

**TUGAS AKHIR – TL184834**

**PENGARUH FUNGSIONALISASI POLIETILEN GLIKOL  
TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL MAGNETIT  
BERSALUT SILIKA SEBAGAI MEDIA PENGOBATAN  
KANKER MELALUI TERAPI HIPERTERMIA**

**LEHONNITA ROTUA LECTIODIVIRANI PAKPAHAN  
NRP. 0251184000098**

Dosen Pembimbing  
**Vania Mitha Pratiwi S.T., M.T.**  
NIP. 198902132020122016  
**Hariyati Purwaningsih S.Si., M.Si.**  
NIP. 197410172006042001

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





**TUGAS AKHIR – TL184834**

**PENGARUH FUNGSIONALISASI POLIETILEN GLIKOL  
TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL MAGNETIT  
BERSALUT SILIKA SEBAGAI MEDIA PENGOBATAN  
KANKER MELALUI TERAPI HIPERTERMIA**

**LEHONNITA ROTUA LECTIODIVIRANI PAKPAHAN  
NRP. 0251184000098**

Dosen Pembimbing  
**Vania Mitha Pratiwi S.T., M.T.**  
NIP. 198902132020122016  
**Hariyati Purwaningsih S.Si., M.Si.**  
NIP. 197410172006042001

**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

# THE EFFECT OF POLYETHYLENE GLYCOL FUNCTIONALIZATION TO THE CHARACTERISTICS OF MAGNETIC NANOPARTICLE COATED SILICA AS A MEDIA CANCER TREATMENT HYPERTHERMIA THERAPY

**LEHONNITA ROTUA LECTIODIVIRANI PAKPAHAN**  
NRP. 0251184000098

Advisor  
**Vania Mitha Pratiwi S.T., M.T.**  
NIP. 198902132020122016  
**Hariyati Purwaningsih S.Si., M.Si.**  
NIP. 197410172006042001

**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

# PENGARUH FUNGSIONALISASI POLIETILEN GLIKOL TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL MAGNETIT BERSALUT SILIKA SEBAGAI MEDIA PENGOBATAN KANKER MELALUI TERAPI HIPERTERMIA

### TUGAS AKHIR

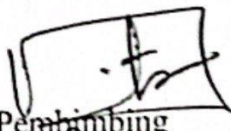
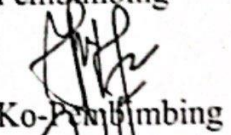
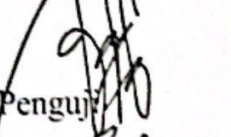

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Teknik Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **LEHONNITA ROTUA LECTIODIVIRANI PAKPAHAN**  
NRP. 0251184000098

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Vania Mitha Pratiwi S.T., M.T
2. Hariyati Purwaningsih S.Si., M.Si
3. Dr. Agung Purniawan S.T., M.Eng
4. Diah Susanti S.T., M.T., PhD



  
Pembimbing  
  
Ko-Pembimbing  
  
Penguji  
  
Penguji

**SURABAYA**  
Juli, 2022

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## APPROVAL SHEET

### THE EFFECT OF POLYETHYLENE GLYCOL FUNCTIONALIZATION TO THE CHARACTERISTICS OF MAGNETIC NANOPARTICLE COATED SILICA AS A MEDIA CANCER TREATMENT HYPERTHERMIA THERAPY

#### FINAL PROJECT

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

By : LEHONNITA ROTUA LECTIODIVIRANI PAKPAHAN  
NRP. 02511840000098

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Vania Mitha Pratiwi S.T., M.T
2. Hariyati Purwaningsih S.Si., M.Si
3. Dr. Agung Purniawan S.T., M.Eng
4. Diah Susanti S.T., M.T., PhD



Advisor  
Co-advisor  
Examiner  
Examinor

SURABAYA  
July, 2022

*(This page is intentionally blank)*

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/ NRP : Lehonita Rotua Lectiodivirani Pakpahan/  
0251184000098

Departemen : Teknik Material dan Metalurgi

Dosen Pembimbing/ NIP : Vania Mitha Pratiwi S.T., M.T./  
198902132020122016

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “PENGARUH FUNGSIONALISASI POLIETILEN GLIKOL TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL MAGNETIT BERSALUT SILIKA SEBAGAI MEDIA PENGOBATAN KANKER MELALUI 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, 7 Juli 2022

Mengetahui  
Dosen Pembimbing



(Vania Mitha Pratiwi S.T., M.T.)  
NIP. 198902132020122016

Mahasiswa



(Lehonita Pakpahan)  
NRP. 0251184000098

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

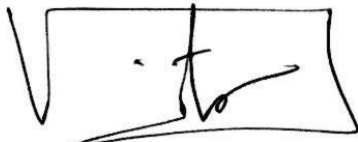
Name of student/NRP : Lehonnita Rotua Lectiodivirani Pakpahan  
Departement : Materials and Metallurgical Engineering  
Advisor/NIP : Vania Pmitha Pratiwi S.T., M.T/  
198902132020122016

Hereby declare that the Final Project with the title of “THE EFFECT OF POLYETHYLENE GLYCOL FUNCTIONALIZATION TO THE CHARACTERISTICS OF MAGNETIC NANOPARTICLE COATED SILICA AS A MEDIA CANCER TREATMENT HYPERTHERMIA THERAPY” 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.

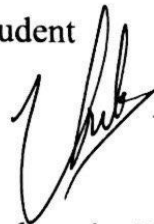
Surabaya, July 7<sup>th</sup> 2022

Acknowledged  
Advisor



(Vania Mitha Pratiwi S.T., M.T)  
NIP. 198902132020122016

Student



(Lehonnita Pakpahan)  
NRP.02511840000098

*(This page is intentionally blank)*

# PENGARUH FUNGSIONALISASI POLIETILEN GLIKOL TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL MAGNETIT BERSALUT SILIKA SEBAGAI MEDIA PENGOBATAN KANKER MELALUI TERAPI HIPERTERMIA

Nama Mahasiswa / NRP : Lehonnita Rotua Lectiodivirani Pakpahan/ 0251184000098  
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS  
Dosen Pembimbing : Vania Mitha Pratiwi S.T., M.T.  
Hariyati Purwaningsih S.Si., M.Si

## Abstrak

Terapi hipertermia lokal adalah salah satu pengobatan dengan mengimplementasikan panas dari temperatur 41-45°C pada sel kanker untuk mengurangi resiko matinya sel normal yang ada di sekitar sel kanker. Adapun bentuk dari terapi hipertermia adalah ferrofluid yang mana diperlukan nanopartikel superparamagnetik dari magnetit. Penelitian ini menarik berbagai peneliti karena sifat magnetnya yang baik dengan biokompatibilitas baik. Walau demikian, interaksi partikel yang kurang baik dan kecenderungannya untuk agregasi membuat diperlukannya pelapisan pada superparamagnet. Salut silika pada permukaan superparamagnetik dilakukan untuk mengurangi resiko agregasi dan menambah biokompatibilitas pada material. Diaplikasikan juga fungsionalisasi polietilen glikol untuk meningkatkan biokompatibilitas material, serta menjadi carrier pada ferrofluid. Tujuan dari penelitian tersebut adalah menganalisa pengaruh penyalutan silika disertai fungsionalisasi polietilen glikol pada nanopartikel magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2\text{-PEG}$ ) terhadap struktur kristal dan morfologi nanopartikel, karakterisasi hubungan material terhadap air, karakteristik sifat magnet dan potensinya untuk digunakan dalam pengobatan kanker dengan terapi hipertermia. Sintesis dilakukan dengan metode sintesis magnetit co-precipitation dan pembentukan salut silika sol-gel. Variasi yang diberlakukan adalah pengaruh konsentrasi TEOS sebagai sumber silika serta rasio partikel terhadap PEG. Selanjutnya sampel dikarakterisasi menggunakan XRD, FTIR, SEM, PSA, hidrofobisitas, *surface tension*, VSM, serta pengujian pengaruh magnet terhadap temperatur.  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2\text{-PEG}$  telah berhasil dilakukan dengan bentuk kubik, tanpa pengaruh pelapisan terhadap ukuran kristal. Bentuk partikel yang teridentifikasi adalah bola dengan modus ukuran terkecil  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$  3ml-PEG 2:5 dengan nilai terkecil, terbesar, dan modus secara berurutan 37,84 nm, 396,10 nm, dan 58,77 nm (20%). Interaksi material terhadap air adalah hidrofilik dengan sudut terkecil diperoleh  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$  3ml-PEG 4:5 sebesar 39,1°. Nilai *surface tension* tertinggi didapat oleh  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$  4ml-PEG 3:5 senilai 64,4 mN/m. Sifat superparamagnetik telah terjadi dengan momen magnet terbesar diperoleh oleh  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$  3ml-PEG 2:5 senilai 51,96 emu/g. Nanopartikel magnetit bersalut silika disertai fungsionalisasi polietilen terbukti berpotensi untuk digunakan sebagai pengobatan kanker terapi hipertermia dengan temperatur akhir tertinggi dengan nilai 32,2°C dan nilai SAR sebesar 87,62 mW/g.

**Kata Kunci:** *polietilen glikol, silika, superparamagnetik, terapi hipertermia.*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# THE EFFECT OF POLYETHYLENE GLYCOL FUNCTIONALIZATION TO THE CHARACTERISTICS OF MAGNETIC NANOPARTICLE COATED SILICA AS A MEDIA CANCER TREATMENT HYPERTHERMIA THERAPY

**Student Name / NRP** : Lehonita Rotua Lectiodivirani Pakpahan/ 0251184000098  
**Departement** : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS  
**Advisor** : Vania Mitha Pratiwi S.T., M.T.  
Hariyati Purwaningsih S.Si., M.Si

## Abstract

Local hyperthermia therapy is a treatment by implementing heat from a temperature of 41-45°C on cancer cells to reduce the risk of causing normal cells around cancer cells to die. The form of hyperthermia therapy is in the form of ferrofluid which requires superparamagnetic nanoparticles of iron (III) oxide which has attracted various studies because of its good magnetic properties and good biocompatibility. However, poor particle interactions and their tendency to form aggregations are necessary for coating the superparamagnets. Therefore, silica coating on the superparamagnetic surface is carried out to reduce the risk of aggregation and increase the biocompatibility of the material. Polyethylene glycol functionalization was also applied to improve the biocompatibility of the material, as well as being a carrier for ferrofluid. The purpose of this study was to analyze the effect of silica coating with polyethylene glycol functionalization on magnetic nanoparticles on the crystal structure and morphology of nanoparticles, characterization of the interaction of materials with air, magnetic characteristics, and their potential to be used in the treatment of cancer with hyperthermia therapy. The synthesis was carried out by the synthesis method of magnetite coprecipitation and the formation of a sol-gel silica coating. Variations applied are the effect of the concentration of TEOS as a source of silica and the ratio of particles to PEG. Furthermore, the samples were characterized using XRD, FTIR, SEM, PSA, hydrophobicity, surface tension, and VSM, as well as testing the effect of magnetism on temperature. Silica coating on magnetite nanoparticles accompanied by PEG functionalization has been successfully carried out in a cubic form, without the effect of coating on crystal size. The shape of the small particles is spherical with nanoparticle size mode, obtained 3ml TEOS silica-coated magnetite with PEG 2 functionalization with the smallest, largest, and 37.84 nm, 396.10 nm, and 58.77 nm (20%). The interaction of the material with water is hydrophilic with the smallest angle obtained by magnetite nanoparticles coated with 3ml silica TEOS with PEG 4:5 functionalization of 39.1o. The highest surface tension value was obtained by magnetite nanoparticles coated with silica TEOS 4ml with PEG 3:5 functionalization of 64.4 mN/m. Superparamagnetic properties have occurred with the largest magnetic moment obtained by magnetite nanoparticles coated with PEG TEOS 3ml silica with PEG 2:5 functionalization of 51.96 emu/g. Silica-coated magnetite nanoparticles accompanied by polyethylene excitation were proven to be the best treatment for hyperthermia therapy with the highest final temperature with a value of 32.2°C and a SAR value of 87.62 mW/g.

**Keywords:** *Hyperthermia therapy, superparamagnetic, silica, polyethylene glycol*

*(This page is intentionally blank)*

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir dengan judul, “PENGARUH FUNGSIONALISASI POLIETILEN GLIKOL TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL MAGNETIT BERSALUT SILIKA SEBAGAI MEDIA PENGOBATAN KANKER MELALUI 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 Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T. dan Hariyati Purwaningsih, 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 Dr. Agung Purniawan S.T., M.Eng dan Ibu Diah Susanti S.T., M.T., PhD selaku dosen penguji tugas akhir atas segala ilmu dan wejangan yang telah diberikan.
3. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M..Si., Ph.D., selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FT-IRS ITS.
4. Ibu Dian Mughni Felicia S.T., M. Sc. selaku dosen wali penulis yang senantiasa memberikan arahan selama masa perkuliahan.
5. Bapak/Ibu Dosen yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis.
6. 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

Lehonnita Rotua Lectiodivirani Pakpahan

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## DAFTAR ISI

<b>Abstrak</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>xv</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xxi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
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
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Nanopartikel .....	3
2.2 Material Magnetik .....	3
2.2.1 Sintesis Nanopartikel Oksida Besi .....	5
2.2.2 Sifat Fisik dan Magnetik Nanopartikel Oksida Besi .....	6
2.2.3 <i>Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles</i> .....	6
2.3 Silika .....	7
2.3.1 Sifat Fisik, Kimia, dan Biologi .....	7
2.4 <i>Silica-Coated Magnetic Nanoparticle</i> .....	8
2.5 Fungsionalisasi .....	9
2.6 <i>Polyethylene Glycol</i> .....	10
2.7 <i>Ferrofluid</i> .....	10
2.8 Patofisiologi Tumor .....	10
2.9 <i>Hyperthermia Therapy</i> .....	11
2.9.1 Biodistribusi Tumor .....	12
2.9.2 Cara Kerja <i>Hyperthermia Therapy</i> dengan <i>Magnetic Nanoparticle</i> .....	12
2.9.3 Ketentuan Nanopartikel untuk <i>Hyperthermia Therapy</i> .....	13
2.10 Penelitian Sebelumnya .....	13
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>16</b>
3.1 Diagram Alir .....	16
3.2 Alat dan Bahan .....	19
3.3 Metode Penelitian .....	19
3.3.1 Prosedur Penelitian .....	20
3.3.2 Preparasi Besi (II) Klorida .....	20
3.3.3 Sintesis <i>Magnetic Nanoparticle Iron (III) Oxide</i> .....	20
3.3.4 <i>Sintesis Coating Silica</i> .....	20
3.3.5 Penambahan <i>Functionalization Polyethylene Glycol</i> .....	21
3.3.6 Pembuatan <i>Ferrofluid</i> .....	21
3.4 Pengujian .....	21
3.4.1 <i>X-Ray Diffractometer (XRD) Testing</i> .....	21
3.4.2 <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Testing</i> .....	22
3.4.3 <i>Scanning Electron Microscopy (SEM) Testing</i> .....	22
3.4.4 <i>Particle Size Analysis (PSA) testing</i> .....	22
3.4.5 Hidrofobisitas .....	23
3.4.6 <i>Surface Tension</i> .....	23
3.4.7 <i>Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Testing</i> .....	23

3.4.8	Pengujian Pengaruh Arus Magnet terhadap Temperatur .....	23
3.5	Pelaksanaan Penelitian .....	24
<b>BAB IV</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>26</b>
4.1	Hasil Uji <i>X-Ray Diffractometer (XRD)</i> .....	26
4.2	Hasil Uji <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Testing</i> .....	28
4.3	Hasil Uji <i>Scanning Electron Microscopy (SEM) Testing</i> .....	31
4.4	Hasil Uji <i>Particle Size Analysis (PSA) Testing</i> .....	33
4.5	Hasil Uji Hidrofobisitas .....	34
4.6	Hasil Uji <i>Surface Tension</i> .....	36
4.7	Hasil Uji <i>Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Testing</i> .....	36
4.8	Pengujian Pengaruh Magnet terhadap Temperatur .....	37
<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>41</b>
5.1	Kesimpulan .....	41
5.2	Saran.....	41
	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>43</b>
	<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>47</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Arah magnet superparamagnetik saat (a) tidak ada medan magnet (b) terdapat medan magnet (c) medan magnet dilepaskan .....	7
<b>Gambar 2.2</b> Gambaran Rumus Kimia Polietilen Glikol .....	10
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir pertama.....	16
<b>Gambar 3.2</b> Diagram alir kedua.....	17
<b>Gambar 3.3</b> Diagram alir ketiga.....	18
<b>Gambar 3.4</b> Diagram alir keempat.....	18
<b>Gambar 3.5</b> Alat Pengujian X-Ray Diffractometer (XRD) Testing .....	21
<b>Gambar 3.6</b> Alat Pengujian Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Testing .....	22
<b>Gambar 3.7</b> Alat Pengujian Scanning Electron Microscopy (SEM) Testing .....	22
<b>Gambar 3.8</b> Alat Pengujian Particle Size Analysis (PSA) Testing.....	23
<b>Gambar 3.9</b> Alat Pengujian Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Testing.....	23
<b>Gambar 3.10</b> Skema Pengujian Medan Magnet AC dengan Temperatur.....	24
<b>Gambar 3.11</b> Skema pembuatan nanopartikel magnetik bersalut silika dengan fungsionalisasi polietilen glikol.....	24
<b>Gambar 4.1</b> Grafik hasil XRD dari besi (III) oksida dengan perbandingan (a) Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> pH 9 (b) Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> pH 10 dan (c) Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> pH 11. ....	26
<b>Gambar 4.2</b> Grafik hasil XRD dari <i>silica coated magnetic nanoparticles</i> dengan penambahan (a) TEOS 3 ml (b) TEOS 4 ml dan (c) TEOS 5 ml.....	27
<b>Gambar 4.3</b> Grafik hasil pengujian <i>X-Ray Diffractometer (XRD)</i> pada nanopartikel magnetit <i>functionalization polyethylene glycol</i> .....	28
<b>Gambar 4.4</b> Grafik FTIR untuk besi (III) oksida dengan <i>coating</i> silika.....	29
<b>Gambar 4.5</b> Grafik hasil pengujian FTIR pada nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 3ml dengan variasi fungsionalisasi PEG.....	30
<b>Gambar 4.6</b> Grafik hasil pengujian FTIR pada nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 4ml dengan variasi fungsionalisasi PEG.....	30
<b>Gambar 4.7</b> Grafik hasil pengujian FTIR pada nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 5ml dengan variasi fungsionalisasi PEG.....	30
<b>Gambar 4.8</b> Hasil pengujian SEM mapping untuk nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 3ml disertai fungsionalisasi polietilen glikol 3:5 pada perbesaran 5x10 <sup>-6</sup> m.....	31
<b>Gambar 4.9</b> Hasil pengujian SEM besi (III) oksida dengan perbesaran 500 nm.....	32
<b>Gambar 4.10</b> Hasil pengujian SEM nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 5 ml dengan perbesaran 5x10 <sup>-6</sup> m.....	32
<b>Gambar 4.11</b> Hasil pengujian SEM nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 3ml disertai fungsionalisasi polietilen glikol 3:5 pada perbesaran 5x10 <sup>-6</sup> m.....	33
<b>Gambar 4.12</b> Grafik hasil pengujian PSA untuk nanopartikel magnetit.....	34
<b>Gambar 4.13</b> Grafik hasil pengujian PSA untuk nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 3ml serta fungsionalisasi polietilen glikol dengan perbandingan 3:5 .....	34
<b>Gambar 4.14</b> Grafik hasil pengujian PSA untuk nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 3ml serta fungsionalisasi polietilen glikol dengan perbandingan 2:5 .....	34
<b>Gambar 4.15</b> Kurva histesis dari hasil pengujian magnetit, magnetit bersalut silika 3ml, dan magnetit bersalut silika 3ml serta fungsionalisasi PEG 2:5 .....	37

<b>Gambar 4.16</b>	Grafik Hasil Pengujian Pengaruh Magnet Terhadap Temperatur pada nanopartikel magnetit, nanopartikel magnetet bersalut silika dengan kandungan TEOS 4ml, dan nanopartikel magnetit bersalut silika dengan kandungan TEOS 5ml.....	38
<b>Gambar 4.17</b>	Grafik Hasil Pengujian Pengaruh Magnet Terhadap Temperatur pada nanopartikel magnetit bersalut silika dengan kandungan TEOS 4ml dengan dan tanpa fungsionalisasi PEG .....	39
<b>Gambar 4.18</b>	Grafik Hasil Pengujian Pengaruh Magnet Terhadap Temperatur pada nanopartikel magnetit bersalut silika dengan kandungan TEOS 5ml dengan dan tanpa fungsionalisasi PEG.....	39

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Jenis Material Magnet.....	4
<b>Tabel 2.2</b> Metode-Metode Sintesis Nanopartikel Oksida Besi.....	5
<b>Tabel 2.3</b> Sifat fisik dan magnetik hematit, magnetit, dan maghemit .....	6
<b>Tabel 2.4</b> Karakteristik Silika .....	7
<b>Tabel 2.5</b> Metode <i>silica-coated magnetic nanoparticles</i> dengan <i>seed growth mediated</i> .....	8
<b>Tabel 2.6</b> Karakteristik <i>Polyethylene Glycol</i> .....	10
<b>Tabel 2.7</b> Perbedaan Tumor Jinak dan Tumor Ganas.....	11
<b>Tabel 2.8</b> Standar ferrofluid nanopartikel magnetit untuk terapi hipertermia .....	13
<b>Tabel 2.9</b> Penelitian sebelumnya terkait sintesis Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .....	14
<b>Tabel 2.10</b> Penelitian sebelumnya terkait <i>coating silica</i> terhadap Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .....	15
<b>Tabel 3.1</b> Kode spesimen.....	24
<b>Tabel 3.2</b> Rancangan Pengujian.....	25
<b>Tabel 4.1</b> Ukuran kristal dari variasi pH besi (III) oksida .....	26
<b>Tabel 4.2</b> Ukuran kristal dari variasi kadar silika pada <i>silica coated magnetic nanoparticle</i> .....	27
<b>Tabel 4.3</b> Tabel ukuran kristal dari variasi kadar PEG pada <i>silica coated magnetic nanoparticle with polyethylene glycol functionalization</i> .....	28
<b>Tabel 4.4</b> Gugus fungsi FTIR pada nanopartikel magnetit bersalut silika dengan fungsionalisasi polietilen glikol.....	29
<b>Tabel 4.5</b> Tabel hasil Pengujian PSA .....	33
<b>Tabel 4.6</b> Tabel hasil Pengujian <i>Hidrofobisitas</i> .....	35
<b>Tabel 4.7</b> Tabel hasil Pengujian <i>Surface Tension</i> .....	36
<b>Tabel 4.8</b> Tabel hasil Pengujian VSM .....	36
<b>Tabel 4.9</b> Tabel hasil Pengujian Pengaruh Magenet Terhadap Temperatur.....	38
<b>Tabel 4.10</b> Perbandingan target dan hasil ferrofluid nanopartikel magnet untuk aplikasi pengobatan kanker terapi hipertermia .....	40

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

---

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kanker adalah penyakit yang sampai saat ini belum bisa dihindari keberadaannya. Pada tahun 2020 saja, terdapat 296.194 penderita kanker yang berada di Indonesia (International Agency for Research on Cancer, 2020). Selama perkembangan kanker atau tumor ganas, tumor menjadi sangat heterogen, menciptakan populasi campuran sel yang dicirikan oleh fitur molekuler yang berbeda dan responsivitas yang beragam terhadap terapi (Pucci et al., 2019). Adapun selama perkembangannya, terdapat kesamaan antara jaringan normal dan neoplastik sel tumor ganas sehingga sulit untuk mengembangkan terapi yang secara khusus akan membunuh sel tumor (Giustini et al., 2010). Dari tantangan tersebut, dilakukan berbagai penelitian terkait terapi yang dikembangkan untuk mengatasi kanker, mulai dari *nanomedicine*, *extracellular vesicles*, *natural antioxidant*, *targeted therapy*, *immunotherapy*, *gene therapy*, *radiomics*, *pathomics*, *thermal ablation*, dan *hyperthermia treatment* (Pucci et al., 2019).

Terapi hipertermia lokal merupakan salah satu terapi yang kerap digunakan untuk membunuh sel kanker di area kecil yang dipilih karena selektivitas yang lebih besar dengan memasukkan pembawa panas bersumber nanopartikel magnet yang mengandung logam dan oksidanya ke dalam tubuh (Fatima et al., 2021). Adapun pada aplikasinya, nanopartikel magnetik terapi hipertermia lokal memanfaatkan nanopartikel magnet yang dapat menghasilkan panas setelah distimulasi dengan medan magnet bolak-balik (Pucci et al., 2019) yang dikemas dalam bentuk *ferrofluid*.

Penggunaan nanopartikel magnetit sebagai *magnetic hyperthermia therapy* menjadi salah satu material yang menarik untuk ditelusuri lebih lanjut. Hal tersebut dikarenakan *iron oxide* memiliki karakteristik yang menguntungkan, seperti biokompatibilitas dan sifat magnetik untuk penargetan selektif dan peningkatan kontras dalam *magnetic resonance imaging* (Giustini et al., 2010). Walau demikian, terdapat kendala dari *iron oxide nanoparticle* dimana tidak adanya situs penahan yang homogen di permukaan untuk berinteraksi dengan molekul biokimia lainnya di lingkungan biologis (Giustini et al., 2010), kecenderungannya untuk beragregasi dalam jangka waktu yang lama karena rasio luas permukaan terhadap volumenya yang besar, dan gaya tarik magnet dipolar antara nanopartikel (Gonçalves et al., 2021). Untuk menghindari hal tersebut, partikel magnetik berukuran nanometer dalam *ferrofluid* dilapisi dengan senyawa organik/anorganik (Narayanan et al., 2011).

Penggunaan matriks anorganik, khususnya silika, sebagai media dispersi untuk *magnetic nanoparticle* telah dilaporkan sebagai metode yang efektif untuk memodulasi sifat magnetik dengan mengontrol pemisahan antar partikel (Narayanan et al., 2011). Keberadaan silika pada permukaan *magnetic nanoparticle* dapat sifat hidrofobik yang dibawa oleh *iron oxide magnetic nanoparticle* menjadi hidrofilik, serta mengurangi agregasi antarpartikel dan menambah stabilitas (Wu et al., 2020).

Diaplikasikan juga *polyethylene glycol* (PEG) sebagai fungsionalisasi permukaan nanopartikel sekaligus *carrier fluid ferrofluid*. PEG memiliki biokompabilitas yang baik sehingga meningkatkan biokompabilitas nanopartikel maupun ferrofluid (Narayanan et al., 2011). Walau demikian, belum adanya penelitian lebih lanjut terkait bagaimana pengaruh *functionalization* PEG mempengaruhi karakteristik dan sifat magnet dari *silica-coated magnetic nanoparticle*. Sehingga, diperlukannya penelitian lebih lanjut terkait bagaimana pengaruh *functionalization* PEG terhadap sifat dan karakteristik *silica-coated magnetic nanoparticle* pada aplikasinya sebagai *cancer treatment hyperthermia therapy*.

---

## 1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penyalutan silika disertai fungsionalisasi polietilen glikol (PEG) pada nanopartikel magnetit terhadap struktur kristal dan morfologi nanopartikel?
2. Bagaimana pengaruh penyalutan silika disertai fungsionalisasi PEG pada nanopartikel magnetit terhadap karakterisasi interaksi material terhadap air?
3. Bagaimana pengaruh penyalutan silika disertai fungsionalisasi PEG pada nanopartikel magnetit terhadap karakteristik sifat magnet?
4. Apakah nanopartikel magnetit bersalut silika disertai fungsionalisasi PEG berpotensi untuk digunakan dalam pengobatan kanker dengan terapi hipertermia?

## 1.3 Batasan Masalah

Untuk mengurangi penyimpangan dari masalah yang ditinjau, maka ditentukan batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Penelitian dilakukan dalam tekanan konstan dan temperatur ruangan.
2. Penelitian berfokus pada sifat fisik dan karakteristik nanopartikel.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Dengan telah ditentukannya perumusan masalah diatas, terdapat tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Menganalisa pengaruh penyalutan silika disertai fungsionalisasi polietilen glikol (PEG) pada nanopartikel magnetit terhadap struktur kristal dan morfologi nanopartikel.
2. Menganalisa pengaruh penyalutan silika disertai fungsionalisasi PEG pada nanopartikel magnetit terhadap karakterisasi hubungan material terhadap air.
3. Menganalisa pengaruh penyalutan silika disertai fungsionalisasi PEG pada nanopartikel magnetit terhadap karakteristik sifat magnet.
4. Menentukan potensi nanopartikel magnetit bersalut silika disertai fungsionalisasi PEG untuk digunakan dalam pengobatan kanker dengan terapi hipertermia.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat pada riset ini adalah mengetahui karakteristik dan sifat dari nanopartikel magnetit bersalut silika disertai fungsionalisasi polietilen glikol. Hasil penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai salah satu alternatif dalam terapi penyembuhan kanker.



---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Nanopartikel

Nanopartikel adalah partikel berskala nano dimana proses produksinya menggunakan nanoteknologi untuk membentuk partikel yang memiliki setidaknya satu dimensi dengan ukuran nanometrik berkisar 1–1000 nm (Gali-Muhtasib & Chouaib, 2020). Terdapat beberapa karakteristik dari nanopartikel yang perlu diperhatikan, seperti bentuk, ukuran, dan distribusi partikel, kekasaran dan topografi partikel, luas permukaan dan kimia permukaan, stabilitas, dispersi, pengembangan, aglomerasi, dan agregasi, kemurnian, serta aktivitas dan hidrofobisitas (Mishra et al., 2017).

Penggunaan nanopartikel pada bidang terapi kesehatan memiliki aspek utama yang perlu diperhatikan, yaitu ukuran, bentuk dan karakteristik permukaan agar dapat mencapai efektivitasnya dalam pengiriman obat nano dan mengontrol efektivitas terapi. Ukuran nanopartikel yang baik untuk aplikasi terapi kanker adalah 10-100 nm. Ukuran yang lebih kecil dari 1-2 nm akan mudah bocor dari pembuluh darah normal sehingga merusak sel normal, serta dapat dengan mudah disaring oleh ginjal (diameter kurang dari 10 nm). Ukuran lebih besar dari 100 nm akan mudah dibersihkan dari sirkulasi oleh fagosit, salah satu penggolongan sel darah putih. Adapun untuk karakteristik permukaan, nanopartikel umumnya dimodifikasi menjadi hidrofilik untuk meningkatkan periode waktu obat terapi dalam sirkulasi, serta jumlahnya yang terkena kontak dengan jaringan tumor. (Yao et al., 2020)

Terdapat tiga jenis nanopartikel pada terapi kanker, yaitu nanopartikel organik, nanopartikel inorganik, dan nanopartikel hybrid. Beberapa nanopartikel yang termasuk nanopartikel organik adalah *liposome-based nanoparticles*, *polymer-based nanoparticles*, dan *dendrimers*. Selain itu, beberapa nanopartikel yang termasuk dalam nanopartikel inorganik adalah *gold nanoparticles*, *carbon nanotubes*, *silica nanoparticles*, dan *magnetic nanoparticles*. Nanopartikel hybrid sendiri adalah campuran dari nanopartikel organik dan inorganik dalam rangka memberikan pembawa multifungsi dengan sifat biologis yang lebih baik yang dapat meningkatkan kemanjuran pengobatan. (Yao et al., 2020)

### 2.2 Material Magnetik

Material magnetik adalah material yang dapat memberi berbagai respon magnet, sedang nanopartikel magnetik adalah partikel berukuran nano yang memiliki respon magnet tertentu. Berdasarkan sifat magnetnya, material magnetik terbagi menjadi lima seperti pada **Tabel 2.1**. Material berbasis oksida besi dapat menjadi pilihan yang tepat karena keamanan dan biokompatibilitasnya yang baik (Agotegaray & Lassalle, 2017). Sedang material campuran logam oksida seperti  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ , dan  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  memiliki aplikasi biomedis yang terbatas. Pada aplikasinya dalam *hyperthermia therapy*, nanopartikel berbasis oksida besi kerap digunakan karena dapat berperan sebagai agen hipertermia yang baik (C. S. S. R. Kumar & Mohammad, 2011), serta kurangnya toksisitas, biokompatibilitas yang sangat baik, dan selain fakta bahwa mereka dapat dimetabolisme oleh heme oksigenase-1 untuk membentuk hemoglobin darah dan karenanya mempertahankan homeostasis sel besi oleh sel (C. S. S. R. Kumar & Mohammad, 2011).

**Tabel 2.1** Jenis Material Magnet(Agotegaray & Lassalle, 2017)

Jenis Material Magnet	Struktur Material	Respon Terhadap Magnet	Respon Setelah Magnet Dilepas	Contoh Material
Ferro-magnetik	Elektron tidak berpasangan, momen magnet atom paralel. Hasil: momen magnetik neto nol, menginduksi titik-titik di beberapa arah.	Momen magnetik bersih: besar dibentuk dari penyelarasan momen magnetik domain di sepanjang arah medan magnet yang diterapkan	Terdapat momen magnet sisa	Fe, Ni, Co
Para-magnetik	Elektron tidak berpasangan, momen magnet atom bersih. Hasil: tidak ada domain magnetik.	Momen magnet bersih: lemah, karena penyelarasan momen magnetik domain.	Tidak ada retensi momen magnetik	Ga, Mg, Li, Ta, Cu
Dia-magnetik	Elektron berpasangan, momen magnet atom nol.	Respon pada medan magnet yang diterapkan sangat lemah	Tidak akan terjadi retensi momen magnetik.	Ag, Au, dan elemen lainnya
Anti-ferro-magnetik	Dua atom berbeda dengan momen magnet sama besar dan berlawanan arah. Hasil: momen magnetik neto nol	Momen magnetik bersih: besar diinduksi dari penyelarasan momen magnetik domain di sepanjang arah medan magnet yang diterapkan.	Terdapat momen magnet sisa	MnO, CoO, NiO, CuCl <sub>2</sub>
Ferri-magnetik	Atom beda dengan lokasi kisi berbeda, momen magnet atom antiparalel. Hasil: momen magnetik tidak hilang, sehingga spontan bersih	Momen magnetik bersih: besar dibentuk dari momen magnetik domain sejajar sepanjang arah medan magnet yang diterapkan	Terdapat sebuah momen magnet sisa setelah medan magnet hilang.	Magnetit (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ), maghemit (γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )

### 2.2.1 Sintesis Nanopartikel Oksida Besi

Tahap pertama dalam memperoleh nanopartikel magnetik adalah memilih, merancang, dan mensintesis inti magnetik. Adapun proses sintesis nanopartikel oksida besi terbagi menjadi beberapa metode seperti pada **Tabel 2.2**.

**Tabel 2.2** Metode-Metode Sintesis Nanopartikel Oksida Besi (Agotegaray & Lassalle, 2017; Zhu et al., 2018)

Metode sintesis	Keterangan metode	Kelebihan	Kekurangan
Co-precipitation	20-150°C Cepat (menit)	- Mudah - Kondisi ruangan - Distribusi ukuran kecil	- Kontrol bentuk buruk - Kristalinitas buruk - Agregasi
<i>High Temp. Thermal Decomposition</i>	100-350°C Lambat (jam-hari)	- Distribusi ukuran sangat kecil - Kontrol bentuk sangat baik - Mudah diukur	- Rumit
<i>Hydro- or solvo-thermal synthesis</i>	150-220°C Lambat (jam-hari)	- Mudah - Distribusi ukuran sangat kecil - Kontrol bentuk sangat baik - Mudah diukur	- Membutuhkan tekanan tinggi
Sol-gel	25-2000°C Normal (jam)	- Distribusi ukuran kecil - Kontrol bentuk baik	- Rumit - Dapat diukur
Microemulsion	20-80°C Normal (jam)	- Distribusi ukuran kecil - Kontrol bentuk baik	- Rumit - Sulit diukur
Sonolysis atau sonochemical	20-50°C	- Sangat mudah - Distribusi ukuran kecil	- Kontrol bentuk buruk - Dapat diukur
<i>Microwave assisted synthesis</i>	Temp. ruangan Lambat (jam)	- Kontrol bentuk baik	- Rumit - Distribusi ukuran sedang - Dapat diukur
Biosynthesis	Temp. ruangan Lambat (jam)		- Rumit - Distribusi ukuran luas - Tidak kontrol bentuk - Sulit diukur
Electro-chemical	Temp. ruangan Lambat (jam-hari)	- Kondisi ruangan Distribusi	- Rumit - Distribusi ukuran sedang - Kontrol bentuk sedang - Dapat diukur
Aerosol/ vapor	>100°C Menit-jam	- Distribusi ukuran kecil - Mudah diukur	- Rumit - Lingkungan terkontrol - Kontrol bentuk sedang

### 2.2.2 Sifat Fisik dan Magnetik Nanopartikel Oksida Besi

Terdapat berbagai macam nanopartikel oksida besi yang terbentuk dari proses sintesis yang telah dilakukan. Dari berbagai nanopartikel oksida besi tersebut, hematit ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), dan maghemit ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) adalah yang paling populer dalam aplikasi biomedis (Agotegaray & Lassalle, 2017). Adapun sifat fisik dan magnetik dari ketiga nanopartikel oksida besi tersebut terlampir pada **Tabel 2.3**.

**Tabel 2.3** Sifat fisik dan magnetik hematit, magnetit, dan maghemit (Cornell & Schwertmann, 2003)

Sifat Fisik dan Magnetik	Hematit $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Magnetit $\text{Fe}_3\text{O}_4$	Maghemit $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
Densitas ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	5,26	5,18	4,87
Titik leleh ( $^\circ\text{C}$ )	1350	1583-1597	-
Hardness	6,5	5,5	5
Tipe magnet	Ferromagnetik lemah, antiferromagnetik	Ferromagnetik	Ferrimagnetik
Curie temp. ( $^\circ\text{C}$ )	-	577	547-713
Néel temp. ( $^\circ\text{C}$ )	675	-	-
Magnetic saturation 300 K	0,3	92-100	60-80

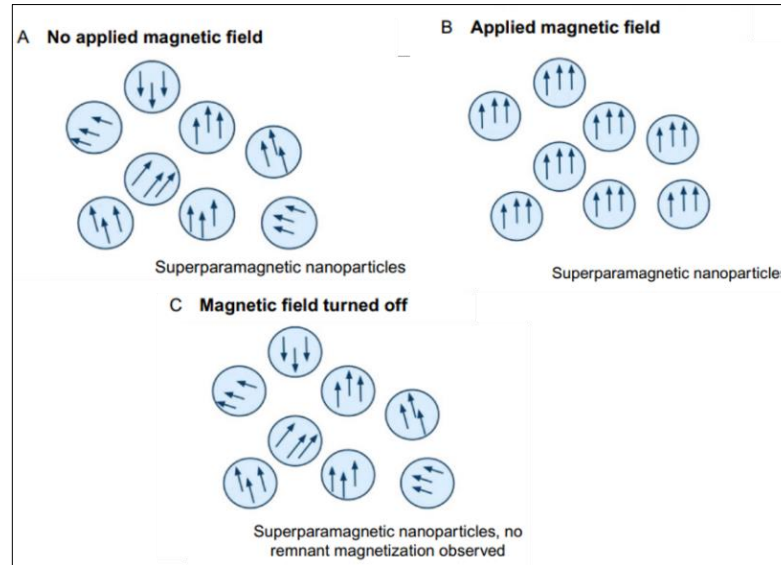
### 2.2.3 Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles

Ketika dipasangkan dengan medan magnet dengan kekuatan medan magnet tertentu (H), partikel akan memproduksi induksi magnetisasi (M) yang terbentuk dari *magnetic susceptibility* ( $\chi$ ) yang ada, dimana perhitungannya dilakukan dengan persamaan 2.1.

$$M = \chi H \quad (2.1)$$

Partikel dengan momen magnet paralel dengan H dan *magnetic susceptibility* bernilai  $10^{-10}$ - $10^{-1}$  disebut dengan paramagnetik. Nanopartikel oksida besi (magnetit, maghemit, atau magnetit nonstokiometrik) dengan ukuran kristal yang sangat kecil (dibawah 20 nm) akan bereaksi terhadap magnet dengan pembentukan *cubic close-packed (CCP) lattice* dari ion oksigen yang mana ion kation yang lebih kecil terletak *interstices* diantara ion anion. Sifat magnet meningkat seiring *h quantum tunneling (electron coupling)*, yang meningkatkan domain magnet tunggal (*single magnetization vector*) pada tiap kristal. Akibat dari *coupling* dan *coalignment* oleh *electron spin* pada domain tunggal, momen dipol magnetik per metal atom (atau biasa disebut *magnetic susceptibility*) dari superparamagnetik akan jauh lebih tinggi dari material paramagnetik.

Saat tidak ada medan magnet (dalam temperatur ruangan), momen magnetik nanopartikel berpindah dengan mudah antara sumbu kristalografi dan partikel superparamagnetik tidak menunjukkan netto momen magnet seperti pada **Gambar 2.1a**. Dikarenakan tingginya *magnetic susceptibility*, kekuatan magnetic H yang rendah dapat menyelaraskan arah momen magnet dari nanopartikel supermagnetik seperti pada **Gambar 2.1b**. Ketika medan magnet hilang, momen magnet dari nanopartikel superparamagnetic kembali menjadi acak dikarenakan agitasi termal atau disebut *Neel relaxation* yang menyebabkan kekurangan akan *remnant magnetization* seperti pada **Gambar 2.1c**. Sifat magnet yang ada pada superparamagnetik (*magnet susceptibility* tinggi dan hilangnya momen magnet ketika medan magnet hilang) membuat superparamagnetik dapat menghindari interaksi magnet antar partikel sehingga baik untuk aplikasi biomedis. (Alcatara & Josephson, 2012)



**Gambar 2.1** Arah magnet superparamagnetik saat (a) tidak ada medan magnet (b) terdapat medan magnet (c) medan magnet dilepaskan (Alcatara & Josephson, 2012)

### 2.3 Silika

Silikon (Si) adalah sebuah unsur kimia yang dicirikan sebagai metaloid tetravalent. Unsur tersebut merupakan elemen paling umum kedelapan di alam semesta dalam hal massa. Walau demikian, silika jarang sekali ditemukan dalam keadaan murni karena tidak tersedianya mineral murni disebabkan oleh sangat mudahnya unsur tersebut bereaksi dengan oksigen dan air pada lingkungan (Agotegaray & Lassalle, 2017). Salah satu senyawa dari unsur silicon yang kerap ditemui adalah silika ( $\text{SiO}_2$ ). Silika terbentuk melalui ikatan kovalen kuat yang mana empat atom oksigen masing-masing terikat pada silikon dengan posisi sudut tetrahedral dalam parameter sel  $a = b = 4,821 \text{ \AA}$  dan  $c = 4,162 \text{ \AA}$ , serta  $\alpha = \beta = 90^\circ$  dan  $\gamma = 120^\circ$  (Sembiring & Simanjuntak, 2015).

Nanopartikel silika telah menarik perhatian untuk diteliti lebih lanjut pada aplikasi biomedis. Hal tersebut dikarenakan ukuran partikel, morfologi, nano-struktur, dan diameter pori dari nanopartikel silika yang memiliki pengaruh baik terhadap perilakunya pada sistem biologis, seperti pada proses penyerapan sel, pelepasan obat, sirkulasi darah, dan biodistribusi (Tang et al., 2012).

#### 2.3.1 Sifat Fisik, Kimia, dan Biologi

Secara umum, silika memiliki karakteristik seperti pada **Tabel 2.4**. Adapun pada aplikasi nanopartikel silika, terdapat berbagai parameter struktural, seperti ukuran partikel, rasio aspek, ukuran pori, dan kepadatan yang secara signifikan memengaruhi perilaku biologis nanopartikel tersebut (Tang et al., 2012). Modifikasi yang dilakukan dapat terjadi berdasarkan perubahan pada proses sintesis dan penambahan katalis atau senyawa fungsional pada permukaan silika (Mirzaei et al., n.d.).

**Tabel 2.4** Karakteristik Silika (Sembiring & Simanjuntak, 2015)

Karakteristik	Jumlah
Berat jenis ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,6
Titik didih ( $^\circ\text{C}$ )	2230
Titik lebur ( $^\circ\text{C}$ )	1600-1725
Densitas ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,2-2,65
Konduktivitas termal ( $\text{W}/\text{cm K}$ )	0,013-0,014

## 2.4 Silica-Coated Magnetic Nanoparticle

Sintesis *silica-coated magnetic nanoparticle* secara umum dapat diperoleh melalui rute sintesis kimia basah (Agotegaray & Lassalle, 2017). Penggunaan silika sebagai *coating* dari *iron oxide magnetic nanoparticle* telah dibahas oleh Chae (2016) (Chae et al., 2016). Dengan penambahan *coating* silika pada permukaan  $Fe_3O_4$ , terjadi pengurangan densitas dari densitas  $Fe_3O_4$ . Selain itu, permukaan dari  $Fe_3O_4$  terlihat lebih halus ketika terlapis oleh silika. Adapun dari metode yang ada, terdapat tiga kelompok metode utama pada proses tersebut, yaitu *seed growth mediated*, *non-seeded methods*, dan *magnetic mesoporous silica*.

Penelitian tersebut berfokus metode *seed growth mediated*. Metode tersebut terbukti sebagai strategi yang paling cocok untuk menilai kontrol atas lebar *coating* silika dan karenanya atas ukuran, bentuk, dan magnet dari sistem nano yang diturunkan. Sifat-sifat tersebut menjadi hal paten dalam hal potensi dan efisiensi nanopartikel magnetik di bidang biomedis (Agotegaray & Lassalle, 2017). Beberapa metode dari kelompok *seed growth mediated* yang kerap dilakukan tertera pada **Tabel 2.5**. Terdapat juga beberapa metode yang ada seperti *one pot synthesis*, *aerosol pyrolysis*, dan *sol-gel* (Agotegaray & Lassalle, 2017).

**Tabel 2.5** Metode *silica-coated magnetic nanoparticles* dengan *seed growth mediated* (Agotegaray & Lassalle, 2017)

Metode	Penentu	Kelebihan	Kekurangan
<b>Stöber</b>	Nanopartikel magnetik, hidrolisis dan kondensasi alkoksilanes (TEOS) dalam larutan etanol berair.	Mudah Murah Silika relatif monodispersi dan homogen pada permukaan magnetik	Tinggi hingga tak terkendalinya hidrolisis TEOS dan rendahnya konsentrasi kritis nukleasi silika homogen membuat pembentukan agregat besar dan produk polidispersi
<b>Micro-emulsion</b>	Nanopartikel magnet <i>coated</i> ligan hidrofobik, dispersi pada media organik, digabung dengan larutan alkalin dan surfaktan.	Kontrol ukuran dan bentuk partikel baik	Banyak faktor mempengaruhi reaksi, seperti jenis surfaktan, rasio surfaktan, waktu reaksi, dan lain-lain.
<b>Sodium silikat</b>	Hidrolisis dari sodium silikat pada media asam atau alkalin	Cukup mudah Permukaan silika tinggi	Rasio natrium silikat dan nanopartikel magnet sensitif
<b>Sono-chemical</b>	Nanopartikel magnet dan partikel silika secara terpisah, kemudian digabung dengan bantuan tekanan luar seperti <i>ultrasound</i>	Mudah Murah Nilai magnetik hampir sama dengan nanopartikel magnet murni	Diperlukan nanopartikel magnet dan partikel silika yang terdispersi dengan baik

Pelapisan silika pada permukaan nanopartikel magnetit dilakukan dengan metode *amorphous nanoparticle coating*. Pelapisan dilakukan dengan sumber silika tetraetil ortosilikat (TEOS) yang mana akan dilakukan mikroemulsi dengan kondisi larutan basa berlebih sehingga pada permukaan akan terjadi reaksi hidrolisis (nukleasi) dan kondensasi (pertumbuhan). Laju reaksi ini jauh lebih lambat dalam mikroemulsi dibandingkan dengan



larutan air dalam jumlah besar. Oleh karena itu, seiring berjalannya waktu, saat reaksi polimerisasi berlangsung, lapisan tipis lapisan silika seragam terbentuk di sekitar setiap nanopartikel (Santra et al., 2001). Adapun pada prosesnya, CTAB berfungsi sebagai surfaktan sekaligus agen penyusun struktur. Kation  $CTA^+$  pertama-tama berintegrasi erat dengan nanopartikel  $Fe_3O_4$  bermuatan negatif untuk membentuk misel bola. Selanjutnya, oligomer silikon yang dihasilkan oleh TEOS diadsorpsi pada misel bola melalui gaya tarik elektrostatik. Jenis interaksi yang terjadi adalah pada saat konsentrasi rendah, oligomer silikon bebas lebih disukai mengendap di persimpangan antara misel dan nanopartikel  $Fe_3O_4$  untuk melindungi tolakan elektrostatik di antara kelompok kepala yang berdekatan dalam misel. Sementara itu, difusi etanol ke dalam misel CTAB akan menurunkan interaksi diri dari ekor alkil, yang menyebabkan peningkatan volume hidrofobik dan pengurangan kelengkungan misel berbentuk bola. Selain itu, amonium hidroksida sebagai katalis basa dapat memfasilitasi pembentukan ikatan hidrogen antara misel CTAB yang berdekatan dan oligomer silikon, yang mendukung pembentukan saluran paralel dan mengurangi energi kelengkungan misel. Oleh karena itu, transformasi struktural oligomer CTAB-silikon dari formulasi bulat ke silinder tercapai. Karena empat elemen di atas, oligomer silikon yang baru dihidrolisis diadsorpsi pada daerah antarmuka silika/larutan dan dapat dihubungkan silang lebih lanjut melalui gugus kepala bermuatan. Oleh karena itu, silika mesopori terus menerus terbentuk dalam arah aksial misel silinder, yang tegak lurus terhadap permukaan nanopartikel (Meng et al., 2018).

## 2.5 Fungsionalisasi

Fungsionalisasi mengacu pada modifikasi permukaan nanopartikel dimana mencakup konjugasi bahan kimia atau biomolekul ke permukaan untuk meningkatkan sifat dan mencapai target dengan presisi tinggi (Thiruppathi et al., 2017). Pada nanopartikel dengan fungsi biologis dan kesehatan, fungsionalisasi permukaan luar memainkan peran penting dalam stabilitas koloid nanopartikel inorganik dan interaksinya dengan lingkungan, yaitu dengan sel hidup dan substrat biologis lainnya (Maurice et al., 2009). Setiap permukaan nanopartikel memiliki proses fungsionalisasi dengan kondisi yang berbeda-beda untuk diterapkan demi mencapai modifikasi permukaan yang efisien. Selain itu, diperlukan juga pertimbangan akan penurunan hasil yang terjadi terhadap nanopartikel seiring fungsionalisasi melibatkan banyak pemrosesan berulang.

Kimia fungsionalisasi dalam pembuatannya menentukan interaksi *nanoprobe* dengan lingkungan biologis dan juga dengan teknik *imaging modality*. Terdapat berbagai metode kimia fungsionalisasi yang mana beberapa yang kerap ditemui adalah (Thiruppathi et al., 2017)

### 1. *Non-covalent binding*

Konjugasi biomolekul nonkovalen dilakukan dengan melampirkan beberapa ligan sekunder tertentu dimana nanopartikel umumnya disambungkan dengan sistem ligan reseptor berbasis afinitas.

### 2. *Covalent conjugation*

Konjugasi kovalen memfasilitasi pengikatan ligan reaktif pada permukaan nanopartikel. Pendekatan ini melibatkan reaksi *linkage* yang dibantu oleh katalis dan sebagian besar lebih disukai dengan fisisorpsi tidak spesifik untuk stabilitas fungsionalisasi.

### 3. *Amorphous nanoparticle coating*

Pelapisan permukaan memberi penggunaan nanopartikel sebagai target ligan/ terapeutik penargetan. *Coating* biasa dilakukan dengan silika maupun polimer lainnya.

### 4. *Surface epitaxial growth*

Penumbuhan epitaksial pada permukaan berarti mendepositkan lapisan anorganik atau organik pada substrat.

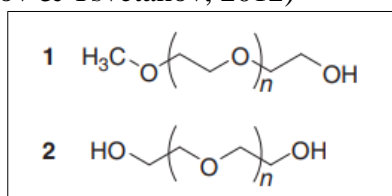
## 2.6 Polyethylene Glycol

*Polyethylene glycol* (PEG) adalah polimer yang terdiri dari monomer etilen oksida. PEG memiliki karakteristik yang banyak dipengaruhi oleh rantai kimia gaya hidrofobik yang diberikan oleh unit etilen,  $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ , dengan interaksi hidrofilik oksigen yang disajikan dalam unit oksiran dalam rumus kimianya. Interaksi dari kedua sifat tersebut membuat PEG dapat larut pada air dengan proporsi apapun dengan catatan temperatur berada dibawah titik didih pelarut. Karakteristik dari PEG dapat dilihat **Tabel 2.6.**(Dimitrov & Tsvetanov, 2012)

**Tabel 2.6** Karakteristik *Polyethylene Glycol*(Dimitrov & Tsvetanov, 2012)

Aspek	Hasil
Rumus kimia	$\text{HO}-(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n-\text{H}$
Polydispersity index	1,04 ( <i>polydisperse</i> )
Berat molekul (Da)	500-20.000
Bentuk pada kondisi kristal	Helix (spiral)
Terbentuk dalam satu <i>fiber identity period</i> (19.3 Å)	2 <i>helical turns</i> 7 oxyethylene ( $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-$ )
Sifat kimia sebagai pelarut	Ampipatik

Sintesis PEG dilakukan dengan polimerisasi pembukaan cincin anionik dari etilen oksida yang diprakarsai oleh serangan nukleofilik ion alkoksida pada cincin epoksida. Hanya memiliki satu atau dua kelompok fungsional terminal, PEG memiliki keterbatasan dengan kapasitas pemuatan yang buruk. Adapun jenis PEG yang kerap digunakan adalah PEG monometoksi dan PEG dihidroksi yang mana struktur kimianya dapat dilihat pada **Gambar 2.2.** Kelarutan air yang tinggi membuat polimer PEG menjadi kandidat serbaguna untuk konjugasi prodrug. PEG juga memiliki kecenderungan hidrofobik karena kelarutannya dalam banyak pelarut organik.(Dimitrov & Tsvetanov, 2012)



**Gambar 2.2** Gambaran Rumus Kimia Polietilen Glikol

## 2.7 Ferrofluid

*Ferrofluid* adalah salah satu *magnetic fluid* dimana terdiri dari suspensi partikel feromagnetik dalam cairan pembawa. *Ferrofluid* terbentuk dari padatan magnet, surfaktan, dan *liquid carrier* untuk suspensi partikel. Adapun semakin kecil ukuran partikel dalam *ferrofluid*, stabilitas suspensi akan semakin tinggi sehingga semakin panjang waktu suspense. Saat diletakkan pada medan magnet, *ferrofluid* mengalami pola ketidakstabilan Rosensweig yang terdiri dari puncak dan lembah (*spike*). *Spikes* adalah struktur *self-organized* yang sangat teratur. Pada penelitian lebih lanjut, telah dilaporkan bahwa *ferrofluid* yang ditempatkan di bawah medan magnet selama lebih dari 35 tahun telah mempertahankan keadaan cairnya tanpa tanda-tanda sedimentasi, yang mana menunjukkan pola *spike* yang konsisten dan dari situ, stabilitas sangat baik.(Oehlsen et al., 2022)

## 2.8 Patofisiologi Tumor

Tumor sendiri adalah sebuah *term* yang sering dikaitkan dengan neoplasia yang berarti “pertumbuhan baru”. Sel-sel neoplastik merupakan perubahan dari sel normal karena sifatnya yang terus bereplikasi tanpa menyadari pengaruh regulasi yang mengontrol sel-sel



normal. Akibat sifatnya, neoplasma menjadi cenderung bertambah besar terlepas dari lingkungan lokal mereka. Walau demikian, otonomi neoplasma sama sekali tidak lengkap. Semua neoplasma bergantung pada inangnya untuk nutrisi dan suplai darahnya. Tak jarang juga, Neoplasma yang berasal dari jaringan yang responsif terhadap hormon seringkali juga memerlukan dukungan endokrin, dan ketergantungan semacam itu terkadang dapat dimanfaatkan secara terapeutik. (V. Kumar et al., 2018)

Neoplasia atau tumor menurut perilaku klinis potensial tumor terbagi menjadi dua, yaitu tumor jinak (*benign*) dan tumor ganas (*malignant*). Tumor jinak memiliki karakteristik mikroskopis dan kasarnya dianggap relatif tidak berbahaya, sehingga tumor jinak tetap terlokalisasi dan dapat dilakukan pengangkatan dengan pembedahan lokal. Tumor ganas dinamakan demikian karena dapat menyerang dan menghancurkan struktur yang berdekatan dan menyebar ke tempat yang jauh (bermetastasis) hingga menyebabkan kematian. Dua komponen dasar yang ada pada tumor jinak dan tumor ganas adalah parenkim, terdiri dari sel-sel yang berubah atau neoplastik, dan stroma non-neoplastik, terdiri dari jaringan ikat, pembuluh darah, dan sel-sel inflamasi yang diturunkan dari inangnya. (V. Kumar et al., 2018) Adapun perbedaan dari tumor jinak dan tumor ganas tertera pada **Tabel 2.7**.

**Tabel 2.7** Perbedaan Tumor Jinak dan Tumor Ganas (V. Kumar et al., 2018)

Pembeda	Tumor Jinak	Tumor Ganas
<i>Differentiation</i>	Mirip jaringan awal <i>Well differentiated</i>	Beda dengan jaringan awal <i>Poorly differentiated</i> Anaplasia
Laju Pertumbuhan	Cenderung lambat	Cenderung cepat
<i>Local invasion</i>	Tidak merusak sel lain (terbungkus kapsul fibrous untuk kompres jaringan terhubung)	Merusak sel lain
Metastases	Tidak	Iya

Tumor ganas juga kerap disebut dengan *cancer stem cells* (CSCs). Meskipun CSCs memiliki sifat dan fungsi yang sangat mirip dengan sel normal, CSCs belum tentu selalu hasil penyimpangan dari sel normal. Dalam kasus tertentu, modifikasi genetik sel normal dapat menyebabkan transformasinya menjadi CSCs. Berikut merupakan karakteristik dasar dan umum dari kanker menurut (V. Kumar et al., 2018):

1. Kanker adalah kelainan genetik yang disebabkan oleh mutasi DNA.
2. Perubahan genetik pada sel kanker dapat diwariskan, diturunkan ke sel anak pada saat pembelahan sel. Akibatnya, sel-sel yang menyimpan perubahan ini tunduk pada seleksi Darwin (*survival of the fittest*, bisa dibilang konsep ilmiah paling penting dalam biologi).
3. Mutasi dan perubahan epigenetik memberikan sel kanker seperangkat sifat yang secara kolektif disebut sebagai tanda kanker.

Sel kanker memiliki kecenderungan untuk menyebar lewat pembuluh darah karena daerah tumbuhnya. Oleh karena itu, diperlukan penanganan yang terpusat untuk sel kanker agar dapat mati sebelum tersebar menuju bagian tubuh lainnya.

## 2.9 *Hyperthermia Therapy*

*Hyperthermia therapy* pada dasarnya menggambarkan kenaikan sementara temperatur di atas 37°C di lokasi tumor untuk terapi. Prosedur ini umumnya diketahui menginduksi perubahan patofisiologi tumor, yang pada akhirnya menyebabkan kematian sel. Secara umum, dua konsep pemanasan yang berbeda telah dilakukan, yaitu hipertermia dengan temperatur

antara 41 sampai 45°C, dan termoablasi ketika temperatur naik lebih tinggi dari 45°C untuk induksi lokal nekrosis jaringan.(Grillone & Ciofani, 2017)

*Hyperthermia treatment* berdasarkan cara kerjanya terbagi menjadi tiga, yaitu seluruh tubuh, regional, dan lokal(Fatima et al., 2021). Penggunaan *hyperthermia treatment* untuk seluruh tubuh dilakukan dengan memanaskan seluruh bagian tubuh sehingga memiliki efek yang buruk terhadap sela tau jaringan normal yang terkena panas. *Hyperthermia therapy* merupakan terapi diaplikasikan pada jaringan atau organ tertentu. Karena cara kerjanya yang demikian, *hyperthermia therapy* regional membutuhkan aplikator eksternal atau perfusi termal selama(Fatima et al., 2021). *Hyperthermia therapy* lokal merupakan terapi yang kerap digunakan untuk membunuh sel kanker di area kecil yang dipilih karena selektivitas yang lebih besar dengan memasukkan pembawa panas bersumber nanopartikel magnet yang mengandung logam dan oksidanya ke dalam tubuh(Fatima et al., 2021).

### 2.9.1 Biodistribusi Tumor

Ketika nanopartikel memasuki aliran darah, terdapat komponen darah dan protein serum yang mengikat di permukaannya sehingga membentuk struktur bernama protein corona. Protein corona menjadi identitas biologis dari nanopartikel, dimana sel mengidentifikasi dan berinteraksi nantinya. Komposisi dari protein yang berinteraksi dengan nanopartikel bersifat dinamis mengingat proses pertukaran yang terjadi oleh redistribusi nanopartikel antara kompartemen yang berbeda di dalam sel serta ke jaringan dan organ lain oleh aliran darah. Modifikasi permukaan nanopartikel menjadi hal yang penting, mengingat protein yang akan berinteraksi dengan nanopartikel memiliki sifat yang berbeda di seriap jaringan manusia. Beberapa interaksi yang dapat dipertimbangkan adalah berdasar pada hidrofobisitas (semakin hidrofobik, semakin baik), ukuran (semakin kecil, protein yang berinteraksi semakin banyak), dan bentuk (semakin banyak lekukan, interaksi protein semakin buruk)(Agotegaray & Lassalle, 2017).

### 2.9.2 Cara Kerja *Hyperthermia Therapy* dengan *Magnetic Nanoparticle*

Produksi panas pada *hyperthermia therapy* disebabkan oleh penyelarasan domain magnetik dalam partikel ketika medan magnet diterapkan, dan proses relaksasi berikutnya (relaksasi Brown dan/atau Neel) di mana panas dilepaskan, ketika medan magnet dihilangkan dan magnetisasi partikel kembali ke nol(Pucci et al., 2019). Hal tersebut dapat tercapai pada material superparamagnetik, dimana setelah medan magnet dihilangkan, momen magnetik menjadi rileks, baik oleh momen magnetik individu di dalam partikel, yang disebut relaksasi Néel, atau oleh rotasi partikel individu di sekitar sumbunya, yang disebut relaksasi Brown.

*Hyperthermia therapy* diidentifikasi dengan melihat efisiensi pemanasan superparamagnetik yang dinyatakan dalam bentuk *specific absorption rate* (SAR). Nilai dari SAR dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti ketebalan lapisan permukaan karena lapisan yang tebal dapat menghalangi gerakan partikel Brown, sifat hidrofilik surfaktan, dan magnetisasi berbeda yang dimiliki oleh nanopartikel karena molekul inti dan molekul surfaktan. Karena pada dasarnya SAR dapat dihitung dengan mengukur efisiensi material merubah energi magnet menuju panas, SAR dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$SAR = \frac{\text{penyerapan energi}}{\text{massa material}} \quad (2.2)$$

Dari rumus pada **Persamaan 2.2**, SAR dapat diukur dengan dua pendekatan, yaitu kalorimetri dan magnetometri. Menurut metode kalorimetri, jika perkembangan waktu temperatur sampel didokumentasikan, turunan waktu temperatur pada  $t=0$  dapat dicapai. Nilai tersebut dihitung pada **Persamaan 2.3** yang mana  $C_p,s$  adalah kapasitas panas sampel dan  $mMNP_s$  adalah massa material. Banyak faktor telah dilaporkan dalam literatur yang mempengaruhi keakuratan nilai SAR kalori, seperti volum sampel, gradien medan magnet,

kehilangan termal, dan metodologi pengukuran. Pemanasan cepat menyebabkan gradien temperatur tinggi saat menangani sampel dalam jumlah besar, karena pembuangan panas yang tinggi, sehingga akurasi SAR telah menunjukkan ketergantungan tertinggi pada pemosisian sensor suhu. Dalam studi lain, sampel dengan nilai magnetik tinggi mengurangi intensitas medan yang diterapkan, dan nilai SAR yang terukur ternyata diremehkan. Selain itu, pengukuran nilai SAR juga bergantung pada kemiringan nilai awal, dan wilayah kemiringan linier selalu terbatas, kecuali pada proses adiabatik.

$$SAR = \frac{c_{p,s}}{m_{MNP_s}} \left| \frac{dT}{dt} \right|_{t=0} \quad (2.3)$$

Di sisi lain, metode magnetometrik untuk pengukuran SAR terdiri dari pengukuran magnetisasi dinamis  $M_t$  sampel dan kemudian mengambil integrasi  $M_t$  versus medan magnet yang diterapkan  $M_t$ , dengan menggunakan **Persamaan 2.4**.

$$SAR = \frac{f}{c} \oint \vec{M}_t \cdot d\vec{H}_t \quad (2.4)$$

### 2.9.3 Ketentuan Nanopartikel untuk Hyperthermia Therapy

Pada aplikasi sebagai pengobatan kanker terapi hipertermia, diperlukan beberapa standar yang terpadu untuk menentukan apakah material telah berhasil menjadi ferrofluid yang dapat masuk ke dalam tubuh. Adapun ketentuan tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2.8**.

**Tabel 2.8** Standar ferrofluid nanopartikel magnetit untuk terapi hipertermia (Giustini et al., 2010; Vilas-Boas et al., 2020)

		Parameter	Target
Ferrofluid	Ukuran partikel		10-100 nm
	Struktur kristal		Kubik
	Morfologi partikel		Sferikal
	Sifat magnet		Superparamagnetik
	Medan koersivitas		0 Oe
	Histeresis		Tidak ada
Aplikasi Hyperthermia Therapy	Menghasilkan panas saat terkena arus magnet		Ya
	Temperatur		41-43°C (hipertermia sedang) >45°C (termoblast)
	Frekuensi medan magnet		$\leq 4,85 \times 10^8$ A/m s

### 2.10 Penelitian Sebelumnya

Penelitian sebelumnya yang menjadi dasar dalam sintesis besi oksida  $Fe_3O_4$  dirangkum dalam **Tabel 2.9**. Pembuatan  $Fe^{2+}$  kerap menggunakan  $FeCl_2$  dan  $FeSO_4$ , sedang pembuatan  $Fe^{3+}$  kerap menggunakan  $FeCl_3$ . Sumber tersebut tidak banyak mempengaruhi pembuatan  $Fe_3O_4$  dikarenakan prosesnya yang konstan rasio mol  $Fe^{2+}$  banding  $Fe^{3+}$  1:2. Sedang pengadukan dapat dilakukan dengan temperatur ruangan maupun temperatur tertentu. Namun, ada baiknya pengadukan dilakukan dengan temperatur tertentu untuk membantu pembentukan  $Fe_3O_4$  (Antarnusa & Suharyadi, 2020). Dengan demikian, dapat dicapai saturasi magnet yang tinggi dengan ukuran nanopartikel yang rendah.

**Tabel 2.9** Penelitian sebelumnya terkait sintesis Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

Aspek	(Aphesteguy et al., 2015)	(Permana et al., 2017)	(Virgina Mira & Mahmudin, 2018)	(Antarnusa & Suharyadi, 2020)
Tahun	2015	2017	2018	2020
Metode	<i>Co-precipitation</i>	<i>Co-precipitation</i>	<i>Co-precipitation</i>	<i>Co-precipitation</i>
Precursor	FeSO <sub>4</sub>	FeCl <sub>2</sub> , FeCl <sub>3</sub>	Pasir besi	FeSO <sub>4</sub> , FeCl <sub>3</sub>
Presipitan	KNO <sub>3</sub> , KOH, H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> OH	NH <sub>4</sub> OH	NH <sub>4</sub> OH
Pengadukan	25°C 15 menit	25°C	70°C 20 menit	60°C 90 menit
Pemanasan	70°C 210 menit	-	-	-
Pengeringan	50°C 24 jam	-	100°C 2 jam	80°C 2 jam
Ukuran	58 nm	9,69±1,06 nm	1,2±0,2 nm	14,5±0,5 nm
M <sub>s</sub> <sup>300K</sup>	75 emu/gr	-	35 emu/gr	77,16 emu/gr

Selain itu, penelitian sebelumnya yang menjadi dasaran dalam *coating silica* pada nanopartikel besi oksida Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dirangkum dirangkum dalam Tabel 2.9. Pada pengujian yang telah dilakukan, digunakan TEOS sebagai prekursor atau sumber silika. Sedang Pada penelitian Chae (2016)(Chae et al., 2016) tidak digunakan surfaktan pada penelitian sehingga penambahan ukuran partikel kurang terukur. Selanjutnya pada penelitian Peralta (2019), ditambahkan surfaktan CTAB sehingga pertumbuhan silika pada permukaan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dapat lebih terkendali walau reduksi sifat magnet menjadi cukup tinggi(Peralta et al., 2019). Penelitian dari (Reczyńska et al., 2020) dan (Taib et al., 2022) selanjutnya berfokus pada memperbaiki sifat magnet dengan mengubah larutan yang digunakan serta temperatur yang digunakan.

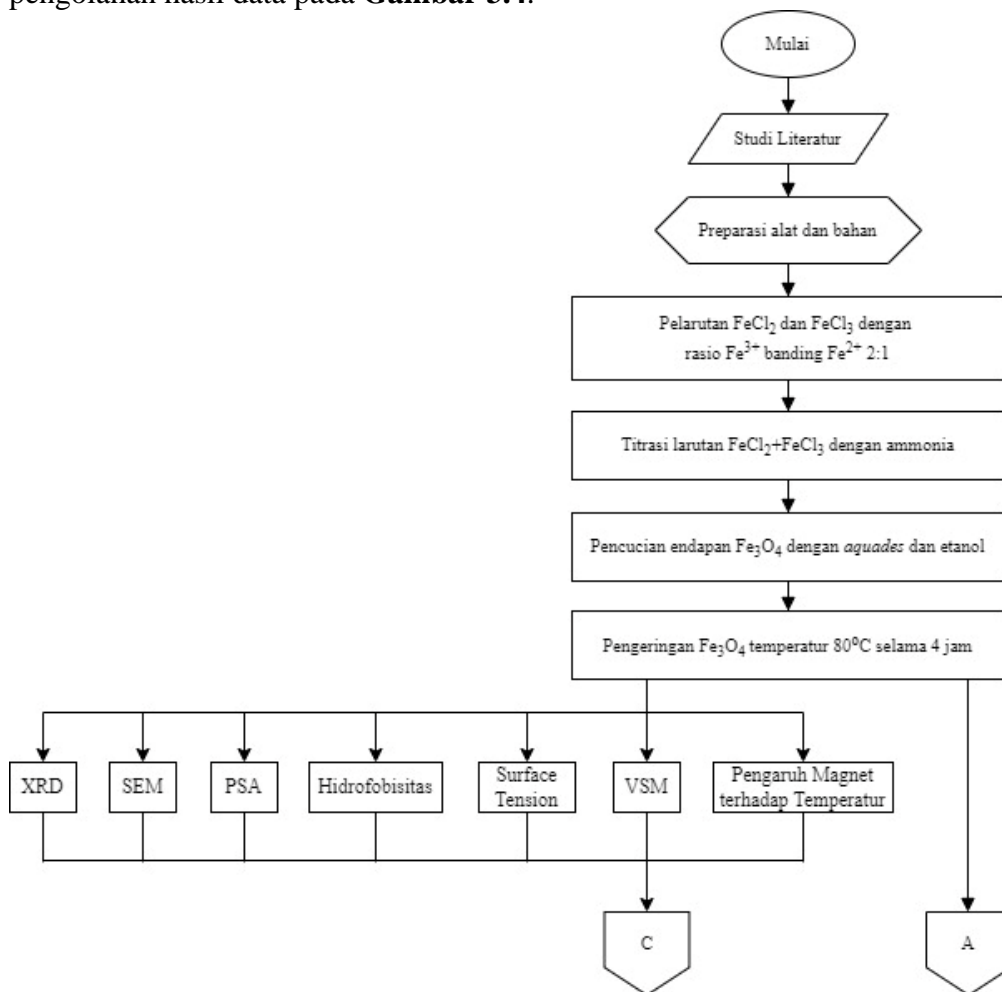
**Tabel 2.10** Penelitian sebelumnya terkait *coating silica* terhadap  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

Aspek	(Chae et al., 2016)	(Peralta et al., 2019)	(Reczyńska et al., 2020)	(Taib et al., 2022)
Tahun	2016	2019	2020	2022
Metode sintesis silika	<i>Sol-gel</i>	<i>Sol-gel</i>	<i>Sol-gel</i>	<i>Sol-gel</i>
Prekursor	TEOS	TEOS	TEOS	TEOS
Surfaktan	-	CTAB	CTAB	CTAB
Larutan	$\text{NH}_3 \text{ H}_2\text{O}$	$\text{NH}_3 \text{ H}_2\text{O}$	Etanol, UHQ- <i>water</i> , ammonia	NaOH
Proses pengadukan	25°C 400 rpm 4 jam	80°C 400 rpm 2 jam	25°C 500 rpm 12 jam	70°C 400 rpm 2 jam
Ukuran $\text{Fe}_3\text{O}_4$	200 nm	76 nm	-	13 nm
Ukuran partikel	240 nm	91 nm	-	45 nm
$M_s^{300\text{K}} \text{ Fe}_3\text{O}_4$	89,4 emu/gr	79,5 emu/gr	86,3 emu/gr	105,4 emu/gr
$M_s^{300\text{K}}$	50,6 emu/gr	19,5 emu/gr	60,1 emu/gr	83,6 emu/gr

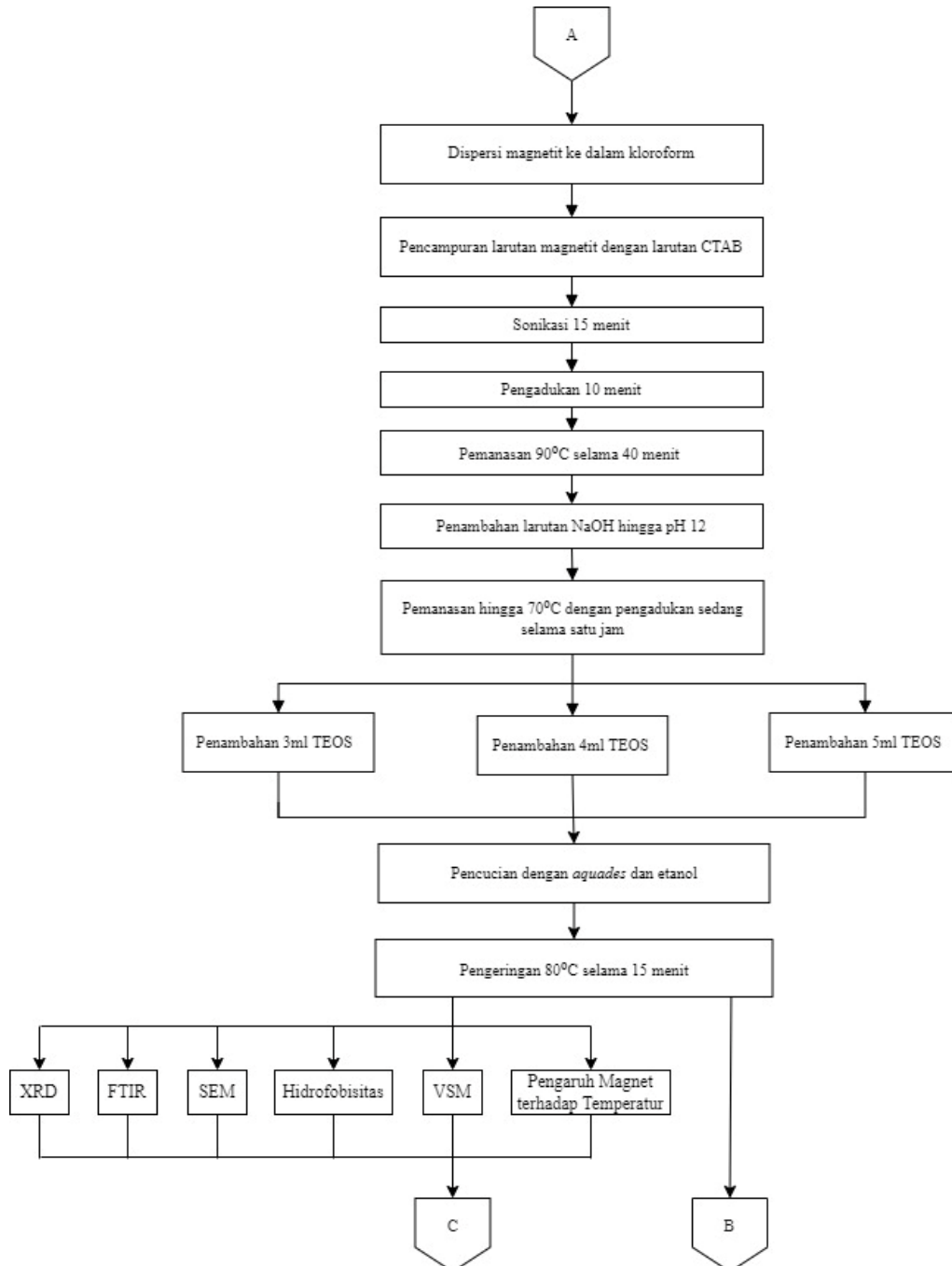
**BAB III**  
**METODOLOGI PENELITIAN**

**3.1 Diagram Alir**

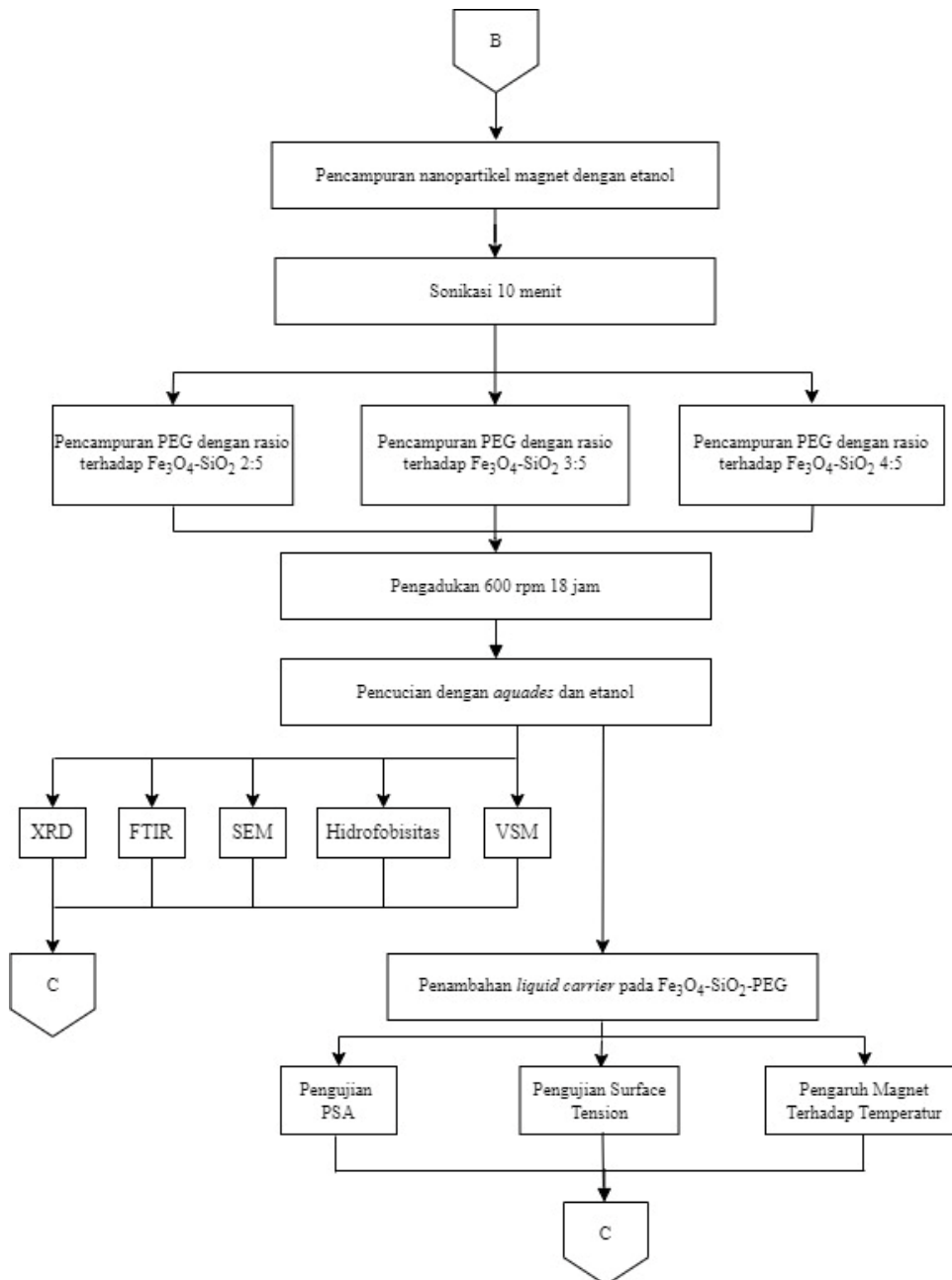
Penelitian tersebut terbagi menjadi empat bagian, yaitu sintesis nanopartikel magnetit pada **Gambar 3.1**, pelapisan silika pada nanopartikel pada **Gambar 3.2**, penambahan fungsionalisasi polietilen glikol dan pembuatan ferrofluid dari nanopartikel magnetit bersalut silika disertai fungsionalisasi polietilen glikol seperti pada **Gambar 3.3**, dan analisis dan pengolahan hasil data pada **Gambar 3.4**.



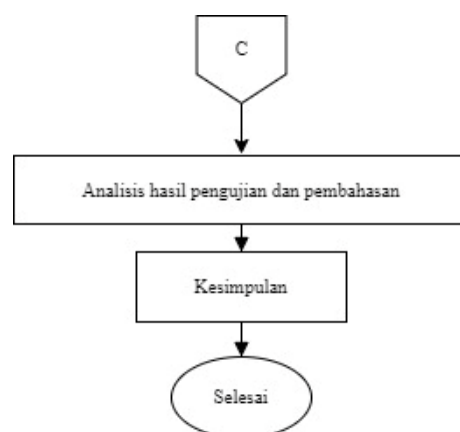
**Gambar 3.1** Diagram alir pertama



**Gambar 3.2** Diagram alir kedua



**Gambar 3.3** Diagram alir ketiga



**Gambar 3.4** Diagram alir keempat



### 3.2 Alat dan Bahan

Terdapat beberapa alat dan bahan yang digunakan pada penelitian tersebut. Berikut merupakan alat yang digunakan.

1. *Glass beaker*
2. Pipet tetes
3. Corong *bucher*
4. Buret
5. Spatula kaca
6. *Overhead mixer*
7. *Magnetic stirrer*
8. Thermometer
9. *Oven*
10. Magnet
11. Cawan Petri

Sedang untuk bahan yang digunakan untuk penelitian tersebut adalah

1. *Steel wool*
2. Asam klorida HCl
3. Kertas saring
4. Besi (III) oksida  $FeCl_3$
5. Akuades
6. Ammonia  $NH_4OH$
7. Kertas pH
8. Alkohol
9. Kloroform
10. *Cetyltrimethylammonium Bromide* CTAB
11. *Tetraethyl orthosilicate* TEOS
12. Natrium Hidroksida NaOH
13. Etanol

### 3.3 Metode Penelitian

Adapun metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Studi literatur

Metode ini dilakukan dengan mengacu pada buku, jurnal penelitian, dan informasi penelitian sebelumnya tentang  $Fe_3O_4$ , *coating* silica dan *functionalization agent*.

2. Diskusi

Diskusi dilakukan sebagai salah satu tahap dalam penelitian guna memperluas wawasan terkait masalah serta hal-hal yang berkaitan dengan penelitian dan menemukan solusi pada penelitian yang akan dirancang. Tahap ini dilakukan dengan pihak yang bersinggungan dengan penelitian.

3. Eksperimental

Metode ini dilakukan dengan prosedur proses sintesis  $Fe_3O_4$ ,  $Fe_3O_4@MSN$ , dan  $Fe_3O_4@SiO_2^w/PEG$ .

4. Pengujian

Terdapat berbagai pengujian yang dilakukan untuk karakterisasi hasil penelitian, yaitu SEM, XRD, FTIR, hidrofobisitas, PSA, VSM, AC magnet, dan pengaruh magnet terhadap temperatur.

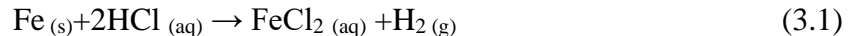
### 3.3.1 Prosedur Penelitian

Penelitian tersebut terbagi menjadi lima bagian utama, yaitu sintesis  $\text{FeCl}_2$ , sintesis nanopartikel besi (III) oksida  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , *coating mesoporous silica*, *functionalization polyethylene glycol*, dan pembuatan *ferrofluid*.

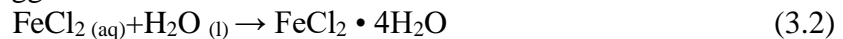
### 3.3.2 Preparasi Besi (II) Klorida

Besi (III) klorida  $\text{FeCl}_3$  (aq) dan besi (II) klorida  $\text{FeCl}_2$  (aq) digunakan sebagai sumber  $\text{Fe}^{3+}$  dan  $\text{Fe}^{2+}$  pada pembentukan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Berikut proses preparasi  $\text{FeCl}_2$

1. *Steel wool* (padat) dilarutkan dalam HCl hingga tidak bereaksi. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut



2. Diamkan larutan semalaman saat *steel wool* sudah tidak dapat terlarut.
3. Tambahkan *aquades* secukupnya kemudian diaduk untuk melarutkan  $\text{FeCl}_2$  yang mengendap.
4.  $\text{FeCl}_2$  disaring kemudian cairan ditampung pada *glass beaker*.
5. Tambahkan *aquades* hingga larutan memiliki rumus kimia berikut

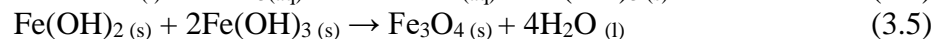
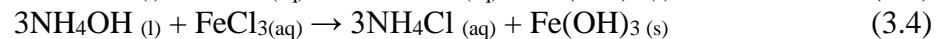
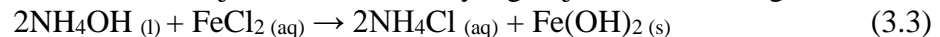


6. Masukkan beberapa paku besi agar  $\text{FeCl}_2$  tidak teroksidasi.
7. Ditambahkan juga HCl seperlunya untuk menjaga saat  $\text{Fe}^{2+}$  teroksidasi dengan udara agar tidak menurunkan pH.

### 3.3.3 Sintesis *Magnetic Nanoparticle Iron (III) Oxide*

Sintesis *magnetic nanoparticle*  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dilakukan dengan metode *co-precipitation* dengan detail metode seperti berikut

1.  $\text{FeCl}_3$  dan  $\text{FeCl}_2$  dilarutkan pada *aquades* dengan perbandingan molar  $\text{Fe}^{3+}$  dan  $\text{Fe}^{2+}$  2:1
2. Lakukan pengedukan sebesar 700 rpm.
3. Titrasi ammonia ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) pada larutan yang tetap diaduk hingga pH 9-11 dengan perubahan warna dari coklat menjadi hitam. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut



4. Larutan kemudian ditambahkan *aquades* dan biarkan serbuk mengendap.
5. Serbuk dicuci dengan *aquades* hingga pH netral.
6. Pencucian serbuk magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dilanjutkan dengan mencuci dengan etanol.
7. Pengeringan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  pada temperatur  $80^\circ\text{C}$  selama 45 menit.

### 3.3.4 Sintesis *Coating Silica*

Proses sintesis *coating silica* dilakukan dengan menggunakan proses *sol-gel* dengan detail metode seperti berikut

1. 320 mg *magnetic nanoparticle*  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  didispersikan dalam 1,00 mL kloroform.
2. Nanopartikel kemudian ditambahkan dengan larutan cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) 400ml dengan konsentrasi 1,02mM.
3. Sonikasi larutan selama 15 menit.
4. Pengadukan 10 menit pada 700 rpm.
5. Pemanasan larutan pada  $90^\circ\text{C}$  dengan 700 rpm selama 40 menit untuk menguapkan kloroform.
6. Larutan ditambahkan 100ml  $\text{H}_2\text{O}$  dengan penambahan NaOH hingga pH 12.
7. Pemanasan larutan pada  $70^\circ\text{C}$  dengan 700 rpm selama 60 menit.
8. 3, 4, dan 5 mL Tetraethyl Orthosilicate TEOS ditambahkan ke dalam larutan reaksi secara berurutan dengan pengadukan 700 rpm.

9. Dilakukan pengadukan sebesar 700 rpm pada temperatur 40°C selama 16 jam.
10. Larutan kemudian didiamkan hingga dingin dan nanopartikel mengendap
11. Magnet dicuci dengan *aquades* dan etanol
12. Pengeringan magnet pada temperatur 80°C selama 15 menit.

### 3.3.5 Penambahan *Functionalization Polyethylene Glycol*

*Functionalization Polyethylene Glycol* dilakukan dengan proses seperti berikut

1. Campurkan 1 gram *silica coated magnetic nanoparticles* dengan 100 mL etanol
2. Sonikasi selama 10 menit
3. Campurkan polietilen glikol pada larutan dengan rasio massa PEG banding Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-mSiO<sub>2</sub> 2:5, 3:5, dan 4:5 sambil diaduk sebesar 600 rpm.
4. Tetap lakukan pengadukan 600 rpm selama 18 jam
5. Nanopartikel kemudian dikeringkan pada temperatur 80°C selama 15 menit.

### 3.3.6 Pembuatan *Ferrofluid*

Pembuatan *ferrofluid* menjadi langkah terkahir dari penelitian tersebut. Cara menjadikan *silica coated magnetic nanoparticles with polyethylene glycol functionalization* sepenuhnya *ferrofluid* adalah sebagai berikut

1. 85% massa *liquid carrier* didispersi pada serbuk Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-PEG.
2. Dilakukan pengadukan dan sonikasi hingga seluruh *silica coated magnetic nanoparticles with polyethylene glycol functionalization* terlarut sepenuhnya.

## 3.4 Pengujian

Untuk memastikan keberhasilan penelitian tersebut, dilakukan berbagai pengujian. Pengujian yang diadakan meliputi XRD, FTIR, SEM, VSM, Hidrofobisitas, Surface Tension, PSA, dan pengaruh magnet terhadap temperatur. Penjelasan terkait setiap pengujian adalah sebagai berikut.

### 3.4.1 *X-Ray Diffractometer (XRD) Testing*

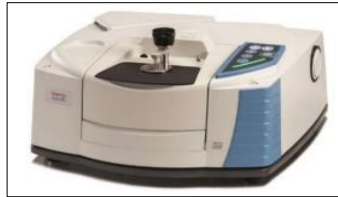
XRD atau X-Ray Diffractometry adalah pengujian *non-destructive* untuk menganalisa karakteristik kristal, senyawa, dan struktur kristal suatu material. Cara kerja XRD adalah dengan memancarkan sinar-X ke arah sampel secara terus-menerus sehingga mengubah sudut tembakan yang mengakibatkan pantulannya menghasilkan spektrum intensitas difraksi. Hasil dari analisis XRD berupa pola difraksi sinar-X yang memiliki puncak intensitas pada  $2\theta$  yang berbeda antara satu dengan lainnya. Hasil grafik kemudian dibandingkan hasil analisis XRD dengan basis data standar yang telah ada. Perbandingan tersebut membuat jenis zat kristalin dalam suatu spesimen dapat diketahui dan diidentifikasi. Pengujian ini menggunakan alat PAN *Analytical XRD* yang berada di Laboratorium Karakterisasi Material di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS



**Gambar 3.5** Alat Pengujian X-Ray Diffractometer (XRD) Testing

### 3.4.2 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Testing*

*Fourier Transform Infrared Spectroscopy* atau FTIR adalah metode pengujian untuk mendeteksi struktur molekul suatu senyawa dengan mengidentifikasi gugus fungsi penyusun senyawa tersebut. Cara kerja FTIR adalah identifikasi zat seperti molekul maupun atom dengan sinar yang berasal dari sinar inframerah dilewatkan melalui dua berkas, yaitu sampel dan pembanding. Setelah itu, sinar inframerah melewati *chopper*. Ketika melewati prisma, berkas akan bertemu dengan *detector* dan dikonverisikan menjadi sinyal listrik yang akan terekam oleh rekorder. Pengujian dilakukan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FT-IRS ITS menggunakan alat jenis Nicole IS10 dengan panjang gelombang  $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ .



**Gambar 3.6** Alat Pengujian Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Testing

### 3.4.3 *Scanning Electron Microscopy (SEM) Testing*

Scanning Electron Microscopy atau SEM pada dasarnya memiliki prinsip yang cukup mirip dengan mikroskop optik biasa, namun sumber cahaya dari SEM ialah elektron dengan lensa yang menggunakan medan magnet. Pengujian SEM dilakukan dengan jenis mikroskop elektron dengan memanfaatkan sinar elektron berenergi tinggi dalam pola raster scan sehingga dapat menampilkan gambar morfologi dengan perbesaran 2000-20.000x. Adapun cara kerja dari SEM adalah electron gun memproduksi electron beam. Anoda kemudian menangkap electron beam untuk diarahkan menuju sampel yang kemudian serangkaian lensa magnetik akan focus pada beam ini dan menembakkan ke sampel. Scanner yang membaca struktur permukaan sampel selanjutnya menangkap sinyal dari secondary dan back scattered electron untuk dikirim ke sistem kontrol sehingga dapat dilihat gambarnya pada monitor dan dapat dicetak bila diperlukan. Pengujian SEM dilakukan di Laboratorium Energi dan Lingkungan DRPM ITS.



**Gambar 3.7** Alat Pengujian Scanning Electron Microscopy (SEM) Testing

### 3.4.4 *Particle Size Analysis (PSA) testing*

*Particle Size Analyzer* atau PSA adalah pengukuran ukuran partikel dengan mendispersikannya ke dalam media sehingga ukuran partikel tersebut menjadi ukuran tunggal. PSA menggunakan metode *Dynamic Light Scattering (DLS)* yang memanfaatkan hamburan sinar inframerah. Ukuran partikel yang terukur adalah ukuran dari individu partikel (*single particle*). Hasil pengukuran yang ditampilkan dalam bentuk distribusi, sehingga dapat diasumsikan gambaran kondisi sampel pengujian. Selain itu hasil pengukuran yang didapat

juga dalam bentuk distribusi, sehingga hasil pengukuran dapat diasumsikan telah menggambarkan kondisi sampel secara keseluruhan



**Gambar 3.8** Alat Pengujian Particle Size Analysis (PSA) Testing

### 3.4.5 Hidrofobisitas

Pengujian hidrofobik dilakukan untuk analisis hidrofobisitas permukaan suatu material dengan cara melakukan pengukuran sudut kontak air. Material dikatakan hidrofobik apabila air sulit mengalir pada permukaannya, sedangkan disebut memiliki sifat hidrofilik apabila air dengan mudah mengalir pada permukaannya. Pengujian dilakukan dengan cara menempatkan setetes air pada tempat yang berbeda dari permukaan *nanofibrous*, kemudian mengukur sudut kontak antara tetesan air dan permukaan partikel, dan dihitung nilai rata-ratanya. Sudut kontak besar ( $>90^\circ$ ) sesuai dengan hidrofobisitas tinggi, sedang hidrofilitas tinggi dengan sudut kontak kecil ( $<90^\circ$ ).

### 3.4.6 Surface Tension

Pengujian *surface tension* dilakukan dengan instrument Surface Tensiometer. Adapun metode yang digunakan pada pengujian tersebut adalah *tear off* dengan pelarut air. Data yang diperoleh berupa nilai *interfacial tension* (IFT). Adapun pengujian dilakukan di Balai Laboratorium Bea dan Cukai Kelas II Surabaya.

### 3.4.7 Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Testing

*Vibrating sample magnetometer* atau VSM merupakan pengujian bertujuan untuk melihat sifat-sifat kemagnetan yang dihasilkan dari *magnetic nanoparticle*. Alat karakterisasi ini memberikan informasi dalam bentuk kurva histeresis dengan tiga besaran penting, yaitu magnetisasi saturasi ( $M_s$ ), magnetisasi remanensi ( $M_r$ ), dan medan koersivitas ( $H_c$ ). Semakin besar nilai  $M_s$  maka semakin kuat sifat kemagnetannya. Dengan pengujian VSM, diperoleh informasi mengenai besaran-besaran sifat magnetik sebagai akibat dari perubahan medan magnet luar ( $H$ ) terhadap magnetisasi ( $M$ ) yang digambarkan dalam kurva histeresis.



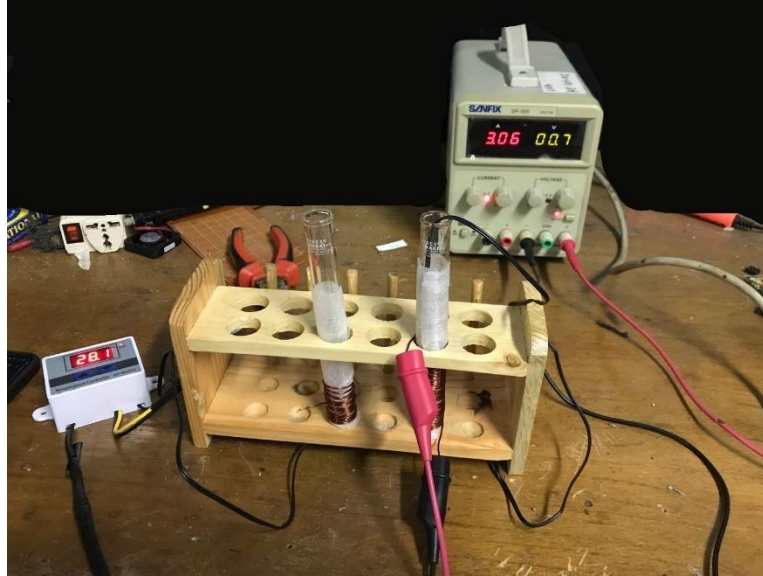
**Gambar 3.9** Alat Pengujian Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Testing

### 3.4.8 Pengujian Pengaruh Arus Magnet terhadap Temperatur

Pengujian pengaruh medan magnet luar AC dan frekuensi bertujuan mengetahui adanya peningkatan temperatur yang terjadi dalam rentang waktu tertentu. Pengujian tersebut dilakukan dengan 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). Hasil dari pengujian ini yaitu berupa grafik hubungan temperatur sebagai fungsi waktu.



**Gambar 3.10** Skema Pengujian Medan Magnet AC dengan Temperatur

### 3.5 Pelaksanaan Penelitian

Penelitian tersebut terdiri dari tiga proses utama, yaitu sintesis besi (III) oksida, pelapisan dengan silika, dan penambahan fungsionalisasi polietilen glikol seperti pada skema **Gambar 3.10**. Akan ada tiga belas sampel yang terbentuk seperti pada **Tabel 3.1**. Pengujian yang akan dilakukan terbagi menjadi saat material berbentuk padatan dan *ferrofluid* yang selengkapnya dijelaskan pada **Tabel 3.2**.



**Gambar 3.11** Skema pembuatan nanopartikel magnetik bersalut silika dengan fungsionalisasi polietilen glikol

**Tabel 3.1** Kode spesimen

	Tanpa PEG	PEG 2:5	PEG 3:5	PEG 4:5
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	AA1			
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 3ml	AB1	AC1	AC2	AC3
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 4ml	AB2	AD1	AD2	AD3
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 5ml	AB3	AE1	AE2	AE3

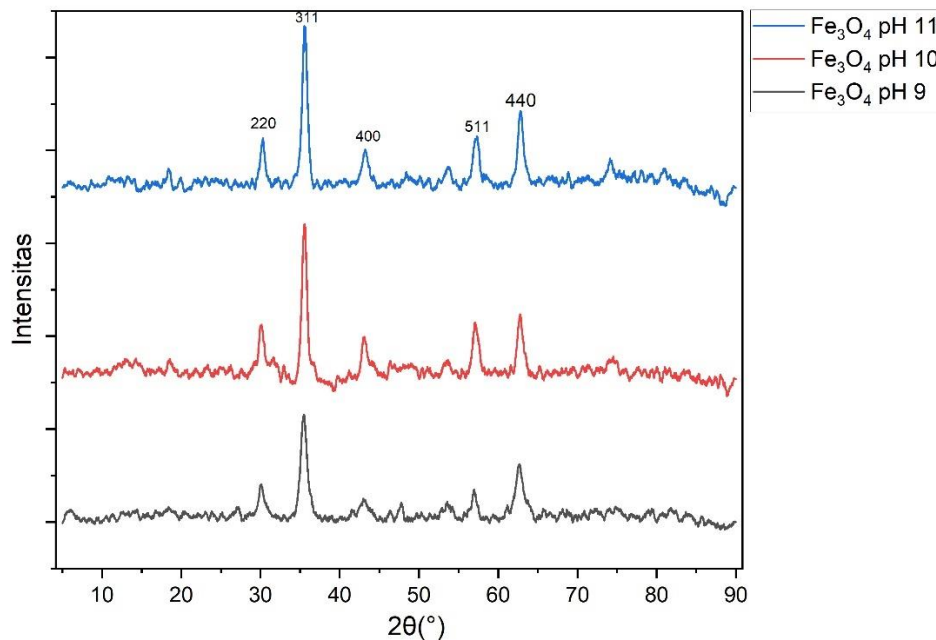
**Tabel 3.2** Pelaksanaan Pengujian

Jenis Pengujian	Pengujian	Bentuk spesimen		Kode Spesimen
		Nanopartikel	<i>Ferrofluid</i>	
Karakterisasi Struktur Kristal dan Morfologi	XRD	✓		AA1, AB1, AB2, AB3, AC1, AC2, AC3, AD1, AD2, AD3, AE1, AE2, AE3
	FTIR	✓		AB1, AB2, AB3, AC1, AC2, AC3, AD1, AD2, AD3, AE1, AE2, AE3
	SEM	✓		AA1, AB3, AC2
	PSA		✓	AA1, AC1, AC2, AC3, AD1, AD2, AD3, AE1, AE2, AE3
Karakterisasi Hubungan Material dengan Air	Hidrofobisitas	✓		AA1, AB1, AB2, AB3, AC1, AC2, AC3, AD1, AD2, AD3, AE1, AE2, AE3
	Surface Tension		✓	AA1, AC1, AC2, AC3, AD1, AD2, AD3, AE1, AE2, AE3
Karakterisasi Sifat Magnet dan Aplikasi	VSM	✓		AA1, AB1, AC1, AC2, AC3, AD1, AD2, AD3, AE1, AE2, AE3
	Pengaruh magnet terhadap temperatur		✓	AA1, AB2, AB3, AC1, AC2, AC3, AD1, AD2, AD3, AE1, AE2, AE3

**BAB IV**  
**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**4.1 Hasil Uji X-Ray Diffractometer (XRD)**

Pada pengujian *X-Ray Diffractometer (XRD)*, didapatkan data berupa identifikasi unsur kimia dan ukuran kristal. Pertama, telah dilakukan sintesis besi (III) oksida dengan tiga variabel pH, yaitu pH 9, 10, dan 11. Hasil sintesis yang telah dilakukan diukur dengan XRD dan diperoleh hasil seperti pada **Gambar 4.1**. Selanjutnya, dilakukan perhitungan terhadap ukuran kristal dari setiap  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dengan perbandingan pH. Ditemukan ukuran kristal sesuai dengan **Tabel 4.1**.



**Gambar 4.1** Grafik hasil XRD dari besi (III) oksida dengan perbandingan (a)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  pH 9 (b)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  pH 10 dan (c)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  pH 11.

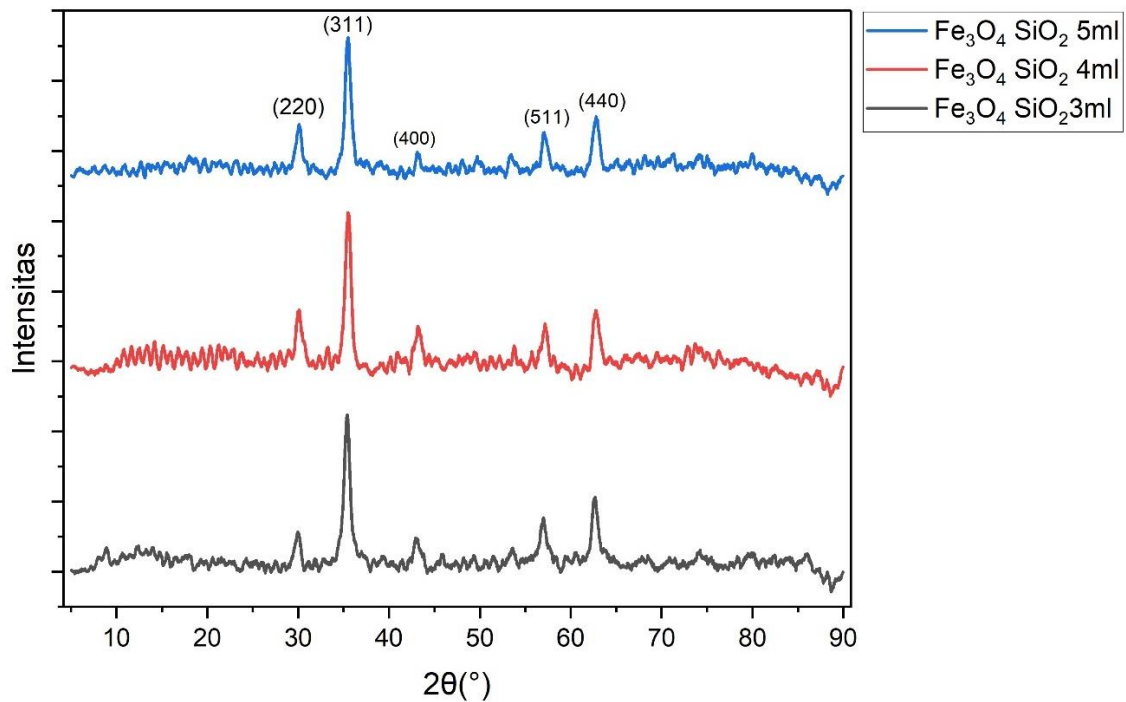
**Tabel 4.1** Ukuran kristal dari variasi pH besi (III) oksida

Jenis Material	Ukuran kristal
$\text{Fe}_3\text{O}_4$ pH 9	14,19 nm
$\text{Fe}_3\text{O}_4$ pH 10	13,72 nm
$\text{Fe}_3\text{O}_4$ pH 11	12,95 nm

Struktur kristal dari besi (III) oksida dapat diukur berdasarkan International Centre for Diffraction Data yang mana besi (III) oksida yang terbentuk tergolong pada ICDD 01-089-0691. Terdapat lima *peak* utama dari material tersebut yang terletak pada hkl dengan masing-masing dua teta 111(18,306), 220(30,112), 311(35,468), 222(37,102), dan 400(43,107). Adapun seluruh *peak* tersebut menunjukkan adanya penambahan ukuran kristal seiring dengan penambahan pH.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang telah terbentuk memiliki bentuk kristal kubik. Selanjutnya, dilakukan sintesis besi (III) oksida dengan pH 10.

Dilakukan *coating* silika pada nanopartikel magnet  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang sudah dibuat. Terdapat tiga variasi volum silika yang dibandingkan. Hasil sintesis yang telah dilakukan diukur dengan XRD dan diperoleh hasil seperti pada **Gambar 4.2**. Selanjutnya, dilakukan perhitungan terhadap ukuran kristal dari setiap *silica coated magnetic nanoparticles* dengan perbandingan silika. Ditemukan ukuran kristal sesuai dengan **Tabel 4.2**.





**Gambar 4.2** Grafik hasil XRD dari *silica coated magnetic nanoparticles* dengan penambahan (a) TEOS 3 ml (b) TEOS 4 ml dan (c) TEOS 5 ml

**Tabel 4.2** Ukuran kristal dari variasi kadar silika pada *silica coated magnetic nanoparticle*

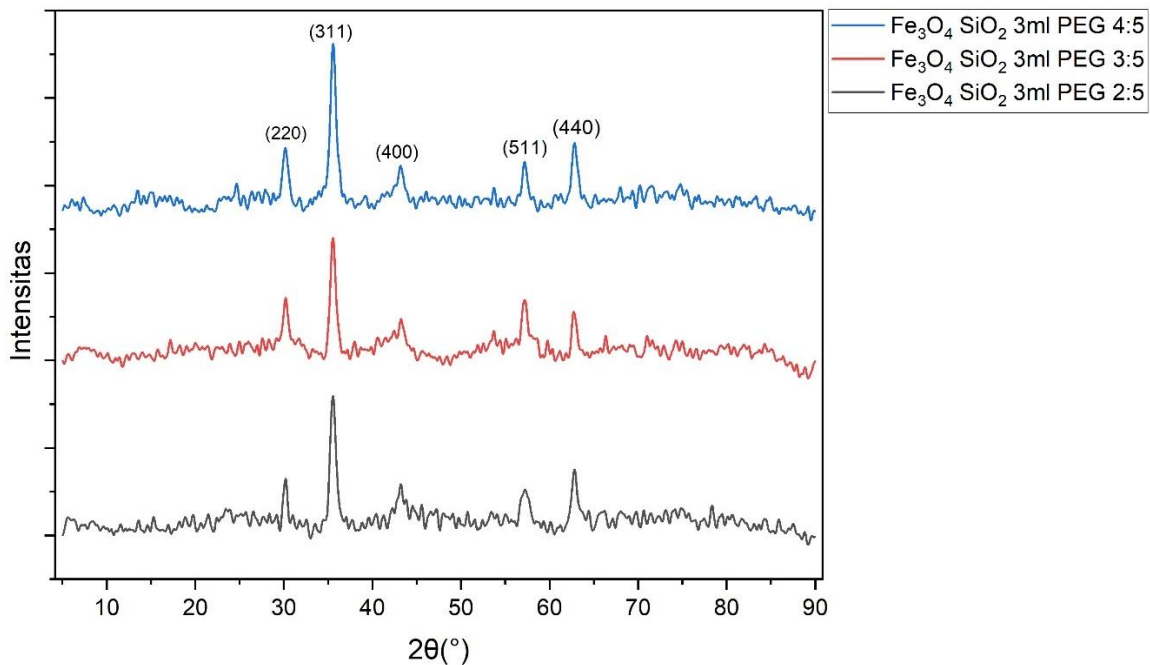
Jenis Material	Ukuran kristal
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 3ml	13,72 nm
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 4ml	13,49 nm
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 5ml	12,87 nm

Ketiga hasil variasi *coating* silika kemudian diaplikasikan *functionalization polyethylene glycol* (PEG) dengan variasinya masing-masing. Hasil dari variasi PEG dengan masing-masing variabel TEOS 3 ml, 4 ml, dan 5 ml masuk dalam pengujian XRD dan diperoleh hasil seperti pada **Gambar 4.3**. Selanjutnya, dilakukan perhitungan terhadap ukuran kristal dari setiap variasi PEG dengan perbandingan silika. Ditemukan ukuran kristal sesuai dengan **Tabel 4.3**. Penambahan PEG pada nanopartikel terbukti menurunkan ukuran kristal dari nanopartikel.

Berdasarkan hasil yang telah dilakukan, dapat dilihat bahwa *coating* maupun *functionalization* tidak memiliki efek yang signifikan terhadap *peak* yang muncul pada hasil XRD. Hal tersebut menandakan bahwa penambahan *coating* dan *functionalization* tidak merubah kristal yang terbentuk pada nanopartikel. Pernyataan tersebut sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh (Bukit et al., 2015) yang mana surfaktan atau penambahan senyawa lainnya tidak merubah identifikasi senyawa yang ada, melainkan hanya berfungsi sebagai *template*.

**Tabel 4.3** Tabel ukuran kristal dari variasi kadar PEG pada *silica coated magnetic nanoparticle with polyethylene glycol functionalization*

Kadar Silika pada Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	PEG banding nanopartikel magnet	Ukuran Kristal
TEOS 3ml 13,95 nm	2:5	11,61 nm
	3:5	11,78 nm
	4:5	12,12 nm
TEOS 4ml 13,49 nm	2:5	11,78 nm
	3:5	11,94 nm
	4:5	12,21 nm
TEOS 5ml 12,87 nm	2:5	11,944 nm
	3:5	11,945 nm
	4:5	12,300 nm



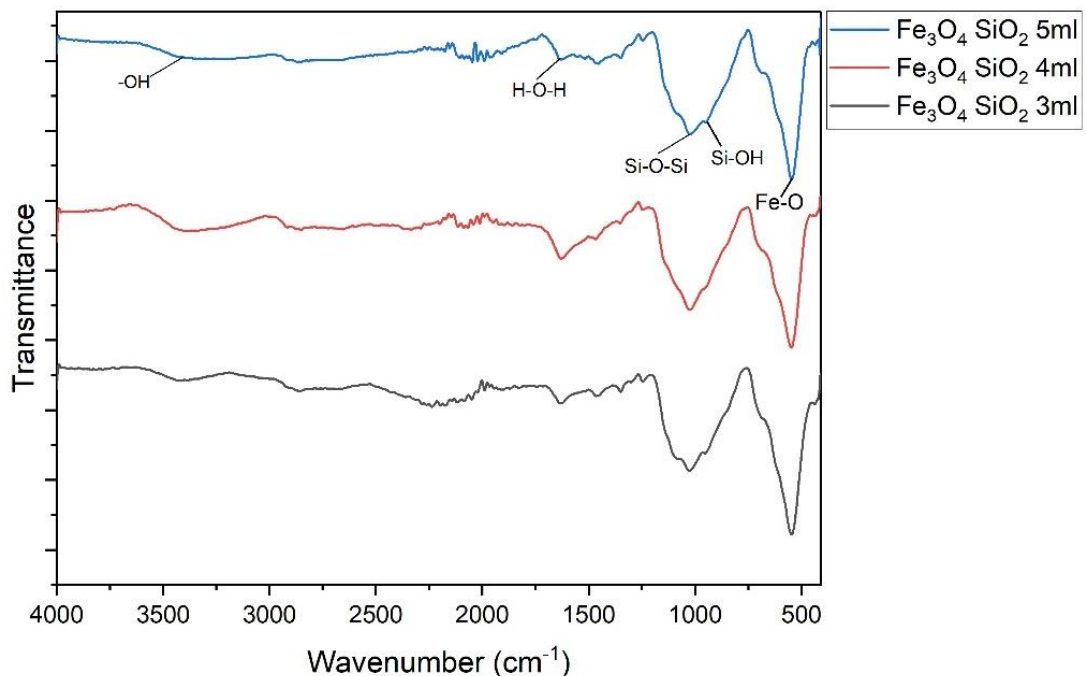
**Gambar 4.3** Grafik hasil pengujian *X-Ray Diffractometer (XRD)* pada nanopartikel magnetit *functionalization polyethylene glycol*

#### 4.2 Hasil Uji *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Testing*

Selama pengujian XRD yang telah dilakukan, sulit untuk dilakukan identifikasi senyawa dan gugus fungsi yang ada pada nanopartikel magnet. Oleh karena itu, dilakukannya pengujian FTIR dalam rangka melihat gugus fungsi dari sintesis *silica coated iron oxide nanoparticles* maupun penambahan *functionalization polyethylene glycol*. Setiap *peak* yang dihasilkan dicocokkan dengan gugus fungsi yang didapat sesuai pada **Tabel 4.4**. Hasil FTIR dari *coating* silika tertera pada **Gambar 4.4**.

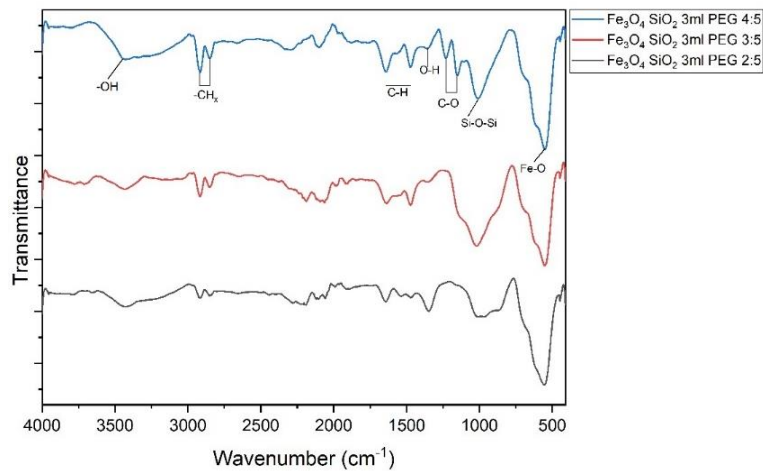
**Tabel 4.4** Gugus fungsi FTIR pada nanopartikel magnetit bersalut silika dengan fungsionalisasi polietilen glikol

Gugus Fungsi	Rentang <i>Wavenumber Peak</i> (cm <sup>-1</sup> )
O-H intermolekul	3550-3200
C-H (bagian dari -CH <sub>x</sub> )	2959-2956 2930-2923 2853-2860
C-H	2000-1640 1470-1430
H-O-H	1650-1630
O-H	1420-1330
C-O	1350-1163
Si-O-Si	1130-1000
Si-OH	950-810
Fe-O	600-550

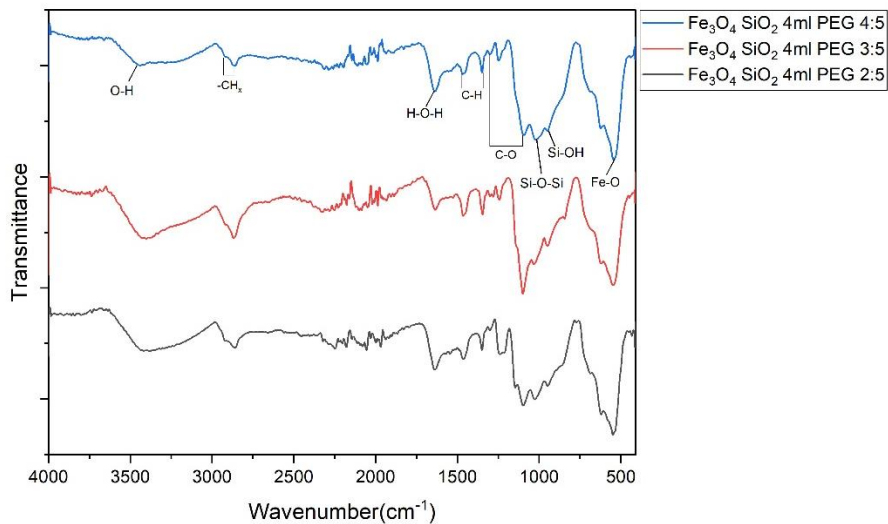


**Gambar 4.4** Grafik FTIR untuk besi (III) oksida dengan *coating* silika

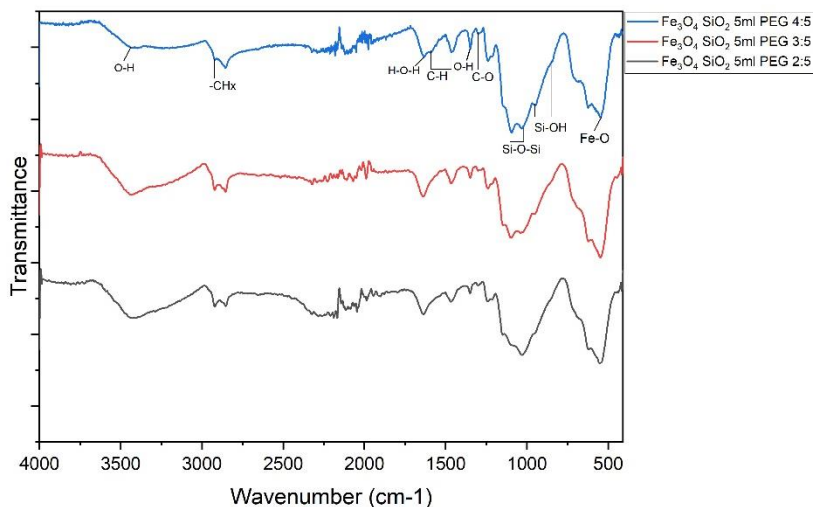
Pada *range* 600-550 cm<sup>-1</sup>, terdapat *peak* pada 560 cm<sup>-1</sup> dengan intensitas tinggi yang menunjukkan adanya gugus fungsi Fe-O. Terdapat juga *peak* pada 1025 cm<sup>-1</sup> yang mana *range* 1055-1020 cm<sup>-1</sup> menunjukkan gugus Si-O-Si sehingga membuktikan bahwa silika yang terbentuk adalah amorf (Kralj et al., 2011). Terbentuk juga *peak* pada bagian 933-978 yang menunjukkan adanya gugus Si-OH (Praseptiangga et al., 2020). Selain itu, terdapat *peak* dengan intensitas rendah pada 3400 cm<sup>-1</sup> yang menunjukkan gugus -O-H dan *peak* H-O-H pada 1635 yang menandakan perpecahan dari molekul air (Zhu et al., 2018). Dengan adanya gugus silika pada hasil FTIR, nanopartikel magnet terbukti telah berhasil di-*coating* dengan silika.



**Gambar 4.5** Grafik hasil pengujian FTIR pada nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 3ml dengan variasi fungsionalisasi PEG



**Gambar 4.6** Grafik hasil pengujian FTIR pada nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 4ml dengan variasi fungsionalisasi PEG

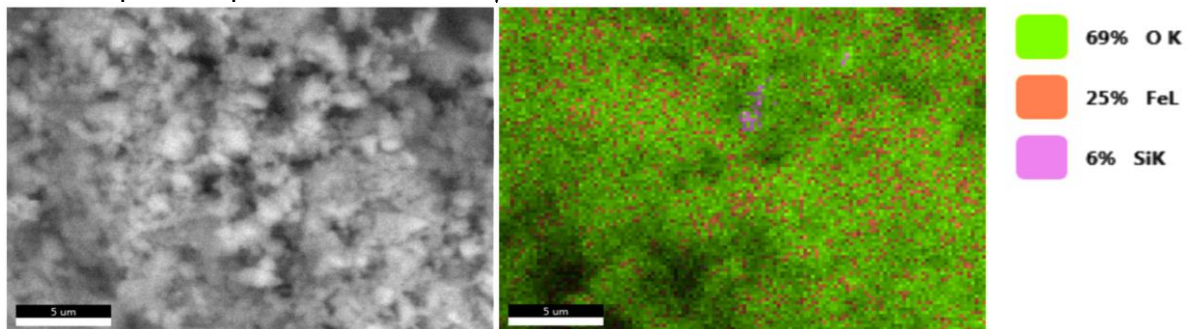


**Gambar 4.7** Grafik hasil pengujian FTIR pada nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 5ml dengan variasi fungsionalisasi PEG

Berdasarkan hasil FTIR yang dilakukan berdasarkan pada **Gambar 4.5**, **Gambar 4.6**, terdapat beberapa *peak* yang terdeteksi seiring dengan penambahan *polyethylene glycol*. Adapun *peak* yang muncul pada *wavenumber*  $1100\text{ cm}^{-1}$  dan  $1240\text{ cm}^{-1}$  merupakan gugus fungsi dari C-O, kemudian  $1465\text{ cm}^{-1}$ , dan  $1640\text{ cm}^{-1}$  merupakan gugus fungsi dari C-H, dan  $1350\text{ cm}^{-1}$  dan  $3440\text{ cm}^{-1}$  merupakan gugus fungsi dari O-H. Selain itu, terdapat *peak*  $2850\text{ cm}^{-1}$  dan  $2920\text{ cm}^{-1}$  yang menjadi bagian dari  $\text{CH}_x$  (Nandiyanto et al., 2019). Seiring dengan bertambahnya jumlah PEG, semakin besar juga intensitas dari *peak* yang terbentuk. Keterangan lebih lengkap dapat dilihat pada **Tabel 4.6**.

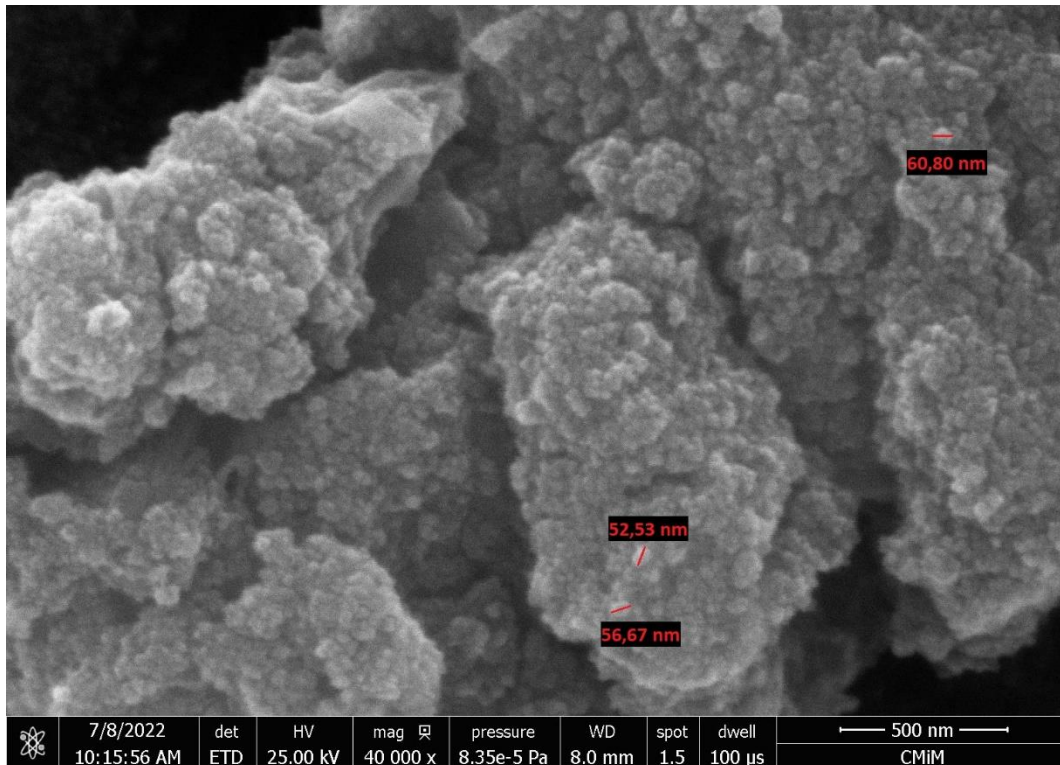
### 4.3 Hasil Uji *Scanning Electron Microscopy (SEM) Testing*

Dilakukan pengujian terhadap tiga sampel dengan ketentuan besi (III) oksida, adanya silika dengan TEOS 5ml, dan silika dengan TEOS 3ml dengan *functionalization polyethylene glycol* 3:5. Hasil dari pengujian SEM diukur pada **Gambar 4.9**, **Gambar 4.10**, dan **Gambar 4.11**. Hasil dari SEM menunjukkan bahwa partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  memiliki ukuran yang lebih kecil jika dibanding dengan ukuran partikel pada *coating silica*, maupun *coating silica with functionalization polyethylene glycol*. Adapun pada besi (III) oksida *coating silica with functionalization polyethylene glycol*, dilakukan juga SEM-EDX dan *mapping* untuk menentukan bagian dari unsur yang ada seperti pada **Gambar 4.8**. Hasil dari *mapping* kemudian dijadikan acuan untuk menentukan unsur yang ada pada nanopartikel seperti pada keterangan setiap gambar. Berdasarkan pengujian tersebut, terbukti bahwa *coating silica* maupun *functionalization polyethylene glycol* telah berhasil terbentuk pada partikel. Namun, pengujian tersebut tidak dapat menentukan ukuran partikel dikarenakan tidak terlihatnya bentuk partikel secara jelas. Maka dari itu, dilakukan pengujian *particle size analysis (PSA)* untuk dapat memproses data lebih lanjut.

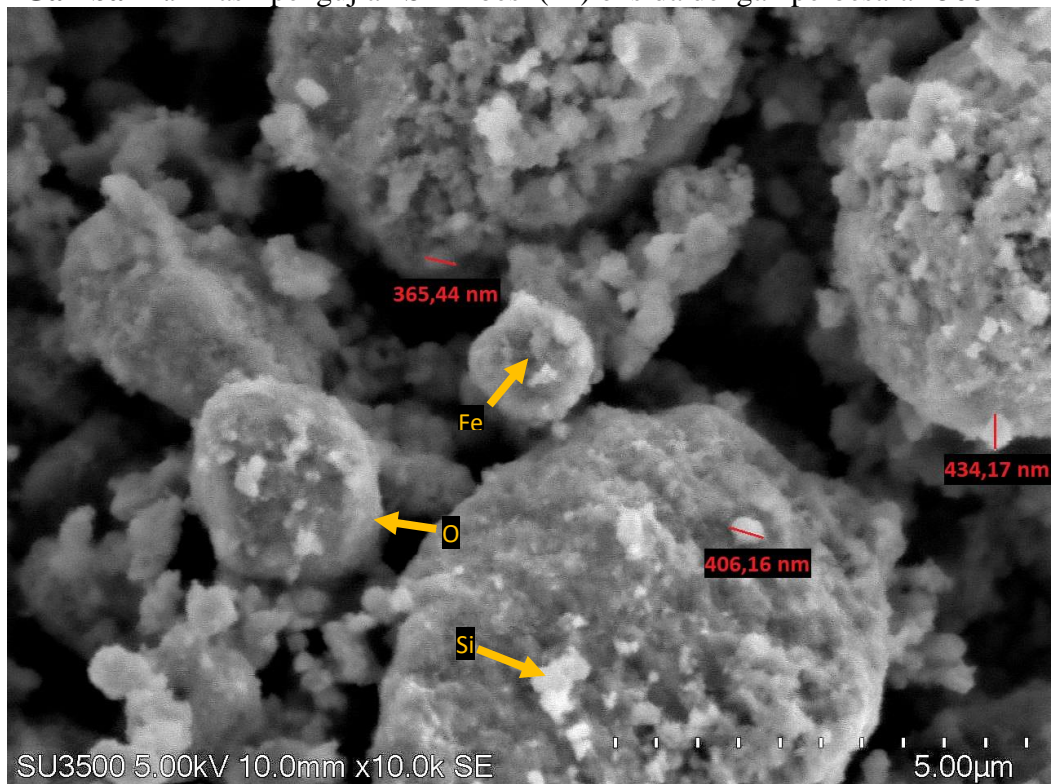


**Gambar 4.8** Hasil pengujian SEM mapping untuk nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 3ml disertai fungsionalisasi polietilen glikol 3:5 pada perbesaran  $5 \times 10^{-6}\text{m}$

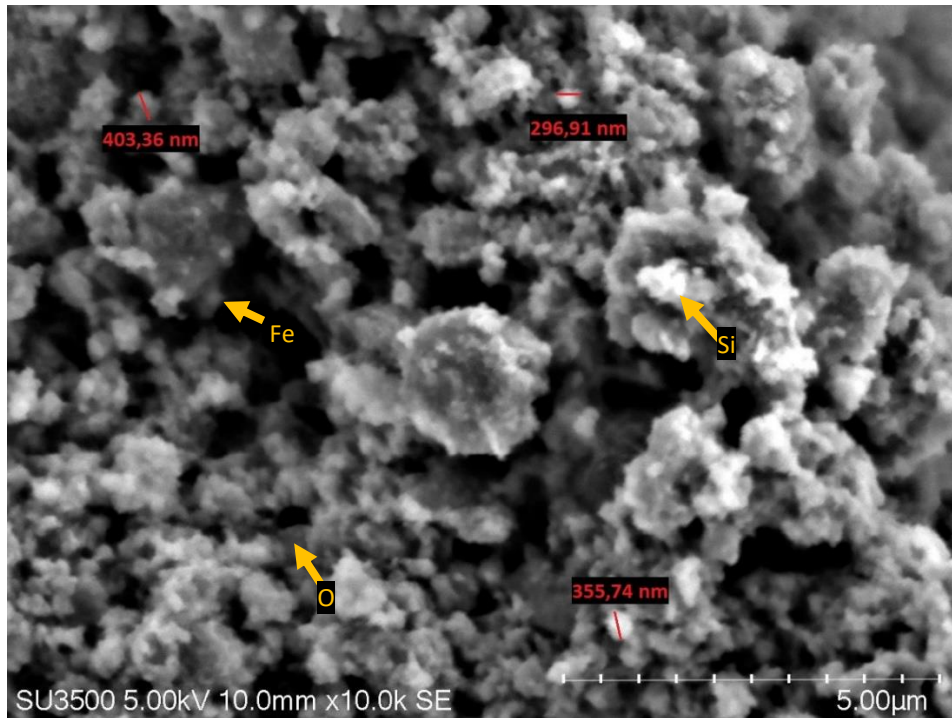




**Gambar 4.9** Hasil pengujian SEM besi (III) oksida dengan perbesaran 500 nm



**Gambar 4.10** Hasil pengujian SEM nanopartikel magnetit beslut silika dengan TEOS 5 ml dengan perbesaran  $5 \times 10^{-6} \text{m}$



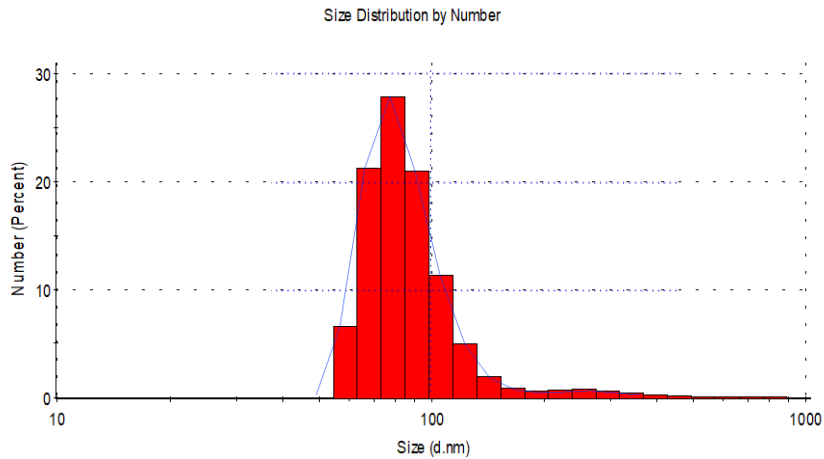
**Gambar 4.11** Hasil pengujian SEM nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 3ml disertai fungsionalisasi polietilen glikol 3:5 pada perbesaran  $5 \times 10^{-6} \text{m}$

#### 4.4 Hasil Uji *Particle Size Analysis* (PSA) Testing

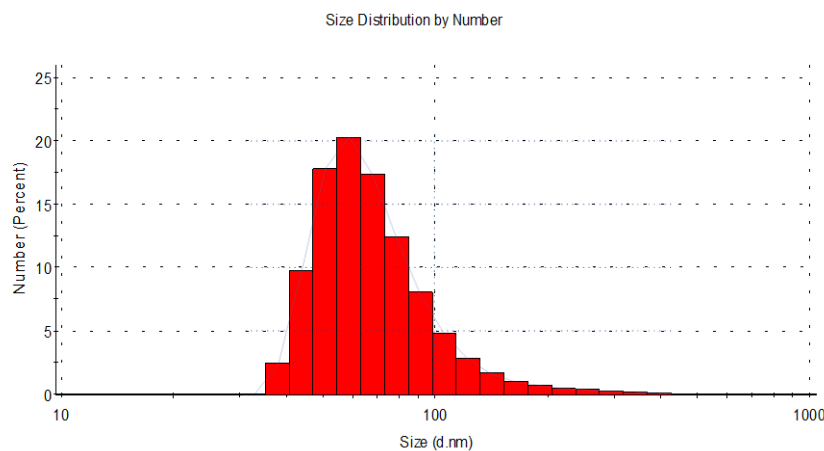
Dilakukan juga pengujian *Particle Size Analysis* (PSA) untuk melihat persebaran ukuran partikel pada larutan *ferrofluid*. Hasil dari penelitian tersebut terlihat pada **Tabel 4.5**. Pada hasil besi (III) oksida, terlihat lewat **Gambar 4.10** bahwa persebaran ukuran partikel tidak merata atau poli dispersi. Hal tersebut didukung oleh penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, bahwa sintesis besi (III) oksida cenderung memiliki ukuran tak merata dengan bentuk yang cenderung *hyperfine* pada pH 10 (Ramadan et al., 2011). Karena persebaran yang tak merata, dilakukannya *coating* untuk menjadi *template* sekaligus untuk memodifikasi permukaan dari partikel. Saat sudah dilakukannya pelapisan dan fungsionalisasi, nanopartikel menjadi monodisperse dengan persebaran ukuran yang lebih merata. Adapun partikel terkecil dan terbesar dengan nilai terkecil diperoleh oleh  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$  3ml-PEG 2:5 dengan nilai terkecil dan terbesar secara berurutan 37,84 nm dan 396,10 nm. Sedang partikel terbanyak dengan nilai terkecil serta persentase terbanyak diperoleh oleh  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$  3ml-PEG 3:5 dengan nilai 58,77 nm sebanyak 23%. Grafik dari hasil pengujian PSA dapat dilihat pada **Gambar 4.12**, **Gambar 4.13**, dan **Gambar 4.14**.

**Tabel 4.5** Tabel hasil Pengujian PSA

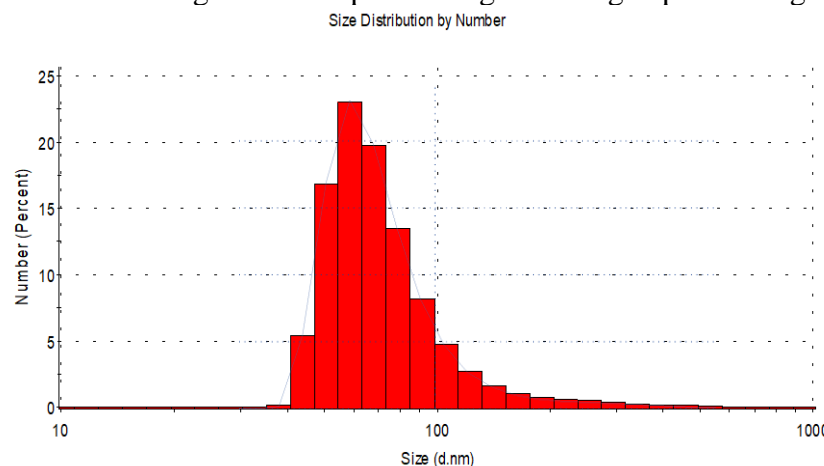
Jenis Material	Ukuran Terkecil	Ukuran Terbesar	Partikel Terbanyak	Persentase Partikel Terbanyak
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	58,70 nm	825,00 nm	78,82 nm	21%
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ 3ml-PEG 2:5	37,84 nm	396,10 nm	58,77 nm	20%
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ 3ml-PEG 3:5	37,84 nm	531,20 nm	58,77 nm	23%
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ 3ml-PEG 4:5	43,82 nm	458,70 nm	68,06 nm	20%
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ 4ml-PEG 2:5	43,82 nm	458,70 nm	58,77 nm	21%
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ 4ml-PEG 3:5	43,82 nm	396,10 nm	68,06 nm	21%
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ 4ml-PEG 4:5	43,86 nm	396,10 nm	58,77 nm	22%
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ 5ml-PEG 2:5	43,82 nm	458,70 nm	58,77 nm	23%
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ 5ml-PEG 3:5	43,82 nm	458,70 nm	68,06 nm	20%
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ 5ml-PEG 4:5	50,75 nm	531,20 nm	78,82 nm	21%



**Gambar 4.12** Grafik hasil pengujian PSA untuk nanopartikel magnetit



**Gambar 4.13** Grafik hasil pengujian PSA untuk nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 3ml serta fungsionalisasi polietilen glikol dengan perbandingan 3:5



**Gambar 4.14** Grafik hasil pengujian PSA untuk nanopartikel magnetit bersalut silika dengan TEOS 3ml serta fungsionalisasi polietilen glikol dengan perbandingan 2:5





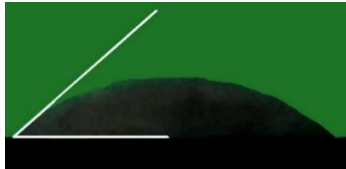
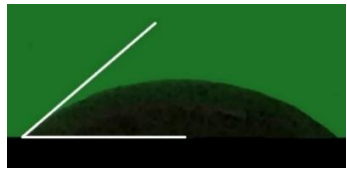







#### 4.5 Hasil Uji Hidrofobisitas

Setiap sampel kemudian diuji dengan hidrofobisitas untuk mengetahui kecenderungan sifatnya terhadap air. Uji hidrofobisitas juga dilakukan untuk menentukan *liquid carrier* pada aplikasi *ferrofluid*. Hasil dari uji hidrofobisitas tertera pada **Tabel 4.6**. Dari hasil pengujian



yang telah dilakukan, dapat dibuktikan bahwa seluruh sampel memiliki sifat hidrofilik. Adapun adanya silika pada permukaan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  membuat terdapatnya gugus silanol (Si-OH) yang memiliki sifat hidrofilik. Namun, lebih banyaknya intensitas dari gugus siloxane (Si-O-Si) membuat silika cenderung memberi sifat hidrofobik. Maka dari itu, semakin tinggi silika yang ditambahkan, semakin tinggi sudut yang dibentuk sehingga hasil semakin hidrofobik. Pada penambahan *functionalization polyethylene glycol*, terdapat dua bagian yang berinteraksi, yaitu bagian ekor dengan gugus alkil, serta bagian kepala dengan sifat polar. Sifat polar yang dimiliki kepala membuat PEG dapat meningkatkan hidrofilik nya jika bagian tersebut berada pada permukaan partikel. Sedang jika permukaan yang ada adalah bagian ekor, PEG akan cenderung memberi sifat hidrofobik. Karena hal tersebut, seluruh besi (III) oksida yang di-coating oleh silika cenderung memiliki sudut yang lebih besar dan cenderung membesar seiring penambahan silika. Sedang pada PEG, hal tersebut bergantung pada interaksi antara permukaan silika yang terbentuk dan jumlah PEG yang ditambahkan. Pada dasarnya, Si-OH akan cenderung bereaksi dengan bagian ekor, sehingga tersisa bagian kepala yang berinteraksi di permukaan sehingga memiliki sifat lebih. Sedang pada lainnya, terdapat bagian ekor yang muncul di permukaan partikel, sehingga partikel cenderung memiliki sifat lebih hidrofobik dibanding dengan besi (III) oksida.

**Tabel 4.6** Tabel hasil Pengujian *Hidrofobitas*

Gambar, Jenis Material, Sudut	Gambar, Jenis Material, Sudut	Gambar, Jenis Material, Sudut
 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 40,2°	-	-
 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ SiO}_2$ 3ml 42,6°	 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ SiO}_2$ 4ml 46,1°	 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ SiO}_2$ 5ml 67,3°
 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ SiO}_2$ 3ml PEG 2:5 41,6°	 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ SiO}_2$ 3ml PEG 3:5 40,5°	 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ SiO}_2$ 3ml PEG 4:5 41,5°
 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ SiO}_2$ 4ml PEG 2:5 38,4°	 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ SiO}_2$ 4ml PEG 3:5 32,5°	 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ SiO}_2$ 4ml PEG 4:5 53,4°
 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ SiO}_2$ 5ml PEG 2:5 56,1°	 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ SiO}_2$ 5ml PEG 3:5 39,7°	 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ SiO}_2$ 5ml PEG 4:5 39,1°

#### 4.6 Hasil Uji *Surface Tension*

Telah dilakukan pengujian *surface tension* dengan hasil seperti pada **Tabel 4.7**. Perlu diketahui bahwa nilai *surface tension* dari air adalah 72 mN/m. Pada hasil tersebut, dapat dilihat bahwa mencampurkan senyawa akan menurunkan nilai *surface tension* dari pelarutnya. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Besha et al., 2018) yang mana penambahan surfaktan telah menurunkan nilai *surface tension* dari larutan karena penyerapan interfasa cair-gas. Penyerapan yang terjadi pada permukaan surfaktan membuat semakin hidrofilik nanopartikel, semakin besar nilai *surface tension* dari larutan. Dari pengujian tersebut, dapat dilihat bahwa Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub> 5ml-PEG 2:5 memiliki nilai *surface tension* paling rendah, sedang Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub> 4ml-PEG 3:5 memiliki nilai *surface tension* tertinggi. Dengan interaksi tersebut, dapat disimpulkan bahwa Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub> 4ml-PEG 3:5 berkemungkinan besar untuk mempertahankan ikatannya dengan air saat terkena tekanan, sedang Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub> 5ml-PEG 2:5 cenderung untuk terpisah saat terkena tekanan.

**Tabel 4.7** Tabel hasil Pengujian *Surface Tension*

Jenis Material	<i>Surface Tension</i> (mN/m)
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	61,1
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 3ml-PEG 2:5	63,1
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 3ml-PEG 3:5	63,8
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 3ml-PEG 4:5	63,4
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 4ml-PEG 2:5	64,3
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 4ml-PEG 3:5	64,4
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 4ml-PEG 4:5	62,8
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 5ml-PEG 2:5	61,9
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 5ml-PEG 3:5	64,2
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 5ml-PEG 4:5	64,3

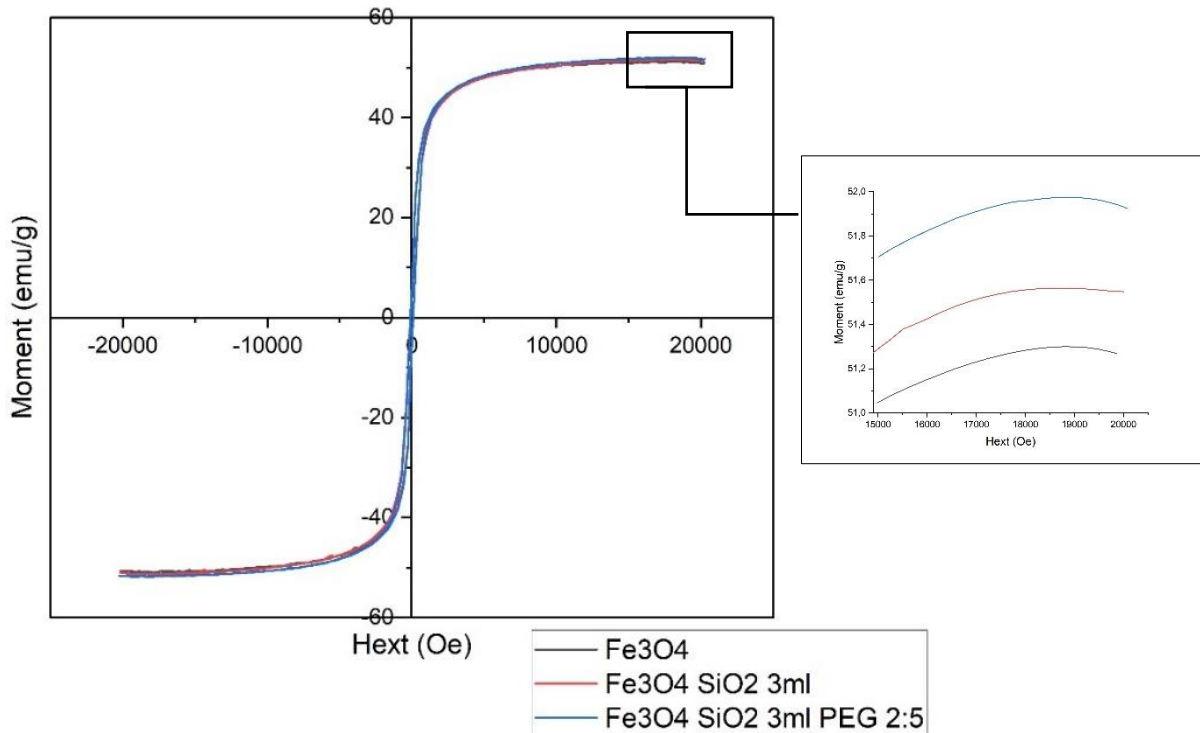
#### 4.7 Hasil Uji *Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Testing*

Perbandingan hasil VSM berdasarkan murni besi (III) oksida, adanya silika, hingga *functionalization polyethylene glycol* tertera pada **Tabel 4.8**. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, diperoleh hasil momen magnet tertinggi pada Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, kemudian Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang telah di-*coating* silika dengan variasi TEOS 3ml, dan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang telah di-*coating* silika dengan variasi TEOS 3ml kemudian di-*functionalization polyethylene glycol* dengan perbandingan 2:5. **Gambar 4.15** mewakili seluruh bentuk dari hasil *M-H hysteresis loop* nanopartikel magnet yang diuji. Jika dibandingkan berdasarkan dengan kadar silika, tidak ditemukannya tren dari medan magnet yang terjadi. Namun jika dibandingkan dengan PEG, akan terlihat bahwa sifat magnet kerap menurun seiring dengan bertambahnya perbandingan penambahan PEG. Hal tersebut membuktikan bahwa penambahan lapisan pada magnet tidak selalu menurunkan momen dari magnet tersebut. Hal tersebut juga terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh (Kunzmann et al., 2011) yang mana penambahan ukuran nanopartikel tidak selalu mengurangi momen magnet yang terjadi.

**Tabel 4.8** Tabel hasil Pengujian VSM

Jenis Material	Momen magnet (emu/g)
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	51,19
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 3ml	51,55
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 3ml PEG 2:5	51,96
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 3ml PEG 3:5	50,39
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 3ml PEG 4:5	49,53
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 4ml PEG 2:5	51,93
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 4ml PEG 3:5	50,56
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 4ml PEG 4:5	49,78

Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 5ml PEG 2:5	43,18
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 5ml PEG 3:5	42,95
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 5ml PEG 4:5	41,99



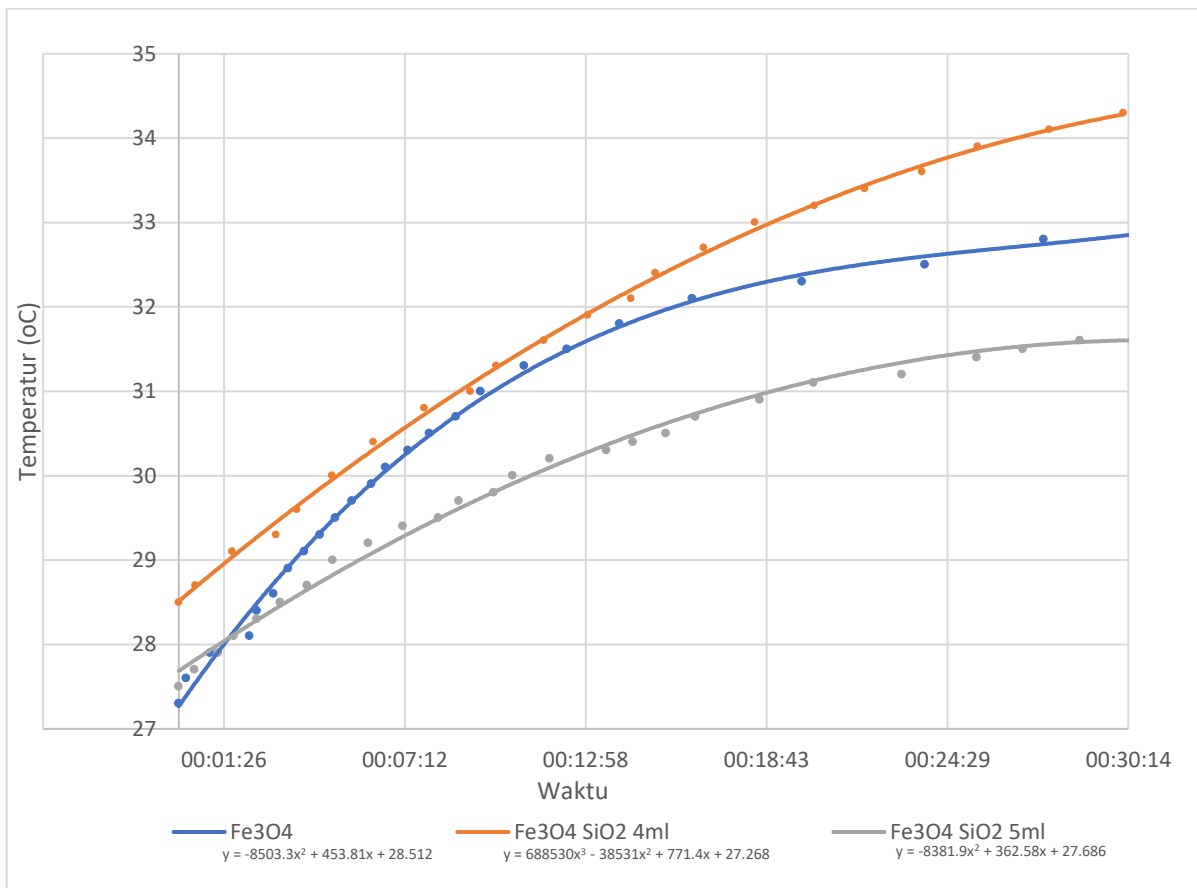
**Gambar 4.15** Kurva histersis dari hasil pengujian magnetit, magnetit bersalut silika 3ml, dan magnetit bersalut silika 3ml serta fungsionalisasi PEG 2:5

#### 4.8 Pengujian Pengaruh Magnet terhadap Temperatur

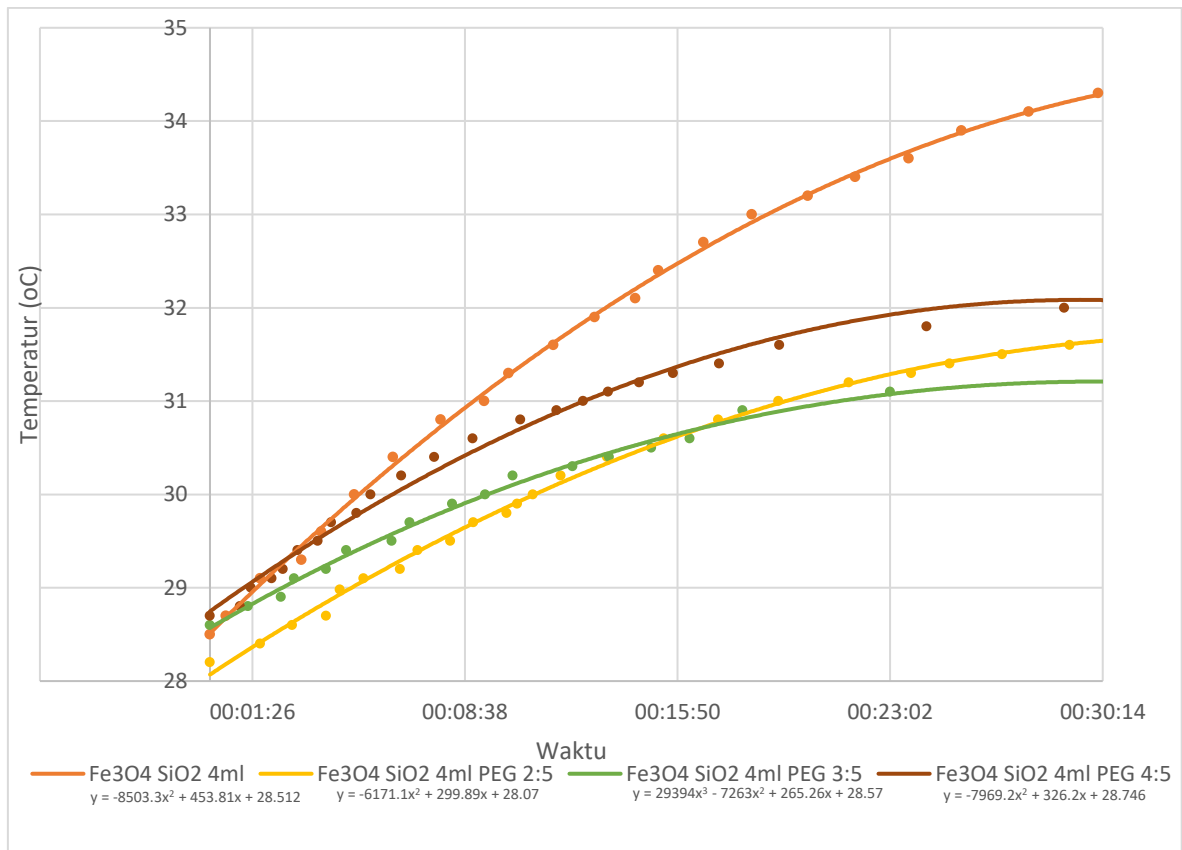
Pengujian pengaruh magnet terhadap temperatur dilakukan selama tiga puluh menit pada aruh *direct current* (DC) dengan arus 3A dan tegangan 0,6V. Temperatur mulainya pertikel adalah 27-28 °C. Temperatur tersebut merupakan awal mula sampel terkena arus. Hasil dari pengujian yang dilakukan tertera pada **Tabel 4.9**. Perubahan nilai SAR dipengaruhi oleh tiga hal, yaitu ketebalan pelapisan mengurangi nilai SAR dikarenakan mengurangi gerakan Brownian dari partikel, nilai hidrofobisitas yang ada pada permukaan (semakin hidrofilik, semakin baik), dan banyaknya arus yang terpapar setelah tereduksi oleh adanya *coating* dan *traeatment* lainnya pada permukaan (Gonçalves et al., 2021). Secara nilai SAR, magnetit bersalut silika sebesar 3ml dengan fungsionalisasi PEG 3:5 memiliki nilai SAR tertinggi sebesar 93,06 mW/g. Hal tersebut dapat disebabkan oleh hidrofobisitas nanopartikel yang masih tergolong baik dan juga ketebalan pelapisannya cenderung kecil. Secara capaian temperatur akhir, terlihat bahwa magnetit bersalut silika sebesar 4ml dapat mencapai 34.3 °C. Walau Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> SiO<sub>2</sub> 4ml memiliki permukaan yang tidak terlalu hidrofilik, lapisan yang ada pada nanopartikel tersebut tidak terlalu tebal sehingga arus yang masuk lebih mudah diterima oleh nanopartikel. Adapun grafik kenaikan waktu banding temperatur dari penelitian tersebut dapat dilihat pada **Gambar 4.16**, **Gambar 4.17**, dan **Gambar 4.18**.

**Tabel 4.9** Tabel hasil Pengujian Pengaruh Magenet Terhadap Temperatur

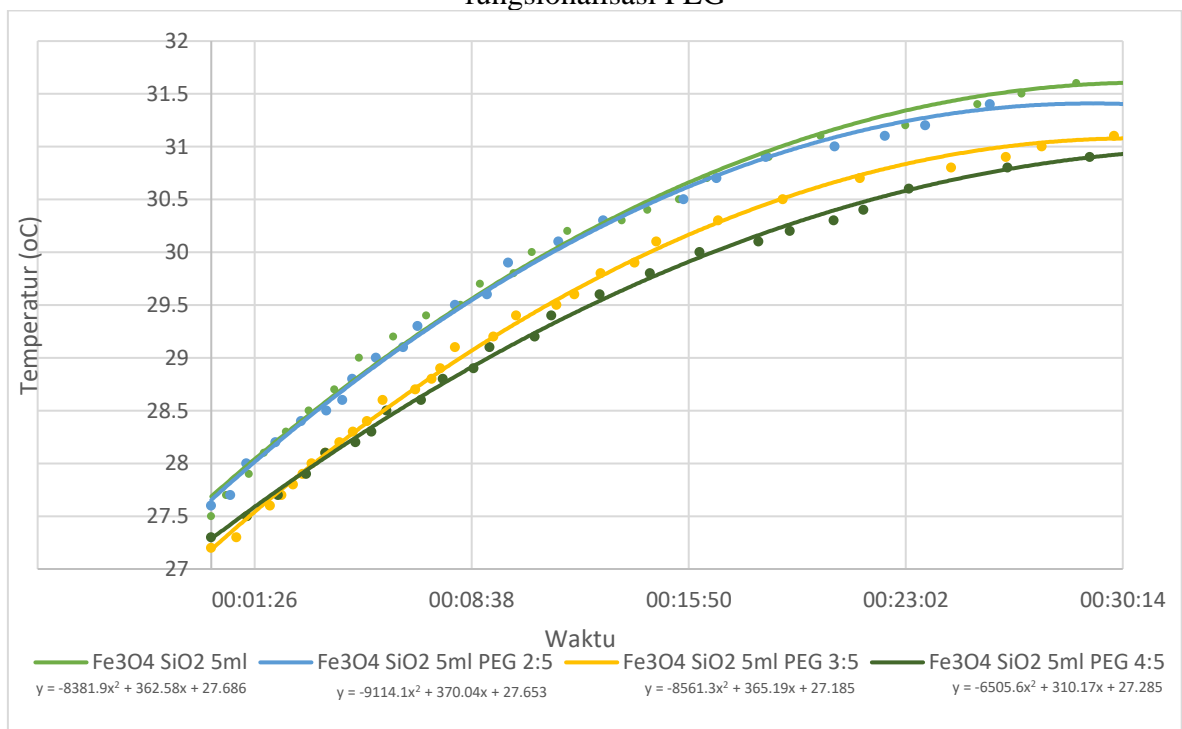
Jenis Material	Nilai SAR	Temperatur akhir
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	141.49 mW/g	32.9 °C
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 4ml	72.70 mW/g	34.3 °C
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 5ml	89.09 mW/g	31.8 °C
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 3ml PEG 2:5	87.63 mW/g	32.2 °C
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 3ml PEG 3:5	93.06 mW/g	31.8 °C
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 3ml PEG 4:5	61.83 mW/g	30.5 °C
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 4ml PEG 2:5	62.83 mW/g	31.7 °C
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 4ml PEG 3:5	52.67 mW/g	31.2 °C
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 4ml PEG 4:5	69.11 mW/g	32.2 °C
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 5ml PEG 2:5	76.73 mW/g	31.5 °C
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 5ml PEG 3:5	76.73 mW/g	30.9 °C
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> 5ml PEG 4:5	63.33 mW/g	31.0 °C



**Gambar 4.16** Grafik Hasil Pengujian Pengaruh Magnet Terhadap Temperatur pada nanopartikel magnetit, nanopartikel magnetit bersalut silika dengan kandungan TEOS 4ml, dan nanopartikel magnetit bersalut silika dengan kandungan TEOS 5ml.



**Gambar 4.17** Grafik Hasil Pengujian Pengaruh Magnet Terhadap Temperatur pada nanopartikel magnetit bersalut silika dengan kandungan TEOS 4ml dengan dan tanpa fungsionalisasi PEG



**Gambar 4.18** Grafik Hasil Pengujian Pengaruh Magnet Terhadap Temperatur pada nanopartikel magnetit bersalut silika dengan kandungan TEOS 5ml dengan dan tanpa fungsionalisasi PEG.

Setelah dilakukannya semua pengujian, didapatkan hasil nanopartikel yang jika dibandingkan dengan target yang telah ditentukan akan terlihat seperti pada tabel berikut. Secara karakteristik, material terbukti berpotensi dalam aplikasinya dalam pengobatan kanker melalui terapi hipertermia. Diambil material dengan temperatur akhir terbaik dan ditemukannya nanopartikel magnetit bersalut silika dengan kandungan TEOS 3ml dengan fungsionalisasi PEG 2:5 seperti pada **Tabel 4.10**. Walau demikian, memang perlu pengembangan lebih lanjut terkait pemerataan bentuk kristal dan ukuran partikel. Adapun hal yang masih perlu diperhatikan adalah bagaimana mengintegrasikan frekuensi medan magnet yang diberikan terhadap temperatur.

**Tabel 4.10** Perbandingan target dan hasil ferrofluid nanopartikel magnet untuk aplikasi pengobatan kanker terapi hipertermia

	Parameter	Target	Hasil Eksperimen Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> 3ml-PEG 2:5.
Ferrofluid	Ukuran partikel	10-200 nm	58,77nm (terbanyak) 37,84nm (terkecil) 396,10nm (terbesar)
	Struktur kristal	Kubik	Kubik
	Morfologi partikel	Sferikal	Sferikal
	Sifat magnet	Superparamagnetik	Superparamagnetik
	Medan koersivitas	0 Oe	0 Oe
Aplikasi Terapi Hipertermia	Histeresis	Tidak ada	Tidak ada
	Menghasilkan panas saat terkena arus magnet	Ya	Ya
	Temperatur	41-43°C (hipertermia sedang) >45°C (termoblast)	32,9°C
	Frekuensi medan magnet	$\leq 4,85 \times 10^8 \text{ A/m s}$	3A 0,6V arus DC

---

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Telah didapat kesimpulan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dengan rincian sebagai berikut

1. Penyalutan silika lewat TEOS pada nanopartikel magnetit disertai fungsionalisasi polietilen glikol ( $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2\text{-PEG}$ ) telah berhasil dilakukan dengan bentuk kubik dan ukuran kristal 11,61-12,30 nm tanpa pengaruh pelapisan terhadap ukuran kristal. Bentuk partikel yang teridentifikasi adalah bola dengan modus ukuran partikel setiap variasi 58,77-78,22 nm. Modus ukuran terkecil diperoleh  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$  3ml-PEG 2:5 dengan nilai terkecil, terbesar, dan modus secara berurutan 37,84 nm, 396,10 nm, dan 58,77 nm (20%).
2.  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2\text{-PEG}$  teridentifikasi hidrofilik karena sudut yang terbentuk berkisar pada  $39,1\text{-}56,1^\circ$  yang mana kurang dari  $90^\circ$ . Sudut terkecil diperoleh oleh  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$  3ml-PEG 4:5. Nilai *surface tension* berkisar pada 61,9-64,4 mN/m dengan nilai tertinggi  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$  4ml-PEG 3:5. Hidrofobisitas cenderung memiliki korelasi dengan *surface tension* yang mana semakin hidrofilik (sudut semakin kecil), nilai *surface tension* cenderung semakin besar.
3.  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2\text{-PEG}$  terbukti memiliki sifat superparamagnetik dengan nilai momen magnet 41,99-51,96 emu/g yang mana semakin tebal pelapisan, nilai momen cenderung semakin kecil. Nilai momen magnet terbesar diperoleh oleh  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$  3ml-PEG 2:5.
4.  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2\text{-PEG}$  terbukti berpotensi untuk digunakan sebagai pengobatan kanker terapi hipertermia. Melalui arus DC sebesar 3A 0,6V selama 30 menit,  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$  3ml-PEG 2:5 dapat mencapai temperatur akhir tertinggi dengan nilai  $32,2^\circ\text{C}$  dan nilai SAR sebesar 87,62 mW/g.

### 5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian tersebut agar dapat dilakukan dengan lebih baik kedepannya adalah sebagai berikut

1. Dilakukannya pengadukan dengan radius per sekon yang lebih terukur.
2. Diperlukannya penambahan daya guna meningkatkan arus yang diperoleh.
3. Diperlukannya alat *generator* AC yang lebih terintegrasi.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



---

DAFTAR PUSTAKA

- Agotegaray, M. A., & Lassalle, V. L. (2017). *Silica-coated Magnetic Nanoparticles An Insight into Targeted Drug Delivery and Toxicology*. <http://www.springer.com/series/8898>
- Alcatara, D., & Josephson, L. (2012). Application of Inorganic Nanoparticles for Diagnosis Based on MRI. In *Nanobiotechnology: Inorganic Nanoparticles vs Organic Particles* (Vol. 4, pp. 233–246). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415769-0.00011-X>
- Antarnusa, G., & Suharyadi, E. (2020). A synthesis of polyethylene glycol (PEG)-coated magnetite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and their characteristics for enhancement of biosensor. *Materials Research Express*, 7(5). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab8bef>
- Aphesteguy, J. C., Kurlyandskaya, G. V., De Celis, J. P., Safronov, A. P., & Schegoleva, N. N. (2015). Magnetite nanoparticles prepared by co-precipitation method in different conditions. *Materials Chemistry and Physics*, 161, 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.05.044>
- Besha, A. T., Bekele, D. N., Naidu, R., & Chadalavada, S. (2018). Recent advances in surfactant-enhanced In-Situ Chemical Oxidation for the remediation of non-aqueous phase liquid contaminated soils and aquifers. *Environmental Technology and Innovation*, 9, 303–322. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.08.004>
- Bukit, N., Frida, E., Simamora, P., & Sinaga, T. (2015). Synthesis Of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles Of Iron Sand Coprecipitation Method With Polyethylene Glycol 6000. *Chemistry and Materials Research*, 7(7), 110–116.
- Chae, H. S., Kim, S. D., Piao, S. H., & Choi, H. J. (2016). Core-shell structured Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> nanoparticles fabricated by sol–gel method and their magnetorheology. *Colloid and Polymer Science*, 294(4), 647–655. <https://doi.org/10.1007/s00396-015-3818-y>
- Cornell, R. M., & Schwertmann, U. (2003). *The iron oxides : structure, properties, reactions, occurrences, and uses*. Wiley-VCH.
- Dimitrov, I., & Tsvetanov, C. B. (2012). Oligomeric Poly(ethylene oxide)s: Functionalized Poly(ethylene glycol)s. PEGylation. In *Polymer Science: A Comprehensive Reference, 10 Volume Set* (Vol. 4, pp. 679–693). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00101-1>
- Fatima, H., Charinpanitkul, T., & Kim, K. S. (2021). Fundamentals to apply magnetic nanoparticles for hyperthermia therapy. *Nanomaterials*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/nano11051203>
- Gali-Muhtasib, H., & Chouaib, R. (2020). *Nanoparticle Drug Delivery Systems for Cancer Treatment*. <https://doi.org/10.4324/9780429341250>
- Giustini, A. J., Petryk, A. A., Cassim, S. M., Tate, J. A., Baker, I., & Hoopes, P. J. (2010). Magnetic Nanoparticle Hyperthermia in Cancer Treatment. *Nano LIFE*, 01(01n02), 17–32. <https://doi.org/10.1142/S1793984410000067>
- Gonçalves, J., Nunes, C., Ferreira, L., Cruz, M. M., Oliveira, H., Bastos, V., Mayoral, Á., Zhang, Q., & Ferreira, P. (2021). Coating of magnetite nanoparticles with fucoidan to enhance magnetic hyperthermia efficiency. *Nanomaterials*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/nano11112939>
- Grillone, A., & Ciofani, G. (2017). Magnetic Nanotransducers in Biomedicine. *Chemistry - A European Journal*, 23(64), 16109–16114. <https://doi.org/10.1002/chem.201703660>
- International Agency for Research on Cancer. (2020). *The Global Cancer Observatory: Indonesia*. <https://gco.iarc.fr/today/data/factsheets/populations/360-indonesia-fact->

sheets.pdf

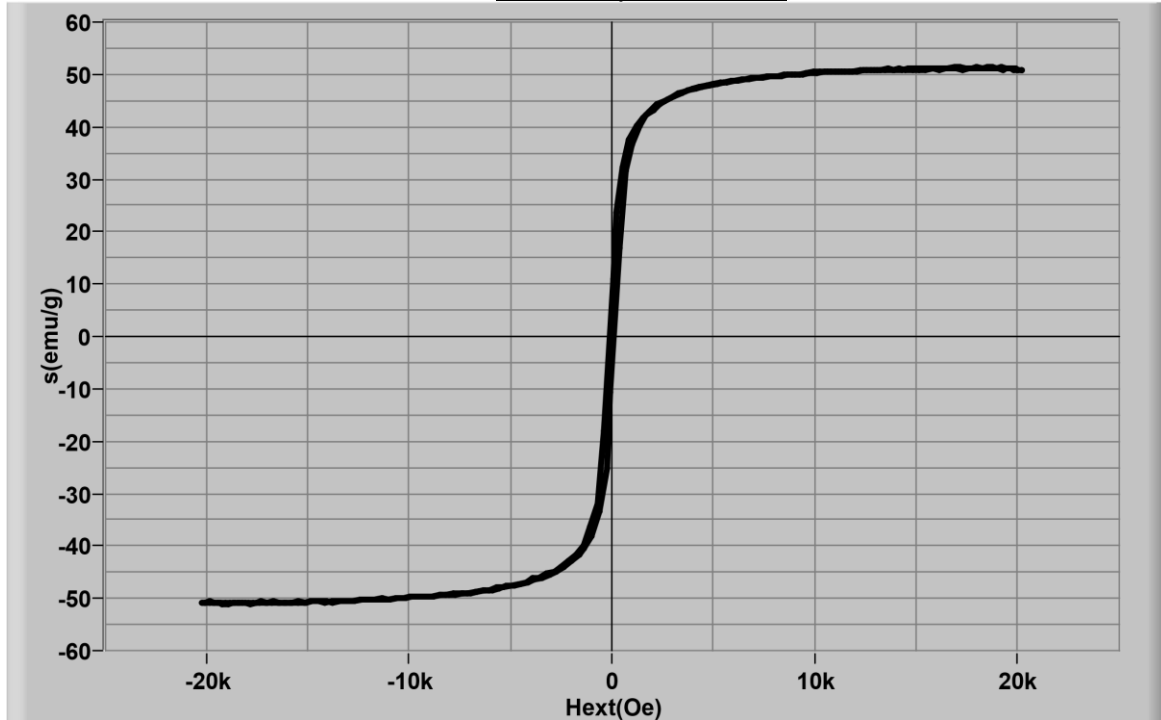
- Kralj, S., Drofenik, M., & Makovec, D. (2011). Controlled surface functionalization of silica-coated magnetic nanoparticles with terminal amino and carboxyl groups. *Journal of Nanoparticle Research*, 13(7), 2829–2841. <https://doi.org/10.1007/s11051-010-0171-4>
- Kumar, C. S. S. R., & Mohammad, F. (2011). Magnetic nanomaterials for hyperthermia-based therapy and controlled drug delivery. In *Advanced Drug Delivery Reviews* (Vol. 63, Issue 9, pp. 789–808). <https://doi.org/10.1016/j.addr.2011.03.008>
- Kumar, V., Abbas, A. K., & Aster, J. C. (2018). *Robbins Basic Pathology* (10th ed.). Elsevier.
- Kunzmann, A., Andersson, B., Vogt, C., Feliu, N., Ye, F., Gabrielsson, S., Toprak, M. S., Buerki-Thurnherr, T., Laurent, S., Vahter, M., Krug, H., Muhammed, M., Scheynius, A., & Fadeel, B. (2011). Efficient internalization of silica-coated iron oxide nanoparticles of different sizes by primary human macrophages and dendritic cells. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 253(2), 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2011.03.011>
- Maurice, V., Georgelin, T., Siaugue, J. M., & Cabuil, V. (2009). Synthesis and characterization of functionalized core-shell  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(10), 1408–1413. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2009.02.051>
- Meng, C., Zhikun, W., Qiang, L., Chunling, L., Shuangqing, S., & Songqing, H. (2018). Preparation of amino-functionalized  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{mSiO}_2$  core-shell magnetic nanoparticles and their application for aqueous  $\text{Fe}^{3+}$  removal. *Journal of Hazardous Materials*, 341, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.062>
- Mirzaei, M., Zarch, M. B., Darroudi, M., Sayyadi, K., Tahmoures Keshavarz, S., Sayyadi, J., Fallah, A., & Maleki, H. (n.d.). *Silica Mesoporous Structures: Effective Nanocarriers in Drug Delivery and Nanocatalysts*. <https://doi.org/10.3390/app10217533>
- Mishra, V., Kesharwani, P., Mohd. Cairul Iqbal bin Mohd. Amin, & Iyer, A. (2017). *Nanotechnology-based approaches for targeting and delivery of drugs and genes*.
- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. (2019). How to read and interpret ftir spectroscopy of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 97–118. <https://doi.org/10.17509/ijost.v4i1.15806>
- Narayanan, T. N., Reena Mary, A. P., Anas Swalih, P. K., Sakthi Kumar, D., Makarov, D., Albrecht, M., Puthumana, J., Anas, A., & Anantharaman, M. R. (2011). Enhanced Biocompatibility of ferrofluids of self-assembled superparamagnetic iron oxide-silica core-shell nanoparticles. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11(3), 1958–1967. <https://doi.org/10.1166/jnn.2011.3578>
- 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>
- Peralta, M. E., Jadhav, S. A., Magnacca, G., Scalarone, D., Mártire, D. O., Parolo, M. E., & Carlos, L. (2019). Synthesis and in vitro testing of thermoresponsive polymer-grafted core-shell magnetic mesoporous silica nanoparticles for efficient controlled and targeted drug delivery. *Journal of Colloid and Interface Science*, 544, 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.02.086>
- Permana, B., Saragi, T., Saputri, M., Safriani, L., Rahayu, I., & Risdiana. (2017). SINTESIS NANOPARTIKEL MAGNETIK DENGAN METODE KOPRESIPITASI. *Jurnal Material Dan Energi Indonesia*, 7.
- Praseptiangga, D., Zahara, H. L., Widjanarko, P. I., Made Joni, I., & Panatarani, C. (2020). Preparation and FTIR spectroscopic studies of  $\text{SiO}_2\text{-ZnO}$  nanoparticles suspension for the development of carrageenan-based bio-nanocomposite film. *AIP Conference*

- Proceedings*, 2219. <https://doi.org/10.1063/5.0003434>
- Pucci, C., Martinelli, C., & Ciofani, G. (2019). Innovative approaches for cancer treatment: Current perspectives and new challenges. In *ecancermedicalscience* (Vol. 13). ecancer Global Foundation. <https://doi.org/10.3332/ecancer.2019.961>
- Ramadan, W., Kareem, M., Hannoyer, B., & Saha, S. (2011). Effect of pH on the structural and magnetic properties of magnetite nanoparticles synthesised by co-precipitation. *Advanced Materials Research*, 324(August), 129–132. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.324.129>
- Reczyńska, K., Marszałek, M., Zarzycki, A., Reczyński, W., Kornaus, K., Pamuła, E., & Chrzanowski, W. (2020). Superparamagnetic iron oxide nanoparticles modified with silica layers as potential agents for lung cancer treatment. *Nanomaterials*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/nano10061076>
- Santra, S., Tapeç, R., Theodoropoulou, N., Dobson, J., Hebard, A., & Tan, W. (2001). Synthesis and characterization of silica-coated iron oxide nanoparticles in microemulsion: The effect of nonionic surfactants. *Langmuir*, 17(10), 2900–2906. <https://doi.org/10.1021/la0008636>
- Schrader, A. M., Monroe, J. I., Sheil, R., Dobbs, H. A., Keller, T. J., Li, Y., Jain, S., Shell, M. S., Israelachvili, J. N., & Han, S. (2018). Surface chemical heterogeneity modulates silica surface hydration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(12), 2890–2895. <https://doi.org/10.1073/pnas.1722263115>
- Sembiring, S., & Simanjuntak, W. (2015). Silika Sekam Padi; Potensinya Sebagai Bahan Baku Keramik Industri. *Plantaxia*, 2–4.
- Taib, N. I., Woodward, R. C., & Pierre, T. G. S. (2022). The Effect of Silica Shell Thickness on Magnetic and Proton Relaxometric Properties: Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@mSiO<sub>2</sub> Nanoparticles. *IEEE Transactions on Magnetics*, 58(2). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3082924>
- Tang, F., Li, L., & Chen, D. (2012). Mesoporous silica nanoparticles: Synthesis, biocompatibility and drug delivery. *Advanced Materials*, 24(12), 1504–1534. <https://doi.org/10.1002/adma.201104763>
- Thirupathi, R., Mishra, S., Ganapathy, M., Padmanabhan, P., & Gulyás, B. (2017). Nanoparticle functionalization and its potentials for molecular imaging. *Advanced Science*, 4(3). <https://doi.org/10.1002/advs.201600279>
- Vilas-Boas, V., Carvalho, F., & Espiña, B. (2020). Magnetic hyperthermia for cancer treatment: Main parameters affecting the outcome of in vitro and in vivo studies. *Molecules*, 25(12), 1–30. <https://doi.org/10.3390/molecules25122874>
- Virgina Mira, P., & Mahmudin, L. (2018). SINTESIS DAN ANALISIS SIFAT MAGNETIK NANOPARTIKEL MAGNETIT (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) BERBASIS PASIR BESI. *Jurnal Universitas Tadulako*, 17(2).
- Wu, Y., Lu, Z., Li, Y., Yang, J., & Zhang, X. (2020). Surface modification of iron oxide-based magnetic nanoparticles for cerebral theranostics: Application and prospection. In *Nanomaterials* (Vol. 10, Issue 8, pp. 1–21). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/nano10081441>
- Yao, Y., Zhou, Y., Liu, L., Xu, Y., Chen, Q., Wang, Y., Wu, S., Deng, Y., Zhang, J., & Shao, A. (2020). Nanoparticle-Based Drug Delivery in Cancer Therapy and Its Role in Overcoming Drug Resistance. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2020.00193>
- Zhu, N., Ji, H., Yu, P., Niu, J., Farooq, M. U., Akram, M. W., Udego, I. O., Li, H., & Niu, X. (2018). Surface modification of magnetic iron oxide nanoparticles. In *Nanomaterials* (Vol. 8, Issue 10). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/nano8100810>

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

LAMPIRAN

Test Report of VSM



Sample Number:AA-I\_2

Test Date:6/21/2022

Test Time:14:31:8

Hmax=1610 kA/m (20.228 kOe)

Temperature=22.9 ?

Hk(Mr90%)=0 A/m (0.00 Oe)

ss=51.52 Am<sup>2</sup>/kg (51.52 emu/g) sr=4.88 Am<sup>2</sup>/kg (4.88 emu/g) Mr/Ms=0.095

jHc=6.3 kA/m (79.08 Oe) Loop Area=3.6 (kOe.emu/g)

No.	Time s	Weight g	IFT mN/m	Avg. mN/m	St.-Dev mN/m	Temp. degC
1	61	0,9112	69,7			
<b>Results</b>						
IFT (mN/m)	69.7					
Temp. (degC)	--					
<b>End</b>						
Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	22. JUN 2022					
Time	14:23:26					
Id	1					
Method	Tear-Off M.					
<b>Parameters</b>						
Correction	H&J					
Density (g/ml)	0.998					
Stage Speed (%)	25					
Acc. of Gravity (m/s^2)	9.807					
No.	Time s	Weight g	IFT mN/m	Avg. mN/m	St.-Dev mN/m	Temp. degC
1	57	0,7137	53,5			
<b>Results</b>						
IFT (mN/m)	53.5					
Temp. (degC)	--					
<b>End</b>						
Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	22. JUN 2022					
Time	14:26:08					
Id	1					
Method	Tear-Off M.					
<b>Parameters</b>						
Correction	H&J					
Density (g/ml)	0.998					
Stage Speed (%)	25					
Acc. of Gravity (m/s^2)	9.807					
No.	Time s	Weight g	IFT mN/m	Avg. mN/m	St.-Dev mN/m	Temp. degC
1	55	0,7166	53,8			
<b>Results</b>						
IFT (mN/m)	53.8					
Temp. (degC)	--					
<b>End</b>						
Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	22. JUN 2022					
Time	14:29:16					
Id	1					
Method	Tear-Off M.					
<b>Parameters</b>						
Correction	H&J					
Density (g/ml)	0.998					
Stage Speed (%)	25					
Acc. of Gravity (m/s^2)	9.807					
No.	Time s	Weight g	IFT mN/m	Avg. mN/m	St.-Dev mN/m	Temp. degC
1	60	0,9242	70,8			
<b>Results</b>						
IFT (mN/m)	70.8					
Temp. (degC)	--					
<b>End</b>						
Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	22. JUN 2022					
Time	14:32:04					
Id	1					

standard duplo

2801 SIMPIO

Khollilah B

2801 DUPLO

Khollilah B

2798 SIMPIO

Khollilah A1

Method Tear-Off M.

Parameters

Correction H&J  
 Density (g/ml) 0.998  
 Stage Speed (%) 25  
 Acc. of Gravity (m/s<sup>2</sup>) 9.807

No.	Time	Weight	IFT	Avg.	St.-Dev	Temp.
	s	g	mN/m	mN/m	mN/m	degC
1	61	0,9266	71,0			

2798 DUPLO

Khollilah A1

Results

IFT (mN/m) 71.0  
 Temp. (degC) --

End

Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 14:35:15  
 Id 1

Method Tear-Off M.

Parameters

Correction H&J  
 Density (g/ml) 0.998  
 Stage Speed (%) 25  
 Acc. of Gravity (m/s<sup>2</sup>) 9.807

No.	Time	Weight	IFT	Avg.	St.-Dev	Temp.
	s	g	mN/m	mN/m	mN/m	degC
1	65	0,8137	61,7			

2792 SIMPLO

Lehonnita AC1

Results

IFT (mN/m) 61.7  
 Temp. (degC) --

End

Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 14:38:17  
 Id 1

Method Tear-Off M.

Parameters

Correction H&J  
 Density (g/ml) 0.998  
 Stage Speed (%) 25  
 Acc. of Gravity (m/s<sup>2</sup>) 9.807

No.	Time	Weight	IFT	Avg.	St.-Dev	Temp.
	s	g	mN/m	mN/m	mN/m	degC
1	60	0,8170	61,9			

2792 DUPLO

Lehonnita ~~AE2~~ AC1<sup>ae</sup>

Results

IFT (mN/m) 61.9  
 Temp. (degC) --

End

Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 14:41:45  
 Id 1

Method Tear-Off M.

Parameters

Correction H&J  
 Density (g/ml) 0.998  
 Stage Speed (%) 25  
 Acc. of Gravity (m/s<sup>2</sup>) 9.807

No.	Time	Weight	IFT	Avg.	St.-Dev	Temp.
	s	g	mN/m	mN/m	mN/m	degC
1	62	0,8180	62,0			

2791 SIMPLO

Lehonnita AE3

Results

IFT (mN/m) 62.0  
 Temp. (degC) --



End  
 Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 14:45:44  
 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

1 59

Weight	IFT	Avg.	St.-Dev	Temp.
g	mN/m	mN/m	mN/m	degC
0,8280	62,8			

2791 DUPLO

Lehonnite AE3

Results  
 IFT (mN/m) 62.8  
 Temp. (degC) --  
 End

Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 14:49:54  
 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

1 58

Weight	IFT	Avg.	St.-Dev	Temp.
g	mN/m	mN/m	mN/m	degC
0,8481	64,5			

2790 SIMPLo

Lehonnite AE2

Results  
 IFT (mN/m) 64.5  
 Temp. (degC) --  
 End

Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 14:53:01  
 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

1 58

Weight	IFT	Avg.	St.-Dev	Temp.
g	mN/m	mN/m	mN/m	degC
0,8470	64,4			

2790 DUPLO

Lehonnite AE2

Results  
 IFT (mN/m) 64.4  
 Temp. (degC) --  
 End

Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 14:56:48  
 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 s	Weight g	IFT mN/m	Avg. mN/m	St.-Dev mN/m	Temp. degC
1	57	0,8470	64,4			
<b>Results</b>						
IFT (mN/m)	64.4					
Temp. (degC)	--					
<b>End</b>						
Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	22. JUN 2022					
Time	15:02:16					
Id	1					
Method	Tear-Off M.					
<b>Parameters</b>						
Correction	H&J					
Density (g/ml)	0.998					
Stage Speed (%)	25					
Acc. of Gravity (m/s^2)	9.807					
No.	Time s	Weight g	IFT mN/m	Avg. mN/m	St.-Dev mN/m	Temp. degC
1	61	0,8460	64,3			
<b>Results</b>						
IFT (mN/m)	64.3					
Temp. (degC)	--					
<b>End</b>						
Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	22. JUN 2022					
Time	15:05:55					
Id	1					
Method	Tear-Off M.					
<b>Parameters</b>						
Correction	H&J					
Density (g/ml)	0.998					
Stage Speed (%)	25					
Acc. of Gravity (m/s^2)	9.807					
No.	Time s	Weight g	IFT mN/m	Avg. mN/m	St.-Dev mN/m	Temp. degC
1	63	0,8369	63,6			
<b>Results</b>						
IFT (mN/m)	63.6					
Temp. (degC)	--					
<b>End</b>						
Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	22. JUN 2022					
Time	15:12:09					
Id	1					
Method	Tear-Off M.					
<b>Parameters</b>						
Correction	H&J					
Density (g/ml)	0.998					
Stage Speed (%)	25					
Acc. of Gravity (m/s^2)	9.807					
No.	Time s	Weight g	IFT mN/m	Avg. mN/m	St.-Dev mN/m	Temp. degC
1	58	0,8372	63,6			
<b>Results</b>						
IFT (mN/m)	63.6					
Temp. (degC)	--					
<b>End</b>						
Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	22. JUN 2022					
Time	15:15:40					
Id	1					

2789 SIMPL0  
Lehonnita AE1

2789 DUPLO  
Lehonnita AE1

2797 SIMPL0  
Lehonnita AD3

2797 DUPLO  
Lehonnita AD3

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	58	0,8348	63,4			

Results

IFT (mN/m) 63.4  
 Temp. (degC) --

End

Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 15:18:36  
 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	0,8346	63,4			

Results

IFT (mN/m) 63.4  
 Temp. (degC) --

End

Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 15:22:10  
 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	58	0,8272	62,8			

Results

IFT (mN/m) 62.8  
 Temp. (degC) --

End

Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 15:25:27  
 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	59	0,8298	63,0			

Results

IFT (mN/m) 63.0  
 Temp. (degC) --

2796 SIMPLO  
 Lehonnita AD2

2796 DUPLO  
 Lehonnita AD2

2795 SIMPLO  
 Lehonnita AD1

End  
 Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 15:28:49  
 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	59	0,8307	63,1			

2795 DULO  
 Lehonnita AD1

Results  
 IFT (mN/m) 63.1  
 Temp. (degC) --

End  
 Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 15:32:01  
 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	67	0,8450	64,2			

2794 SIMPLO  
 Lehonnita AC3

Results  
 IFT (mN/m) 64.2  
 Temp. (degC) --

End  
 Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 15:35:17  
 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	0,8453	64,3			

2791 DULO  
 Lehonnita AC3

Results  
 IFT (mN/m) 64.3  
 Temp. (degC) --

End  
 Instrument K20  
 Version 01.23  
 Date 22. JUN 2022  
 Time 15:38:41  
 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 s	Weight g	IFT mN/m	Avg. mN/m	St.-Dev mN/m	Temp. degC
1	63	0,8441	64,2			
<b>Results</b>						
IFT (mN/m)	64.2					
Temp. (degC)	--					
<b>End</b>						
Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	22. JUN 2022					
Time	15:41:20					
Id	1					
Method	Tear-Off M.					
<b>Parameters</b>						
Correction	H&J					
Density (g/ml)	0.998					
Stage Speed (%)	25					
Acc. of Gravity (m/s^2)	9.807					
No.	Time s	Weight g	IFT mN/m	Avg. mN/m	St.-Dev mN/m	Temp. degC
1	59	0,8435	64,1			
<b>Results</b>						
IFT (mN/m)	64.1					
Temp. (degC)	--					
<b>End</b>						
Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	22. JUN 2022					
Time	15:44:39					
Id	1					
Method	Tear-Off M.					
<b>Parameters</b>						
Correction	H&J					
Density (g/ml)	0.998					
Stage Speed (%)	25					
Acc. of Gravity (m/s^2)	9.807					
No.	Time s	Weight g	IFT mN/m	Avg. mN/m	St.-Dev mN/m	Temp. degC
1	68	0,9345	71,6			
<b>Results</b>						
IFT (mN/m)	71.6					
Temp. (degC)	--					
<b>End</b>						
Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	22. JUN 2022					
Time	15:47:36					
Id	1					
Method	Tear-Off M.					
<b>Parameters</b>						
Correction	H&J					
Density (g/ml)	0.998					
Stage Speed (%)	25					
Acc. of Gravity (m/s^2)	9.807					
No.	Time s	Weight g	IFT mN/m	Avg. mN/m	St.-Dev mN/m	Temp. degC
1	61	0,9332	71,5			
<b>Results</b>						
IFT (mN/m)	71.5					
Temp. (degC)	--					
<b>End</b>						
Instrument	K20					
Version	01.23					
Date	22. JUN 2022					
Time	15:50:41					
Id	1					

2703 SIMPLO  
Lehonnika AC2

2703 DUPLO  
Lehonnika AC2

2799 SIMPLO  
Khollilah B2

2799 DUPLO  
Khollilah B2

### UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam keseluruhan pengerjaan penelitian dan penyusunan tugas akhir berjudul “PENGARUH FUNGSIONALISASI POLIETILEN GLIKOL TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL MAGNETIT DENGAN PELAPISAN SILIKA SEBAGAI MEDIA PENGOBATAN KANKER DENGAN TERAPI HIPERTERMIA” ini, penulis mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, baik secara moral maupun material yang tidak dapat dihitungkan jumlahnya. Penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang tanpa jasa dan budi mereka penelitian ini tidak akan terselesaikan dengan baik, mereka adalah:

1. Ayah, ibu, dan adik penulis, yang tanpa henti memberikan doa, kasih sayang, nasehat, dan dukungan serta semangat dari segi apapun.
2. Bu Hariyati Purwaningsih S.Si., M.Si dan Bu Vania Mitha Pratiwi S.T., M.T yang telah membimbing dan memberikan berbagai macam bantuan kepada penulis selama mengerjakan penelitian tugas akhir.
3. Juli, Aul, Krisna, Arga, Marel, Safa, dan Elsa yang telah banyak bertukar pikiran dengan penulis selama kuliah, khususnya pada saat penulisan tugas akhir.
4. Erika, Fla, Dindra, Fransisca, dan Juli yang telah menjadi teman penulis bertukar cerita dan bersinggah semenjak mahasiswa baru hingga saat ini.
5. Segenap teman-teman badminton MT20 yang telah membuat penulis lebih sering olahraga dikala waktu senggang.
6. Bayu yang banyak membantu dan menemani penulis di hari-hari penulis.
7. Teman-teman serta mbak mas Hublu HMMT 2019 dan External Affairs HMMT 2020 yang telah mengisi hari-hari penulis dalam berorganisasi
8. Teman-teman Silver Parade yang telah menjadi teman cerita dan susah payah mengembangkan *event* bergensi DTMM (katanya).
9. Seluruh pihak yang telah membawa penulis hingga menuju titik ini.

Penulis tidak dapat mengungkapkan kata lain selain terima kasih juga mohon maaf sebesar-besarnya atas kesalahan, kekurangan, atau apapun yang kurang berkenan di hati. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan kepada penulis dibalas oleh Yang Maha Kuasa. Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat khususnya di bidang penelitian material dan kemajuan Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS serta tanah air Indonesia.

Surabaya, 11 Juli 2022

Penulis,

Lehonnita Pakpahan

LAPORAN TUGAS AKHIR  
TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

---



### BIODATA PENULIS



Penulis bernama Lehonita Rotua Lectiodivirani Pakpahan. Merupakan anak pertama dari dua bersaudara atas pasangan Rocky Pakpahan dan Lennis Yulianti Sihombing yang lahir pada tanggal 16 Agustus 2000 di Kota Surabaya, Jawa Timur. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Cita Hati Surabaya, SMP Negeri 6 Surabaya, SMA Negeri 5 Surabaya, dan melanjutkan studi Strata-1 (S1) di Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur SBMPTN pada tahun 2018. Selama berkuliah, penulis aktif dalam kegiatan akademik, seperti Studi Independen 2021 Kampus Merdeka. Di bidang non akademik, penulis aktif mengikuti pelatihan, seperti manajerial (LKMM TD). Selain itu penulis juga aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi sebagai Kepala Departemen Media dan Informasi. Penulis dapat dihubungi melalui alamat surel [lehonnitarlp@gmail.com](mailto:lehonnitarlp@gmail.com) dan nomor telepon +62 813-5716-0752.