar 2.15	Kurva temperatur vs waktu dari nanopartikel Fe_3O_4 yang dilapisi SO (Araújo-Neto et al., 2014).....	19
Gambar 3.1	Diagram alir sintesis fluida nanopartikel Fe_3O_4 superparamagnetik	22
Gambar 3.2	Alat uji SEM.....	24
Gambar 3.3	Alat dan skema uji SEM.....	25
Gambar 3.4	Alat uji FTIR.....	25
Gambar 3.5	Skema uji hidrofobisitas.....	26
Gambar 3.6	Alat uji PSA.....	26
Gambar 3.7	Alat uji tegangan permukaan.....	27
Gambar 3.8	Alat uji VSM.....	28
Gambar 3.9	Skema uji medan magnet.....	28
Gambar 4.1	Sampel hasil sintesis (a) nanopartikel Fe_3O_4 (b) fluida nanopartikel Fe_3O_4	31
Gambar 4.2	Hasil XRD sampel nanopartikel (a) Fe_3O_4 , (b) Fe_3O_4 + GA 2:5, (c) Fe_3O_4 + GA 3:5, (d) Fe_3O_4 + GA 4:5.....	32
Gambar 4.3	Hasil FTIR sampel nanopartikel (a) Fe_3O_4 , (b) Fe_3O_4 + GA 2:5, (c) Fe_3O_4 + GA 3:5, (d) Fe_3O_4 + GA 4:5.....	34
Gambar 4.4	Hasil SEM nanopartikel Fe_3O_4 murni dengan skala 500 nm.....	35
Gambar 4.5	Hasil SEM nanopartikel Fe_3O_4 + GA 2:5 dengan skala 3 μ m.....	35
Gambar 4.6	Distribusi ukuran nanopartikel Fe_3O_4 murni dan dilapisi GA.....	36

Gambar 4.7	Hasil hidrofobisitas sampel nanopartikel (a) Fe_3O_4 , (b) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{GA}$ 2:5, (c) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{GA}$ 3:5, (d) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{GA}$ 4:5	37
Gambar 4.8	Perbandingan kurva histersis	39
Gambar 4.9	Kurva pengaruh variasi frekuensi medan magnet AC terhadap respon pemanasan dari nanopartikel Fe_3O_4 murni.....	40
Gambar 4.10	Kurva pengaruh penambahan GA pada nanopartikel Fe_3O_4 terhadap respon pemanasan.....	41

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Metode sintesis nanopartikel oksida besi dan perbandingan parameternya (Ansari et al., 2019)	5
Tabel 2.2	Sifat fisik dan magnetik oksida besi (Teja & Koh, 2009)	6
Tabel 2.3	Magnetik properti dari superparamagnetik (Benz, 2012).....	8
Tabel 2.4	Properti dari <i>ferrofluid</i> (Hangi et al., 2018).....	11
Tabel 2.5	Properties aplikasi terapi hipertermia	12
Tabel 2.6	Penelitian sebelumnya terkait metode sintesis magnetit (Fe_3O_4)	14
Tabel 2.7	Penelitian sebelumnya terkait surfaktan	17
Tabel 3.1	Tabel jadwal penelitian.....	29
Tabel 3.2	Kode spesimen dan variasi perlakuan	29
Tabel 3.3	Pengujian pada sampel nanopartikel Fe_3O_4 dan fluida nanopartikel Fe_3O_4	29
Tabel 4.1	Komparasi JCPDS #19-069 dan sintesis nanopartikel Fe_3O_4	32
Tabel 4.2	Ukuran kristal nanopartikel Fe_3O_4 murni dan dilapisi GA.....	33
Tabel 4.3	<i>Wavenumber</i> dan gugus fungsi pada nanopartikel Fe_3O_4 berlapis GA	34
Tabel 4.4	Hasil mapping sampel partikel Fe_3O_4 yang dilapisi GA 2:5.....	36
Tabel 4.5	Ukuran partikel terbanyak pada tiap sampel dan persentasenya	36
Tabel 4.6	Sudut kontak dan sifat hidrofobisitas	37
Tabel 4.7	Nilai tegangan permukaan nanopartikel Fe_3O_4 murni dan dilapisi GA.....	38
Tabel 4.8	Pengaruh ukuran partikel dengan sifat magnetik	39
Tabel 4.9	Nilai SAR dan temperatur akhir yang diperoleh	41
Tabel 4.10	Hasil sintesis fluida nanopartikel Fe_3O_4 untuk aplikasi terapi hipertermia.....	42

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam bidang nanoteknologi saat ini nanopartikel berkembang dengan sangat pesat. Nanopartikel magnetik merupakan jenis nanopartikel yang dapat dimanipulasi menggunakan medan magnet. Partikel seperti itu umumnya terdiri dari unsur-unsur magnetis seperti besi, nikel, kobalt dan senyawa kimianya. Dalam banyak penelitian, partikel yang memiliki ukuran nano yaitu 1-100 nm dapat menunjukkan bentuk magnetism yang menarik yaitu superparamagnetik (X.-M. Li et al., 2011). Tiga material magnetik berbentuk oksida besi yang paling umum ditemukan di alam adalah magnetit (Fe_3O_4), maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) dan hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Nanopartikel oksida besi magnetik (Fe_3O_4 dan $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) memiliki toksitas yang rendah, sifat superparamagnetik dan metode sintesis yang sederhana, karena hal-hal tersebut, nanopartikel oksida besi menarik untuk aplikasi biomedis (Ali et al., 2016).

Untuk mensintesis nanopartikel oksida besi dengan ukuran yang sesuai, perlu mengontrol faktor-faktor yang mempengaruhi kondisi sintesis, seperti temperatur, waktu, pelarut dan reaktan. Terdapat beberapa jenis metode yang digunakan untuk mensintesis nanopartikel oksida besi, antara lain dekomposisi termal, ko-presipitasi, hidrotermal/solvotermal, sol-gel, mikroemulsi, ablasi laser, elektrokimia dan metode bantuan gelombang mikro (Lastovina et al., 2017; Wu et al., 2016). Beberapa tahun terakhir, metode ko-presipitasi banyak digunakan karena mudah dilakukan dan efektif untuk mensintesis nanopartikel Fe_3O_4 dengan rendemen yang tinggi (Rahmayanti, 2020). Berdasarkan reaksi termodinamika, disarankan bahwa untuk mendapat SPIONs murni, harus menyiapkan precursor *ferrous* dan *ferric* ke dalam larutan basa, seperti NaOH atau NH_4OH . Selain itu untuk mempertahankan potential redoks yang sesuai, rasio molar $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ harus dikontrol dengan hati-hati pada 1:2. Ukuran nanopartikel juga dapat disesuaikan dengan penambahan surfaktan selain mengontrol temperatur reaksi (X.-M. Li et al., 2011).

Ferrofluid merupakan cairan magnetik yang menunjukkan perilaku seperti cairan normal namun memiliki sifat superparamagnetik. *Ferrofluid* pada dasarnya adalah suspensi nanopartikel magnetik dalam cairan pembawa yang sesuai. Nanopartikel magnetik dilapisi dengan surfaktan yang sesuai dapat mencegah aglomerasi. Viskositas dari *ferrofluid* sangat dipengaruhi oleh medan magnet luar. Sifat superparamagnetik dari *ferrofluid* ini menjadikannya kandidat potensial untuk berbagai aplikasi industri dan biomedis (Savitha et al., 2018). *Ferrofluid* telah banyak diteliti untuk berbagai aplikasi in-vivo seperti sel pemisahan (Boyer et al., 1997), pencitraan resonansi magnetik (MRI) sebagai agen kontras (Jun et al., 2005), penargetan dan pengiriman obat magnetik (Neuberger et al., 2005), dan terutama *ferrofluid* dapat menghasilkan panas dalam medan magnet bolak-balik dan menjadi material yang menjanjikan untuk terapi hipertermia (Morozy et al., 2002).

Terapi hipertermia adalah metode pengobatan kanker menggunakan nanopartikel magnetik. Dalam prosesnya, partikel magnetik disuntikkan secara lokal ke dalam jaringan kanker yang kemudian dipanaskan hingga temperatur yang diperlukan, yaitu sekitar 45°C dengan bantuan medan magnet luar AC dan frekuensi tertentu yang dapat menyebabkan peningkatan temperatur sehingga dapat membunuh sel kanker (Morozy et al., 2002). Adanya peningkatan temperatur ini dapat disebabkan karena pengaruh medan magnet luar AC, frekuensi dan massa nanopartikel Fe_3O_4 yang digunakan. Peningkatan temperatur dalam proses terapi hipertermia ditentukan dengan efisiensi penyerapan panas melalui nilai *Specific Absorption Rate* (SAR). SAR adalah panas yang diserap oleh nanopartikel Fe_3O_4 akibat pengaruh medan magnet luar AC dan frekuensi, kemudian dilepaskan oleh nanopartikel Fe_3O_4 berupa temperatur (Mohapatra et al., 2019).

Dari penelitian sebelumnya sintesis nanopartikel Fe_3O_4 telah berhasil dilakukan oleh Petcharoen et al. Rentang ukuran partikel yang dihasilkan yaitu 10-40 nm dan morfologi magnetit yang dihasilkan berbentuk bola (*spherical*). Penambahan surfaktan pada proses sintesis menyebabkan ukuran partikel lebih besar dibandingkan dengan yang tidak dilapisi. Ukuran partikel magnetit tidak dilapisi surfaktan dan yang dilapisi asam heksanoat mengalami peningkatan, sedangkan yang dilapisi asam oleat menurun seiring dengan meningkatnya temperatur reaksi. Untuk sifat magnetik, semua sampel menunjukkan perilaku superparamagnetik pada temperatur kamar. Nanopartikel magnetik berlapis asam oleat dapat terdispersi dan memiliki stabilitas suspensi yang baik di dalam larutan *aqueous* selama 1 minggu (Petcharoen & Sirivat, 2012). Rajan et al. telah meneliti potensi pemanasan nanopartikel Fe_3O_4 yang biokompatibel dan stabil yang dilapisi dengan berbagai surfaktan seperti asam glutamat (GA), asam sitrat (CA), polietilen glikol (PEG), polivinilpirolidin (PVP), etilen diamin (EDA) dan setil-trimetil ammonia bromida (CTAB) dengan ukuran nanopartikel, bentuk, anisotropi magnetik serta kerentanan yang terdefinisi dengan baik. Dari data yang diperoleh menunjukkan bahwa suseptibilitas magnetik maksimum dari 0,075 emu/gOe yang dikenai temperatur hipertermia di bawah medan magnet 450 Oe, menghasilkan nilai SAR tertinggi yaitu 130 W/g dalam nanopartikel Fe_3O_4 berlapis GA (Rajan et al., 2020).

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi surfaktan terhadap karakteristik nanopartikel Fe_3O_4 ?
2. Apakah nanopartikel Fe_3O_4 mempunyai karakteristik SPIONs (*Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles*)?
3. Bagaimana karakteristik nanopartikel Fe_3O_4 di dalam cairan pembawa air?
4. Apakah fluida nanopartikel Fe_3O_4 superparamagnetik berpotensi untuk aplikasi terapi hipertermia?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Reaksi-reaksi kimia yang terjadi dalam penelitian ini dianggap sempurna secara stoikiometri.
2. Penelitian ini dilakukan pada tekanan atmosfer dan temperatur kamar, serta lingkungan penelitian dianggap steril dari kontaminan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi konsentrasi surfaktan terhadap karakteristik nanopartikel Fe_3O_4 .
2. Menganalisis karakteristik SPIONs (*Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles*) di dalam nanopartikel Fe_3O_4 .
3. Menganalisis karakteristik nanopartikel Fe_3O_4 di dalam cairan pembawa air.
4. Menganalisis kemampuan fluida nanopartikel Fe_3O_4 superparamagnetik untuk diaplikasikan sebagai terapi hipertermia

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan fluida magnetit (Fe_3O_4) menggunakan prekursor sintesis dengan kualitas partikel magnetit yang mempunyai karakteristik ukuran nano

dengan homogenitas tinggi dan sifat superparamagnetik yang reliabel serta memenuhi kriteria aplikasi terapi hipertermia.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Nanopartikel Oksida Besi

Nanopartikel merupakan partikel logam maupun polimer yang memiliki ukuran berskala nanometer, yaitu 1-100 nm. Nanopartikel sangat menarik untuk dijadikan sebagai objek penelitian karena memiliki sifat fisik dan kimia yang lebih unggul dibandingkan dengan material *bulk*-nya (Hakim, 2008). Karena dimensi nanopartikel yang sangat kecil dan sebanding dengan sel virus, protein dan gen, mereka memiliki potensi interaksi pada proses biologis (Soares et al., 2015).

Oksida besi merupakan senyawa yang terdiri dari besi dan oksigen. Oksida besi tersebar luar di alam serta mempunyai peran penting pada proses geologi serta biologi. Terdapat beberapa jenis oksida besi seperti wustit (FeO), magnetit (Fe₃O₄), hematit (α -Fe₂O₃) dan maghemite (γ -Fe₂O₃) (Pratama & Izzati, 2017).

Nanopartikel oksida besi lebih unggul dari jenis nanopartikel oksida logam lainnya karena memiliki sifat biokompatibilitas dan stabilitas, serta paling umum digunakan untuk aplikasi biomedis (Soares et al., 2015).

2.1.1 Preparasi Nanopartikel Oksida Besi

Sintesis nanopartikel merupakan prosedur multistep yang sangat kritis dan harus dioptimalkan, mengingat bahwa variasi kecil dalam proses sintesis dapat secara signifikan mempengaruhi hasil yang diinginkan. Karena alasan tersebut, sifat fisik dan kimia partikel perlu dikontrol secara ketat sesuai dengan aplikasi yang akan diterapkan. Parameter yang mempengaruhi ukuran partikel antara lain, temperatur, waktu, pelarut dan reaktan. Berikut adalah metode sintesis nanopartikel oksida besi beserta parameter yang mempengaruhi, yang dirangkum pada Tabel 2.1 (Ansari et al., 2019; Song et al., 2019).

Tabel 2.1 Metode sintesis nanopartikel oksida besi dan perbandingan parameternya (Ansari et al., 2019)

Metode	Temperatur (°C)	Waktu	Ukuran (nm)
Ko-presipitasi	20-150	Menit	5-40
Dekomposisi termal	100-350	Jam-hari	4-30
Mikroemulsi	20-80	Jam	10-25
Hidrotermal	150-280	Jam-hari	10-800
Polyol	130-220	Jam	4-100
Sol-gel	25-200	Jam	15-50
Biominalisasi	80	Jam	~140
Dekomposisi sputter	100-800	Jam	5-100

Di antara metode-metode sintesis tersebut, metode ko-presipitasi yang paling sederhana untuk membuat partikel nano karena prosedurnya lebih mudah dilakukan serta membutuhkan temperatur reaksi yang rendah (<100). Untuk sintesis nanopartikel Fe₃O₄ dengan metode ko-presipitasi, bergantung pada pengendapan dan reduksi besi (III) oksida-hidroksida, (FeO(OH)) dan besi (II) hidroksida, (Fe(OH)₂). Perbandingan/rasio antara ion *ferrous* (Fe²⁺) dan ion *ferric* (Fe³⁺) dalam medium basa (alkali) sangat mempengaruhi hasil akhir sintesis. Efeknya meliputi rentang diameter partikel dan sifat magnetik yang dihasilkan. Alkali NH₄OH memiliki peran penting dalam proses pengendapan bersama ion Fe²⁺ dan ion Fe³⁺ yang ada dalam larutan, yaitu dengan memberikan ion hidroksil (OH⁻) untuk mengendapkan logam hidroksida yang tidak

stabil. Selama pemanasan, molekul air (H_2O) dihilangkan dari hidroksida logam campuran yang kemudian mengarah ke pembentukan Fe_3O_4 . Stabilitas nanopartikel Fe_3O_4 dapat dicapai dengan penyerapan langsung dari surfaktan (mengandung gugus karboksil, hidroksil atau amino) ke gugus OH yang ada di permukaan endapan nanopartikel (Merdekani, 2013; Rahmayanti, 2020; Rajan et al., 2020).

2.1.2 Sifat Fisik dan Magnetik

Oksida besi di alam ada dalam berbagai bentuk, bentuk yang paling umum yaitu magnetit (Fe_3O_4), maghemit ($\gamma-Fe_2O_3$) dan hematit ($\alpha-Fe_2O_3$). Berikut adalah beberapa sifat fisik dan magnetiknya yang dirangkum dalam Tabel 2.2 (Teja & Koh, 2009).

Tabel 2.2 Sifat fisik dan magnetik oksida besi (Teja & Koh, 2009)

Sifat	Oksida Besi		
	Hematit	Magnetit	Maghemit
Formula molekul	$\alpha-Fe_2O_3$	Fe_3O_4	$\gamma-Fe_2O_3$
Densitas(g/cm^3)	5,26	5,18	4,87
Melting point ($^{\circ}C$)	1350	1583-1597	-
Hardness	6,5	5,5	5
Jenis kemagnetan	Feromagnetik lemah atau antiferomagnetik	Feromagnetik	Ferimagnetik
Curie temperatur (K)	956	850	820-986
MS di 300K ($A \cdot m^2/kg$)	0,3	92-100	60-80
Standard free energy of formation ΔG_f° (kJ/mol)	-742,7	-1012,6	-711,1
Sistem kristalografi	Rhombohedral, hexagonal	Cubic	Cubic atau tetrahedral
Tipe struktural	Corundum	Inversespinel	Defect spinel $P4_332$
Spacegroup	R3c (hexagonal)	Fd3m	(cubic); $P4_12_12$ (tetragonal)
Parameter kisi (nm)	$a = 0,5034, c = 1,375$ (hexagonal) aRh $= 0,5427, \alpha = 55,3^{\circ}$ (rhombohedral)	$a = 0,8396$	$a = 0,83474$ (cubic); $a = 0,8347, c = 2,501$ (tetragonal)

2.1.3 Aplikasi Nanopartikel Oksida Besi

Nanopartikel oksida besi yang terbuat dari magnetit (Fe_3O_4) dan maghemite ($\gamma-Fe_2O_3$) memiliki sifat biokompatibilitas dan superparamagnetik yang dapat diaplikasikan pada bidang biomedis, seperti penghantaran obat yang ditargetkan, bioimaging, hipertermia, terapi fotoablasi, biosensor dan *theranostics*. Selain memiliki sifat biokompatibilitas dan bioavailabilitas, nanopartikel oksida besi memberikan keuntungan dalam pengobatan gangguan neurologis berdasarkan kemampuan mereka untuk dicitrakan dan didorong secara eksternal

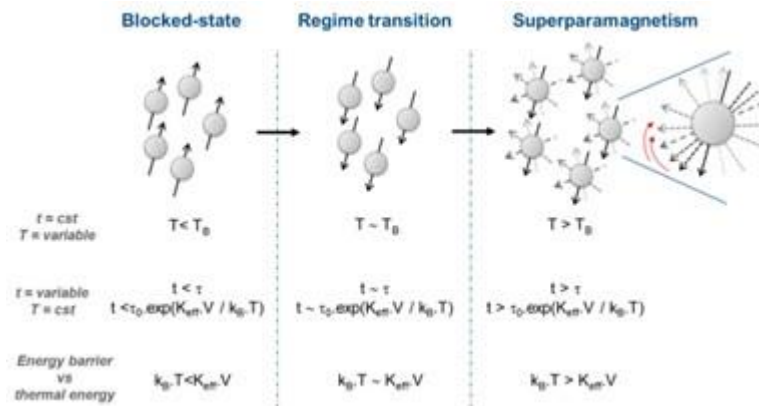
melalui pemindai magnetik untuk aplikasi penghantaran obat yang ditargetkan. Nanopartikel oksida besi yang dikenai medan magnet statis dapat digunakan untuk meningkatkan permeabilitas *blood-brain-barrier* (BBB) terhadap nanopartikel oksida besi, sedangkan apabila dikenai medan magnet AC cocok untuk membunuh sel tumor secara selektif melalui hipertermia lokal (Ansari et al., 2019).

2.2 Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles (SPIONs)

Nanopartikel atau partikel domain tunggal pada umumnya memiliki ukuran <100 nm dan jenuh bahkan tanpa dikenai medan magnet luar, karena ukurannya yang sebanding dengan ukuran domain magnetik. Di atas temperatur tertentu yang disebut *blocking temperature*, nanopartikel akan menunjukkan perilaku superparamagnetik, seperti partikel yang menunjukkan perilaku paramagnetik di atas temperatur Curie atau Néel. Perubahan perilaku magnetik seperti itu disebabkan oleh pembalikan putaran yang bertentangan dengan partikel, yang temperaturnya menyebabkan *spins disorder* (Gambar 2.1). Waktu relaksasi putaran (τ), sesuai dengan waktu yang dibutuhkan untuk pembalikan putaran diungkapkan oleh rumus Arrhenius dari teori Néel-Brown:

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(\frac{K_{eff} V}{k_B T}\right) \quad (2.1)$$

Dimana, r_0 adalah waktu yang diharapkan dari pembalikan putaran (antara 10^{-9} sampai 10^{-12}), K_{eff} adalah konstanta anisotropi dari material, V adalah volume nanopartikel, k_B adalah konstanta Boltzmann, dan T adalah temperatur (Wallyn et al., 2019).

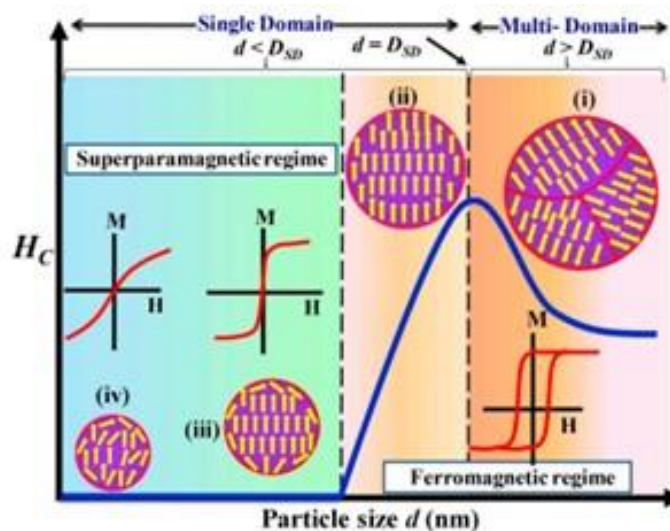


Gambar 2.1 Transisi keadaan magnetik dari keadaan terblokir ke superparamagnetisme nanopartikel domain tunggal yang bergantung pada waktu pengukuran dan kondisi temperatur di bawah medan magnet nol (Wallyn et al., 2019)

Material superparamagnet merespon medan magnet eksternal dengan sangat kuat karena dalam kondisi *bulk* material ini bersifat feromagnetik. Namun ketika medan magnet eksternal dihilangkan, maka material ini kembali pada kondisi non-magnetik. Properti inilah yang menjadikan material superparamagnetik dapat diaplikasikan pada bidang biomedis. Terdapat sejumlah material yang menunjukkan sifat feromagnetik, antara lain Fe, Co atau Ni. Namun yang paling magnetis dari semua mineral alami di bumi dan banyak digunakan sebagai material superparamagnetik untuk jenis aplikasi biologis adalah magnetit (Fe_3O_4) (Akbarzadeh et al., 2012).

2.2.1 Magnetisasi Superparamagnetik

Momen magnet atomik di dalam suatu material akan secara selaras berorientasi menuju satu arah, hal tersebut yang menyebabkan suatu material memiliki sifat magnetik, dalam kasus ini ferromagnetik. Ketika momen magnet atomik dalam suatu material memiliki orientasi tak beraturan, maka nilai magnetisasi menjadi nol. Sebenarnya, arah momen magnet atomik tidak serta merta mengubah magnetisasi suatu material. Terdapat domain magnetik yang merupakan suatu daerah dimana arah momen magnet atomik atom-atom di dalamnya berada pada orientasi yang sama. Material dengan ukuran besar (*bulk*) memiliki banyak domain di dalamnya sehingga dapat dikatakan bahwa material tersebut memiliki multi-domain. Material dengan multi-domain memiliki nilai koersivitas yang rendah (tidak nol) atau dalam kata lain kekuatan medan magnet yang dibutuhkan untuk menghilangkan remanensi dari magnetisasinya relatif rendah. Semakin kecil ukuran suatu material, maka semakin sedikit jumlah domain magnetik yang dimilikinya, sehingga semakin besar nilai koersivitas-nya. Koersivitas akan mencapai maksimum ketika material tersebut sangatlah kecil sehingga hanya memiliki domain tunggal (*single domain*). Namun ketika ukuran material diperkecil lagi (hingga skala nano), koersivitasnya akan turun secara drastis menjadi nol. Pada kondisi inilah suatu material dikatakan memiliki sifat superparamagnet, yang digambarkan pada Gambar 2.2 (Akbarzadeh et al., 2012). Tabel 2.3 merupakan beberapa properties dari sifat superparamagnetik.



Gambar 2.2 Skema ilustrasi hubungan koersivitas (H_c), putaran momen magnet dan sifat kurva histeresis dengan ukuran nanopartikel (d) (Mohapatra et al., 2019)

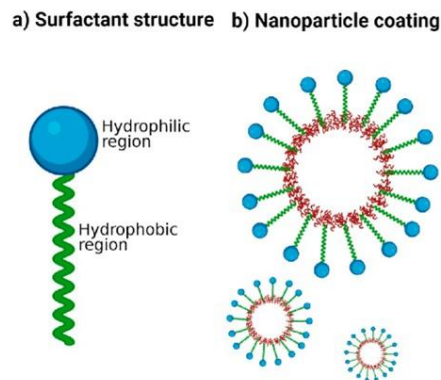
Tabel 2.3 Magnetik properti dari superparamagnetik (Benz, 2012)

Magnetik properti	Superparamagnetik
Struktur partikel	Partikel domain tunggal
Memori magnetik	Tidak ada
Koersivitas	Nol
Magnetisasi saturasi	Tinggi
Arah polarisasi relatif terhadap medan eksternal	Searah
Waktu relaksasi spin	$\tau_m \gg \tau$
Temperatur	$T > T_B$

2.3 Surfaktan

Nanopartikel memiliki kecenderungan untuk kembali saling menggumpal (aglomerasi) satu sama lain, membentuk material *bulk* seperti semula. Sehingga diperlukan material atau molekul pelapis yang dapat menghindari nanopartikel dari aglomerasi tersebut (Hakim, 2008).

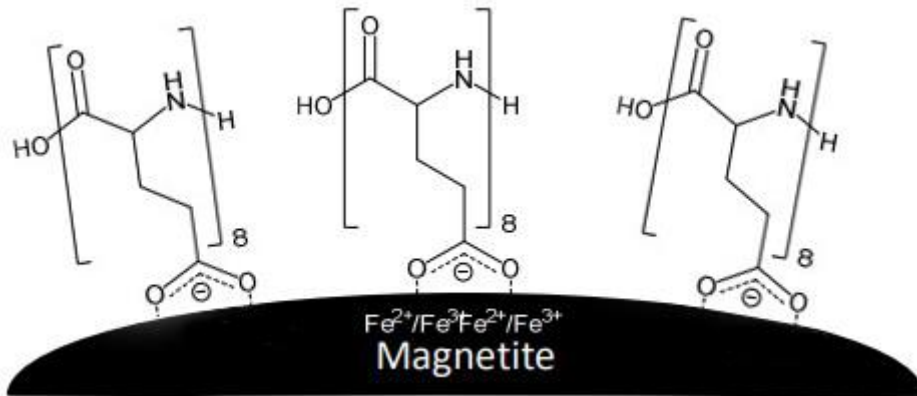
Surfaktan (*Surfactant/surface active agent*) merupakan zat yang apabila ada pada konsentrasi rendah dalam suatu sistem, memiliki sifat adsorpsi ke permukaan sistem. Surfaktan adalah molekul amfifilik yang memiliki kepala polar atau hidrofilik dan ekor hidrofobik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Surfaktan berfungsi untuk mengurangi tegangan permukaan air dengan mengadsorpsi antarmuka liquid-gas, serta mengurangi tegangan antarmuka minyak dan air dengan mengadsorpsi antarmuka liquid-liquid (Assadi, 2012; Milton J. Rosen, 2012).



Gambar 2.3 Lapisan surfaktan pada nanopartikel (Milton J. Rosen, 2012)

Selain mencegah aglomerasi, surfaktan juga dapat membuat nanopartikel memiliki sifat biokompatibel dan mampu secara selektif melekat pada entitas biologis tertentu. Kegunaan lainnya yaitu dapat membantu nanopartikel untuk terdispersi atau terlarut dengan baik, karena nanopartikel memiliki ukuran sangat kecil, sehingga gerakan Brown mampu mendispersikannya secara homogen di dalam cairan pembawa. Lapisan surfaktan dapat melindungi nanopartikel dari oksidasi serta erosi akibat media asam atau basa (Fang et al., n.d.; Vékás, 2007; Wallyn et al., 2019).

Faktor penting dalam memilih surfaktan adalah sifat dielektik dari surfaktan harus cocok dengan cairan pembawa. Oleh karena itu, surfaktan dipilih berdasarkan sifat cairan pembawa. Surfaktan yang sering digunakan dalam cairan pembawa antara lain asam oleat, silika, polivinil alkohol (PVA) dan asam akrilik. Surfaktan yang paling umum, yaitu asam oleat memiliki ekor hidrofobik yang memungkinkan tersuspensi dalam cairan pembawa nonpolar seperti kerosin. Ketika cairan pembawa polar yang digunakan, maka surfaktan yang mempunyai ekor hidrofilik seperti asam akrilik, atau asam glutamat dapat digunakan (Oehlsen et al., 2022; Rajan et al., 2020). Pada Gambar 2.4 ditunjukkan surfaktan GA telah diadsorpsi pada partikel Fe_3O_4 hidrofilik dengan gaya tarik elektrostatis. Mikyalova dkk (2004) menyebutkan bahwa interaksi antara surfaktan GA dengan nanopartikel Fe_3O_4 yaitu melalui gugus karboksilat kedua dan bukan melalui gugus amino maupun α -karboksilat (Abarca-Cabrera et al., 2021)



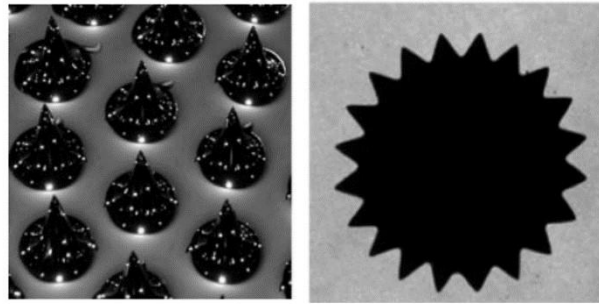
Gambar 2.4 Skema ikatan surfaktan GA dengan partikel Fe_3O_4 (Schwaminger et al., 2017)

2.4 Ferrofluid

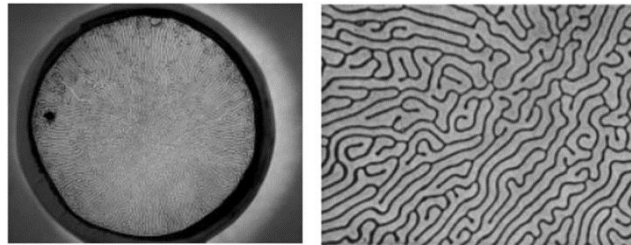
Ferrofluid atau dikenal juga sebagai koloid magnetik, merupakan suspensi koloid nanopartikel magnetik yang dapat dikontrol secara magnetis. *Ferrofluid* umumnya terdiri dari tiga komponen (dalam volume) yaitu 5% nanopartikel magnetik, 10% surfaktan dan 85% cairan pembawa. Jenis nanofluida ini menggunakan koloid nanopartikel magnetik, seperti Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, CoFe_2O_4 , Co, Fe atau Fe-C yang terdispersi secara stabil dalam cairan pembawa. *Ferrofluid* memiliki partikel magnetik dengan dimensi sekitar 10 nm dan tersebar dalam cairan pembawa. Nanopartikel magnetik yang paling umum digunakan dalam *ferrofluid* adalah magnetit (Fe_3O_4), karena proses oksidasinya tidak menyebabkan penurunan sifat magnetik, tidak seperti reduksi magnetisasi ketika Fe atau Co teroksidasi (Mayer & Mayer, n.d.; Odenbach, 2013; Reeves & Weaver, 2014).

2.4.1 Karakteristik *Ferrofluid*

Ferrofluid memiliki garis, pola, dan struktur yang khas yang dapat berkembang dari ketidakstabilan ferohidrodinamik seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.3 (a). Untuk perilaku puncak (*peaking*) *ferrofluid*, dihasilkan dari bidang medan magnetik yang tegak lurus terhadap permukaan bebas lapisan *ferrofluid*. Pada Gambar 2.3 (b) untuk struktur seperti roda gigi, dihasilkan dari ketidakstabilan bidang tegak lurus radial, hal ini terjadi ketika magnet kecil ditempatkan di belakang tetesan *ferrofluid* yang dibatasi di antara pelat kaca yang berjarak dekat. Pada Gambar 2.4 (a) dan (b) untuk ketidakstabilan labirin terjadi ketika medan magnet yang diterapkan bersinggungan dengan dimensi tipis lapisan *ferrofluid* yang dibatasi di antara pelat kaca yang berjarak dekat. Semua gambar menggunakan *ferrofluid* dengan magnetisasi saturasi 400 G. Pada Gambar 2.3-2.4, *ferrofluid* dikelilingi oleh 50% propanol / 50% campuran air deionisasi untuk mencegah *ferrofluid* membasahi pelat kaca (Zahn, 2001). Tabel x.x merupakan beberapa properties dari sifat superparamagnetik. Tabel 2.4 merupakan beberapa properties dari sifat *ferrofluid*.



Gambar 2.5 (a) Pola puncak hexagonal (b) Struktur menyerupai roda gigi (Zahn, 2001)



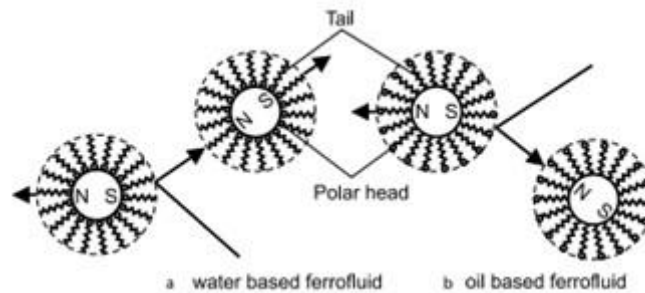
Gambar 2.6 (a) Ketidakstabilan labirin (b) Pandangan lebih dekat dari ketidakstabilan labirin (Zahn, 2001)

Tabel 2.4 Properti dari *ferrofluid* (Hangi et al., 2018)

Properti	Hasil	Satuan
Densitas	976	kg.m ⁻³
Viskositas	0,006	Pa.s
<i>Specific heat capacity</i>	2190	J.kg ⁻¹ K ⁻¹
Konduktivitas termal	0,14	W.m ⁻¹ K ⁻¹
Diameter partikel	~10	nm
Konsentrasi volumetrik	6	%
Koefisien piromagnetik	0,0028	K ⁻¹

2.4.2 Klasifikasi *Ferrofluid*

Secara garis besar, *ferrofluid* dibagi berdasarkan jenis cairan pembawa yaitu berbahan dasar air (bersifat polar) dan berbahan dasar minyak (bersifat nonpolar), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 (Fang et al., n.d.). Cairan pembawa merupakan komponen tambahan dalam *ferrofluid* selain nanopartikel magnetik dan surfaktan. Cairan pembawa adalah cairan non-magnetik di mana nanopartikel tersebar. Cairan ini mampu menyesuaikan sifat-sifat *ferrofluid*, seperti viskositas, tegangan permukaan, tegangan uap dan stabilitas pada temperatur tinggi atau rendah (Oehlsen et al., 2022).



Gambar 2.7 Klasifikasi ferrofluid berdasarkan cairan pembawa (Fang et al., n.d.)

Cairan pembawa bervariasi dalam sifat seperti reaktivitas, viskositas, titik didih dan titik beku. Faktor-faktor inilah yang akan menentukan cairan pembawa seperti apa yang cocok untuk aplikasi yang diinginkan. Jenis-jenis cairan pembawa yang pernah digunakan yaitu air, mineral oil, cairan ionik, kerosin, minyak zaitun, minyak sintesis dan semi-sintetik dan pelumas. Diantara cairan pembawa tersebut, yang paling umum digunakan adalah air dan kerosin (minyak tanah). Dalam pengaplikasiannya, cairan pembawa tidak boleh reaktif dengan material lain. Oleh karena itu, setelah cairan pembawa dipilih, lalu surfaktan dapat dipilih. Proses seleksi ini ditujukan untuk aplikasi *ferrofluid* pada bidang biomedis. Dalam bidang seperti itu, air adalah cairan pembawa yang paling umum digunakan karena sifatnya yang tidak beracun (Oehlsen et al., 2022).

2.5 Terapi Hipertermia

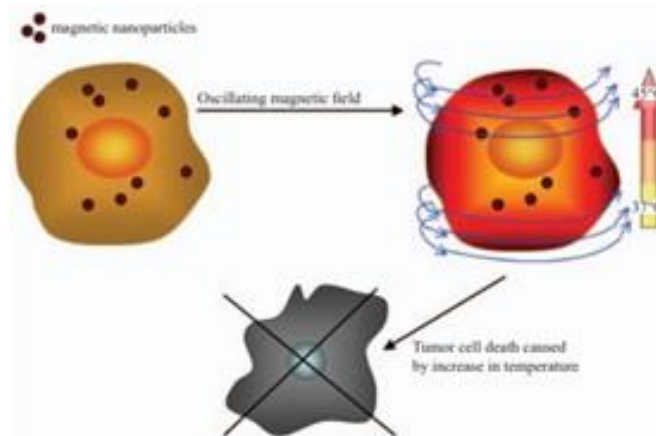
Terapi hipertermia merupakan metode pengobatan kanker dengan menggunakan nanopartikel magnetik. Dalam prosesnya, nanopartikel magnetik disuntikkan secara lokal ke dalam jaringan kanker yang kemudian dipanaskan hingga temperatur yang dibutuhkan dengan bantuan medan magnet eksternal. Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Gilchrist et al. sejak 50 tahun yang lalu. Menurut *National Cancer Institute*, pengobatan hipertermia dapat membunuh sel kanker dengan kenaikan temperatur sekitar 42-45°C. Suspensi nanopartikel magnetik dipanaskan dengan menerapkan medan magnet AC sambil mempertahankan medan magnet yang diterapkan secara eksternal dengan frekuensi di bawah batas Atkinson-Brezovich ($H \times f \leq 4,85 \times 10^8 A m^{-1} s^{-1}$). Pendekatan ini dapat menghancurkan tumor dengan kerusakan minimal pada jaringan yang sehat dan mengurangi efek samping negatif (Latorre, 2009; Linh et al., 2009; Mohapatra et al., 2018). Table 2.5 menunjukkan parameter dari aplikasi terapi hipertermia.

Tabel 2.5 Properties aplikasi terapi hipertermia

Parameter	Hasil	Referensi
Ukuran partikel	<20 nm	(Q. Li et al., 2017)
Struktur kristal	Kubik	(Q. Li et al., 2017)
Morfologi partikel	Bola	(Q. Li et al., 2017)
Sifat magnet	Superparamagnetik	(Akbarzadeh et al., 2012)
Hc	no	(Akbarzadeh et al., 2012)
Arus medan magnet ($H \times f$)	$\leq 4,85 \times 10^8 A m^{-1} s^{-1}$	(Mohapatra et al., 2018)
Temperatur	42-45°C	(Rajan et al., 2020)
SAR	130 W/g	(Rajan et al., 2020)

Mekanisme kerja dari terapi hipertermia yaitu saat medan magnet beresilasi diterapkan pada sampel, maka mekanisme fisik yang beragam akan mencegah partikel mengikuti medan

magnet, dengan demikian energi dapat ditargetkan secara lokal. Energi ini dapat berupa energi panas dan pemanasan sitotoksik memungkinkan untuk dapat digunakan pada pengobatan kanker (Reeves & Weaver, 2014). Gambar 2.7 merupakan representasi skematis dari fluida hipertermia magnetik, dimana suspensi magnetik nanopartikel dimasukkan ke dalam tumor dan ketika dikenai medan magnet AC maka nanopartikel akan melepaskan energi dalam bentuk panas yang menyebabkan kenaikan temperatur yang mengarah ke kematian sel tumor (Latorre, 2009).



Gambar 2.8 Mekanisme kerja terapi hipertermia (Latorre, 2009)

Efisiensi pemanasan SPIONs dinyatakan dalam bentuk *specific absorption rate* (SAR), yang merupakan faktor penting dalam menentukan keberhasilan aplikasi terapi hipertemia (Rajan et al., 2020). Jumlah panas yang dihasilkan nanopartikel magnetik dikuantifikasi dalam SAR dengan rumus berikut,

$$SAR = \frac{c}{m} \left(\frac{dT}{dt} \right) \quad (2.2)$$

Dimana, C adalah *specific heat* dari koloid (yaitu, untuk air dengan nilai $4,18 \text{ J g}^{-1} \text{ C}^{-1}$), dT/dt adalah kemiringan awal grafik temperatur terhadap waktu, dan m adalah massa material magnetik (mg/ml) dalam suspensi. Satuan SAR dinyatakan dalam Watt/gram (W/g) (Mohapatra et al., 2019).

SAR merupakan mekanisme kehilangan kerentanan melalui relaksasi Néel dan relaksasi Brownian pada medan magnet AC. Jika kedua proses relaksasi tersebut berlangsung secara bersamaan, maka disipasi daya dihitung dengan mempertimbangkan kontribusi relatif dari waktu relaksasi Néel dan Brownian, yang masing-masing dilambangkan dengan τ_N and τ_B . Nilai SAR dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut: (a) ketebalan lapisan permukaan, karena fakta bahwa lapisan yang tebal dapat menghalangi gerakan partikel Brown, (b) sifat hidrofilik yang berbeda dari berbagai surfaktan dan (c) magnetisasi berbeda yang dimiliki oleh nanopartikel karena molekul inti dan molekul surfaktan (Rajan et al., 2020).

Fluida magnetik berbasis nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) superparamagnetik yang dilapisi dengan lapisan biokompatibel cocok untuk aplikasi terapi hipertermia karena partikelnya memiliki momen magnet yang tinggi, *specific loss power* (SLP) magnetik yang kuat serta tidak beracun. *Food and Drug Administration* menyetujui bahwa nanopartikel Fe_3O_4 superparamagnetik biokompatibel dengan tubuh manusia (Linh et al., 2009).

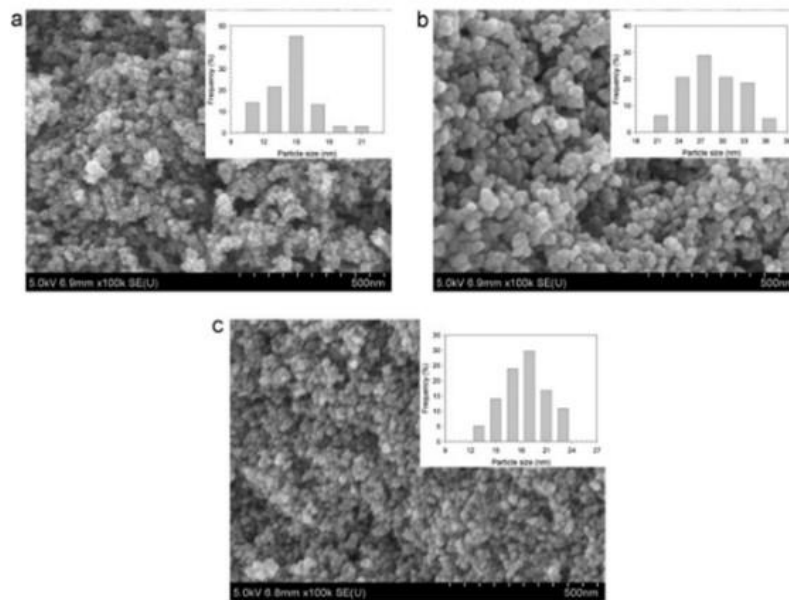
2.6 Penelitian Sebelumnya

Penelitian sebelumnya yang menjadi dasar penelitian ini dalam menentukan metode sintesis magnetit (Fe_3O_4) dirangkum dalam tabel dan diagram berikut:

Tabel 2.6 Penelitian sebelumnya terkait metode sintesis magnetit (Fe_3O_4)

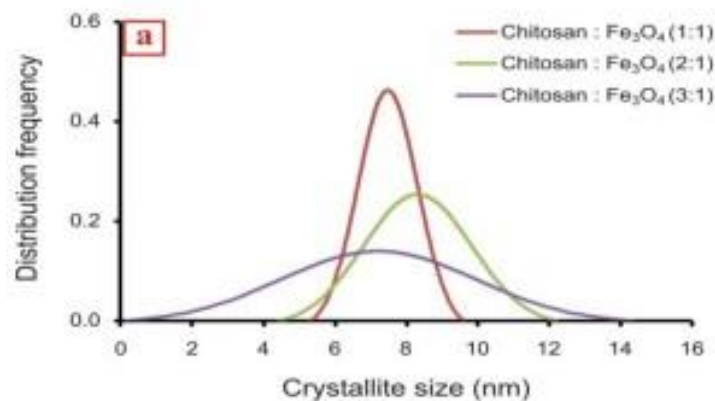
Aspek	Petcharoen et al.	Wulandari et al.	Saragi et al.	Nalle et al.
Tahun	2012	2017	2018	2019
Metode	Ko-presipitasi	Ko-presipitasi	Ko-presipitasi	Ko-presipitasi
Prekursor	$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dan FeCl_3	$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Ratio prekursor	1.5g : 3.0g	1.72g : 4.70g	5.4g : 1.99g	0.125g : 0.350g
Agen presipitasi	25 wt% NH_4OH	NH_3 , 25% (v/v) in H_2O	$\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (25%)	Larutan ammonia (25%, v/v)
Surfaktan	Asam oleat & asam heksagonat	Kitosan	-	OA dengan variasi 25, 50, 75, 100, 125 dan 150 μL
Proses pengeringan	Divacuum pada 80°C selama 24 jam	Pengeringan beku	<i>Centrifuge</i>	Pengeringan beku
Ukuran partikel	10-40 nm	<10 nm	10.14-11.66 nm pada temperatur sintesis 25°C , 40°C , 60°C dan 80°C	6,60-9,4 nm

Sintesis nanopartikel Fe_3O_4 telah berhasil dilakukan oleh Petcharoen et al. Dengan menggunakan karakterisasi SEM, partikel yang dihasilkan berukuran 10-40 nm dan partikel akan berukuran lebih besar ketika permukaan partikel dilapisi oleh surfaktan. Konduktivitas listrik menurun seiring meningkatnya ukuran partikel dan kehadiran agen pelapis (Petcharoen & Sirivat, 2012).



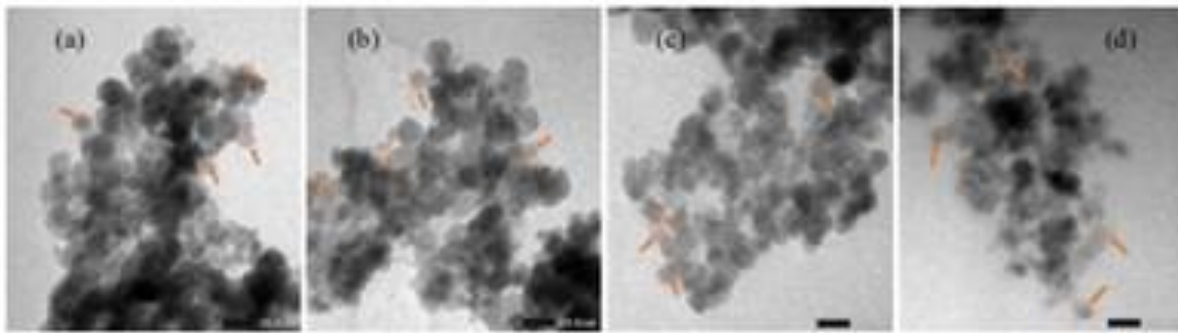
Gambar 2.9 Pengujian SEM nanopartikel Fe_3O_4 (Petcharoen & Sirivat, 2012)

Wulandari et al. telah mensintesis nanopartikel magnetik Fe_3O_4 yang dilapisi kitosan sebagai kandidat agen penghantar obat menggunakan metode ko-presipitasi ex-situ. Modifikasi permukaan dengan kitosan (dalam konsentrasi kecil) digunakan untuk mencegah oksidasi Fe_3O_4 menjadi $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Distribusi ukuran kristal dari kitosan-nanopartikel Fe_3O_4 yang didapat dari pengujian PSA, dimana rata-rata ukurannya adalah kurang dari 10 nm (Wulandari et al., 2017).



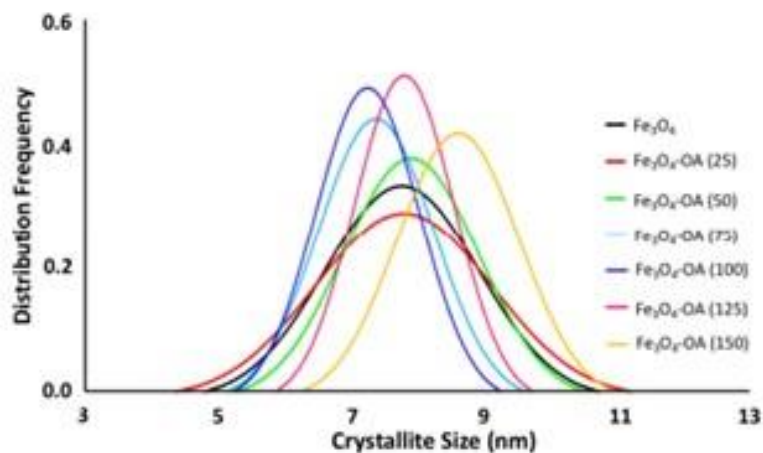
Gambar 2.10 Distribusi ukuran kristal dari kitosan-nanopartikel Fe_3O_4 dengan variasi perbandingan (Wulandari et al., 2017)

Nanopartikel magnetik Fe_3O_4 telah berhasil disintesis oleh Saragi et al. dengan metode ko-presipitasi pada variasi temperatur sintesis 25°C , 40°C , 60°C dan 80°C . berdasarkan pengukuran TEM, diketahui bahwa morfologi nanopartikel Fe_3O_4 berbentuk bulat dengan ukuran rata-rata (10.14 ± 0.24) nm, (10.32 ± 0.92) nm, (10.95 ± 0.89) nm dan (11.66 ± 0.87) nm pada temperatur sintesis masing-masing 25°C , 40°C , 60°C dan 80°C . Dari data yang diperoleh, disimpulkan bahwa temperatur dapat mengontrol ukuran nanopartikel magnetit. Ukuran rata-rata nanopartikel Fe_3O_4 meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur sintesis dikarenakan percepatan reaksi kimia ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} (Saragi et al., 2018).



Gambar 2.11 Foto TEM nanopartikel magnetik Fe_3O_4 dengan perbesaran skala 20 nm pada temperatur sintesis 25°C (a), 40°C (b), 60°C (c) dan 80°C (d) (Saragi et al., 2018)

Sintesis nanopartikel Fe_3O_4 yang dilapisi asam oleat atau OA berhasil dilakukan oleh Nalle et al. Rata-rata ukuran kristal dari nanopartikel Fe_3O_4 yang disintesis adalah 8,64 nm, sedangkan ukuran nanopartikel Fe_3O_4 yang dilapisi OA pada jumlah OA yang berbeda ditemukan pada kisaran 6,60-9,48 nm (Nalle et al., 2019).



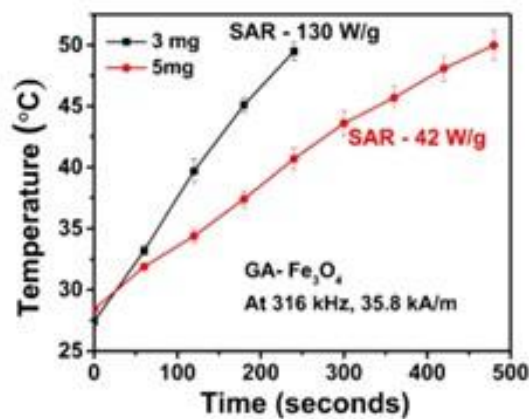
Gambar 2.12 Distribusi ukuran dari nanopartikel Fe_3O_4 dilapisi OA (Nalle et al., 2019)

Penelitian sebelumnya yang menjadi dasar penelitian ini dalam menentukan variasi surfaktan dirangkum dalam tabel dan diagram berikut:

Tabel 2.7 Penelitian sebelumnya terkait surfaktan

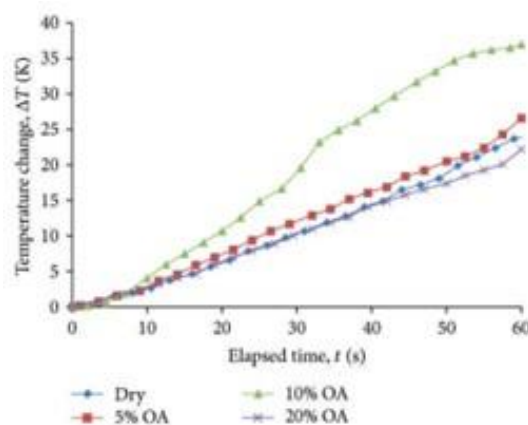
Referensi	Tahun	Aspek			
		Ukuran partikel Fe ₃ O ₄	Surfaktan	Komposisi surfaktan	SAR (W/g)
Rajan et al.	2020	8.1±0.23	Asam glutamat (GA)	1 mg/ml	60
				2 mg/ml	115
				3 mg/ml	130
		8.4±0.43	Asam sitrat (CA)	1 mg/ml	48
				2 mg/ml	97
				3 mg/ml	67
		8.8±0.14	Polietilen glikol (PEG)	1 mg/ml	49
				2 mg/ml	80
				3 mg/ml	53
		8.3±0.16	Polivinilpirolidin (PVP)	1 mg/ml	56
				2 mg/ml	92
				3 mg/ml	63
9.5±0.48	Etilen diamin (EDA)	1 mg/ml	44		
		2 mg/ml	66		
		3 mg/ml	44		
8.7±0.28	Setiltrimetil ammonia bromida (CTAB)	1 mg/ml	47		
		2 mg/ml	71		
		3 mg/ml	47		
Burnham et al.	2013	15.3	Asam oleat (OA)	0%	5.813
		10.7		5%	7.025
		9.4		10%	11.084
		8.0		20%	7.451
Neto et al.	2014	9.0	Sodium oleat (SO)	100mL	14

Rajan et al. telah meneliti potensi pemanasan nanopartikel Fe₃O₄ yang biokompatibel dan stabil yang dilapisi dengan berbagai surfaktan seperti GA, CA, PEG, PVP, EDA dan CTAB dengan ukuran nanopartikel, bentuk, anisotropi magnetik serta kerentanan yang terdefinisi dengan baik. Dari data yang diperoleh menunjukkan bahwa suseptibilitas magnetik maksimum dari 0,075 emu/gOe yang dikenai temperatur hipertermia di bawah medan magnet 450 Oe, menghasilkan nilai SAR tertinggi yaitu 130 W/g dalam nanopartikel Fe₃O₄ berlapis GA. Nilai SAR ditunjukkan pada Gambar 2.12 (Rajan et al., 2020).



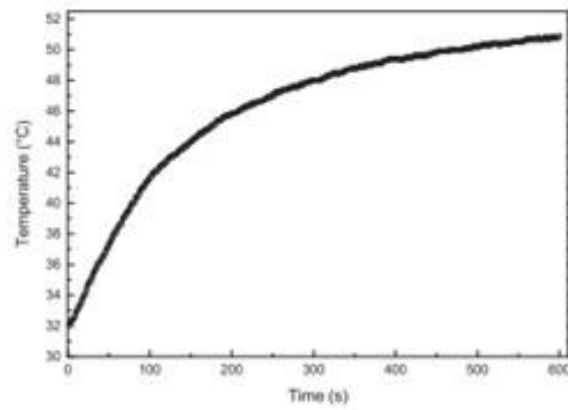
Gambar 2.13 Kurva temperatur vs waktu untuk dispersi koloid Fe_3O_4 berlapis GA (Rajan et al., 2020)

Hasil penelitian Burnham et al. menunjukkan bahwa *ferrofluid* berbasis Fe_3O_4 sedikit lebih efisien dalam melepaskan panas di bawah medan magnet AC dari pada yang berbasis $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, hal ini membuat ferrofluid berbasis Fe_3O_4 lebih cocok untuk aplikasi hipertermia. Dari data yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa OA yang melapisi partikel Fe_3O_4 dengan diameter 9,4 nm, menghasilkan nilai SAR tertinggi yaitu 11,084 W/g (Gambar 2.13), namun nilai ini tidak menerjemahkan langsung ke sifat-sifat agen hipertermia magnetik (Burnham et al., 2013).



Gambar 2.14 Perubahan temperatur vs waktu dari nanopartikel Fe_3O_4 dengan berbagai konsentrasi OA (Burnham et al., 2013)

Neto et al. telah melakukan sintesis dan karakterisasi nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) berlapis SO dengan distribusi ukuran yang sempit, disesuaikan dengan aplikasi hipertermia magnetik. SO telah berhasil melapisi nanopartikel Fe_3O_4 dalam rasio berat sekitar 25% dengan stabilitas sistem distribusi ukuran yang sempit, dengan 80% kristalinitas dan rentang dimensi 6-12 nm serta ukuran rata-rata sekitar 9 nm. Sistem ini menunjukkan efisiensi yang menjanjikan untuk aplikasi hipertermia magnetik, dengan nilai SAR yang didapat 14 W/g pada amplitudo medan rendah 15,9 kA/m dan frekuensi 62 kHz. Sampel menunjukkan peningkatan temperatur yang cepat yaitu mencapai 42,5°C dalam waktu sekitar 1,9 menit (Gambar 2.14) (Araújo-Neto et al., 2014).



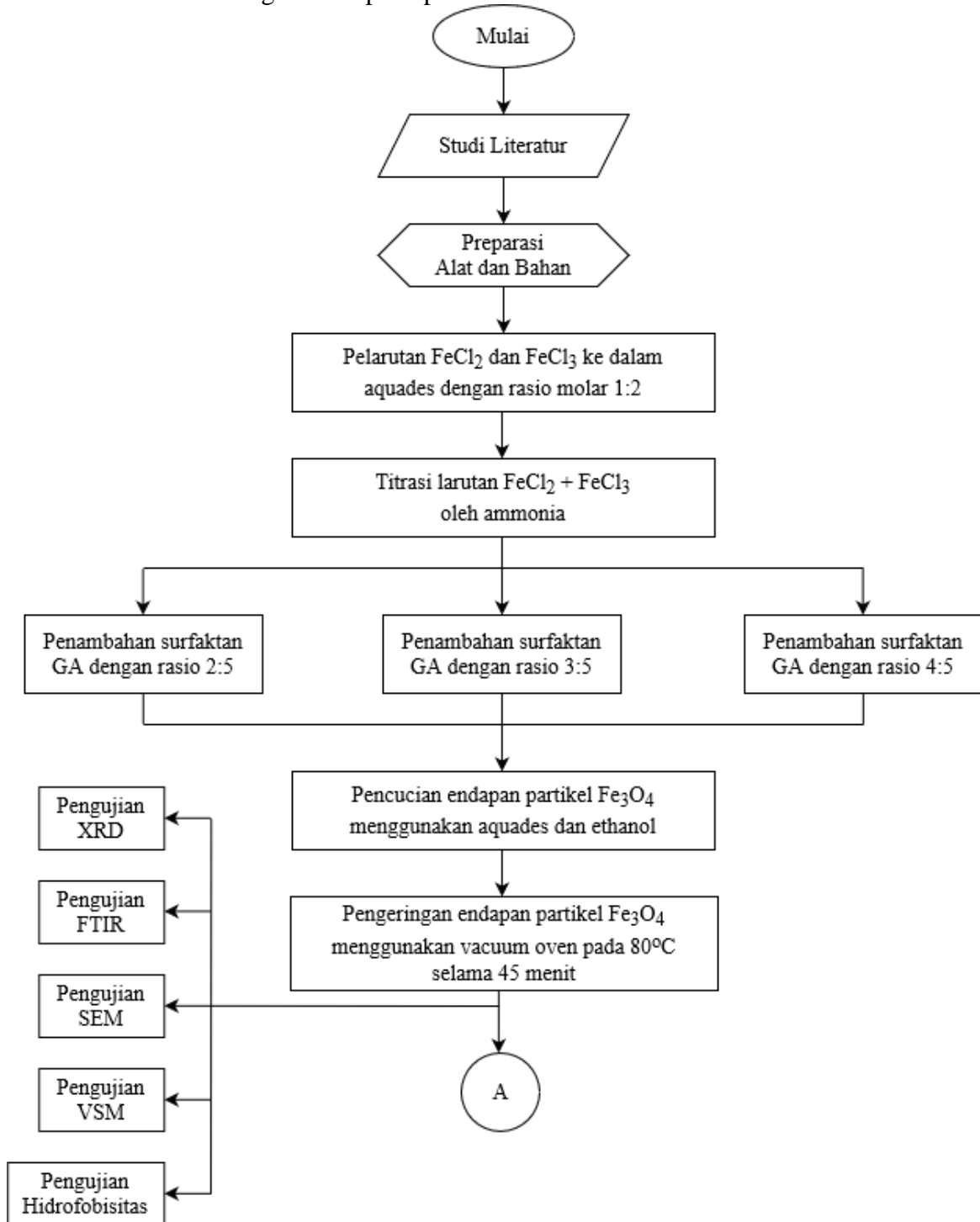
Gambar 2.15 Kurva temperatur vs waktu dari nanopartikel Fe_3O_4 yang dilapisi SO (Araújo-Neto et al., 2014)

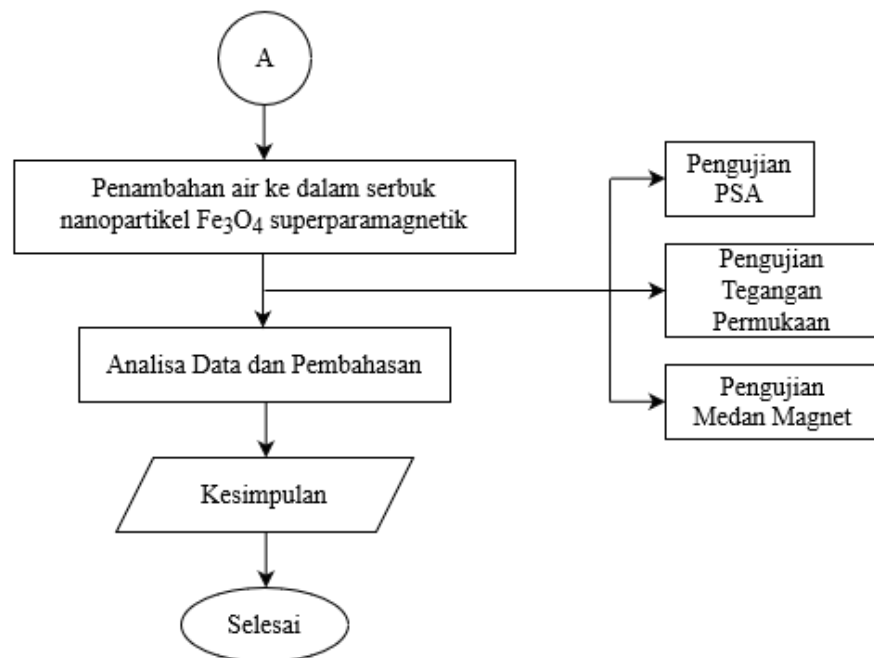
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Berikut adalah diagram alir pada penelitian ini.





Gambar 3.1 Diagram alir sintesis fluida nanopartikel Fe_3O_4 superparamagnetik

3.2 Alat Penelitian

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Neraca analitik
Digunakan untuk menimbang massa senyawa FeCl_3 , FeCl_2 dan surfaktan GA.
2. Gelas beaker
3Digunakan sebagai wadah dalam proses sintesis magnetit.
3. Silinder pengukur
Digunakan untuk mengukur larutan ammonia.
4. Pengaduk mekanik
Digunakan untuk mengaduk larutan selama proses sintesis magnetit.
5. Buret
Digunakan sebagai wadah larutan ammonia selama proses titrasi.
6. Statif dan klem
Digunakan sebagai penyangga buret.
7. pH meter
Digunakan untuk mengukur pH selama proses sintesis magnetit.
8. Cawan petri
Digunakan sebagai wadah serbuk magnetit.
9. Vacuum oven
Digunakan dalam proses pengeringan serbuk magnetit.
10. Alat karaktersasi morfologi dan struktur material:
 - a. Instrumen *X-Ray Diffractometry (XRD)*
 - b. Instrumen *Scanning Electron Microscopy (SEM)*
 - c. Instrumen *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*
 - d. Instrumen Hidrofobisitas
 - e. Instrumen *Particle Size Analyzer (PSA)*
 - f. Instrument *Surface Tensiometer*
11. Alat uji sifat magnetik:
 - a. Instrumen *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)*

12. Alat uji disiapkan panas:
 - a. Instrumen Generator AC dan *Thermocouple*

3.3 Bahan penelitian

Adapun bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

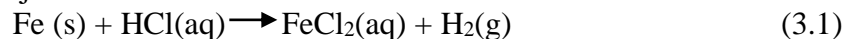
1. FeCl₃
2. NH₄OH 25%
3. Aquades
4. Ethanol 99%
5. Alkohol 37%
6. Asam glutamat
7. Steel wool
8. Kertas saring
9. Neodymium magnet

3.4 Metode Penelitian

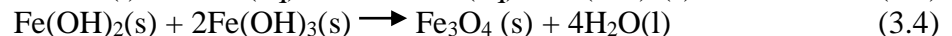
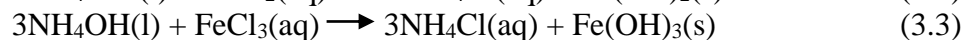
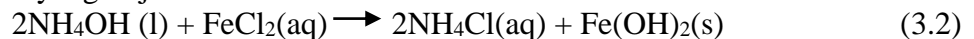
Dalam penelitian ini preparasi fluida nanopartikel Fe₃O₄ superparamagnetik terdiri dari 2 tahap, yaitu sebagai berikut:

3.4.1 Sintesis Nanopartikel Fe₃O₄ yang dilapisi Surfaktan

Dalam penelitian ini, sintesis magnetit (Fe₃O₄) dilakukan dengan menggunakan metode ko-presipitasi dengan bahan dasar FeCl₂ dan FeCl₃ dengan perbandingan molar 1:2. Larutan FeCl₂ dibuat dengan mereaksikan 10 gr steel wool sebagai sumber Fe dengan 70 mL HCl. Berikut adalah reaksi yang terjadi:



Sedangkan larutan FeCl₃ dibuat dengan melarutkan 15 gr serbuk FeCl₃ ke dalam 100 mL aquades. dengan prekursor serbuk besi (III) klorida (FeCl₃) serta steel wool dan HCl sebagai sumber besi (II) klorida (FeCl₂) yang dilarutkan dengan aquades sebanyak 100 ml dan kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnetik. Selama proses pengadukan dilakukan titrasi larutan ammonia (NH₄OH) sebanyak 75 ml hingga nilai pH sekitar 9-10 untuk membentuk partikel Fe₃O₄. Dengan penambahan ammonia ke dalam larutan FeCl₂ + FeCl₃ perlahan larutan akan berubah warna menjadi coklat dan membentuk *dark solid* (magnetit). Berikut adalah reaksi yang terjadi:



Setelah proses titrasi selesai dilanjutkan dengan memasukkan surfaktan GA dengan variasi konsentrasi 2:5, 3:5 dan 4:5 ke dalam larutan. Surfaktan dibuat dengan perbandingan volume yaitu 2 gr GA dilarutkan ke dalam 5 mL aquades, begitu pula dengan variasi konsentrasi yang lain. Setelah proses pengadukan kemudian dilakukan pencucian partikel Fe₃O₄ dengan aquades dan ethanol masing-masing sebanyak 5 kali. Partikel Fe₃O₄ yang telah dicuci lalu dikeringkan menggunakan vacuum oven dengan temperatur 80°C selama 45 menit.

3.4.2 Sintesis Fluida Nanopartikel Fe₃O₄

Bahan pendispersi serbuk nanopartikel Fe₃O₄ yang digunakan dalam penelitian ini adalah air. Jumlah air yang dibutuhkan yaitu sebanyak 85% dari total massa serbuk nanopartikel Fe₃O₄. Lalu nanopartikel Fe₃O₄ didispersikan ke dalam air dan aduk hingga seluruh partikel terdispersi.

3.5 Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa jenis pengujian karakterisasi, pengujian sifat magnetik dan pengujian disipasi panas pada sampel untuk mendukung penelitian ini.

3.5.1 X-Ray Diffractometry (XRD)

Pengujian *X-ray diffractometry* atau *XRD* merupakan salah satu teknik karakterisasi material yang digunakan untuk menganalisis senyawa dan struktur kristal suatu material. Pengujian ini bertujuan untuk mendeteksi difraksi sinar-X dari suatu material. Prinsip kerja dari *XRD* adalah sinar-X secara terus menerus akan berubah sudut datangnya, sehingga tercipta sebuah spektrum intensitas difraksi dengan sudut antara sinar datang dan sinar difraksi. Data yang didapat dari pengujian yaitu pola intensitas difraksi yang terbentuk sebagai fungsi dari sudut difraksi (2θ). Pada pola difraksi akan terlihat beberapa puncak intensitas pada 2θ yang berbeda, pola ini memiliki karakteristik yang berbeda pada setiap material. Dengan membandingkan pola ini dengan standar data yang ada, maka dapat diidentifikasi jenis zat kristalin yang ada di dalam suatu material (Widyastuti, 2019).

Perhitungan ukuran kristal dihitung dengan menggunakan persamaan Scherrer, sebagai berikut:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3.5)$$

Di mana k adalah konstanta Debye-Scherrer (0,9), λ adalah panjang gelombang sinar-X (1,5406 Å), β adalah nilai Full Wide at a Half Maximum (FWHM), θ adalah sudut difraksi Bragg (radian).

$$\beta = \sqrt{FWHM_{sp}^2 - FWHM_{st}^2} \quad (3.6)$$

Dimana $FWHM_{sp}$ adalah lebar puncak difraksi sampel pada setengah maksimum sedangkan $FWHM_{st}$ adalah FWHM standar. FWHM standar yang dipakai yaitu silica standar (0,0502) pada instrument XRD di Divisi Karakterisasi DTMM.

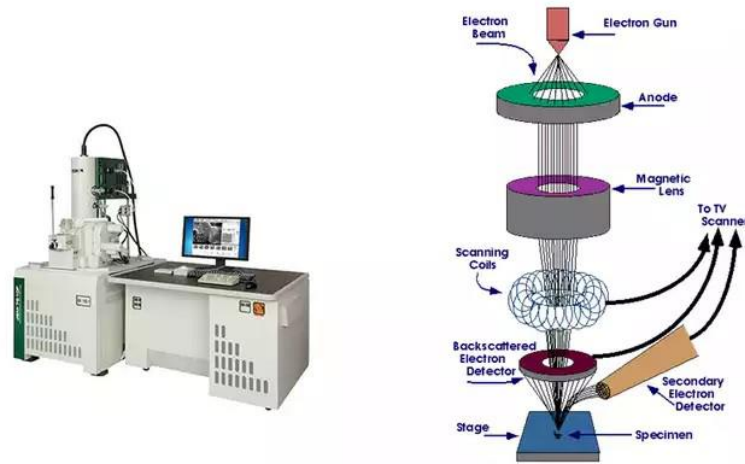


Gambar 3.2 Alat uji SEM

3.5.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy atau *SEM* merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang umum digunakan untuk menganalisis sifat material dengan cara melakukan pemindaian (*scanning*) pada permukaan suatu material. *SEM* dapat mengidentifikasi topografi, morfologi, komposisi dan kristalografi suatu material. Data yang didapat dari pengujian *SEM* yaitu berupa gambar dengan perbesaran yang tinggi, *depth of field* yang tinggi serta resolusi yang lebih baik

jika dibandingkan dengan mikroskop optik. Prinsip kerja dari *SEM* sendiri ialah interaksi antara elektron dengan material spesimen. Ketika elektron berinteraksi dengan atom di dalam spesimen, maka setiap individu elektron akan mengalami dua jenis hamburan, yaitu hamburan elastis dan inelastis. Dari pantulan inelastis akan menghasilkan sinyal elektron sekunder dan sinar X karakteristik, sedangkan dari pantulan elastis akan didapat sinyal *backscattered electron*. Tingkat hamburan elektron ini tergantung dari energi elektron, nomor atom unsur pada spesimen dan kerapatan atom sampel. Semakin besar energi elektron maka tingkat hamburannya akan semakin besar, namun semakin tinggi nomor atom dan kerapatan atom spesimen maka tingkat hamburannya semakin rendah (Widyastuti, 2019).



Gambar 3.3 Alat dan skema uji SEM

3.5.3 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

Pengujian *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)* adalah salah satu teknik karakterisasi material berjenis spektroskopi vibrasi. *FTIR* dapat mengidentifikasi struktur dari molekul suatu material dengan memanfaatkan interaksi radiasi gelombang elektromagnetik dan vibrasi di dalam molekul. Gelombang elektromagnetik yang digunakan pada pengujian *FTIR* adalah sinar inframerah. *FTIR* mengidentifikasi vibrasi suatu molekul dengan mendeteksi absorpsi sinar inframerah oleh molekul. Hasil data yang didapat dari pengujian adalah grafik dimana sumbu X menyatakan intensitas spektrum inframerah. Langkah berikutnya setelah mendapatkan spektrum final *FTIR* yang berupa plot transmitansi vs bilangan gelombang atau absorbansi vs bilangan gelombang ialah menentukan struktur dari molekul suatu material dengan cara membandingkan data puncak transmitansi ataupun absorbansi dengan data standar struktur molekul yang telah ada sebelumnya (Widyastuti, 2019).

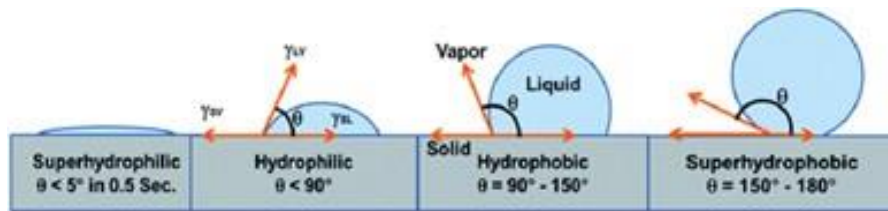


Gambar 3.4 Alat uji FTIR

3.5.4 Hidrofobisitas

Hidrofobisitas dari material merupakan suatu resistensi untuk mengalirkan air pada permukaannya. Suatu material disebut memiliki sifat hidrofobik apabila air sulit mengalir pada permukaannya, sedangkan disebut memiliki sifat hidrofilik apabila air dengan mudah mengalir pada permukaannya. Hidrofobisitas permukaan suatu material dapat diindikasikan secara kuantitatif dengan nilai sudut kontak (Θ) yang terbentuk antara tetesan air dengan permukaan material tersebut, yang tidak lain merupakan representasi langsung dari tegangan interfacemolekul air. Berdasarkan pengukuran sudut kontak dan sifat pembasahannya, permukaan padat dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis (Putri, 2020; Tropis Perkotaan Samsurizal et al., 2018).

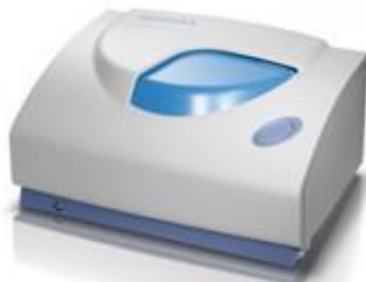
- Superhidrofilik, jika sudut kontak air kurang dari 10°
- Hidrofilik, jika sudut kontak air diantara 10° - 90°
- Hidrofobik, jika sudut kontak air diantara 90° - 150°
- Superhidrofobik, jika sudut kontak air lebih dari 150°



Gambar 3.5 Skema uji hidrofobisitas

3.5.5 Particle Size Analyzer (PSA)

Pengujian *Particle Size Analyzer* atau *PSA* menggunakan metode *Dynamic Light Scattering (DLS)* yang memanfaatkan hamburan sinar inframerah. Hamburan sinar inframerah ditembakkan oleh alat ke sampel uji, sehingga sampel akan bereaksi menghasilkan gerak *Brown* (gerakan acak dari partikel yang sangat kecil di dalam cairan akibat dari benturan antar molekul yang ada di dalam zat cair). Gerak inilah yang kemudian dianalisis oleh alat, semakin kecil ukuran molekul maka gerakannya akan semakin cepat. Pengujian *PSA* juga menggunakan metode basah, dimana metode ini menggunakan media pendispersi untuk mendispersikan material uji. Metode ini digunakan pada *PSA* karena partikel yang didispersikan ke dalam media akan menghindari partikel untuk saling beraglomerasi (menggumpal). Dengan demikian, ukuran partikel yang terukur adalah ukuran dari individu partikel (*single particle*). Selain itu hasil pengukuran yang didapat juga dalam bentuk distribusi, sehingga hasil pengukuran dapat diasumsikan telah menggambarkan kondisi sampel secara keseluruhan (Mufid, 2016).



Gambar 3.6 Alat uji PSA

3.5.6 Tegangan permukaan

Metode cincin Du Noüy merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk mengukur tegangan permukaan. Pengukuran dilakukan dengan alat yang disebut Tensiometer. Instrumen ini memiliki keseimbangan mikro yang akurat dan mekanisme yang tepat untuk memindahkan sampel cairan secara vertikal ke dalam glass beaker. Cincin yang digunakan biasanya terbuat dari paduan platina dan iridium dengan geometri yang jelas. Proses pengujian tegangan permukaan yaitu cincin yang tergantung pada pengait timbangan pertama dicelupkan ke dalam cairan dan kemudian ditarik secara perlahan dengan menurunkan bejana sampel. Uap yang mengelilingi kalorimeter yang menunjukkan pertukaran gas dari pembakaran, prosesnya mirip dengan pembakaran lilin. Neraca mikro terus-menerus mencatat gaya yang diterapkan pada cincin saat menarik melalui antarmuka cairan udara. Tegangan permukaan tersebut adalah gaya maksimum yang diperlukan untuk melepaskan cincin dari permukaan cairan. Kekuatan detasemen sama dengan tegangan permukaan dikalikan dengan pinggiran permukaan yang terlepas. Oleh karena itu, untuk sebuah cincin, $4r$ FR dimana r R adalah jari-jari cincin. Gaya yang diukur dengan timbangan termasuk berat cincin (Alam et al., 2017).



Gambar 3.7 Alat uji tegangan permukaan

3.5.7 Vibrating Sample Magnetometer (VSM)

Vibrating Sample Magnetometer atau *VSM* adalah salah satu jenis peralatan yang digunakan untuk mengetahui sifat magnetik suatu material. Dengan pengujian *VSM* dapat diperoleh informasi mengenai besaran-besaran sifat magnetik sebagai akibat dari perubahan medan magnet luar (H) terhadap magnetisasi (M) yang digambarkan dalam kurva histeresis. Dari kurva tersebut dapat diketahui sifat kemagnetan suatu material, yaitu magnetisasi saturasi (M_s), medan koersivitas (H_c) dan remanensi magnetik (M_r). Alat *VSM* bekerja berdasarkan metode induksi, dimana metode ini mengukur magnetisasi dari sinyal yang ditimbulkan atau diinduksikan oleh cuplikan yang bergetar dalam lingkungan medan magnet pada sepasang kumparan (Mashuri, 2015; Mujamilah, 2000).

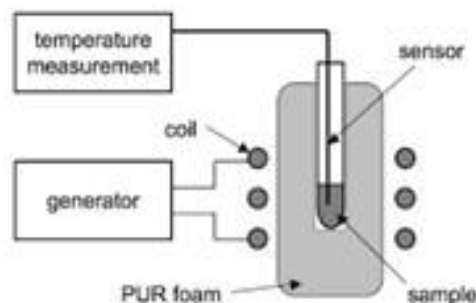


Gambar 3.8 Alat uji VSM

3.5.8 Medan Magnet

Disipasi panas oleh nanopartikel supermagnetik di bawah medan magnet AC yang diterapkan memiliki prinsip kerja berdasarkan teori relaksasi *Néel* (rotasi momen magnetik tanpa gerakan partikel dan relaksasi *Brownian* (rotasi fisik). Pengujian pengaruh medan magnet luar AC dan frekuensi bertujuan untuk mengetahui adanya peningkatan temperatur yang terjadi dalam rentang waktu 660 detik. Hasil dari pengujian ini yaitu berupa grafik hubungan temperatur sebagai fungsi waktu (Nemala et al., 2014; Tommy Hasan Abadi & Mufti, n.d.).

Prinsip kerja dari *thermocouple* menggunakan efek *thermoelectric* (efek *Seebeck*) untuk mengukur perbedaan temperatur suatu material antara titik pengukuran dan persimpangan referensi dengan temperatur yang diketahui. Efek *Seebeck* menginduksi potensi dengan menggunakan dua ujung logam yang terbuat dari bahan yang berbeda lalu dilas bersama. Potensi yang telah diukur dapat diterjemahkan ke perbedaan temperatur atau persamaan polynomial. *Thermocouple* memiliki rentang pengukuran yang luas dan waktu respon yang cepat serta tidak mempengaruhi media pengukuran. *Thermocouple* dibagi berdasarkan rentang pengukuran temperatur yang berbeda, seperti tipe T untuk temperatur yang lebih rendah (-185 hingga 300) dan tipe S untuk temperatur yang lebih tinggi (hingga 1600). Jenis *thermocouple* yang paling umum digunakan dalam aplikasi industri adalah tipe K, jenis ini mampu mengukur temperatur dari 0 hingga 1100 °C dalam operasi berkelanjutan. Keakuratan tergantung pada jenis *thermocouple* tetapi biasanya tidak melebihi 3 Kelvin (Hoffschmidt et al., 2012).



Gambar 3.9 Skema uji medan magnet

3.6 Rancangan Penelitian

Adapun penelitian dan pengujian yang dilakukan terlihat pada Tabel 3.1 hingga Tabel 3.3.

Tabel 3.1 Tabel jadwal penelitian

Kegiatan	Februari				Maret				April				Mei				Juni				Juli			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi literatur	■	■	■	■																				
Asistensi kepada dosen pembimbing			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Penyusunan Laporan																								
Preparasi Alat dan Bahan				■	■	■																		
Sintesis Fe ₃ O ₄						■	■	■	■	■	■	■												
Sintesis liquid magnetite						■	■	■	■	■	■	■												
Pengujian													■	■	■	■	■	■	■	■				
Analisa data dan pembahasan													■	■	■	■	■	■	■	■				

Tabel 3.2 Kode spesimen dan variasi perlakuan

Spesimen	Rasio molar Fe ²⁺ /Fe ³⁺	Surfaktan	Rasio konsentrasi surfaktan
A	1:2	Asam Glutamat	2:5
B	1:2	Asam Glutamat	3:5
C	1:2	Asam Glutamat	4:5

Tabel 3.3 Pengujian pada sampel nanopartikel Fe₃O₄ dan fluida nanopartikel Fe₃O₄

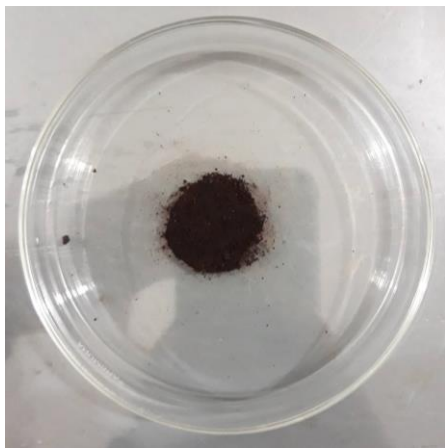
Pengujian		Sampel	
		Nanopartikel Fe ₃ O ₄	Fluida Fe ₃ O ₄
Uji karakteristik struktur kristal dan morfologi partikel	XRD	✓	
	FTIR	✓	
	SEM	✓	
	PSA	✓	
Uji karakteristik interaksi partikel dengan air	Hidrofobisitas		✓
	Tegangan permukaan		✓
Uji sifat magnetik	VSM	✓	
Uji disipasi panas	Medan magnet		✓

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

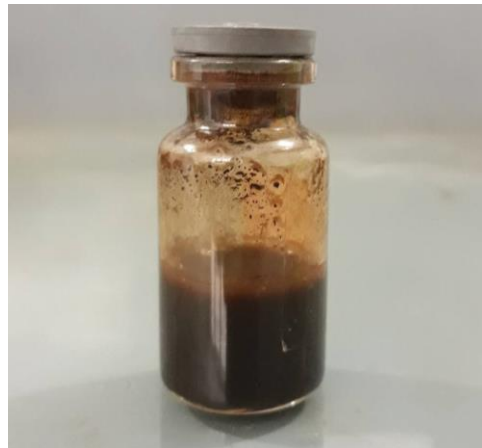
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Sintesis Nanopartikel Fe₃O₄

Sintesis nanopartikel Fe₃O₄ (magnetit) pada penelitian ini menggunakan metode ko-presipitasi dengan prekursor serbuk besi (III) klorida (FeCl₃) serta steel wool dan HCl sebagai sumber besi (II) klorida (FeCl₂) dengan penambahan konsentrasi surfaktan GA yaitu 2:5, 3:5 dan 4:5 ke dalam larutan. Hasil sintesis berupa serbuk nanopartikel magnetit (Fe₃O₄) berwarna hitam kecoklatan yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 (a). Kemudian dilakukan pembuatan fluida nanopartikel Fe₃O₄ dengan mendispersikan serbuk nanopartikel Fe₃O₄ ke dalam cairan pembawa air. Fluida magnetit terbentuk dari 85% cairan pembawa dan 15% serbuk nanopartikel. Selanjutnya dilakukan sonikasi pada fluida nanopartikel Fe₃O₄ untuk homogenisasi larutan. Hasil sintesis fluida nanopartikel Fe₃O₄ ditunjukkan pada Gambar 4.1 (b).



(a)



(b)

Gambar 4.1 Sampel hasil sintesis (a) nanopartikel Fe₃O₄ (b) fluida nanopartikel Fe₃O₄

4.2 Hasil karakterisasi Fluida Nanopartikel Fe₃O₄ Superparamagnetik

Adapun tujuan dari karakterisasi pada penelitian ini adalah untuk menganalisis senyawa, struktur kristal dan morfologi yang terbentuk, ukuran partikel, interaksi nanopartikel Fe₃O₄ dengan cairan pembawa air, sifat magnetik serta kemampuan menghasilkan energi panas untuk masing-masing sampel dengan variasi konsentrasi surfaktan GA sebanyak 2:5, 3:5 dan 4:5.

4.2.1 Analisa Hasil XRD

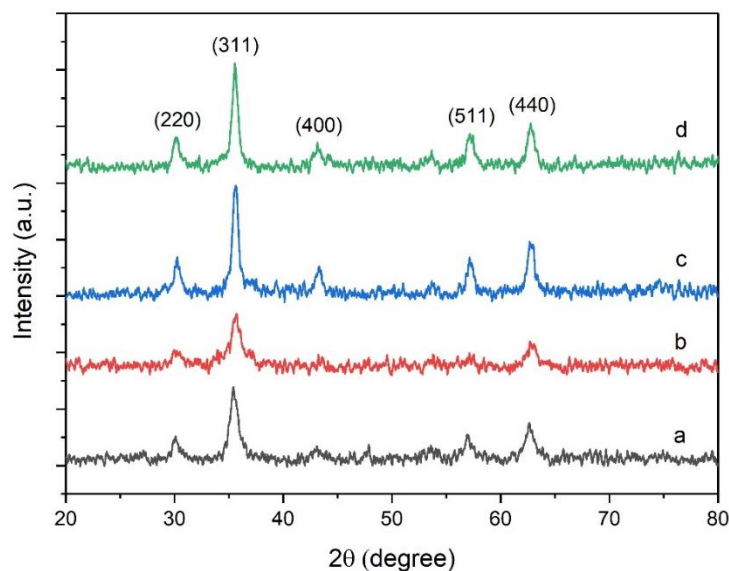
Hasil sintesis nanopartikel Fe₃O₄ dengan variasi konsentrasi surfaktan GA sebanyak 2:5, 3:5 dan 4:5 dilakukan pengujian dengan menggunakan alat XRD PANanalytical dengan rentang sudut 5°-90° menggunakan panjang gelombang CuK α sebesar 1.54060Å. Kemudian dilakukan identifikasi fasa menggunakan software *High Score Plus* untuk mengetahui pola difraksi Fe₃O₄. Berdasarkan pola difraksi senyawa Fe₃O₄ diperoleh lima puncak utama dengan indeks miller (h k l) yaitu (220), (311), (400), (511) dan (440) yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Selanjutnya dilakukan perbandingan dengan data acuan JCPDS #19-0629 diketahui bahwa kelima puncak utama tersebut merupakan puncak khas yang dimiliki oleh senyawa Fe₃O₄, perbandingan keseluruhan sampel ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Dengan membandingkan nanopartikel magnetit murni dengan yang dilapisi surfaktan GA dapat dikatakan bahwa puncak difraksi terlihat serupa, hal ini menunjukkan bahwa penambahan lapisan surfaktan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap struktur kristal nanopartikel magnetit. Masing-masing sampel memiliki indeks miller (h k l) yang sama dan mengarah pada

struktur kristal *face-centered cubic* dengan grup ruang Fd-3m dan parameter kisi dalam kisaran 8,36-8.39 Å. Pola XRD pada Gambar 4.1 menunjukkan intensitas peak yang tinggi dengan tidak adanya bentuk peak yang melebar, hal tersebut menunjukkan bahwa sampel memiliki kristalinitas yang baik (Prasetyoko et al., 2012). Terlihat pula dengan peningkatan konsentrasi GA terjadi kenaikan intensitas peak, dari fenomena tersebut dapat dikatakan bahwa kristalinitas material semakin baik seiring penambahan GA.

Tabel 4.1 Komparasi JCPDS #19-069 dan sintesis nanopartikel Fe₃O₄

Sampel	Fasa JCPDS #19-069	2θ	I	FWHM	d (Å)
Fe ₃ O ₄		30.17	48	0.7	2.96
		35.36	156	0.85	2.54
		43.07	78	0.7	2.10
		56.96	58	0.4	1.62
		62.63	68	0.87	1.48
		30.23	31	1.0	2.96
Fe ₃ O ₄ + GA 2:5		35.57	89	0.93	2.52
		43.22	40	0.7	2.09
		57.17	41	0.8	1.61
		62.95	49	0.9	1.48
Fe ₃ O ₄ + GA 3:5	Fe ₃ O ₄ (magnetit)	30.25	74	0.62	2.96
		35.61	250	0.57	2.52
		43.26	51	0.65	2.09
		57.23	79	0.66	1.61
		62.81	116	0.72	1.48
		30.27	65	0.68	2.95
Fe ₃ O ₄ + GA 4:5		35.57	226	0.59	2.52
		43.29	39	0.7	2.09
		57.17	70	0.76	1.61
		62.71	93	0.79	1.48



Gambar 4.2 Hasil XRD sampel nanopartikel (a) Fe₃O₄, (b) Fe₃O₄ + GA 2:5, (c) Fe₃O₄ + GA 3:5, (d) Fe₃O₄ + GA 4:5

Berdasarkan hasil perhitungan dengan persamaan Scherrer diperoleh ukuran kristal yang ditunjukkan pada Tabel 4.2. Terjadinya tren penurunan dan kenaikan ukuran kristal yang diperoleh setelah modifikasi permukaan dengan surfaktan GA menunjukkan bahwa surfaktan berperan penting dalam mengontrol ukuran kristal dari nanopartikel magnetit.

Tabel 4.2 Ukuran kristal nanopartikel Fe_3O_4 murni dan dilapisi GA

Sampel	Ukuran kristal (nm)
Fe_3O_4	9.83
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{GA (2:5)}$	8.98
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{GA (3:5)}$	9.18
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{GA (4:5)}$	10.85

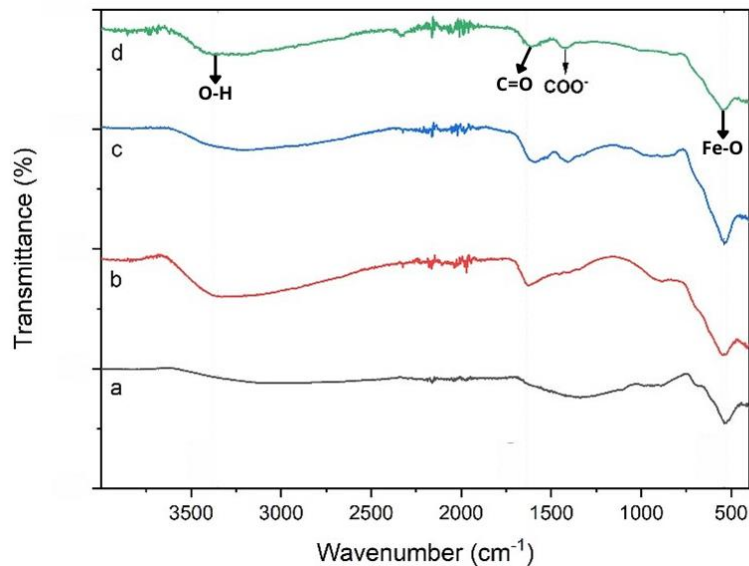
Dari data di atas terlihat bahwa meningkatnya ukuran kristal dipengaruhi oleh meningkatnya konsentrasi GA. Hasil tersebut bertolak belakang dengan beberapa penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Rajan et al, Burnham et al, Petcharoen et al dan Nalle et al yang menyatakan bahwa semakin tinggi konsentrasi surfaktan, maka ukuran kristalnya semakin kecil. Akan tetapi penelitian yang dilakukan oleh Zirak et al justru memperoleh hasil yang sama dengan penelitian ini, yaitu ukuran kristal yang meningkat seiring dengan konsentrasi surfaktan yang naik. Jenis surfaktan yang digunakan menentukan ukuran akhir partikel dan stabilitas disperse melalui gaya tolak menolak yang mencegah agregasi dan penggumpalan partikel (Huetal, 2005). GA adalah surfaktan ionic hidrofilik yang sangat stabil di dalam air (polar). Ekor hidrofobik dari GA mengadsorpsi ke permukaan partikel Fe_3O_4 , sedangkan kepala hidrofilik menjulur keluar ke cairan pembawa air dan menciptakan lapisan stabilizer (Shegokarand Muller, 2010). Jika pertumbuhan partikel Fe_3O_4 lebih cepat dari laju penyerapan molekul surfaktan untuk menutupi permukaan partikel Fe_3O_4 yang terbuka, maka akumulasi partikel yang tersebar luas akan terjadi karena gaya Tarik hidrofobik antar partikel (Dasanand Tan, 2012; Tamjidietal, 2013). Hal tersebut mungkin terjadi saat GA tidak dapat secara cepat menutupi partikel Fe_3O_4 yang baru terbentuk dan tidak menyerap cukup cepat ke permukaan partikel Fe_3O_4 karena laju pembentukan partikel yang cepat dan strukturnya yang besar (Zirak & Pezeshki, 2015).

4.2.2 Analisa Hasil FTIR

Selama pengujian XRD yang telah dilakukan, sulit untuk mengidentifikasi senyawa dan gugus fungsi yang terbentuk pada nanopartikel Fe_3O_4 , sehingga dilakukan pengujian FTIR dengan tujuan mengetahui gugus fungsi dari sintesis nanopartikel Fe_3O_4 . Berdasarkan penelitian (Rajan et al., 2020) menunjukkan *absorption bands* pada $\sim 540 \text{ cm}^{-1}$ yang mana sesuai dengan *vibrational band* dari logam-oksigen (Fe-O) pada tetrahedral dan *band* dekat 3.436 cm^{-1} ditujukan untuk *stretching vibrations* dari gugus hidroksil (O-H). *IR bands* dengan intensitas rendah untuk Fe_3O_4 dengan coating GA ditunjukkan pada *wavenumber* $\sim 1.635 \text{ cm}^{-1}$ dan $\sim 1.421 \text{ cm}^{-1}$ sesuai dengan *stretching vibration* ikatan C=O dari gugus fungsi COOH yang mana ikatan tersebut memastikan bahwa pengikatan GA ke permukaan nanopartikel Fe_3O_4 berhasil dengan kemisorpsi ion karboksilat. Karakteristik utama ditunjukkan pada *broad band* $\sim 3.350 \text{ cm}^{-1}$ untuk *stretching vibration* gugus fungsi N-H yang dimiliki oleh GA, di mana *stretching vibration* tersebut juga tumpang tindih dari gugus fungsi O-H. Spektrum FTIR dan gugus fungsi yang terbentuk pada nanopartikel Fe_3O_4 berlapis GA ditunjukkan pada Gambar 4.2 dan Tabel 4.3.

Adanya muatan negatif pada permukaan magnetit dianggap berasal dari deprotonasi permukaan dan adanya hidroksil dan karboksilat ikatan kelompok, sedangkan muatan positif disebabkan oleh surfaktan kationik yang digunakan. GA memiliki dua gugus karboksil dan satu

gugus amino, dimana GA merupakan salah satu jenis polisakarida yang memiliki afinitas pengikatan kuat terhadap Fe_3O_4 (Rajan et al., 2020).



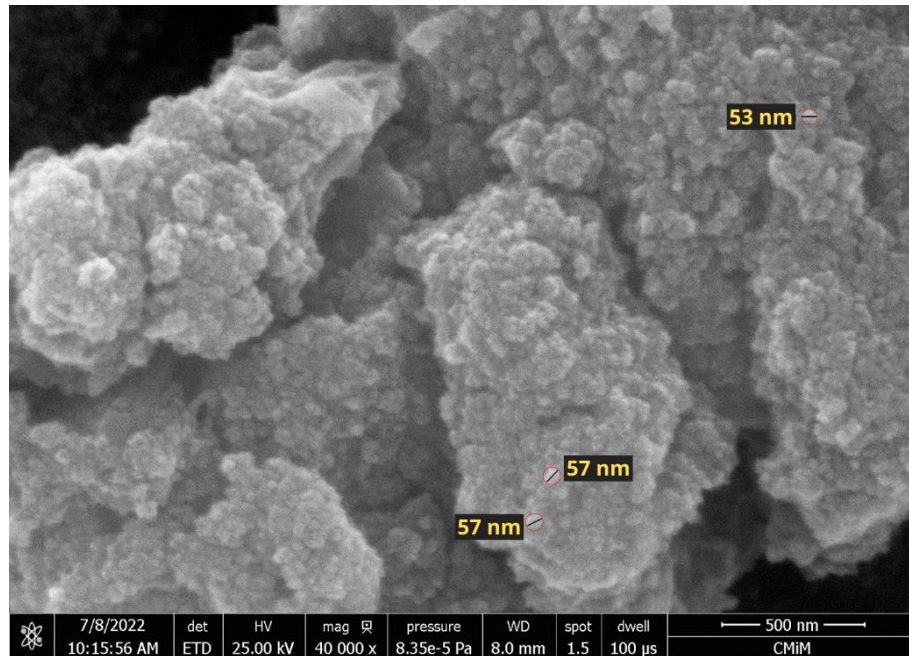
Gambar 4.3 Hasil FTIR sampel nanopartikel (a) Fe_3O_4 , (b) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{GA } 2:5$, (c) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{GA } 3:5$, (d) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{GA } 4:5$

Tabel 4.3 *Wavenumber* dan gugus fungsi pada nanopartikel Fe_3O_4 berlapis GA

<i>Wavenumber</i> (cm^{-1})	Gugus fungsi
~540	Fe-O
~1625	COO^-
~1380	C=O
~3350	O-H

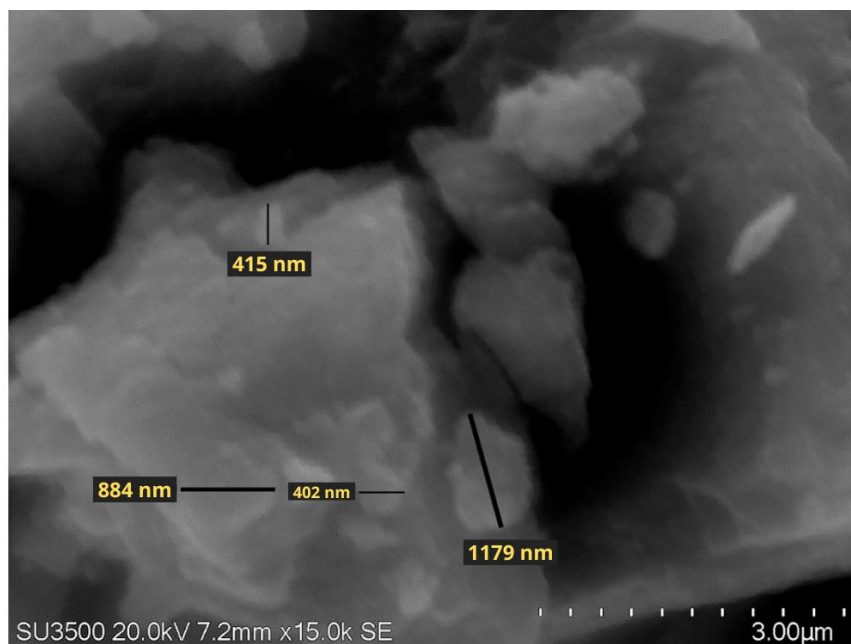
4.2.3 Analisa Hasil SEM

Berdasarkan hasil karakterisasi SEM, ukuran senyawa Fe_3O_4 memiliki ukuran partikel rata-rata sebesar 55.67 nm. Nilai partikel ini lebih besar dibandingkan dengan ukuran kristal senyawa Fe_3O_4 dari hasil data XRD, namun ukuran partikelnya hampir mirip dengan hasil PSA. Hal tersebut terjadi karena ukuran partikel pada hasil SEM bukan ukuran partikel tunggal, sedangkan pada ukuran kristal dari hasil XRD adalah ukuran partikel tunggal Fe_3O_4 . Hasil karakterisasi SEM juga menunjukkan bahwa senyawa Fe_3O_4 mengalami aglomerasi. Aglomerasi ini disebabkan karena partikel-partikel magnetik yang berinteraksi sangat kuat sehingga membentuk gumpalan. Oleh karena itu, hasil karakterisasi SEM mempunyai ukuran partikel yang lebih besar. Selain itu, diamati bahwa bentuk dari senyawa Fe_3O_4 adalah irregular (Gambar 4.3).



Gambar 4.4 Hasil SEM nanopartikel Fe_3O_4 murni dengan skala 500 nm

Pada Gambar 4.4 rata-rata ukuran partikel Fe_3O_4 yang dilapisi GA 2:5 sebesar 720 nm. Sampel Fe_3O_4 + GA 2:5 juga dilakukan uji SEM-EDX dan mapping untuk mengetahui unsur yang terbentuk yang ditunjukkan pada Tabel 4.4. Hasil mapping kemudian dijadikan acuan untuk menentukan unsur yang terbentuk. Berdasarkan data yang didapat terbukti bahwa lapisan surfaktan GA telah berhasil terbentuk pada partikel Fe_3O_4 . Akan tetapi, pengujian tersebut tidak dapat menentukan ukuran partikel dikarenakan tidak terlihatnya bentuk partikel dengan baik.



Gambar 4.5 Hasil SEM nanopartikel Fe_3O_4 + GA 2:5 dengan skala 3 μm

Tabel 4.4 Hasil mapping sampel partikel Fe₃O₄ yang dilapisi GA 2:5

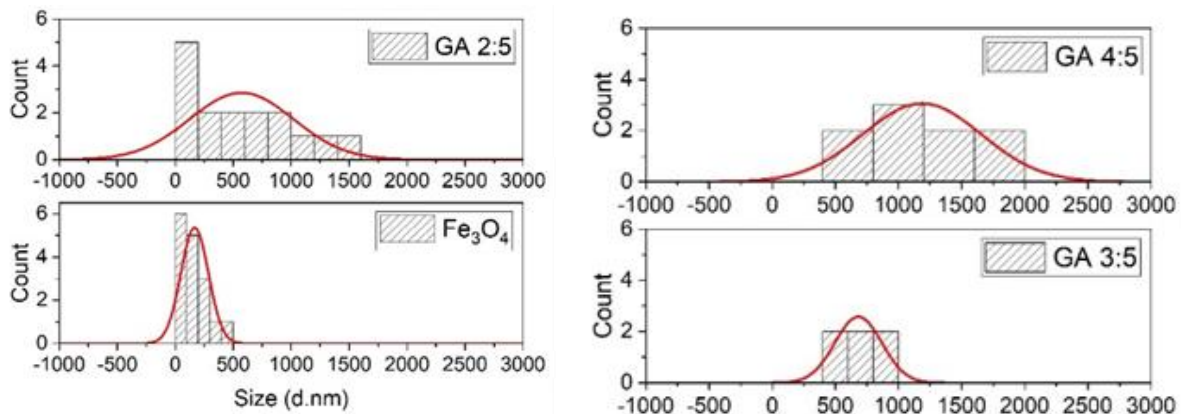
Sampel	Unsur C		Unsur O		Unsur Fe	
	Massa (%)	Atom (%)	Massa (%)	Atom (%)	Massa (%)	Atom (%)
Fe ₃ O ₄ + GA (2:5)	7.17	13.72	46.91	67.39	45.92	18.90

4.2.4 Analisa Hasil PSA

Serbuk nanopartikel Fe₃O₄ dengan variasi konsentrasi surfaktan GA yang telah dihasilkan kemudian dijadikan *ferrofluid* untuk dilakukan pengujian PSA sehingga diperoleh distribusi ukuran partikelnya sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.5. Dapat diperhatikan bahwa bentuk distribusi ukuran partikel tergantung pada konsentrasi surfaktan, distribusi menjadi lebih sempit karena konsentrasi surfaktan meningkat. Efek konsentrasi surfaktan menunjukkan distribusi ukuran yang semakin sempit ini diharapkan karena surfaktan dapat mencegah aglomerasi dan membatasi pertumbuhan partikel (Rodríguez-López et al., 2015). Rata-rata ukuran partikel yang ditunjukkan pada Tabel 4.5 menyatakan bahwa ukuran partikel meningkat seiring dengan meningkatnya penambahan konsentrasi GA. Hasil PSA ini memiliki tren yang sama dengan hasil SEM, yaitu semakin penambahan GA akan meningkatkan ukuran partikel. Fenomena ini mirip dengan hasil XRD dimana ukuran kristal meningkat seiring dengan meningkat konsentrasi GA, yang mana penjelasan dari fenomena tersebut juga sama dengan hasil XRD. Pada Tabel 4.5, hasil uji PSA menunjukkan rata-rata ukuran partikel sampel yang cukup besar (>100 nm). Hal tersebut disebabkan oleh rendahnya tingkat dipersitas serbuk nanopartikel Fe₃O₄ di dalam cairan pembawa air yang digunakan dalam pembuatan *ferrofluid*, sehingga ukuran partikel yang terukur menjadi besar.

Tabel 4.5 Ukuran partikel terbanyak pada tiap sampel dan persentasenya

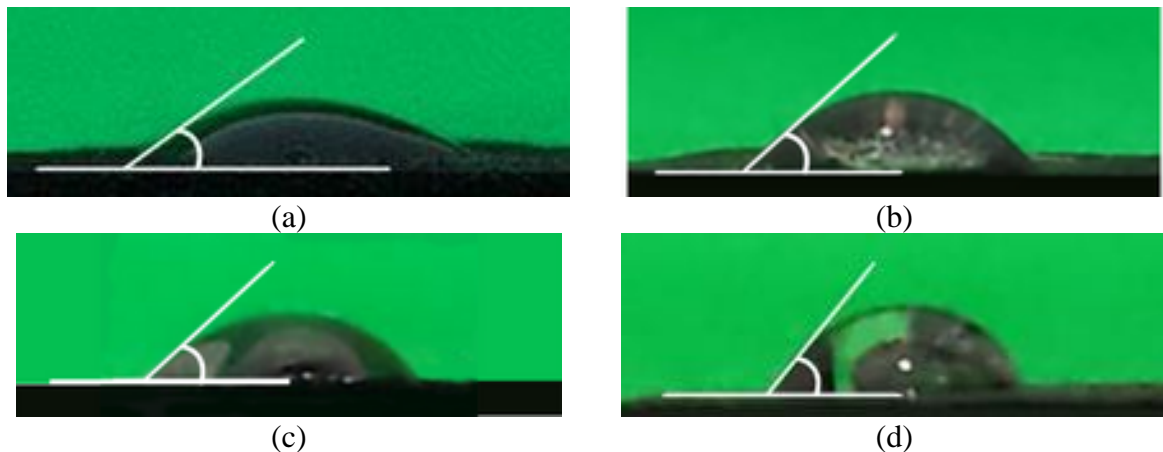
Sampel	Ukuran partikel terbanyak (nm)	Persentase ukuran partikel terbanyak (%)
Fe ₃ O ₄	58.77	29.3
Fe ₃ O ₄ + GA (2:5)	164.2	25.7
Fe ₃ O ₄ + GA (3:5)	615.1	34.5
Fe ₃ O ₄ + GA (4:5)	955.4	22.3



Gambar 4.6 Distribusi ukuran nanopartikel Fe₃O₄ murni dan dilapisi GA

4.2.5 Analisa Hasil Hidrofobisitas

Pengujian hidrofobisitas dilakukan untuk mengetahui resistensi sampel terhadap air, yang mana nanti akan menentukan jenis cairan pembawa yang cocok digunakan pada masing-masing sampel. Pengujian ini dilakukan dengan cara memadamkan sampel menggunakan mesin press hidrolik dan sampel dikenai beban sebesar 60-80 MPa. Kemudian pada permukaan masing-masing sampel ditetaskan air menggunakan mikropipet sebanyak 50 μ l. Selanjutnya dilakukan analisis terhadap sudut kontak antara permukaan sampel dengan air dan didapat hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Dari data yang telah diperoleh pada Tabel 4.6 dapat dikatakan bahwa seluruh sampel memiliki sifat hidrofilik karena mempunyai sudut kontak <90 $^{\circ}$, sehingga cairan pembawa yang dapat digunakan untuk membuat *ferrofluid* dari masing-masing sampel yaitu berupa air. Hal ini dikarenakan terjadi ikatan antara gugus karboksilat dengan ion besi pada permukaan nanopartikel Fe₃O₄. Mikyalova dkk (2004) menyebutkan bahwa interaksi antara surfaktan GA dengan nanopartikel Fe₃O₄ yaitu melalui gugus karboksilat kedua dan bukan melalui gugus amino maupun α -karboksilat (Abarca-Cabrera et al., 2021). Pernyataan tersebut mendukung hasil dari penelitian ini bahwa gugus karboksilat kedua merupakan bagian ekor hidrofobik yang berikatan langsung dengan ion besi pada permukaan nanopartikel Fe₃O₄, sedangkan α -karboksilat yang berikatan dengan gugus amino merupakan bagian kepala hidrofilik. Sehingga dapat dikatakan layer terluar dari nanopartikel Fe₃O₄ yang telah dilapisi surfaktan GA bersifat hidrofilik.



Gambar 4.7 Hasil hidrofobisitas sampel nanopartikel (a) Fe₃O₄, (b) Fe₃O₄ + GA 2:5, (c) Fe₃O₄ + GA 3:5, (d) Fe₃O₄ + GA 4:5

Tabel 4.6 Sudut kontak dan sifat hidrofobisitas

Sampel	Sudut kontak ($^{\circ}$)	Sifat hidrofobisitas
Fe ₃ O ₄	36.07	Hidrofilik
Fe ₃ O ₄ + GA (2:5)	41.74	Hidrofilik
Fe ₃ O ₄ + GA (3:5)	42.56	Hidrofilik
Fe ₃ O ₄ + GA (4:5)	50.83	Hidrofilik

Peningkatan konsentrasi GA menyebabkan peningkatan interaksi hidrofobik antara ekor hidroksil dari GA dengan permukaan nanopartikel Fe₃O₄. Oleh karena itu, sudut kontak permukaan partikel meningkat dari 36.07 $^{\circ}$ menjadi 41.74 $^{\circ}$. Kelebihan surfaktan akibat meningkatnya konsentrasi pada 3:5 dan 4:5 mengakibatkan struktur lapisan ganda dengan kepala hidrofilik dari dua lapisan yang saling bersilangan dan menyebabkan bagian ekor lapisan kedua menjulur ke larutan, sehingga sudut kontak terus meningkat dari 42.56 $^{\circ}$ ke 50.83 $^{\circ}$ (Mat

Latif et al., 2021). Namun, seluruh sampel masih dalam kategori hidrofilik meskipun sudut kontak meningkat seiring dengan konsentrasi GA yang meningkat.

4.2.6 Analisa Hasil Tegangan Permukaan

Sifat dispersi dari sintesis nanopartikel magnetit di dalam air merupakan faktor penting untuk aplikasi biomedis sehingga diperlukan stabilitas suspensi yang baik dalam sistem tubuh. Aplikasi fluida hipertermia magnetik untuk terapi kanker membutuhkan stabilitas suspensi yang tinggi dengan ukuran partikel kecil untuk meningkatkan efisiensi pemanasan dalam menaikkan temperatur hingga dapat membunuh sel tumor. Pada pengujian ini, semua sampel didispersikan ke dalam cairan pembawa air melalui proses sonikasi selama 15 menit. Stabilitas masing-masing sampel diamati melalui pengujian tegangan permukaan yang ditunjukkan pada Tabel 4.7. Dari data hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa nanopartikel Fe_3O_4 yang dilapisi oleh surfaktan menunjukkan kecenderungan dispersitas yang meningkat dari pada nanopartikel Fe_3O_4 yang tidak dilapisi surfaktan. Hal tersebut terjadi karena surfaktan yang berikatan dengan permukaan partikel Fe_3O_4 dapat mengurangi tegangan antarmuka padat/cair dan menginduksi ikatan hydrogen dengan lingkungan air. Fenomena ini merupakan ilustrasi dari efek Reh binder (fenomena mengurangi kekuatan padatan dengan adsorpsi surfaktan pada permukaan padat) Stabilitas suspensi partikel dapat ditingkatkan dengan menambahkan konsentrasi surfaktan lebih tinggi ke permukaan partikel agar memberikan interaksi yang lebih kuat antar partikelnya (Turganbay et al., 2012).

Namun hasil tegangan permukaan yang didapat tidak naik secara signifikan ketika diberi penambahan surfaktan GA. Hal tersebut dapat dikorelasikan dengan hasil hidrofobisitas yang mana sudut kontak meningkat ketika konsentrasi GA juga meningkat. Secara tidak langsung sifat hidrofilik dari partikel berkurang sehingga mempengaruhi hasil nilai tegangan permukaan dari partikel Fe_3O_4 murni yang tidak terlalu jauh dari hasil nilai tegangan permukaan yang dilapisi GA. Hasil tegangan permukaan juga berhubungan dengan hasil uji PSA yang menunjukkan rata-rata ukuran partikel cukup besar (>100 nm). Hal tersebut menyebabkan rendahnya tingkat dispersitas nanopartikel Fe_3O_4 di dalam cairan pembawa air.

Tabel 4.7 Nilai tegangan permukaan nanopartikel Fe_3O_4 murni dan dilapisi GA

Sampel	Tegangan permukaan (mN/m)
Fe_3O_4	69.9
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{GA} (2:5)$	71.2
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{GA} (3:5)$	72
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{GA} (4:5)$	71.2

4.2.7 Analisa Hasil VSM

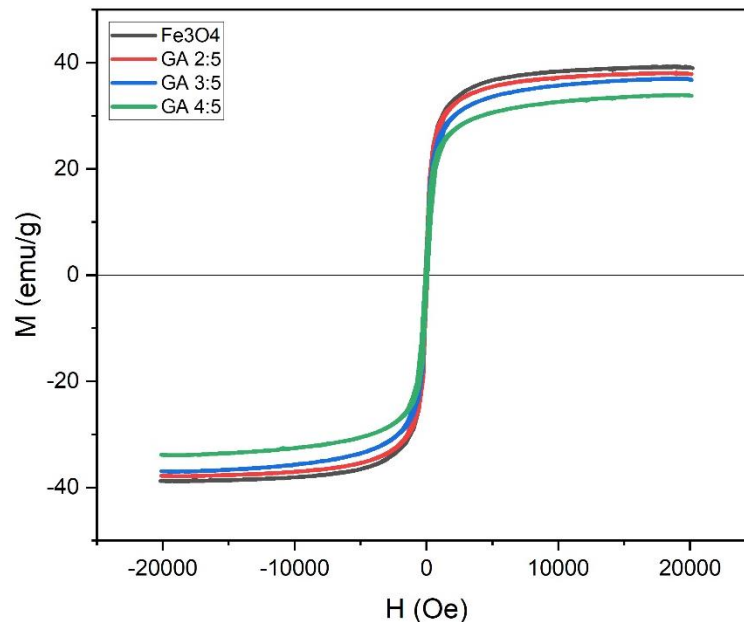
Besaran penting dalam menentukan sifat magnetik yang dapat diketahui dari kurva histeresis magnetik adalah magnetisasi saturasi (M_s) dan medan koersivitas (H_c). Pada Gambar 4.7 dapat dilihat perbandingan kurva histeresis dari nanopartikel Fe_3O_4 . Untuk lebih jelasnya, nilai magnet saturasi dan medan koersivitas masing-masing sampel ditunjukkan pada Tabel 4.8. Data pada Tabel 4.8 menunjukkan hubungan yang kuat antara ukuran partikel dengan sifat magnetik.

Magnetisasi saturasi (M_s) semakin menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi surfaktan GA. Jika dikorelasikan dengan data ukuran partikel (Tabel 4.5), maka dapat dikatakan bahwa semakin besar ukuran partikel akan semakin turun nilai magnetisasi saturasinya. Hal tersebut bertolak belakang dengan beberapa penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Petcharoen dkk. (2012) yang menyatakan bahwa semakin besar ukuran partikel berdampak

pada meningkatnya nilai magnetisasi saturasi. Namun, pada penelitian yang dilakukan oleh Oliveira dkk. (2018) justru memiliki hasil yang sama dengan penelitian ini, yaitu nilai magnetisasi saturasi yang menurun (13.7 emu/g – 6.4 emu/g) seiring dengan ukuran partikel yang meningkat (5 nm – 6.9 nm).

Dari Table 4.8 juga dapat dilihat bahwa nilai medan koersivitas (H_c) berbanding terbalik dengan ukuran partikel atau dengan kata lain semakin besar ukuran partikel semakin kecil nilai medan koersivitasnya. Hal tersebut terjadi karena ukuran partikel yang semakin besar maka semakin banyak batas antar kristal dan semakin besar pula hambatan gerakan dinding domain sehingga resistensi terhadap medan demagnetisasi akan semakin besar dan nilai medan koersivitas semakin rendah. Sebaliknya, semakin kecil ukuran partikel, semakin mudah untuk memindahkan dinding domain sehingga resistensi terhadap demagnetisasi medan magnet semakin kecil, yang berarti semakin tinggi nilai medan koersivitasnya.

Dengan demikian, fenomena turunnya saturasi magnetik (M_s) seiring dengan meningkatnya ukuran nanopartikel Fe_3O_4 pada penelitian ini dapat disebabkan karena nanopartikel Fe_3O_4 tersebut merupakan superparamagnetik parsial, yaitu nanopartikel Fe_3O_4 yang dihasilkan mempunyai inti dengan karakteristik feromagnetik dan dikelilingi oleh shell bersifat paramagnetik. Di sisi lain, fenomena tersebut juga kemungkinan dapat disebabkan oleh adanya material lain yang bersifat non-magnetik yang menempel pada permukaan nanopartikel Fe_3O_4 sehingga mengurangi interaksi magnetik di antara partikel-partikelnya (Oliveira et al., 2018).



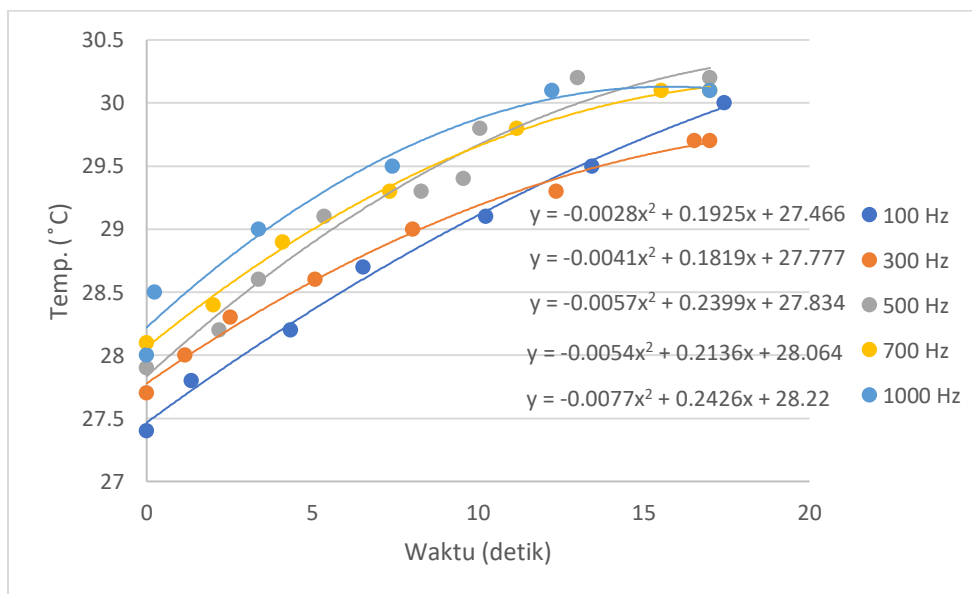
Gambar 4.8 Perbandingan kurva histeresis

Tabel 4.8 Pengaruh ukuran partikel dengan sifat magnetik

Sampel	Ukuran partikel (nm)	M_s (emu/g)	H_c (kOe)
Fe_3O_4	58.77	39.31	20.190
$Fe_3O_4 + GA (2:5)$	164.2	38.10	20.137
$Fe_3O_4 + GA (3:5)$	615.1	37.06	20.135
$Fe_3O_4 + GA (4:5)$	955.4	33.94	20.132

4.2.8 Analisa Hasil Medan Magnet

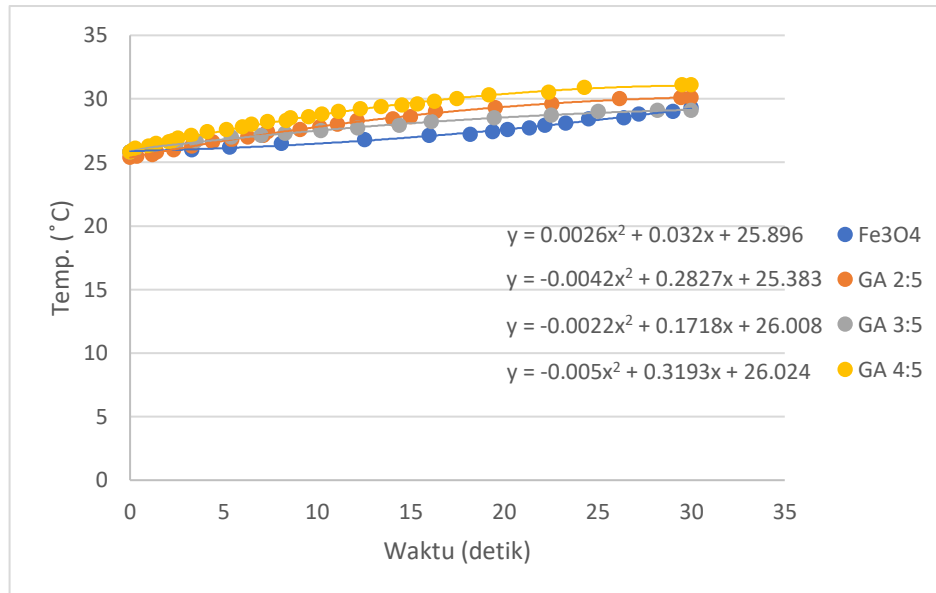
Ferrofluid dibuat untuk masing-masing sampel dengan mendispersikan sampel ke dalam air kemudian dikenai medan magnet eksternal untuk melihat respon pemanasan yang terjadi. Respon pemanasan diukur pada parameter medan magnet AC yaitu arus 3A dan frekuensi 100-1000Hz. Untuk mencegah aglomerasi antar partikel dilakukan sonikasi untuk semua sampel sebelum pengukuran dimulai. Pada penelitian ini dilakukan pengujian medan magnet AC dengan variasi frekuensi pada nanopartikel Fe_3O_4 yang tidak dilapisi surfaktan dan didapat hasil (Gambar 4.8) bahwa kenaikan temperatur yang paling cepat dan mencapai temperatur paling tinggi yaitu pada frekuensi 1000 Hz. Hal tersebut terjadi karena frekuensi medan magnet bergantung pada relaksasi spin magnetik dari nanopartikel superparamagnetik. Waktu relaksasi juga di korelasikan dengan anisotropi, peningkatan anisotropi menghasilkan peningkatan waktu relaksasi sehingga memungkinkan penggunaan frekuensi medan magnet yang lebih rendah. Telah ditemukan bahwa partikel oksida besi kubik domain tunggal mempunyai pemanasan magnetik yang unggul serta efisien dibandingkan dengan partikel spherical lain dengan ukuran yang sama. Menggunakan simulasi Monte Carlo, pada tingkat atom partikel kubik dilaporkan memiliki anisotropi permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan partikel yang berbentuk bola (*spherical*). Hasil tersebut menunjukkan peran yang menguntungkan dari anisotropi permukaan dalam peningkatan pemanasan dan juga menunjukkan pentingnya kualitas struktur kristal serta ikatan permukaan pada sifat magnetik nanopartikel superparamagnetik (Obaidat et al., 2014).



Gambar 4.9 Kurva pengaruh variasi frekuensi medan magnet AC terhadap respon pemanasan dari nanopartikel Fe_3O_4 murni

Selanjutnya uji respon pemanasan dilakukan dengan menggunakan medan magnet DC dengan arus 3A dan tegangan 0.6V selama 30 menit untuk setiap sampel. Didapat hasil pengaruh konsentrasi GA terhadap kenaikan temperatur pemanasan yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Dapat dilihat bahwa dengan peningkatan konsentrasi GA nilai SAR cenderung menurun. Dari data yang telah diperoleh dapat diketahui efisiensi pemanasan SPIONs yang dinyatakan dalam bentuk SAR ditunjukkan pada Tabel 4.9. Nilai SAR dari sampel nanopartikel Fe_3O_4 yang tidak dilapisi surfaktan lebih tinggi dibandingkan dengan yang dilapisi surfaktan GA dengan konsentrasi 2:5, 3:5 dan 4:5 karena magnetisasi yang diperoleh lebih tinggi. Fenomena menurunnya nilai SAR ini berkaitan dengan nilai magnetisasi yang mana memiliki

korelasi dengan peningkatan konsentrasi surfaktan yang mengurangi gerakan Brownian dari partikel, sifat hidrofobisitas yang dimiliki oleh partikel (semakin hidrofilik, nilai magnetisasi semakin tinggi), serta banyaknya arus yang dikenai pada partikel (Rajan et al., 2020). Sampel nanopartikel Fe_3O_4 murni memiliki nilai SAR yang paling tinggi dikarenakan memiliki sifat hidrofilik yang paling baik sehingga arus yang masuk lebih mudah diterima oleh nanopartikel Fe_3O_4 . Sedangkan seiring peningkatan konsentrasi GA maka mengurangi gerakan Brownian dan sifat hidrofilik juga semakin berkurang, sehingga menyebabkan arus yang dipaparkan terhambat dan membuat nilai SAR semakin menurun.



Gambar 4.10 Kurva pengaruh penambahan GA pada nanopartikel Fe_3O_4 terhadap respon pemanasan

Tabel 4.9 Nilai SAR dan temperatur akhir yang diperoleh

Sampel	SAR (W/mg)	Temperatur akhir (°C)
Fe_3O_4	155.61	29.3
Fe_3O_4 + GA (2:5)	81.83	30.1
Fe_3O_4 + GA (3:5)	56.62	29.1
Fe_3O_4 + GA (4:5)	27.43	31.1

Dari seluruh hasil pengujian yang telah diperoleh dapat dikatakan bahwa secara garis besar sintesis fluida nanopartikel Fe_3O_4 pada penelitian ini apabila diaplikasikan untuk terapi hipertermia masih perlu dikaji ulang. Hal ini dikarenakan masih ada beberapa parameter standar terapi hipertermia yang masih belum dapat terpenuhi pada penelitian ini. Pada Tabel 4.10 berikut merupakan target properties untuk terapi hipertermia.

Tabel 4.10 Hasil sintesis fluida nanopartikel Fe₃O₄ untuk aplikasi terapi hipertermia

Sampel	Parameter							
	Ukuran partikel (nm)	Stuktur kristal	Morfologi	Sifat magnetik	Hc (kOe)	Arus (A)	Temp. (°C)	SAR (W/mg)
Fe ₃ O ₄	58,77	Kubik	Irregular	superpara magnetik	20.190	3	29,3	155,61
Fe ₃ O ₄ + GA (2:5)	164,2	Kubik	Irregular	superpara magnetik	20.137	3	30,1	81,83
Fe ₃ O ₄ + GA (3:5)	615,1	Kubik	-	superpara magnetik	20.135	3	29,1	56,62
Fe ₃ O ₄ + GA (4:5)	955,4	Kubik	-	superpara magnetik	20.132	3	31,1	27,43

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Pengaruh konsentrasi surfaktan GA terhadap nanopartikel Fe_3O_4 mempengaruhi peningkatan ukuran kristal dan ukuran partikel yaitu dengan ukuran kristal sebesar 8.98-9.83 nm dan ukuran partikel sebesar 58.77-955.4 nm. Penambahan surfaktan GA tidak mempengaruhi perubahan pada struktur kristal, dimana struktur yang terbentuk yaitu kubik dengan morfologi irregular.
2. Nanopartikel Fe_3O_4 telah terbukti memiliki sifat superparamagnetik. Nilai magnetisasi saturasi tertinggi dimiliki oleh nanopartikel Fe_3O_4 murni yaitu sebesar 39.31 emu/g serta nilai koersivitas-nya yaitu 20,190 kOe.
3. Penambahan konsentrasi surfaktan GA pada nanopartikel Fe_3O_4 memiliki pengaruh terhadap dispersitas saat pembentukan fluida nanopartikel Fe_3O_4 superparamagnetik. Hal tersebut dibuktikan dengan sifat hidrofilik yang dimiliki oleh nanopartikel Fe_3O_4 sehingga dapat mengurangi tegangan permukaan serta dapat terdispersi ke dalam cairan pembawa air.
4. Peningkatan konsentrasi surfaktan GA pada nanopartikel Fe_3O_4 mempengaruhi penurunan terhadap nilai magnetisasi serta nilai SAR. Nilai terendah SAR dimiliki oleh sampel Fe_3O_4 + GA 4:5 yaitu sebesar 27,43 /mg, sedangkan nilai tertinggi SAR didapatkan oleh sampel Fe_3O_4 murni yaitu sebesar 155,61 W/mg.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah:

1. Dilakukan peninjauan ulang terhadap penambahan surfaktan ke dalam larutan saat proses sintesis nanopartikel berlangsung
2. Dilakukan pengujian *Transmission Electron Microscope* (TEM) untuk mencitrakan struktur dan ukuran partikel dalam resolusi yang lebih tinggi
3. Diperlukan instrument generator AC yang lebih terintegritas
4. Dilakukan peninjauan ulang terhadap parameter aplikasi terapi hipertermia agar dapat memenuhi target yang diinginkan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abarca-Cabrera, L., Fraga-García, P., & Berensmeier, S. (2021). Bio-nano interactions: binding proteins, polysaccharides, lipids and nucleic acids onto magnetic nanoparticles. *Biomaterials Research*, 25(1), 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40824-021-00212-y>
- Akbarzadeh, A., Samiei, M., & Davaran, S. (2012). Magnetic nanoparticles: Preparation, physical properties, and applications in biomedicine. *Nanoscale Research Letters*, 7, 1–13. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-144>
- Alam, D., Yadav, L., Gopi Nath, D., Bhora, B., Purushotham, M., & Kanna, R. (2017). Determining Surface Tension of Different Fluids with The Help of Tensiometer. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 6(4), 42–45.
- Ali, A., Zafar, H., Zia, M., ul Haq, I., Phull, A. R., Ali, J. S., & Hussain, A. (2016). Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles. In *Nanotechnology, Science and Applications* (Vol. 9, pp. 49–67). Dove Medical Press Ltd. <https://doi.org/10.2147/NSA.S99986>
- Ansari, S. A. M. K., Ficiarà, E., Ruffinatti, F. A., Stura, I., Argenziano, M., Abollino, O., Cavalli, R., Guiot, C., & D'Agata, F. (2019). Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis, characterization and functionalization for biomedical applications in the Central Nervous System. In *Materials* (Vol. 12, Issue 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma12030465>
- Araújo-Neto, R. P., Silva-Freitas, E. L., Carvalho, J. F., Pontes, T. R. F., Silva, K. L., Damasceno, I. H. M., Egito, E. S. T., Dantas, A. L., Morales, M. A., & Carriço, A. S. (2014). Monodisperse sodium oleate coated magnetite high susceptibility nanoparticles for hyperthermia applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 364, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.04.001>
- Assadi, Y. (2012). 2.10 – Dispersive Liquid–Liquid Microextraction. *Comprehensive Sampling and Sample Preparation: Analytical Techniques for Scientists*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381373-2.10051-1>
- Benz, M. (2012). *Superparamagnetism : Theory and Applications-Discussion of Two Papers on Magnetic Nanoparticles*.
- Boyer, M., Townsend, L. E., Vogel, L. M., Falk, J., Reitz-Vick, D., Trevor, K. T., Villalba, M., Bendick, P. J., Glover, J. L., & Oak, R. (1997). Isolation of endothelial cells and their progenitor cells from human peripheral blood. In *Cardiovascular Surgery*.
- Burnham, P., Dollahon, N., Li, C. H., Viescas, A. J., & Papaefthymiou, G. C. (2013). Magnetization and Specific Absorption Rate Studies of Ball-Milled Iron Oxide Nanoparticles for Biomedicine. *Journal of Nanoparticles*, 2013, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2013/181820>
- Fang, J. I., Wang, W., & Zhao, S. (n.d.). *F Fabrication of 3D Microfluidic Channels Fabrication of 3D Microfluidic Structures*.
- Hakim, L. (2008). *Kontrol Ukuran dan Dispersitas Nanopartikel Besi Oksida*. Universitas Indonesia.
- Hangi, M., Bahiraei, M., & Rahbari, A. (2018). Forced convection of a temperature-sensitive ferrofluid in presence of magnetic field of electrical current-carrying wire: A two-phase approach. *Advanced Powder Technology*, 29(9), 2168–2175. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.05.026>
- Hoffschmidt, B., Alexopoulos, S., Götsche, J., Sauerborn, M., & Kaufhold, O. (2012). High concentration solar collectors. In *Comprehensive Renewable Energy* (Vol. 3, pp. 165–209). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00306-1>
- Jun, Y. W., Huh, Y. M., Choi, J. S., Lee, J. H., Song, H. T., Kim, S., Yoon, S., Kim, K. S., Shin, J. S., Suh, J. S., & Cheon, J. (2005). Nanoscale Size Effect of Magnetic Nanocrystals and

- Their Utilization for Cancer Diagnosis via Magnetic Resonance Imaging. *Journal of the American Chemical Society*, 127(16), 5732–5733. <https://doi.org/10.1021/ja0422155>
- Lastovina, T. A., Budnyk, A. P., Soldatov, M. A., Rusalev, Y. v., Guda, A. A., Bogdan, A. S., & Soldatov, A. v. (2017). Microwave-assisted synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles in oleylamine–oleic acid solutions. *Mendeleev Communications*, 27(5), 487–489. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2017.09.019>
- Latorre, M. (2009). *Applications of Magnetic Nanoparticles in Medicine: Magnetic Fluid Hyperthermia*. <https://www.researchgate.net/publication/26774943>
- Li, Q., Kartikowati, C. W., Horie, S., Ogi, T., Iwaki, T., & Okuyama, K. (2017). Correlation between particle size/domain structure and magnetic properties of highly crystalline Fe₃O₄ nanoparticles. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09897-5>
- Li, X.-M., Xu, G., Liu, Y., & He, T. (2011). *Magnetic Fe₃O₄ Nanoparticles: Synthesis and Application in Water Treatment* (Vol. 1).
- Linh, P. H., Thach, P. Van, Tuan, N. A., Thuan, N. C., Manh, D. H., Phuc, N. X., & Hong, L. Van. (2009). Magnetic fluid based on Fe₃O₄ nanoparticles: Preparation and hyperthermia application. *Journal of Physics: Conference Series*, 187. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/187/1/012069>
- Mashuri, A. (2015). *THE ANALYSIS OF CRYSTAL SIZE, MAGNETIC PROPERTIES AND MICROWAVE ABSORPTION IN X AND KU-BAND MAGNETITE MATERIAL (Fe₃O₄) MADE BY MILLING METHOD WAHYUNI LESTARI NRP 1111 100 703*.
- Mat Latif, W. M. S., Musa, M. S. M., Balakirisnan, A. S. M., & Sulaiman, W. R. W. (2021). The effect of surfactant concentration on nanoparticles surface wettability during wettability alteration of oil-wet carbonate rock. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 15(2), 7993–8002. <https://doi.org/10.15282/jmes.15.2.2021.05.0630>
- Mayer, D., & Mayer, D. (n.d.). *Future of Electrotechnics: Ferrofluids Theory of Electrical Engineering View project Network Theory View project FUTURE OF ELECTROTECHNICS: FERROFLUIDS*. <https://www.researchgate.net/publication/265995103>
- Merdekani, S. (2013). *SINTESIS PARTIKEL NANOKOMPOSIT Fe₃O₄/SiO₂ DENGAN METODE KOPRESIPITASI*.
- Milton J. Rosen, J. T. K. (2012). *SURFACTANTS AND INTERFACIAL PHENOMENA*.
- Mohapatra, J., Xing, M., & Liu, J. P. (2019). Inductive thermal effect of ferrite magnetic nanoparticles. In *Materials* (Vol. 12, Issue 19). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma12193208>
- Mohapatra, J., Zeng, F., Elkins, K., Xing, M., Ghimire, M., Yoon, S., Mishra, S. R., & Liu, J. P. (2018). Size-dependent magnetic and inductive heating properties of Fe₃O₄ nanoparticles: Scaling laws across the superparamagnetic size. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(18), 12879–12887. <https://doi.org/10.1039/c7cp08631h>
- Morozy, P., Jonesz, S. K., & Grayz, B. N. (2002). Magnetically mediated hyperthermia: current status and future directions. *INT. J. HYPERTHERMIA*, 18(4), 284. <https://doi.org/10.1080/0265673011010878>
- Mufid, A. (2016). *SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF COMPOSITE LITHIUM PHOSPHATE FERRO / GRAFITE WITH VARIOUS OF WEIGHT FRACTION GRAFITE BY SOLID STATE METHODS MAGISTER PROGRAM STUDY ON MATERIAL SCIENCES DEPARTMENT OF PHYSICS FACULTY OF MATHEMATIC AND NATURAL SCIENCES INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA 2016*.

- Mujamilah, R. M. R. M. S. P. M. I. M. F. Y. M. E. S. B. M. R. M. R. M. S. P. M. I. M. F. Y. M. E. S. B. M. (2000). *Vibrating Sample Magnetometer (VSM) tipe Oxford VSM1.2H*.
- Nalle, F. C., Wahid, R., Wulandari, I. O., & Sabarudin, A. (2019). Synthesis and characterization of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles using oleic acid as stabilizing agent. *Rasayan Journal of Chemistry*, 12(1), 14–21. <https://doi.org/10.31788/RJC.2019.1214082>
- Nemala, H., Thakur, J. S., Naik, V. M., Vaishnav, P. P., Lawes, G., & Naik, R. (2014). Investigation of magnetic properties of Fe₃O₄ nanoparticles using temperature dependent magnetic hyperthermia in ferrofluids. *Journal of Applied Physics*, 116(3). <https://doi.org/10.1063/1.4890456>
- Neuberger, T., Schöpf, B., Hofmann, H., Hofmann, M., & von Rechenberg, B. (2005). Superparamagnetic nanoparticles for biomedical applications: Possibilities and limitations of a new drug delivery system. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 293(1), 483–496. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.01.064>
- Obaidat, I. M., Issa, B., & Haik, Y. (2014). Magnetic properties of magnetic nanoparticles for efficient hyperthermia. *Nanomaterials*, 5(1), 63–89. <https://doi.org/10.3390/nano5010063>
- Odenbach, S. (2013). Ferrofluids and their applications. *MRS Bulletin*, 38(11), 921–924. <https://doi.org/10.1557/mrs.2013.232>
- Oehlsen, O., Cervantes-Ramírez, S. I., Cervantes-Avilés, P., & Medina-Velo, I. A. (2022). Approaches on Ferrofluid Synthesis and Applications: Current Status and Future Perspectives. *ACS Omega*, 7(4), 3134–3150. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05631>
- Oliveira, P. N., Bini, R. D., Dias, G. S., Alcouffe, P., Santos, I. A., David, L., & Cótica, L. F. (2018). Magnetite nanoparticles with controlled sizes via thermal degradation of optimized PVA/Fe(III) complexes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 460(Iii), 381–390. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.04.005>
- Petcharoen, K., & Sirivat, A. (2012). Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles via the chemical co-precipitation method. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 177(5), 421–427. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2012.01.003>
- Prasetyoko, D., Ayunanda, N., Fansuri, H., Hartanto, D., & Ramli, Z. (2012). Phase transformation of rice husk ash in the synthesis of ZSM-5 without organic template. *ITB Journal of Science*, 44 A(3), 250–262. <https://doi.org/10.5614/itbj.sci.2012.44.3.5>
- Pratama, O. I., & Izzati, R. F. (2017). *SINTESIS Fe₃O₄ DENGAN METODE ELEKTROKIMIA SEBAGAI ELEKTROKATALIS PADA METAL-AIR BATTERIES*. INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER.
- Putri, N. A. E. (2020). *ANALISIS SIFAT SUPERHIDROFOBIAK-SUPEROLEOFILIK PADA MODIFIKASI MATERIAL SPONS POLYURETHANE SEBAGAI PEMISAH MINYAK DAN AIR SECARA SELEKTIF*.
- Rahmayanti, M. (2020). SINTESIS DAN KARAKTERISASI MAGNETIT (Fe₃O₄): STUDI KOMPARASI METODE KONVENSIONAL DAN METODE SONOKIMIA. In *Al Ulum Sains dan Teknologi* (Vol. 6, Issue 1).
- Rajan, A., Sharma, M., & Sahu, N. K. (2020). Assessing magnetic and inductive thermal properties of various surfactants functionalised Fe₃O₄ nanoparticles for hyperthermia. *Scientific Reports*, 10(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71703-6>
- Reeves, D. B., & Weaver, J. B. (2014). Approaches for modeling magnetic nanoparticle dynamics. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 42(1), 85–93. <https://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.2014010845>
- Rodríguez-López, A., Cruz-Rivera, J. J., Elías-Alfaro, C. G., Betancourt, I., Ruiz-Silva, H., & Antaño-López, R. (2015). Fine tuning of magnetite nanoparticle size distribution using dissymmetric potential pulses in the presence of biocompatible surfactants and the

- electrochemical characterization of the nanoparticles. *Materials Science and Engineering C*, 46, 538–547. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.10.052>
- Saragi, T., Depi, B. L., Butarbutar, S., Permana, B., & Risdiana. (2018). The impact of synthesis temperature on magnetite nanoparticles size synthesized by co-precipitation method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1013(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1013/1/012190>
- Savitha, S., Iyengar, S. S., Ananthamurthy, S., & Bhattacharya, S. (2018). Studying effect of carrier fluid viscosity in magnetite based ferrofluids using optical tweezers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 310(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012098>
- Schwaminger, S. P., Blank-Shim, S. A., Scheifele, I., Fraga-García, P., & Berensmeier, S. (2017). Peptide binding to metal oxide nanoparticles. *Faraday Discussions*, 204, 233–250. <https://doi.org/10.1039/c7fd00105c>
- Soares, P. I. P., Lochte, F., Echeverria, C., Pereira, L. C. J., T Coutinho, J., Ferreira, I. M. M., Novo, C. M. M., & Borges, J. P. M. R. (2015). Thermal and magnetic properties of iron oxide colloids: Influence of surfactants. *Nanotechnology*, 26(42). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/42/425704>
- Song, C., Sun, W., Xiao, Y., & Shi, X. (2019). Ultrasmall iron oxide nanoparticles: synthesis, surface modification, assembly, and biomedical applications. In *Drug Discovery Today* (Vol. 24, Issue 3, pp. 835–844). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2019.01.001>
- Teja, A. S., & Koh, P. Y. (2009). Synthesis, properties, and applications of magnetic iron oxide nanoparticles. In *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials* (Vol. 55, Issues 1–2, pp. 22–45). <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2008.08.003>
- Tommy Hasan Abadi, M., & Mufti, N. (n.d.). *SEMINAR NASIONAL FISIKA DAN PEMBELAJARANNYA 2017 SPECIFIC ABSORPTION RATE (SAR) PADA PARTIKEL NANO FE 3 O 4 DALAM MEDAN MAGNET AC*.
- Tropis Perkotaan Samsurizal, D., Pratama Putera, R., Studi Teknik Elektro, P., Tinggi Teknik -PLN, S., Barat, J., & Jakarta, D. (2018). Samsurizal 1 , Rizki Pratama Putera 1. *Christiono / Jurnal Ilmiah Setrum*, 7(2), 288–295.
- Turganbay, S., Aidarova, S. B., Bekturganova, N. E., Li, C. S., Musabekov, K. B., Kumargalieva, S. S., & Toshtay, K. (2012). Nanoparticles of sulfur as fungicidal products for agriculture. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 14(4), 313–319. <https://doi.org/10.18321/ectj128>
- Vékás, L. (2007). *FERROFLUIDS Synthesis, properties and applications “New magnetic materials and their applications.”*
- Wallyn, J., Anton, N., & Vandamme, T. F. (2019). Synthesis, principles, and properties of magnetite nanoparticles for in vivo imaging applications—A review. In *Pharmaceutics* (Vol. 11, Issue 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11110601>
- Widyastuti, H. A. H. P. R. M. Q. (2019). *Buku Karakterisasi Material 2020* (1st ed.). ITS Press.
- Wu, W., Jiang, C. Z., & Roy, V. A. L. (2016). Designed synthesis and surface engineering strategies of magnetic iron oxide nanoparticles for biomedical applications. *Nanoscale*, 8(47), 19421–19474. <https://doi.org/10.1039/c6nr07542h>
- Wulandari, I. O., Santjojo, D. J. D. H., Shobirin, R. A., & Sabarudin, A. (2017). Characteristics and magnetic properties of chitosan-coated Fe₃O₄ nanoparticles prepared by ex-situ co-precipitation method. *Rasayan Journal of Chemistry*, 10(4), 1348–1358. <https://doi.org/10.7324/RJC.2017.1041907>
- Zahn, M. (2001). Magnetic fluid and nanoparticle applications to nanotechnology. In *Journal of Nanoparticle Research* (Vol. 3).

Zirak, M. B., & Pezeshki, A. (2015). Effect of Surfactant Concentration on the Particle Size, Stability and Potential Zeta of Beta carotene Nano Lipid Carrier. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 4(9), 924–932.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1

Hasil ICCD 01-089-3854

Name and formula

Reference code:	01-089-3854
Mineral name:	Magnetite, syn
Compound name:	Iron Oxide
Common name:	Iron diiron(III) oxide
ICSD name:	Iron Oxide
Empirical formula:	Fe ₃ O ₄
Chemical formula:	Fe ₃ O ₄

Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	Fd-3m
Space group number:	227
a (Å):	8.3940
b (Å):	8.3940
c (Å):	8.3940
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Calculated density (g/cm ³):	5.20
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	591.43
Z:	8.00
RIR:	4.99

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
Corrosion
ICSD Pattern
Inorganic
Mineral

Quality: Calculated (C)

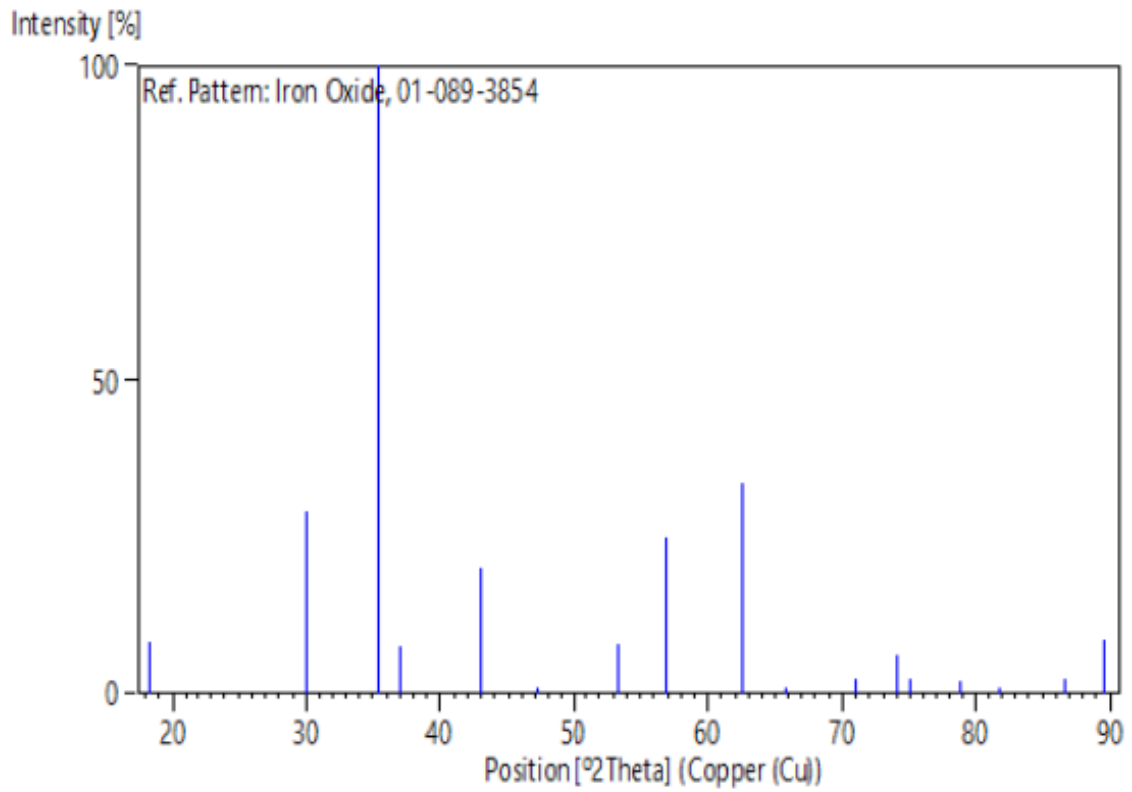
Comments

ICSD collection code: 044525
Creation Date: 1/1/1970
Modification Date: 1/1/1970
ICSD Collection Code: 044525
Calculated Pattern Original Remarks: REM M PDF 00-019-0629
Test from ICSD: No R value given
Test from ICSD: At least one TF missing
Additional Patterns: See PDF 01-082-1533 and PDF 01-089-0688. X-ray diffraction and magnetic measurements of the Fe-Cr spinels. e d a (FD3-MS). AB2X4.

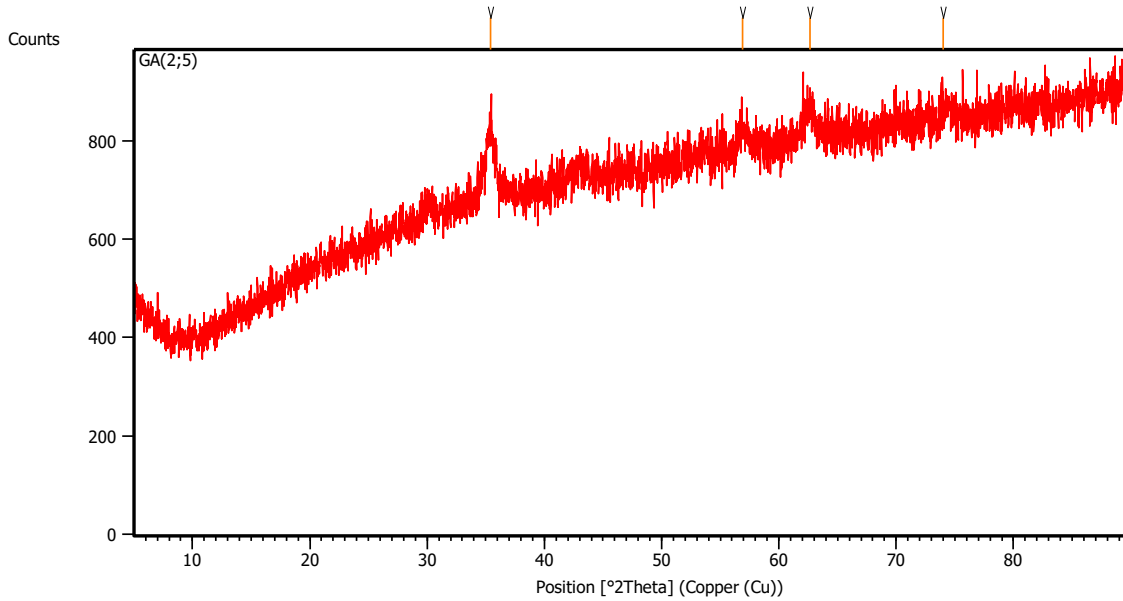
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	4.84628	18.292	8.1
2	2	2	0	2.96773	30.088	28.9
3	3	1	1	2.53089	35.439	100.0
4	2	2	2	2.42314	37.071	7.5
5	4	0	0	2.09850	43.070	20.1
6	3	3	1	1.92572	47.157	0.9
7	4	2	2	1.71342	53.432	8.0
8	5	1	1	1.61543	56.958	24.8
9	4	4	0	1.48386	62.546	33.4
10	5	3	1	1.41884	65.764	0.7
11	6	2	0	1.32721	70.956	2.5
12	5	3	3	1.28007	73.993	6.0
13	6	2	2	1.26544	74.994	2.4
14	4	4	4	1.21157	78.957	2.0
15	7	1	1	1.17540	81.893	0.3
16	6	4	2	1.12170	86.743	2.2
17	7	3	1	1.09281	89.640	8.4

Stick Pattern



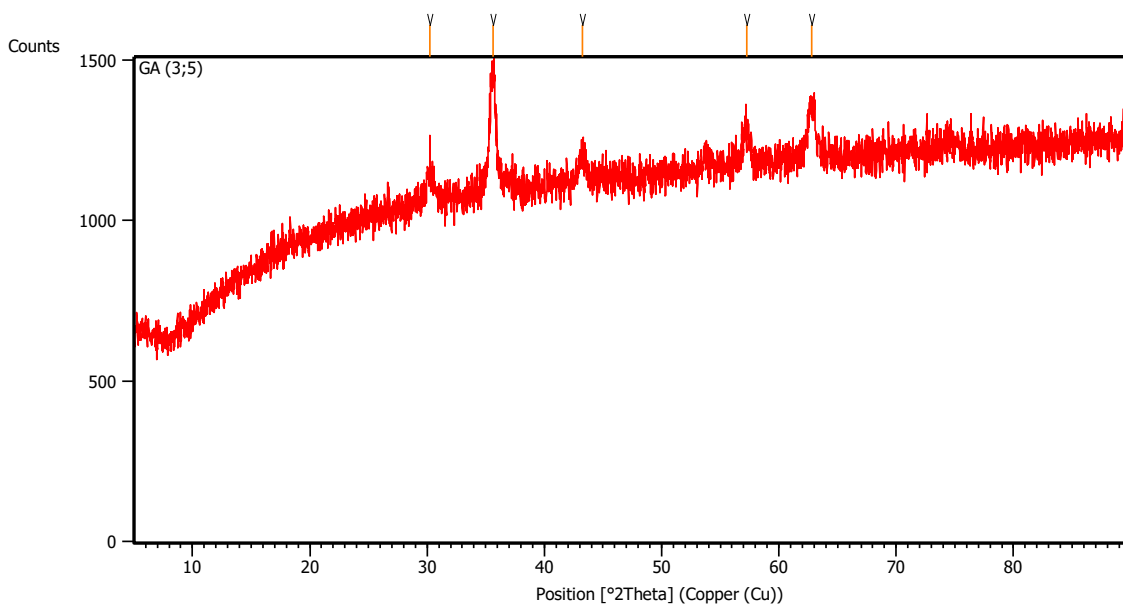
Lampiran 2
Hasil XRD Fe₃O₄ + GA 2:5



Peak List

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
35.4040	140.26	0.5353	2.53542	100.00
56.9005	36.82	0.8029	1.61827	26.25
62.6703	54.77	0.6691	1.48245	39.05
74.0173	26.82	0.9368	1.28076	19.12

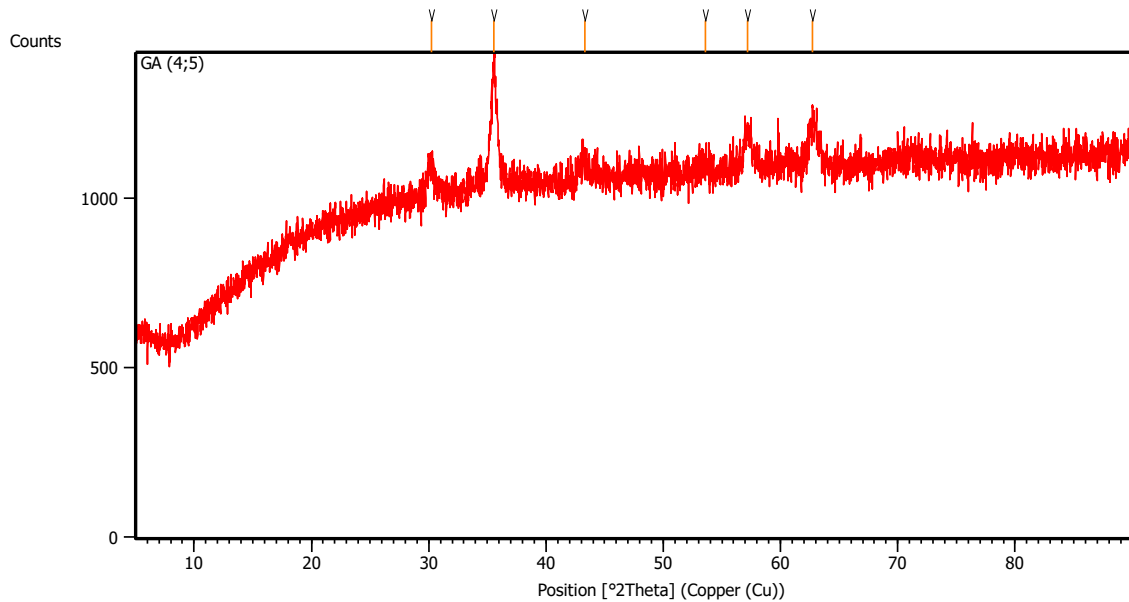
Hasil XRD Fe₃O₄ + GA 3:5



Peak List

Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
30.2450	112.47	0.4015	2.95510	32.64
35.6110	344.55	0.4684	2.52116	100.00
43.2642	76.18	0.5353	2.09127	22.11
57.2257	107.94	0.5353	1.60984	31.33
62.8055	155.50	0.6691	1.47958	45.13

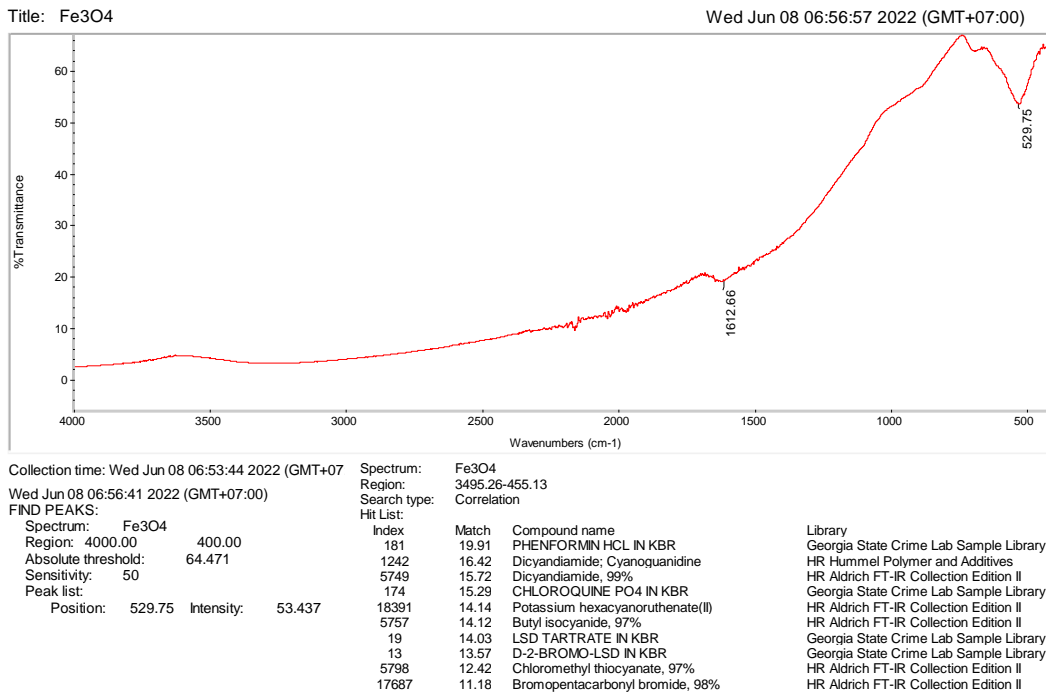
Hasil XRD Fe_3O_4 + GA 4:5



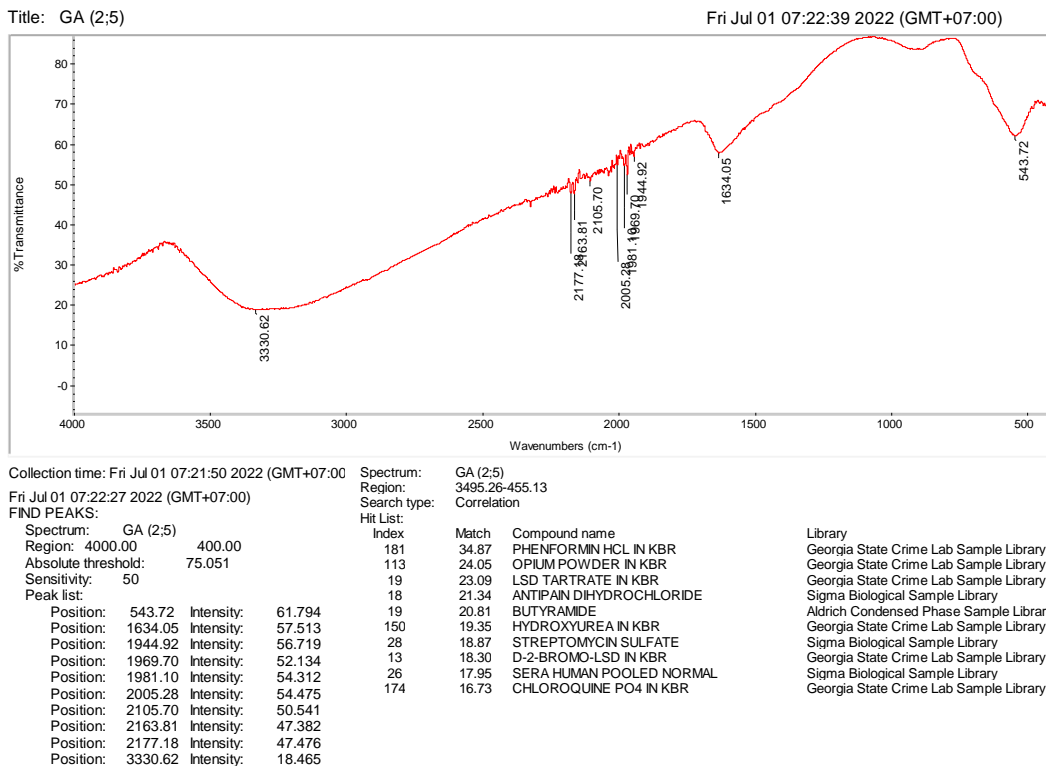
Peal List

Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
30.2712	92.78	0.4684	2.95260	26.31
35.5725	352.59	0.2342	2.52380	100.00
43.2874	56.15	0.8029	2.09020	15.93
53.5999	36.20	0.8029	1.70986	10.27
57.1739	96.63	0.5353	1.61118	27.41
62.7054	136.20	0.4684	1.48170	38.63

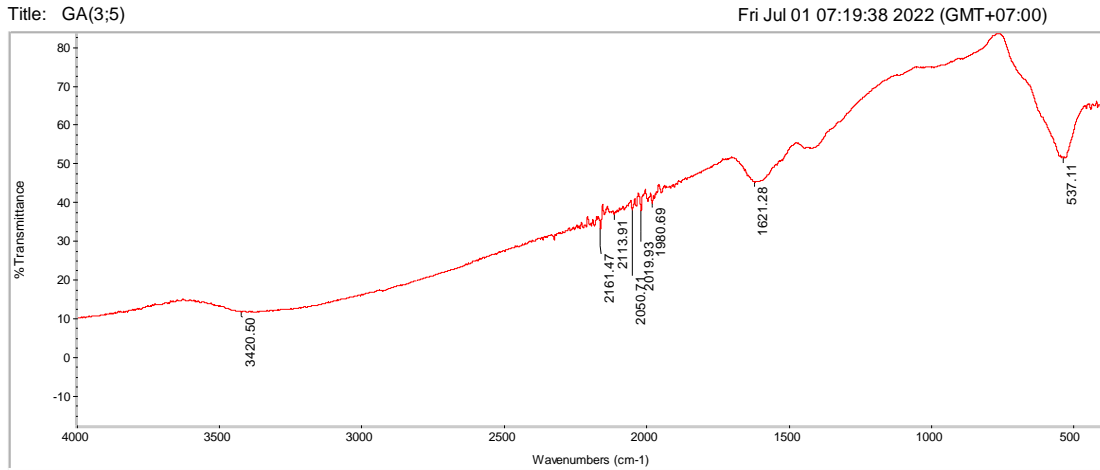
Lampiran 3
Hasil FTIR Fe₃O₄



Hasil XRD Fe₃O₄ + GA 2:5



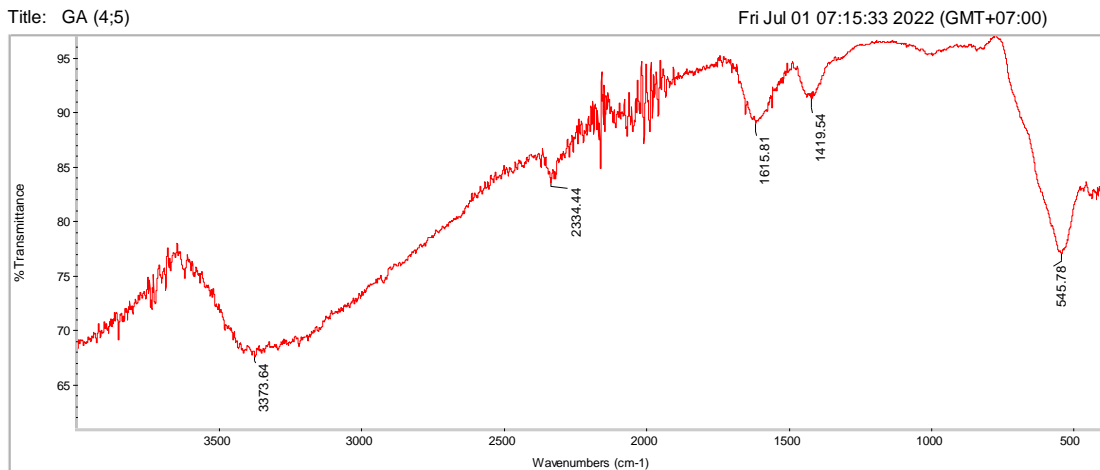
Hasil XRD Fe₃O₄ + GA 3:5



Collection time: Fri Jul 01 07:16:56 2022 (GMT+07:00) Spectrum: GA(3;5)
 Fri Jul 01 07:19:25 2022 (GMT+07:00) Region: 3495.26-455.13
 FIND PEAKS: Search type: Correlation

Position	Intensity	Index	Match	Compound name	Library
4000.00	400.00	181	23.04	PHENFORMIN HCL IN KBR	Georgia State Crime Lab Sample Library
Absolute threshold: 58.386		174	20.46	CHLOROQUINE PO4 IN KBR	Georgia State Crime Lab Sample Library
Sensitivity: 50		113	16.95	OPIUM POWDER IN KBR	Georgia State Crime Lab Sample Library
Peak list:		42	15.82	THIAZOLIDINE, 97%	Aldrich Vapor Phase Sample Library
Position: 537.11	Intensity: 51.222	13	15.69	D-2-BROMO-LSD IN KBR	Georgia State Crime Lab Sample Library
Position: 1621.28	Intensity: 44.957	112	15.00	ERYTHROMYCIN STEARATE IN KBR	Georgia State Crime Lab Sample Library
Position: 1980.69	Intensity: 39.588	19	14.87	LSD TARTRATE IN KBR	Georgia State Crime Lab Sample Library
Position: 2050.71	Intensity: 37.533	109	14.67	SUCROSE IN KBR	Georgia State Crime Lab Sample Library
Position: 2161.47	Intensity: 37.669	5795	14.59	Methyl thiocyanate, 99%	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
Position: 2113.91	Intensity: 36.517	17661	13.84	Dicarbonylcyclopentadienyl(dimethylsulfoniummethylidene)iron tetrafluoroborate, 98	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
Position: 3420.50	Intensity: 11.340				

Hasil XRD Fe₃O₄ + GA 4:5



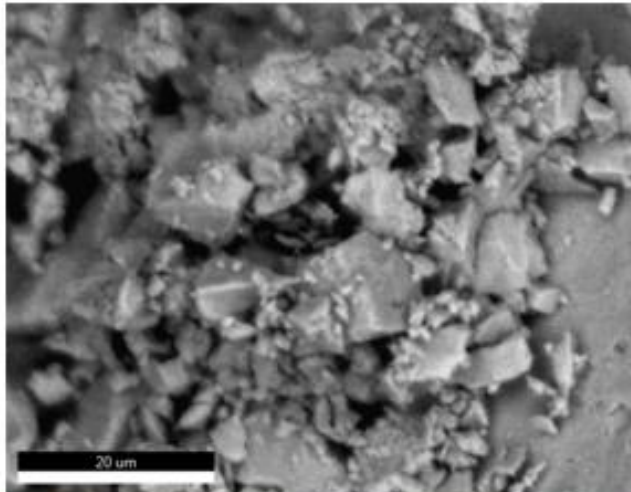
Collection time: Fri Jul 01 07:13:29 2022 (GMT+07:00) Spectrum: GA (4;5)
 Fri Jul 01 07:15:10 2022 (GMT+07:00) Region: 3495.26-455.13
 FIND PEAKS: Search type: Correlation

Position	Intensity	Index	Match	Compound name	Library
4000.00	400.00	113	19.80	OPIUM POWDER IN KBR	Georgia State Crime Lab Sample Library
Absolute threshold: 67.715		5795	18.51	Methyl thiocyanate, 99%	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
Sensitivity: 50		181	17.78	PHENFORMIN HCL IN KBR	Georgia State Crime Lab Sample Library
Peak list:		17673	17.67	Dicarbonyldichlorobis(triphenylphosphine)ruthenium(II), 97%	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
Position: 3373.64	Intensity: 67.412	109	17.40	SUCROSE IN KBR	Georgia State Crime Lab Sample Library
		112	15.98	ERYTHROMYCIN STEARATE IN KBR	Georgia State Crime Lab Sample Library
		80	15.94	CHONDROITIN SULFATE GRADE III SOD	Sigma Biological Sample Library
		40	15.13	CELLOPHANE	Hummel Polymer Sample Library
		60	14.90	PENTAZOCINE HCL IN KBR	Georgia State Crime Lab Sample Library
		13	14.64	D-2-BROMO-LSD IN KBR	Georgia State Crime Lab Sample Library

Lampiran 4
Hasil SEM-EDX + mapping sampel Fe_3O_4 + GA 2:5

Sample Name: Fe3O4-GA

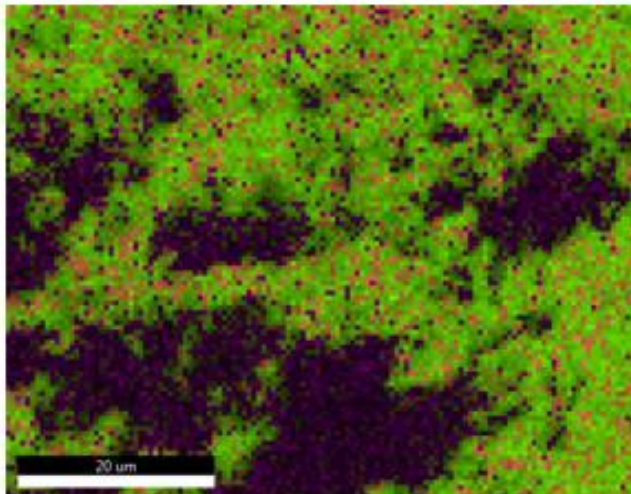
Area 1



Image

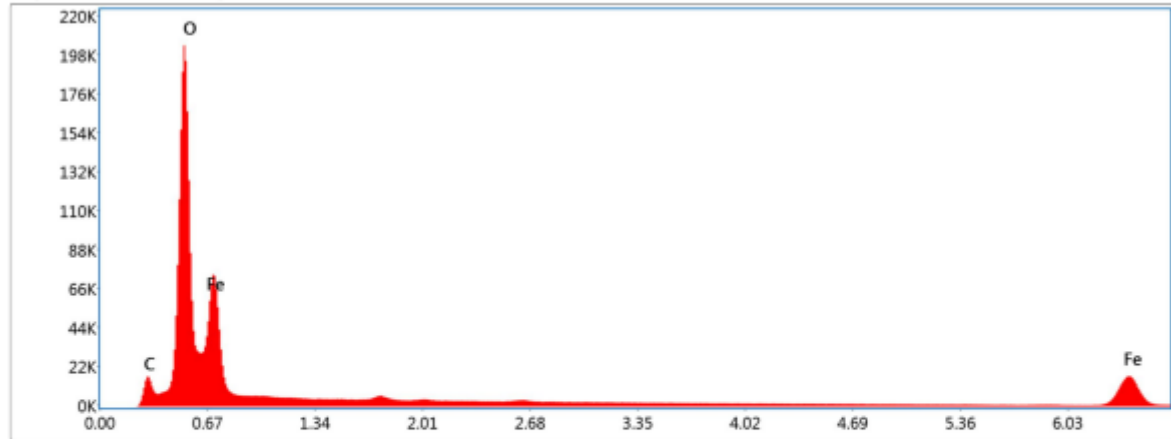
Live Map 1

ElementOverlay



Sum Spectrum

map202206070342187960.spc

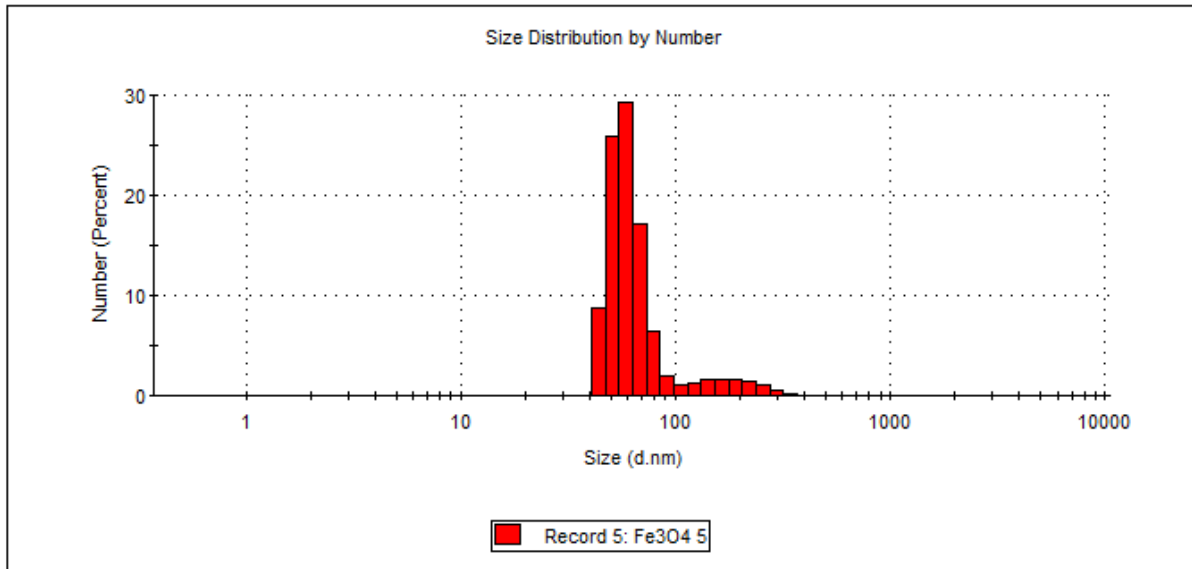


3.665K Cnts 2.640 keV Det: Element-C2B Lock Map/Line Elements

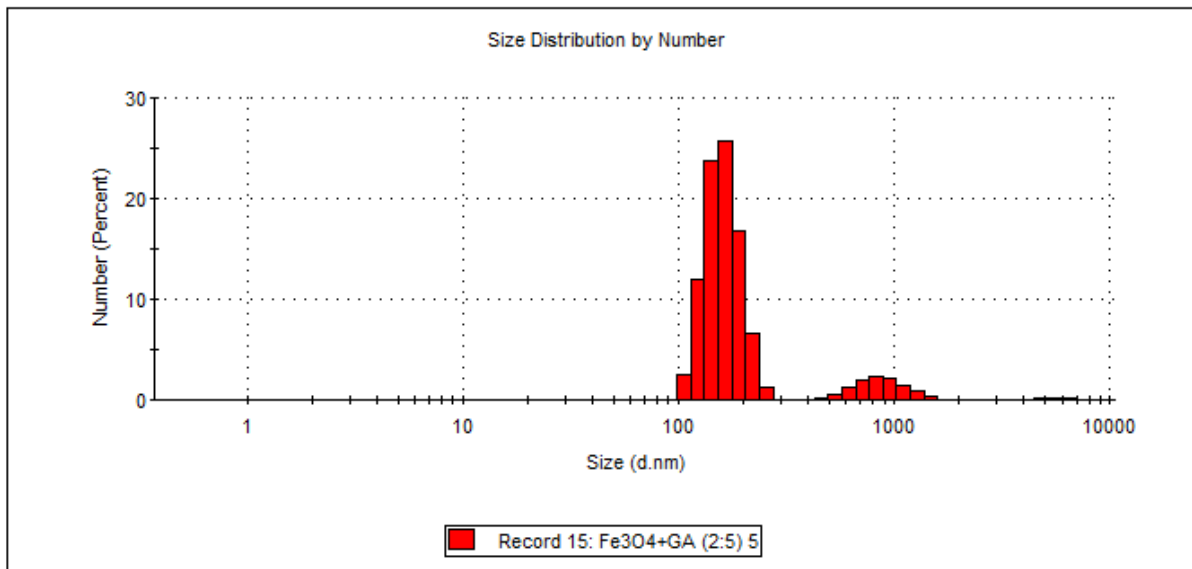
Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	7.17	13.72	544.43	7.82	0.0367	1.1893	0.4300	1.0000
O K	46.91	67.39	7046.90	4.72	0.3800	1.1273	0.7186	1.0000
FeL	45.92	18.90	1412.02	6.28	0.2222	0.8407	0.5755	1.0000

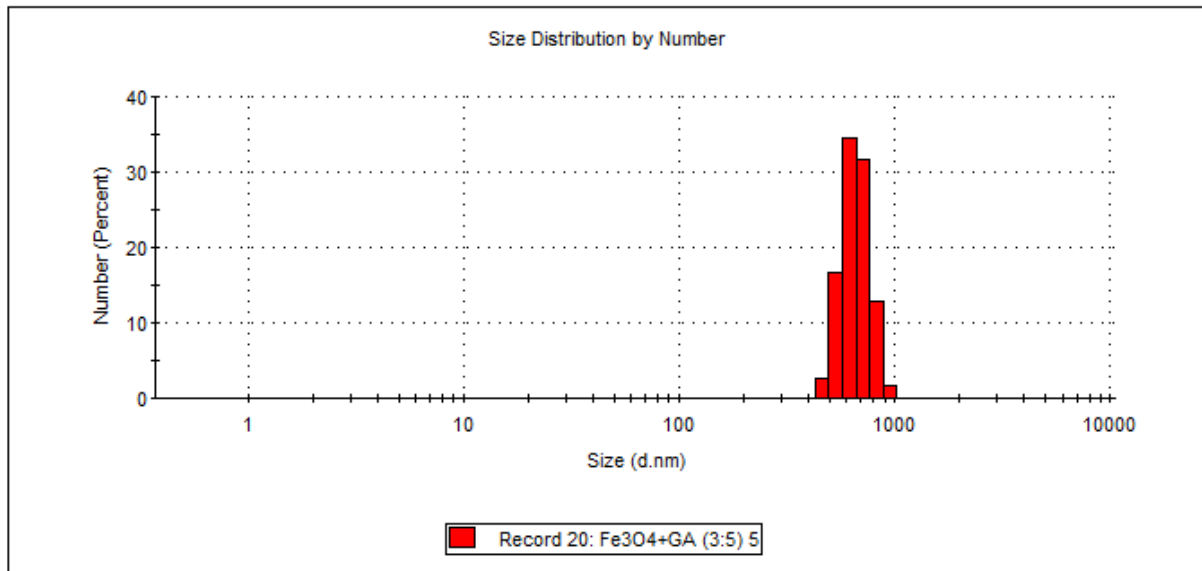
Lampiran 5
Hasil distribusi ukuran partikel sampel Fe_3O_4



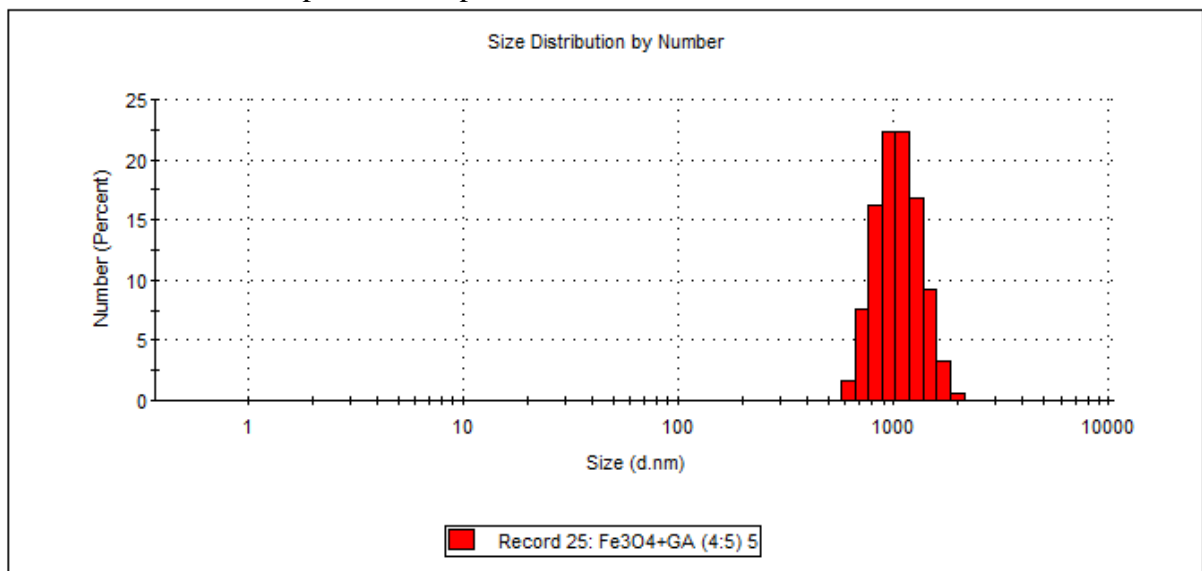
Hasil distribusi ukuran partikel sampel $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{GA}$ 2:5



Hasil distribusi ukuran partikel sampel Fe_3O_4 + GA 3:5



Hasil distribusi ukuran partikel sampel Fe_3O_4 + GA 4:5



Lampiran 6
Hasil pengujian tegangan permukaan

KRÜSS Tensiometer EasyDyne
1434 2504 Fe3O4

Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	08. JUN 2022					
Time	10:46:02					
Id	1					
Method	Ring Method					
Parameters						
Correction	H&J					
Density (g/ml)	0.998					
Stage Speed (%)	25					
Reading limit	5					
St.-Dev. (mN/m)	0.10					
Values for SD.	5					
Acc. of Gravity (m/s^2)	9.807					
No.	Time	Weight	IFT	Avg.	St.-Dev	Temp.
	s	g	mN/m	mN/m	mN/m	degC
1	73	0,9162	70,1			
2	115	0,9147	70,0			
3	159	0,9139	69,9			
4	202	0,9138	69,9			
5	245	0,9133	69,9	69,9	0,09	
Results						
IFT (mN/m)	69.9					
St.-Dev. (mN/m)	0.09					
Temp. (degC)	--					
End						

KRÜSS Tensiometer EasyDyne
1434 2505 Sampel Fe₃O₄ + GA_2_5

Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	08. JUN 2022					
Time	10:52:57					
Id	1					
Method	Ring Method					
Parameters						
Correction	H&J					
Density (g/ml)	0.998					
Stage Speed (%)	25					
Reading limit	5					
St.-Dev. (mN/m)	0.10					
Values for SD.	5					
Acc. of Gravity (m/s ²)	9.807					
No.	Time	Weight	IFT	Avg.	St.-Dev	Temp.
	s	g	mN/m	mN/m	mN/m	degC
1	73	0,9293	71,2			
2	115	0,9295	71,2			
3	157	0,9292	71,2			
4	199	0,9290	71,2			
5	241	0,9287	71,1	71,2	0,03	
Results						
IFT (mN/m)	71.2					
St.-Dev. (mN/m)	0.03					
Temp. (degC)	--					
End						

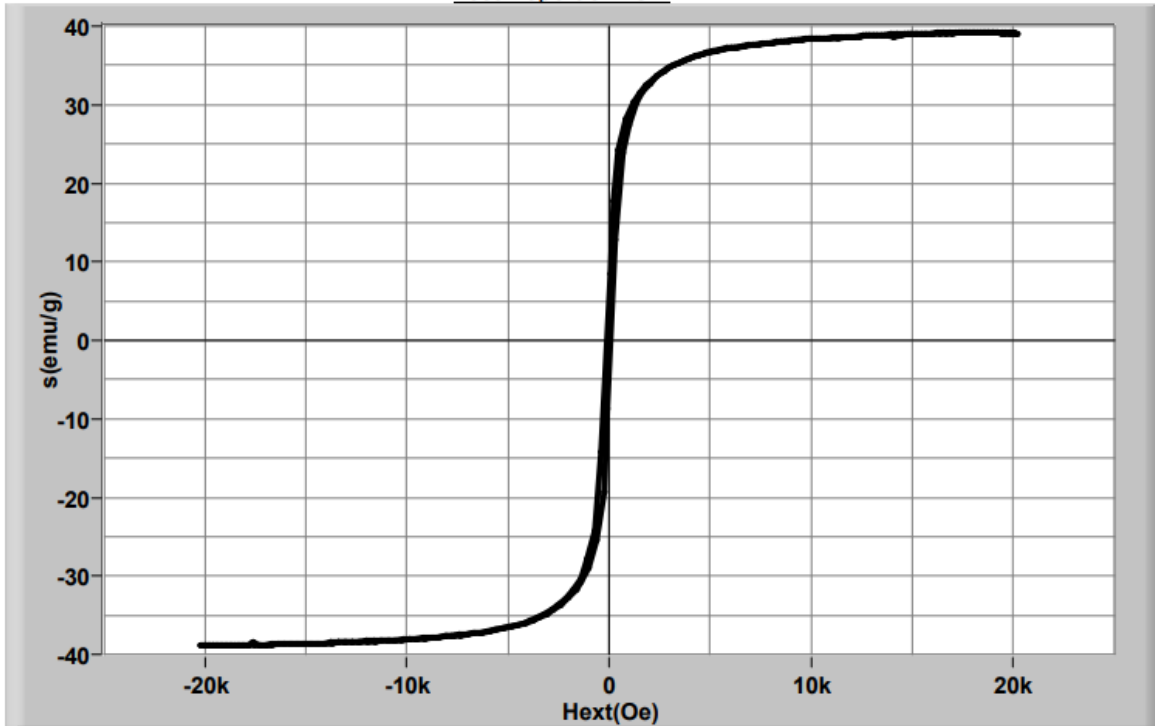
Method	Tear-Off M.						
Parameters							
Correction	H&J						
Density (g/ml)	0.998						
Stage Speed (%)	25						
Acc. of Gravity (m/s ²)	9.807						
No.	Time	Weight	IFT	Avg.	St-Dev	Temp.	
	s	g	mN/m	mN/m	mN/m	degC	
1	59	0,9395	72,0				2803 SIMPLO Putri Safa Teknik Material
Results							
IFT (mN/m)	72.0						
Temp. (degC)	--						
End							
Instrument	K20						
Version	01.23						
Date	22. JUN 2022						
Time	16:04:40						
Id	1						
Method	Tear-Off M.						
Parameters							
Correction	H&J						
Density (g/ml)	0.998						
Stage Speed (%)	25						
Acc. of Gravity (m/s ²)	9.807						
No.	Time	Weight	IFT	Avg.	St-Dev	Temp.	
	s	g	mN/m	mN/m	mN/m	degC	
1	60	0,9388	72,0				2803 DUPLO Putri Safa Teknik Material
Results							
IFT (mN/m)	72.0						
Temp. (degC)	--						
End							

KRÜSS Tensiometer EasyDyne
1434 2507 Sampel Fe₃O₄ + GA _4_5

Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	08. JUN 2022					
Time	11:07:29					
Id	1					
Method	Ring Method					
Parameters						
Correction	H&J					
Density (g/ml)	0.998					
Stage Speed (%)	25					
Reading limit	5					
St.-Dev. (mN/m)	0.10					
Values for SD.	5					
Acc. of Gravity (m/s ²)	9.807					
No.	Time	Weight	IFT	Avg.	St.-Dev	Temp.
	s	g	mN/m	mN/m	mN/m	degC
1	72	0,9303	71,3			
2	114	0,9300	71,2			
3	156	0,9298	71,2			
4	198	0,9299	71,2			
5	240	0,9295	71,2	71,2	0,02	
Results						
IFT (mN/m)	71.2					
St.-Dev. (mN/m)	0.02					
Temp. (degC)	-.-					
End						

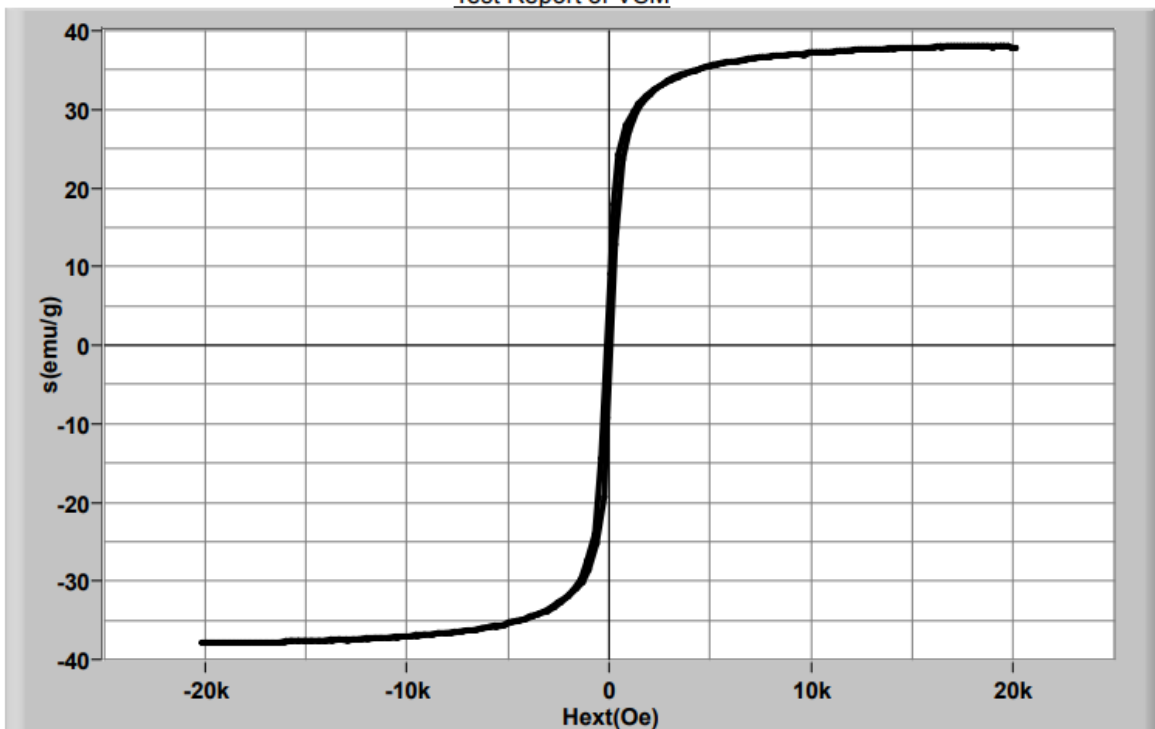
Lampiran 7
Hasil pengujian VSM

Test Report of VSM



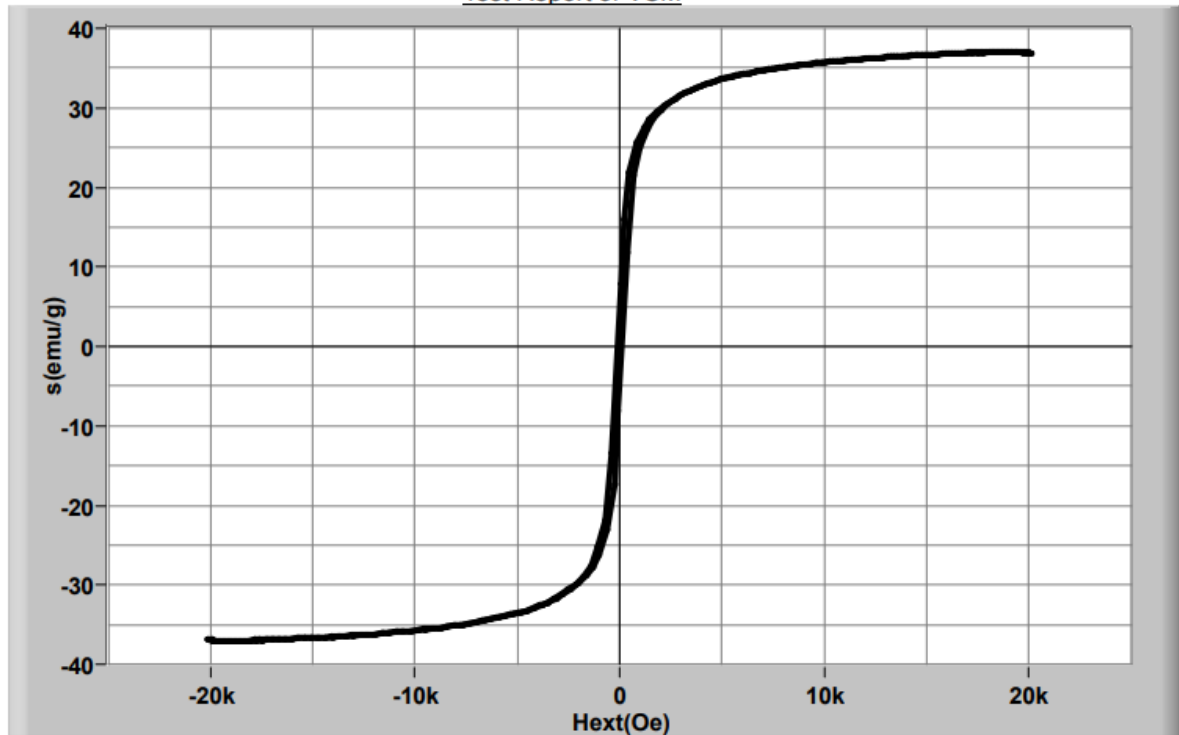
Sample Number: Fe3O4_2	Test Date: 6/30/2022	Test Time: 11:10:50
Hmax=1607 kA/m (20.190 kOe)	Temperature=23.1 ?	Hk(Mr90%)=0 A/m (0.00 Oe)
ss=39.31 Am ² /kg (39.31 emu/g)	sr=3.84 Am ² /kg (3.84 emu/g)	Mr/Ms=0.098
jHc=6.3 kA/m (78.99 Oe)	Loop Area=2.5 (kOe.emu/g)	

Test Report of VSM



Sample Number: Fe3O4 + GA (2;5)_2	Test Date: 6/30/2022	Test Time: 11:46:29
Hmax=1602 kA/m (20.137 kOe)	Temperature=24.2 ?	Hk(Mr90%)=0 A/m (0.00 Oe)
ss=38.10 Am ² /kg (38.10 emu/g)	sr=4.20 Am ² /kg (4.20 emu/g)	Mr/Ms=0.110
jHc=6.6 kA/m (82.51 Oe)	Loop Area=2.5 (kOe.emu/g)	

Test Report of VSM

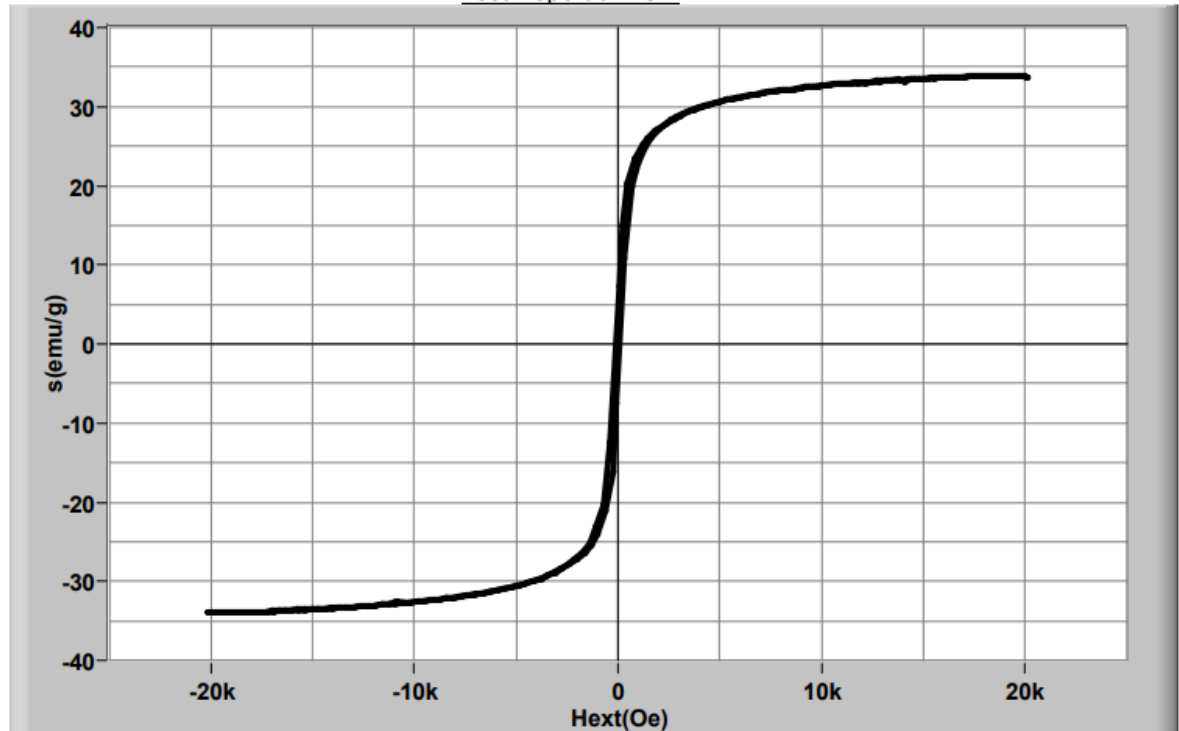


Sample Number: Fe₃O₄ + GA (3;5)_2
Hmax=1602 kA/m (20.135 kOe)
ss=37.06 Am²/kg (37.06 emu/g)
jHc=6.6 kA/m (83.49 Oe)

Test Date: 6/30/2022
Temperature=25.9 ?
sr=3.78 Am²/kg (3.78 emu/g)
Loop Area=2.4 (kOe.emu/g)

Test Time: 14:38:57
Hk(Mr90%)=0 A/m (0.00 Oe)
Mr/Ms=0.102

Test Report of VSM



Sample Number: Fe₃O₄ + GA (4;5)_2
Hmax=1602 kA/m (20.132 kOe)
ss=33.94 Am²/kg (33.94 emu/g)
jHc=6.7 kA/m (84.13 Oe)

Test Date: 6/30/2022
Temperature=24.9 ?
sr=3.58 Am²/kg (3.58 emu/g)
Loop Area=2.3 (kOe.emu/g)

Test Time: 14:55:17
Hk(Mr90%)=0 A/m (0.00 Oe)
Mr/Ms=0.105

Lampiran 8

Perhitungan nilai SAR

$$SAR = C_s \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \cdot \frac{M_{SOL}}{M_{MNPS}}$$

C water	4.187
M sol	5
M mnps	0.88
Msol /Mmnps	5.681818

Fe ₃ O ₄					
time (s)	jumlah s	fulltime	temp. (°C)	T/t	SAR
0	0	0	25.8	0	0
3.34	214	3.3	26	0.000935	0.022233
2.01	120.1	5.34	26.2	0.001665	0.039617
2.34	154	8.1	26.5	0.001948	0.046344
4.44	284	12.55	26.8	0.001056	0.02513
3.05	180.5	16	27.1	0.001662	0.03954
2.17	137	18.2	27.2	0.00073	0.017365
0.42	42	19.4	27.4	0.004762	0.113285
1.14	74	20.18	27.6	0.002703	0.064297
1.17	77	21.35	27.7	0.001299	0.030896
0.41	41	22.18	27.9	0.004878	0.116048
1.1	70	23.29	28.1	0.002857	0.067971
1.23	83	24.52	28.4	0.003614	0.085987
1.47	107	26.4	28.5	0.000935	0.022233
0.4	4	27.2	28.8	0.075	1.784233
1.41	101	29.02	29	0.00198	0.047108
0.58	58	30	29.3	0.005172	0.123051
				Avg.	0.155608
					155.61

GA 2:5					
time (s)	jumlah s	fulltime	temp. (°C)	T/t	SAR
0	0	0	25.4	0	0
0.36	36	0.36	25.5	0.002778	0.066083
0.42	42	1.21	25.6	0.002381	0.056642
0.19	43	1.42	25.8	0.004651	0.11065
0.51	44	2.35	26	0.004545	0.108135
0.53	53	3.3	26.3	0.00566	0.134659
1.11	71	4.42	26.6	0.004225	0.10052
1.01	60.1	5.45	26.8	0.003328	0.079167
0.44	44	6.3	27	0.004545	0.108135
0.41	41	7.12	27.1	0.002439	0.058024
0.22	22	7.35	27.4	0.013636	0.324406
1.34	94	9.1	27.6	0.002128	0.050617
1.03	60.3	10.14	27.8	0.003317	0.078905
0.54	54	11.1	28	0.003704	0.08811
1	60	12.14	28.3	0.005	0.118949
1.5	65	14.05	28.4	0.001538	0.0366
0.54	54	15	28.6	0.003704	0.08811
1.34	94	16.35	29	0.004255	0.101233
3.16	96	19.52	29.3	0.003125	0.074343
3.05	180.5	22.57	29.6	0.001662	0.03954
3.19	199	26.17	30	0.00201	0.047819
3.29	209	29.47	30.1	0.000478	0.011383
0.13	13	30	30.1	0	0
				Avg.	0.081827
					81.83

GA 3:5					
time (s)	jumlah s	fulltime	temp. (°C)	T/t	SAR
0	0	0	25.8	0	0
0.25	25	0.25	26	0.008	0.190318
0.56	56	1.22	26.3	0.005357	0.127445
1.25	85	2.49	26.5	0.002353	0.055976
1.05	60.5	3.55	26.7	0.003306	0.078644
1.44	104	5.42	27	0.002885	0.068624
1.19	79	7.02	27.1	0.001266	0.030114
1.27	87	8.3	27.3	0.002299	0.054689
1.49	109	10.21	27.5	0.001835	0.043651
1.56	116	12.18	27.7	0.001724	0.041017
2.18	138	14.39	27.9	0.001449	0.034478
1.32	92	16.11	28.2	0.003261	0.077575
3.37	217	19.49	28.5	0.001382	0.032889
3.01	180.1	22.53	28.7	0.00111	0.026418
2.11	131	25.05	29	0.00229	0.05448
3.14	194	28.21	29.1	0.000515	0.012263
1.38	98	30	29.1	0	0
				Avg.	0.054622
					54.62

GA 4:5					
time (s)	jumlah s	fulltime	temp. (°C)	T/t	SAR
0	0	0	25.8	0	0
0.18	18	0.18	26	0.011111	0.264331
0.09	0.9	0.29	26.1	0.111111	2.643308
0.29	29	1.01	26.3	0.006897	0.164067
0.36	36	1.4	26.5	0.005556	0.132165
0.25	25	2.07	26.6	0.004	0.095159
0.19	19	2.28	26.7	0.005263	0.125209
0.26	26	2.57	26.9	0.007692	0.182998
0.27	27	3.27	27.1	0.007407	0.176221
0.43	43	4.13	27.4	0.006977	0.165975
1.03	60.3	5.17	27.6	0.003317	0.078905
0.44	44	6.01	27.8	0.004545	0.108135
0.48	48	6.51	28	0.004167	0.099124
0.45	45	7.37	28.2	0.004444	0.105732
0.55	55	8.36	28.3	0.001818	0.043254
0.2	2	8.57	28.5	0.1	2.378977
0.56	56	9.55	28.6	0.001786	0.042482
0.31	31	10.28	28.8	0.006452	0.153482
0.46	46	11.16	29	0.004348	0.103434
1.14	74	12.31	29.2	0.002703	0.064297
1.1	61	13.44	29.4	0.003279	0.077999
1.09	60.9	14.55	29.5	0.001642	0.039064
0.4	4	15.36	29.6	0.025	0.594744
0.51	51	16.29	29.8	0.003922	0.093293
1.2	62	17.49	30	0.003226	0.076741
1.3	63	19.2	30.3	0.004762	0.113285
3.17	197	22.38	30.5	0.001015	0.024152
2.19	139	24.29	30.9	0.002878	0.06846
5.23	323	29.52	31.1	0.000619	0.014731
0.08	0.8	30	31.1	0	0
				Avg.	0.02743
					27.43

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam pengerjaan laporan penelitian tugas akhir berjudul “ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI SURFAKTAN ASAM GLUTAMAT TERHADAP KARAKTERISTIK FLUIDA NANOPARTIKEL Fe_3O_4 SUPERPARAMAGNETIK UNTUK APLIKASI TERAPI HIPERTERMIA” ini, penulis juga mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung hingga laporan ini terselesaikan dengan baik. Diantaranya:

1. Mama, papa dan adik penulis yang selalu mendoakan, memberika motivasi, nasehat dan semangat selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
2. Bu Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si dan Bu Rindang Fajarin, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan banyak ilmu kepada penulis selama pengerjaan tugas akhir.
3. Chrisna Juli Astuti selaku partner tugas akhir penulis yang selalu berjuang, membantu dan selalu bersama dalam suka maupun duka selama penelitian ini.
4. Shafira Marelia Arifa, sahabat penulis sejak SMA yang yang selalu ada saat penulis dalam keadaan susah maupun senang, selalu memberi motivasi, memberikan bantuan dalam banyak hal dan selalu mendoakan untuk kesuksesan bersama.
5. Namirah Shofi Alfianah, sahabat penulis yang selalu mendengarkan keluh kesah, selalu ada saat penulis dalam keadaan apapun baik susah maupun senang, selalu memberi motivasi, memberikan bantuan dalam banyak hal dan selalu mendoakan untuk kesuksesan bersama.
6. Marel, Juli, Leho, Krisna, Aul dan Elsa yang telah banyak membantu dan saling bertukar pikiran dengan penulis selama kuliah, khususnya saat penulisan tugas akhir.
7. Teman-teman serta mas mbak BPH HMMT 2019 dan BPI HMMT 2020 yang telah memberi semangat dan mengisi hari-hari penulis dalam berorganisasi.
8. Bapak dan ibu kos yang telah memberi dukungan dan motivasi selama pengerjaan tugas akhir.
9. Serta seluruh pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Penulis tidak dapat mengungkapkan kata-kata selain terima kasih dan juga mohon maaf sebesar-besarnya atas kurangan, kesalahan dan apapun yang kurang berkenan di hati. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat khususnya di bidang penelitian material.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Putri Safa Ailsa Nugroho. Lahir di Blitar pada tanggal 8 Maret 2000 dan merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di mulai dari SDN Kampungdalem I Tulungagung pada tahun 2006-2010, SDN Latsari Tuban pada tahun 2010-2012, SMPN 3 Tuban pada tahun 2012-2015, SMA Semesta Bilingual Boarding School Semarang pada tahun 2015-2018. Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan pendidikan S-1 di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama berkuliah, penulis juga aktif dalam kegiatan organisasi, yaitu menjadi Wakil Bendahara Umum (BPH HMMT FTI-ITS) pada tahun 2019-2020 dan Bendahara umum (BPI HMMT FTIRS ITS) pada tahun 2020-2021, serta aktif dalam kegiatan pelatihan seperti LKMM Pra TD, LKMW TD, BMS, dan PMO HMMT.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)