

TUGAS AKHIR – TL184834

ANALISIS PENGARUH PENSTABIL *POLYETHYLENE GLYCOL* (PEG) TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ SEBAGAI MEDIA TERAPI HIPERTERMIA

KHOLLILAH NUR AINI
NRP. 02511840000105

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

ANALISIS PENGARUH PENSTABIL *POLYETHYLENE GLYCOL* (PEG) TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ SEBAGAI MEDIA TERAPI HIPERTERMIA

KHOLLILAH NUR AINI
NRP. 02511840000105

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

**ANALYSIS OF THE EFFECT POLYETHYLENE GLYCOL
(PEG) STABILIZERS ON CHARACTERISTICS OF
 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ NANOPARTICLES AS A MEDIA FOR
HYPERThERmia THERAPY**

KHOLLILAH NUR AINI
NRP. 02511840000105

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

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH PENSTABIL *POLYETHYLENE GLYCOL* (PEG) TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ SEBAGAI MEDIA TERAPI HIPERTERMIA

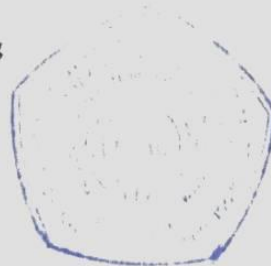
TUGAS AKHIR

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 : **KHOLLILAH NUR AINI**
NRP. 02511840000105

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

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF THE EFFECT POLYETHYLENE GLYCOL (PEG) STABILIZERS ON CHARACTERISTICS OF $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ NANOPARTICLES AS A MEDIA FOR 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 : **KHOLLILAH NUR AINI**
NRP. 02511840000105

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



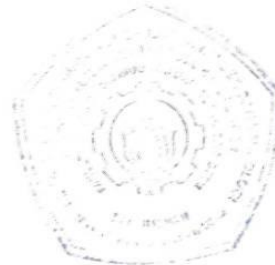
Co-Advisor



Examiner



Examiner



SURABAYA
July, 2022

(This page is intentionally blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

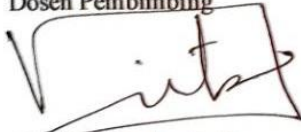
Nama mahasiswa/NRP : Kholilah Nur Aini / 02511840000105
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing/NIP : Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T. / 198902132020122016

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS PENGARUH PENSTABIL *POLYETHYLENE GLYCOL* (PEG) TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ SEBAGAI MEDIA 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, 23 Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing



(Vania Mitha Pratiwi)
NIP. 198902132020122016

Mahasiswa



(Kholilah Nur Aini)
NRP. 02511840000105

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

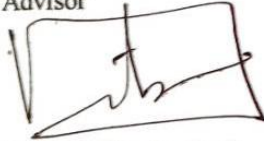
Name of student/NRP : Kholilah Nur Aini / 02511840000105
Departement : Materials and Metallurgical Engineering FTIRS-ITS
Advisor/NIP : Vania Mitha Pratiwi / 198902132020122016

Hereby declare that the Final Project with the title of "ANALYSIS OF THE EFFECT POLYETHYLENE GLYCOL (PEG) STABILIZERS ON CHARACTERISTICS OF $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ NANOPARTICLES AS A MEDIA FOR 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.

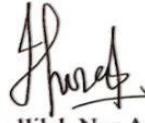
Surabaya, 23 Juli 2022

Acknowledged
Advisor



(Vania Mitha Pratiwi)
NIP. 198902132020122016

Student



(Kholilah Nur Aini)
NRP. 02511840000105

(This page is intentionally blank)

ANALISIS PENGARUH PENSTABIL *POLYETHYLENE GLYCOL* (PEG) TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ SEBAGAI MEDIA TERAPI HIPERTERMIA

Nama Mahasiswa / NRP : Kholiliah Nur Aini / 02511840000105
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing 1 : Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T.
Dosen Pembimbing 2 : Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.

Abstrak

Kanker merupakan salah satu penyebab utama kematian di dunia. *Magnetic hyperthermia* merupakan salah satu pengobatan kanker yang menggunakan nanopartikel magnetit (Fe_3O_4). Sebelum diaplikasikan Fe_3O_4 biasanya dimodifikasi pada permukaannya, salah satunya adalah *dicoating* dengan silika. Sebelum dimodifikasi, nanopartikel magnetit harus memiliki ukuran dan bentuk partikel yang homogen, dimana pada saat sintesis Fe_3O_4 perlu adanya agen penstabil. Pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik pengaruh penstabil PEG terhadap nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ sebagai media terapi hipertermia. Metode yang digunakan dengan *co-precipitation* dengan penambahan PEG dengan konsentrasi 2:5, 3:5 dan 4:5. Karakteristik yang dilakukan menggunakan XRD, FTIR, SEM, PSA, VSM, medan magnet AC dan hidrofobisitas. Hasil pengujian XRD, SEM dan PSA menunjukkan bahwa penambahan penstabil PEG dapat menurunkan ukuran partikel serta mengurangi aglomerasi dan saat *dicoating* dengan silika ukuran partikel mengalami peningkatan karena terdapat silika yang melingkupi Fe_3O_4 . Ukuran partikel Fe_3O_4 -PEG (2:5); (3:5); (4:5) memiliki nilai sebesar 155.96; 149.74; 149.67 nm sedangkan Fe_3O_4 -PEG/ SiO_2 memiliki nilai sebesar 170.4; 106.68; 149.84 nm. Hasil VSM menunjukkan bahwa semua sampel bersifat superparamagnetik dengan nilai saturasi Fe_3O_4 -PEG (2:5); (3:5); (4:5) sebesar 39.40; 48.76; 57.79 emu/g dan Fe_3O_4 -PEG/ SiO_2 sebesar 30.92; 42.64; 50.81 emu/g. Hasil uji hidrofobisitas menyatakan bahwa semua sampel bersifat hidrofilik sehingga cocok untuk aplikasi biomedis. Analisis medan magnet AC menunjukkan bahwa semua sampel mengalami kenaikan temperatur apabila dikenai arus dari luar sehingga berpotensi untuk aplikasi terapi hipertermia.

Kata Kunci: *Magnetit (Fe_3O_4), Silika, Terapi Hipertermia*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALYSIS OF THE EFFECT POLYETHYLENE GLYCOL (PEG) STABILIZERS ON CHARACTERISTICS OF Fe₃O₄/SiO₂ NANOPARTICLES AS A MEDIA FOR HYPERTHERMIA THERAPY

Student Name / NRP : Kholilah Nur Aini / 02511840000105
Departement : Materials and Metallurgical Engineering FTIRS-ITS
Advisor : Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T.
Co-Advisor : Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.

Abstract

Cancer is one of the leading causes of death in the world. Magnetic hyperthermia is a cancer treatment that uses magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles. Before applying Fe₃O₄ usually on the surface, one of which is coated with silica. Previously, magnetite nanoparticles had to have homogeneous particle size and shape, where at the time of Fe₃O₄ synthesis a stabilizing agent was needed. This research was conducted to determine the characteristics of the effect of PEG stabilizer on Fe₃O₄/SiO₂ nanoparticles as a medium for hyperthermia therapy. The method used is coprecipitation with the addition of PEG with concentrations of 2:5, 3:5 and 4:5. The characteristics were carried out using XRD, FTIR, SEM, PSA, VSM, AC magnetic field and hydrophobicity. XRD, SEM and PSA test results showed that the addition of PEG stabilizer could reduce particle size and reduce agglomeration and when coated with silica the particle size increased due to the presence of silica surrounding Fe₃O₄. The particle size of Fe₃O₄-PEG (2:5):(3:5):(4:5) has a value of 155.96;149.74;149.67 nm while Fe₃O₄-PEG/SiO₂ has a value of 170.4;106.68;149.84 nm. The VSM results show that all samples are superparamagnetic with a saturation value of Fe₃O₄-PEG (2:5):(3:5):(4:5) of 39.40; 48.76; 57.79 emu/g and Fe₃O₄-PEG/SiO₂ of 30.92; 42.64; 50.81 emu/g. The results of the hydrophobicity test stated that all samples were hydrophilic so they were suitable for biomedical applications. Analysis of the AC magnetic field showed that all samples experienced an increase in temperature when exposed to external currents so that it was possible for hyperthermia therapy applications.

Keywords: *Hyperthermia Therapy, Magnetite (Fe₃O₄), Silica*

(This page is intentionally blank)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji dan Syukur atas kehadiran Allah SWT. yang telah memberikan rahmat, inayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS PENGARUH PENSTABIL *POLYETHYLENE GLYCOL* (PEG) TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ SEBAGAI MEDIA 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 Ibu Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas segala ilmu dan bimbingan yang telah diberikan selama pelaksanaan Tugas Akhir hingga penyusunan Laporan Tugas Akhir.
2. Bapak Sigit Tri Wicaksono S.Si., M.Si., Ph.D., selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.
3. Dian Mughni Fellicia ST., M. Sc, selaku dosen wali penulis yang senantiasa memberikan arahan selama masa perkuliahan.
4. Bapak/Ibu Dosen yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis.
5. Orang tua, keluarga, dan teman dekat penulis yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.

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

Surabaya, 23 Juli 2022
Penulis

Khollilah Nur Aini

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

Abstrak	xiii
Abstract	xv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiii
1 BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Nanopartikel	3
2.1.1 Nanopartikel Oksida Besi	3
2.1.2 Sifat Fisik Oksida Besi	4
2.1.3 Sintesis Nanopartikel Oksida Besi	4
2.1.4 Aplikasi Nanopartikel Oksida Besi	5
2.2 <i>Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles</i>	6
2.2.1 Magnetisasi Superparamagnetik	6
2.3 Silika	8
2.4 <i>Polyethylene Glycol (PEG)</i>	9
2.5 <i>Hyperthermia Therapy</i>	10
2.5.1 Pengertian <i>Hyperthermia Therapy</i>	10
2.5.2 <i>Magnetic Hyperthermia</i>	11
2.6 Penelitian Sebelumnya	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	15
3.1 Diagram Alir	15
3.1.1 Diagram Alir Sintesis Fe ₃ O ₄	15
3.1.2 Diagram Alir Sintesis Fe ₃ O ₄ /SiO ₂	15
3.2 Bahan Penelitian	16
3.3 Alat Penelitian	17
3.4 Metode Penelitian	18
3.5 Prosedur Penelitian	18
3.5.1 Sintesis Nanopartikel Fe ₃ O ₄	19
3.5.2 Sintesis Fe ₃ O ₄ /SiO ₂	19
3.5.3 Sintesis <i>Liquid Magnetic</i>	19
3.6 Pengujian	20
3.6.1 <i>X-Ray Diffractometry (XRD)</i>	20
3.6.2 <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)</i>	21
3.6.3 <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	22
3.6.4 <i>Particle Size Analyzer (PSA)</i>	23
3.6.5 Hidrofobisitas	24
3.6.6 <i>Vibrating Sample Magnetometer (VSM)</i>	24
3.6.7 Medan Magnet AC	25
3.7 Rancangan Penelitian	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27

4.1	Hasil Analisis Pengujian XRD.....	27
4.2	Hasil Analisis Pengujian FTIR	28
4.3	Hasil Analisis Pengujian SEM.....	31
4.4	Hasil Analisis PSA.....	32
4.5	Hasil Analisis Pengujian <i>Vibration Sample Magnetometer</i> (VSM)	33
4.6	Hasil Analisis Hidrofobisitas	34
4.7	Hasil Analisis Medan Magnet AC	36
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	39
5.1	Kesimpulan	39
5.2	Saran	39
	DAFTAR PUSTAKA.....	41
	LAMPIRAN.....	47
	UCAPAN TERIMA KASIH	57
	BIODATA PENULIS.....	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jenis nanopartikel.....	3
Gambar 2. 2 <i>Hysteresis curve</i> beberapa jenis sifat magnetik material	6
Gambar 2. 3 <i>Single domain</i>	7
Gambar 2. 4 Kurva histersis partikel superparamagnetik dan ferimagnetik nanopartikel Fe ₃ O ₄	7
Gambar 2. 5 Struktur silika tetrahedral.....	8
Gambar 2. 6 Struktur molekul PEG.....	10
Gambar 2. 7 Bentuk fisik PEG 4000	10
Gambar 2. 8 Mekanisme kerja <i>hyprthermia therapy</i>	12
Gambar 2. 9 Proses <i>hyperthermia therapy</i> menggunakan nanopartikel magnetik	12
Gambar 2. 10 Karakterisasi SEM (a) Fe ₃ O ₄ (b) Fe ₃ O ₄ /SiO ₂	13
Gambar 2. 11 Kurva Magnetisasi Fe ₃ O ₄ /SiO ₂	13
Gambar 2. 12 Karakterisasi SEM Fe ₃ O ₄ /SiO ₂	14
Gambar 2. 13 Karakterisasi TEM Fe ₃ O ₄ /SiO ₂	14
Gambar 3. 1 Diagram alir sintesis Fe ₃ O ₄	15
Gambar 3. 2 Diagram alir sintesis Fe ₃ O ₄ /SiO ₂	16
Gambar 3. 3 Alat uji XRD	21
Gambar 3. 4 Alat uji FTIR.....	21
Gambar 3. 5 Skema kerja FTIR	22
Gambar 3. 6 Alat Uji SEM	23
Gambar 3. 7 Alat Uji PSA	23
Gambar 3. 8 Skema Uji Hidrofobisitas.....	24
Gambar 3. 9 Alat Uji VSM.....	25
Gambar 3. 10 Skema uji medan magnet AC dan frekuensi.....	25
Gambar 4. 1 Hasil pengujian XRD (a) Fe ₃ O ₄ , (b) Fe ₃ O ₄ -PEG (2:5), (c) Fe ₃ O ₄ -PEG (3:5), (d) Fe ₃ O ₄ -PEG (4:5).....	27
Gambar 4. 2 Hasil pengujian XRD (a) Fe ₃ O ₄ -PEG (2:5)/SiO ₂ , (b) Fe ₃ O ₄ -PEG (3:5)/SiO ₂ , (c) Fe ₃ O ₄ -PEG (4:5)/SiO ₂	28
Gambar 4. 3 Hasil pengujian FTIR (a) Fe ₃ O ₄ , (b) Fe ₃ O ₄ -PEG (2:5), (c) Fe ₃ O ₄ -PEG (3:5), (d) Fe ₃ O ₄ -PEG (4:5).....	29
Gambar 4. 4 Hasil FTIR (a) Fe ₃ O ₄ -PEG (2:5)/SiO ₂ , (b) Fe ₃ O ₄ -PEG (3:5)/SiO ₂ , (c) Fe ₃ O ₄ -PEG (4:5)/SiO ₂	30
Gambar 4. 5 Hasil pengujian SEM Fe ₃ O ₄ (a) perbesaran 100x, (b) perbesaran 10000x	31
Gambar 4. 6 Hasil pengujian SEM Fe ₃ O ₄ -PEG (a) perbesaran 3000x (b) perbesaran 5000x	31
Gambar 4. 7 Hasil pengujian SEM Fe ₃ O ₄ -PEG/SiO ₂ (a) perbesaran 5000x (b) perbesaran15000x.....	32
Gambar 4. 8 Grafik ukuran partikel (a) Fe ₃ O ₄ (b) Fe ₃ O ₄ -PEG (c) Fe ₃ O ₄ -PEG/SiO ₂	33
Gambar 4. 9 Hasil pengujian VSM (a) Fe ₃ O ₄ , (b) Fe ₃ O ₄ -PEG (2:5), (c) Fe ₃ O ₄ -PEG (3:5), (d) Fe ₃ O ₄ -PEG (4:5) (e) Fe ₃ O ₄ -PEG (2:5)/SiO ₂ , (f) Fe ₃ O ₄ -PEG (3:5)/SiO ₂ , (g) Fe ₃ O ₄ -PEG (4:5)/SiO ₂	34
Gambar 4. 10 Hasil uji hidrofobisitas (a) Fe ₃ O ₄ , (b) Fe ₃ O ₄ -PEG (2:5), (c) Fe ₃ O ₄ -PEG (3:5), (d) Fe ₃ O ₄ -PEG (4:5), (e) Fe ₃ O ₄ -PEG (2:5)/SiO ₂ , (f) Fe ₃ O ₄ -PEG (3:5)/SiO ₂ , (g) (Fe ₃ O ₄ -PEG (4:5)/SiO ₂	35
Gambar 4. 11 Kenaikan temperatur sampel (a) Fe ₃ O ₄ (b) Fe ₃ O ₄ -PEG (c) Fe ₃ O ₄ - PEG/SiO ₂	36

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Sifat fisik dan magnetik oksida besi	4
Tabel 2. 2 Metode sintesis nanopartikel oksida besi dan.....	4
Tabel 2. 3 Karakteristik silika.....	8
Tabel 2. 4 Karakteristik <i>Polyethylene Glycol</i> (PEG).....	9
Tabel 2. 5 Penelitian sebelumnya	13
Tabel 3. 1 Jadwal penelitian.....	26
Tabel 3. 2 Rancangan penelitian.....	26
Tabel 3. 3 Rancangan pengujian.....	26
Tabel 4. 1 Ukuran kristal	28
Tabel 4. 2 Puncak hasil pengujian FTIR tiap sampel	30
Tabel 4. 3 Ukuran partikel rata-rata.....	32
Tabel 4. 4 Saturasi magnetisasi tiap sampel	33
Tabel 4. 5 Sudut kontak tiap sampel.....	35
Tabel 4. 6 Tabel perbandingan.....	37

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kanker merupakan salah satu penyebab utama kematian di dunia. Terdapat beberapa metode untuk pengobatan kanker yaitu metode konvensional dan modern. Pembedahan, radioterapi, *gene therapy* dan kemoterapi merupakan metode konvensional utama yang sering digunakan untuk pengobatan kanker. Namun, dengan menggunakan metode pengobatan tersebut masih banyak memiliki keterbatasan dan efek samping bagi pasien penderita kanker seperti toksisitas terhadap sel-sel sehat disekitarnya (P. Das et al., 2019).

Magnetic hyperthermia therapy adalah terapi yang memanfaatkan nanopartikel magnet yang dapat menghasilkan panas setelah distimulasi dengan medan magnet bolak-balik. Dalam prosesnya, partikel magnetik disuntikkan secara lokal ke dalam jaringan kanker yang kemudian dipanaskan hingga temperatur yang diperlukan, yaitu sekitar 45 °C dengan bantuan medan magnet luar AC dan frekuensi tertentu yang dapat menyebabkan peningkatan temperatur sehingga dapat membunuh sel kanker.

Magnetit (Fe_3O_4) merupakan material nanopartikel magnetik yang paling umum digunakan dalam penelitian *magnetic hyperthermia* hal ini dikarenakan magnetit merupakan material yang memiliki toksisitas yang rendah, sifat magnetik dan juga proses sintesis yang cukup mudah. Pada perkembangannya magnetit sering dimodifikasi pada permukaannya, salah satunya adalah di *coating* dengan menggunakan silika, membentuk nanoparticle core shell. Silika juga memiliki beberapa sifat yang umumnya tidak dimiliki oleh senyawa organik yang lain, seperti biokompatibel, inert secara kimia (Kostiv et al., 2017), luas permukaan yang tinggi (Rahayu et al., 2021), mudah dimodifikasi dengan senyawa kimia tertentu sehingga dapat meningkatkan kinerjanya, pertukaran ion dan sifat adsorpsi yang baik, serta memiliki kestabilan mekanik dan termal yang tinggi. Nanopartikel Fe_3O_4 murni sering mengalami aglomerasi, Fenomena ini merupakan kecenderungan alami yang dimiliki oleh partikel nano Fe_3O_4 akibat adanya gaya Van der Waals dan juga dari dipol magnet (Arista et al., 2019).

Sebelum dimodifikasi, nanopartikel magnetit harus memiliki ukuran dan bentuk partikel yang homogen. Untuk mendapatkan magnetit monodispersi yang baik, seseorang harus fokus pada preparasinya. Prekursor, media, dan reagen pengendapan harus dikontrol untuk menghasilkan magnetit dengan bentuk, ukuran, dan stabilitas yang diinginkan. Untuk prekursor, garam Fe(II) dan Fe(III) dengan stoikiometri yang ditentukan akan menghasilkan nanopartikel magnetit meskipun disintesis tanpa bahan penstabil. Basa lemah seperti amonia biasanya lebih dipilih daripada natrium hidroksida atau kalium hidroksida. Akhirnya, faktor penting terakhir adalah pilihan bahan penstabil. Dimana untuk mengurangi aglomerasi sebelum di *coating* dengan silika maka perlu adanya *stabilizer* pada saat sintesis nanopartikel Fe_3O_4 . Macam-macam stabilizer ada banyak, salah satunya adalah *Polyethylene glycol* (PEG). *Polyethylene glycol* (PEG) adalah polimer biokompatibel yang paling populer dan banyak digunakan karena manfaatnya seperti meningkatkan dispersibilitas, biokompatibel, tidak beracun, dan biaya rendah.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penstabil PEG (*Polyethylene Glycol*) terhadap karakteristik nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$?
2. Bagaimana pengaruh *coating* silika terhadap karakteristik nanopartikel magnetik Fe_3O_4 ?

1.3 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil yang optimal dan sesuai yang diharapkan, maka dalam penelitian ini batasan masalah yang diterapkan adalah sebagai berikut:

1. Reaksi-reaksi kimia yang terjadi dalam penelitian ini dianggap sempurna secara stoikiometri.
2. Lingkungan *penelitian* dianggap steril dan bebas kontaminan.
3. Penelitian dilakukan pada tekanan atmosfer dan temperatur ruang yang konstan.

1.4 Tujuan Penelitian

Dari rumusan masalah diatas maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh penstabil PEG (*Polyethylene Glycol*) terhadap karakteristik nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$.
2. Menganalisis pengaruh *coating* silika terhadap karakteristik nanopartikel magnetik Fe_3O_4 .

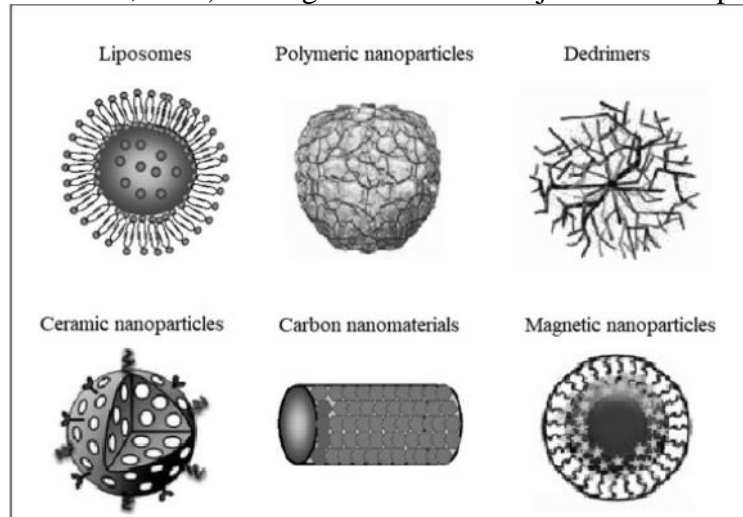
1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memiliki manfaat untuk mendapatkan material inovasi baru yaitu Nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ dengan penambahan PEG (*Polyethylene Glycol*) sebagai agent penstabil untuk aplikasi terapi hipertermia. Sehingga diperoleh hasil yang baik dan efektif untuk aplikasi pengembangan material biomedis dan memberikan kontribusi dalam material sains yang memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut dalam dunia kesehatan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Nanopartikel

Nanoteknologi merupakan salah satu bidang ilmu fisika, kimia, biologi serta rekayasa yang menarik perhatian peneliti dalam beberapa tahun belakangan ini (Veronica et al., 2022). Komponen dasar dari nanoteknologi adalah nanopartikel. Menurut standar ISO dan ASTM, nanopartikel adalah partikel berskala nano yang berukuran sekitar 10 – 100 nm dengan satu atau lebih dimensi (Ealias & Saravanakumar, 2017). Nanopartikel memiliki sifat fisik dan kimia yang lebih unggul dibandingkan dengan material *bulk*-nya (Hakim, 2008), seperti memiliki luas permukaan yang lebih besar, reaktivitas dan stabilitas yang tinggi serta *high strength*. Karena properties yang dimilikinya nanopartikel banyak digunakan di berbagai aplikasi seperti pada bidang kosmetik, biomedis, katalis, elektronik, industri, manufaktur, makanan, konstruksi, energi dll (Ealias & Saravanakumar, 2017; Khan et al., 2021). Nanopartikel dapat diklasifikasikan menjadi berbagai jenis, berdasarkan ukuran, bentuk dan propertiesnya (Jadhav & Shaikh, 2019; Khan et al., 2021). Pada gambar 2.1 menunjukkan beberapa jenis nanopartikel.



Gambar 2. 1 Jenis nanopartikel (Muhtasib & Chouaib, 2020)

Salah satu material nanopartikel, yaitu material magnetik. Material magnetik adalah material yang dapat memberikan berbagai respon terhadap magnet. Adapaun beberapa jenis material magnet yang memiliki sifat magnet diantaranya, yaitu material oksida besi, seperti hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), ilmenite (FeTiO_3) dan magnetit (Fe_3O_4) serta material sulfida besi, seperti pirhotit (Fe_7S_8) dan greigit (Fe_3S_4). Penelitian penggunaan material oksida besi telah banyak dilakukan dalam berbagai bidang (Prasdiantika & Susanto, 2017). Berdasarkan sifat magnetnya, material magnetik terbagi menjadi lima, seperti ferromagnetik, ferrimagnetik, paramagnetik, antiferromagnetik, dan diamagnetik (agoteray). Nanopartikel yang tersusun dari material ferromagnetik dan berukuran <100 nm, memiliki bentuk magnetism yaitu superparamagnet. Material ferromagnetik tersebut termasuk unsur logam, paduan oksida dan senyawa kimia lainnya yang dimagnetisasi oleh medan magnet luar. Sifat superparamagnet biasanya hanya ada dalam sistem nanopartikel (Ali et al., 2016).

2.1.1 Nanopartikel Oksida Besi

Oksida besi yang terkenal di alam terdapat delapan jenis, jenis oksida besi yang paling umum ditemukan, yakni magnetit (Fe_3O_4), maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) dan hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$).

Magnetit (Fe_3O_4), maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) adalah material yang ideal untuk aplikasi dalam bidang industri dan biomedis. Hal tersebut dikarenakan keduanya memiliki keunggulan yang dapat digunakan kembali dibandingkan oksida besi lainnya karena sifat magnetik, biokimianya yang unik.

2.1.2 Sifat Fisik Oksida Besi

Oksida besi memiliki sifat fisik yang sangat baik, salah satunya terkait dengan sifat magnetik. Sifat magnetik dari oksida besi dipengaruhi oleh ukuran, bentuk morfologi, dan memiliki luas permukaan yang besar sehingga oksida besi memiliki keunggulan untuk mengabsorpsi ion logam berat (Wu et al., 2015). Berikut adalah sifat fisik dan magnetik dari besi oksida yang dirangkum dalam tabel 2.1

Tabel 2. 1 Sifat fisik dan magnetik oksida besi (Teja & Koh, 2009)

Sifat	Oksida Besi		
	Magnetit	Maghemit	Hematit
Formula molekul	Fe_3O_4	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
Densitas (g/cm^3)	5,18	4,87	5,26
Melting point ($^\circ\text{C}$)	1583-1597	-	1350
Jenis kemagnetan	Feromagnetik	Ferimagnetik	Feromagnetik lemah atau antiferomagnetik
Curie temperature (K)	850	820-986	956
The Saturation Magnetization M_s di 300 K ($\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$)	92-100	60-80	0,3
Standard free energy of formation ΔG_f° (kJ/mol)	-1012,6	-711,1	-742,7
Sistem kristalografi	Cubic	Cubic atau tetrahedral	Rhombohedral, hexagonal

2.1.3 Sintesis Nanopartikel Oksida Besi

Sifat fisika dan kimia nanopartikel Fe_3O_4 tidak terlepas dari pemilihan metode dan parameter sintesis. Metode dan parameter sintesis sangat berperan dalam menentukan ukuran partikel, bentuk, morfologi, ukuran nanopartikel, distribusi ukuran, magnet, dan luas permukaan (Ansari et al., 2019). Parameter yang mempengaruhi ukuran partikel antara lain, temperatur, waktu, pelarut dan reaktan (Song et al., 2019). Berikut adalah metode sintesis nanopartikel oksida besi beserta parameter yang mempengaruhi, yang dirangkum pada Tabel 2.2

Tabel 2. 2 Metode sintesis nanopartikel oksida besi dan perbandingan paramaternya (Ali et al., 2016; Ansari et al., 2019; Hosu et al., 2019; Xu et al., 2014)

Metode	Temperatur ($^\circ\text{C}$)	Waktu	Ukuran (nm)	Kelebihan	Kekuranga
<i>Co-precipitation</i>	20-150	Minutes	5-40	Mudah, kondisis ruangan, distribusi ukuran kecil, mudah diukur	Kontrol bentuk buruk, kristalinitas buruk, aglomerasi

Metode	Temperatur (°C)	Waktu	Ukuran (nm)	Kelebihan	Kekuranga
<i>Thermal decomposition</i>	100-350	Hours-days	4-30	Distribusi ukuran sangat kecil, kontrol bentuk sangat baik, mudah diukur	Rumit
<i>Microemulsion</i>	20-80	Hours	10-25	Distribusi ukuran kecil, kontrol bentuk baik Mudah, distribusi ukuran sangat	Rumit, sulit diukur
<i>Hydrothermal</i>	150-280	Hours-days	10-800	kecil, kontrol bentuk sangat baik, mudah diukur	Membutuhkan tekanan tinggi
Sol-gel	25-200	Hours	15-50	Distribusi ukuran kecil, kontrol bentuk baik	Rumit, dapat diukur
Aerosol/ vapor	>100	Hours	10 - 100	Distribusi ukuran kecil, mudah diukur	Rumit, temperatur tinggi, kontrol bentuk sedang
<i>Electrochemical</i>	25-30	Hours	5-100	Kontrol ukuran mudah	Reproduktifitas buruk

Di antara metode-metode sintesis tersebut, metode *co-precipitation* yang paling sederhana untuk membuat partikel nano karena prosedurnya lebih mudah dilakukan, simpel, efisien, dan juga tidak memerlukan perlakuan panas pada temperatur yang tinggi untuk proses sintesis nanopartikel (<100°C). Terdapat tiga tahapan utama dalam metode sintesis *co-precipitation*, yaitu pertama preparasi larutan garam logam prekursor, reaksi pembentukan nanopartikel melalui reaksi basa alkali, dan terakhir proses pencucian slurry nanopartikel. Faktor-faktor yang mempengaruhi ukuran, morfologi, dan komposisi dari nanopartikel seperti perbandingan rasio Fe^{3+} dan Fe^{2+} 2:1, dan jenis surfaktan yang digunakan (Zhu et al., 2018).

Adapun kelemahan dari metode *co-precipitation* adalah ukuran dari nanopartikel cenderung besar serta memiliki polidisversitas partikel yang kecil. Selain itu, nanopartikel yang dihasilkan dari sintesis menggunakan metode *co-precipitation* mudah teraglomerasi dan teroksidasi. Untuk meningkatkan stabilitas serta mencegah terjadinya hal tersebut, maka perlu dilakukan modifikasi permukaan nanopartikel Fe_3O_4 dengan penambahan stabilizer pada permukaan nanopartikel (Song et al., 2019).

2.1.4 Aplikasi Nanopartikel Oksida Besi

Nanopartikel oksida besi memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan dalam berbagai aplikasi karena sifatnya yang unik dalam skala nano, seperti luas permukaan yang besar, energi permukaan yang tinggi, toksisitas yang rendah, biokompatibilitas yang baik, superparamagnetik, penyerapan yang tinggi (Rahmawati et al., 2018).

Saat ini, oksida besi dalam bentuk Fe_3O_4 (magnetit) dan senyawa $\gamma-Fe_2O_3$ (maghemite) adalah nanopartikel yang paling umum digunakan pada bidang biomedis seperti *targeted drug*

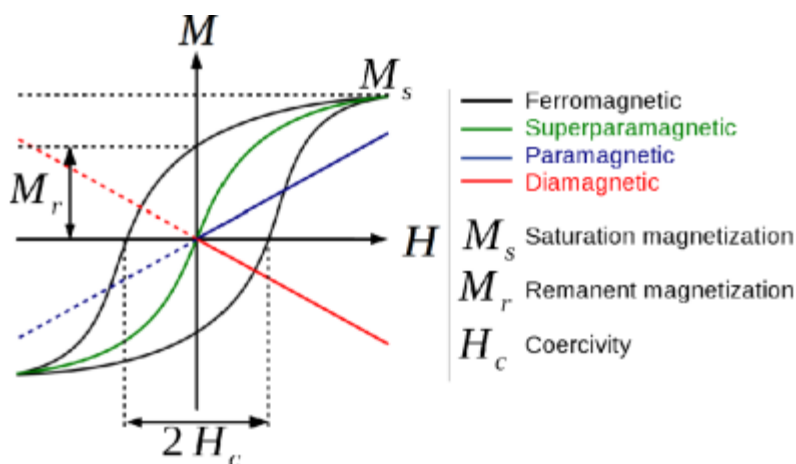
delivery, bioimaging, hyperthermia (Kalber et al., 2016), *photoablation therapy*, biosensor dan *theranostics* (Rahmawati et al., 2018).

2.2 Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles

Ukuran partikel mempengaruhi sifat magnetik dari material nanopartikel. Pada kondisi tertentu, ketika ukuran partikel besi oksida (Fe_3O_4) < 100 nm, maka material Fe_3O_4 dapat menampilkan sifat superparamagnetik (Nee Koo et al., 2019). Material superparamagnet merespon medan magnet eksternal dengan sangat kuat karena dalam kondisi *bulk* material ini bersifat feromagnetik. Namun ketika medan magnet eksternal dihilangkan, maka material ini kembali pada kondisi non-magnetik. Properti inilah yang menjadikan material superparamagnetik dapat diaplikasikan pada bidang biomedis. Terdapat sejumlah material yang menunjukkan sifat feromagnetik, antara lain Fe, Co atau Ni. Namun yang paling magnetis dari semua mineral alami di bumi dan banyak digunakan sebagai material superparamagnetik untuk jenis aplikasi biologis adalah magnetit (Fe_3O_4) (Akbarzadeh et al., 2015).

2.2.1 Magnetisasi Superparamagnetik

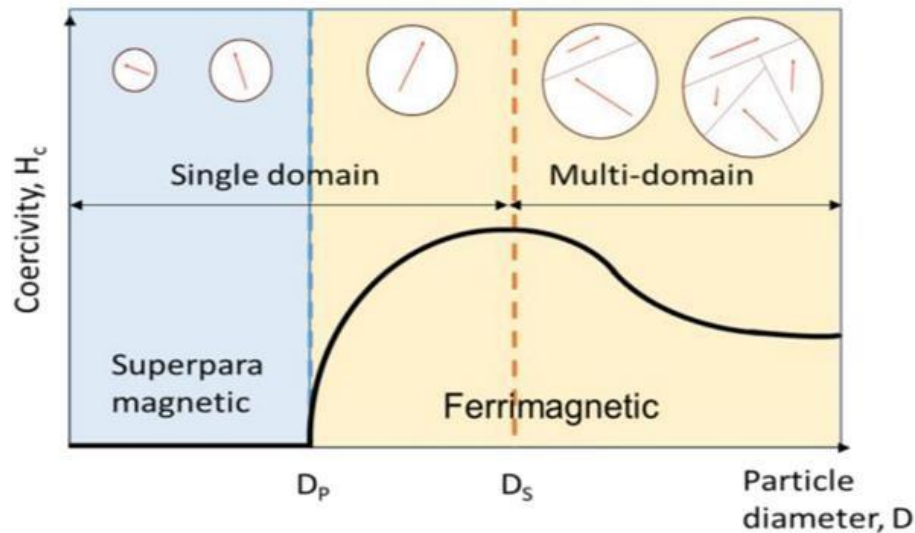
Material magnetik dikategorikan menjadi 2 jenis, yaitu magnet lunak (*soft magnetic*) dan magnet keras (*hard magnetic*). Ciri-ciri dari magnet lunak biasanya tidak bersifat permanen (mudah dimagnetisasi), sedangkan untuk magnet keras biasanya cenderung memiliki sifat magnet yang permanen atau tidak mudah dimagnetisasi. Medan magnet akan timbul di sekitar kumparan apabila suatu kumparan tersebut dialiri dengan arus listrik. Ketika arus listrik yang diberikan pada kumparan ditingkatkan maka medan magnet akan meningkat hingga mencapai titik konstan. Dari hal tersebut menunjukkan bahwasannya material feromagnetik telah mencapai titik jenuh. Material feromagnetik cenderung akan mempertahankan sifat kemagnetannya dan fluks magnet tidak hilang sepenuhnya apabila arus yang dialirkan diputus. Jumlah fluks magnetik yang tersisa biasa disebut dengan *magnetism residual*, sedangkan kemampuan material untuk mempertahankan sifat kemagnetannya umumnya disebut dengan *retentivity*.



Gambar 2. 2 Hysteresis curve beberapa jenis sifat magnetik material (Cornell & Schwertmann, 1972)

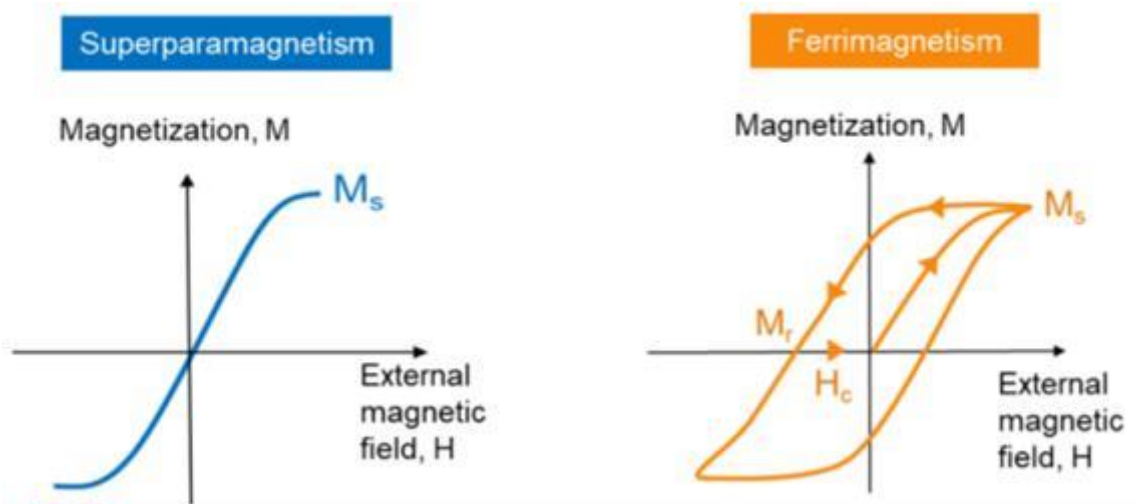
Momen magnet atomik di dalam suatu material akan secara selaras berorientasi menuju satu arah, hal tersebut yang menyebabkan suatu material memiliki sifat magnetik, dalam kasus ini feromagnetik. Semakin kecil ukuran suatu material, semakin sedikit jumlah domain magnetik yang dimilikinya, semakin besar nilai *coercivity*-nya. *Coercivity* akan mencapai

maksimum ketika material tersebut sangatlah kecil sehingga hanya memiliki *single domain*. Namun ketika ukuran material diperkecil lagi (hingga skala nano), *coercivity*-nya akan turun secara drastis menjadi nol. Pada kondisi inilah suatu material dikatakan memiliki sifat superparamagnetik (Akbarzadeh et al., 2015).



Gambar 2. 3 *Single domain* (Nee Koo et al., 2019)

Partikel superparamagnetik berbeda dengan material ferimagnetik, dimana pada partikel superparamagnetik tidak memiliki *coercivity* dan kurva *hysteresis loop* yang disebabkan adanya *single domain*, sehingga membuat partikel tersebut hanya dapat dimagnetisasi apabila diberikan medan magnet dari luar (Laurent et al., 2011). Partikel superparamagnetik dicirikan dengan respon kemagnetan nanopartikel Fe_3O_4 yang sangat tinggi terhadap medan magnetik eksternal (dari luar). Secara visual, nilai *coercivity* dan magnetisasi remanensi dapat dilihat pada kurva histeresis Fe_3O_4 adalah nol pada Gambar 2.4



Gambar 2. 4 Kurva histeresis partikel superparamagnetik dan ferimagnetik nanopartikel Fe_3O_4 (Nee Koo et al., 2019)

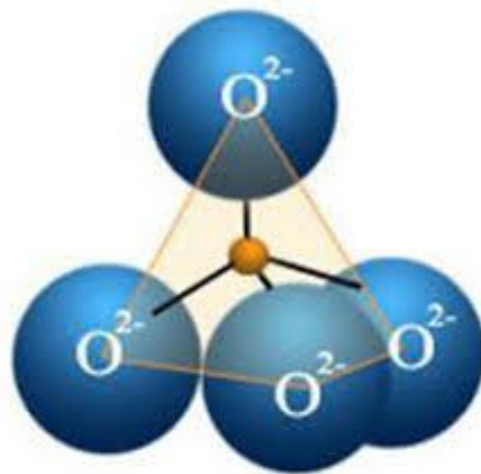
2.3 Silika

Silika atau yang biasa dikenal dengan rumus kimia SiO_2 (*silicon dioxide*) merupakan senyawa kimia yang terbentuk dari atom silikon (Si) dan oksigen (O_2), dimana keduanya merupakan unsur yang paling banyak ditemukan di alam. Silika mempunyai ciri-ciri fisis yakni berbentuk padatan atau bubuk yang halus, berwarna putih, memiliki titik didih dan cair yang tinggi dll. Adapun karakterisasi silika secara umum terdapat pada tabel. Secara alami silika terdapat dalam bentuk kristalin dan amorfus. Kristalin silika terdapat dalam 3 bentuk utama, yaitu kuarsa, tridimit dan kristobalit. Sedangkan struktur amorfus dapat ditemukan dalam bentuk opal, flint, kaca silika, *diatomaceous earth* dan *vitreous silica* (Rahayu et al., 2021; Sembiring & Simanjuntak, 2015).

Tabel 2. 3 Karakteristik silika (Rahayu et al., 2021)

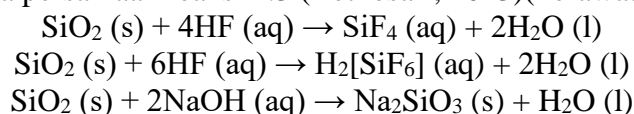
Karakteristik	Nilai
Berat Jenis (g/cm^3)	2,6
Titik Didih ($^{\circ}\text{C}$)	2230
Titik Lebur ($^{\circ}\text{C}$)	1600 – 1725
Densitas (g/cm^3)	2,2 – 2,65
Konduktivitas Termal (W/cm. K)	0,013 - 0,014
Konduktivitas Listrik (200K) (S/cm)	$8,66 \times 10^{-7}$
Konstanta Dielektrik	50
Resistivitas (Ω/cm) (30°C)	10^{12}
Kekerasan (kg/mm^2)	650
Kekuatan Tarik (MPa)	110
Modulus Elastisitas (GPa)	73 - 75
Koordinasi Geometri	Tetrahedral
Rumus Molekul	SiO_2
Struktur Kritisal	Kristobalit, Trimidit, Kuarsa

Berdasarkan susunan struktur, silika terbentuk dari satuan struktur primer silikat tetrahedral SiO_4^{4-} , di mana satu atom Si^{4+} dikelilingi oleh empat atom oksigen (O^{2-}) yang terikat secara ikatan ionik dan kovalen membentuk ikatan tetrahedral yang kuat, 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 $\gamma = 120^{\circ}$. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 (Ferawati, 2020; Sembiring & Simanjuntak, 2015) .



Gambar 2. 5 Struktur silika tetrahedral (Ferawati, 2020)

Silika umumnya tidak reaktif terhadap asam, kecuali asam fosfat (H_3PO_4) dan asam hidrofluorida (HF), seperti pada persamaan reaksi 2.1 dan reaksi 2.2 dalam asam berlebih. Di samping itu, silika dapat bereaksi dengan basa, khususnya basa kuat seperti alkali hidroksida, yang dapat dilihat pada persamaan reaksi 2.3 (Retnosari, 2013)(Ferawati, 2020).



Silika juga memiliki beberapa sifat yang umumnya tidak dimiliki oleh senyawa organik lain seperti biokompatibilitas yang bagus, biodegradasi, memiliki luas permukaan yang tinggi (Yang et al., 2017), *nontoxic* (Chae et al., 2016), inert secara kimia, hidrofilik (Chellappa & Vijayalakshmi, 2019), mudah dimodifikasi dengan senyawa kimia tertentu sehingga dapat meningkatkan kinerjanya, serta memiliki kestabilan mekanik dan termal yang tinggi (Ferawati, 2020). Oleh karena itu silika banyak digunakan di beberapa aplikasi seperti pada bidang biomedis (drug delivery, SERS, Colorimetric diagnostics, Photothermal therapy, biosensor), thermal insulation film, rubber filler, insulating layer untuk semiconductor dll (Agotegaray & Lassalle, 2017)(Chae et al., 2016).

2.4 Polyethylene Glycol (PEG)

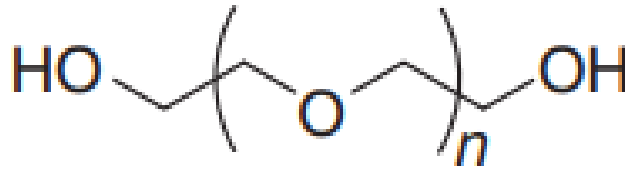
Polyethylene Glycol (PEG) disebut juga makrogol, merupakan polimer sintetik dengan rumus umum $HO-(CH_2CH_2O)_n-H$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3. Sintesis *Polyethylene Glycol* (PEG) berlangsung melalui proses poli-kondensasi antara ethylene oxide $(CH_2CH_2O)_n$ dengan air (H_2O) pada kondisi tekanan tinggi dan dibantu dengan adanya katalis (Javed et al., 2020)(Soni et al., 2020). PEG umumnya memiliki berat molekul 200-300000 Da. Penamaan PEG umumnya ditentukan dengan bilangan yang menunjukkan berat molekul rata-ratanya. PEG dengan berat molekul 200-600 (PEG 200-600) berbentuk cair/liquid, PEG 800-1500 semi padat, PEG 3000-20000 atau lebih berupa padatan semi kristalin dan PEG dengan berat molekul lebih besar dari 100000 berbentuk seperti resin pada suhu kamar. PEG merupakan polimer mudah larut dalam berbagai pelarut, titik leleh dan toksisitasnya rendah, berada dalam bentuk kristalin. Kebanyakan PEG yang digunakan memiliki berat molekul antara 4000-20000, khususnya PEG 4000 dan PEG 6000 (Soni et al., 2020)(Leuner & Dressman, 2000).

Polyethylene Glycol (PEG) memiliki properties seperti biokompatibilitas, low cost, toksisitas rendah, inert, non-immunogenic, hidrofilik, tidak mudah terbakar, dapat didaur ulang dan memiliki stabilitas yang baik. Karena properties yang dimilikinya PEG banyak digunakan pada beberapa aplikasi seperti pada bidang biomaterial (drug delivery, rekayasa jaringan), bidang industri dan manufaktur (kosmetik, farmasi, biodisel) dll (Soni et al., 2020)(Dimitrov & Tsvetanov, 2012). Dibawah ini merupakan tabel yang menunjukkan karakteristik dari *Polyethylene Glycol* (PEG)

Tabel 2. 4 Karakteristik *Polyethylene Glycol* (PEG) (Dimitrov & Tsvetanov, 2012; Soni et al., 2020)

Karakteristik	Nilai
Rumus kimia	$HO-(CH_2CH_2O)_n-H$
Density	1.27 g/mL at 25 °C
Melting point	64-66 °C
Boiling point	>250 °C
Specific gravity	1.128
Vapor pressure	<0.01 mm Hg (20 °C)

Karakteristik	Nilai
Warna	Putih
pH	5.5 – 7.0 (25 °C, 50 mg/mL in H ₂ O)



Gambar 2. 6 Struktur molekul PEG (Dimitrov & Tsvetanov, 2012)



Gambar 2. 7 Bentuk fisik PEG 4000

2.5 *Hyperthermia Therapy*

2.5.1 *Pengertian Hyperthermia Therapy*

Kanker merupakan salah satu penyebab utama kematian di dunia. Terdapat beberapa metode untuk pengobatan kanker yaitu metode konvensional dan modern. Pembedahan, radioterapi, *gene therapy* dan kemoterapi merupakan metode konvensional utama yang sering digunakan untuk pengobatan kanker. Namun, dengan menggunakan metode pengobatan tersebut masih banyak memiliki keterbatasan dan efek samping bagi pasien penderita kanker seperti toksisitas terhadap sel-sel sehat disekitarnya (Beik et al., 2016; P. Das et al., 2019).

Hyperthermia therapy merupakan salah satu metode terapi pengobatan kanker modern yang saat ini banyak digunakan dan dikembangkan. Menurut National Cancer Institute dari Amerika Serikat *hyperthermia therapy* merupakan suatu jenis terapi dimana jaringan tubuh dikenai temperatur tinggi untuk merusak dan membunuh sel kanker, menghambat pertumbuhannya atau membuat sel kanker lebih sensitif terhadap efek radiasi dan obat anti kanker tertentu (Bañobre-López et al., 2013). Menurut National Cancer Institute sel kanker umumnya akan mati atau rentang pada temperatur sekitar 42-45°C, sedangkan sel tubuh yang sehat dapat menerima panas yang lebih tinggi sekitar 42 °C. Sedangkan untuk meningkatkan temperaturnya *hyperthermia therapy* menggunakan sumber panas eksternal (Behrouzkie et al., 2016). Pendekatan ini dapat menghancurkan tumor kanker dengan meminimalkan kerusakan pada jaringan yang sehat dan dapat mengurangi efek samping negatif (Latorre & Rinaldi, 2009).

Menurut The National Cancer Institute, *hypothermia therapy* dibagi ke dalam tiga jenis yaitu: hipertermia lokal, hipertermia regional, dan hipertermia seluruh tubuh. Hipertermia lokal melibatkan pemanasan pada area kecil seperti tumor, hipertermia regional melibatkan pemanasan area jaringan yang luas seperti organ, sedangkan hipertermia seluruh tubuh melibatkan pemanasan tubuh untuk pengobatan kanker metastatik (Laurent et al., 2011).

2.5.2 Magnetic Hyperthermia

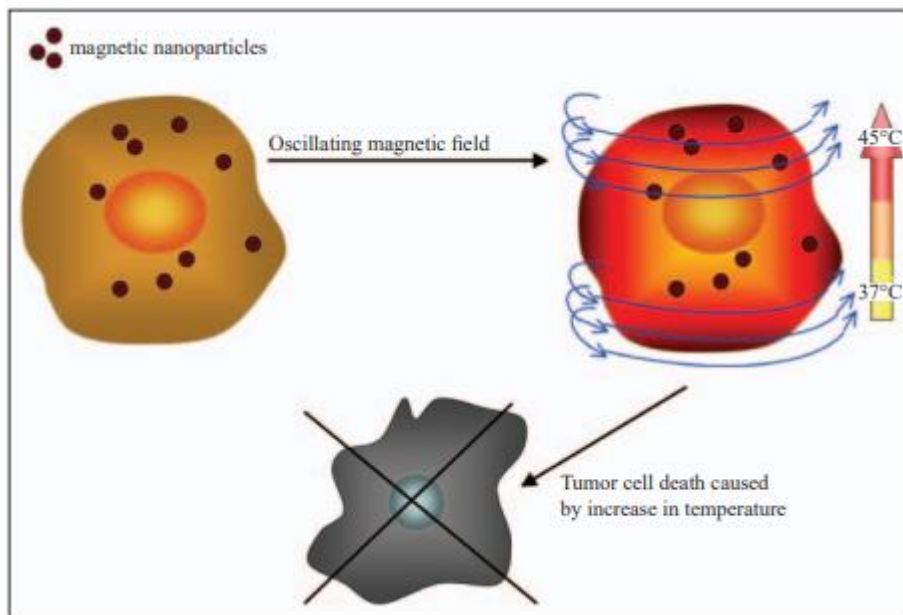
Magnetic hyperthermia merupakan metode pengobatan kanker dengan menggunakan nanopartikel magnetik. Dalam prosesnya, nanopartikel magnetik disuntikkan secara lokal ke dalam jaringan kanker yang kemudian dipanaskan hingga temperatur yang dibutuhkan dengan bantuan medan magnet AC dengan kekuatan dan frekuensi yang cukup untuk menyebabkan nanopartikel menjadi panas, yang menyebabkan kematian sel tumor dengan cepat sementara jaringan normal disekitarnya tetap tidak terpengaruh (Latorre & Rinaldi, 2009).

Sel-sel kanker akan mati pada temperatur 42 °C selama 30 menit. Oleh karena itu intensitas dan frekuensi medan magnet AC harus sesuai agar menghasilkan energi yang cukup untuk mencapai temperatur yang diperlukan. Menurut standar Internasional, frekuensi yang diterapkan pada makhluk hidup tidak boleh melebihi batas atas kriteria Atkinson-Brezovich ($H \times f \leq 4,85 \times 10^8 \text{ A m}^{-1} \text{ s}^{-1}$). Dengan demikian, frekuensi yang digunakan harus antara 30 kHz–300 kHz sedangkan batas medan magnet yang diijinkan adalah $H \leq 15 \text{ kA/m}$ (Ramazanov et al., 2021).

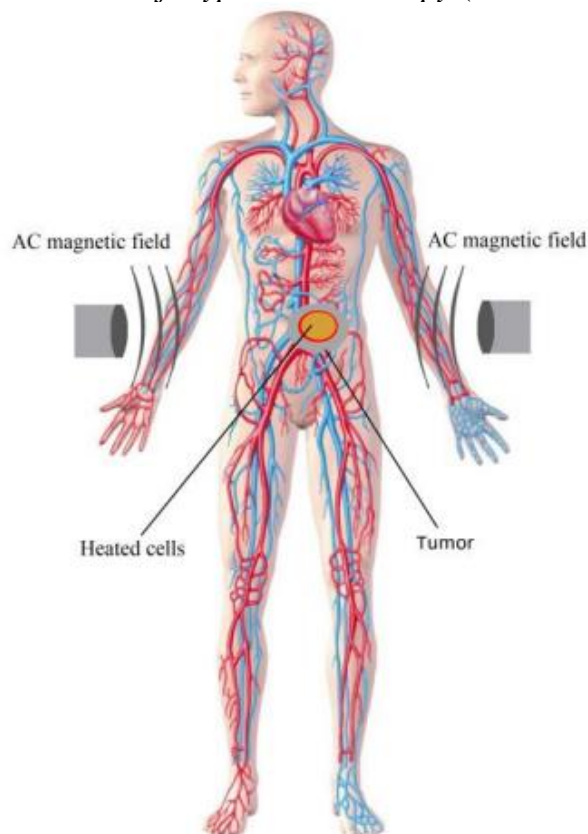
Fluida magnetik berbasis nanopartikel magnetik (Fe_3O_4) superparamagnetik yang dilapisi dengan lapisan biokompatibel cocok untuk aplikasi *hyperthermia therapy* karena partikelnya memiliki momen magnet yang tinggi, *specific loss power* (SLP) magnetik yang kuat serta *non-toxicity*. Food and Drug Administration menyetujui bahwa nanopartikel Fe_3O_4 superparamagnetik biokompatibel dengan tubuh manusia (Linh et al., 2009). Efisiensi pemanasan nanopartikel magnetik dinyatakan dalam bentuk *Specific Absorption Rate* (SAR), yang merupakan faktor penting dalam menentukan keberhasilan aplikasi *hyperthermia therapy*. Jumlah panas yang dihasilkan nanopartikel magnetik dikuantifikasi dalam SAR dengan rumus berikut,

$$SAR = \frac{c}{m} \left(\frac{dT}{dt} \right) \quad 2.1$$

Dimana, C adalah *specific heat* dari koloid (yaitu, untuk air dengan nilai $4,18 \text{ J g}^{-1} \text{ C}^{-1}$), dT/dt adalah kemiringan awal grafik temperatur terhadap waktu, dan m adalah massa material magnetik (mg/ml) dalam suspensi. Satuan SAR dinyatakan dalam Watt/gram (W/g) (Fatima et al., 2021).



Gambar 2. 8 Mekanisme kerja *hyprthermia therapy* (Latorre & Rinaldi, 2009)



Gambar 2. 9 Proses *hyperthermia therapy* menggunakan nanopartikel magnetik (Ramazanov et al., 2021)

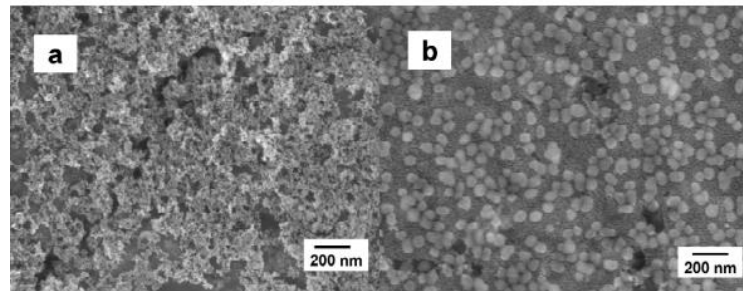
2.6 Penelitian Sebelumnya

Penelitian Sebelumnya yang menjadi dasaran penelitian ini dirangkum dalam tabel dan diagram berikut:

Tabel 2. 5 Penelitian sebelumnya

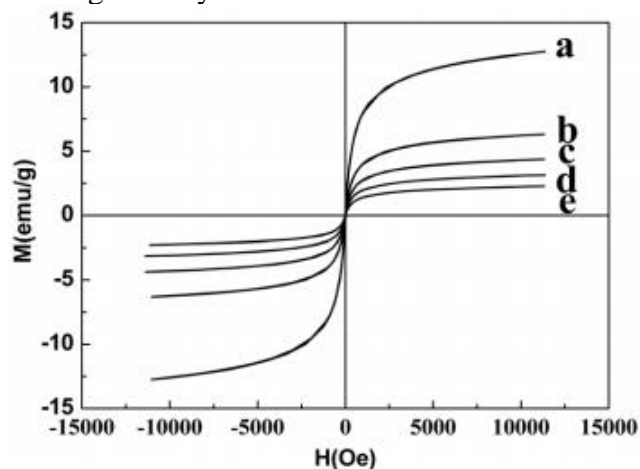
Aspek	Gao, Maizhen el al.	Glaria, A et al.	Adam, Alexandre et al.
Tahun	2011	2018	2021
Sintesis Fe ₃ O ₄	Coprecipitation	Co-precipitation	microemulsion
Sintesis <i>coated silica Stabilizer</i>	Sol gel PEG	microemulsion -	microemulsion Oleic acid
Ukuran partikel Fe ₃ O ₄	8-12 nm	67 nm	18 nm
Ukuran partikel <i>silica coated magnetic</i>	-	>69 nm	70 ± 7 nm
Magnetisasi	2,4 - 12,7 emu/g	18 emu/g	-

Sintesis *silica coated magnetic* telah dilakukan oleh Gao, Maizhen el al. Dengan menggunakan karakterisasi SEM. Pada gambar a menunjukkan karakterisasi SEM pada Fe₃O₄ dimana masih banyak terdapat aglomerasi. Pada gambar menunjukkan karakterisasi SEM Fe₃O₄/SiO₂ dimana aglomerasi sudah mulai berkurang.



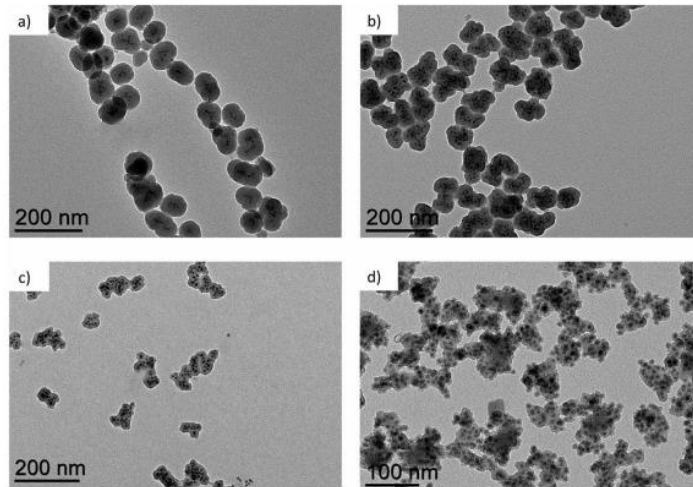
Gambar 2. 10 Karakterisasi SEM (a) Fe₃O₄ (b) Fe₃O₄/SiO₂ (Gao, Maizhen el al, 2011)

Magnetisasi Fe₃O₄/SiO₂ nilainya adalah 12,7 emu/g, 6,3 emu/g, 4,3 emu/g, 3,1 emu/g dan 2,4 emu/g untuk berbagai TEOS konsentrasi masing-masing, yang menunjukkan tren penurunan bertahap. Alasannya adalah bahwa lapisan SiO₂ tumbuh lebih tebal dengan meningkatnya konsentrasi TEOS, sehingga mengurangi magnetisasi. Singkatnya, kemagnetan dari partikel komposit dapat dikontrol dengan menyesuaikan konsentrasi TEOS.



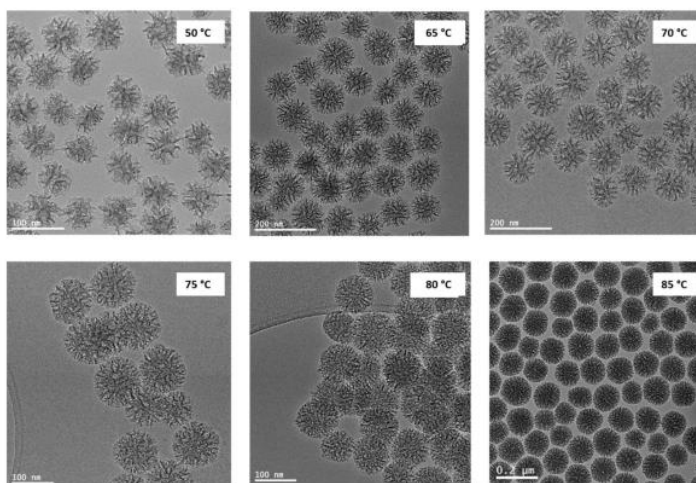
Gambar 2. 11 Kurva Magnetisasi Fe₃O₄/SiO₂ (Gao, Maizhen el al, 2011)

Sintesis *silica coated magnetic* telah dilakukan oleh Glaria,A et al. Dengan menggunakan karakterisasi SEM. Ukuran partikel masih besar tetapi aglomerasi berkurang.



Gambar 2. 12 Karakterisasi SEM $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ (Glaria,A et al, 2018)

Sintesis *silica coated magnetic* telah dilakukan oleh Adam, Alexandre et al. Dengan menggunakan karakterisasi TEM menunjukkan ukuran partikel sudah homogen dan aglomerasi berkurang.



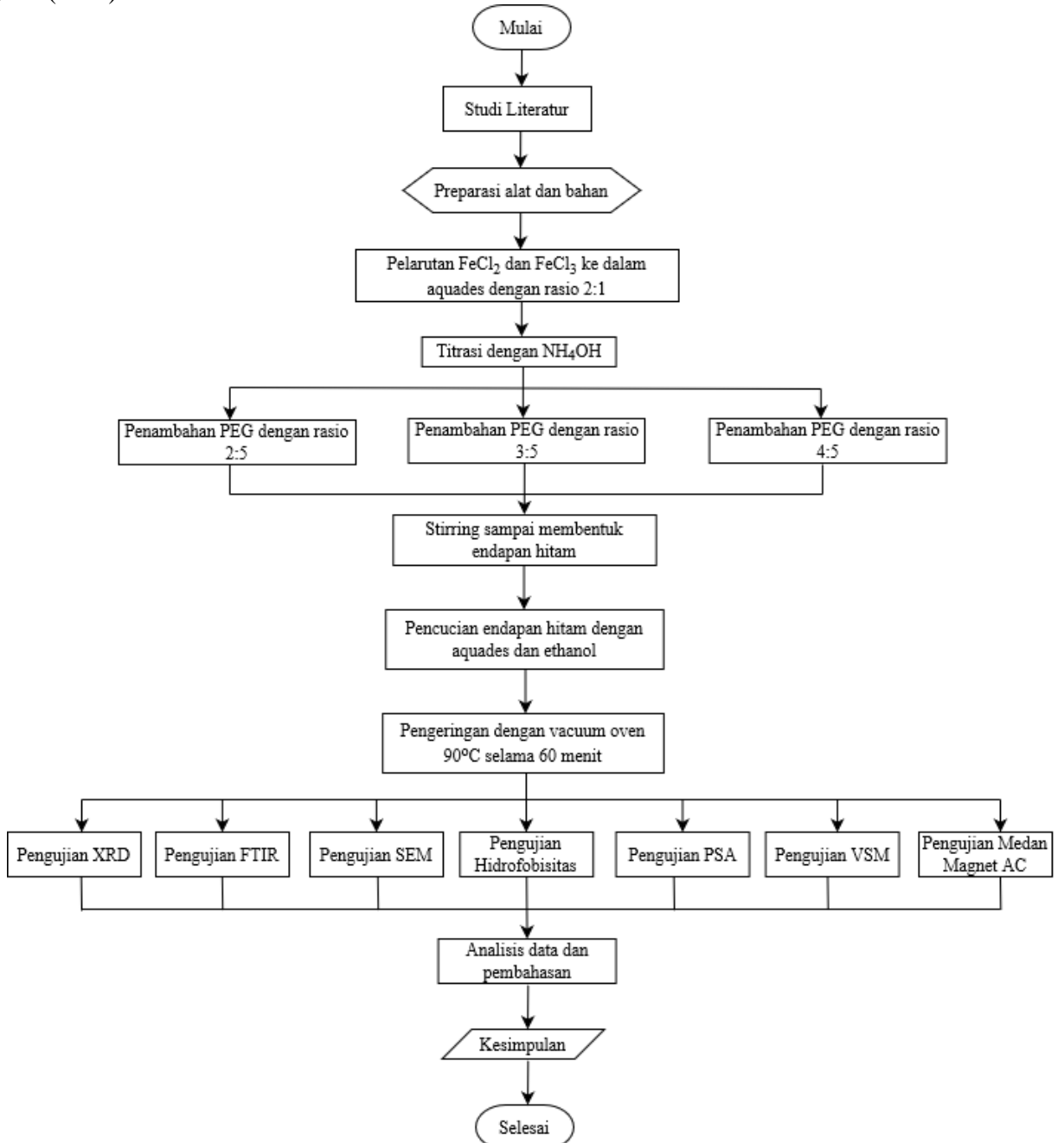
Gambar 2. 13 Karakterisasi TEM $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ (Adam,Alexandre et al, 2021)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

3.1.1 Diagram Alir Sintesis Fe₃O₄

Berikut merupakan diagram alir dari proses sintesis Fe₃O₄ dengan penstabil *Polyethylene Glycol* (PEG)



Gambar 3. 1 Diagram alir sintesis Fe₃O₄

3.1.2 Diagram Alir Sintesis Fe₃O₄/SiO₂

Berikut merupakan diagram alir dari proses sintesis Fe₃O₄/SiO₂



Gambar 3. 2 Diagram alir sintesis Fe₃O₄/SiO₂

3.2 Bahan Penelitian

Adapun bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Steel wool*
Steel wool digunakan sebagai bahan untuk membuat FeCl₂.
2. FeCl₃
FeCl₃ digunakan sebagai prekursor untuk sintesis Fe₃O₄.
3. HCl 2M
HCl 2M digunakan untuk mereaksikan *steel wool*. HCl yang digunakan didapatkan dari Sumber Ilmiah Persada (SIP).
4. NH₄OH 25%

NH_4OH 25% merupakan basa yang digunakan sebagai titrasi untuk menghasilkan endapan hitam Fe_3O_4 . NH_4OH 25% yang digunakan didapatkan dari Sumber Ilmiah Persada (SIP).

5. Aquades

Aquades digunakan sebagai pelarut dan untuk memcuci endapan hitam Fe_3O_4 dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$.

6. NaOH

7. Ethanol 99%

Ethanol 99% digunakan untuk memcuci endapan hitam Fe_3O_4 dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$. Ethanol 99% didapatkan dari Sumberl Ilmiah Persada (SIP).

8. *Polyetylen Glycol* 4000 (PEG 4000)

Polyetylen Glycol 4000 (PEG 4000) diganakan sebagai agen penstabil saat sintesis Fe_3O_4 . PEG 4000 yang digunakan menggunakan merk Sigma Aldrich yang didapatkan dari Muda Berkoh Jogja.

9. Kloroform

Kloroform digunakan untuk melarutkan Fe_3O_4 dan CTAB. Kloroform yang digunakan merk Sigma Aldrich yang didapatkan dari Sumberl Ilmiah Persada (SIP).

10. *Cetyltrimethylammonium Bromide* (CTAB)

Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB) digunakan sebagai template silika. CTAB yang digunakan merk Sigma Aldrich yang didapatkan dari Merck Germany.

11. *Tetraethyl Orthosilicate* (TEOS)

Tetraethyl Orthosilicate (TEOS) digunakan sebagai prekursor untuk *coating* silika. TEOS yang digunakan merk Sigma Aldrich yang didapatkan dari Merck Germany.

3.3 Alat Penelitian

Adapun alat yang digunakan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Beaker glass*

Beaker glass digunakan sebagai wadah pencampuran bahan utama.

2. Gelas ukur

Gelas ukur digunakan untuk mengukur volume larutan.

3. Naraca analitik

Neraca analitik digunakan untuk menimbang massa bahan yang akan digunakan.

4. Pipet tetes

Pipet tetes digunakan untuk mengambil larutan kimia dari wadah ke dalam gelas ukur.

5. Cawan petri (*petri dish*)

Cawan petri digunakan sebagai wadah nanopartikel magnetik saat di *vaacum oven*.

6. Spatula

Spatula digunakan untuk mengambil bahan serbuk yang akan digunakan.

7. *Magnetic stirrer*

Magnetic stirrer digunakan untuk mengaduk larutan secara otomatis sampai homogen

8. Neodymium magnet

Neodymium magnet digunakan untuk membantu mengendapkan Fe_3O_4 .

9. Kertas saring

Kertas saring digunakan untuk menyaring larutan hasil reaksi *steel wool* dengan HCL 2M untuk menghasilkan larutan FeCl_2 yang berwarna hijau.

10. Buret

Buret digunakan untuk meneteskan NH_4OH 25% ke dalam larutan prekursor.

11. Statif dan klem

Statif dan klem digunakan untuk menjepit buret saat hendak melakukan titrasi.

12. pH meter

pH meter digunakan untuk mengukur pH selama proses sintesis.

13. *Centrifuge*

Centrifuge digunakan untuk memisahkan bahan tersuspensi dari medianya.

14. *Vacuum oven*

Vacuum oven digunakan untuk mengeringkan sampel setelah sintesis

15. Alat karakterisasi morfologi dan struktur material:

- Instrumen *X-Ray Diffractometry* (XRD)
- Instrumen *Fourier Transform Infrared* (FTIR)
- Instrumen *Scanning Electron Microscopy* (SEM)
- Instrumen *Particle Size Analyzer* (PSA)

16. Alat uji sifat magnet:

- Instrumen *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM)

17. Alat uji disipasi panas

- Medan magnet AC

3.4 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 , penstabil *Polyethylene Glycol* (PEG) dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$.

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 , $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$

4. Pengujian

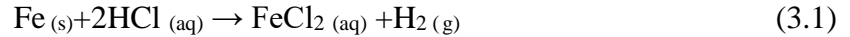
Terdapat berbagai pengujian yang dilakukan untuk karakterisasi hasil penelitian, yaitu SEM, XRD, FTIR, PSA, VSM, hidrofobitas dan Medan Magnet AC.

3.5 Prosedur Penelitian

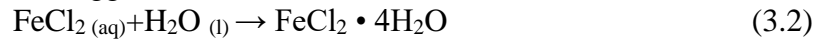
Sintesis nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ ini dilakukan melalui 3 tahapan, yaitu proses sintesis nanopartikel magnetik Fe_3O_4 dengan penambahan agent penstabil PEG menggunakan metode *co-precipitation*, dilanjutkan dengan sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ menggunakan metode *microemulsion*. Proses ketiga adalah sintesis *liquid magnetic*.

3.5.1 Sintesis Nanopartikel Fe₃O₄

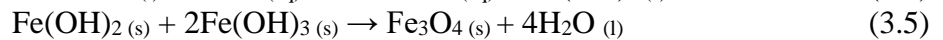
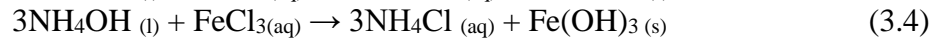
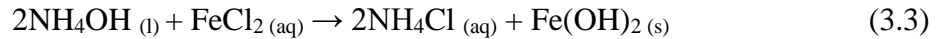
Dalam penelitian ini, sintesis nanopartikel magnetik Fe₃O₄ dilakukan dengan menggunakan metode *co-precipitation* dengan bahan dasar prekursor FeCl₂ dan FeCl₃. Larutan FeCl₂ dibuat dengan mereaksikan steel wool sebagai sumber Fe dengan HCl. Reaksi yang terbentuk sebagai berikut:



Lalu ditambahkan dengan *aquades* hingga larutan memiliki rumus kimia berikut:



Selanjutnya larutan FeCl₃ dan FeCl₂ dilarutkan pada *aquades* dengan perbandingan molar Fe³⁺ banding Fe²⁺ 2:1. Larutan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 800 rpm dan pada temperatur ruang. Setelah itu larutan dititisi menggunakan ammonia (NH₄OH 25%) hingga nilai pH sekitar 9-10, sambil terus diaduk dengan kecepatan 800 rpm. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



Selama proses titrasi berlangsung, *Polyethylene Glycol* (PEG) ditambahkan dengan variasi konsentrasi 2:5, 3:5 dan 4:5, larutan terus diaduk dengan kecepatan 800 rpm sampai larutan berubah warna dan terbentuk endapan hitam. Selanjutnya endapan hitam disaring dari larutan dengan menggunakan bantuan magnet dan dicuci menggunakan *aquades* dan etanol sampai pH netral. Endapan hitam Fe₃O₄ yang terkumpul dikeringkan menggunakan vacuum oven dengan temperatur 80°C selama 2 jam.

3.5.2 Sintesis Fe₃O₄/SiO₂

Proses sintesis Fe₃O₄/SiO₂ dilakukan dengan menggunakan proses *microemulsion* dengan detail metode seperti berikut:

1. *magnetic nanoparticle* Fe₃O₄ didispersikan dalam kloroform.
2. Larutan magnetit ditambahkan *cetyltrimethylammonium bromide* (CTAB) dan *aquades*.
3. Ultrasonikasi selama 15 menit.
4. Larutan dipanaskan hingga temperatur 90°C selama 30 menit sambil diaduk sedang 800 rpm untuk menguapkan kloroform, menghasilkan larutan Fe₃O₄-CTAB berwarna hitam transparan.
5. NaOH 2,00 M ditambahkan dalam larutan sampai pH larutan menjadi 12.
6. Larutan dipanaskan hingga 70°C sambil diaduk sedang 700 rpm selama 1 jam.
7. *Tetraethyl orthosilicate* (TEOS) ditambahkan ke dalam larutan reaksi secara berurutan dengan pengadukan cepat 700 rpm.
8. Larutan diaduk dengan kecepatan 700 rpm, temperatur 40°C selama 16 jam.
9. Dilakukan sentrifuge selama 15 menit untuk menghasilkan endapan hitam kecoklatan.
10. Dilakukan tiga kali pencucian dengan *aquades* dan etanol untuk menghilangkan spesies yang tidak bereaksi.
11. Endapan dikeringkan dengan vacuum oven 80°C selama 30 menit.

3.5.3 Sintesis *Liquid Magnetic*

Bahan pendispersi serbuk Fe₃O₄, Fe₃O₄-PEG dan Fe₃O₄/SiO₂ yang digunakan dalam penelitian ini adalah *aquades*. Jumlah *aquades* yang dibutuhkan yaitu sebanyak 85% dari total

massa serbuk Fe_3O_4 , Fe_3O_4 -PEG dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$. Lalu serbuk Fe_3O_4 dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ didispersikan ke dalam aquades dan aduk hingga seluruh magnetit terdispersi.

3.6 Pengujian

Dalam penelitian ini, digunakan berbagai metode pengujian sebagai berikut:

3.6.1 X-Ray Diffractometry (XRD)

Pengujian *X-ray diffractometry* atau XRD merupakan salah satu teknik karakterisasi material yang digunakan untuk menganalisis karakteristik kristal, senyawa, dan struktur kristal pada suatu material. Cara kerja alat ini adalah dengan memancarkan sinar-X ke arah sampel dan secara terus-menerus mengubah sudut tembakan hingga pantulannya menghasilkan spektrum intensitas difraksi. Difraksi merupakan interferensi konstruktif yang tersebar. Difraksi dan puncak intensitas dapat terjadi ketika sinar-X yang datang bertubrukan dengan sampel dan memenuhi hukum Bragg seperti pada persamaan 3.1 (Widyastuti et al., 2019).

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.6)$$

Dimana,

n = orde difraksi

λ = panjang gelombang sinar-X (m)

d = jarak antara bidang yang menghasilkan difraksi (\AA)

θ = sudut difraksi (radian)

Hasil dari analisis XRD berupa pola difraksi sinar-X yang memiliki puncak intensitas pada 2θ yang berbeda antara satu dengan lainnya. Setiap puncak disini mewakili difraksi dari bidang kristalografi tertentu. Dengan membandingkan hasil analisis XRD dengan basis data standar yang telah ada, jenis zat kristalin dalam suatu spesimen dapat diketahui dan diidentifikasi (Widyastuti et al., 2019). Untuk mengetahui informasi terkait ukuran kristal sampel dari data hasil keluaran XRD dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Scherrer (Ingham & Toney, 2013) seperti pada Persamaan 3.2 berikut.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta\cos\theta} \quad (3.7)$$

Dimana,

D = ukuran kristal (\AA)

K = konstanta Scherrer dengan nilai 0,9

λ = panjang gelombang (\AA)

β = FWHM (Full Width at Half Maximum) (rad)

θ = sudut difraksi ($^\circ$)

Instrumen XRD yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini bertipe Philips X'Pert MPD (*Multi Purpose Diffractometer*) seperti pada gambar 3.3 yang terdapat di Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS, Surabaya. Parameter pengujian XRD yang digunakan adalah panjang gelombang Cu- $K\alpha$ 1,5406 \AA , energi x-ray 8,04 keV, waktu difraksi 10 detik, dan sudut yang digunakan 15-80 $^\circ$. Dari pengujian XRD akan didapatkan data yang berisikan intensitas dan sudut yang terdeteksi. Kemudian diolah ke dalam bentuk grafik menggunakan software Origin Pro. Pengujian ini dilakukan terhadap sampel Fe_3O_4 , Fe_3O_4 -PEG dengan variasi konsentrasi dan Fe_3O_4 -PEG/ SiO_2 .



Gambar 3. 3 Alat uji XRD (Ermrich & Opper, 2011)

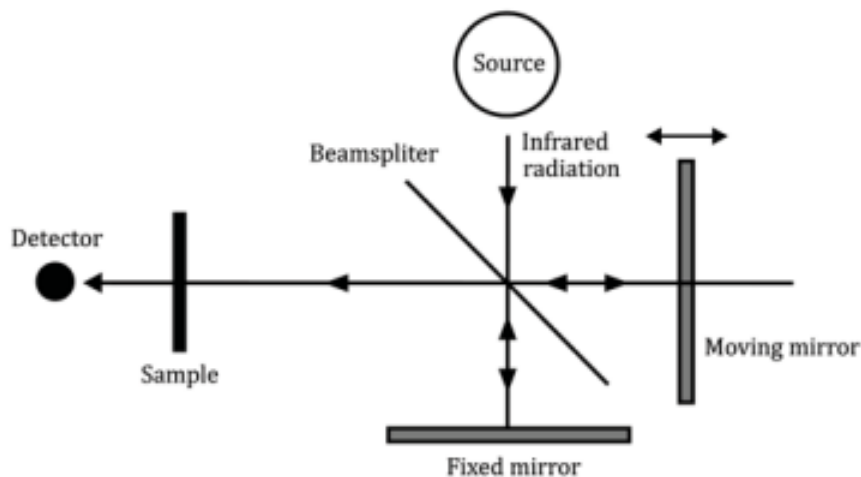
3.6.2 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

Fourier Transform Infrared Spectroscopy atau FTIR merupakan salah satu metode dalam karakterisasi material untuk mengidentifikasi struktur dari molekul suatu material berjenis spektroskopi vibrasi dengan memanfaatkan interaksi radiasi gelombang inframerah dan vibrasi di dalam molekul. Gelombang elektromagnetik yang digunakan pada pengujian FTIR adalah sinar inframerah. (Widyastuti et al., 2019) Instrumen uji FTIR dapat dilihat pada Gambar 3.4



Gambar 3. 4 Alat uji FTIR

Prinsip kerja FTIR secara umum yaitu dengan memancarkan radiasi infra merah dari interferometer melalui sampel. Sebagian besar radiasi infra merah akan diserap dan sebagian lainnya akan ditransmisikan. Hasilnya akan ditangkap oleh detektor dan diubah menjadi spectrum oleh Interfeogram. Hal tersebut menggambarkan penyerapan molekul dan transmisi yang mengindikasikan ciri khas suatu sampel. Prinsip kerja FTIR dapat dilihat pada Gambar 3.5. Hasil FTIR berupa grafik dengan sumbu x menyatakan intensitas spektrum inframerah. Sumbu y menyatakan absorbansi dengan hasil grafik suatu pita dengan puncak-puncak yang disebut sebagai pita absorbansi. Spektrum final hasil FTIR ini selanjutnya dibandingkan dengan basis data standar puncak transmisi ataupun absorbansi untuk menentukan struktur dari molekul suatu material melalui gugus fungsi (Leng, 2008).



Gambar 3. 5 Skema kerja FTIR (Widyastuti et al., 2019)

Pengujian *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi FT-IRS ITS Surabaya dengan menggunakan instrumen Thermo Scientific Nicolet IS10 dengan panjang gelombang $500 - 4000 \text{ cm}^{-1}$. Dari hasil pengujian dengan menggunakan Spektroskopi FTIR didapat beberapa puncak serta panjang gelombang masing-masing puncak. Pengujian ini dilakukan terhadap sampel Fe_3O_4 , Fe_3O_4 -PEG dengan variasi konsentrasi dan Fe_3O_4 -PEG/ SiO_2 .

3.6.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy atau SEM merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang umum digunakan untuk menganalisis sifat material dengan cara melakukan pemindaian (scanning) pada permukaan suatu material. SEM dapat mengidentifikasi topografi, morfologi, komposisi dan kristalografi suatu material. Data yang didapat dari pengujian SEM yaitu berupa gambar dengan perbesaran yang tinggi, *depth of field* yang tinggi serta resolusi yang lebih baik jika dibandingkan dengan mikroskop optik. Prinsip kerja dari SEM sendiri ialah interaksi antara elektron dengan material spesimen. Ketika elektron berinteraksi dengan atom di dalam spesimen, maka setiap individu elektron akan mengalami dua jenis hamburan, yaitu hamburan elastis dan inelastis. Dari pantulan inelastis akan menghasilkan sinyal elektron sekunder dan sinar X karakteristik, sedangkan dari pantulan elastis akan didapat sinyal backscattered electron. Tingkat hamburan elektron ini tergantung dari energi elektron, nomor atom unsur pada spesimen dan kerapatan atom sampel. Semakin besar energi elektron maka tingkat hamburannya akan semakin besar, namun semakin tinggi nomor atom dan kerapatan atom spesimen maka tingkat hamburannya semakin rendah. (Widyastuti et al., 2019)

Pengujian SEM dilakukan di Laboratorium Fakultas Teknik UPN Veteran Surabaya Jawa Timur dengan menggunakan instrumen Hitachi SU3500 dengan perbesaran 250x hingga 50.000x. Instrumen uji SEM dapat dilihat pada gambar 3.6



Gambar 3. 6 Alat Uji SEM

3.6.4 Particle Size Analyzer (PSA)

Karakterisasi menggunakan PSA (*Particle Size Analyzer*) digunakan untuk mengetahui ukuran partikel dan distribusi ukuran partikel. Prinsip kerja dari alat ini adalah dengan menggunakan metode *Dynamic Light Scattering* (DLS) yang memanfaatkan hamburan sinar inframerah. Hamburan sinar inframerah ditembakkan oleh alat ke sampel uji, sehingga sampel akan bereaksi menghasilkan gerak Brown (gerakan acak dari partikel yang sangat kecil di dalam cairan akibat dari benturan antar molekul yang ada di dalam zat cair). Gerak inilah yang kemudian dianalisis oleh alat, semakin kecil ukuran molekul maka gerakannya akan semakin cepat (Adhim, 2018; Irvine, 2019; Mufid, 2016).

Pengujian PSA dilakukan dengan menggunakan metode basah dimana metode ini menggunakan media pendispersi untuk mendispersikan material uji. Hal ini dikarenakan partikel didispersikan ke dalam media sehingga partikel tidak saling beraglomerasi (menggumpal). Dengan demikian ukuran partikel yang terukur adalah ukuran dari single particle. Selain itu hasil pengukuran dalam bentuk distribusi, sehingga hasil pengukuran dapat diasumsikan sudah menggambarkan keseluruhan kondisi sampel (Mufid, 2016).

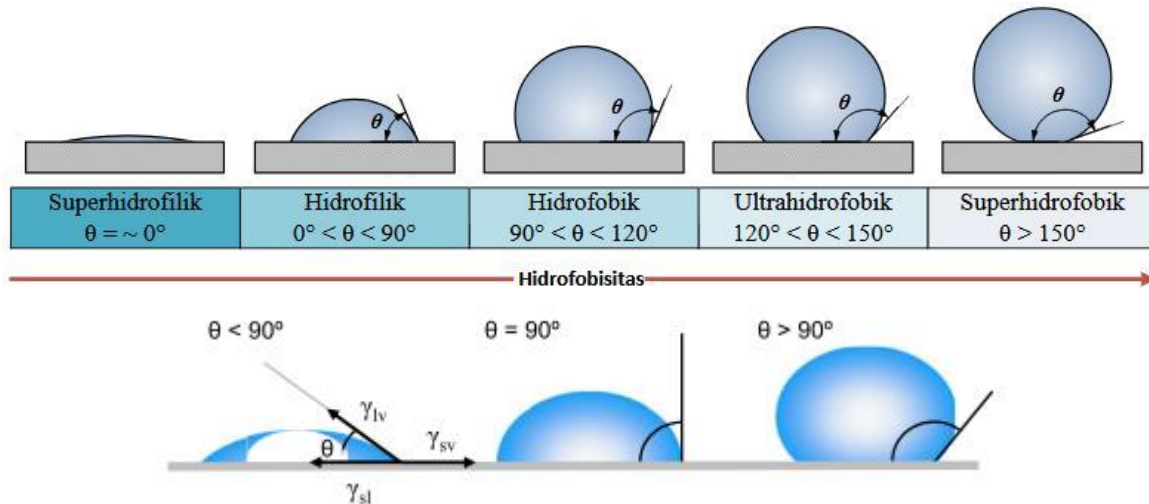
Pengujian sampel dengan PSA dilakukan di Laboratorium Zat Padat, Departemen Fisika ITS, Surabaya. Sampel yang akan diuji dilarutkan terlebih dahulu dalam medium aquades dan dijadikan sampel koloid. Setelah itu, sampel dimasukkan ke dalam sepertiga cuvet dan diuji. Alat uji PSA yang digunakan bertipe Malvern Zeta Nanosizer terlihat pada gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Alat Uji PSA (Adhim, 2018)

3.6.5 Hidrofobisitas

Pengujian hidrofobik merupakan salah satu metode karakterisasi hidrofobisitas permukaan suatu material dengan cara melakukan pengukuran sudut kontak air. Suatu material disebut memiliki sifat hidrofobik apabila air sulit mengalir pada permukaannya, sedangkan disebut memiliki sifat hidrofilik apabila air dengan mudah mengalir pada permukaannya. Metode hidrofobik dilakukan dengan cara menempatkan setetes air pada tempat yang berbeda dari permukaan nanofibrous, kemudian mengukur sudut kontak antara tetesan air dan permukaan partikel, kemudian dihitung nilai rata-ratanya. Sudut kontak besar ($>90^\circ$) sesuai dengan hidrofobisitas tinggi, dan hidrofilitas tinggi dengan sudut kontak kecil ($<90^\circ$) (Bracco & Holst, 2013).



Gambar 3. 8 Skema Uji Hidrofobisitas (Bracco & Holst, 2013)

3.6.6 Vibrating Sample Magnetometer (VSM)

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

Dalam metode ini, sampel nanopartikel Fe_3O_4 , Fe_3O_4 -PEG dan Fe_3O_4 -PEG/ SiO_2 dimasukkan kedalam wadah sampel dan ditempatkan di antara kedua kutub elektromagnet yang biasanya dihadapkan secara horizontal. Pada saat pengukuran, sampel diberikan getaran konstan secara vertikal dengan frekuensi yang tetap. Perubahan fluks magnetik, yang mana sebanding dengan momen magnetik sampel, menyebabkan induksi voltase AC yang nantinya dideteksi oleh pickup coils yang ditempatkan di dekat kutub elektromagnet. Hasil pengujian VSM berupa fungsi momen magnetik terhadap medan magnet yang diberikan, serta informasi lain seperti koersivitas, pergantian medan, dan distribusinya (Adeyeye & Shimon, 2015).

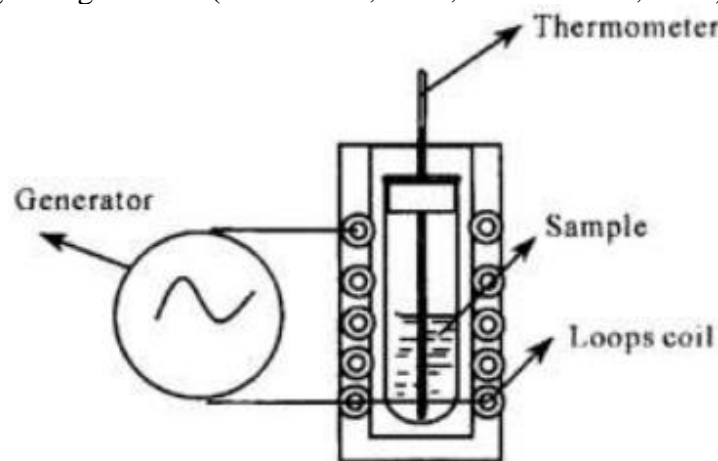
Pengujian sampel dengan VSM dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Lanjut I Fisika, Pusat Riset Fisika Kuantum, Puspiptek-Serpong, menggunakan VSM250 seperti pada gambar 3.9



Gambar 3. 9 Alat Uji VSM

3.6.7 Medan Magnet AC

Disipasi panas oleh nanopartikel supermagnetik di bawah medan magnet AC yang diterapkan memiliki prinsip kerja berdasarkan teori relaksasi Néel (rotasi momen magnetik tanpa gerakan partikel dan relaksasi Brownian (rotasi fisik). Pengujian pengaruh medan magnet luar AC dan frekuensi bertujuan untuk mengetahui adanya peningkatan temperatur yang terjadi dalam rentang waktu 660 detik. Hasil dari pengujian ini yaitu berupa grafik hubungan temperatur sebagai fungsi waktu (Abadi et al., 2017; Nemala et al., 2014).



Gambar 3. 10 Skema uji medan magnet AC dan frekuensi (Abadi et al., 2017)

Pada pengujian, 65 mg partikel nanopartikel sampel Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG}$ dan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG/SiO}_2$ diletakkan dalam wadah kaca. Selanjutnya sampel diletakkan di tengah kumparan sebagai sumber medan magnet AC lalu dialiri arus dari generator AC seperti pada gambar 3.10.

3.7 Rancangan Penelitian

Adapun rancangan penelitian dan pengujian yang dilakukan terlihat pada tabel dibawah.

Tabel 3. 1 Jadwal penelitian

Kegiatan	Februari				Maret				April				Mei				Juni			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur	■	■	■	■																
Asistensi			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Penyusunan Laporan					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Preparasi Alat dan Bahan					■	■														
Sintesis Fe ₃ O ₄						■	■	■	■											
Sintesis <i>Coating</i> Silika									■	■	■	■								
Sintesis <i>Liquid Magnetite</i>												■								
Pengujian													■	■	■	■	■			
Analisis data dan pembahasan																	■	■	■	■

Tabel 3. 2 Rancangan penelitian

Spesimen	Rasio konsentrasi penstabil PEG	Volume TEOS
Fe ₃ O ₄		
Fe ₃ O ₄ -PEG (2:5)	2:5	
Fe ₃ O ₄ -PEG (3:5)	3:5	
Fe ₃ O ₄ -PEG (4:5)	4:5	
Fe ₃ O ₄ -PEG (2:5)/ SiO ₂	2:5	4 ml
Fe ₃ O ₄ -PEG (3:5)/ SiO ₂	3:5	4 ml
Fe ₃ O ₄ -PEG (4:5)/ SiO ₂	4:5	4 ml

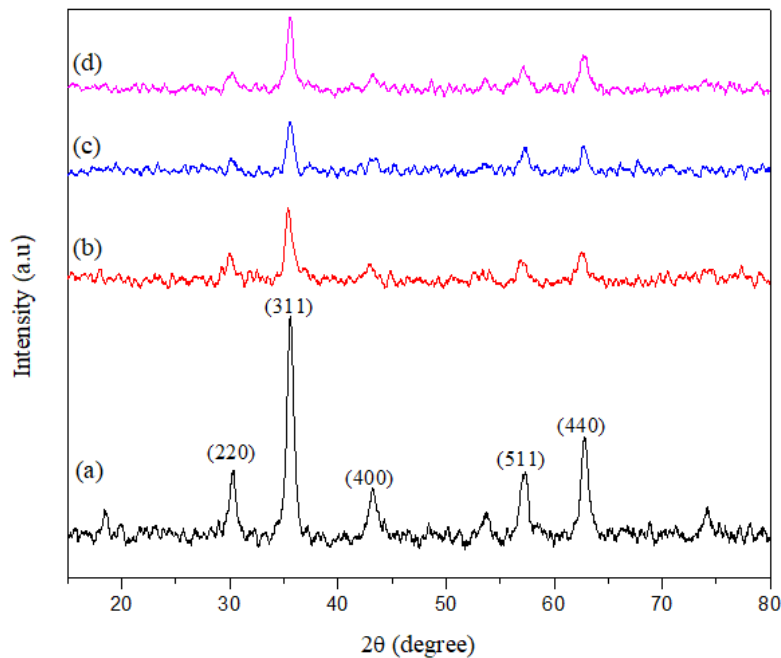
Tabel 3. 3 Rancangan pengujian

Pengujian		Spesimen	
		Nanopartikel Fe ₃ O ₄ , Fe ₃ O ₄ -PEG, Fe ₃ O ₄ -PEG/SiO ₂	<i>Liquid magnetite</i>
Uji Karakteristik	XRD	v	
	FTIR	v	
	SEM	v	
	PSA		v
Uji sifat magnetik	Hidrofobisitas	v	
	VSM	v	
Uji disipasi panas	Medan magnet AC		v

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Analisis Pengujian XRD

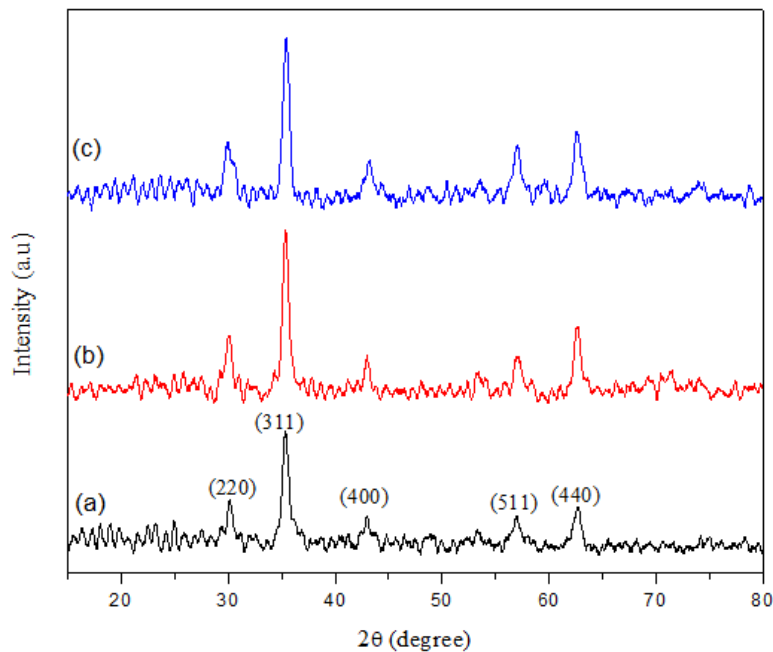
Pengujian XRD dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui unsur atau senyawa dan struktur kristal yang terdapat pada sampel. Pada penelitian kali ini sampel yang dilakukan pengujian XRD yaitu Fe_3O_4 , Fe_3O_4 -PEG dan Fe_3O_4 -PEG/ SiO_2 yang ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Hasil pengujian XRD (a) Fe_3O_4 , (b) Fe_3O_4 -PEG (2:5), (c) Fe_3O_4 -PEG (3:5), (d) Fe_3O_4 -PEG (4:5)

Pada gambar 4.1 menunjukkan pola difraksi XRD dari sampel Fe_3O_4 dan Fe_3O_4 -PEG dengan 3 variasi konsentrasi 2:5, 3:5 dan 4:5. Hasil analisis data menggunakan software *Xpert High Score Plus*, pada sampel Fe_3O_4 menunjukkan puncak difraksi pada daerah 2θ : 30.08°, 35.49°, 43.07°, 57.08° dan 62.74° dengan indeks miller (220), (311), (400), (511) dan (440). Berdasarkan referensi *ICSD 96- 900-6921* menunjukkan bahwa fasa yang terbentuk adalah magnetit (Fe_3O_4) yang merupakan oksida logam dengan struktur kristal *inverse spinel* dengan satuan struktur sel *Face-centered Cubic* (FCC) (Abboud et al., 2015; Anbarasu et al., 2015).

Pada gambar 4.1 penambahan *Polyethylene Glycol* (PEG) sebagai agen penstabil pada saat proses sintesis dengan metode *co-precipitation* tidak mengubah pola difraksi dari Fe_3O_4 , pada pola XRD menunjukkan puncak difraksi yang sama hal ini menunjukkan bahwa penambahan agen penstabil PEG saat sintesis tidak mempengaruhi struktur kristal dari magnetit (Fe_3O_4) (Abboud et al., 2015), akan tetapi intensitasnya berubah, dimana hal ini akan mempengaruhi ukuran kristalnya (Tai et al., 2016). Ukuran kristal dapat dilihat pada tabel 4.1. Pada penelitian Tai et al., 2016 menjelaskan bahwa penambahan PEG dapat menurunkan kristalinitas dari nanopartikel, karena polimer PEG merupakan sebuah oligomer yang mempunyai rantai seragam pendek, sehingga dapat dengan mudah diserap pada permukaan koloid metal oksida dalam hal ini Fe_3O_4 . Adanya PEG pada permukaan koloid menyebabkan pertumbuhan partikel-partikel Fe_3O_4 terhambat karena ruang gerak partikel-partikel tersebut terhalang dengan adanya PEG (Nanopartikel et al., 2021).



Gambar 4. 2 Hasil pengujian XRD (a) $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (2:5)/SiO}_2$, (b) $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (3:5)/SiO}_2$, (c) $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (4:5)/SiO}_2$

Pada gambar 4.2 menunjukkan pola difraksi $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG/SiO}_2$. Dimana terlihat puncak difraksi yang menunjukkan fasa Fe_3O_4 dengan indeks miller (220), (311), (400), (511) dan (440). Pada gambar 4.2 terdapat puncak difraksi yang intensitasnya sangat kecil yaitu pada $2\theta = 21.1^\circ$, 22.9° , 18.9° , dan 24.9° , menurut penelitian dari Das, Harinarayan et dan Kim, Ki Do menjelaskan bahwa sebuah wide peak atau puncak lebar pada $2\theta = 15\text{-}30^\circ$ itu menunjukkan adanya SiO_2 (H. Das et al., 2019; Kim et al., 2007).

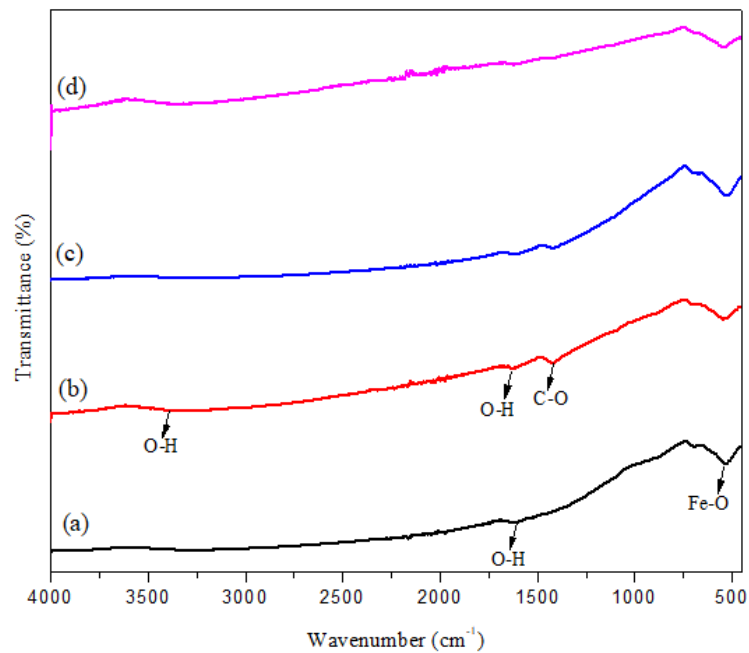
Selain itu, dapat dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan Scherrer pada persamaan 3.7 untuk memperoleh nilai *crystallite size* dari tiap-tiap sampel. Nilai ukuran kristal Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG}$ dan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG/SiO}_2$ dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Ukuran kristal

Sampel	2θ [Degree]	FWHM [Rad]	Ukuran kristal (nm)
Fe_3O_4	35.563	0.68	12.30245609
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (2:5)}$	35.39	0.68	12.29651641
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (3:5)}$	35.56	0.75	11.14869866
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (4:5)}$	35.54	0.57	14.69271658
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (2:5)/SiO}_2$	35.35	0.62	13.49250429
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (3:5)/SiO}_2$	35.344	0.61	13.71496003
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (4:5)/SiO}_2$	35.397	0.607	13.78524250

4.2 Hasil Analisis Pengujian FTIR

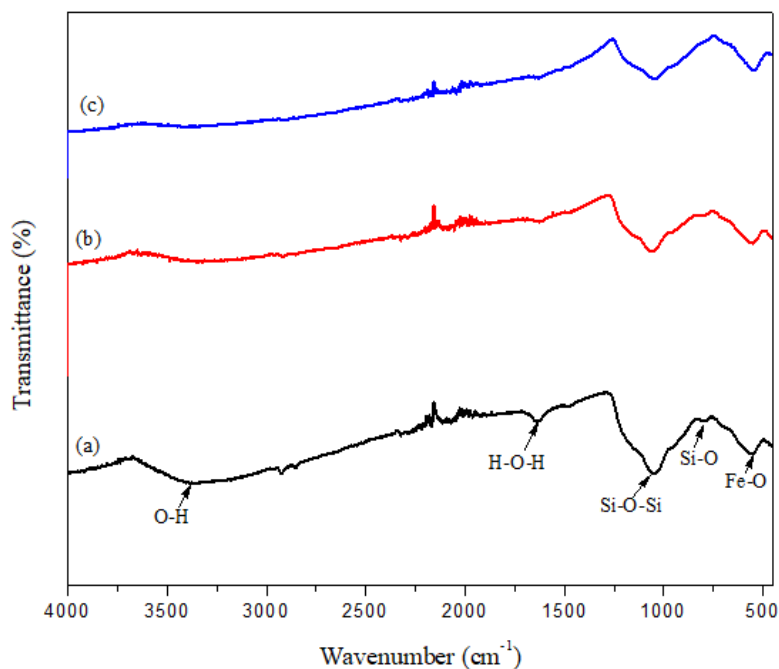
Pengujian *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) dilakukan untuk menganalisis gugus fungsi yang terbentuk selama proses sintesis. Dari hasil pengujian dengan menggunakan Spektroskopi FTIR didapat beberapa puncak serta panjang gelombang masing-masing puncak. Pengujian ini dilakukan terhadap sampel Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG}$ dengan variasi konsentrasi dan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG/SiO}_2$.



Gambar 4. 3 Hasil pengujian FTIR (a) Fe_3O_4 , (b) Fe_3O_4 -PEG (2:5), (c) Fe_3O_4 -PEG (3:5), (d) Fe_3O_4 -PEG (4:5)

Pada gambar 4.3 menunjukkan spektrum FTIR dari sampel Fe_3O_4 , dan Fe_3O_4 -PEG. Pada gambar (a) menunjukkan spektrum FTIR dari sampel Fe_3O_4 yang memiliki dua puncak utama. Pertama terdapat gugus fungsi Fe-O pada bilangan gelombang disekitar 529.75 cm^{-1} yang menunjukkan terbentuknya Fe_3O_4 . Bilangan gelombang antara $400 - 650 \text{ cm}^{-1}$ merupakan ciri khas dari ikatan Fe-O pada Fe_3O_4 (Irianti et al., 2021). Yang kedua terbentuk ikatan O-H *stretching* (gugus hidroksil) pada bilangan gelombang 1612.66 cm^{-1} yang merupakan vibrasi dari ikatan Fe-O yang menyertai reaksi pembentukan menggunakan metode *co-precipitation* (Arista et al., 2019). Pada sampel Fe_3O_4 -PEG menunjukkan beberapa puncak yaitu pada bilangan gelombang 549.07 cm^{-1} untuk gugus fungsi Fe-O, pada 1423.27 cm^{-1} untuk gugus fungsi C-O *stretching* dan $1609.50, 3356.15 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan gugus fungsi dari O-H (Namikuchi et al., 2021; Rajesh Kumar et al., 2014).

Pada gambar 4.4 menunjukkan spektrum FTIR dari sampel Fe_3O_4 -PEG/ SiO_2 , dimana terdapat gugus fungsi Fe-O pada bilangan gelombang 552.88 cm^{-1} , Si-O pada bilangan gelombang 789.55 cm^{-1} , Si-O-Si pada bilangan gelombang 1046.17 cm^{-1} , H-O-H pada bilangan gelombang 1634.21 cm^{-1} dan O-H *stretching* pada bilangan gelombang 3374.70 cm^{-1} (Chae et al., 2016).



Gambar 4. 4 Hasil FTIR (a) Fe_3O_4 -PEG (2:5)/ SiO_2 , (b) Fe_3O_4 -PEG (3:5)/ SiO_2 , (c) Fe_3O_4 -PEG (4:5)/ SiO_2

Dari semua hasil pengujian FTIR sampel Fe_3O_4 , Fe_3O_4 -PEG dengan variasi konsentrasi dan Fe_3O_4 -PEG/ SiO_2 dapat dirangkum gugus fungsi beserta daftar puncaknya pada tabel 4.3 sebagai berikut.

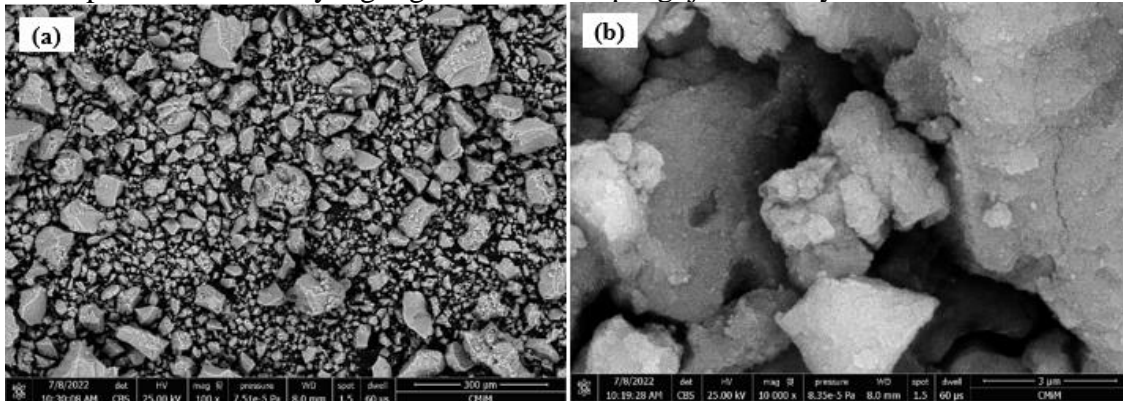
Tabel 4. 2 Puncak hasil pengujian FTIR tiap sampel

Sampel	Wavenumber (cm^{-1})	Ikatan
Fe_3O_4	529.75	Fe-O
	1612.66	O-H
Fe_3O_4 -PEG (2:5)	549.07	Fe-O
	1423.27	C-O
	1609.50	O-H
	3356.15	O-H
Fe_3O_4 -PEG (3:5)	524.29	Fe-O
	1419.53	C-O
	1600	O-H
Fe_3O_4 -PEG (4:5)	555.30	Fe-O
	3399.40	O-H
Fe_3O_4 -PEG (2:5)/ SiO_2	552.88	Fe-O
	789.55	Si-O
	1046.17	Si-O-Si
	1634.21	H-O-H
	3374.70	O-H
Fe_3O_4 -PEG (3:5)/ SiO_2	553.24	Fe-O
	799.04	Si-O
	1057.31	Si-O-Si
	1625.31	H-O-H
	33317.93	O-H
Fe_3O_4 -PEG (4:5)/ SiO_2	550.53	Fe-O

Sampel	Wavenumber (cm ⁻¹)	Ikatan
	1042.37	Si-O-Si
	3421.42	O-H

4.3 Hasil Analisis Pengujian SEM

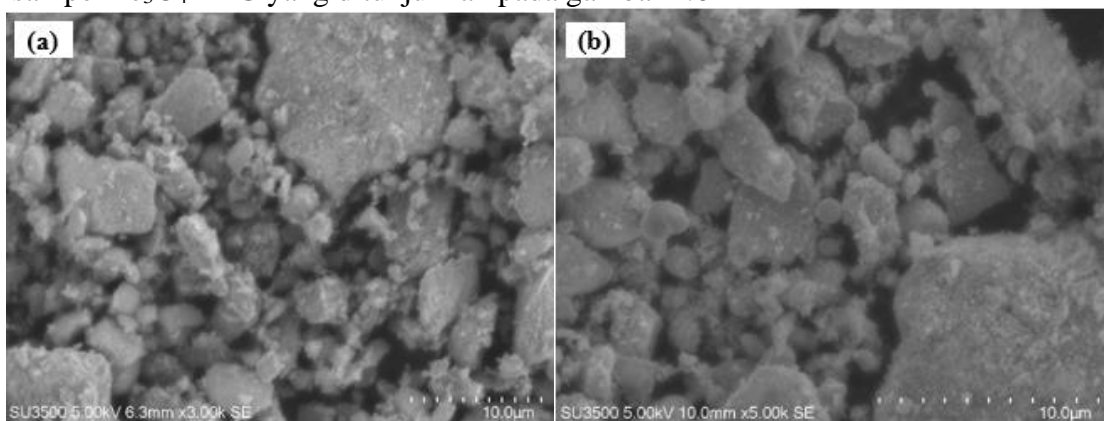
Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan pada sampel Fe₃O₄, Fe₃O₄-PEG dan Fe₃O₄-PEG/SiO₂. Tujuannya yaitu untuk mengidentifikasi morfologi dari permukaan sampel-sampel tersebut. Alat yang digunakan dalam pengujian SEM yaitu HITACHI SU3500.



Gambar 4.5 Hasil pengujian SEM Fe₃O₄ (a) perbesaran 100x, (b) perbesaran 10000x

Dari gambar 4.5 dapat dilihat struktur morfologi dari sampel Fe₃O₄ pada perbesaran 100x dan 10000x. Morfologi dari Fe₃O₄ tanpa penambahan *stabilizer* PEG dapat dilihat dari gambar memiliki ukuran yang tidak seragam dan juga masih banyak terdapat aglomerasi. Hal ini dikarenakan nanopartikel Fe₃O₄ yang disintesis dengan menggunakan metode *co-precipitation* tanpa menggunakan *stabilizer* memiliki *high surface energy* sehingga tidak stabil dan mudah beraglomerasi satu sama lain (Xu et al., 2014), serta adanya gaya Van der Waals pada permukaan dan gaya tarik magnet yang kuat antar partikel (Arista et al., 2019)(Ali et al., 2016).

Selanjutnya pengujian SEM juga dilakukan untuk mengetahui morfologi permukaan dari sampel Fe₃O₄-PEG yang ditunjukkan pada gambar 4.6

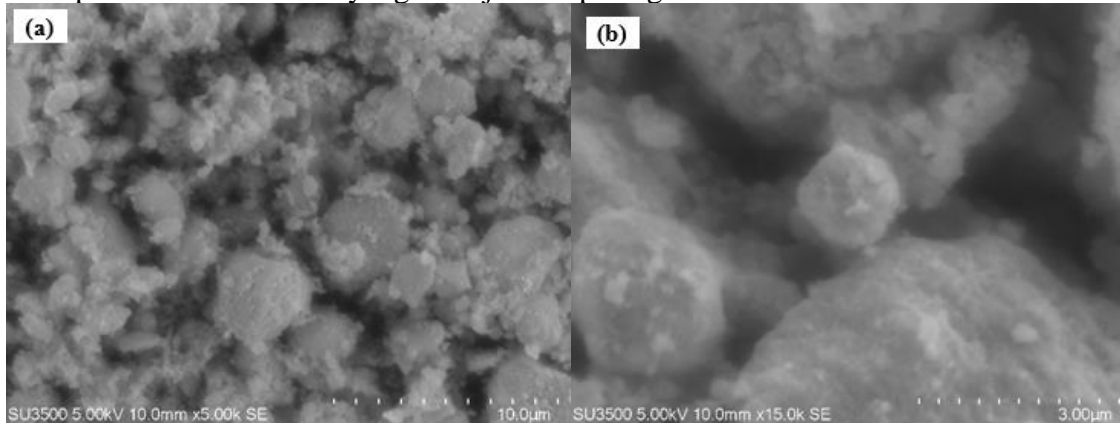


Gambar 4.6 Hasil pengujian SEM Fe₃O₄-PEG (a) perbesaran 3000x (b) perbesaran 5000x

Dari gambar 4.6 dapat dilihat struktur morfologi dari sampel Fe₃O₄-PEG memiliki ukuran yang lebih seragam jika dibandingkan dengan Fe₃O₄ walaupun masih terdapat beberapa ukuran yang besar. Dari gambar diatas juga dapat dilihat bahwa nanopartikel Fe₃O₄ dengan penambahan *stabilizer* PEG mempunyai bentuk bulat dan relatif seragam. Adanya penambahan PEG sebagai *stabilizer* atau *capping agent* pada saat proses sintesis dapat mengontrol ukuran partikel dan

menghalangi terjadinya aglomerasi (Antarnusa & Suharyadi, 2020; Arista et al., 2019). Dengan adanya PEG pada permukaan koloid menyebabkan pertumbuhan partikel-partikel Fe_3O_4 terhambat karena ruang gerak partikel-partikel tersebut terhalang dengan adanya PEG (Nanopartikel et al., 2021).

Selanjutnya pengujian SEM juga dilakukan untuk mengetahui morfologi permukaan dari sampel $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG/SiO}_2$ yang ditunjukkan pada gambar 4.7



Gambar 4. 7 Hasil pengujian SEM $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG/SiO}_2$ (a) perbesaran 5000x (b) perbesaran 15000x

Dari gambar 4.7 dapat dilihat struktur morfologi dari sampel $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG/SiO}_2$ memiliki bentuk bola (*spherical*), lebih seragam dan menunjukkan cangkang inti yang jelas yaitu silika yang melapisi pada permukaan nanopartikel Fe_3O_4 . Permukaan nanopartikel Fe_3O_4 *coating* silika tampak lebih halus dibandingkan dengan nanopartikel Fe_3O_4 tanpa *coating* silika (Chae et al., 2016). Nanopartikel Fe_3O_4 *coating* silika dengan rasio TEOS yang berbeda menunjukkan bahwa semakin besar rasio volume TEOS menyebabkan ukuran partikel semakin besar. Hal ini terjadi karena ketika dosis TEOS meningkat, jumlah SiO_2 meningkat. Oleh karena itu, partikel Fe_3O_4 cukup terlapisi, dan ukuran nanopartikel meningkat dengan rasio TEOS meningkat (Gao et al., 2011).

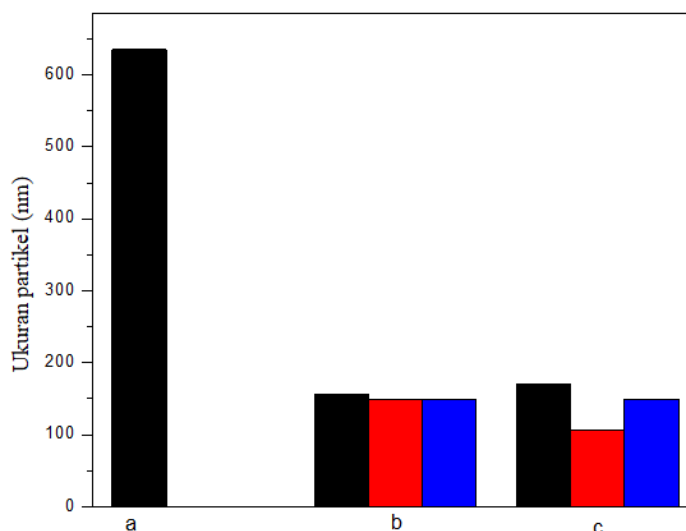
4.4 Hasil Analisis PSA

Pengujian PSA dilakukan pada sampel Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG}$ dan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG/SiO}_2$. Pengujian PSA dilakukan untuk mengetahui ukuran partikel yang terlarut dalam pelarut dan distribusinya.

Ukuran partikel rata-rata pada setiap sampel dapat terlihat pada tabel 4.4

Tabel 4. 3 Ukuran partikel rata-rata

Sampel	Ukuran partikel rata-rata (nm)
Fe_3O_4	635.1
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (2:5)}$	155.96
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (3:5)}$	149.74
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (4:5)}$	149.64
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (2:5)/SiO}_2$	170.4
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (3:5)/SiO}_2$	106.68
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (4:5)/SiO}_2$	149.84



Gambar 4. 8 Grafik ukuran partikel (a) Fe₃O₄ (b) Fe₃O₄-PEG (2:5) (3:5) (4:5) (c) Fe₃O₄-PEG/SiO₂

Pada tabel 4.3 dan gambar 4.8 dapat dilihat bahwa ukuran partikel Fe₃O₄ memiliki ukuran partikel paling besar dari sampel lainnya, hal ini karena adanya aglomerasi antar partikel saat proses sintesis berlangsung. Sedangkan sampel Fe₃O₄-PEG memiliki ukuran partikel jauh lebih kecil dibandingkan sampel Fe₃O₄. Hal ini sesuai dengan teori bahwa penggunaan agen penstabil PEG pada saat sintesis Fe₃O₄ dapat menurunkan ukuran partikelnya, karena dengan penambahan *stabilizer* dapat mengontrol ukuran partikel dan mengurangi aglomerasi antar partikel pada saat proses sintesis berlangsung (Antarnusa & Suharyadi, 2020).

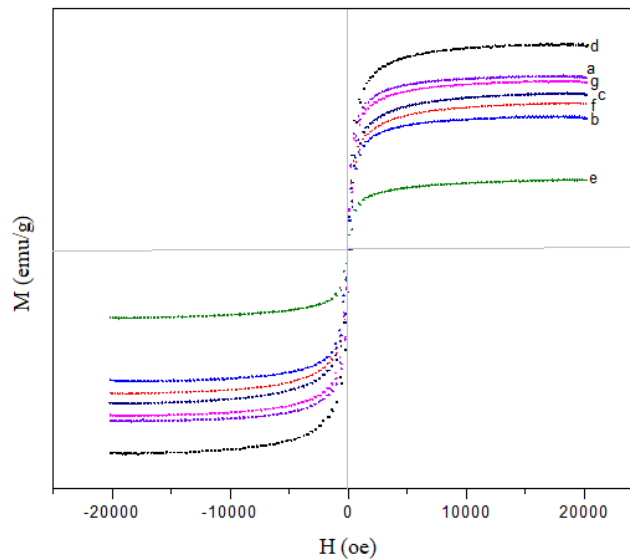
Sedangkan ukuran partikel pada sampel Fe₃O₄-PEG/SiO₂ memiliki ukuran partikel rata-rata lebih besar dari Fe₃O₄-PEG, hal ini membuktikan bahwa terdapat lapisan silika pada permukaan nanopartikel Fe₃O₄ sehingga ukuran partikelnya meningkat. Ukuran partikel pada Fe₃O₄ *coating* silika bisa dikontrol dengan cara mengontrol rasio volume TEOS. TEOS disini digunakan sebagai prekursor silika, jadi apabila volume TEOS meningkat, maka jumlah silika meningkat. Oleh karena itu, partikel Fe₃O₄ cukup terlapisi, dan ukuran nanopartikel meningkat seiring dengan rasio TEOS (Gao et al., 2011).

4.5 Hasil Analisis Pengujian *Vibration Sample Magnetometer* (VSM)

Sifat magnetik dari nanopartikel hasil sintesis pada penelitian ini diselidiki menggunakan perangkat pengujian Vibrating Sample Magnetometer (VSM) yang pada sampel Fe₃O₄, Fe₃O₄-PEG dan Fe₃O₄-PEG/SiO₂, dalam penelitian ini menunjukkan sifat superparamagnetik yang dapat dilihat dari bentuk kurva M-H atau kurva magnetisasi pada Gambar 4.9 serta memiliki nilai saturasi yang ditunjukkan pada tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Saturasi magnetisasi tiap sampel

Spesimen	Saturasi Magnetisasi (emu/g)
Fe ₃ O ₄	51.52
Fe ₃ O ₄ -PEG (2:5)	39.40
Fe ₃ O ₄ -PEG (3:5)	48.76
Fe ₃ O ₄ -PEG (4:5)	57.79
Fe ₃ O ₄ -PEG (2:5)/SiO ₂	30.92
Fe ₃ O ₄ -PEG (3:5)/SiO ₂	42.64
Fe ₃ O ₄ -PEG (4:5)/SiO ₂	50.81



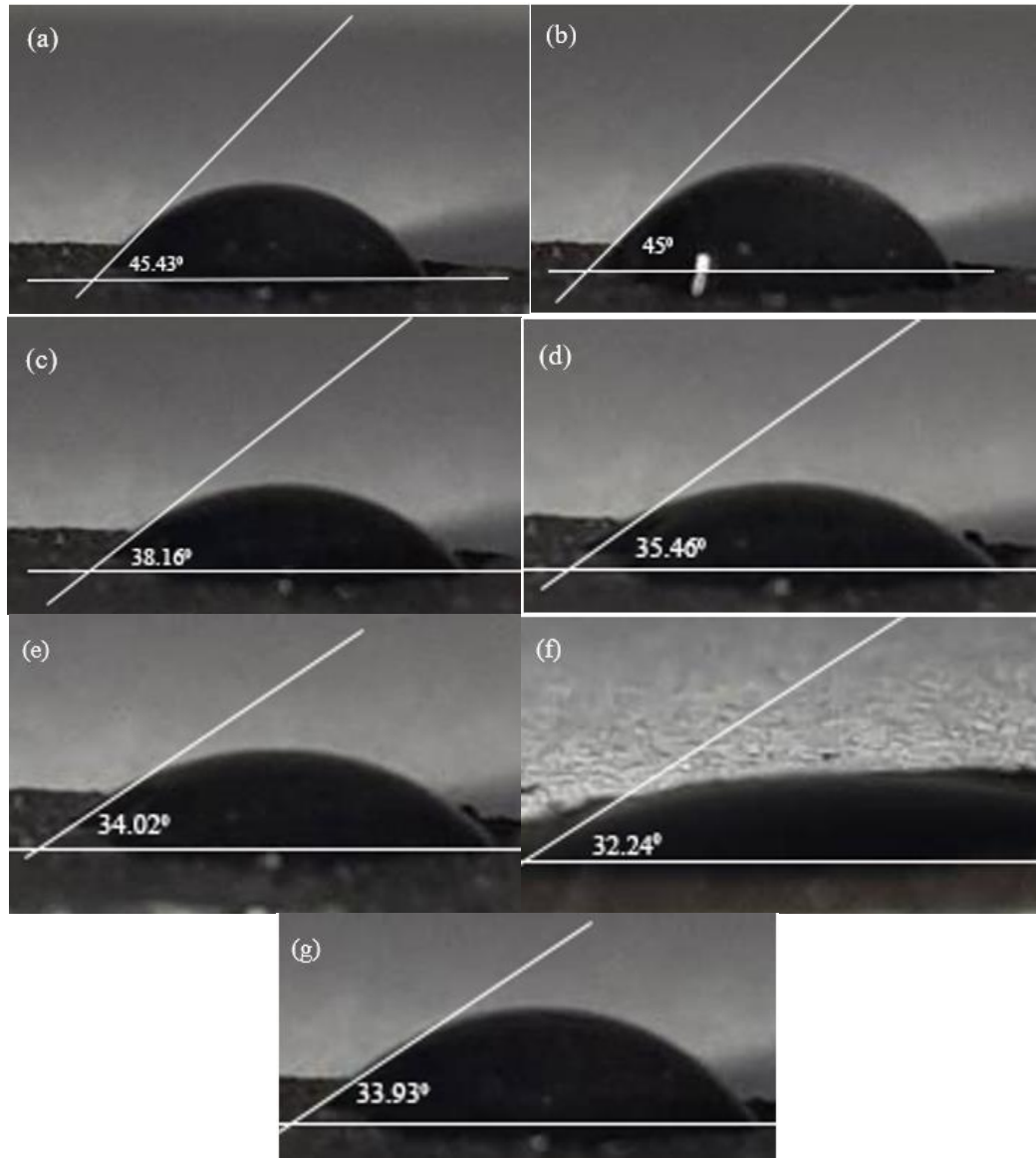
Gambar 4. 9 Hasil pengujian VSM (a) Fe_3O_4 , (b) Fe_3O_4 -PEG (2:5), (c) Fe_3O_4 -PEG (3:5), (d) Fe_3O_4 -PEG (4:5) (e) Fe_3O_4 -PEG (2:5)/ SiO_2 , (f) Fe_3O_4 -PEG (3:5)/ SiO_2 , (g) Fe_3O_4 -PEG (4:5)/ SiO_2

Dari pengujian VSM semua sampel memiliki sifat superparamagnetik, karena membentuk kurva S dan koersivitas (H_c) mendekati 0. Partikel magnetik yang memiliki sifat superparamagnetik, dalam kurva pada Gambar 4.9 tersebut tidak menunjukkan adanya magnet sisa (remanence) yang biasa dimiliki oleh material feromagnetik atau ferimagnetik. Pada sampel Fe_3O_4 -PEG/ SiO_2 atau yang di *coating* dengan silika memiliki nilai saturasi magnetisasi yang lebih rendah dibandingkan dengan sampel Fe_3O_4 , Fe_3O_4 -PEG, hal ini disebabkan adanya lapisan silika yang melingkupi Fe_3O_4 sehingga kekuatan magnetnya berkurang dari Fe_3O_4 murni (Hui et al., 2011; Zhang et al., 2016).

Suatu material dikategorikan sebagai material bersifat superparamagnetik ketika nilai coercivity-nya nol. Material superparamagnet akan kehilangan net *magnetic* moment-nya ketika medan magnet eksternal dihilangkan dan akan memiliki net *magnetic* moment lagi ketika material berada dalam medan magnet eksternal. Fenomena ini dapat dilihat pada Gambar 4.9 yang ditandai dengan tidak adanya simpangan pada sumbu x ketika medan magnet eksternal bernilai nol. Nilai magnetisasi langsung melompat pada nilai saturasi magnetisasinya tepat setelah medan magnet eksternal diberikan yang ditandai dengan belokan pada kurva. Setelah medan magnet eksternal perlahan dihilangkan, kurva magnetisasi menunjukkan tidak adanya remanence atau sisa magnetisasi yang biasa dimiliki oleh material bersifat feromagnetik atau ferimagnetik.

4.6 Hasil Analisis Hidrofobisitas

Pengujian hidrofobisitas ini dilakukan untuk mengetahui apakah material tersebut bersifat hidrofilik atau hidrofobik. Pengujian metode hidrofobisitas dilakukan dengan cara menempatkan setetes air pada sampel yang telah dikompres, kemudian mengukur sudut kontak antara tetesan air dan permukaan nanopartikel. Hasil pengujian hidrofobisitas pada semua sampel ditunjukkan pada gambar 4.10



Gambar 4. 10 Hasil uji hidrofobisitas (a) Fe_3O_4 , (b) Fe_3O_4 -PEG (2:5), (c) Fe_3O_4 -PEG (3:5), (d) Fe_3O_4 -PEG (4:5), (e) Fe_3O_4 -PEG (2:5)/ SiO_2 , (f) Fe_3O_4 -PEG (3:5)/ SiO_2 , (g) (Fe_3O_4 -PEG (4:5)/ SiO_2)

Tabel 4. 5 Sudut kontak tiap sampel

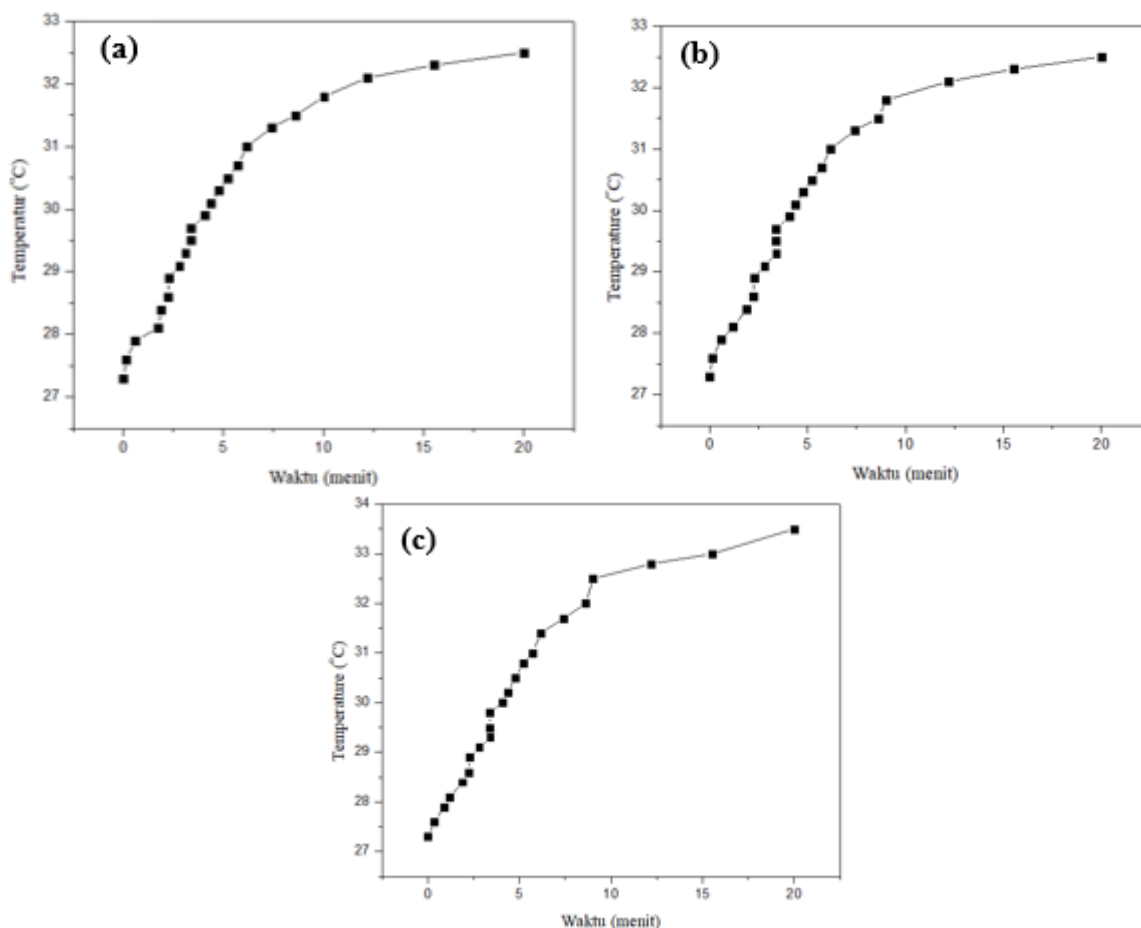
Sampel	Sudut kontak (°)
Fe_3O_4	45.43
Fe_3O_4 -PEG (2:5)	45
Fe_3O_4 -PEG (3:5)	38.16
Fe_3O_4 -PEG (4:5)	35.46
Fe_3O_4 -PEG (2:5)/ SiO_2	34.02
Fe_3O_4 -PEG (3:5)/ SiO_2	32.24
Fe_3O_4 -PEG (4:5)/ SiO_2	33.93

Pada gambar 4.10 dan tabel 4.5 menunjukkan bahwa semua sampel memiliki sifat hidrofilik, hal ini karena sudut kontak yang terbentuk $<90^\circ$. Pada sampel Fe_3O_4 memiliki sudut kontak sebesar 45.43° sedangkan sudut kontak Fe_3O_4 -PEG dan Fe_3O_4 -PEG/ SiO_2 memiliki nilai

dibawah Fe_3O_4 . Dengan penambahan PEG dan silika menyebabkan sudut kontak yang terbentuk lebih kecil dibandingkan dengan sampel Fe_3O_4 , hal ini dikarenakan polimer PEG dan silika merupakan material yang mempunyai properties hidrofilik yang baik. Karena sifat hidrofiliknya PEG dan silika sering digunakan sebagai *agent stabilizer* atau *capping agent* pada nanopartikel magnetik untuk tujuan pada bidang biomedis seperti *targeted drug delivery*. Selain itu pelapisan dengan PEG dan silika pada nanopartikel oksida besi (Fe_3O_4) dapat mengurangi toksisitas, dapat meningkatkan stabilitas dan dapat membentuk suspensi berair sangat baik yang dapat digunakan dalam berbagai sistem biologis (Dimitrov & Tsvetanov, 2012).

4.7 Hasil Analisis Medan Magnet AC

Pengujian pengaruh medan magnet luar AC dan frekuensi bertujuan untuk mengetahui adanya peningkatan temperatur pada sampel. Hasil pengujian ini ditunjukkan oleh grafik hubungan temperatur sebagai fungsi waktu. Pada pengujian ini sampel adalah 0,882 g partikel nano Fe_3O_4 yang diletakkan dalam tabung reaksi kaca. Selanjutnya sampel diletakkan di tengah kumparan sebagai sumber medan magnet. Medan magnet yang berhasil ditimbulkan adalah sebesar 0.3A. Untuk mengetahui perubahan temperatur yang diakibatkan panas, maka ditempatkan termokopel pada sampel. Hasil pengujian ini diperoleh bahwa temperatur berhasil meningkat secara signifikan dari $25^\circ\text{C} - 32.5^\circ\text{C}$ selama 30 menit.



Gambar 4. 11 Kenaikan temperatur sampel (a) Fe_3O_4 (b) Fe_3O_4 -PEG (c) Fe_3O_4 -PEG/ SiO_2

Pada gambar 4.11 menunjukkan grafik kenaikan temperatur pada sampel Fe_3O_4 , Fe_3O_4 -PEG dan Fe_3O_4 -PEG/ SiO_2 . Semua sampel mengalami kenaikan temperatur setelah di aliri oleh arus AC, tetapi hanya naik rata-rata sebesar 5°C . Hal ini dikarenakan setting arus pada generator AC pada percobaan ini hanya sebesar 0.3A dan batas frekuensi hanya sampai 1000Hz.

Tabel 4. 6 Tabel perbandingan

Parameter	Standar (jurnal) (Abboud et al., 2015)	Fe₃O₄	Fe₃O₄-PEG	Fe₃O₄- PEG/SiO₂
Ukuran partikel (nm)	1-100	635.1	155.96;149.74;149.67	170.4;106.68;149.84
Struktur kristal	Kubik	Kubik	Kubik	Kubik
Sifat magnet	Superparamagnetik	Superparamagnetik	Superparamagnetik	Superparamagnetik
Nilai Magnetisasi emu/g	66	51.52	39.40; 48.76; 57.79	30.92; 42.64; 50.81
Temperatur °C	42-45	32.5	31.9	30.8
Hidrofobitas	Hidrofilik	Hidrofilik	Hidrofilik	Hidrofilik

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil untuk penelitian ini adalah.

1. Penambahan penstabil PEG pada saat sintesis Fe_3O_4 digunakan sebagai kontrol ukuran partikel Fe_3O_4 dan menjaga agar tidak terjadi aglomerasi sehingga pada saat di *coating* dengan silika ukurannya tidak terlalu besar. Dapat dilihat pada SEM bahwa ukuran partikel lebih seragam dengan bentuk yang *spherical*. Ukuran partikel Fe_3O_4 -PEG memiliki nilai sebesar 155.96; 149.74; 149.67 nm. Memiliki sifat magnet superparamagnetik dengan nilai saturasi sebesar 39.40; 48.76; 57.79 emu/g dan semua sampel memiliki sifat hidrofilik. Untuk uji medan magnet mengalami kenaikan temperatur dari 25 °C menjadi 31.9 °C.
2. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ dilihat dari uji SEM memiliki bentuk partikel yang bulat dan lebih seragam dibandingkan dengan Fe_3O_4 tanpa *coating*. Untuk ukuran partikel hasil uji PSA menunjukkan bahwa Fe_3O_4 -PEG/ SiO_2 mengalami peningkatan ukuran dibandingkan dengan Fe_3O_4 -PEG yaitu sebesar 170.4; 106.68; 149.84 nm. Hasil uji VSM juga menunjukkan bahwa Fe_3O_4 *coating* silika memiliki sifat magnet superparamagnetik dengan nilai saturasi sebesar 30.92; 42.64; 50.81 emu/g dan memiliki sifat hidrofilik. Untuk uji medan magnet mengalami kenaikan temperatur dari 25 °C menjadi 30.8 °C, sehingga masih bisa berpotensi untuk aplikasi terapi hipertermia.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian ini adalah.

1. Untuk penelitian selanjutnya perlu ditambahkan tentang pengaruh stabilizer lainnya.
2. Dapat dilakukan pengujian dengan variasi frekuensi.
3. Dapat diuji coba dalam simulasi *body fluid*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abadi, M. T. H., Mufti, N., & Sunaryo. (2017). SPECIFIC ABSORPTION RATE (SAR) Fe_3O_4 DALAM MEDAN MAGNET AC. *SEMINAR NASIONAL FISIKA DAN PEMBELAJARANNYA*, 291–297.
- Abboud, M., Youssef, S., Podlecki, J., Habchi, R., Germanos, G., & Foucaran, A. (2015). Superparamagnetic Fe_3O_4 nanoparticles, synthesis and surface modification. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 39, 641–648. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.05.035>
- Adeyeye, A. O., & Shimon, G. (2015). Growth and Characterization of Magnetic Thin Film and Nanostructures. In *Handbook of Surface Science* (1st ed., Vol. 5). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62634-9.00001-1>
- Adhim, M. S. (2018). *Sintesis Nanopartikel Fe_3O_4 (Magnetit) dari Batu Besi Menggunakan Metode Kopresipitasi dengan Variasi PH* (Vol. 4). Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Agotegaray, M. A., & Lassalle, V. L. (2017). Silica-coated Magnetic Nanoparticles: An Insight into Targeted Drug Delivery and Toxicology. In *Ferrites and Ferrates: Chemistry and Applications in Sustainable Energy and Environmental Remediation* (Issue February). SpringerBriefs in Molecular Science. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50158-1>
- Akbarzadeh, A., Samiei, M., & Soodabeh, D. (2015). Management of presumed benign giant ovarian cysts: A minimally invasive technique using the alexis laparoscopic system. *Journal of Minimally Invasive Gynecology*, 22(4), 540. <https://doi.org/10.1016/j.jmig.2015.01.027>
- Ali, A., Zafar, H., Zia, M., ul Haq, I., Phull, A. R., Ali, J. S., & Hussain, A. (2016). Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles. *Nanotechnology, Science and Applications*, 9, 49–67. <https://doi.org/10.2147/NSA.S99986>
- Anbarasu, M., Anandan, M., Chinnasamy, E., Gopinath, V., & Balamurugan, K. (2015). Synthesis and characterization of polyethylene glycol (PEG) coated Fe_3O_4 nanoparticles by chemical co-precipitation method for biomedical applications. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 135, 536–539. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.07.059>
- Ansari, S. A. M. K., Ficiarà, E., Ruffinatti, F. A., Stura, I., Argenziano, M., Abollino, O., Cavalli, R., Guiot, C., & D'Agata, F. (2019). Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis, characterization and functionalization for biomedical applications in the Central Nervous System. *Materials*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/ma12030465>
- Antarnusa, G., & Suharyadi, E. (2020). A synthesis of polyethylene glycol (PEG)-coated magnetite Fe_3O_4 nanoparticles and their characteristics for enhancement of biosensor. *Materials Research Express*, 7(5). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab8bef>
- Arista, D., Rachmawati, A., Ramadhani, N., Saputro, R. E., Taufiq, A., & Sunaryono. (2019). Antibacterial Performance of Fe_3O_4 /PEG-4000 Prepared by Co-precipitation Route. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 515(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/515/1/012085>
- Bañobre-López, M., Teijeiro, A., & Rivas, J. (2013). Magnetic nanoparticle-based hyperthermia for cancer treatment. *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*, 18(6), 397–400. <https://doi.org/10.1016/j.rpor.2013.09.011>
- Behrouzkiya, Z., Joveini, Z., Keshavarzi, B., Eyvazzadeh, N., & Aghdam, R. Z. (2016). Hyperthermia: How can it be used? *Oman Medical Journal*, 31(2), 89–97. <https://doi.org/10.5001/omj.2016.19>
- Beik, J., Abed, Z., Ghoreishi, F. S., Hosseini-Nami, S., Mehrzadi, S., Shakeri-Zadeh, A., &

- Kamrava, S. K. (2016). Nanotechnology in hyperthermia cancer therapy: From fundamental principles to advanced applications. *Journal of Controlled Release*, 235, 205–221. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.05.062>
- Bracco, G., & Holst, B. (2013). Surface science techniques. In *Springer Series in Surface Sciences* (Vol. 51, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34243-1>
- Chae, H. S., Kim, S. D., Piao, S. H., & Choi, H. J. (2016). Core-shell structured Fe₃O₄@SiO₂ 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>
- Chellappa, M., & Vijayalakshmi, U. (2019). Fabrication of Fe₃O₄-silica core-shell magnetic nano-particles and its characterization for biomedical applications. *Materials Today: Proceedings*, 9, 371–379. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.02.166>
- Cornell, R. ., & Schwertmann, U. (1972). Crystal structure. In *Nature* (Vol. 236, Issue 5345). <https://doi.org/10.1038/236285b0>
- Das, H., Debnath, N., Arai, T., Kawaguchi, T., Sakamoto, N., Shinozaki, K., Suzuki, H., & Wakiya, N. (2019). Superparamagnetic magnesium ferrite/silica core-shell nanospheres: A controllable SiO₂ coating process for potential magnetic hyperthermia application. *Advanced Powder Technology*, 30(12), 3171–3181. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.09.026>
- Das, P., Colombo, M., & Prospero, D. (2019). Recent advances in magnetic fluid hyperthermia for cancer therapy. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 174, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.10.051>
- 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). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00101-1>
- Ealias, A. M., & Saravanakumar, M. P. (2017). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263(3). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032019>
- Ermich, M., & Opper, D. (2011). *X-RAY Powder Diffraction for the analyst*.
- Fatima, H., Charinpanitkul, T., & Kim, K. S. (2021). Fundamentals to apply magnetic nanoparticles for hyperthermia therapy. *Nanomaterials*, 11(5), 1–20. <https://doi.org/10.3390/nano11051203>
- Ferawati, T. (2020). *REVIEW: PENGARUH PENGGUNAAN TEMPLATE TERHADAP PEMBENTUKAN SILIKA NANOTUBES BERBAHAN DASAR SEKAM PADI*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Gao, M., Li, W., Dong, J., Zhang, Z., & Yang, B. (2011). Synthesis and Characterization of Superparamagnetic Fe₃O₄@SiO₂ Core-Shell Composite Nanoparticles. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 01(02), 49–54. <https://doi.org/10.4236/wjcmp.2011.12008>
- Hakim, L. (2008). *Kontrol Ukuran dan Dispersitas Nanopartikel Besi Oksida*. 59.
- Hosu, O., Tertis, M., & Cristea, C. (2019). Implication of magnetic nanoparticles in cancer detection, screening and treatment. *Magnetochemistry*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry5040055>
- Hui, C., Shen, C., Tian, J., Bao, L., Ding, H., Li, C., Tian, Y., Shi, X., & Gao, H. J. (2011). Core-shell Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles synthesized with well-dispersed hydrophilic Fe₃O₄ seeds. *Nanoscale*, 3(2), 701–705. <https://doi.org/10.1039/c0nr00497a>
- Ingham, B., & Toney, M. F. (2013). X-ray diffraction for characterizing metallic films. In *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications: Structure, Processing and Properties*. <https://doi.org/10.1533/9780857096296.1.3>

- Irianti, F. D. D., Sutanto, H., Priyono, P., Wibowo, A. A., Syahida, A. N., & Alkian, I. (2021). Characterization structure of Fe₃O₄@PEG-4000 nanoparticles synthesized by co-precipitation method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1943(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1943/1/012014>
- Irvine, C. (2019). A Guidebook To Particle Size Analysis. In *Horiba*.
- Jadhav, S. D., & Shaikh, I. A. (2019). Synthesis of Nanoparticles an Overew, a Review Article. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)*, Volume-3(Issue-3), 426–428. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd22816>
- Javed, R., Zia, M., Naz, S., Aisida, S. O., Ain, N. ul, & Ao, Q. (2020). Role of capping agents in the application of nanoparticles in biomedicine and environmental remediation: recent trends and future prospects. *Journal of Nanobiotechnology*, 18(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s12951-020-00704-4>
- Kalber, T. L., Ordidge, K. L., Southern, P., Loebinger, M. R., Kyrtatos, P. G., Pankhurst, Q. A., Lythgoe, M. F., & Janes, S. M. (2016). Hyperthermia treatment of tumors by mesenchymal stem cell-delivered superparamagnetic iron oxide nanoparticles. *International Journal of Nanomedicine*, 11, 1973–1983. <https://doi.org/10.2147/IJN.S94255>
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2021). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 8(5). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- Kim, K. Do, Kim, S. S., Choa, Y.-H., & Kim, H. T. (2007). Formation and Surface Modification of Fe₃O₄ Nanoparticles by Co-precipitation and Sol-gel Method. *J. Ind. Eng. Chem*, 13(7), 1137–1141.
- Kostiv, U., Patsula, V., Šlouf, M., Pongrac, I. M., Škokić, S., Radmilović, M. D., Pavičić, I., Vrček, I. V., Gajović, S., & Horák, D. (2017). Physico-chemical characteristics, biocompatibility, and MRI applicability of novel monodisperse PEG-modified magnetic Fe₃O₄&SiO₂ core-shell nanoparticles. *RSC Advances*, 7(15), 8786–8797. <https://doi.org/10.1039/c7ra00224f>
- Latorre, M., & Rinaldi, C. (2009). Applications of magnetic nanoparticles in medicine: Magnetic fluid hyperthermia. *Puerto Rico Health Sciences Journal*, 28(3), 227–238.
- Laurent, S., Dutz, S., Häfeli, U. O., & Mahmoudi, M. (2011). Magnetic fluid hyperthermia: Focus on superparamagnetic iron oxide nanoparticles. *Advances in Colloid and Interface Science*, 166(1–2), 8–23. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.04.003>
- Leng, Y. (2008). *Materials Characterization Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods Second Edition* (Second Edi). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12.
- Leuner, C., & Dressman, J. (2000). Improving drug solubility for oral delivery using solid dispersions. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 50(1), 47–60. [https://doi.org/10.1016/S0939-6411\(00\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0939-6411(00)00076-X)
- Linh, P. H., Thach, P. Van, Tuan, N. A., Thuan, N. C., Manh, D. H., Phuc, N. X., & Hong, L. Van. (2009). Magnetic fluid based on Fe₃O₄ nanoparticles: Preparation and hyperthermia application. *Journal of Physics: Conference Series*, 187(December 2015). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/187/1/012069>
- Mufid, A. (2016). *Mufid, A. SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF COMPOSITE LITHIUM PHOSPHATE FERRO / GRAFITE WITH VARIOUS OF WEIGHT FRACTION GRAFITE BY SOLID STATE*. INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER.
- Muhtasib, H. G., & Chouaib, R. (2020). Nanoparticle Drug Delivery Systems for Cancer Treatment. In H. G. Muhtasib & R. Chouaib (Eds.), *Jenny Stanford Publishing Pte. Ltd.* Jenny Stanford Publishing Pte. Ltd.
- Mujamilah, Ridwan, Muslich, M. R., Purwanto, S., Febri, M. I. M., Yohannes A.M, Santoso,

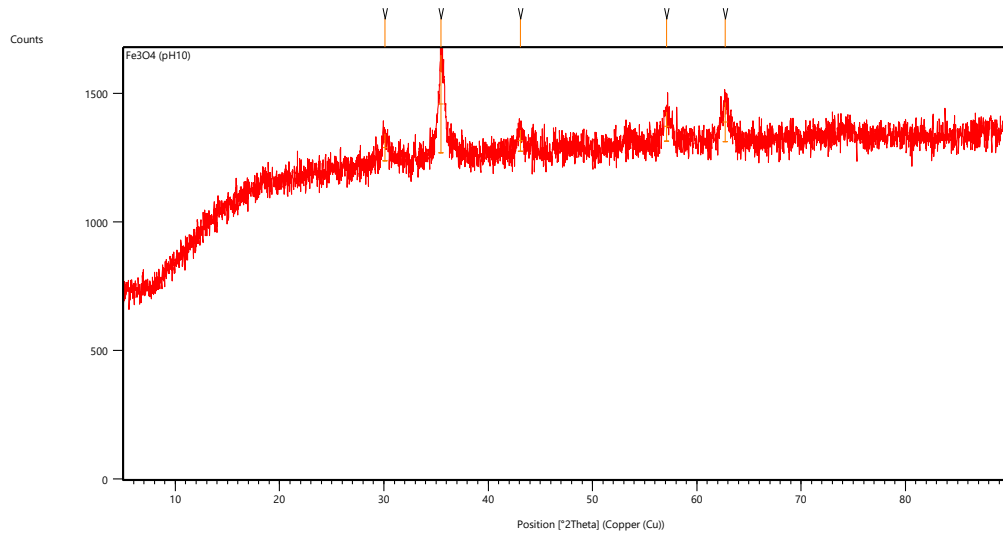
- E., & Mugirahardjo, H. (2000). Vibrating sample magnetometer (VSM) tipe oxford VSM1.2H. *Prosiding Seminar Nasional Bahan Magnet I, di*, 77–81.
- Namikuchi, E. A., Gaspar, R. D. L., Da Silva, D. S., Raimundo, I. M., & Mazali, I. O. (2021). PEG size effect and its interaction with Fe₃O₄ nanoparticles synthesized by solvothermal method: Morphology and effect of pH on the stability. *Nano Express*, 2(2). <https://doi.org/10.1088/2632-959X/ac0596>
- Nanopartikel, S., Polietilen, F. O., Peg, G., Tatinting, G. D., & Aritonang, H. F. (2021). *DARI PASIR BESI PANTAI HAIS SEBAGAI ADSORBEN LOGAM KADMIUM (Cd).* 14(2).
- Nee Koo, K., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., Rahma, M. A., & Sheng, T. Z. (2019). Preparation and characterization of superparamagnetic Fe₃O₄/CNTs nanocomposites dual-drug carrier. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 32(1), 42–46. <https://doi.org/10.1007/s11595-017-1555-4>
- Nemala, H., Thakur, J. S., Naik, V. M., Vaishnav, P. P., Lawes, G., & Naik, R. (2014). Investigation of magnetic properties of Fe₃O₄ nanoparticles using temperature dependent magnetic hyperthermia in ferrofluids. *Journal of Applied Physics*, 116(3), 1–7. <https://doi.org/10.1063/1.4890456>
- Prasdiatika, R., & Susanto, S. (2017). Preparasi Dan Penentuan Jenis Oksida Besi Pada Material Magnetik Pasir Besi Lansilowo. *Jurnal Teknosains*, 6(1), 7. <https://doi.org/10.22146/teknosains.11385>
- Rahayu, A., Fadhillah Hanum, F., Aldilla Fajri, J., Dwi Anggraini, W., & Khasanah, U. (2021). Review: Pengolahan Limbah cair Industri dengan Menggunakan Silika A Review: Industrial Liquid Waste Treatment Using Silica. *Open Science and Technology*, 02(01), 2776–169. <https://opscitech.com/journal>
- Rahmawati, R., Taufiq, A., Sunaryono, S., Fuad, A., Yulianto, B., Suyatman, S., & Kurniadi, D. (2018). Synthesis of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles from Iron sands by Coprecipitation-Ultrasonic Irradiation Methods. *Journal of Materials and Environmental Science*, 9(1), 155–160. <https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.19>
- Rajesh Kumar, S., Marianna, L., Gianni, S., Joseph Nathanael, A., Hong, S. I., Oh, T. H., Mangalaraj, D., Viswanathan, C., & Ponpandian, N. (2014). Hydrophilic polymer coated monodispersed Fe₃O₄ nanostructures and their cytotoxicity. *Materials Research Express*, 1(1). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/1/1/015015>
- Ramazanov, M., Karimova, A., & Shirinova, H. (2021). Magnetism for drug delivery, mri and hyperthermia applications: A review. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(2), 8654–8668. <https://doi.org/10.33263/BRIAC112.86548668>
- Retnosari, A. (2013). Ekstraksi dan Penentuan Kadar Silika (SiO₂) Hasil Ekstraksi dari Abu Terbang (Fly Ash) Batubara. In *Universitas Jember*. Universitas Jember.
- Sembiring, S., & Simanjuntak, W. (2015). SILIKA SEKAM PADI Potensi sebagai Bahan Baku Keramik Industri. In *palntaxia* (Vol. 59).
- Song, C., Sun, W., Xiao, Y., & Shi, X. (2019). Ultrasmall iron oxide nanoparticles: synthesis, surface modification, assembly, and biomedical applications. *Drug Discovery Today*, 24(3), 835–844. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2019.01.001>
- Soni, J., Sahiba, N., Sethiya, A., & Agarwal, S. (2020). Polyethylene glycol: A promising approach for sustainable organic synthesis. *Journal of Molecular Liquids*, 315, 1–31. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113766>
- Tai, M. F., Lai, C. W., & Abdul Hamid, S. B. (2016). Facile Synthesis Polyethylene Glycol Coated Magnetite Nanoparticles for High Colloidal Stability. *Journal of Nanomaterials*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/8612505>
- Teja, A. S., & Koh, P. Y. (2009). Synthesis, properties, and applications of magnetic iron oxide nanoparticles. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 55(1–2),

-
- 22–45. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2008.08.003>
- Veronica, Y., Astuti, & Usna, S. R. A. (2022). Sintesis dan Karakterisasi Nanokomposit Fe₃O₄@PEG:ZnO. *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, 11(1), 30–36. <https://doi.org/10.25077/jfu.11.1.30-36.2022>
- Widyastuti, Ardhyanta, H., Purwaningsih, H., & Qulub, R. M. (2019). KARAKTERISASI MATERIAL Bagian 1: Komposisi, Topografi dan Sifat Mekanik. In A. I. Ramadhani (Ed.), *ITS Press* (1st ed.). ITS Press.
- Wu, W., Wu, Z., Yu, T., Jiang, C., & Kim, W. S. (2015). Recent progress on magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis, surface functional strategies and biomedical applications. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16(2), 23501. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/2/023501>
- Xu, J. K., Zhang, F. F., Sun, J. J., Sheng, J., Wang, F., & Sun, M. (2014). Bio and nanomaterials based on Fe₃O₄. *Molecules*, 19(12), 21506–21528. <https://doi.org/10.3390/molecules191221506>
- Yang, H., Jiang, P., Chen, Z., & Nie, L. (2017). Magnetic Fe₃O₄ @Mesoporous Silica Composite Microspheres: Synthesis and Biomedical Applications. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 9(12), 1849–1860. <https://doi.org/10.1166/nnl.2017.2561>
- Zhang, L., Shao, H. ping, Zheng, H., Lin, T., & Guo, Z. meng. (2016). Synthesis and characterization of Fe₃O₄@SiO₂ magnetic composite nanoparticles by a one-pot process. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 23(9), 1112–1118. <https://doi.org/10.1007/s12613-016-1329-6>
- 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. *Nanomaterials*, 8(10), 1–27. <https://doi.org/10.3390/nano8100810>

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

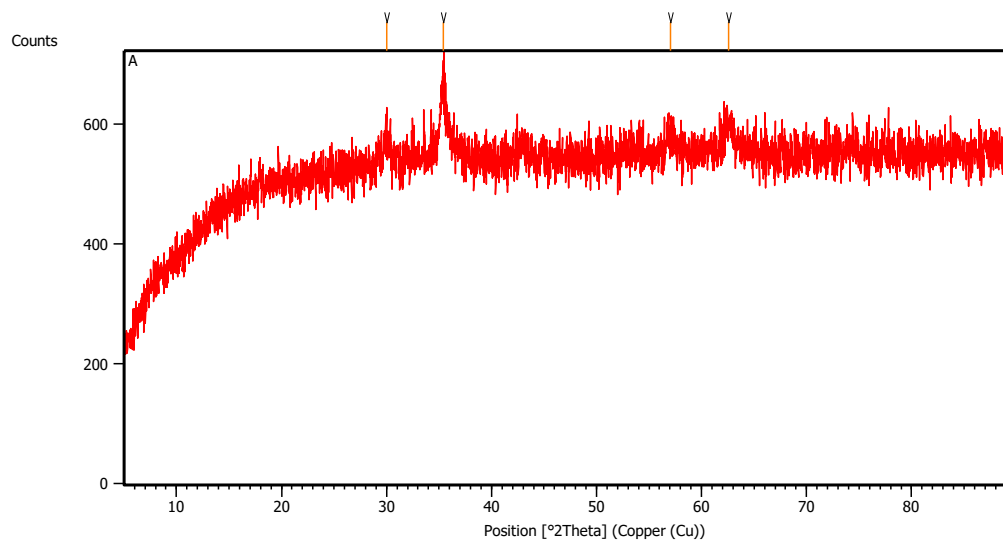
LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Pengujian XRD a. Fe₃O₄



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
30.0881	105.20	0.4015	2.97015	27.77
35.4918	378.79	0.4684	2.52935	100.00
43.0738	83.40	0.5353	2.10007	22.02
57.0890	114.12	0.5353	1.61337	30.13
62.7450	153.51	0.5353	1.48086	40.53

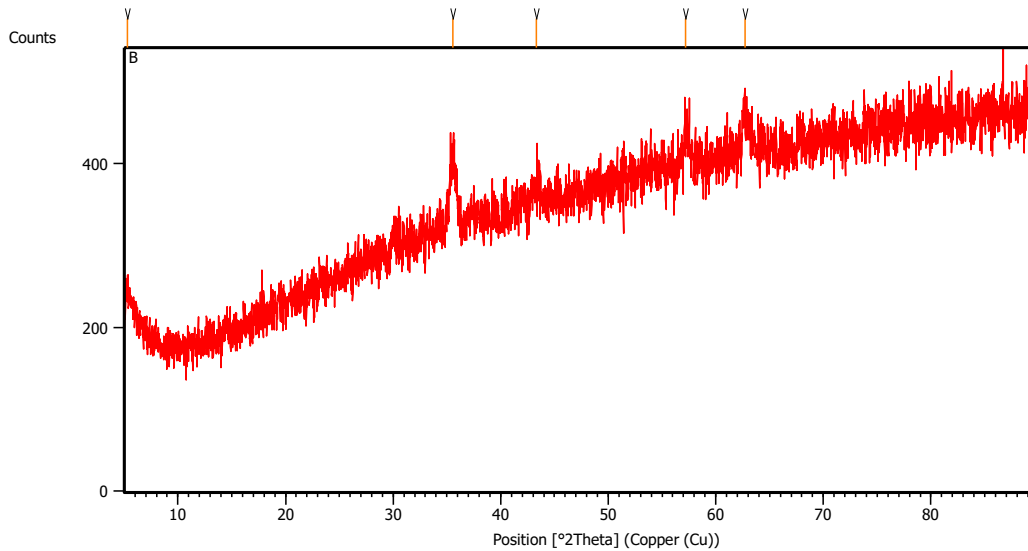
b. Fe₃O₄-PEG (2:5)



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
30.0236	48.36	0.4015	2.97639	37.96
35.4191	127.41	0.4015	2.53438	100.00
57.0418	37.52	0.8029	1.61460	29.45

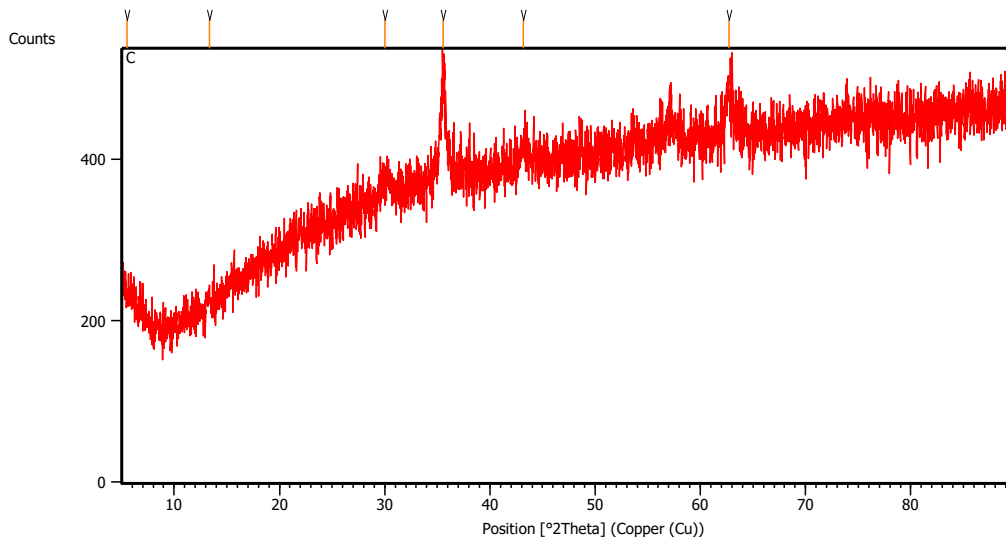
62.6001 38.67 0.6691 1.48394 30.35

c. Fe₃O₄-PEG (3:5)



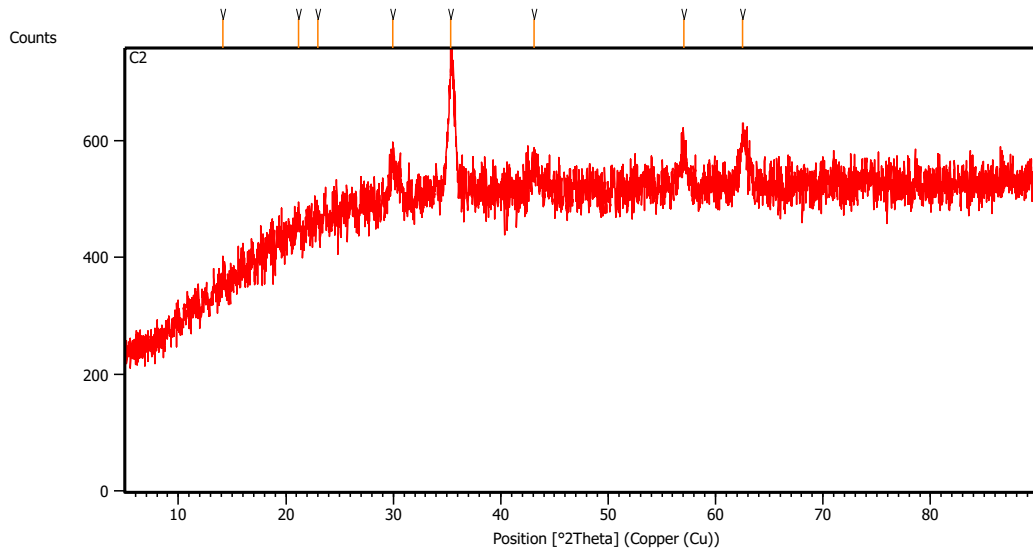
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
5.3317	52.12	0.4015	16.57541	59.89
35.5645	87.03	0.6691	2.52435	100.00
43.3259	20.64	0.5353	2.08843	23.71
57.1977	34.52	0.8029	1.61057	39.66
62.7464	40.63	0.4015	1.48083	46.69

d. Fe₃O₄-PEG (4:5)



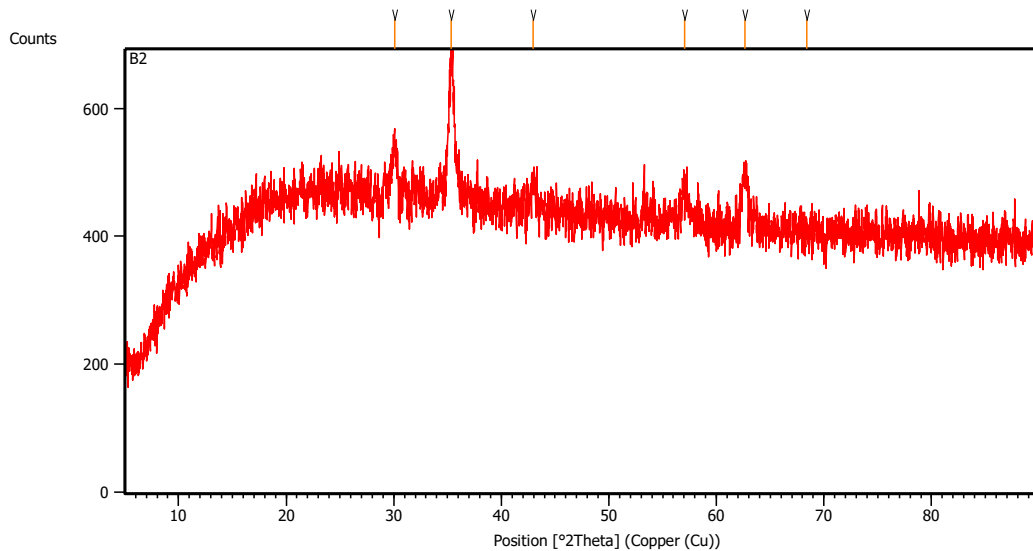
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
5.5225	22.00	0.8029	16.00308	17.55
13.3484	17.42	0.4015	6.63322	13.90
30.0525	26.92	0.8029	2.97359	21.47
35.5782	125.34	0.3346	2.52341	100.00
43.1446	23.29	0.8029	2.09679	18.58
62.7250	46.88	0.6691	1.48129	37.40

e. Fe₃O₄-PEG (2:5)@SiO₂



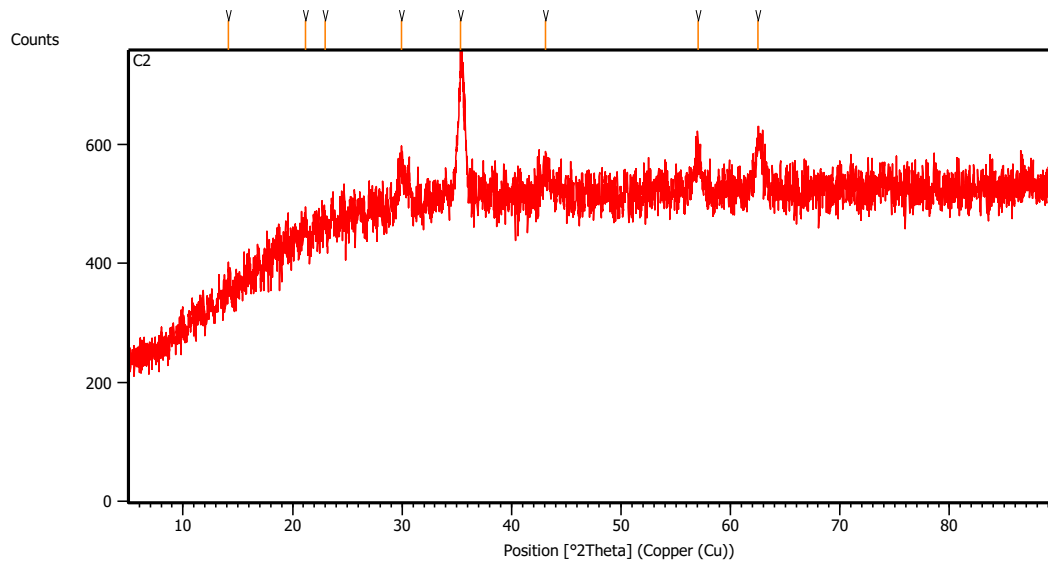
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
13.7449	26.37	0.4015	6.44277	18.17
18.9918	25.64	0.4015	4.67301	17.68
24.9064	35.56	0.3346	3.57508	24.51
30.1799	63.03	0.4015	2.96133	43.44
35.3736	145.09	0.3346	2.53753	100.00
56.8573	32.76	0.8029	1.61940	22.58
62.6561	56.08	0.4015	1.48275	38.65

f. Fe₃O₄-PEG (3:5)@SiO₂



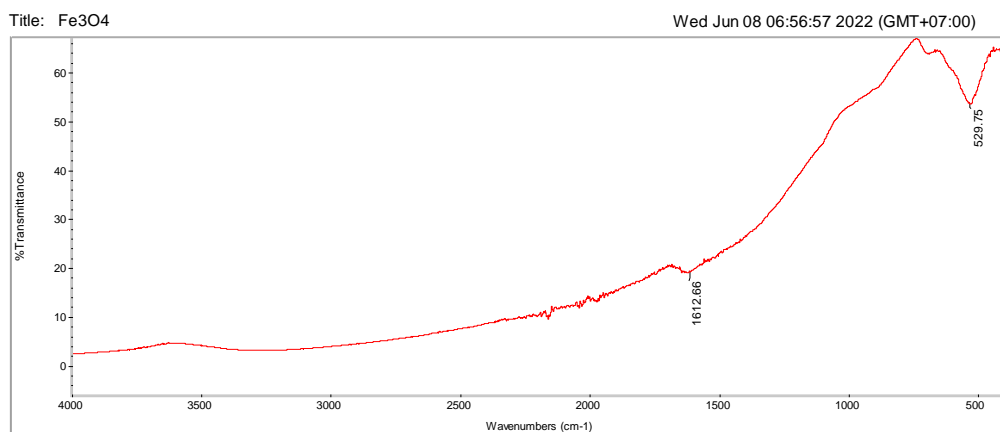
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
30.1129	76.98	0.4015	2.96776	37.82
35.3748	203.54	0.4684	2.53745	100.00
42.9845	39.36	0.4015	2.10423	19.34
57.0436	40.27	0.6691	1.61455	19.78
62.6239	82.08	0.5353	1.48343	40.32
68.3769	15.45	0.2007	1.37198	7.59

g. Fe₃O₄-PEG (4:5)@SiO₂

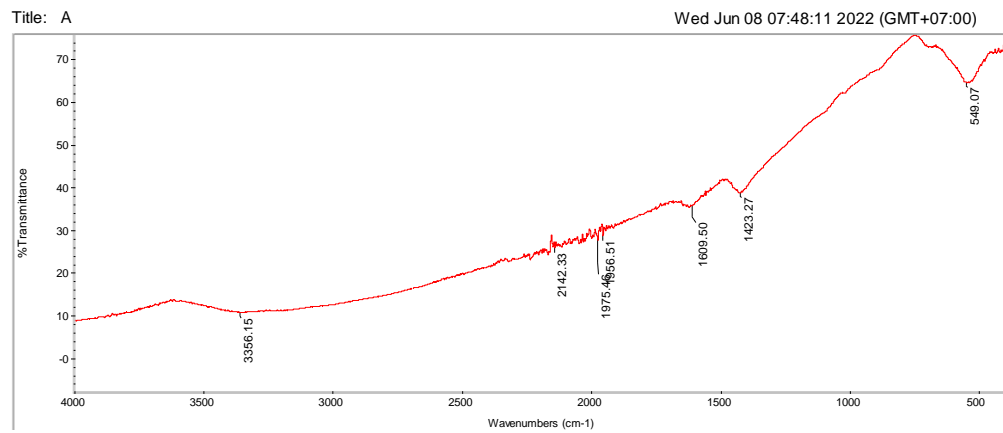


Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
14.1638	22.03	0.4015	6.25315	10.22
21.1857	27.24	0.3346	4.19378	12.64
22.9642	22.77	0.4015	3.87286	10.56
29.9322	74.26	0.5353	2.98527	34.44
35.3701	215.60	0.2676	2.53778	100.00
43.0982	37.80	0.5353	2.09894	17.53
57.0369	63.86	0.4015	1.61472	29.62
62.5311	88.75	0.3346	1.48541	41.16

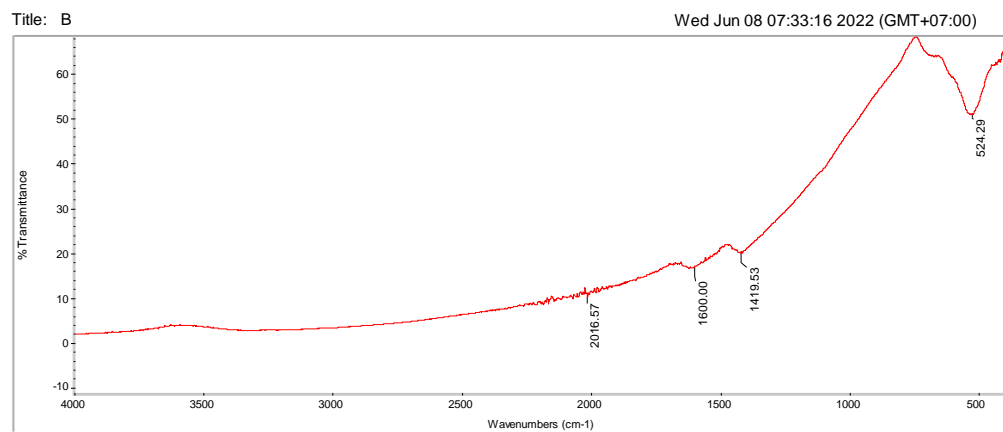
Lampiran 2
Hasil Pengujian FTIR
a. Fe₃O₄



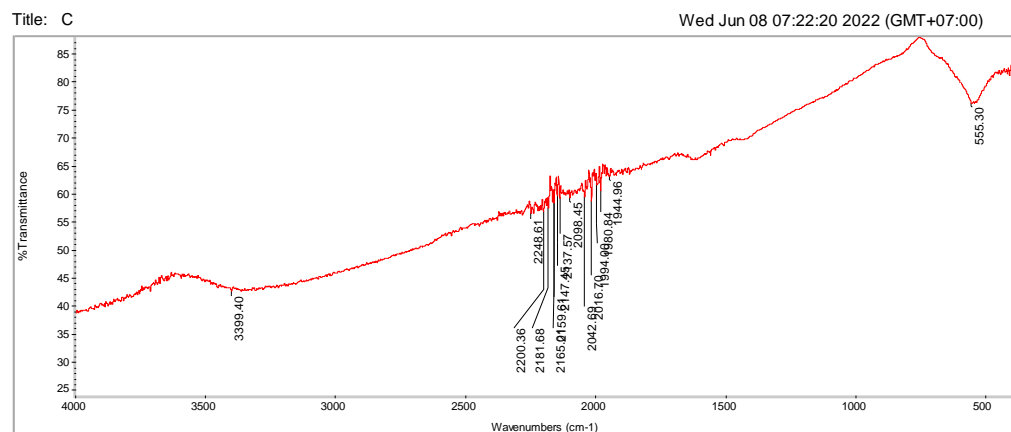
b. Fe₃O₄-PEG (2:5)



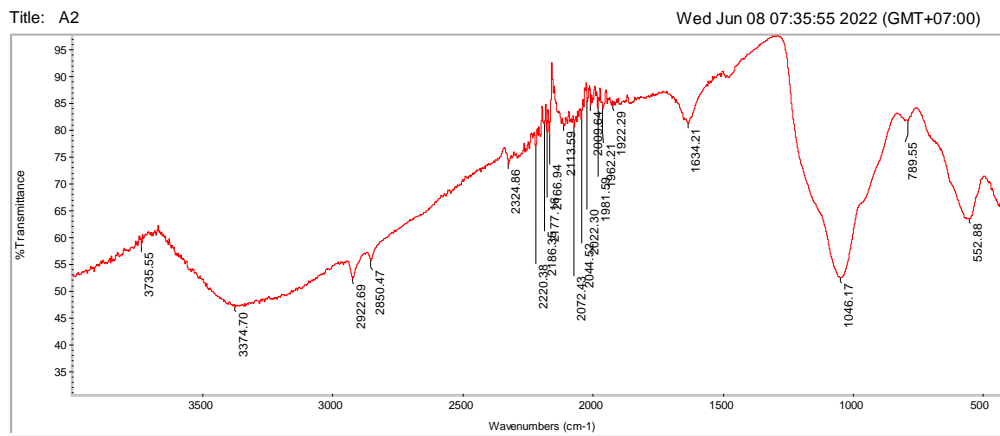
c. Fe₃O₄-PEG (3:5)



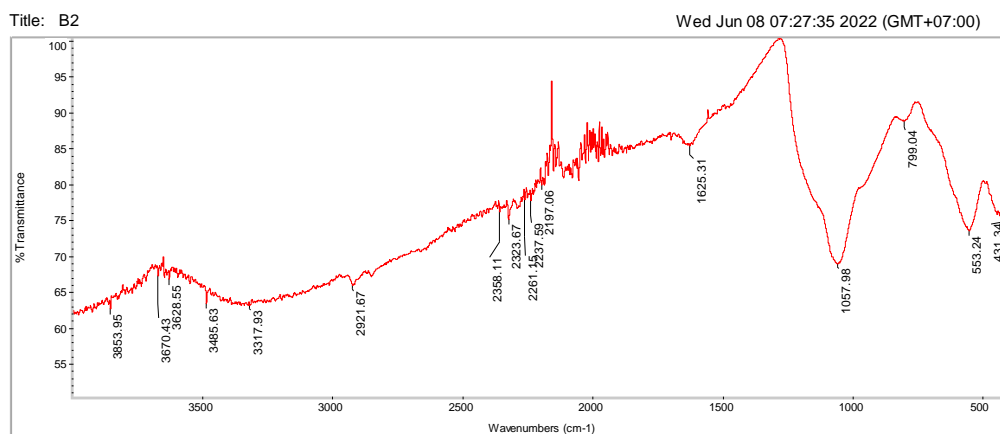
d. Fe₃O₄-PEG (4:5)



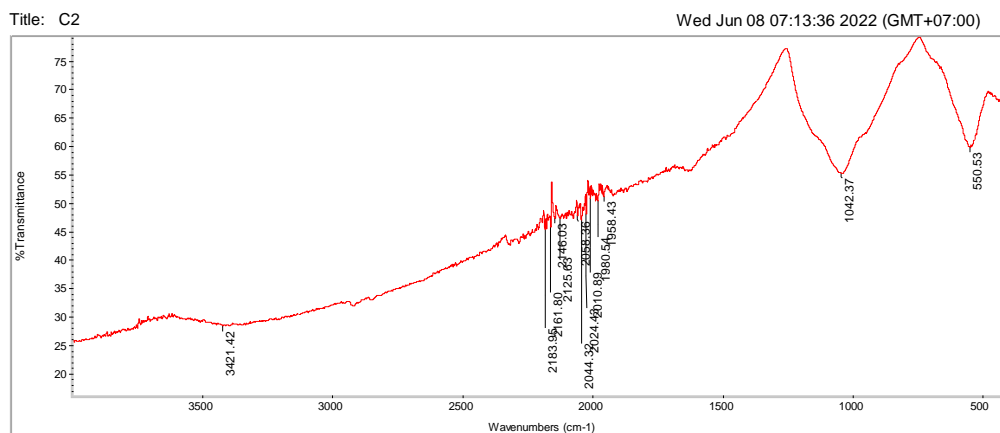
e. $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (2:5)@SiO}_2$



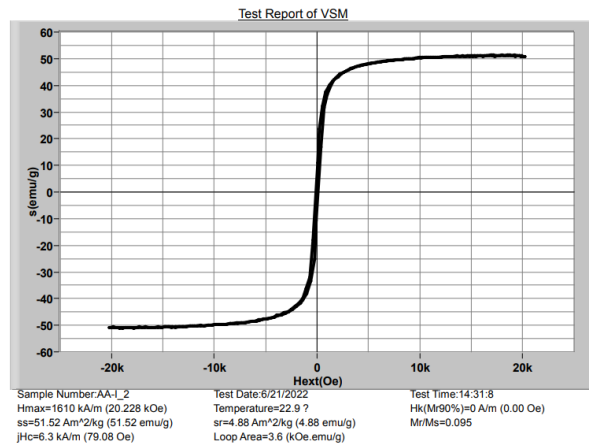
f. $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (3:5)@SiO}_2$



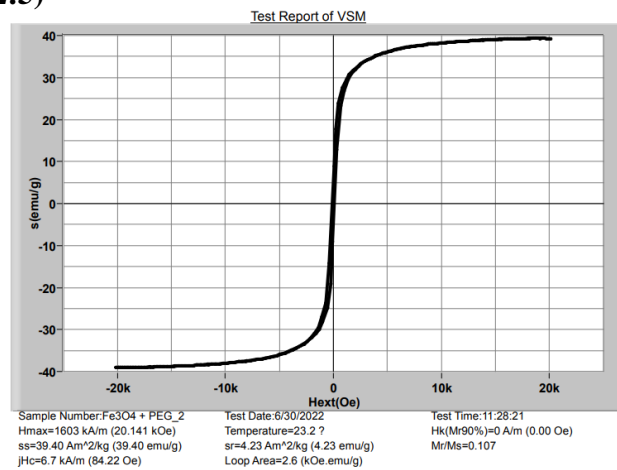
g. $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (4:5)@SiO}_2$



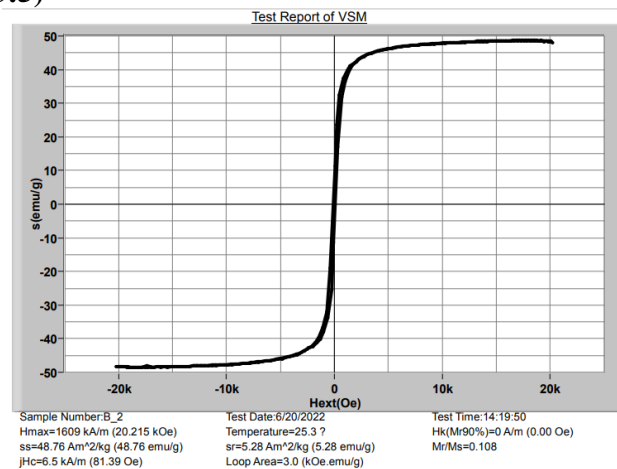
Lampiran 3
Hasil Pengujian VSM
a. Fe_3O_4



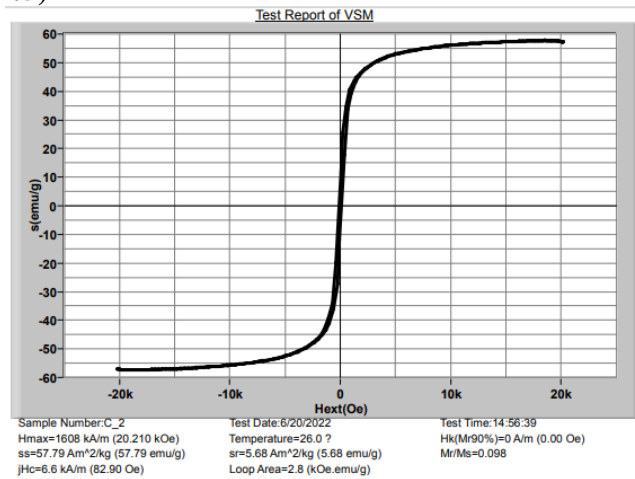
b. Fe_3O_4 -PEG (2:5)



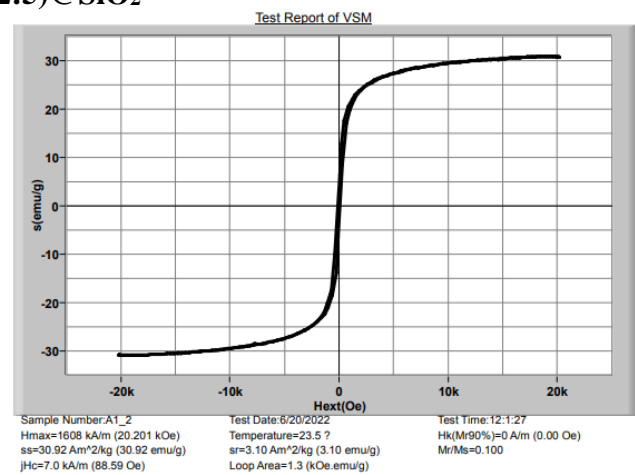
h. Fe_3O_4 -PEG (3:5)



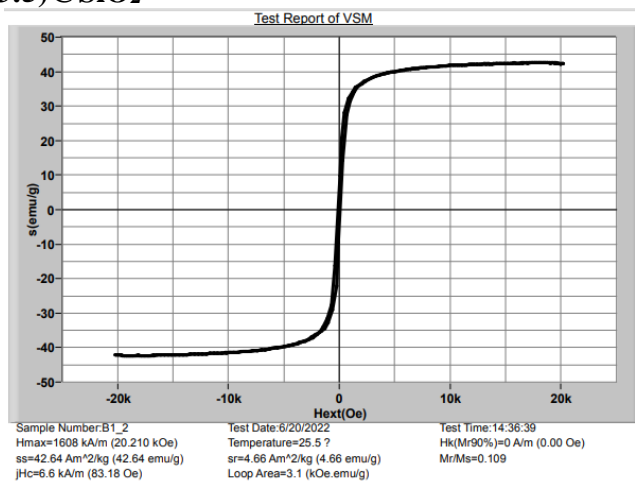
i. Fe₃O₄-PEG (4:5)



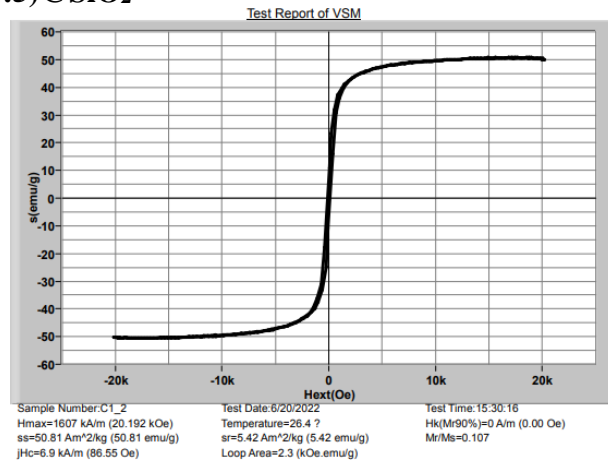
j. Fe₃O₄-PEG (2:5)@SiO₂



k. Fe₃O₄-PEG (3:5)@SiO₂



1. $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PEG (4:5)@SiO}_2$



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penelitian Tugas Akhir “ANALISIS PENGARUH PENSTABIL *POLYETHYLENE GLYCOL* (PEG) TERHADAP KARAKTERISTIK NANOPARTIKEL $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ SEBAGAI MEDIA TERAPI HIPERTERMIA”, penulis mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung diantaranya:

1. Ibu dan Bapak kedua orang tua penulis yang selalu mengirimkan dukungan, dorongan, motivasi, serta doa yang selalu dipanjatkan agar penulis dapat diperkuat imannya dan dipermudah dalam penyusunan laporan ini.
2. Bu Hariyati dan Bu Vania selaku dosen pembimbing penulis yang senantiasa memberikan bimbingan dan pembelajaran selama penulis menyusun laporan ini.
3. Lehonita Rotua Lectiodivirani Pakpahan sebagai partner penulis serta Tim Nanopartikel Magnetik Safa dan Juli yang telah membantu penulis dalam melaksanakan penelitian Tugas Akhir.
4. Angkatan MT 20 yang banyak meninggalkan kesan dan pengalaman berharga selama penulis berkuliah.
5. Keluarga “Alles” Yulin, Elok, Nurin dan Retno yang telah menjadi tempat untuk bercerita, berkeluh kesah, bercita-cita dan selalu berdoa bersama-sama.
6. Anggota Laboratorium Kimia Material yang telah membantu penulis dalam keberjalanan Tugas Akhir.
7. Dinda dan Ranti sebagai teman jarak jauh yang selalu memberikan doa serta motivasi kepada penulis.
8. Keluarga “Matahati Family” yang senantiasa mendengarkan keluh kesah dan memberikan dukungan kepada penulis di setiap keadaan selama masa perkuliahan.
9. Ibu Hardjono selaku ibu kos Humaniora B4 yang telah banyak membantu, mendukung dan mendoakan penulis selama pelaksanaan Tugas Akhir.
10. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata, semoga penelitian Tugas Akhir ini dapat bermanfaat untuk pengembangan lebih lanjut dan siapapun yang membutuhkan di masa yang akan datang.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Kholillah Nur Aini. Merupakan anak kedua dari dua bersaudara atas pasangan Sumadi dan Tarni yang lahir pada tanggal 4 Agustus 2001 di Kota Wonogiri, Jawa Tengah. Penulis menempuh pendidikan formal di SD N Karang Tengah, SMP Negeri 2 Selogiri, SMA Negeri 3 Sukoharjo, 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 Independent 2022 Kampus Merdeka, dan beberapa kali mengikuti PKM Ilmiah. Di bidang non akademik penulis aktif mengikuti pelatihan seperti manajerial (LKMM TD), kewirausahaan (LKMW TD), keagamaan (Pearlite 1), media dan desain (BMS). Organisasi yang diikuti oleh penulis antara lain menjadi Sekretaris Departemen Ukhuwah di LKKI Ash-Haabul Kahfi. Penulis dapat dihubungi melalui alamat surel kholilahnuraini@gmail.com dan nomor telepon +62 8529-3133-967