



**INVESTIGASI STRUKTUR DOMAIN DAN PENGARUH
PENERAPAN *MICROWAVE ASSISTED* TERHADAP
BAHAN *ALLOY* FePt MENGGUNAKAN
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

SKRIPSI

Oleh
Lutviana
NIM 141810201039

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2018**

PERSEMBAHAN

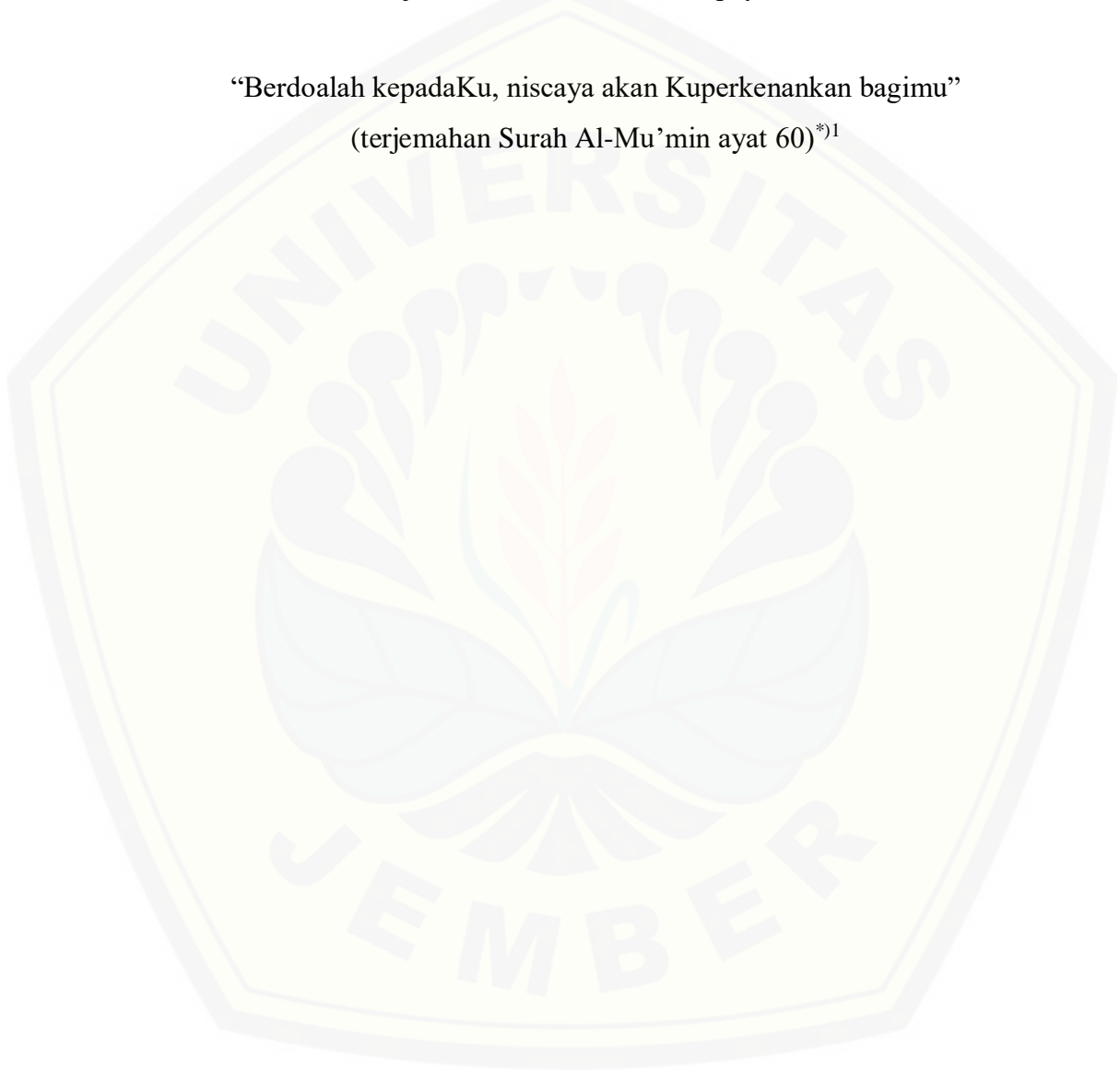
Skripsi ini saya persembahkan untuk :

1. Ibunda Nur Jannah, Ayahanda Abidin, kakak Miftakhus Sholeha dan seluruh keluarga terkasih yang tidak pernah kenal lelah selalu memberi nasihat, semangat serta doa-doanya.
2. Guru-guruku sejak Taman Kanak-Kanak hingga Sekolah Menengah Atas dan Dosen-dosen serta Teknisi di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Jember yang telah mendidik dengan penuh perhatian, kesabaran, dan keikhlasan.
3. Teman-temanku sejak Taman Kanak-Kanak hingga Perguruan Tinggi (Graphytasi 2014) yang dengan tulus menemaniku disaat duka maupun suka.
4. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember

MOTTO

“Barang siapa bertaqwa kepada Allah niscaya Allah menjadikan baginya kemudahan dalam segala urusannya”
(terjemahan Surah Ath-Thalaq ayat 4)^{*}

“Berdoalah kepadaKu, niscaya akan Kuperkenankan bagimu”
(terjemahan Surah Al-Mu'min ayat 60)^{*1}



^{*}Departemen Agama Republik Indonesia. 2002. *Alquran dan Terjemahannya*. Surabaya: Mahkota.

PERNYATAAN

Saya bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Lutviana

NIM : 141810201039

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Investigasi Struktur Domain dan Pengaruh Penerapan *Microwave Assisted* terhadap Bahan *Alloy FePt* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang saya sebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian bersama dosen dan mahasiswa dan hanya dapat dipublikasikan dengan mencantumkan nama dosen pembimbing.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, November 2018

Yang menyatakan,

Lutviana

NIM 141810201039

SKRIPSI

**INVESTIGASI STRUKTUR DOMAIN DAN PENGARUH
PENERAPAN *MICROWAVE ASSISTED* TERHADAP
BAHAN *ALLOY* FePt MENGGUNAKAN
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

Oleh

Lutviana

NIM 141810201039

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama

: Dr. Lutfi Rohman, S.Si.,M.Si.

Dosen Pembimbing Anggota

: Agung T. Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Investigasi Struktur Domain dan Pengaruh Penerapan *Microwave Assisted* terhadap Bahan *Alloy* FePt Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” telah diuji dan disahkan :

Hari, tanggal :

Tempat :

Tim Penguji:

Dosen Pembimbing Utama

Dosen Pembimbing Anggota

Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si.
NIP. 197208201998021001

Agung T. Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D.
NIP. 196812191994021001

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II

Endhah Purwandari, S.Si., M.Si.
NIP. 198111112005012001

Dr. Artoto Arkundato, S.Si., M.Si.
NIP. 196912251999031001

Mengesahkan,
Dekan Fakultas MIPA

Drs. Sujito, Ph.D
NIP. 196102041987111001

RINGKASAN

Investigasi Struktur Domain dan Pengaruh Penerapan *Microwave Assisted* terhadap Bahan *Alloy FePt* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik; Lutviana, 141810201039; 94 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam; Universitas Jember.

Tantangan yang tidak pernah berakhir dari teknologi penyimpanan data adalah kemampuan untuk meningkatkan kepadatan penyimpanan. Media penyimpanan data yang mudah digunakan untuk meningkatkan kepadatan penyimpanan salah satunya adalah media penyimpanan data magnetik. Salah satu aplikasi penyimpanan data magnetik yaitu *Hard Disk Drive* (HDD). Pengoptimalan HDD dapat dilakukan dengan meningkatkan kapasitas dan kepadatan tinggi, sehingga diperlukan teknik penulisan informasi. Teknik penulisan yang berkembang saat ini salah satunya adalah *Microwave Assisted Magnetic Recording* (MAMR). Teknologi MAMR menggunakan medan gelombang mikro yang dihasilkan dari *Spin Torque Oscillator* (STO) tegak lurus. *Spin torque oscillator* menghasilkan medan elektromagnetik berfrekuensi tinggi dan bergerak dengan kecepatan tinggi yang memungkinkan data ditulis ke media magnetik. MAMR dapat mengurangi besarnya medan reversal dan medan koersivitas ketika frekuensi maksimal gelombang *microwave* sesuai dengan frekuensi resonansi feromagnetik atau FMR (*Ferromagnetic Resonance*). Material feromagnetik yang digunakan untuk media perekam magnetik *hard disk drive* yaitu material feromagnetik yang memiliki anisotropi magnetik, dan koersivitas yang tinggi. Salah satu material feromagnetik yang menjanjikan tersebut adalah *iron-platinum* (FePt). Material FePt memiliki stabilitas yang sangat baik dalam ketahanan korosi sehingga berpotensi diaplikasikan dalam media perekaman magnetik.

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui diameter kritis bahan yang membatasi diameter berstruktur *single domain* dan *multi domain* serta pengaruh penerapan *microwave assisted* terhadap medan koersivitas dan energi sistem. Penelitian ini menggunakan bahan *alloy FePt* berbentuk *nanosphere* yang diaplikasikan pada simulator OOMMF di windows dan Nmag di linux. Kedua simulator tersebut didasarkan pada persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) dengan faktor redaman $\alpha = 0,05$. Penelitian ini diawali dengan menginvestigasi struktur domain dan rapat energi dalam kondisi *groundstate* pada ukuran diameter bahan 10 nm – 36 nm dengan interval 2 nm menggunakan simulator Nmag. Hasil penelitian menunjukkan perubahan struktur domain dari *single domain* menjadi *multi domain* yang dibatasi oleh titik diameter kritis yang berada pada diameter 15 nm. Diameter tersebut sesuai dengan perhitungan teori Brown yaitu sebesar 14,422 nm. Struktur *single domain* terjadi pada diameter di bawah diameter kritis yaitu 10 nm – 14 nm, sedangkan struktur *multi domain* terjadi pada diameter di atas diameter kritis yaitu 16 nm – 36 nm. Hasil tersebut diperkuat dengan adanya grafik profil rapat energi terhadap variasi diameter. Energi-energinya adalah energi total, energi demagnetisasi, dan energi *exchange*. Energi total merupakan

jumlah dari semua energi yang muncul dari magnetisasi. Energi demagnetisasi merupakan energi yang timbul dari penyelarasan momen magnetik atom. Energi *exchange* merupakan energi yang timbul dari interaksi spin dengan spin tetangganya, sehingga bernilai maksimum apabila memiliki lebih dari 1 domain. Daerah I dengan diameter berstruktur *single domain* didominasi oleh energi demagnetisasi, daerah II dengan diameter berstruktur *multi domain* didominasi oleh energi *exchange* sedangkan daerah III dengan diameter berstruktur *multi domain* merupakan daerah energi stabil.

Pada bagian kedua, pengamatan terhadap konfigurasi struktur domain saat diberi medan eksternal yang terlihat pada kurva histeresis. Kurva histeresis ini memberikan informasi mengenai medan koersivitas, medan saturasi dan medan remanensi pada setiap bahan *alloy* FePt dengan masing-masing variasi *cell mesh*, diameter bahan, amplitudo dan frekuensi. Variasi *cell mesh* dalam penelitian ini adalah 1 nm, 1,5 nm dan 2 nm. Hasil menunjukkan bahwa penambahan ukuran *cell mesh* menyebabkan medan koersivitas menurun. Menurunnya medan koersivitas terjadi karena kerapatan momen-momen magnet yang semakin kecil seiring bertambahnya ukuran *cell mesh*. Kemudian diameter bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 12 nm, 18 nm, dan 24 nm. Diameter bahan tersebut mewakili setiap daerah-daerah pada profil rapat energi. Hasil menunjukkan bahwa semakin besar diameter bahan yang digunakan maka volum bahan meningkat sehingga menyebabkan magnetisasi menurun. Menurunnya magnetisasi inilah yang menyebabkan medan koersivitas menurun. Selanjutnya pengaruh penerapan *microwave assisted* terhadap medan koersivitas dilihat dalam kurva histeresis. Amplitudo yang digunakan adalah 10 mT dan 1000 mT, sedangkan frekuensi yang digunakan adalah 1,2 GHz dan 120 GHz. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan nilai amplitudo dan frekuensi menyebabkan medan koersivitas menjadi semakin menurun. Hal ini diperkuat pada pembentukan kurva histeresis yang semakin tipis seiring dengan penambahan nilai amplitudo dan frekuensi. Medan eksternal tambahan *microwave assisted* cenderung lebih cepat mengalami pembalikan magnetisasi dengan rentang medan eksternal yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan medan eksternal tanpa *microwave assisted*.

Grafik pengaruh *microwave assisted* terhadap rapat energi yaitu energi total, energi demagnetisasi dan energi *exchange* menunjukkan bahwa energi total bernilai negatif untuk medan eksternal yang melebihi medan koersivitasnya. Hal ini terjadi pada saat pembentukan saturasi dengan struktur domain yang terbentuk yakni *single domain*. Energi demagnetisasi memiliki nilai yang rendah dan energi *exchange* memiliki nilai tinggi tepat pada medan koersivitasnya. Hal ini disebabkan di medan koersivitas terjadi pembalikan magnetisasi. Dihasilkan selisih yang cukup besar antara dalam keadaan tanpa *microwave assisted* dan dengan menggunakan *microwave assisted*. Selisih energi inilah yang digunakan oleh *microwave assisted* untuk membantu bahan *alloy* FePt melakukan pembalikan magnetisasi lebih cepat dan mudah. Hal ini dapat dilihat dari besarnya medan koersivitas yang semakin berkurang.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Investigasi Struktur Domain dan Pengaruh Penerapan *Microwave Assisted* Terhadap Bahan *Alloy FePt* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S-1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Agung T. Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, tenaga, dan perhatian dalam membantu penulisan skripsi ini;
2. Endhah Purwandari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji I dan Dr. Artoto Arkundato, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Agus Suprianto, S.Si., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang senantiasa memberikan bimbingan selama penulis menjadi mahasiswa;
4. Segenap Dosen dan Karyawan Fakultas MIPA Universitas Jember yang selalu membantu dan mendukung;
5. Teman-teman tim fisika komputasi magnetik (Alfia Endah, Nazril Aiga, dan Khiptiatun Ni'mah) yang telah memberikan dukungan dan motivasi dalam menyelesaikan penelitian skripsi ini;
6. Sahabat-sahabatku tercinta *Girl Only*: Rani Kusumaningtyas, Ulfa Urfiyah, Ira Apsari Ningtias, Nurfaizatul Jannah dan Cita Dewi Nindi yang selalu menyemangati, menasehati serta mengisi hari-hariku dengan tawa dan candaan;
7. Sahabat-sahabat KKN UMD 30 2017 yaitu Astri, Sheila, Elvina, Nasyika, Ayu, Edo, Adil, Verly dan Hambali telah menjadi *patner* 45 hariku;

8. Teman-teman Kos Edelweis Jln. Jawa 4c No.6, telah menjadi saksi proses hidupku selama menjadi mahasiswa;
9. Kawan-kawan pengurus HIMAFI 2016 dan pengurus HIMAFI 2017, telah mengajarkan arti kepengurusan, musyawarah, kepemimpinan dll;
10. Mas Bagus Fath Nagara angkatan 2011, telah membimbing dan mengajari mengenai penelitian ini;
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang membangun dari pembaca sangat diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang Fisika.

Jember, November 2018
Yang menyatakan,

Lutviana
NIM 141810201039

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERTANYAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBING	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Masalah	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Struktur Kristal	7
2.1.1 Kubik	7
2.1.2 <i>Hexagonal Closed Packed (HCP)</i>	9
2.1.3 <i>Face Centered Tetragonal (FCT)</i>	10
2.2 Klasifikasi Bahan	10
2.2.1 Diamagnetik	10
2.2.2 Paramagnetik	11
2.2.3 Feromagnetik	11
2.3 Bahan Alloy FePt	12

2.4 Domain Magnet dan Domain-wall	13
2.5 Energi pada Sistem Feromagnetik	15
2.5.1 Energi <i>Exchange</i>	15
2.5.2 Energi Magnetostatis	16
2.5.3 Energi <i>Magnetocrystalline</i> Anisotropi	17
2.5.4 Energi Zeeman	18
2.6 Konsep Mikromagnetik	18
2.7 Dinamika Magnetisasi Spin	19
2.8 Struktur Domain	21
2.8.1 Domain Tunggal (<i>Single Domain</i>)	21
2.8.2 Domain Jamak (<i>Multi Domain</i>)	22
2.9 Diameter Kritis (<i>Critical Diameter</i>)	22
2.10 Kurva Histeresis	24
2.11 Mekanisme Pembalikan Magnetisasi	26
2.12 <i>Microwave Assisted</i>	26
2.13 Simulasi Mikromagnetik	27
BAB 3. METODE PENELITIAN	31
3.1 Rancangan Penelitian	31
3.2 Jenis dan Sumber Data	32
3.3 Definisi Operasional Variabel	32
3.3.1 Variabel Bebas (<i>Independent Variable</i>)	32
3.3.2 Variabel Terikat (<i>Dependent Variable</i>)	32
3.3.3 Variabel Kontrol (<i>Control Variable</i>)	33
3.4 Kerangka Pemecahan Masalah	33
3.5 Prosedur Kerja	34
3.6 Metode Analisa	Error! Bookmark not defined.
3.6.1 Analisis pengaruh variasi diameter bahan terhadap struktur domain bahan <i>alloy</i> FePt	35
3.6.2 Analisis pengaruh <i>cell mesh</i> , diameter bahan dan <i>microwave assisted</i> terhadap medan koersivitas dalam kurva histeresis	37

3.6.3 Analisis grafik *microwave assisted* terhadap energi

total, energi demagnetisasi dan energi *exchange* Error! Bookmark not defined

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Pengaruh Variasi Diameter terhadap Struktur Domain	
Bahan Alloy FePt	39
4.2 Kurva Histeresis	46
4.2.1 Pengaruh Variasi <i>Cell Mesh</i> terhadap Medan	
Koersivitas	46
4.2.2 Pengaruh Variasi Diameter Bahan terhadap Medan	
Koersivitas	49
4.2.3 Pengaruh <i>Microwave Assisted</i> terhadap Medan	
Koersivitas	51
4.2.4 Pembalikan Magnetisasi	54
4.3 Grafik Pengaruh <i>Microwave Assited</i> terhadap Energi Total,	
Energi Demagnetisasi dan Energi <i>Exchange</i>	60
BAB 5. PENUTUP	64
5.1 Kesimpulan	64
5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN	72

DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 Parameter material alloy FePt untuk input data simulasi mikromagnetik ...	32
4.1 Medan koersivitas (Hc) terhadap variasi <i>cell mesh</i> pada saat diameter 12 nm	47
4.2 Medan koersivitas (Hc) terhadap variasi <i>cell mesh</i> pada saat diameter 18 nm	48
4.3 Medan koersivitas (Hc) terhadap variasi <i>cell mesh</i> pada saat diameter 24 nm	48
4.4 Medan koersivitas terhadap variasi diameter bahan pada saat <i>cell mesh</i> 1 nm	50
4.5 Medan koersivitas terhadap variasi diameter bahan pada saat <i>cell mesh</i> 1,5 nm	50
4.6 Medan koersivitas terhadap variasi diameter bahan pada saat <i>cell mesh</i> 2 nm	51
4.7 Medan koersivitas pada saat <i>cell mesh</i> 1 nm dan diameter 12 nm	52
4.8 Medan koersivitas pada saat <i>cell mesh</i> 1 nm dan diameter 18 nm	53
4.9 Medan koersivitas pada saat <i>cell mesh</i> 1 nm dan diameter 24 nm	53
4.10 Selisih energi total, energi demagnetisasi dan energi <i>exchange</i> sebagai pengaruh <i>microwave assisted</i>	63

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Kubik sederhana dengan konstanta kisi a	7
2.2 Struktur kristal <i>Body Centered Cubic</i> (BCC).....	8
2.3 Struktur kristal <i>Face Centered Cubic</i> (FCC)	9
2.4 (a) Susunan lapisan A dan B pembentuk HCP, (b) Dimensi satuan HCP	9
2.5 <i>Face Centered Tetragonal</i> (FCT) teratur.....	10
2.6 Skema material diamagnetik saat tidak dan adanya medan magnet H.....	10
2.7 Skema material paramagnetik saat tidak dan adanya medan magnet H.....	11
2.8 Skema material ferromagnetik saat tidak dan adanya medan magnet H	11
2.9 Struktur kristal <i>alloy</i> FePt (a) FCC (b) FCT	12
2.10 Gambaran skematik domain magnetik.....	13
2.11 Skematik <i>domain wall</i> (Bloch Walls).....	14
2.12 Skema yang menunjukkan penambahan domain dapat mengurangi medan demagnetisasi eksternal sehingga mengurangi energi magnetostatik.....	16
2.13 Gerak presisi dari momen magnet terhadap medan efektif. (a) tanpa redaman, (b) dengan menggunakan redaman (damping).....	21
2.14 Skema perubahan nilai koersivitas pada partikel ferromagnetik dengan diameter.....	23
2.15 Kurva Histerisis dari bahan ferromagnetik	24
2.16 Representasi kurva histeresis hard magnetik dan soft magnetik	25
2.17 Model mekanisme pembalikan magnetisasi.....	26
2.18 Simulasi mikromagnetik OOMMF	27
2.19 Simulasi mikromagnetik Nmag	29
3.1 Diagram alir rancangan penelitian.....	31
3.2 Diagram alir penelitian untuk menentukan struktur domain.....	33
3.3 Diagram alir penelitian untuk pembuatan kurva histeresis	34
3.4 Struktur domain yang dipengaruhi oleh variasi diameter	36
3.5 Grafik pengaruh variasi diameter terhadap rapat energi.....	36

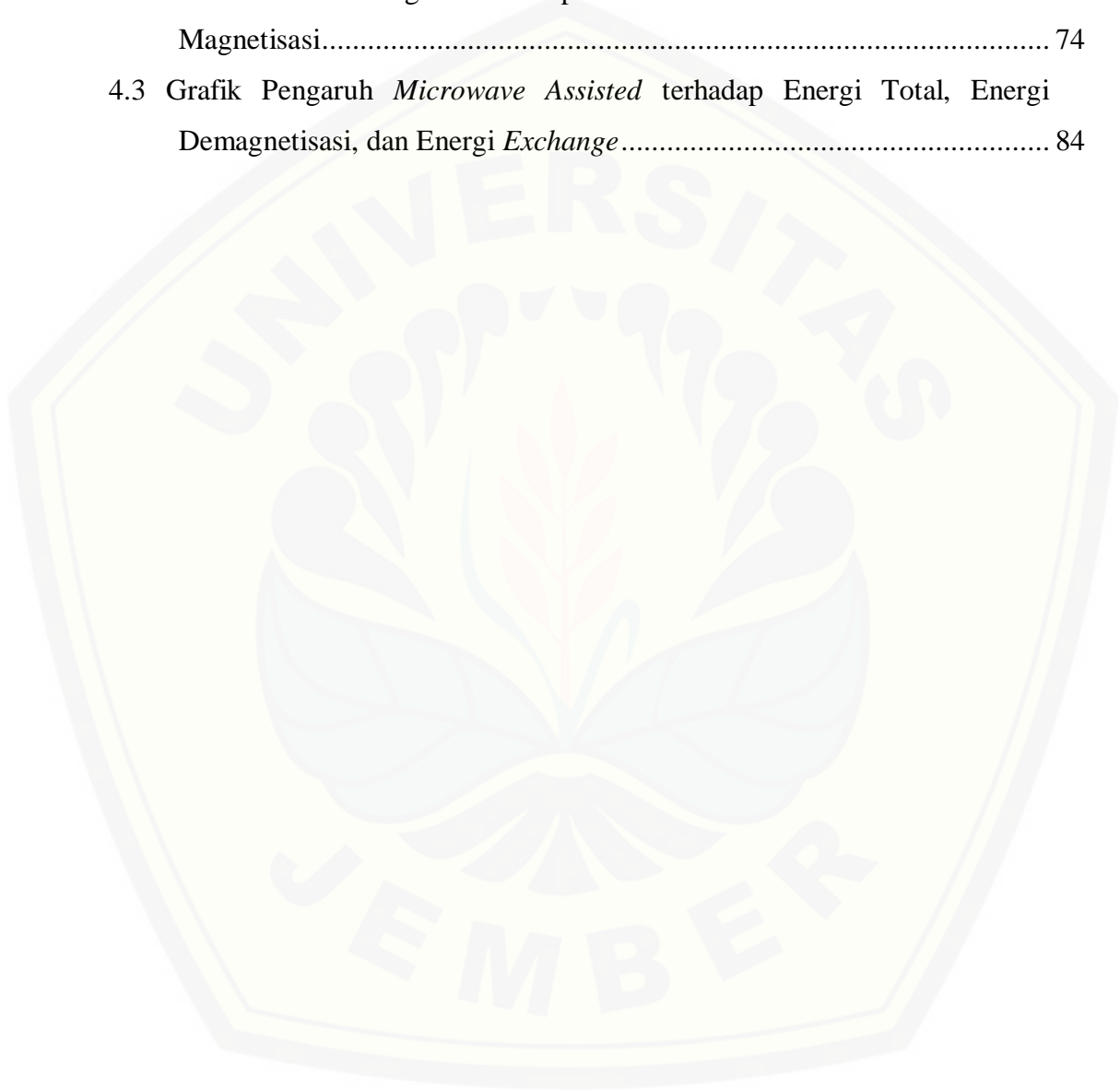
3.6	Kurva histeresis perubahan medan eksternal (H_z) terhadap magnetisasi ternormalisasi	37
3.7	Grafik rapat energi sistem terhadap variasi medan eksternal menggunakan <i>microwave assisted</i> dan tanpa <i>microwave assisted</i> (a) energi total, (b) energi <i>exchange</i> dan demagnetisasi	38
4.1	Diameter kritis bahan <i>alloy</i> FePt berbentuk <i>nanosphere</i> pada diameter 15 nm	40
4.2	Struktur <i>single domain</i> magnet pada bahan FePt bentuk <i>nanosphere</i> dengan variasi diameter, antara lain: (a) 10 nm, (b) 12 nm, (c) 14 nm	40
4.3	Struktur <i>multi domain</i> magnet pada bahan FePt bentuk <i>nanosphere</i> dengan variasi diameter, antara lain : (a) 16 nm, (b) 18 nm, (c) 20 nm	41
4.4	Struktur <i>multi domain</i> magnet pada bahan FePt bentuk <i>nanosphere</i> dengan variasi diameter, antara lain : (a) 22 nm, (b) 24 nm, (c) 26 nm, (d) 28 nm, (e) 30 nm, (f) 32 nm.....	42
4.5	Struktur <i>multi domain</i> magnet pada bahan FePt bentuk <i>nanosphere</i> dengan variasi diameter, antara lain (a) 34 nm, (b) 36 nm	43
4.6	Grafik profil rapat energi pada bahan <i>alloy</i> FePt bentuk <i>nanosphere</i> terhadap variasi diameter	45
4.7	Kurva histeresis dari 3 variasi <i>cell mesh</i> pada saat diameter 12 nm.....	47
4.8	Kurva histeresis dari 3 variasi <i>cell mesh</i> pada saat diameter 18 nm.....	47
4.9	Kurva histeresis dari 3 variasi <i>cell mesh</i> pada saat diameter 24 nm.....	48
4.10	Kerapatan momen-momen magnet bahan berdiameter 18 nm dengan <i>cell mesh</i> (a) 1nm, (b) 1,5 nm dan (c) 2nm	49
4.11	Kurva histeresis dari 3 diameter bahan pada saat <i>cell mesh</i> 1nm.....	49
4.12	Kurva histeresis dari 3 diameter bahan pada saat <i>cell mesh</i> 1,5 nm.....	50
4.13	Kurva histeresis dari 3 diameter bahan pada saat <i>cell mesh</i> 2nm.....	51
4.14	Kurva histeresis dari pengaruh <i>microwave assisted</i> terhadap medan koersivitas pada saat <i>cell mesh</i> 1 nm dan diameter 12 nm.....	52
4.15	Kurva histeresis dari pengaruh <i>microwave assisted</i> terhadap medan koersivitas pada saat <i>cell mesh</i> 1 nm dan diameter 18 nm.....	53

4.16	Kurva histeresis dari pengaruh <i>microwave assisted</i> terhadap medan koersivitas pada saat <i>cell mesh</i> 1 nm dan diameter 24 nm.....	53
4.17	Pembalikan magnetisasi bahan <i>alloy</i> FePt pada saat <i>cell mesh</i> 1 nm dan diameter 12 nm tanpa <i>microwave assited</i> dalam (a) kurva histeresis (b) visualisasi pembalikan magnetisasi.....	55
4.18	Pembalikan magnetisasi bahan <i>alloy</i> FePt pada saat <i>cell mesh</i> 1 nm dan diameter 18 nm tanpa <i>microwave assited</i> dalam (a) kurva histeresis (b) visualisasi pembalikan magnetisasi.....	57
4.19	Kurva perbandingan (a) magnetisasi dan (b) struktur domain dari medan eksternal tanpa <i>microwave assisted</i> dan dengan <i>microwave assisted</i> pada saat <i>cell mesh</i> 1,5 nm dan diameter bahan 18 nm	59
4.20	Grafik pengaruh <i>microwave assisted</i> terhadap energi sistem (a) total, (b) demagnetisasi dan (c) <i>exchange</i> pada saat <i>cell mesh</i> 1 nm dan diameter 12 nm	61
4.21	Grafik selisih energi total, energi demagnetisasi dan energi <i>exchange</i> pada saat <i>cell mesh</i> 1 nm dan diameter 12 nm	63

DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

4.2 Kurva Histeresis Pengaruh Penerapan <i>Microwave Assisted</i> dan Pembalikan Magnetisasi.....	74
4.3 Grafik Pengaruh <i>Microwave Assisted</i> terhadap Energi Total, Energi Demagnetisasi, dan Energi <i>Exchange</i>	84



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri penyimpanan data telah mengalami kemajuan yang luar biasa karena adanya pengembangan teknik material dan fabrikasi. Tantangan yang tidak pernah berakhir dari teknologi penyimpanan data adalah kemampuan untuk meningkatkan kepadatan penyimpanan. Media penyimpanan data yang mudah digunakan untuk meningkatkan kepadatan penyimpanan salah satunya adalah media penyimpanan data magnetik (Tudu dan Tiwari, 2017). Penyimpanan magnetik adalah aplikasi memori *non-volatile* yang memanfaatkan keadaan stabil magnetisasi dari material untuk menyimpan data atau informasi. *Non-volatile* berarti bahwa data yang telah disimpan tidak akan hilang ketika komputer dimatikan. Salah satu aplikasi penyimpanan data magnetik yaitu *Hard Disk Drive* (HDD) (Wibowo, 2011).

HDD merupakan sebuah media penyimpanan sekunder pada sebuah komputer. Berawal dari perusahaan *International Business Machines* (IBM) yang menjadi pelopor perkembangan komputer pada tahun 1950an menciptakan 305 RAMAC (*Random Access Method of Accounting and Control*) yaitu media penyimpanan sekunder yang pertama berupa sebuah *harddisk* dengan fisik yang sangat besar dengan kapasitas data yang dapat disimpan adalah sebesar 5 MB (Mega Byte) (Wahyudi, 2005). Perkembangan HDD semakin pesat pada kurun waktu 4 tahun terakhir dengan ditemukannya HDD dengan densitas 520 Gbit/m² (Muhammady *et al.*, 2012). Sehingga kebutuhan HDD berkapasitas besar semakin meningkat.

Salah satu cara perkembangan HDD adalah menurunnya ukuran titik data hingga ukuran nanometer, dengan harapan *harddisk* memiliki memori yang besar dengan ukuran divais yang kecil sehingga secara fungsional *harddisk* akan sanggup menampung data yang banyak dan secara ukuran, *harddisk* mudah dibawa dan diletakkan dalam perangkat komputer (Mikrajuddin, 2012). Pengoptimalan tersebut dapat dilakukan dengan peningkatan kapasitas dan kepadatan tinggi, sehingga diperlukan teknik penulisan informasi. Teknik

penulisan yang berkembang saat ini salah satunya adalah *Microwave Assisted Magnetic Recording* (MAMR) (Wibowo, 2011). Teknologi MAMR menggunakan medan gelombang mikro yang dihasilkan dari *Spin Torque Osilator* (STO) tegak lurus. *Spin torque osilator* menghasilkan medan elektromagnetik berfrekuensi tinggi dan bergerak dengan kecepatan tinggi yang memungkinkan data ditulis ke media magnetik. MAMR dapat mengurangi besarnya medan reversal dan medan koersivitas ketika frekuensi maksimal gelombang *microwave* sesuai dengan frekuensi resonansi feromagnetik atau FMR (*Ferromagnetic Resonance*). Teknik FMR dapat digunakan untuk menyelidiki dinamika magnetisasi dari material feromagnetik sebagai dasar penyimpanan data (Li *et al.*, 2008).

Material feromagnetik memanfaatkan konfigurasi momen magnet atau spin magnet dalam domain magnet (*magnetic domain*) dan domain wall magnet (*magnetic domain-wall*) sebagai media penyimpanan data (Schryer & Walker, 1974). Berbagai hasil penelitian mengenai domain magnet yang dimiliki oleh material feromagnetik pada skala nano menggunakan simulasi mikromagnetik telah banyak dipublikasikan. Material nanomagnetik memiliki kekuatan magnetik yang lebih kuat dibandingkan dengan material mikromagnetik. Tingkat kemagnetan atau magnetisasi akan meningkat dengan penurunan ukuran butiran partikel (Nabok, 2000). Penelitian-penelitian yang telah dipublikasikan salah satunya adalah mengenai konfigurasi struktur domain magnet pada keadaan *groundstate* ataupun dengan memberikan medan eksternal (*external field*) untuk pengamatan dinamika magnetisasi. Keadaan *groundstate* adalah keadaan stabil pada energi minimum yang digunakan untuk investigasi titik diameter kritis. Titik ini merupakan titik peralihan/transisi dari struktur *single domain* menjadi *multi domain* (Widodo, 2013). Pemberian medan eksternal dapat menggunakan bantuan medan gelombang mikro (*microwave assisted*) berfrekuensi tinggi yang diamati dari beberapa sifat intrinsik seperti pembentukan kurva histeresis dan mekanisme pembalikan struktur domain. Kurva histeresis tersebut berisikan informasi mengenai medan remanen, medan koersivitas dan medan saturasi sedangkan pembalikan magnetisasi akan mempengaruhi medan *switching* seiring dengan meningkatnya diameter yang digunakan (Li *et al.*, 2008).

Penelitian mengenai domain magnet telah dilakukan oleh Nagara (2016) yang menggunakan bahan *alloy* CoPd berdiameter antara 110 nm-280 nm untuk memperoleh struktur domain. Hasil menunjukkan bahwa diameter kritisnya 140 nm dan diperkuat dengan adanya grafik profil energi. Nagara juga meneliti pengaruh penerapan *microwave assisted* dengan menggunakan ukuran sel 1,5 nm, 4 variasi amplitudo dan frekuensi. Hasil diperoleh informasi bahwa *microwave assisted* mampu membuat nilai medan koersivitas menurun, *microwave assisted* cenderung lebih cepat mengalami pembalikan magnetisasi dengan rentang medan eksternal yang lebih kecil daripada tanpa *microwave assisted*. *Microwave assisted* ini merupakan medan eksternal yang mampu memberikan kontribusi dalam pembuatan perekam magnetik karena mampu menurunkan besar medan koersivitas pada material. Oleh karenanya pengaruh *microwave assisted* ini disimulasikan dengan menggunakan material tertentu sehingga dapat teramati perubahan medan koersivitas melalui kurva histeresis.

Penelitian lainnya dilakukan oleh Widodo (2013) mengenai struktur domain magnet pada kondisi *groundstate* dan diberikan medan magnet eksternal *quasi static* sepanjang arah *hard-axis* bahan Py, Ni, Fe dan Co. Hasil yang diperoleh dari simulasi menyatakan bahwa diameter kritis Py = 37,5 nm, Ni = 57,5 nm, Fe = 25 nm, dan Co = 50 nm. Besarnya medan eksternal yang diberikan 0 hingga 1500 mT dengan step perubahan 10 mT, sedangkan variasi diameter menggunakan diameter *hard axis*. Kurva histeresis yang terbentuk kemudian dianalisa besar koersivitas intrinsik H_{ci} , medan remanan, medan saturasi (*saturation field*) serta waktu pembalikan (*switching time*) (Widodo, 2013). Material-material yang digunakan oleh Widodo (2013) merupakan material feromagnetik yang memiliki magnetisasi saturasi antara 400×10^3 A/m - 1400×10^3 A/m kecuali Fe yang memiliki magnetisasi saturasi sebesar 1700×10^3 A/m. Karena magnetisasi saturasi dari unsur Fe besar, maka unsur ini akan diinvestigasi dengan menggunakan campuran unsur lain dari logam transisi atau biasa disebut *alloy*. Logam transisi yang tepat yang dapat digunakan sebagai perpaduan adalah Pt (*platinum*) karena apabila Pt dipadukan dengan Fe akan menghasilkan konstanta anisotropi K yang besar (Sun *et al.*, 2000).

Penentuan sifat *alloy* FePt dilakukan oleh Naturalium (2006) dimana hasil yang diperoleh menyatakan bahwa FePt tersebut memiliki konstanta anisotropi $6,6 \times 10^5 \text{ J/m}^3$, medan anisotropi ($\mu_0 H_A$) 11,5 T, magnetisasi saturasi $\mu_0 M_s = 1,43 \text{ T}$ dan *exchange length* $I_{ex} = 2 \text{ nm}$ (Naturalium, 2006). Hasil tersebut menunjukkan bahwa bahan *alloy* FePt memiliki magnetisasi saturasi yang lebih besar dibandingkan *alloy* CoPd, Py, Ni, dan Co. Magnetisasi saturasi ini dapat mempengaruhi besar diameter kritis material sebagai penentu struktur *single domain* dan struktur *multi domain* (Widodo, 2013). Oleh karena itu bahan *alloy* FePt inilah yang akan digunakan sebagai bahan pengaplikasian struktur domain magnetik.

Bahan *alloy* FePt merupakan suatu material yang telah menerima banyak perhatian dari komunitas riset magnetik karena memiliki *magnetocrystalline* anisotropi yang sangat tinggi sekitar 10^6 joule/m^3 . Karena anisotropi yang dimiliki FePt tinggi maka koersivitas yang dihasilkan akan tinggi, sehingga FePt berpotensi diaplikasikan dalam media perekaman magnetik (Evans, 2008). Medan koersivitas yang tinggi terletak pada diameter yang menunjukkan struktur *single domain* (di bawah diameter kritis) dan akan terpengaruh oleh adanya medan eksternal (Nagara, 2016). Penerapan medan eksternal pada bahan *alloy* FePt dapat disimulasi melalui kurva histeresis menggunakan bantuan medan eksternal tambahan gelombang mikro (*microwave assisted*).

Penentuan struktur domain dan pengaruh penerapan *microwave assisted* terhadap medan eksternal dalam kurva histeresis pada bahan *alloy* FePt dapat dilakukan dengan pendekatan simulasi mikromagnetik (Widodo, 2013). Simulasi yang digunakan adalah Nmag (Nanomagnetik) dan OOMMF (*Object Oriented Micromagnetic Framework*). Parameter bahan *alloy* FePt yang diinputkan ke dalam simulasi mikromagnetik yaitu saturasi magnetisasi, konstanta anisotropi, konstanta *exchange* dan faktor redaman dengan menggunakan diameter sekitar diameter kritis untuk menentukan struktur domain yang dapat dibuktikan pembagian *single domain* dan *multi domain* oleh adanya grafik energi sistem melalui simulasi Nmag. Parameter bahan tersebut juga digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi *cell mesh*, diameter dan medan eksternal tambahan

microwave assisted terhadap medan koersivitas dan energi sistem melalui OOMMF yang dapat diamati pada kurva histeresis.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian yang telah disampaikan, rumusan masalah yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana pengaruh variasi diameter terhadap struktur domain bahan *alloy* FePt?
2. Bagaimana pengaruh *cell mesh*, diameter bahan dan *microwave assisted* terhadap medan koersivitas dalam kurva histeresis?
3. Bagaimana pengaruh *microwave assisted* terhadap energi total, energi demagnetisasi, dan energi *exchange*?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian kali ini antara lain

1. Penelitian simulasi mikromagnetik *alloy* FePt dilakukan dalam bentuk *nanosphere*.
2. Variasi ukuran diameter dalam penentuan struktur domain adalah 10 nm - 36 nm dengan interval 2 nm.
3. Struktur domain berupa *single domain* dan *multi domain*.
4. Bahan *alloy* FePt dipengaruhi oleh medan eksternal tambahan berupa *microwave assisted*.
5. Pembentukan kurva histeresis dan energi yang dipengaruhi *microwave assisted* menggunakan 3 variasi diameter, 3 *cell mesh*, 2 nilai amplitudo dan 2 frekuensi.
6. Struktur kristal bahan *alloy* FePt berbentuk FCT (*Face Centered Tetragonal*) dengan atom Pt berada di pusat.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang akan dicapai adalah

1. Mengetahui pengaruh variasi diameter bahan terhadap struktur domain bahan *alloy* FePt.
2. Mengetahui pengaruh *cell mesh*, diameter bahan dan *microwave assisted* terhadap medan koersivitas dalam kurva histeresis.
3. Mengetahui pengaruh *microwave assisted* terhadap energi total, energi demagnetisasi dan energi *exchange*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen sehingga dapat digunakan sebagai acuan bahan dasar dari pembuatan media penyimpanan magnetik. Penelitian ini juga memberi informasi mengenai diameter kritis dan karakteristik bahan *alloy* FePt yang baik digunakan untuk perekam magnetik. Karakteristik bahan tersebut antara lain mengenai ukuran *cell mesh* dan diameter bahan yang apabila diperkecil mampu meningkatkan medan koersivitas. Pemanfaatan *cell mesh* dan diameter bahan dengan ukuran sangat kecil (nm) menghasilkan perekam magnetik dengan kapasitas penyimpanan yang besar. Kemudian *microwave assisted* yang diterapkan untuk mempercepat proses pembalikan magnetisasi. Proses pembalikan magnetisasi yang cenderung cepat menyebabkan data lebih mudah ditulis ke perekam magnetik.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

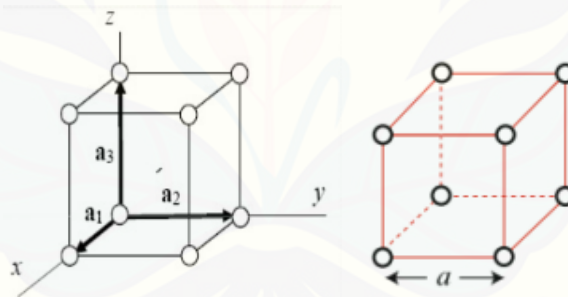
Kemagnetan merupakan bagian penting dalam perkembangan aplikasi memori maupun HDD. Oleh karena itu diperlukan pemahaman mengenai sifat-sifat magnetik yang erat kaitannya dengan mekanisme penyimpanan informasi dalam aplikasi memori dan HDD seperti struktur domain magnetik dan kurva histeresis.

2.1 Struktur Kristal

2.1.1 Kubik

a. Kubik Sederhana (*Simple Cubic*)

Kristal kubik sederhana konstanta kisiya adalah a dan volume per atomnya a^3 . Jarak antar atom terdekat adalah a . Masing-masing atom terikat dengan enam atom tetangga yang berdekatan. Vektor primitif $a_1 = a\hat{x}$, $a_2 = a\hat{y}$, $a_3 = a\hat{z}$. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.1



Gambar 2.1 Kubik sederhana dengan konstanta kisi a (Sumber: John dan Soo Yi, 2009)

b. *Body Centered Cubic* (BCC)

Struktur BCC mempunyai sebuah atom pada pusat kubus dan pada setiap titik sudut kubus. Jika kita mengambil satu unit sel pada sisi kubik a , ada 2 atom per sel $(0,0,0)$ dan $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$. Volume atomik nya adalah $\frac{1}{2}a^3$ dan jarak terdekat dengan atomlainya adalah $\frac{\sqrt{3}}{2}a$ (John dan Soo Yi, 2009). Menurut Jasprit (2003) menyatakan bahwa jika x , y , dan z adalah tiga vektor satuan orthogonal. Kemudian satu vektor primitif berpusat pada tubuh. Kisi kubik bisa jadi,

$$a_1 = a\hat{x}, a_2 = a\hat{y}, a_3 = \frac{a}{2}(\hat{x} + \hat{y} + \hat{z}) \quad (2.1)$$

Vektor primitif untuk kisi BCC yang lebih simetris adalah

$$a_1 = \frac{a}{2}(\hat{y} + \hat{z} - \hat{x}), a_2 = \frac{a}{2}(\hat{z} + \hat{x} - \hat{y}), a_3 = \frac{a}{2}(\hat{x} + \hat{y} - \hat{z}) \quad (2.2)$$

Masing-masing atom terikat dengan delapan atom tetangga yang berdekatan, dengan jari-jari atomnya R (Mangonon, 1999)

$$\sqrt{3} a = 4R \text{ atau } a = \frac{4R}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

Untuk nilai *Atomic Packing Factor* (APF) dapat menggunakan persamaan

$$APF = \frac{\text{Volume atom-atom dalam sel satuan}}{\text{Volume Sel satuan}} \quad (2.4)$$

Dari hasil perhitungan harga untuk APF kristal BCC adalah 0,68 dan sisanya 0,32 adalah ruang kosong. Hal ini menunjukkan bahwa kristal BCC berstruktur padat. Logam lain yang mempunyai struktur seperti ini yaitu: chromium, colombium, barium, vanadium, molybdenum dan tungsten



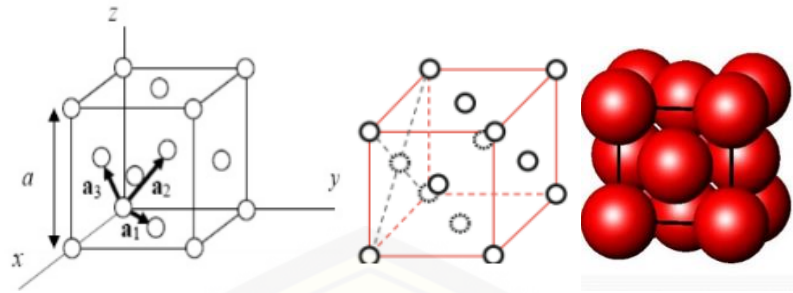
Gambar 2.2 Struktur kristal *Body Centered Cubic* (BCC) (Sumber: Jasprit, 2003)

c. *Face Centered Cubic* (FCC)

Satu sel dari struktur kristal FCC dapat dilihat pada gambar 2.3. Gambar tersebut menunjukkan bahwa terdapat satu titik *lattice* pada setiap sudut ($1/8$ atom) dan satu titik *lattice* pada setiap pusat sisi kubus ($1/2$ atom) sehingga dalam satu sel satuan FCC terdapat 4 atom. Struktur kristal FCC dikelilingi oleh 12 atom tetangga dengan bilangan koordinasi adalah 12. Jari-jari atom FCC dapat diketahui dengan persamaan

$$\sqrt{2} a = 4R \text{ atau } a = 4R\sqrt{2} \quad (2.5)$$

Persamaan 2.4 juga dapat digunakan untuk mengetahui nilai APF pada kristal FCC. APF sebesar 0,74 dan sisanya sebesar 0,26 merupakan ruang kosong. Hal ini mencirikan bahwa kristal FCC berstruktur padat. Contoh FCC yaitu Pd, Cu, Pb, Pt (Mangonon, 1999).



Gambar 2.3 Struktur kristal *Face Centered Cubic* (FCC) (Sumber: Jasprit, 1999)

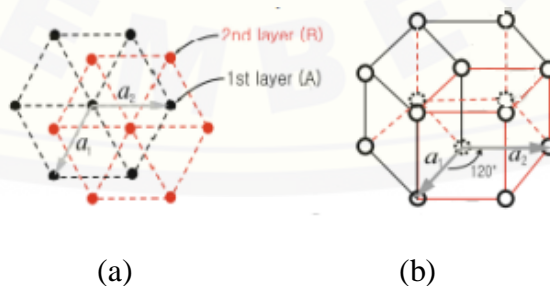
Untuk membangun pusat FCC, kisi Bravais menambah kisi pada kubik sederhana ditambahkan titik pada pusat setiap persegi. Vektor primitif untuk kisi FCC

$$a_1 = \frac{a}{2}(\hat{y} + \hat{z}), a_2 = \frac{a}{2}(\hat{z} + \hat{x}), a_3 = \frac{a}{2}(\hat{x} + \hat{y}) \quad (2.6)$$

Kisi Bravais adalah kristal kisi yang memiliki titik-titik kisi yang ekuivalen sehingga titik-titik kisi tersebut dalam kristal akan ditempati oleh atom-atom yang sejenis (Jasprit, 2003).

2.1.2 *Hexagonal Closed Packed* (HCP)

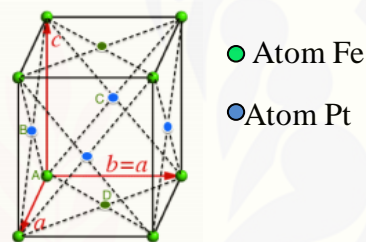
HCP dibentuk dari susunan 2 lapisan yakni lapisan A dan lapisan B, terlihat pada gambar 2.4(a). Struktur ini tersusun dari beberapa bagian, bagian muka atas dan bawah yang terdiri dari 6 atom dan mengelilingi 1 atom pusat serta diantara muka unit sel ini terdapat 3 atom. Akan tetapi, untuk beberapa logam HCP, nilai rasio ini berubah dari nilai idealnya. Bilangan koordinasi struktur HCP dan faktor tumpukannya (APF) sama dengan struktur FCC, yaitu 12 untuk bilangan koordinasi dan 0,74 untuk faktor tumpukan



Gambar 2.4 (a) Susunan lapisan A dan B pembentuk HCP (Sumber: John dan Soo Yi, 2009), (b) Dimensi satuan HCP (Sumber: Jasprit, 2003)

2.1.3 Face Centered Tetragonal (FCT)

Struktur kristal ini mempunyai 3 sumbu kristal yang masing-masing saling tegak lurus. Sumbu a dan b mempunyai satuan panjang sama. Sedangkan sumbu c berlainan, dapat lebih panjang atau lebih pendek seperti pada gambar 2.5. Tetragonal memiliki *axial ratio* (perbandingan sumbu) $a = b \neq c$, yang artinya panjang sumbu a sama dengan sumbu b tapi tidak sama dengan sumbu c . Struktur kristal memiliki sudut kristalografi $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Hal ini berarti pada sistem ini semua sistem kristalografinya (α, β , dan γ) tegak lurus satu sama yang lain. Sistem struktur kristal tetragonal memiliki perbandingan sumbu $a : b : c = 1 : 3 : 6$ yang artinya pada sumbu a ditarik dengan nilai 1, pada sumbu b ditarik garis dengan nilai 3 dan sumbu c ditarik garis dengan nilai 6 (Tjia, 1987).

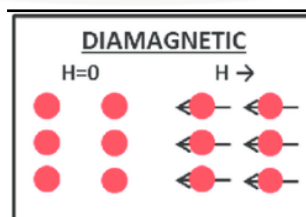


Gambar 2.5 Face Centered Tetragonal (FCT) teratur (Sumber: Herde, 2013)

2.2 Klasifikasi Bahan

2.2.1 Diamagnetik

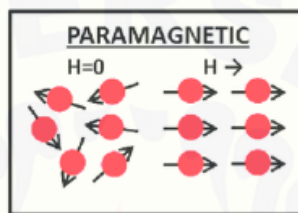
Diamagnetik adalah gejala kemagnetan suatu bahan dimana ketika tidak ada medan luar H momen magnetiknya nol dan ketika suatu bahan diberikan medan magnet luar H , maka akan terinduksi oleh perubahan elektron orbital yang disebabkan oleh medan magnet luar. Besarnya momen magnet induksi sangat kecil dan arahnya kebalikan dari medan magnet luar. Material diamagnetik memiliki susceptibilitas yang sangat kecil (orde 10^{-5}) dan negatif (Hasan, 2008).



Gambar 2.6 Skema material diamagnetik saat tidak dan adanya medan magnet H (Sumber: Veronica *et al.*, 2016)

2.2.2 Paramagnetik

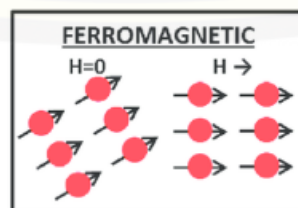
Paramagnetik adalah gejala kemagnetan pada suatu bahan dimana jika terdapat medan luar yang mempengaruhi maka momen magnetik akan memiliki arah yang sama dengan arah medan luar tersebut. Namun hanya sebagian kecil saja yang menjadi searah. Hal ini disebabkan karena pada bahan paramagnetik energi panas memiliki pengaruh yang relatif lebih besar daripada energi magnetik yang diberikan. Bahan paramagnetik memiliki susceptibilitas yang kecil dan positif $\chi \approx 10^{-3} - 10^{-5}$ (Hasan, 2008).



Gambar 2.7 Skema material paramagnetik saat tidak dan adanya medan magnet H (Sumber: Veronica *et al.*, 2016).

2.2.3 Ferromagnetik

Bahan ferromagnetik adalah bahan yang permeabilitas relatifnya jauh lebih besar dari satu dan susceptibilitasnya bernilai positif. Ketika bahan ferromagnetik diberi medan magnet luar, maka momen magnet dalam domain magnet akan searah dengan arah medan magnet luar tersebut. Momen-momen magnet ini akan tetap searah walaupun medan magnet luar dihilangkan, sehingga bahan ini dapat dijadikan magnet permanen. Domain magnet pada bahan ferromagnetik tanpa diberi medan magnet luar dan diberi medan magnet luar ditunjukkan pada gambar 2.8. Bahan yang termasuk dalam bahan ferromagnetik adalah besi, kobalt dan nikel (Ida, 2004).

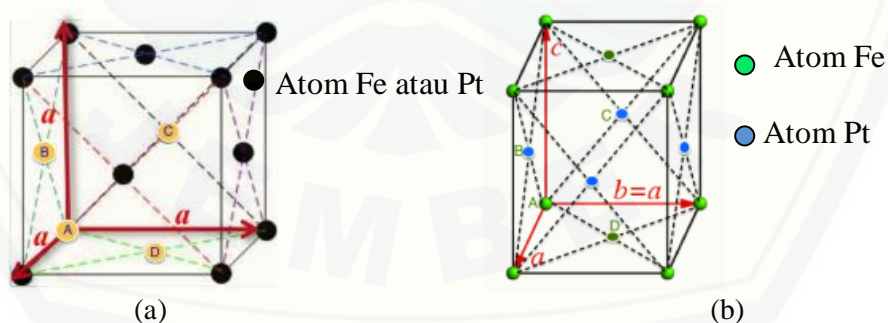


Gambar 2.8 Skema material ferromagnetik saat tidak dan adanya medan magnet H (Sumber: Veronica *et al.*, 2016).

2.3 Bahan Alloy FePt

Bahan *alloy* yang merupakan bahan paduan antara bahan yang mempunyai unsur logam dengan logam. Bahan FePt termasuk bahan *alloy* karena bahan Fe (*iron*) yang termasuk bahan feromagnetik yang dipadukan dengan bahan logam transisi yaitu Pt (*platinum*). Bahan *alloy* FePt memiliki *magnetocrystalline* anisotropi yang sangat tinggi sekitar 10^5 - 10^6 joule/m³ yang memungkinkannya memiliki butiran magnetik termal yang sangat kecil yakni mendekati 2,6 nm (Zhao, 2011). Karena anisotropi yang dimiliki FePt tinggi maka koersivitas yang dihasilkan akan tinggi (Evans, 2008).

Bahan *alloy* FePt membentuk dua struktur kristal utama yaitu FCC (*Face Centered Cubic*) dan FCT (*Face Centered Tetragonal*). Struktur FCC disebut juga struktur A1 yang terdiri dari kubus yang memiliki sisi sepanjang a_{fcc} . Setiap sudut dan setiap sisi dari kubus memiliki atom seperti yang terlihat pada gambar 2.9(a). Pada struktur FCC, setiap atom antara Fe dan Pt ditempatkan secara acak dalam struktur kisi. Sebaliknya, struktur FCT memecah simetri kubik struktur FCC dengan mengubah panjang salah satu sisi seperti gambar 2.9(b). Tidak seperti struktur FCC, atom Fe dan Pt membentuk lapisan bergantian sepanjang sumbu c pada fase teratur FCT. Bahan *alloy* FePt berstruktur FCT sangat baik digunakan untuk HDD karena medan koersivitasnya melebihi 30 kOe (Herde, 2013).



Gambar 2.9 Struktur kristal *alloy* FePt (a) FCC (b) FCT (Sumber: Herde, 2013).

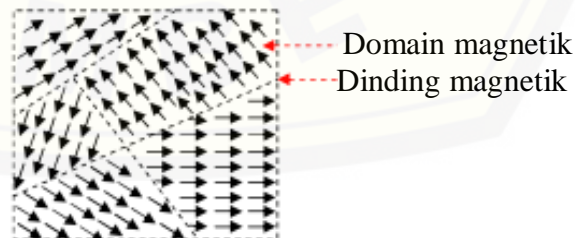
Parameter yang dimiliki bahan *alloy* FePt diantaranya yaitu energi *exchange* (A) sebesar $1,03 \times 10^{-11}$ J/m, magnetisasi saturasi (M_s) 1,43 T atau $1,43 \times 10^6$ A/m (Ampere/meter), konstanta *magnetocrystalline* anisotropi bernilai (K) $6,6 \times 10^5$ J/m³, *domain wall* (δ_w) 6,3 nm, medan anisotropi (H_A) 11,5 T dan $I_{ex} = 2$ nm

(Naturalium, 2006) dan memiliki faktor redaman $a = 0,05$ (Kim *et al.*, 2016). Bahan FePt merupakan bahan intermetalik karena perpaduan dua logam Fe dan logam Pt. Bahan FePt memiliki struktur kristal *face centered tetragonal* (FCT) pada temperatur tinggi. Bahan *alloy* FePt memiliki sumbu mudah (*easy axis*) pada titik c (001) (Xing *et al.*, 2006).

Para ilmuwan di Laboratorium Akselerator Nasional SLAC Departemen Energi telah melihat untuk pertama kalinya bagaimana atom FePt bahan generasi berikutnya untuk perangkat penyimpanan data magnetik yang dapat merespon sangat cepat terhadap kilatan laser singkat. Hasil yang diperoleh bahwa laser dapat memflash magnetisasi partikel FePt dalam waktu kurang dari seperseratus detik, menyebabkan atom-atom dalam material bergerak lebih dekat satu arah dan bergerak lebih jauh di satu arah (Gnida, 2018).

2.4 Domain Magnet dan *Domain-wall*

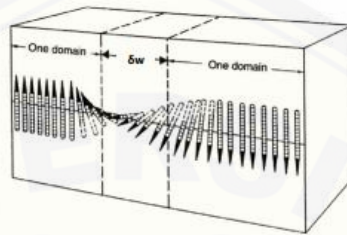
Domain magnetik merupakan daerah dimana momen magnetik mempunyai orientasi yang sama (Coey, 2009). Beberapa sifat magnetik yang kuat ditemukan karena adanya magnetisasi spontan. Mekanisme dibalik munculnya magnetisasi spontan ini pertama kali diutarakan oleh Pierre Weiss 1907. Pierre mengasumsikan bahwa terdapat medan efektif yang disebut medan molekular (*molecular field*) yang menyearahkan arah spin tetangganya agar menjadi searah satu dengan yang lain (Yaying, 2003). Gambaran skematik domain magnetik ditunjukkan oleh gambar 2.10



Gambar 2.10 Gambaran skematik domain magnetik (Sumber: Yaying, 2003)

Selain domain magnetik, juga terdapat domain yang merupakan hasil interaksi antar domain magnetik yang disebut dengan *domain walls*. *Domain walls* ini muncul pada transisi arah spin *up* menjadi arah spin *down*. Kebanyakan

perubahan magnetik di bawah pengaruh medan magnetik luar muncul pada domain walls, sehingga pemahaman tentang *domain walls* ini sangat penting untuk menggambarkan proses magnetisasi (Jiles, 1998). *Domain walls* dengan lebar δ_w yang terletak diantara dua domain magnetik secara skematik ditunjukkan oleh gambar 2.11.



Gambar 2.11 Skematik *domain wall* (Bloch Walls) (Sumber: Jiles, 1998)

Magnetisasi M merupakan suatu karakteristik dari material magnetik dan secara mikroskopis tergantung pada jumlah momen-momen magnet dan volume bahan dengan persamaan :

$$M = \frac{m}{V} \quad (2.7)$$

Dengan :

M = Magnetisasi (A/m)

m = vektor momen magnet (A/m^2)

V = Volume (m^3)

Bila seluruh momen magnet memiliki orientasi sama, maka dapat dikatakan sebagai magnetisasi jenuh (saturation magnetization) (Hasan, 2008). Hubungan antara magnetisasi M dengan medan magnet luar H dituliskan sebagai

$$M = \chi H \quad (2.8)$$

dimana χ adalah suseptibilitas magnetik yang didefinisikan sebagai magnetisasi yang terjadi per satuan medan magnet luar. Suseptibilitas dijadikan sebagai parameter kualitas material magnetik dan dasar penggolongan sifat magnetik dalam suatu material (Puri dan Babbar, 1997). Magnetisasi bahan dapat dipengaruhi oleh medan magnet luar \vec{H} . Medan magnet luar dapat ditimbulkan oleh magnet permanen (termasuk magnet bumi) dan muatan bergerak (arus listrik). Pada ruang hampa tidak terjadi magnetisasi, dan kaitan medan magnet \vec{B}

dengan \vec{H} dapat dituliskan:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.9)$$

dengan $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m adalah permeabilitas ruang hampa, \vec{H} adalah medan magnet luar A/m dan \vec{B} adalah kuat medan magnet W/m² atau tesla (T) (Rahmatun, 2012). Menurut Wibowo (2011) magnetisasi juga dapat dipandang sebagai tingkat respon suatu bahan ketika dikenai medan magnet eksternal (\vec{H}). Hubungan antara magnetisasi (\vec{M}) terhadap medan magnetik (\vec{H}) dan induksi magnetik (\vec{B}) dinyatakan sebagai berikut

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.10)$$

2.5 Energi pada Sistem Feromagnetik

2.5.1 Energi *Exchange*

Energi *exchange* merupakan energi yang timbul dari interaksi spin dengan spin tetangganya melalui *exchange coupling* (Widodo, 2013). Bentuk umum persamaan konstanta *exchange* untuk model atomistik secara umum yaitu

$$J_{ij} = \frac{3k_B T_c}{\epsilon z} \quad (2.11)$$

k_B adalah konstanta Boltzmann, T_c adalah temperatur curie, z jumlah tetangga terdekat (*nearest neighbour*) dan ϵ adalah faktor koreksi yang didasarkan dengan struktur kristalnya (Evans, 2013). Interaksi dua spin tergantung pada spin paralel atau antiparalel yang harus disesuaikan dengan prinsip larangan Pauli (*Pauli exclusion*) yaitu tidak diperkenankan ada dua elektron yang mempunyai bilangan kuantum yang sama pada tempat dan waktu yang sama (Cullity dan Graham, 2008). Menurut Peter (2004) untuk spin 1/2 sistem yang berputar mengandalkan *Heisenberg Hamilton Operator* dapat ditulis :

$$H_{ex} = -\sum_{ij} J_{ij} S_i S_j \quad (2.12)$$

dimana J_{ij} adalah denominasi integral *exchange* atau konstanta *exchange*, $S_i S_j$ adalah unit vektor dua spin atom yang berinteraksi. Karena *Heisenberg Hamilton Operator* adalah isotropik maka keadaan energi (*energy state*) tidak tergantung pada arah magnetisasi. Energi *exchange* seluruh volume bahan magnet dapat

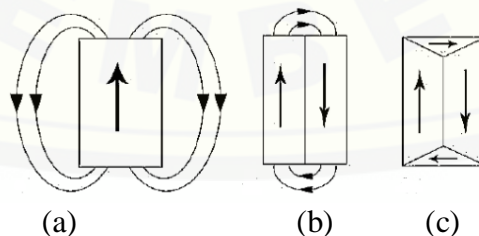
dituliskan

$$E_{ex} = \frac{1}{J_s^2} \int_v A_{ex} \left[(\nabla J_x)^2 + (\nabla J_y)^2 + (\nabla J_z)^2 \right] dV \quad (2.13)$$

dimana A_{ex} adalah konstanta *exchange stiffness* dan tergantung pada konstanta *exchange* J_{ij} . A_{ex} sedikit berbeda bila diukur sepanjang perbedaan arah kristalografi dari bahan. Energi *exchange* menjadi minimum jika semua spin sejajar satu sama lain.

2.5.2 Energi Magnetostatik

Energi magnetostatik material magnet bergantung pada magnetisasi M dan momen magnetik per volum, yang muncul dari penyelarasan dipol magnetik atom (Fudiss, 2010). Jika material terdiri dari satu domain (*single domain*) maka akan berperilaku sebagai magnet blok yang terlihat pada gambar 2.12(a) dan sebuah medan demagnetisasi (tanda panah) yang ada di sekitar blok. Bidang demagnetisasi eksternal ini memiliki energi magnetostatik yang bergantung pada bentuk sampel. Pada saat tersebut energi magnetostatik besar. Energi magnetostatik harus diminimalkan agar energi magnet total berkurang. Hal ini dapat dicapai dengan mengurangi medan demagnetisasi eksternal dengan membagi material ke dalam domain terlihat pada gambar 2.12(b). Penambahan domain tersebut dapat meningkatkan energi *exchange*, karena domain tidak dapat sejajar (*parallel*), namun akibatnya energi total menjadi berkurang. Energi magnetostatik dapat berkurang menjadi nol oleh struktur domain yang tidak meninggalkan medan demagnetisasi eksternal ditunjukkan gambar 2.12(c)



Gambar 2.12 Skema yang menunjukkan penambahan domain dapat mengurangi medan demagnetisasi eksternal sehingga mengurangi energi magnetostatik (Sumber: Mukhopadhyay, 2015)

Menurut Fudiss (2010) energi magnetostatik E_d , dianggap sebagai besarnya energi magnetisasi di dalam medan demagnetisasi, yang dijelaskan oleh

$$E_d = -\mu_0 \int_v \vec{M} \cdot \vec{H}_d dV = -\mu_0 \int_v \vec{M} \cdot \frac{\vec{H}}{2} dV = \frac{\mu_0}{2} M_s^2 \quad (2.14)$$

Dimana $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, \vec{M} adalah magnetisasi, M_s adalah magnetisasi saturasi dan H_d adalah medan demagnetisasi.

2.5.3 Energi *Magnetocrystalline* Anisotropi

Energi juga bergantung pada orientasi magnetisasi terhadap kristalografi sumbu material. Energi ini disebut energi *magnetocrystalline anisotropy*. Energi anisotropi pada dasarnya hasil dari interaksi spin-orbit. Jadi besarnya energi *magnetocrystalline anisotropi* tergantung pada karakteristik kristalografi dari bahan. Ada dua jenis *magnetocrystalline anisotropy* yakni anisotropi kubik (*cubic anisotropy*) dan anisotropi antarmuka (*interface anisotropy*).

a. Anisotropi Kubik

Anisotropi kubik bersifat magnetokristalin, dan timbul dari interaksi atom momen magnetik dengan simetri intrinsik area kristal melalui interaksi orbit spin, misalnya untuk besi dan nikel. Energi anisotropi kubik pada dasarnya ditunjukkan oleh

$$E_c = K_1(m_x^2 m_y^2 + m_x^2 m_z^2 + m_y^2 m_z^2) + K_2 m_x^2 m_y^2 m_z^2 \quad (2.15)$$

dimana m_x, m_y dan m_z adalah magnetisasi sepanjang sumbu kristal x, y, dan z. K_1 adalah konstanta anisotropi. pada suhu kamar, orde kedua dan orde tinggi lainnya dapat diabaikan (Fudiss, 2010).

b. Anisotropi Uniaksial

Menurut Bayreuther (2002) film magnetik dengan anisotropi uniaksial out-of-plane (sepanjang sumbu z), energinya simetris dalam bidang film. dengan bentuk kristal *hexagonal* dan *tetragonal*. Anisotropi volume uniaksial (K_u) dapat ditunjukkan oleh

$$E_v = K_{u1} \sin^2 \theta + K_{u2} \sin^4 \theta \quad (2.16)$$

dimana θ adalah sudut antara magnetisasi, K_{u1}, K_{u2} adalah konstanta anisotropi

per satuan unit volum (J/m^3) dan θ adalah sudut antara magnetisasi terhadap sumbu $-z$. Untuk $K_u > 0$, maka energi minimumnya pada $\theta = 0$ dan $\theta = \pi$. Hal ini menunjukkan bahwa sumbu mudah (*easy-axis*) sejajar dengan sumbu simetris dan dikenal sebagai *easy-axis-anisotropy* (Widodo, 2013).

2.5.4 Energi Zeeman

Energi Zeeman adalah energi yang berasal dari interaksi medan magnetisasi M (momen magnetik) dengan medan magnet eksternal. Besarnya energi Zeeman diberikan oleh:

$$E_z = \mu_0 \int \vec{M} \cdot \vec{H}_{Ext} dV \quad (2.17)$$

Dimana H_{ext} merupakan medan eksternal dan besar $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m^{-1}$. Nilai energi Zeeman akan terminimalisasi jika orientasi arah magnetisasi searah dengan arah medan yang diberikan (Widodo, 2013).

2.6 Konsep Mikromagnetik

Mikromagnetik digunakan untuk perhitungan distribusi magnetisasi pada bahan feromagnetik dan ferimagnetik (Miltat dan Donahue, 2007). Konsep ini dapat menjelaskan interaksi antara momen magnet, konfigurasi momen magnet dan energi sistem pada proses magnetisasi. Konsep dasar dari mikromagnetik dapat dijelaskan dengan teori kontinum, yaitu suatu konsep fisika yang digunakan untuk menjelaskan sistem gerak benda dengan menggunakan pendekatan mekanika klasik dengan sistem energi bersifat kontinu pada kondisi setimbang (Brown, 1963). Menurut Schrefl (1999) dalam sebuah teori kontinum arah momen magnetik dapat digambarkan dengan vektor polarisasi magnetik sebagai berikut

$$\vec{J}(\vec{r}) = \mu_0 \vec{M}(\vec{r}) = \mu_0 \vec{m}/V \quad (2.18)$$

Dimana J adalah polarisasi magnetik, yang sebanding dengan magnetisasi M yang diberikan oleh momen magnetik m per satuan volum V . μ_0 adalah permeabilitas magnetik vakum. Prinsip yang kedua dari mikromagnetik adalah adanya ketentuan mengenai polarisasi magnetik sebagai fungsi suhu

$$|\vec{J}| = J_s(T) \quad (2.19)$$

Dengan demikian keadaan magnetik dari sistem dapat dijelaskan oleh cosinus arah $\beta_i(\vec{r})$ dari polarisasi magnetik $\vec{J} = \beta_i J_s$ dalam keadaan setimbang, $\beta_i(\vec{r})$ meminimalkan total energi bebas Gibbs (*Gibbs free energy*) dari sistem. Total energi bebas Gibbs merupakan kontribusi yang berasal dari elektrodinamika, dan mekanika kuantum dapat ditulis dalam bentuk berikut

$$E_t = \int \left\{ -\frac{1}{2} \vec{H}_d \cdot \vec{J} + A \sum_{i=0}^3 (\nabla \beta_i)^2 - K_u (\vec{u} \cdot \vec{\beta})^2 - \vec{H}_{app} \cdot \vec{J} \right\} dV \quad (2.20)$$

Integral tersebut mencakup total volume semua partikel. A, K_u , dan u masing-masing menunjukkan konstanta *exchange*, konstanta anisotropi unaksial *magnetocrystalline* dan arah. H_{app} adalah bidang terapan sebagai akibat adanya minimalisasi energi Zeeman. Medan demagnetisasi H_d mengikuti dari adanya muatan volume magnetic $\nabla \cdot \vec{J}$ dan muatan permukaan magnetik $n \cdot \vec{J}$ (n menunjukkan vektor satuan). Persamaan (2.20) dikenal sebagai persamaan Brown. Persamaan ini diselesaikan untuk mengetahui distribusi magnetisasi bahan feromagnetik pada keadaan setimbang (Brown, 1963).

2.7 Dinamika Magnetisasi Spin

Tidak adanya penjelasan mengenai proses dinamika magnetisasi yang terjadi pada bahan feromagnetik saat menuju kesetimbangan magnetisasi di persamaan Brown membuat Landau dan Lifshitz (LL) memperkenalkan persamaan Landau dan Lifshitz (LL). Persamaan Landau-Lifshitz (LL) merupakan persamaan yang menjelaskan tentang gerak spin magnet yang digambarkan sebagai gerak rotasi dari momen magnet terhadap arah medan efektif (H_{eff}) pada saat kondisi ekuilibrium (Widodo, 2013). Meskipun awalnya persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) digunakan untuk menggambarkan dinamika magnetisasi makroskopik, persamaan standar LLG digunakan dalam mikromagnetik numerik yang menggambarkan dinamika unsur magnetik yang kecil (Evans *et al.*, 2013).

Menurut Widodo (2011) pada saat medan magnetik efektif H_{eff} dikenakan pada suatu momen magnetik \vec{m} , maka momen magnetik ini akan mengalami momen gaya $\vec{\tau}$ sedemikian hingga orientasi \vec{m} menjadi searah dengan H_{eff} . Momen gaya ini dinyatakan dengan

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{H}_{eff} \quad (2.21)$$

Sedangkan momen gaya juga bisa dinyatakan sebagai perubahan momentum sudut terhadap waktu

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad (2.22)$$

Dan menurut teori kuantum, hubungan antara momen magnetik dengan momentum sudut dinyatakan

$$\vec{m} = -\gamma\vec{L} \quad (2.23)$$

Dimana $\gamma = 2,11 \times 10^5 \text{ m A}^{-1}\text{s}^{-1}$ adalah nilai absolut dari gyromagnetic rasio untuk elektron, Sehingga persamaan momen gaya bisa

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\gamma\vec{m} \times \vec{H}_{eff} \quad (2.24)$$

Persamaan ini menyatakan presisi gyromagnetik dari suatu momen magnetik. Dengan asumsi bahwa spin momen magnet bergerak sepanjang elemen volume dV , maka persamaan (2.24) dapat ditulis menjadi

$$\frac{1}{dV} \frac{d\Sigma\vec{m}}{dt} = -\gamma \frac{d\Sigma\vec{m}}{dV} \times \vec{H}_{eff} \quad (2.25)$$

Dimana $\vec{M} = \frac{d\Sigma\vec{m}}{dV}$, sehingga persamaan di atas berubah menjadi

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma\vec{M} \times \vec{H}_{eff} \quad (2.26)$$

Menurut Schrefl *et al* (2006) untuk mendeskripsikan gerak momen magnetik menuju kesetimbangan maka keberadaan efek redaman perlu diperhitungkan dalam penghitungan medan H_{eff} . Efek redaman ini sebanding dengan kecepatan $\eta \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}$, dengan η adalah konstanta positif. Dengan melibatkan efek redaman

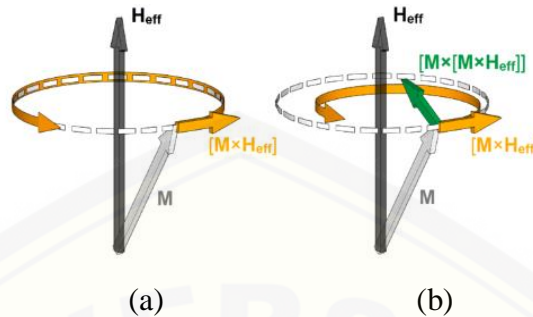
$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma\vec{M} \times \vec{H}_{eff} - \eta\gamma\vec{M} \times \vec{H}_{eff} \quad (2.27)$$

Dengan menyatakan $\eta\gamma$ sebagai konstanta redaman Gilbert α , bentuk lain dari persamaan gerak diatas adalah

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma\vec{M} \times \vec{H}_{eff} - \frac{\alpha}{M_s}\vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) \quad (2.28)$$

Disini M adalah magnetisasi, M_s adalah magnetisasi saturasi ($M \cdot M = M_s^2$), H_{eff} adalah medan magnet efektif. Persamaan (2.28) ini dikenal sebagai persamaan Landau-Lifshitz Gilbert (LLG). Suku pertama pada persamaan (2.28) menyatakan

bentuk gerak gyromagnetik dan suku kedua menyatakan bentuk redaman yang menyebabkan momen magnet bergerak kearah medan H .



Gambar 2.13 Gerak presisi dari momen magnet terhadap medan efektif. (a) tanpa radaman, (b) dengan menggunakan redaman (damping) (Sumber : Makarov, 2014)

2.8 Struktur Domain

2.8.1 Domain Tunggal (*Single Domain*)

Sifat magnet bahan-bahan feromagnetik sangat dipengaruhi oleh ukuran sel. Sel yang dipandang hanya memiliki dipol magnetik tunggal yang terisolasi yang disebut domain tunggal atau *single domain* (SD) (Mahardika, 2008). Partikel magnetik yang tetap dalam satu domain tunggal untuk semua medan magnet disebut partikel domain tunggal. Partikel ini sangat kecil (umumnya di bawah diameter mikrometer). Pada awal 1930 Frenkel dan Dorfman memperkirakan bahwa ada partikel yang cukup kecil yang memiliki satu domain. Pada tahun 1940an peningkatan perhitungan batas ukuran atas oleh Kittel dan Néel, dan perhitungan kurva magnetisasi untuk sistem partikel domain tunggal oleh Stoner dan Wohlfarth (Stoner dan Wohlfarth, 1948). Partikel ini berada dalam keadaan domain tunggal sepanjang siklus histeresis. Jika sebuah partikel dalam keadaan domain tunggal, semua magnetisasi internalnya menunjuk ke arah yang sama. Partikel yang merupakan domain tunggal di semua medan magnet mengubah keadaannya dengan rotasi magnetisasi yang menghasilkan koersivitas yang jauh lebih besar dibandingkan dengan jika memiliki lebih dari satu domain. Hal ini dikarenakan jika lebih dari satu domain magnetik, transisi antara satu domain dan tetangganya melibatkan rotasi magnetisasi untuk membentuk dinding domain. Dinding-dinding domain bergerak dengan mudah di dalam magnet dan memiliki

koersivitas rendah (Butler dan Banerjee, 1975).

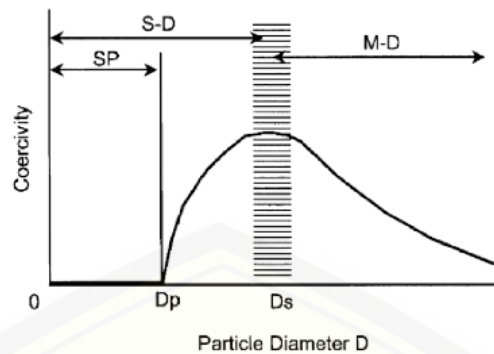
Teori yang paling banyak digunakan untuk histeresis dalam partikel domain tunggal adalah model Stoner-Wohlfarth. Ini berlaku untuk sebuah partikel dengan anisotropi magnetokristalin uniaksial (Stoner dan Wohlfarth, 1948). Berdasarkan pendekatan mikromagnetik, pada saat *single domain*, dimana keseluruhan momen magnet sejajar sumbu anisotropinya, maka kontribusi energi *exchange* dan energi anisotropi dari total energi sistem adalah nol. Satu-satunya energi yang relevan adalah energi magnetostatik. Sebuah partikel dengan struktur domain tunggal (*single domain*) sering disebut sebagai partikel Stoner-Wohlfarth (Mardona, 2012).

2.8.2 Domain Jamak (*Multi Domain*)

Kutub-kutub bebas pada permukaan *single domain* menghasilkan suatu energi magnetik yang bertambah dengan volume butir. Pada ukuran tertentu, energi tersebut menjadi cukup besar karena medan demagnetisasi yang cenderung memutar magnetisasi dengan cara mengurangi momen magnet total dan memecah magnetisasi menjadi beberapa domain yang dinamakan domain jamak atau *multi domain* (Mahardika, 2018). Pada keadaan ini, energi magnetostatik akan minimum, meskipun semua spin tidak sejajar, namun perubahan arah secara bertahap cukup kecil sehingga pengurangan dari energi magnetostatiknya itu lebih besar dibandingkan kenaikan energi *exchange* (Guimarães, 2009).

2.9 Diameter Kritis (*Critical Diameter*)

Diameter kritis (D_s) adalah wilayah yang menandai adanya perubahan dari domain tunggal (*single domain*) ke domain jamak (*multi domain*) seperti yang terlihat pada gambar berikut



Gambar 2.14 Skema perubahan nilai koersivitas pada partikel ferromagnetik dengan diameter (Sumber: Rao *et al.*, 2007)

Nilai dari diameter kritis D_s umumnya mulai dari 10 nm hingga melebihi 1000 nm. Diameter kritis untuk domain magnet D_s , yang merupakan diameter terbesar yang mungkin dimiliki oleh partikel ferromagnetik. Selbihnya akan memiliki energi yang lebih untuk membagi diri menjadi dua atau lebih domain. Menurut Widodo (2013) diameter kritis *single-domain* dipaparkan oleh Kittel dengan cara membandingkan energi yang diperlukan untuk membuat dinding domain terhadap pengurangan energi magnetostatik atau energi demagnetostatik selama penciptaan struktur domain. Kemudian, Brown, menghitung secara rinci batas ukuran diameter kritis untuk keadaan struktur *single-domain* dengan meninjau energi minimumnya dengan menggunakan persamaan

$$D_c = 7,211 \times I_{ex} \quad (2.29)$$

Menurut Naturalium (2006) nilai *exchange length* adalah

$$I_{ex} = \sqrt{\frac{A}{\mu_0 M_s^2}} \quad (2.30)$$

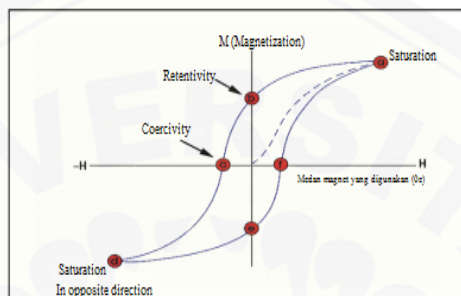
Diameter kritis untuk partikel *single domain* ini dapat ditunjukkan oleh persamaan berikut (Guimarães, 2009)

$$D_s = \frac{72\sqrt{AK}}{\mu_0 M_s^2} \quad (2.31)$$

Dimana A adalah konstanta exchange, K adalah konstanta anisotropi, M_s adalah magnetisasi saturasi, dan $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m⁻¹ adalah permeabilitas magnet dalam vakum.

2.10 Kurva Histeresis

Material ferromagnetik mempunyai karakteristik yang cukup berbeda dari material lainnya yaitu ketika material diberi medan luar (H), kurva yang terbentuk dapat berupa loop histeresis. Di bawah temperatur curie lebar kedua sisi loop histeresis sepanjang sumbu H disebut koersitivitas (c), sedangkan tinggi *loop* histeresis sepanjang sumbu M disebut remanensi (Livingston, 1981).



Gambar 2.15 Kurva Histeresis dari bahan ferromagnetik (Sumber: Livingston, 1981)

Intensitas magnet H diperbesar dari nol secara kontinu, maka harga M akan mengikuti lengkungan magnetisasi hingga mencapai H maksimum. Kemudian jika nilai H diperkecil, maka nilai M tidak mengikuti lengkungan magnetisasi semula, sehingga untuk nilai H yang sama, nilai permeabilitas ada dua. Walaupun intensitas magnet $H = 0$, nilai $M \neq 0$ (tetap ada). Untuk menghilangkan M , maka diperlukan intensitas magnet balik ($-H$) ke titik c . Jika intensitas magnet balik diperbesar, maka magnetisasi M akan berubah arah ($-M$) dan kembali ke titik awal (simetris) (Mardiyansyah, 2013).

Kurva histeresis adalah karakteristik kebergantungan magnetisasi terhadap medan eksternal H . Hasil pengukuran diperoleh informasi tentang medan saturasi, remanensi dan koersivitas yang berkaitan dengan sifat bahan dalam aplikasi medan magnetik dan medan listrik. Saturasi adalah magnetisasi bahan yang mengalami perubahan sekalipun medan koersivitas diperbesar (pada kondisi medan koersivitas tertentu magnetisasi bahan tidak berubah). Remanensi adalah magnetisasi sisa ketika medan eksternal magnetik ditiadakan ($H=0$). Koersivitas adalah ketahanan bahan magnetik untuk mengubah magnetisasinya (Livingstone, 1981). Sedangkan medan koersivitas adalah medan yang dibutuhkan untuk membuat magnetisasi remanen bernilai nol (Kotnala dan Shah, 2014). Menurut

Manaf (2013) hubungan medan koersivitas dengan polarisasi magnetik adalah

$$H_c = -J_s/2\mu_0 \quad (2.32)$$

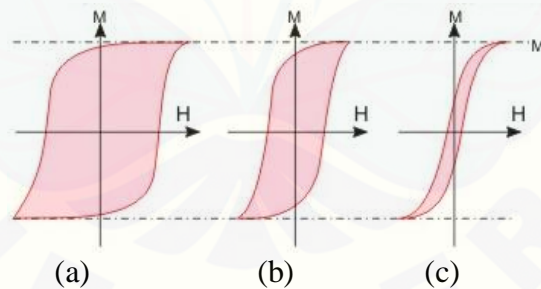
dengan :

H_c = medan magnet demagnetisasi (Oe), dan

J_s = polarisasi magnetik (Tesla).

Medan magnet demagnetisasi adalah medan yang dibutuhkan untuk menghilangkan medan magnet sisa (remanen) pada suatu benda secara serentak atau bergantian, antara mengurangi kuat medan dan membalik arah medan magnet setelah dilakukan magnetisasi pada benda tersebut.

Kurva histerisis dibedakan menjadi dua yaitu kurva histerisis *soft* magnetik dan *hard* magnetik material feromagnetik. Bahan magnetik lunak adalah bahan magnet yang mudah dimagnetisasi (demagnetized) sedangkan bahan magnetik permanen adalah bahan yang sulit dimagnetisasi. Bahan magnetik lunak menunjukkan *hysterisis loop* yang sempit ($H_c < 10$ Oe), sedangkan bahan magnetik permanen menunjukkan *hysterisis loop* yang luas dan memiliki koersivitas yang tinggi ($H_s > 100$ Oe), loop histerisis luas menunjukkan energi magnetik yang dapat disimpan dalam bahan (Chauhan, 2010) seperti yang ditunjukkan gambar 2.16

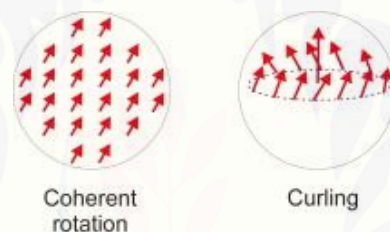


Gambar 2.16 Representasi kurva histeresis *hard* magnetik dan *soft* magnetik (Sumber : Feynman *et al.*, 1963)

Gambar 2.16(a) menunjukkan bahwa nilai magnetisasi M dan medan koersivitas besar yang sangat dibutuhkan untuk magnet permanen. Gambar 2.16(b) daerah loop histeresis terkait dengan jumlah disipasi energi setelah pembalikan medan untuk perekam magnetik. Gambar 2.16(c) magnetisasi besar dan medan koersivitas kecil dibutuhkan untuk transformator dan inti motor untuk meminimalkan energi disipasi dengan medan AC (Feynman *et al.*, 1963).

2.11 Mekanisme Pembalikan Magnetisasi

Mekanisme pembalikan magnetisasi terdapat dua model. Pertama, model rotasi koheren (*coherent rotation*) yaitu mekanisme pembalikannya terjadi secara seragam dan berputar bersama - sama. Model pembalikan ini terjadi pada partikel berstruktur *single-domain* atau yang dikenal sebagai partikel Stoner-Wohlfarth (Coey, 2009). Model Stoner Wolfarth mendeskripsikan kurva magnetisasi dari kumpulan partikel *single domain* dengan uniaxial anisotropi sebagai hasil dari bentuk partikel atau dari *magnetocrystalline anisotropy* (Morecroft, 2003). Kedua, model *curling* yaitu mekanisme pembalikan dimana spin-spin dari partikel membentuk struktur vortex. Model ini terjadi pada sebagian besar partikel magnetik berbentuk bola dengan diameter di atas diameter kritis (Widodo, 2013).



Gambar 2.17 Model mekanisme pembalikan magnetisasi (Sumber: Buschow, 2015)

2.12 *Microwave Assisted*

Gelombang mikro (*microwave*) adalah gelombang elektromagnetik dengan frekuensi super tinggi (Super High Frequency, SHF), yaitu 300MHz-300GHz. Teknologi *microwave* banyak digunakan untuk *point-to-point* telekomunikasi. Gelombang mikro digunakan dalam komunikasi pesawat ruang angkasa, TV, dan komunikasi telepon ditransmisikan jarak jauh dengan *microwave* antara stasiun bumi dan satelit komunikasi. Apabila gelombang mikro diserap oleh sebuah benda, akan muncul efek pemanasan pada benda tersebut. Aplikasi lain gelombang mikro adalah pemanfaatannya untuk radar. Radar digunakan untuk mencari dan menentukan jejak suatu benda dengan gelombang mikro dengan frekuensi sekitar 10^{10} Hz (Akdeniz, 2007).

Microwave Assisted Magnetic Recording (MAMR) dipatentkan oleh Rivkin, N.T.K.A. Sistem MAMR terdiri dari sebuah elemen yang menghasilkan sebuah *radio frequency assist magnetic field* dan sebuah medium perekam (Nozaki *et al.*,

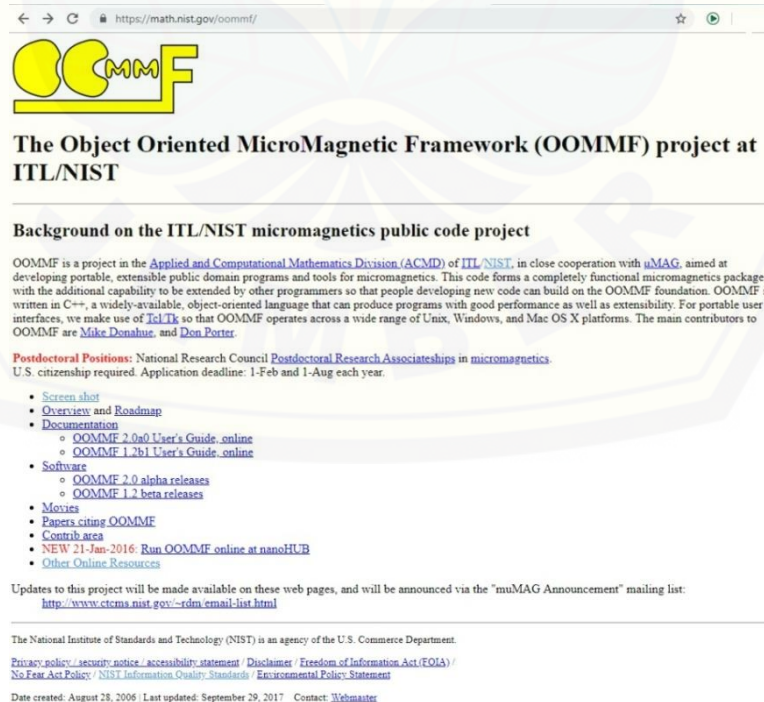
2006). Bahan mikromagnetik yang dipengaruhi *microwave assisted* pada kondisi awal akan digetarkan secara konstan oleh medan eksternal. Bahan yang bergetar tentu memiliki frekuensi. Jika medan eksternal berupa *microwave assisted* ini diterapkan pada bahan dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi bahan, kemudian bahan tersebut menyerap energi maka akan dihasilkan resonansi feromagnetik. Akibatnya adalah magnetisasi bahan akan bergetar pada sudut maksimal dan medan koersivitas yang akan terus berkurang (Li *et al.*, (2008).

2.13 Simulasi Mikromagnetik

Simulasi mikromagnetik dapat digunakan aplikasi sebagai berikut ini.

1. OOMMF (*Object Oriented Micromagnetic Framework*) menggunakan bangun persegi/kotak sebagai struktur bahan. Simulasi ini memiliki geometri bangun sejenis kotak/persegi. Bangun ini akan dijelaskan secara detail hingga tiap tepi/sisi bangun. Namun, memiliki kelemahan dalam hal simulasi geometri bangun sejenis lingkaran. Kelemahan ini disebabkan karena hasil dari simulasi memiliki nilai *error*

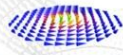
(<https://math.nist.gov/oommf/>)



Gambar 2.18 Simulasi mikromagnetik OOMMF (Sumber: NIST, 2001)

2. Nmag (Nanomagnetik) dimana memiliki skrip *Python* yang berjalan pada mesin virtual berbasis *Linux*. Beberapa keuntungan penting dari NMAG adalah: didasarkan pada metode elemen hingga, yang cocok untuk komputasi struktur non-kubus, deskripsi di *Python* memberikan tingkat fleksibilitas yang tinggi, penyimpanan data efisien karena kompresi biner, dan kemungkinan penggalan di *.vtk* file digunakan lebih lanjut untuk visualisasi. Penentuan ukuran dan bentuk struktur menggunakan Netgen yang berfungsi untuk membagi elemen generasi mesh. Visualisasi dari file *.vtk*, yang meliputi data magnetisasi dinamis, diolah menggunakan program Maya Vi. Mesh pertama dibuat dengan file geometri (*.geo*) yang berisi primitif untuk mengembangkan mesh yang diinginkan. File output dari Netgen adalah format *.neutral*, tetapi menggunakan perintah *nmeshimport* kami dikonversi ke dalam format file *.nmesh.h5* (Lefter dan Mihai, 2012) Metode ini perlu dibuat *mesh* untuk penentuan titik penting dalam susunan simulasi ini. *Mesh* ini ditentukan perbandingan ukuran yang sesuai antara bangun dengan penyusunnya (<http://nmag.soton.ac.uk/nmag>).

Not secure | nmag.soton.ac.uk/nmag/

 **Nmag**
Computational Micromagnetism

UNIVERSITY OF Southampton
School of Engineering Sciences

Nmag home

NMAG HOME

Pages

- Manual (pdf)
- Manual (one html file)
- nmag 0.2
- Manual (split html files)
- Wiki
- Download
- Mailing list

Nmag

Nmag is a micromagnetic simulation package. It has been developed at the University of Southampton with substantial contributions from Hans Fangohr, Thomas Fischbacher, Matteo Franchin. It is released under the [GNU GPL](#).

Features in brief:

- based on finite elements (suitable for non-cuboidal structures)
- problem description in Python, therefore high degree of flexibility
- inbuilt mesh post processing tools
- efficient data storage (binary compressed) and extraction into vtk files (of course the raw data can be extracted)
- arbitrary crystal anisotropy
- (pseudo) periodic boundary conditions ("macro geometry approach")
- Spin torque transfer (Zhang-Li model for uniform current density)
- Supports use of matrix compression library (HLIB) for BEM
- extensive documentation in [html](#) and [pdf](#), including Tutorial
- [download](#) as source tarball [with all libraries](#), or only [the core nmag code](#) (see [installation](#))

License and Disclaimer


This software was developed at the University of Southampton, United Kingdom. It is released under the GNU General Public License (GNU GPL) as published by the Free Software Foundation; either version 2, or (at your option) any later version.

Nmag is an experimental system. Neither the University of Southampton nor the authors assume any responsibility whatsoever for its use by other parties, and makes no guarantees, expressed or implied, about its quality, reliability, or any other characteristic.

The software is provided free and open source. However, there is no resource available to provide installation support, user support, bug fixes or extensions of functionality, and the default expectation should be that the software is provided as is.

News

- **30 January 2012**
Provision of Virtual Machine disk image (VMWare) providing a pre-compiled Nmag 0.2 ([read more](#)).
- **13 January 2012**
Release of [Nmag 0.2.1](#)
- **3 January 2012 to 6 January 2012**
Anticipated server downtime (due central infrastructure works)
- **December 2011**
Release of Nmag 0.2.0.
- **June 2009**
The Institute of Physics Magnetism Group uses the Nmag logo for their [group fiver](#).



Mailing list & Contact

[Searchable archives](#) of the nmag-users [mailing list](#).

Acknowledgement

The development of the Nmag tool has been financially supported by the [EPSRC](#), Grant GR/T09156/01, EP/E039944/1 (United Kingdom), the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under Grant Agreement no 233552, and the University of Southampton.

56180 visits to this page since 18 Sep 2006

Page last modified Thu Jan 26 14:36:43 2012. | Created with [rst2arch](#), and [reStructuredText](#) docutils.

Gambar 2.19 Simulasi mikromagnetik Nmag (Sumber: NIST, 2001)

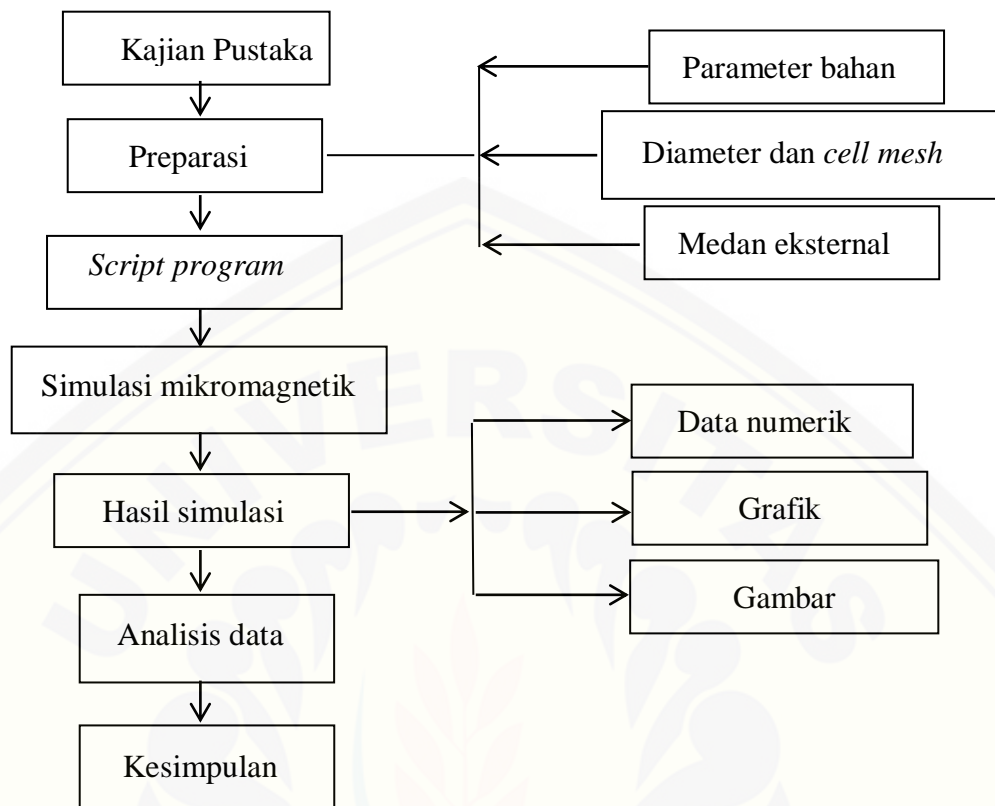
BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian yang dilakukan adalah menginvestigasi struktur domain dan penerapan pengaruh *microwave assisted* bahan *alloy* FePt menggunakan simulasi mikromagnetik. Penelitian ini diawali dengan mengkaji terlebih dahulu penelitian-penelitian sebelumnya dan mengumpulkan referensi dari berbagai sumber. Sehingga diperoleh informasi mengenai hal-hal yang diteliti untuk dibandingkan dengan hasil yang akan diperoleh.

Langkah selanjutnya adalah mempersiapkan parameter-parameter input, diameter dan *cell mesh* serta medan eksternal tambahan yang digunakan yakni *microwave assisted* dengan adanya variasi amplitudo dan frekuensi. Tahap ini disebut tahap preparasi. Parameter-parameter tersebut diperoleh dari penelitian sebelumnya yang kemudian dimasukkan ke dalam *script program*. Parameter tersebut berupa magnetisasi saturasi, konstanta *exchange*, konstanta anisotropi, dan faktor redaman. Kemudian hasil yang diperoleh mengenai struktur domain dan kurva histeresis. *Script program* tersebut kemudian *dirunning* menggunakan simulasi mikromagnetik OOMMF dan Nmag. File (x.ndt) diperoleh setelah *running* pada Nmag dan file (x.odt) diperoleh setelah *running* pada OOMMF.

Simulasi mikromagnetik ini menghasilkan data numerik, grafik, dan gambar. Data numerik berupa diameter struktur domain dan besar medan koersivitas akibat variasi *cell mesh*, diameter bahan serta pengaruh medan eksternal tambahan *microwave assisted* pada kurva histeresis. Grafik yang terbentuk berupa profil rapat energi struktur domain yang dipengaruhi oleh variasi diameter, serta profil energi yang dipengaruhi medan eksternal tambahan *microwave assisted*. Gambar yang dihasilkan berupa visualisasi struktur domain dalam keadaan *groundstate* dan pembalikan magnetisasi dalam keadaan diberi medan eksternal. Hasil penelitian dianalisis kemudian dijadikan dasar untuk membuat kesimpulan. Diagram alir dari rancangan penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir rancangan penelitian

Penelitian tersebut dilakukan di Laboratorium Fisika Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Penelitian ini dimulai dari Februari 2018 sampai Agustus 2018. Alat yang digunakan meliputi 1 set perangkat komputer dengan spesifikasi RAM 4GB, *processor* Intel® Core™ i3-3240 CPU @ 3,40GHzx4 dan tipe sistem 64 bit dengan sistem operasi *windows 7 ultimate* dan *linux ubuntu 12.10*. *Software* yang digunakan antara lain OOMMF, Nmag, Maya Vi, dan Origin Pro.

3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis penelitian yang dilakukan adalah simulasi terhadap bahan *alloy* FePt yang dianalisis struktur domain dan kurva histeresisnya. Data yang diperoleh dalam penelitian ini berupa data kuantitatif dari hasil analisis struktur domain berupa diameter kritis untuk memperoleh diameter struktur *single domain* dan *multi domain*, analisis kurva histeresis untuk memperoleh data pengaruh variasi

cell mesh, diameter bahan, frekuensi dan amplitudo terhadap medan koersivitas serta analisis pengaruh *microwave assisted* terhadap profil rapat energi yaitu energi total, energi demagnetisasi dan energi *exchange*. Sumber data input yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari Naturalium (2006) dan Kim (2016). Data yang digunakan diperoleh dari hasil penelitian yang sudah ada sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Parameter material alloy FePt untuk input data simulasi mikromagnetik

Bahan Alloy	M_s (A/m) ^{*[1]}	A (J/m) ^{*[1]}	K (J/m ³) ^{*[1]}	I_{ex} (nm) ^{*[1]}	α ^{*[2]}
Lapisan tipis FePt	$1,43 \times 10^6$	$1,03 \times 10^{-11}$	$6,6 \times 10^5$	2	0,05

Sumber : ^{*[1]}Naturalium (2006), ^{*[2]}Kim (2016).

3.3 Definisi Operasional Variabel

Variabel penelitian adalah segala sesuatu yang ditetapkan oleh peneliti sehingga diperoleh informasi tentang hal tersebut (Sugiyono, 2016). Variabel yang digunakan adalah variabel bebas (*independent variable*), variabel terikat (*dependent variable*), dan variabel kontrol (*control variable*).

3.3.1 Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas adalah variabel yang mempengaruhi atau yang menjadi sebab perubahannya atau timbulnya variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi diameter bahan untuk mengetahui struktur domain. Kemudian variasi *cell mesh*, diameter bahan, amplitudo dan frekuensi untuk mengetahui pengaruhnya terhadap medan koersivitas dalam kurva histeresis, serta grafik *microwave assisted* terhadap energi sistem untuk mengetahui pengaruhnya terhadap energi total, energi demagnetisasi dan energi *exchange* yang dihasilkan.

3.3.2 Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

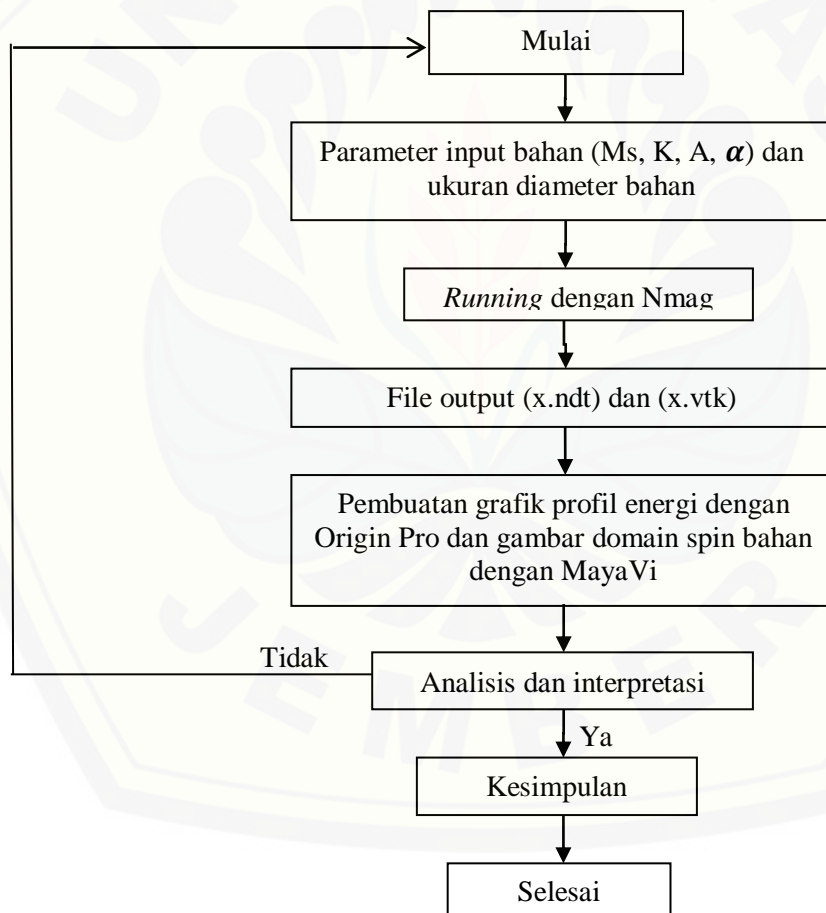
Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat karena adanya variabel bebas. Variabel terikat nya adalah struktur domain yang meliputi struktur *single domain* dan struktur *multi domain*, medan koersivitas dalam kurva histeresis, serta grafik energi total, energi demagnetisasi, dan energi *exchange* yang dipengaruhi *microwave assisted*.

3.3.3 Variabel Kontrol (*Control Variable*)

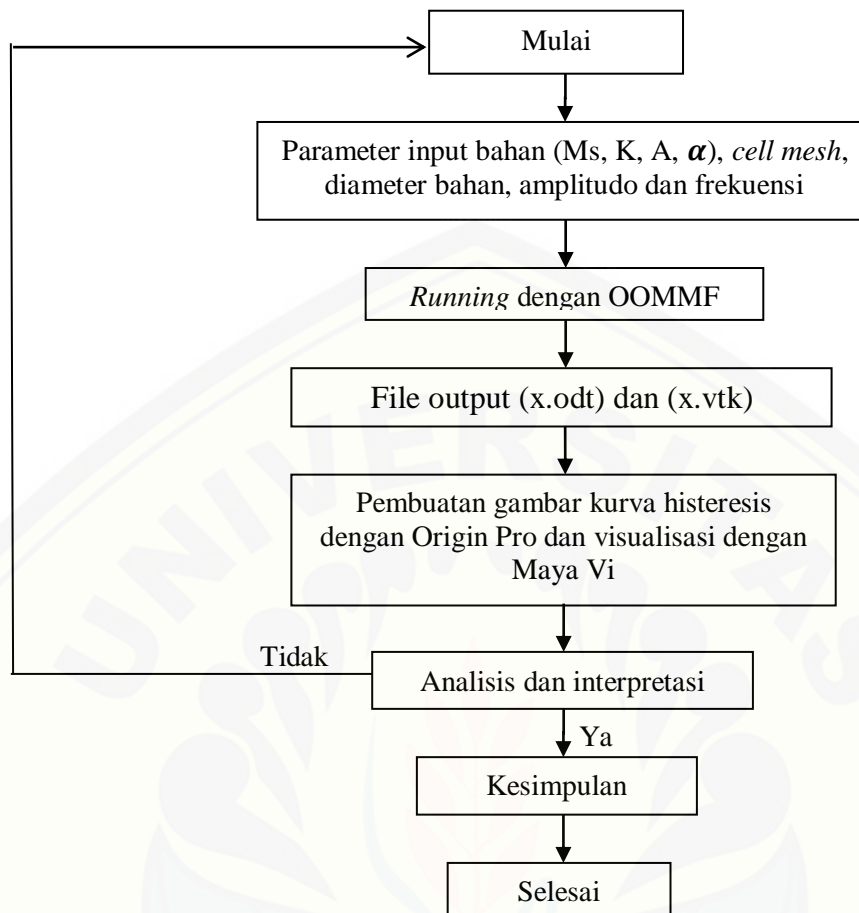
Variabel kontrol adalah variabel yang dibuat sama atau faktor lain diluar perlakuan yang dikenakan pada objek penelitian. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah struktur kristal yang digunakan FCT (*Face Centered Tetragonal*) yang beranisotropi uniaxial, dan faktor redaman $a = 0,05$.

3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

Penelitian yang telah dilakukan secara umum digambarkan dalam diagram alir penelitian seperti pada gambar 3.2(a) dan 3.2(b)



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian untuk menentukan struktur domain



Gambar 3.3 Diagram alir penelitian untuk pembuatan kurva histeresis

3.5 Prosedur Kerja

Penelitian ini dilakukan menggunakan *software* berlisensi *public* yaitu NMAG (*Nano Magnetic*) yang dapat dijalankan pada sistem operasi GNU/Linux dan OOMMF (*Object Oriented Micromagnetic Framework*) yang dapat dijalankan pada sistem operasi Windows. *Software* lainnya adalah Maya Vi dan Origin Pro yang digunakan untuk visualisasi setiap simulasi yang digunakan. Kedua simulasi mikromagnetik ini dapat digunakan untuk menganalisa penelitian mengenai struktur domain dan pengaruh medan eksternal tambahan *microwave assisted* terhadap bahan *alloy* FePt.

Langkah pertama yang dilakukan adalah kajian pustaka sebagai dasar untuk kajian teori. Kajian teori tersebut memuat mengenai parameter-parameter input bahan yang dibutuhkan untuk memulai simulasi. Parameter-parameter bahan

tersebut antara lain magnetisasi saturasi, konstanta anisotropi, konstanta *exchange*, dan faktor redaman (*damping* LLG).

Parameter yang digunakan untuk menentukan struktur domain dengan memvariasi diameter bahan *alloy* FePt kemudian *dirunning* menggunakan *software* Nmag yang menghasilkan data output (x.ndt) dan (x.vtk). Output (x.ndt) digunakan untuk membuat grafik profil rapat energi pada *software* Origin Pro yaitu energi demagnetisasi, energi total, dan energi *exchange*. Output (x.vtk) digunakan untuk visualisasi domain bahan pada *software* Maya Vi yang menggambarkan struktur domain pada diameter tertentu. Kemudian dianalisis dan interpretasi diameter yang termasuk *single domain* dan *multi domain*. Namun jika tidak sesuai dengan teori atau jauh dari analisa maka dimulai dari awal. Hasil analisa tersebut kemudian disimpulkan.

Langkah selanjutnya adalah mengamati pengaruh penerapan *microwave assisted* dalam kurva histeresis dengan memvariasi nilai *cell mesh*, diameter bahan, amplitudo dan frekuensi. Parameter-parameter input *dirunning* menggunakan *software* OOMMF yang menghasilkan data output (x.odt) dan (x.vtk). Output (x.odt) digunakan untuk pembentukan kurva histeresis pada *software* Origin Pro. Sedangkan (x.vtk) digunakan untuk visualisasi kurva histeresis pada *software* Maya Vi yang memberi gambaran adanya pembalikan magnetisasi. Kemudian hasil dianalisis dan interpretasi pengaruh adanya medan medan eksternal tambahan *microwave assisted* dalam kurva histeresis dan profil rapat energi yang meliputi energi total, energi demagnetisasi dan energi *exchange*. Namun jika tidak mengalami perubahan maka dimulai dari awal. Hasil analisa tersebut kemudian disimpulkan.

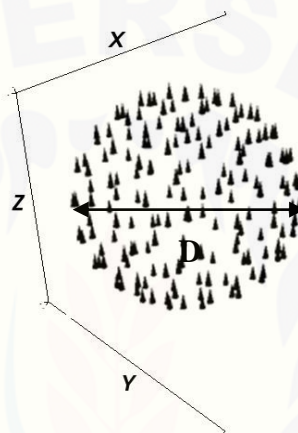
3.6 Analisis Data

Analisis data yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

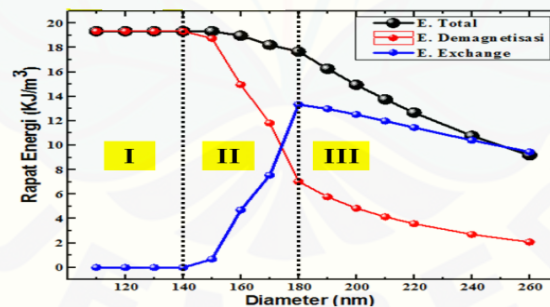
3.6.1 Analisis pengaruh variasi diameter bahan terhadap struktur domain bahan *alloy* FePt

Penelitian ini menghasilkan struktur domain dengan memvariasi nilai diameter. Simulasi ini dilakukan pada 15 diameter bahan yaitu sebesar 10 nm, 12

nm, 14 nm, 15 nm, 16 nm, 18 nm, 20 nm, 22 nm, 24 nm, 26 nm, 28 nm, 30 nm, 32 nm, 34 nm, dan 36 nm. Simulasi mikromagnetik dijalankan dengan program Nmag yang menghasilkan *ouput* file (x.ndt) dan (x.vtk). File (.vtk) digunakan untuk visualisasi struktur domain yang dianalisis dengan menggunakan *software* Maya Vi seperti yang terlihat pada gambar 3.4. File (x.ndt) digunakan untuk membuat kurva profil rapat energi terhadap variasi diameter meliputi energi total, energi demagnetisasi, energi *exchange* menggunakan *software* Origin Pro seperti yang terlihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.4 Struktur domain yang dipengaruhi oleh variasi diameter

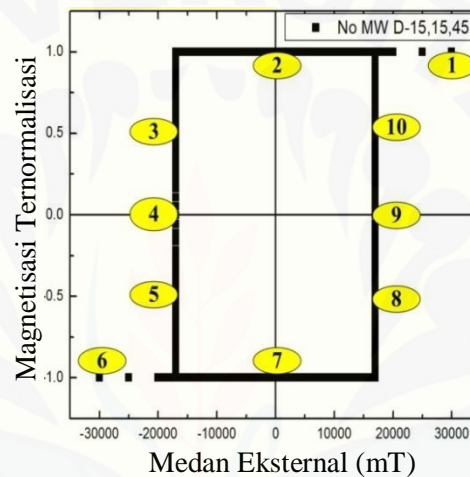


Gambar 3.5 Grafik pengaruh variasi diameter terhadap rapat energi (Sumber: Nagara, 2016)

Diameter kritis hasil simulasi dianalisis terhadap hasil perhitungan menurut teori Brown sebesar 14,422 nm. Diameter kritis ini ditandai dengan munculnya spin tidak sejajar yang merupakan transisi dari *single domain* menuju *multi domain*. Hal ini diperkuat dengan adanya grafik profil rapat energi terhadap variasi diameter. Energi demagnetisasi mendominasi struktur *single domain* dan energi *exchange* mendominasi struktur *multi domain*.

3.6.2 Analisis pengaruh *cell mesh*, diameter bahan dan *microwave assisted* terhadap medan koersivitas dalam kurva histeresis

Kurva histeresis dibentuk menggunakan input data dari file (x.odt) hasil *ruuning* OOMMF pada kolom O atau urutan ke 15 yang merupakan $Oxs_UZeeman::Bz$ sebagai sumbu x dan kolom V atau urutan ke 22 yang merupakan $Oxs_TimeDriver::magnetization$ sebagai sumbu y pada *software* Origin Pro. Simulasi ini menggunakan variasi *cell mesh* 1 nm, 1,5 nm, dan 2 nm, diameter geometri 12 nm, 18 nm, dan 24 nm, amplitudo 10 mT dan 1000 mT serta frekuensi 1,2 GHz dan 120 GHz.



Gambar 3.6 Kurva histeresis perubahan medan eksternal (H_z) terhadap magnetisasi ternormalisasi (Sumber: Nagara, 2016)

Nilai medan koersivitas (H_c) diperoleh dari unsur kurva histeresis dengan persamaan

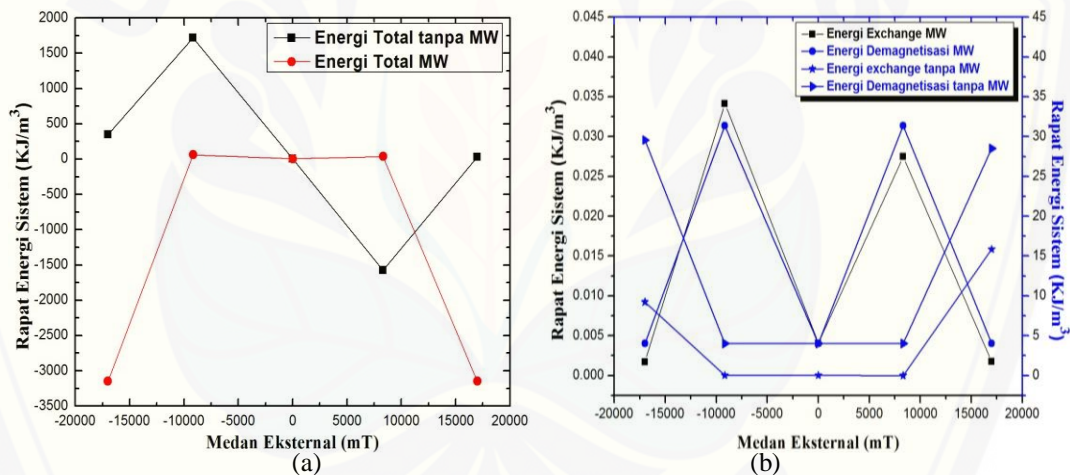
$$H_c = \frac{(H_x \text{ terbesar} - H_x \text{ terkecil}) \text{ pada posisi sumbu } y=0}{2} \quad (3.1)$$

Analisis pada kurva histeresis ini menunjukkan adanya perubahan medan koersivitas seiring bertambahnya ukuran *cell mesh* dan diameter bahan yang digunakan. Hasil simulasi dianalisis berdasarkan persamaan magnetisasi 2.7 dimana kerapatan momen magnet berbanding lurus dengan magnetisasi, sedangkan volume berbanding terbalik dengan magnetisasi. Kurva histeresis ini juga memberikan informasi pengaruh *microwave assisted* terhadap medan koersivitas dimana penambahan nilai amplitudo dan frekuensi menyebabkan

medan koersivitas menurun. Medan koersivitas menjadi tempat pembalikan magnetisasi baik pembalikan magnetisasi model rotasi koheren maupun model *curling*. Penerapan medan eksternal tambahan *microwave assisted* menyebabkan pembalikan magnetisasi bekerja dengan cepat apabila dibandingkan dengan tanpa medan eksternal tambahan

3.6.3 Analisis grafik pengaruh *microwave assisted* terhadap energi total, energi demagnetisasi dan energi *exchange*

Ouput file (x.odt) juga digunakan untuk menentukan pengaruh *microwave assisted* diinvestigasi berdasarkan perbandingan rapat energi yang digunakan antara menggunakan medan eksternal tambahan *microwave assisted* dan tanpa *microwave assisted* terhadap medan eksternal.



Gambar 3.7 Grafik rapat energi sistem terhadap variasi medan eksternal menggunakan *microwave assisted* dan tanpa *microwave assisted* (a) energi total, (b) energi *exchange* dan demagnetisasi (Sumber: Nagara, 2016)

Analisa pengaruh medan eksternal terhadap energi total, energi demagnetisasi dan energi *exchange* menunjukkan bahwa energi total bernilai negatif pada medan eksternal yang melebihi nilai medan koersivitasnya, energi demagnetisasi memiliki nilai yang rendah sedangkan energi *exchange* memiliki nilai tinggi tepat pada medan koersivitasnya. Selisih energi dalam keadaan tanpa menggunakan *microwave assisted* dan dengan menggunakan *microwave assisted* digunakan untuk melakukan pembalikan magnetisasi.

BAB 5. PENUTUP

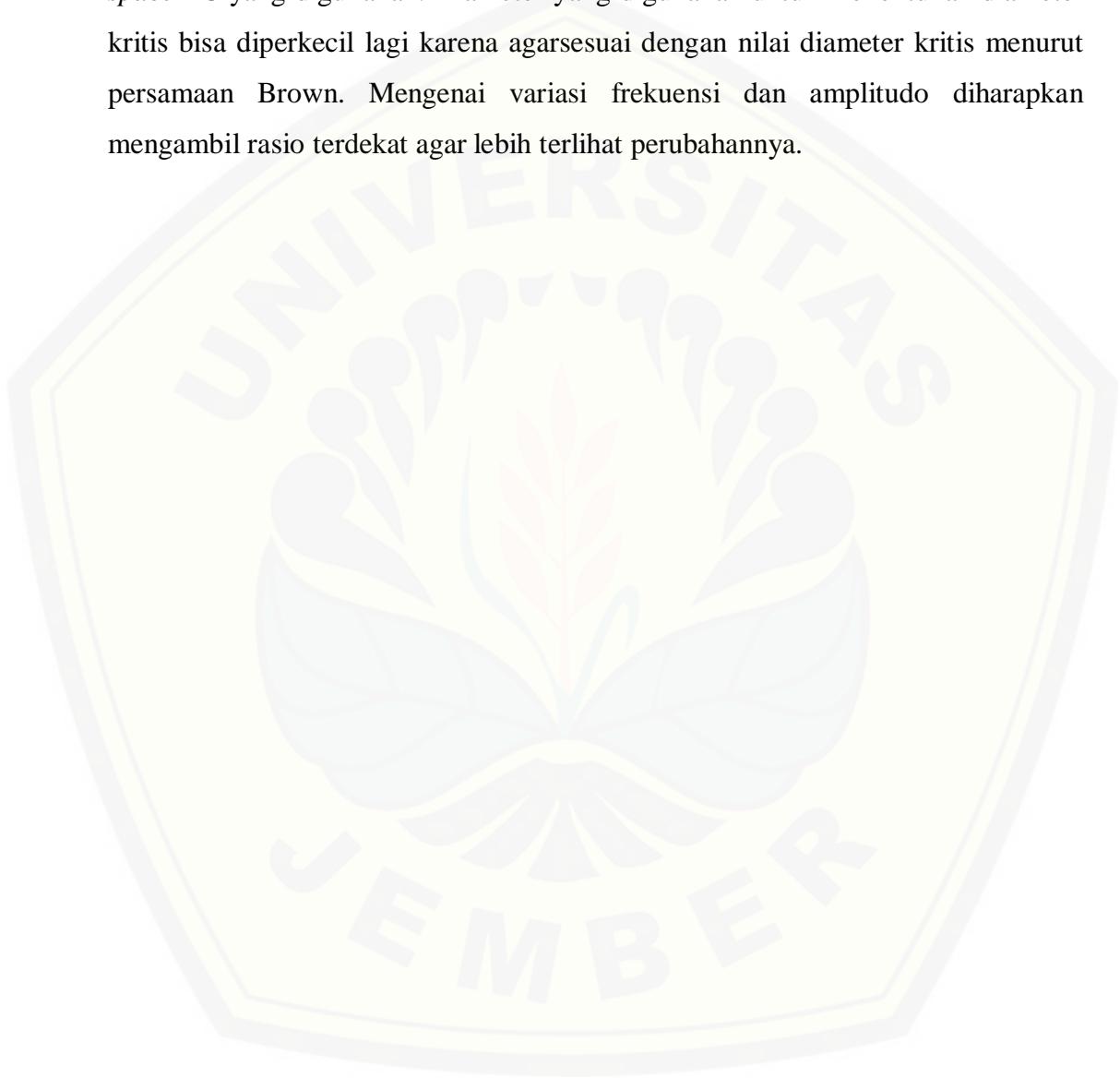
5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian mengenai investigasi struktur domain dan pengaruh penerapan *microwave assisted* terhadap bahan *alloy* FePt menggunakan simulasi mikromagnetik adalah

1. Besarnya diameter kritis bahan *alloy* FePt berbentuk *sphere* adalah 15 nm. Struktur *single domain* terletak pada diameter 10 nm – 14 nm sedangkan struktur *multi domain* terletak pada diameter 16 nm – 36 nm. Hal ini diperkuat oleh adanya profil rapat energi yang ada dimana energi total, energi *exchange* dan energi demagnetisasi yang mengalami perubahan seiring bertambahnya diameter.
2. Variasi *cell mesh*, diameter bahan, amplitudo dan frekuensi berpengaruh terhadap medan koersivitas yang terbentuk dalam kurva histeresis. Penambahan ukuran *cell mesh*, diameter bahan, amplitudo dan frekuensi menyebabkan medan koersivitas menjadi menurun yang dibuktikan dengan semakin menipisnya kurva histeresis.
3. Pengaruh *microwave assisted* terhadap energi total, energi demagnetisasi dan energi *exchange* menunjukkan bahwa energi total bernilai negatif untuk medan eksternal yang melebihi medan koersivitasnya Hal ini terjadi pada saat pembentukan saturasi dengan struktur domain yang terbentuk yakni *single domain*. Energi demagnetisasi memiliki nilai yang rendah dan energi *exchange* memiliki nilai tinggi tepat pada medan koersivitasnya. Hal ini disebabkan di medan koersivitas terjadi pembalikan magnetisasi Dihasilkan selisih yang cukup besar antara dalam keadaan tanpa *microwave assisted* dan dengan menggunakan *microwave assisted*. Selisih energi inilah yang digunakan oleh *microwave assisted* untuk membantu bahan *alloy* FePt melakukan pembalikan magnetisasi lebih cepat dan mudah.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu perlu melakukan observasi terlebih dahulu terkait ukuran sel yang akan digunakan. Observasi ini bertujuan agar simulasi yang dilakukan tidak terhambat oleh lamanya *running* dan *memory space* PC yang digunakan. Diameter yang digunakan untuk menentukan diameter kritis bisa diperkecil lagi karena agarsesuai dengan nilai diameter kritis menurut persamaan Brown. Mengenai variasi frekuensi dan amplitudo diharapkan mengambil rasio terdekat agar lebih terlihat perubahannya.



DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah. Mikrajuddin. 2012. *Pengantar Nanoteknologi*. Bandung : Institut Teknologi Bandung.
- Akdeniz, Y. dan S, Ulku. 2007. Microwave effect on ion-exchange and structure of clinoptilolite. *Jurnal Porous*.14(1): 55–60.
- Alberto P. Guimarães. 2009. *Principles of Nanomagnetism*. Rio de Janeiro : Springer.
- Bayreuther, G., M. Zolfl, dan D. Weiss. 2001. *Magnetocrystalline volume and interface anisotropies in epitaxial films: Universal relation and Ne'el's model*. Germany : Springer.
- Brown, W. F. 1963. *Micromagnetism*. New York: John Wiley & Sons, Inc
- Buschow, J. 2015. *Supermagnetism Handbook of Magnetic Materials*. Netherland: North Holland.
- Butler, F. Robert, S. K Banerjee,. 1975. Theoretical single-domain grain size range in magnetite and titanomagnetite. *Jurnal Geophysical Research*. 80(29): 4049-4058.
- Chauhan, P. 2010. *Preparation and Characterization of Barium Heksaferit by Barium Hexaferrite by Barium Monoferrite*. Punjab: Thapal University Patiala
- Coey, J.M 2009. *Magnetism and Magnetic Materials*. United States of America: Cambridge University Press.
- Cullity, B.D. dan C.D, Graham. 2008. *Introduction to Magnetic Materials Second Edition*. New Jersey : IEEE Press&Wiley.
- Dobisz, E.A. 2008. Patterned media: Nanofabrication challenges of future disk drives. *Proceedings of the IEEE*.96(11).
- Evans, R. F. L. 2008. Atomistic Modeling of Nanogranular Magnetic Materials. *Tesis*. England : University of York.
- Evans, R. F. L., W. J. Fan, P. Chuureemart, T. A. Ostler, M. O. A. Ellis, dan R. W. Chantrell. 2013. Atomistic Spin Model Simulations of Magnetic Nanomaterials. *Jurnal of Physics : Condens Matter*. 26 (10) 103202.

- Fudis, D. 2010. *Magnetization Reserval Dynamic in Magnetically Couple Trilayer System*. Universitat Berlin: Dini.
- Gnida, M. 2018. Combining X-ray and electron data from two cutting-edge SLAC instruments, researchers observe the rapid atomic response of iron-platinum nanoparticles to light, which could help control future magnetic data storage devices. *Journal National Accelerator Laboratory*.
- Guimarães, A.P. 2009. *Principles of Nanomagnetism*. Rio de Janeiro: Springer.
- Hasan. 2008. Studi Sifat Magnetik Alloy Fe₉₇-xSi₃Al_x (x=4.5 dan 6% at). *Tesis*. Depok: FMIPA Universitas Indonesia.
- Herde, H. 2013. *Phase Transitions in Iron-Platinum*. Los Angeles: University of California
- Ida, N. 2004. *Engineering Electromagnetics Second Edition*. USA: Springer
- Jiles, DC. 1998. *Introduction to Magnetism and magnetic Materials*. Boca Raton: CRC Press.
- John, J. dan Soo Yi, K. 2009. *Solid State Physics*. New York: Springer.
- Kim, S. H, J. W. Hwang, dan H. L Sim. 2016. Relaxation Effects of Magnetization Modulus and Precession Axis on Damping Time of Precession in L10-Ordered FePt Alloy Film. *Journal of Korea: Current Applied Physics*. 17(7): 1009-1013.
- Kotnala. R. K dan J. Shah. 2014. Ferrite Materials: Nano to Spintronics Regime. *Journal Handbook of Magnetism Materials*. 23: 293-370.
- Lefter dan Mihai Dimian. 2012. *Micromagnetic analysis of magnetization behavior in Permalloy nanoparticles for data storage applications*. Suceava: Stefan cel Mare University.
- Li, P., X. Yang, dan X. Cheng. 2008. *Micromagnetic Simulation of Microwave Assisted Switching in Ni₈₀Fe₂₀ Thin Film Element*. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology.
- Livingston, J. D., 1981. *Physics Status Solidi*. New York : Churchill

- Mahardika, P. 2008. Kajian Sifat Magnetik Magnetit (Fe_3O_4) Hasil Penumbuhan Dengan Metode Presipitasi Berbahan Dasar Pasir Besi. *Skripsi*. Bandung: Fisika, FMIPA, ITB.
- Makarov, A. 2014. Modeling of Emerging Resistive Switching Based Memory Cells. *Thesis*. Wien : Technischen Universitat Wien.
- Malventano, A. 2017. *Western Digital MAMR Tech Pushes Future HDDs Beyond 40 TB*. California: Western Digital.
- Mangonon, P.L. 1999. *The Principles of Materials Selection for Engineering Design*. USA: Prentice Hall.
- Mardiansyah, D. 2013. Analisa Sifat Feromagnetik Material Menggunakan Metode Monte Carlo. *Jurnal Pekanbaru*.2(2): 65-74.
- Mardona. 2012. Dinamika Domain Wall dan Efek Anisotropi pada Material Feromagnet Co dan Ni Berbentuk Nanowire. *Tesis*. Jakarta: Universitas Jakarta.
- Mathias Getzlaff. 2008. *Fundamentals of Magnetism*. Verlag Berlin Heidelberg : Springer.
- Miltat, J. E. dan M. J. Donahue. 2007. *Numerical Micromagnetism: Finite Difference Method*. USA: NIST University.
- Muhammady, S., Suharyana, dan B. Purnama. 2012. Kajian Simulasi Mikromagnetik Ketergantungan Tipe-nukleasi Magnetisasi Reversal terhadap Waktu pada Nano Dot Permalloy. *Indonesian Journal of Applied Physics* 2 (2): 2089 – 0133.
- Mukhopadhyay, Ankan. 2015. Measurement of Magnetic Hysteresis Loops in Continuous and Patterned Ferromagnetic Nanostructures by Static Magneto-Optical Kerr Effect Magnetometer. *Proceeding*. Guwahati: Indian Institute of Technology.
- Myung, N. V., D. Y. Park, M. Schwartz, K. Nobe, H. Yang, C. K. Yang, dan J. W. Judy. 2000. Electrodeposited Hard Magnetic Thin Films for MEMS Applications. *Jurnal Sixth International Symposium on Magnetic Materials, Processes and Devices, Proc. Electrochem. Soc.* 29: 506, ISBN: 1-56677-296- 6.

- Nabok, A. 2000. *Organic and Inorganic Nanostructures*. England : Sheffield Hallam University.
- Nagara, B. 2016. Investigasi Sifat-Sifat Magnetik Bahan CoPd dan Pengaruh Penerapan Microwave Assisted Menggunakan Simulasi Mikromagnetik. *Skripsi*. Jember : Fisika FMIPA Universitas Jember.
- Nakatani, Y., A. Thiaville, dan J. Miltat. 2005. Head To Head Domain Wall in Soft Nanostrips. *Journal IEEE Trans. Magn.* 33:4167.
- Naturalium, Rerum. 2006. Nanocrystalline Fe-Pt alloys : phase Transformations, Structure and Magnetism. *Disertasi*. Rusland : Magister der Physik Julia Vladimirovna Lyubina.
- Nozaki, N., Miyake, T.; K. Uchitomi; M. Y. Zhang; I. Kono; H. Sammoto dan K. Inagaki. 2006. Effect of The Principal Nutrients on Lovastatin Production by *Monascus pilosus*. *Jurnal Bioscience Biotechnology Biochemistry* Vol 70 (5): 1154 – 1159.
- Puri, R.K dan V.K Babbar. 1997. *Solid State Physics*. New Delhi: S Chand Limited.
- Prof. R.P. Feynman. 1963. *Lecture on Physics*. California : California Institute of Technology.
- Rahmatun, Aini. 2012. Kajian Model Ising 2 Dimensi untuk Bahan Antiferromagnetik. *Skripsi*. Yogyakarta : Universitas Negeri Yogyakarta.
- Rao, C., P. Thomas, dan J. Kulkarni. 2007. *Nanocrystals: Synthesis, Properties and Application*. New York: Springer.
- Schryer, N.L dan Walker, L.R. 1974. The motion of 180 domain wall in uniform dc magnetic fields, *Jurnal. Appl. Phys.* 45:5406.
- Schrefl, T., W Scholz, J. Fidler, dan D Suess. 1999. *Micromagnetic Simulation and Application*. Austria : Viena University of Technology.
- Schrefl, T., J. Fidler, dan J. Dean 2006. *Multiscale Micromagnetic Simulation of Giant Magnetoresistance Read Heads*. Austria : Viena University of Technology.

- Singh, Jasprit. 2003. *Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology*. Cambridge : University Press.
- Speckmayer, Peter. 2004. *Electron Microscopy and Micromagnetic Simulation of FePt and CoPt Nanoparticles*. Wien : Technischen Universitat Wien.
- Souca RC, dan Prejbeanu IL. 2005. *Forty-ninth Annual Conference On Jurnal. Magnetism And Magnetic Material*. Florida : Jacksonville.
- Stoner, E. C. dan E. P ,Wohlfarth. 1948. A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys. *Journal Material Sciences and Applications*. 6(12): 240, 599.
- Sugiyono. 2016. *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Bandung: PT Alfabet.
- Sun, S, C. B. Murray, D. Weller, L. Folks dan A. Moser. 2000. Monodisperse FePt Nanoparticles and Ferromagnetic FePt Nanocrystal Superlattice. *Journal Science*. 287(5460): 1989-1992.
- The National Institute of Standards and Technology (NIST). 2001. *OOMMF Screenshot*. US: Commerce Department.
- Tjia, M. 1987. *Materi Pokok Fisika Zat Padat*. Jakarta: Universitas Terbuka.
- Tudu, B dan Tiwari, A. 2017. *Recent Developments in Perpendicular Magnetic Anisotropy Thin Films for Data Storage Applications*. US : University of Utah.
- Lacovaci, V., G. Lucarini, I. Ricotti dan A. Menciassi. 2016. *Magnetic Field-Based Technologies For Lab-On-a-Chip Application*. Italy : Intech.
- Wibowo,N A. 2011. Simulasi Mikromagnetik Mode Magnetisasi Reversal Berbantuan Panas Pada Nanodot Magnetik Beranisotropi Tegak Lurus Dengan Menyelesaikan Persamaan LLG. *Tesis*.Surakarta : Universitas Sebelas Maret.
- Wibowo,N. A., A.M, Kukuh dan M. A Waluyo. 2014. Pengaruh Redaman Gilbert Terhadap Pola Pembalikan Magnetisasi Bahan Ferromagnetik Kuat Cobaltplatinum-Chromium Pada Suhu Ruang. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Pendidikan Sains IX*. 5(1). ISSN :2087-0922
- Widodo, T. A. 2013. Studi Mikromagnetik Dinamika Struktur Domain pada

Material Feromagnetik Py, Ni, Fe, dan Co Model Nanosphere. *Tesis*. Depok: Universitas Indonesia.

Wahyudi, E Nur. 2005. *Mengenal Hard Disk Lebih Dekat*. Semarang : Universitas Stikubank.

Xing, Y. T., I. Barb, R. Gerritsma, R. J. C. Spreeuw, H. Luigjes, Q. F. Xiao, C. Retif, dan J. B. Goedkoop. 2006. Fabrication of magnetic atom chips based on FePt. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 313: 192–197.

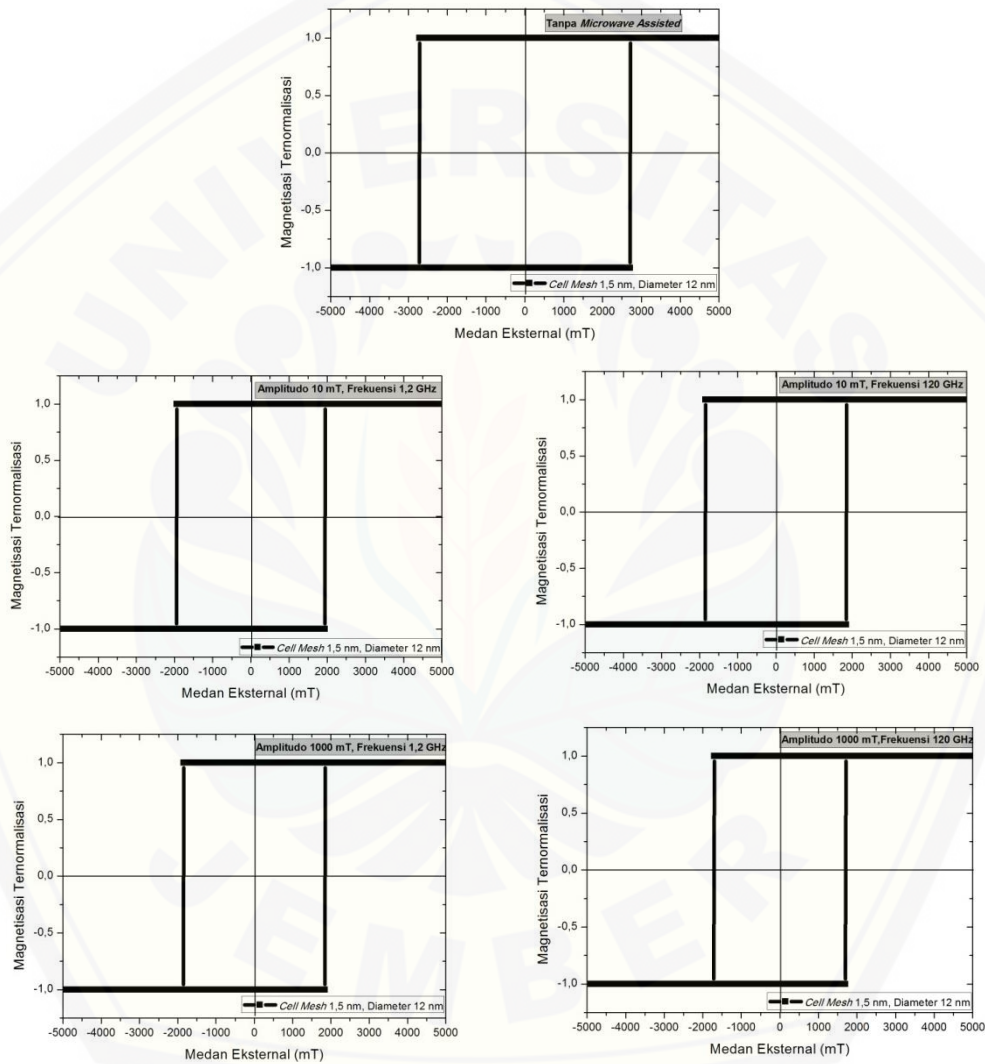
Xing Zhao, L.H Huo, dan X.L Cheng. 2011. *L10 FePt (001) Thin Films for Perpendicular Magnetic Recording Media*. Singapore : Nanyang Technological University.

Z. Yaying. 2003. *Magnetic Simulation on Advanced Recording Media*. Singapore: Department of Electrical and Computer Engineering, National University.

Lampiran 4.2 Kurva Histeresis Pengaruh Penerapan *Microwave Assisted* dan Pembalikan Magnetisasi

a. Kurva Histeresis

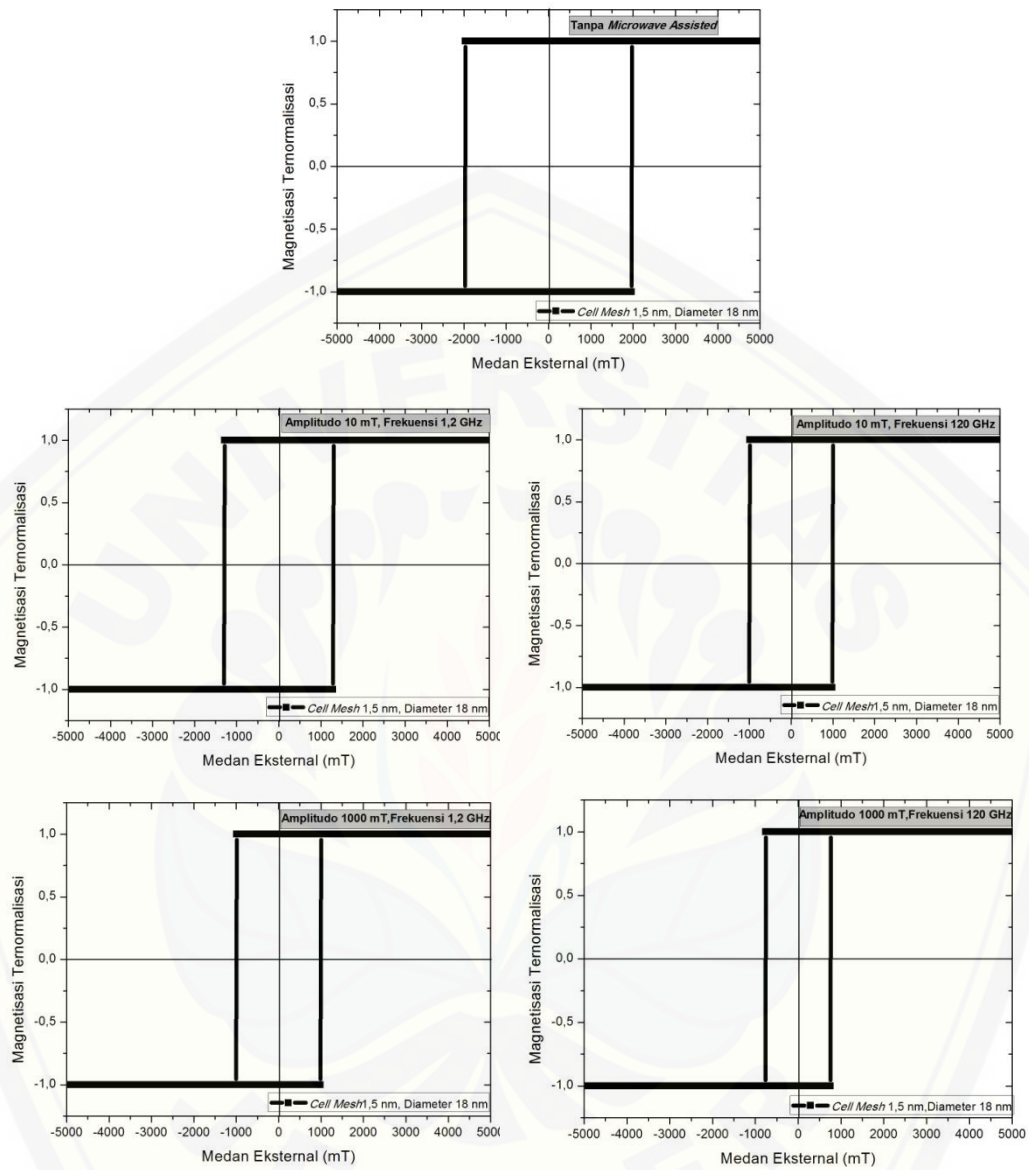
1. Bahan dengan *cell mesh* 1,5 nm dan diameter 12 nm



Tabel 4.10 Medan koersivitas pada *cell mesh* 1,5 nm dan diameter 12 nm

<i>Microwave Assisted</i>	Medan Koersivitas H_c (mT)	Magnetisasi Ternormalisasi
0	2720	0,99994
$A_1=10$ mT, $F_1=1,2$ GHz	1950	0,999938528571279
$A_1=10$ mT, $F_2=120$ GHz	1850	0,999937545299468
$A_2=1000$ mT, $F_1=1,2$ GHz	1850	0,999937545299468
$A_2=1000$ mT, $F_2=120$ GHz	1710	0,999936168718933

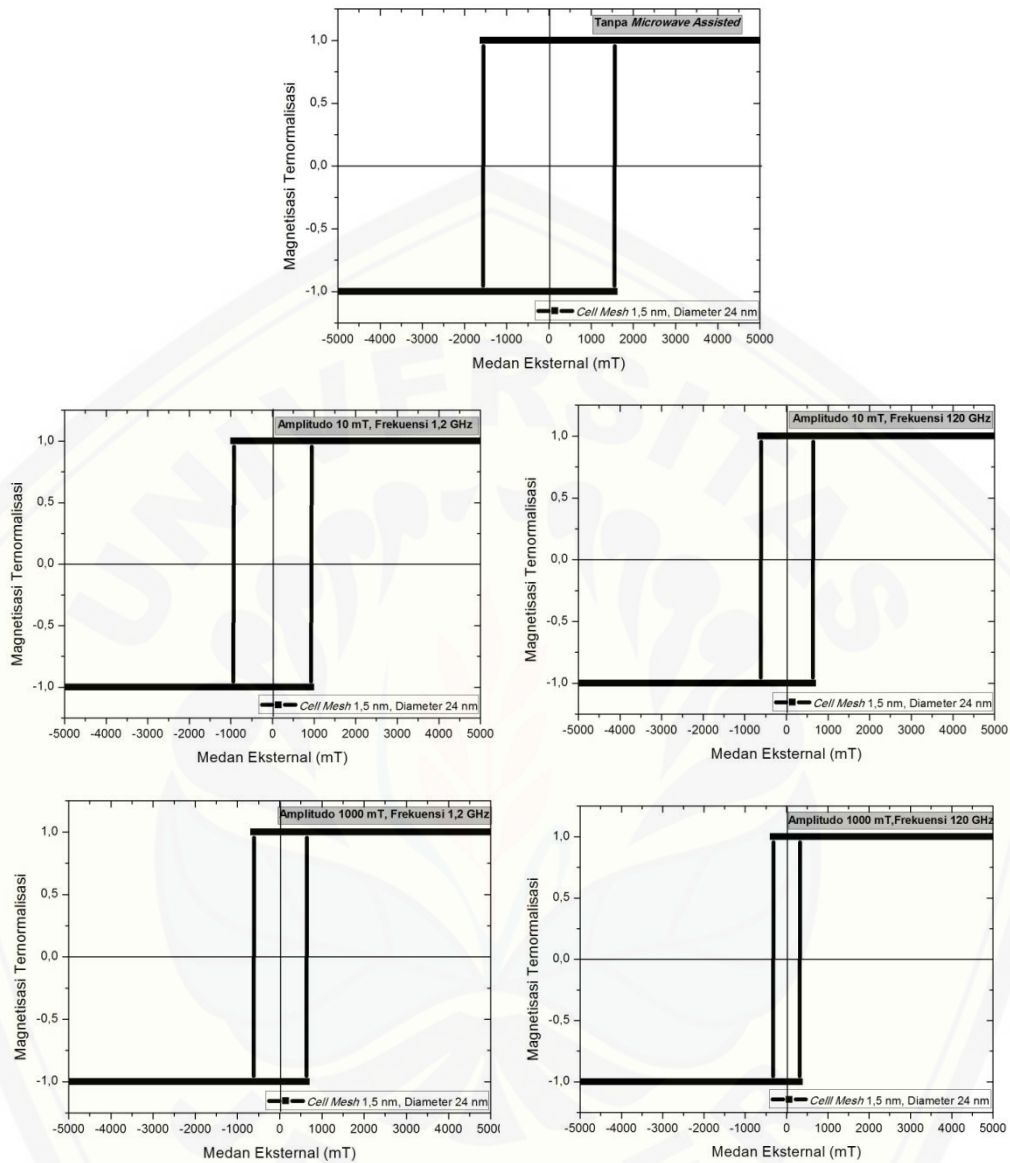
2. Bahan dengan *cell mesh* 1,5 nm dan diameter 18 nm



Tabel 4.21 Medan koersivitas pada *cell mesh* 1,5 nm dan diameter 18 nm

<i>Microwave Assisted</i>	Medan Koersivitas Hc (mT)	Magnetisasi Ternormalisasi
0	1970	0,999922521340532
A ₁ =10 mT, F ₁ =1,2 GHz	1300	0,999912756767229
A ₁ =10 mT, F ₂ =120 GHz	1000	0,999908384570228
A ₂ =1000 mT, F ₁ =1,2 GHz	1000	0,999908384570228
A ₂ =1000 mT, F ₂ =120 GHz	760	0,999904886812627

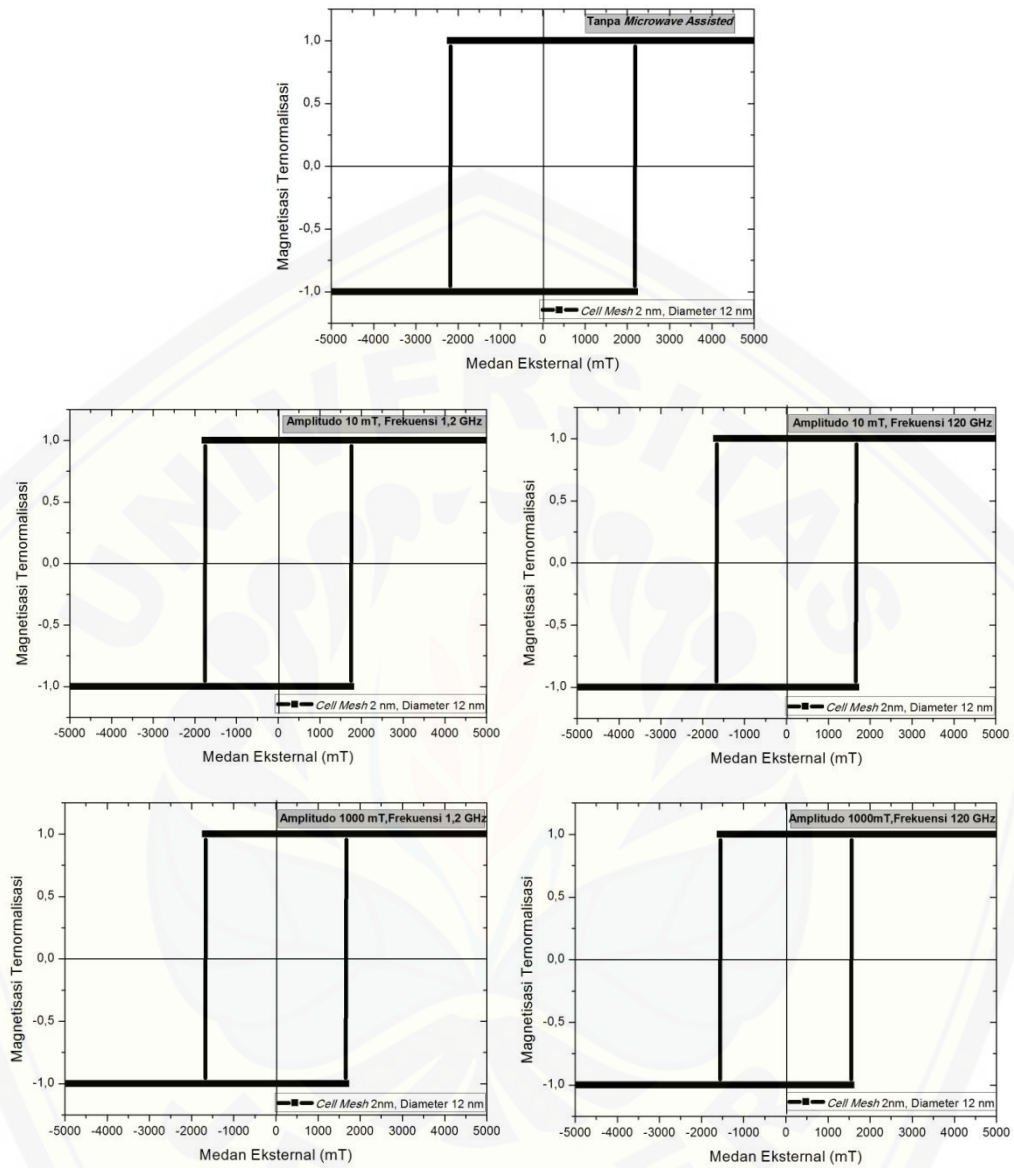
3. Bahan dengan *cell mesh* 1,5 nm dan diameter 24 nm



Tabel 4.32 Medan koersivitas pada *cell mesh* 1,5 nm dan diameter 24 nm

<i>Microwave Assisted</i>	Medan Koersivitas Hc (mT)	Magnetisasi Ternormalisasi
0	1560	0,999917794410145
A ₁ =10 mT, F ₁ =1,2 GHz	940	0,999908266852788
A ₁ =10 mT, F ₂ =120 GHz	620	0,999903656744386
A ₂ =1000 mT, F ₁ =1,2 GHz	620	0,999903656744386
A ₂ =1000 mT, F ₂ =120 GHz	330	0,999898892965704

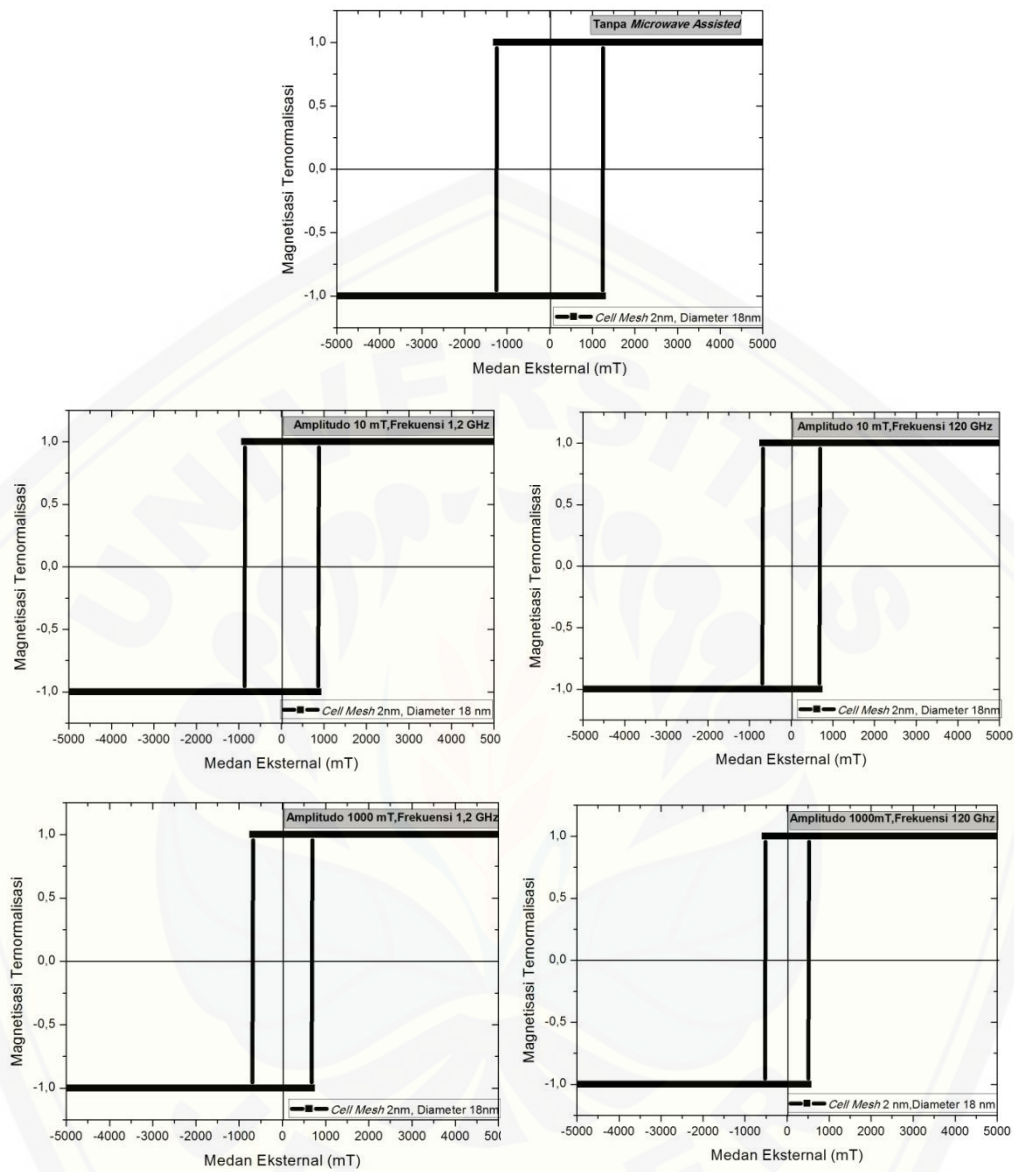
4. Bahan dengan *cell mesh* 2 nm dan diameter 12 nm



Tabel 4.43 Medan koersivitas pada *cell mesh* 2 nm dan diameter 12 nm

<i>Microwave Assisted</i>	Medan Koersivitas Hc (mT)	Magnetisasi Ternormalisasi
0	2190	0,999890861340013
A ₁ =10 mT, F ₁ =1,2 GHz	1760	0,999882423127259
A ₁ =10 mT, F ₂ =120 GHz	1670	0,999880656989705
A ₂ =1000 mT, F ₁ =1,2 GHz	1670	0,999880656989705
A ₂ =1000 mT, F ₂ =120 GHz	1560	0,999878498377139

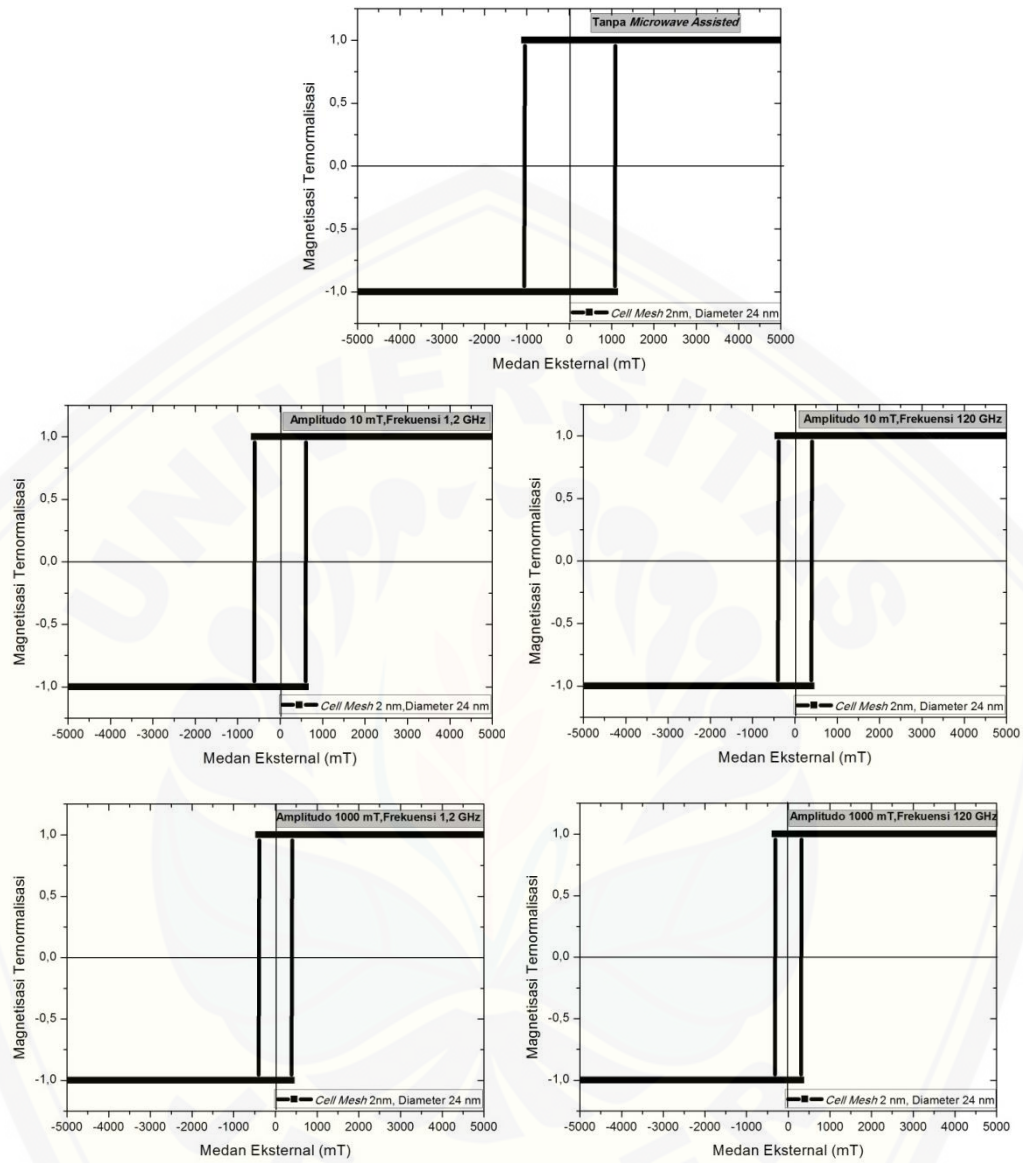
5. Bahan dengan *cell mesh* 2 nm dan diameter 18 nm



Tabel 4.54 Medan koersivitas pada *cell mesh* 2 nm dan diameter 18 nm

<i>Microwave Assisted</i>	Medan Koersivitas Hc (mT)	Magnetisasi Ternormalisasi
0	1250	0,999858706935098
A ₁ =10 mT, F ₁ =1,2 GHz	875	0,999849280523911
A ₁ =10 mT, F ₂ =120 GHz	690	0,999844439934381
A ₂ =1000 mT, F ₁ =1,2 GHz	690	0,999844439934381
A ₂ =1000 mT, F ₂ =120 GHz	520	0,999840108880591

6. Bahan dengan *cell mesh* 2 nm dan diameter 24 nm

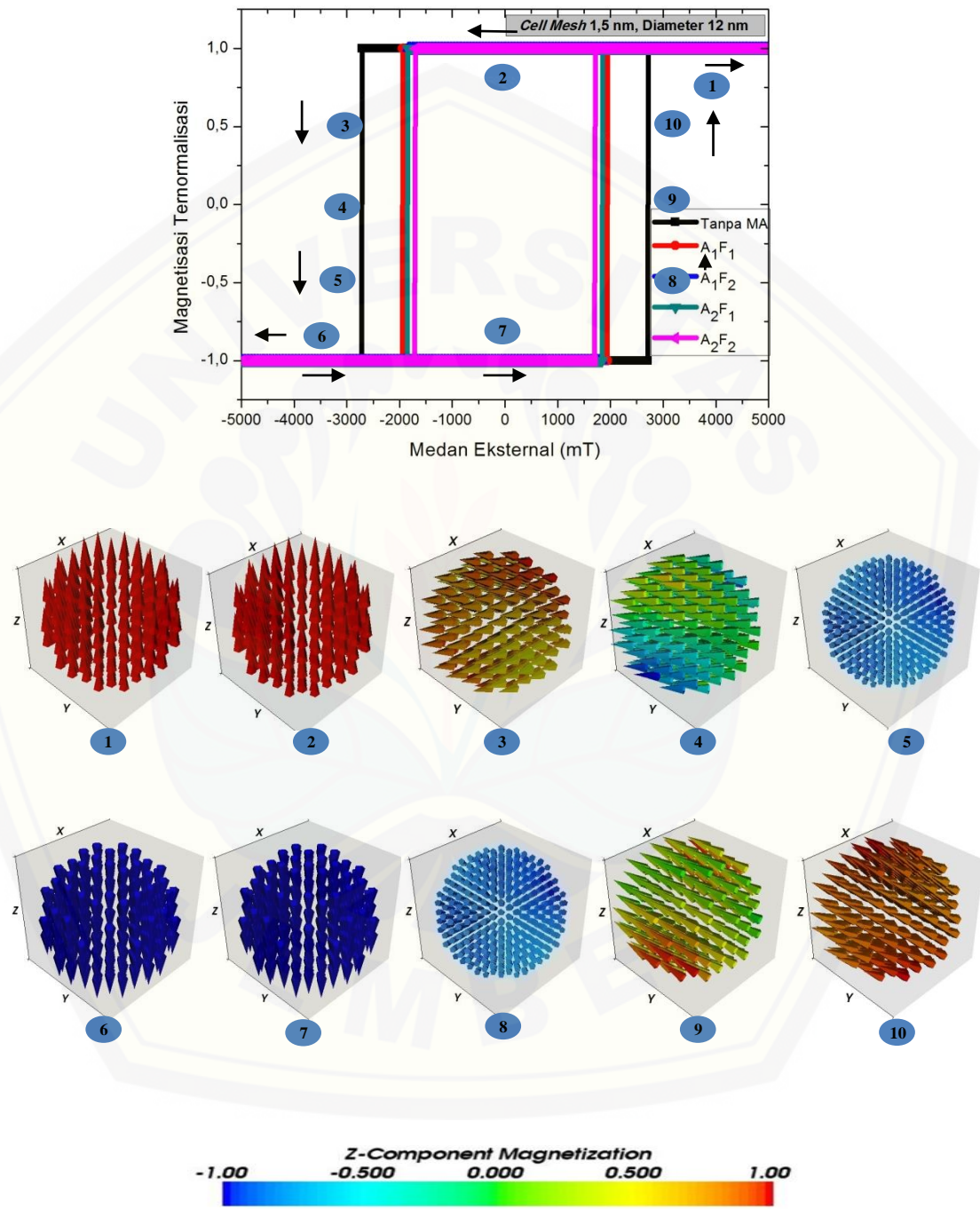


Tabel 4.65 Medan koersivitas pada *cell mesh* 2 nm dan diameter 24 nm

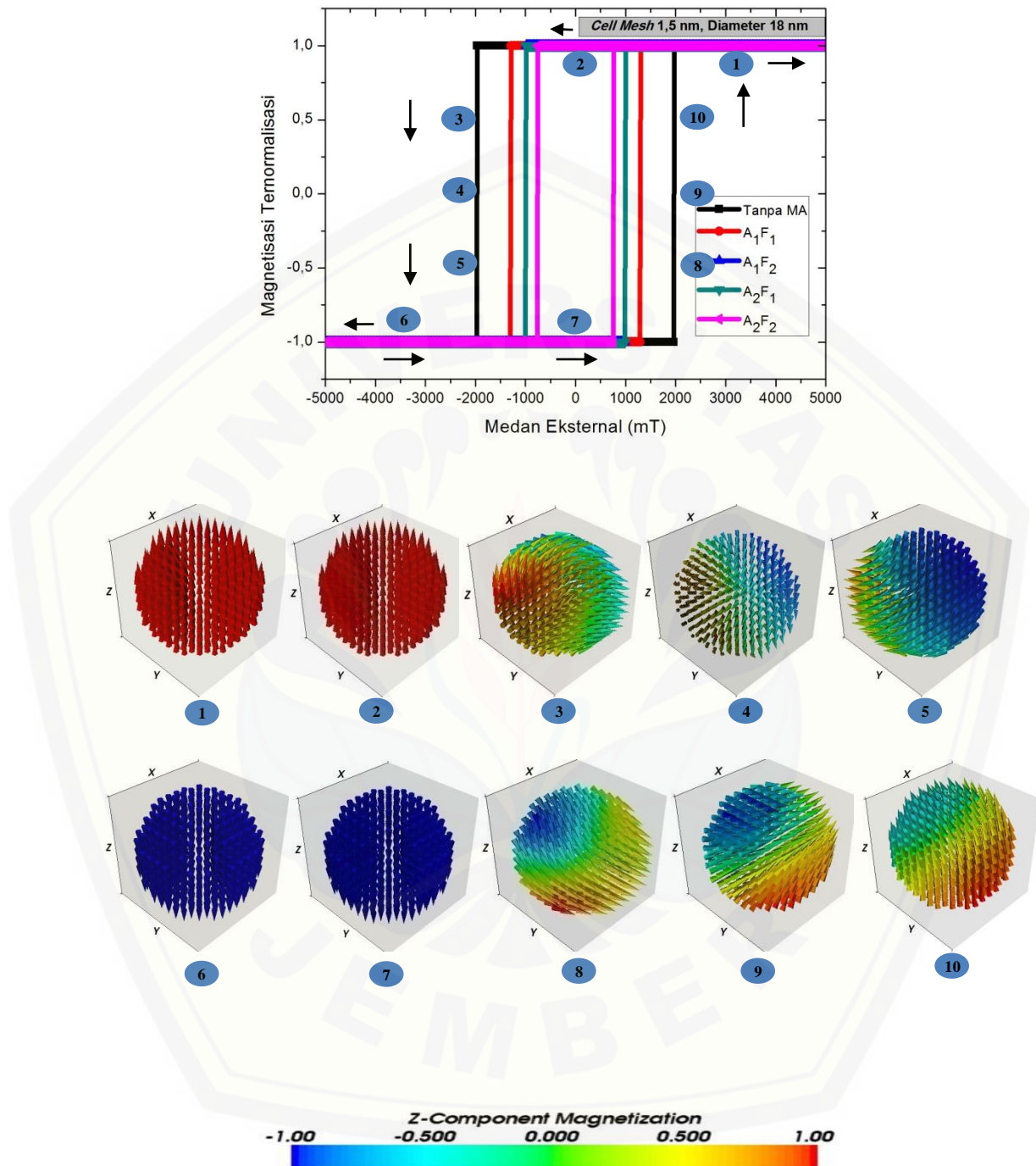
<i>Microwave Assisted</i>	Medan Koersivitas Hc (mT)	Magnetisasi Ternormalisasi
0	1070	0,999761319304733
A ₁ =10 mT, F ₁ =1,2 GHz	610	0,999749879367964
A ₁ =10 mT, F ₂ =120 GHz	400	0,999744874395628
A ₂ =1000 mT, F ₁ =1,2 GHz	400	0,999744874395628
A ₂ =1000 mT, F ₂ =120 GHz	320	0,999742967739500

b. Pembalikan Magnetisasi

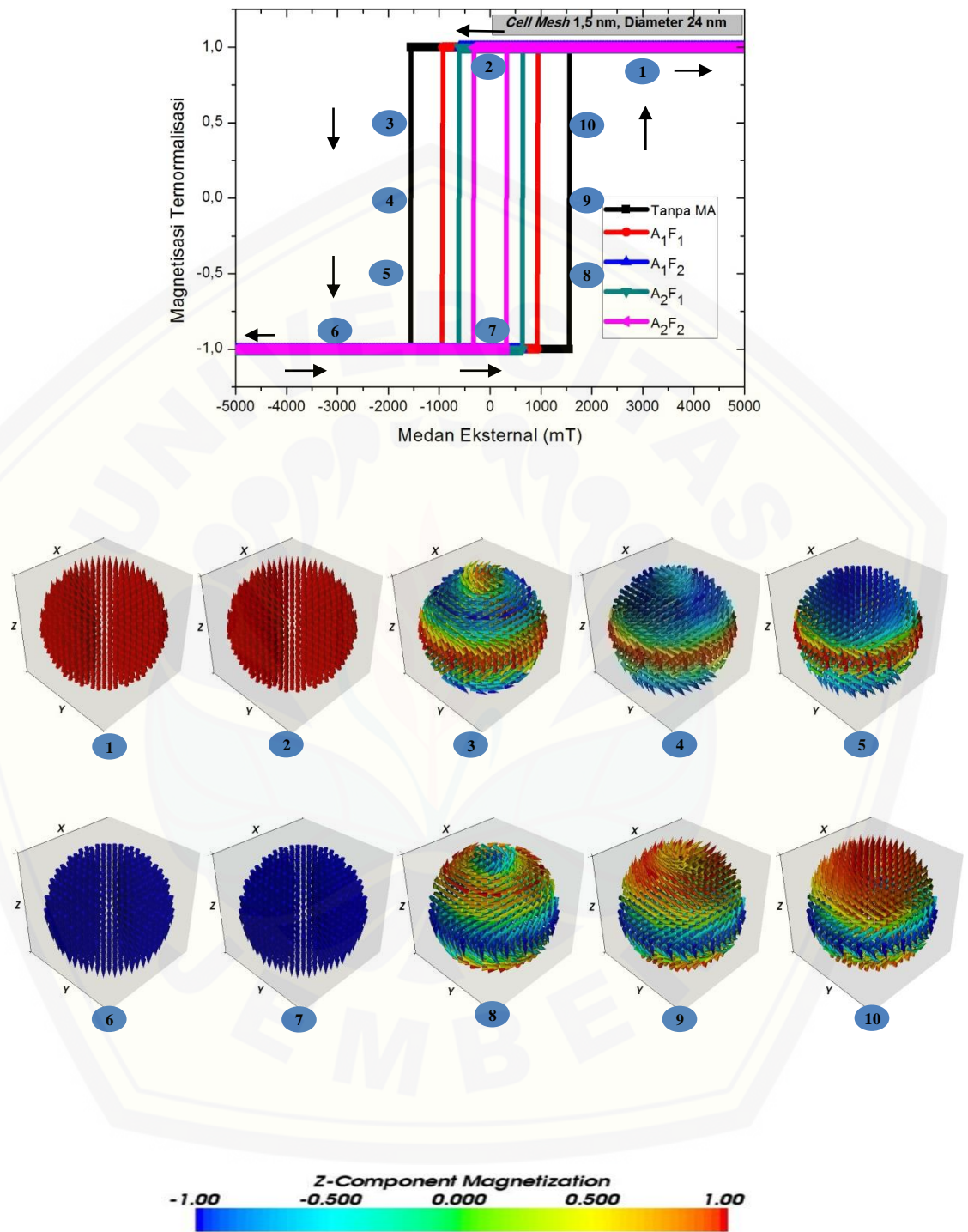
1. Bahan dengan *cell mesh* 1,5 nm dan diameter 12 nm



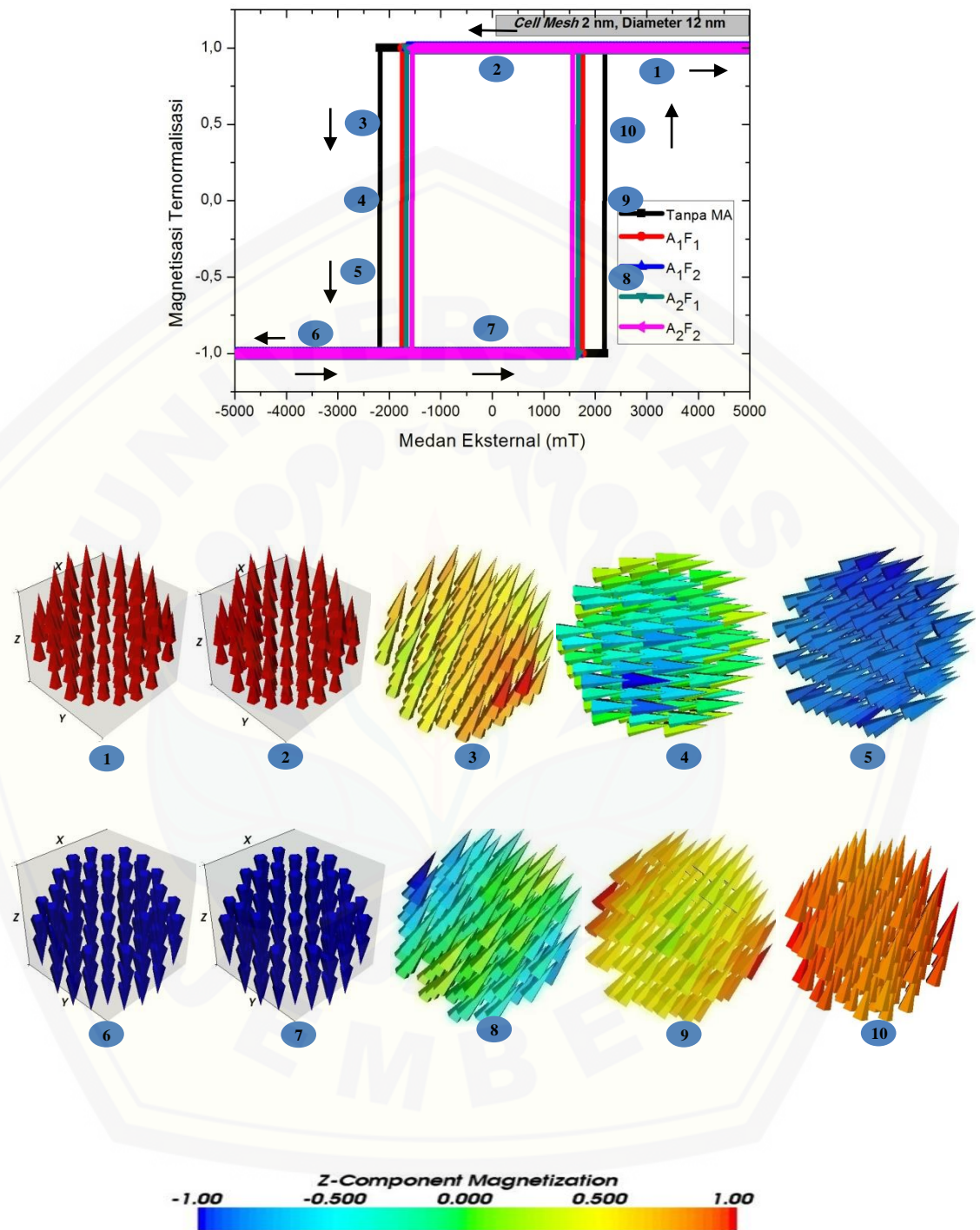
2. Bahan dengan *cell mesh* 1,5 nm dan diameter 18 nm



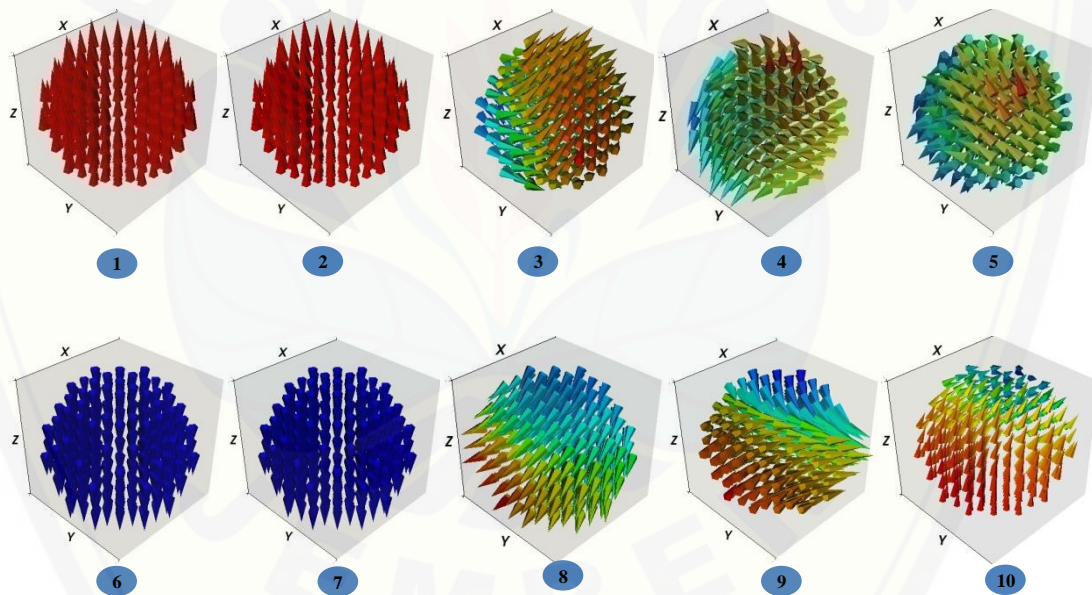
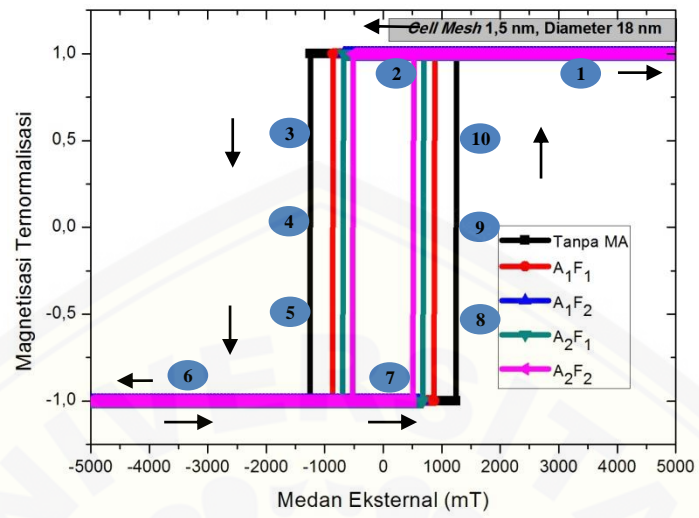
3. Bahan dengan *cell mesh* 1,5 nm dan diameter 24 nm



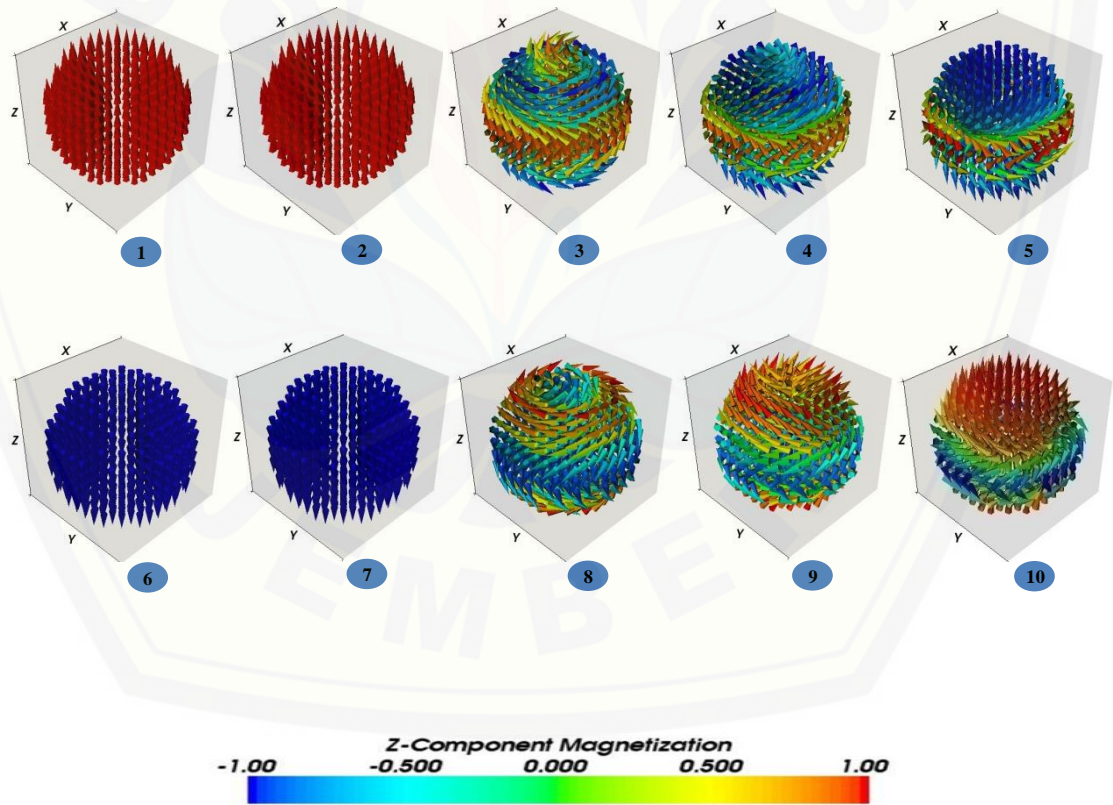
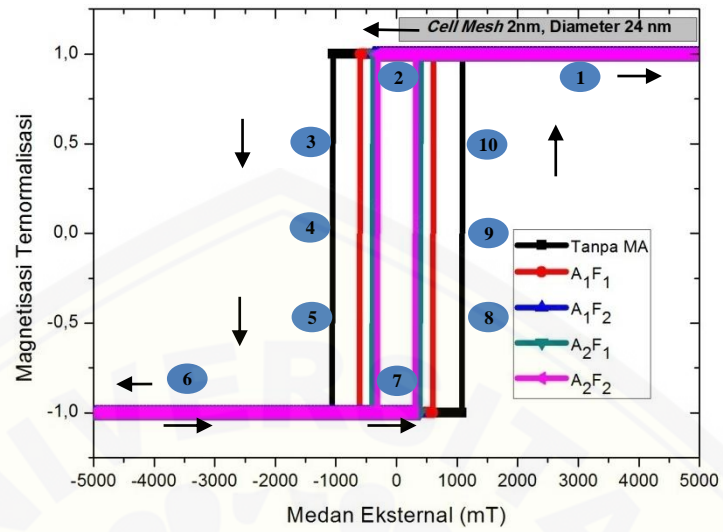
4. Bahan dengan *cell mesh* 2 nm dan diameter 12 nm



5. Bahan dengan *cell mesh* 2 nm dan diameter 18 nm

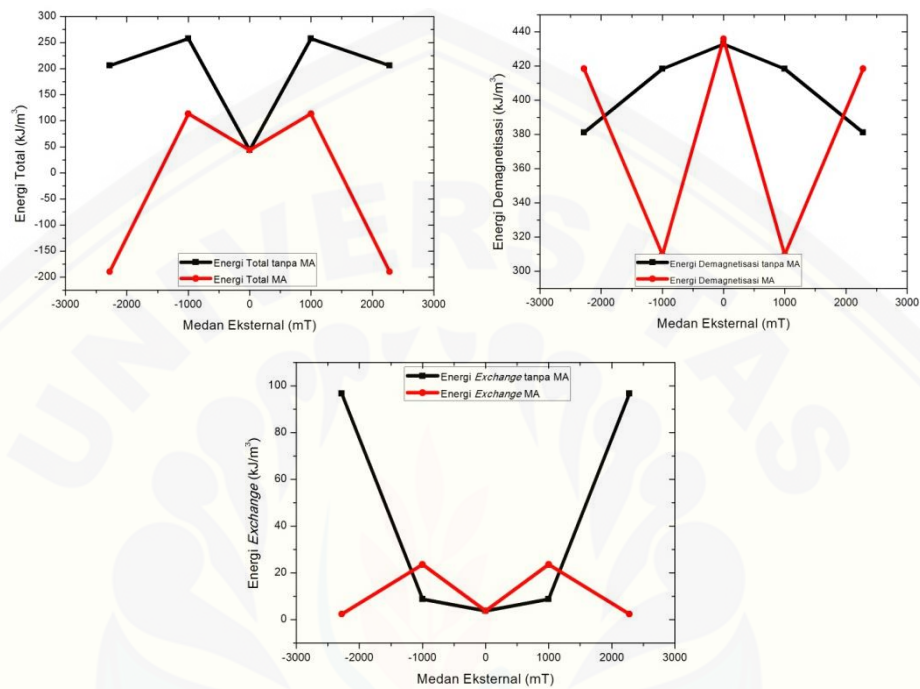


6. Bahan dengan *cell mesh* 2 nm dan diameter 24 nm

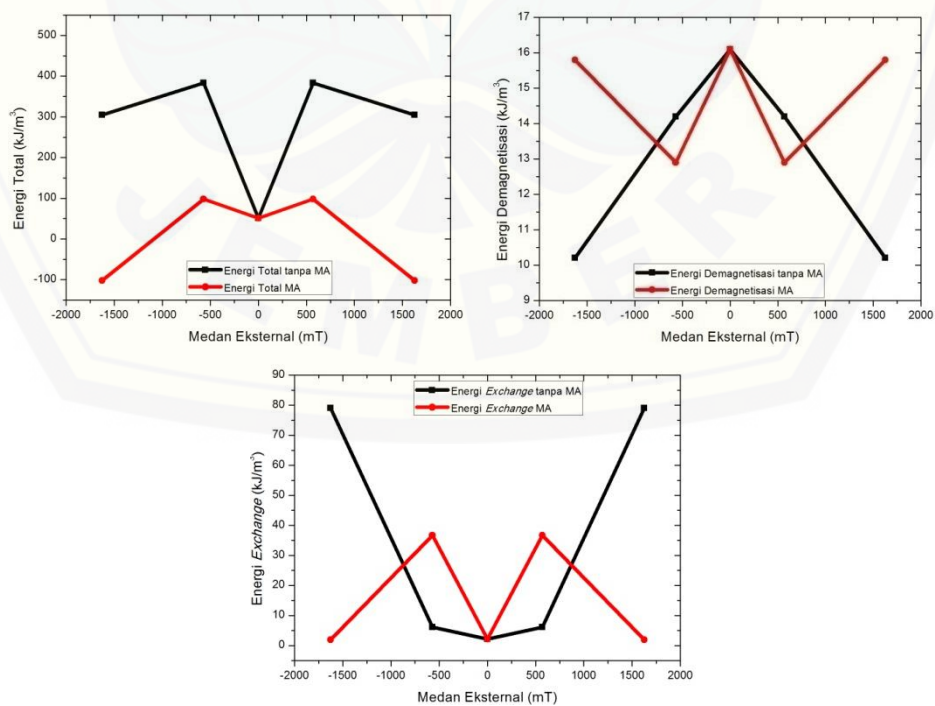


Lampiran 4.3 Grafik Pengaruh *Microwave Assisted* terhadap Energi Total, Energi Demagnetisasi, dan Energi *Exchange*

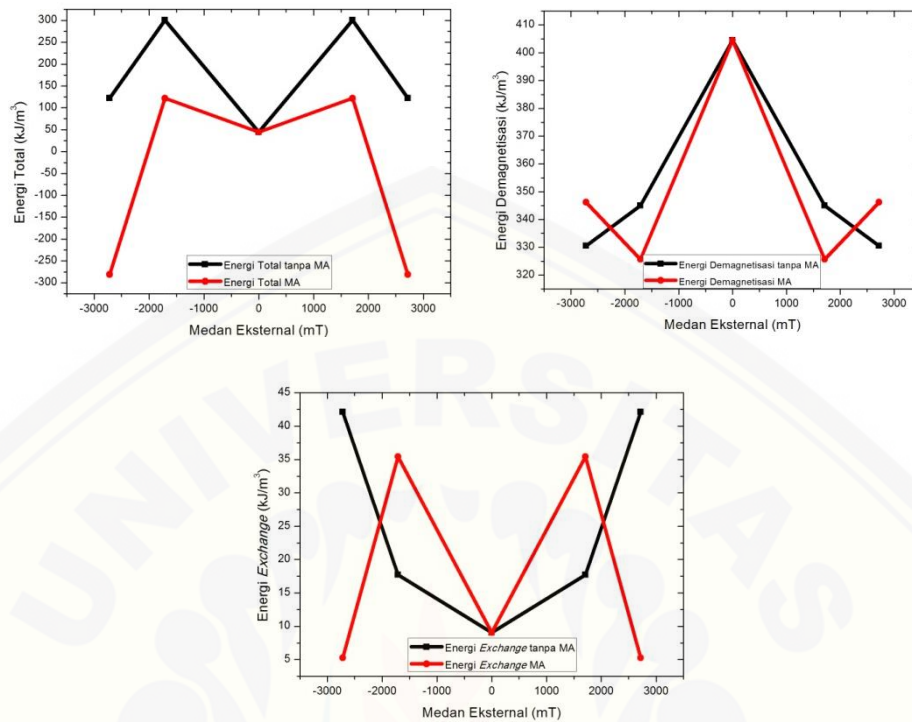
1. Bahan dengan *cell mesh* 1 nm dan diameter 18 nm



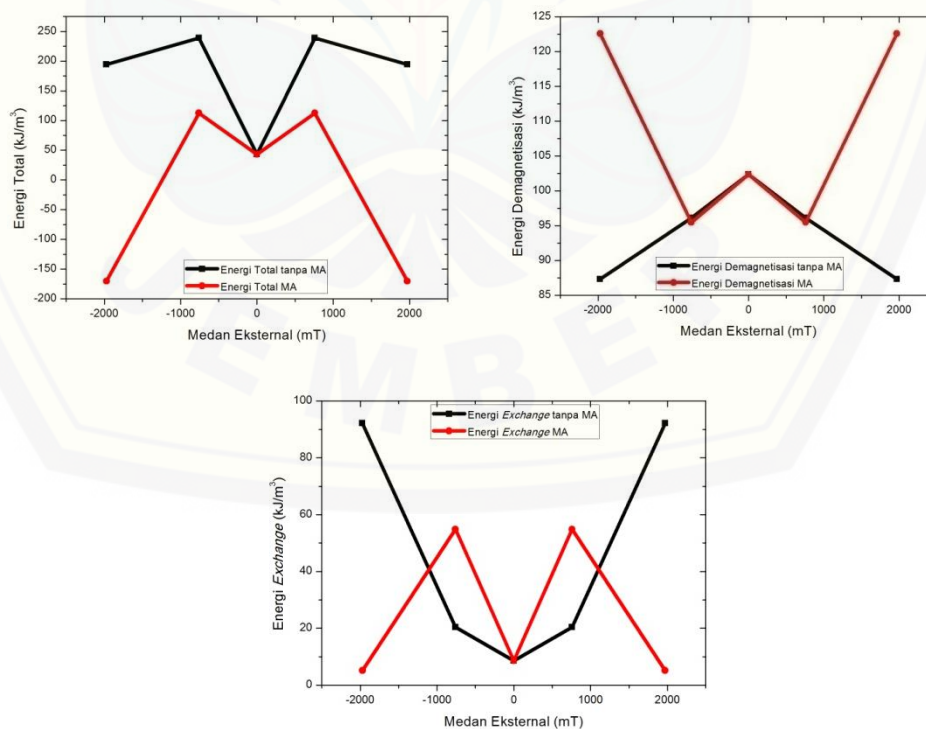
2. Bahan dengan *cell mesh* 1 nm dan diameter 24 nm



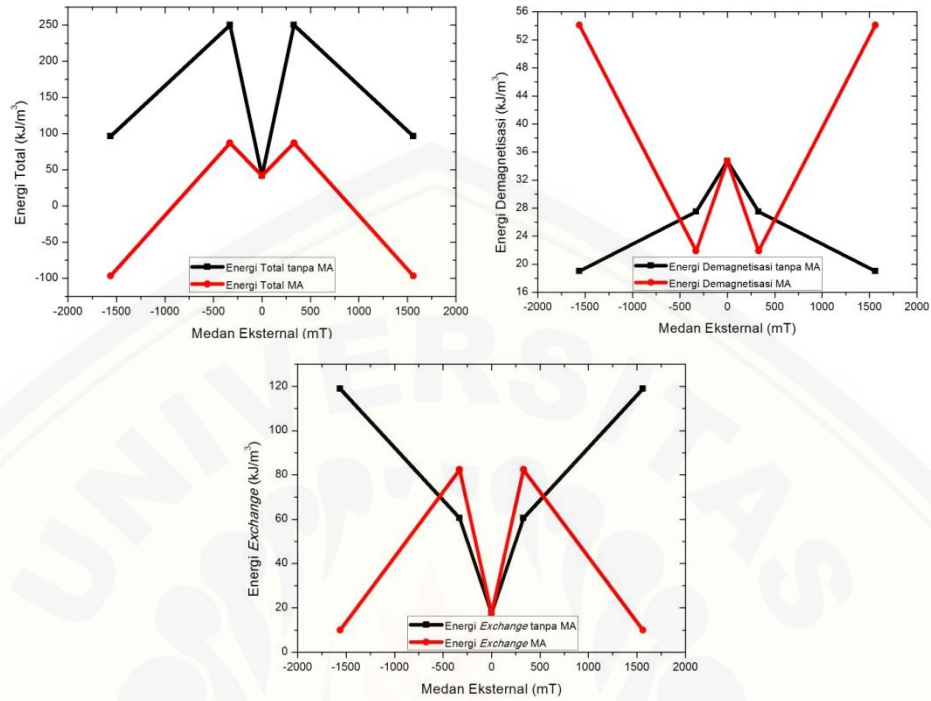
3. Bahan dengan *cell mesh* 1,5 nm dan diameter 12 nm



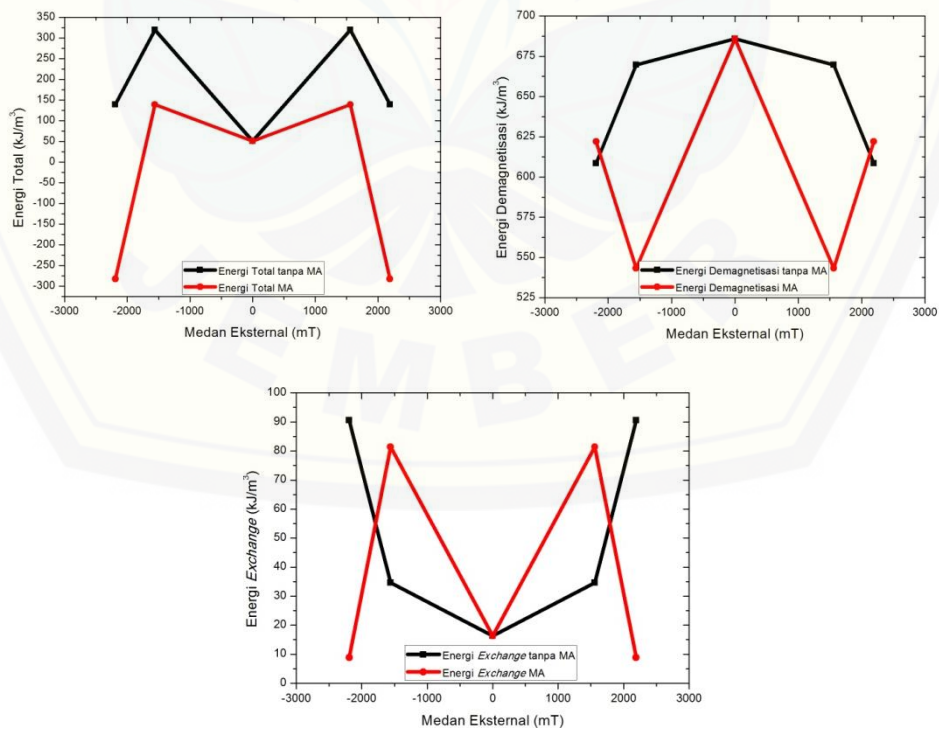
4. Bahan dengan *cell mesh* 1,5 nm dan diameter 18 nm



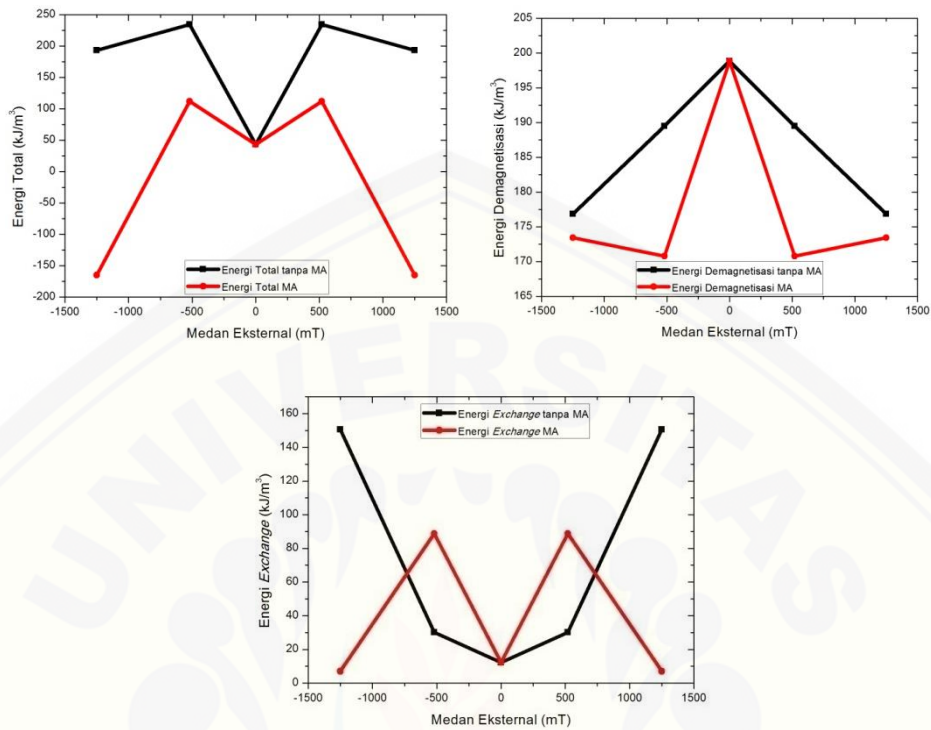
5. Bahan dengan *cell mesh* 1,5 nm dan diameter 24 nm



6. Bahan dengan *cell mesh* 2 nm dan diameter 12 nm



7. Bahan dengan *cell mesh* 2 nm dan diameter 18 nm



8. Bahan dengan *cell mesh* 2 nm dan diameter 24 nm

