



**INVESTIGASI SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN CoFeB  
DAN PENGARUH PENERAPAN *HEAT ASSISTED*  
MENGUNAKAN SIMULASI MIKROMAGNETIK**

**SKRIPSI**

Oleh

**Moh. Eko Ardiansyah  
NIM 111810201055**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2016**



**INVESTIGASI SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN CoFeB  
DAN PENGARUH PENERAPAN *HEAT ASSISTED*  
MENGUNAKAN SIMULASI MIKROMAGNETIK**

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Program Studi Fisika (S1)  
dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh

**Moh. Eko Ardiansyah**

**NIM 111810201055**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2016**

## PERSEMBAHAN

Dengan memanjatkan puji syukur terhadap kehadiran Allah SWT, skripsi ini penulis persembahkan untuk:

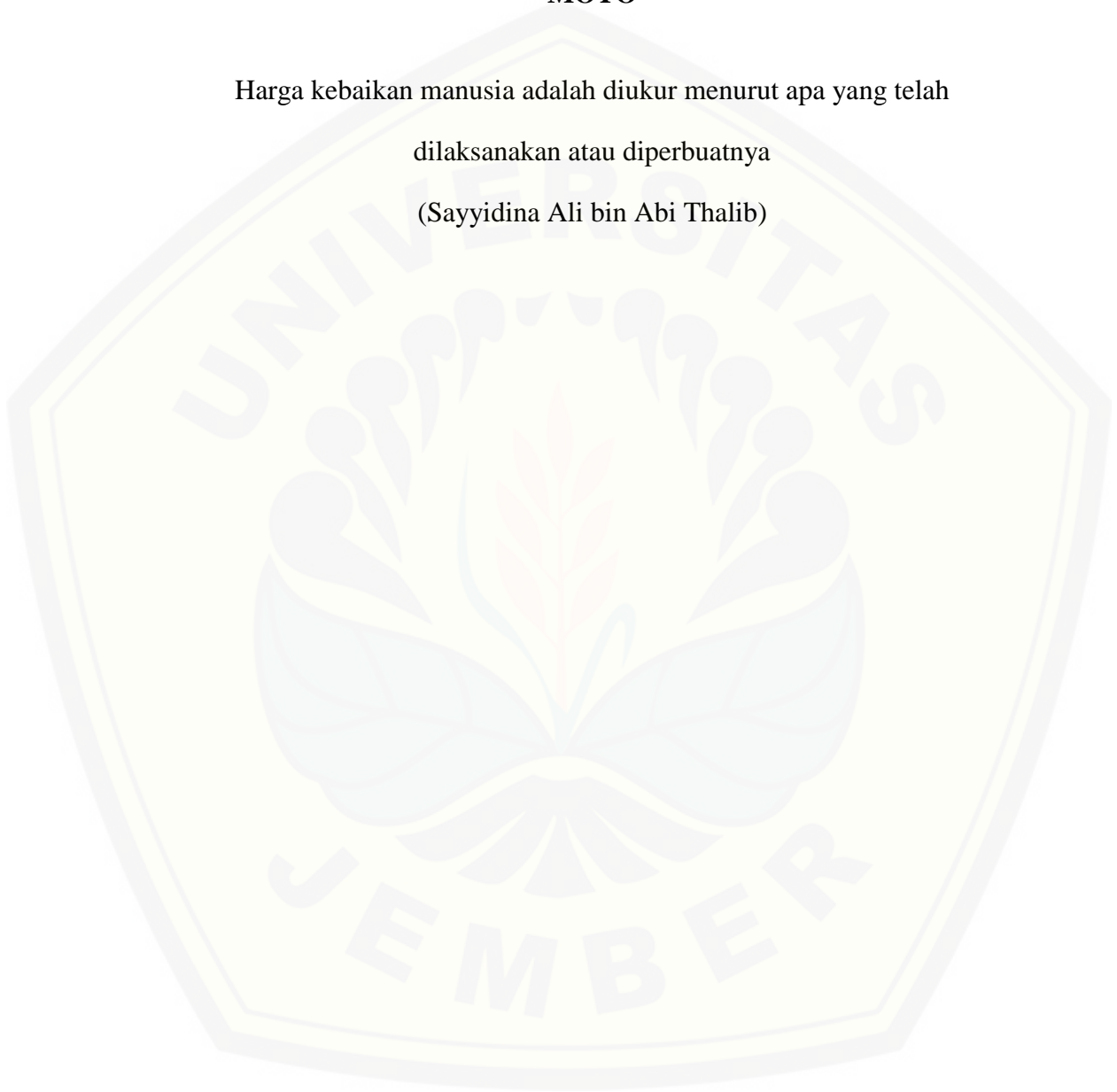
1. Ibunda Mardiyana dan Om Haryono terimakasih atas segala kasih sayang dan pengorbanan yang telah diberikan, doa yang selalu dipanjatkan, serta dukungan motivasi yang mengiringiku setiap saat.
2. Saudara-saudara yang telah memberikan semangat.
3. Seluruh pendidik sejak taman kanak-kanak sampai perguruan tinggi yang telah mengamalkan ilmunya kepada saya.
4. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

**MOTO**

Harga kebaikan manusia adalah diukur menurut apa yang telah

dilaksanakan atau diperbuatnya

(Sayyidina Ali bin Abi Thalib)



**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Moh. Eko Ardiansyah

NIM : 111810201055

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Investigasi sifat-sifat magnetik bahan CoFeB dan pengaruh penerapan *heat assisted* menggunakan simulasi mikromagnetik” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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

Jember, Mei 2016

Yang menyatakan,

Moh. Eko Ardiansyah

NIM 111810201055

**SKRIPSI**

**INVESTIGASI SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN CoFeB  
DAN PENGARUH PENERAPAN *HEAT ASSISTED*  
MENGUNAKAN SIMULASI MIKROMAGNETIK**

Oleh

Moh. Eko Ardiansyah

NIM 111810201055

Pembimbing:

Dosen Pembimbing Utama: Dr. Lutfi Rohman, S.Si, M.Si.

Dosen Pembimbing Anggota: Dr. Edy Supriyanto, S.Si. M.Si.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Investigasi sifat-sifat magnetik bahan CoFeB dan pengaruh penerapan *heat assisted* menggunakan simulasi mikromagnetik” telah diuji dan disahkan secara akademis pada:

hari :

tanggal :

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember

**Tim Penguji**

Ketua (Dosen Pembimbing Utama)

Sekretaris (Dosen Pembimbing Anggota)

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

Dr. Edy Supriyanto, S.Si. M.Si.

NIP 197208201998021001

NIP 196712151998021001

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II

Drs. Yuda Cahyoargo H., M.Sc, Ph.D.

Supriyadi, S.Si. M.Si.

NIP 196203111987021001

NIP 198204242006041003

Mengesahkan

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Drs. Sujito, Ph.D.

NIP 196102041987111001

## RINGKASAN

**Investigasi sifat-sifat magnetik bahan CoFeB dan pengaruh penerapan *heat assisted* menggunakan simulasi mikromagnetik;** Moh. Eko Ardiansyah, 111810201055: 58 halaman; Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember.

Salah satu media penyimpanan data yang biasa digunakan oleh berbagai komputer adalah suatu media perekam magnetik *hard disk drive* (HDD). *Hard disk drive* (HDD) pada umumnya digunakan sebagai penyimpanan data jangka panjang pada komputer. Upaya untuk memperbesar kapasitas penyimpanan data yaitu dengan cara meningkatkan kerapatan bit (*bit-areal-density*). Kerapatan bit yang meningkat berarti akan meningkatkan kapasitas penyimpanan data dari media perekam data tersebut. Bahan material yang berpotensi untuk diaplikasikan sebagai media penyimpanan data adalah bahan feromagnetik.

Penelitian ini dilakukan menggunakan simulasi mikromagnetik dengan bahan feromagnetik. Ada beberapa bahan yang termasuk dalam golongan ini, antara lain adalah besi (Fe), nikel (Ni), cobalt (Co) dan beberapa bahan campuran seperti CoFeB. CoFeB merupakan bahan magnet *permalloy* yang bersifat *hard* magnetik. *Hard* magnetik merupakan material magnet yang memiliki medan koersif kuat. Dalam mempelajari sifat magnet yang ada dalam bahan CoFeB dapat digunakan pendekatan secara teori komputasi. Salah satu metode yang bisa digunakan adalah *Heat Assisted Magnetic Recording* (HAMR). HAMR merupakan sistem magnetisasi berbantuan panas untuk menurunkan medan *switching* yang telah dilakukan. Metode HAMR ini dapat digunakan dengan simulasi mikromagnetik. Simulasi mikromagnetik dapat dilakukan dengan menggunakan metode *finite element* (FE) dan atomistik. Program yang dapat digunakan dalam simulasi mikromagnetik antara lain *Vampire* dan *Nmag*. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat magnetik bahan CoFeB serta



pengaruh *heat assisted* terhadap medan koersivitas. Struktur model bahan yang digunakan adalah nanosphere

Hasil simulasi yang dihasilkan menunjukkan besarnya diameter kritis dari bahan CoFeB adalah 10 nm. Hal tersebut diperkuat dengan grafik energi sistem yang ada, dimana perubahan energi *exchange* dan energi demagnetisasi mengalami perubahan pada diameter 10 nm. Pada daerah dengan diameter 5 nm sampai dengan 10 nm, struktur domain yang terbentuk adalah *single-domain*. Pada diameter 15 nm sampai dengan 20 nm, struktur domain yang terbentuk berada pada keadaan *vortex*.

Berdasarkan hasil simulasi memperlihatkan bahwa terdapat perbedaan perubahan medan koersivitas pada bahan CoFeB. Medan koersivitas pada diameter 5 nm sampai dengan 10 nm mempunyai pola meningkat, seiring bertambahnya diameter. Sedangkan medan koersivitas pada diameter 15 nm sampai dengan diameter 25 mempunyai pola menurun seiring bertambahnya diameter. Hal ini dikarenakan pada diameter 10 nm merupakan diameter kritis dari bahan CoFeB.

Temperatur Curie pada bahan CoFeB berdasarkan hasil simulasi diperoleh pada 700 K. Hal ini dapat diperkuat dengan adanya perubahan magnetisasi yang cenderung konstan seiring dengan penambahan temperatur diatas 700 K. Pengaruh *heat assisted* berdasarkan simulasi memperlihatkan bahwa terdapat 3 pola perbedaan perubahan medan koersivitas pada bahan CoFeB. Pola pertama yaitu terjadi pada temperatur 0 K sampai 100 K. Pola kedua terjadi saat medan koersivitas menunjukkan penurunan seiring bertambahnya temperatur yaitu pada temperatur 100 K sampai 500 K, keadaan ini sesuai dengan konsep dari *heat assisted*. Pola ketiga berada pada temperatur 600 K – 800 K, dimana pada rentang temperatur tersebut kurva histerisis bahan CoFeB menunjukkan medan koersivitasnya sudah rusak.

## PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Investigasi sifat-sifat magnetik bahan CoFeB dan pengaruh penerapan *heat assisted* menggunakan simulasi mikromagnetik”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, pengarahan dan bimbingan berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Dr. Lutfi Rohman, S.Si. M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Dr. Edy Supriyanto, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
2. Drs. Yuda Cahyoargo Hariadi, M.Sc., Ph.D., selaku Dosen Penguji I dan Supriyadi, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Puguh Hiskiawan, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa;
4. Segenap Dosen dan Karyawan Fakultas MIPA Universitas Jember yang selalu membantu dan mendukung;
5. Orang tuaku tersayang Ibunda Mardiyana dan Om Haryono yang telah memberikan restu, kasih sayang serta doanya hingga sekarang;
6. Saudara-saudaraku Syaiful Bahri, Murtiningsih dan adikku tersayang Shafa Az-Zahra yang telah memberikan motivasi dan keceriaan serta menemani orang tua di rumah selama saya menuntut pendidikan di bangku kuliah;
7. Gutaminingsih, yang telah sabar dan setia dalam menemani, memberikan semangat dan motivasi;

8. Bapak Taufiq Usman Wibowo dan Mas Edi Sutrisno yang telah memberikan bantuan selama penelitian;
9. Teman-teman seperjuangan angkatan 2011, GP 11 yang telah memberikan bantuan dan dukungannya;
10. Sahabat seperjuanganku di Laboratorium Fisika Komputasi, Bagus Fath Nagara H.T. serta sahabat-sahabat yang telah membantu selama penelitian dan penyusunan skripsi, Bahar, Niko, Alex, Angga, Syahrial, Deri dan Mahendra;
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Dengan segala kerendahan hati penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang Fisika.

Jember, Mei 2016

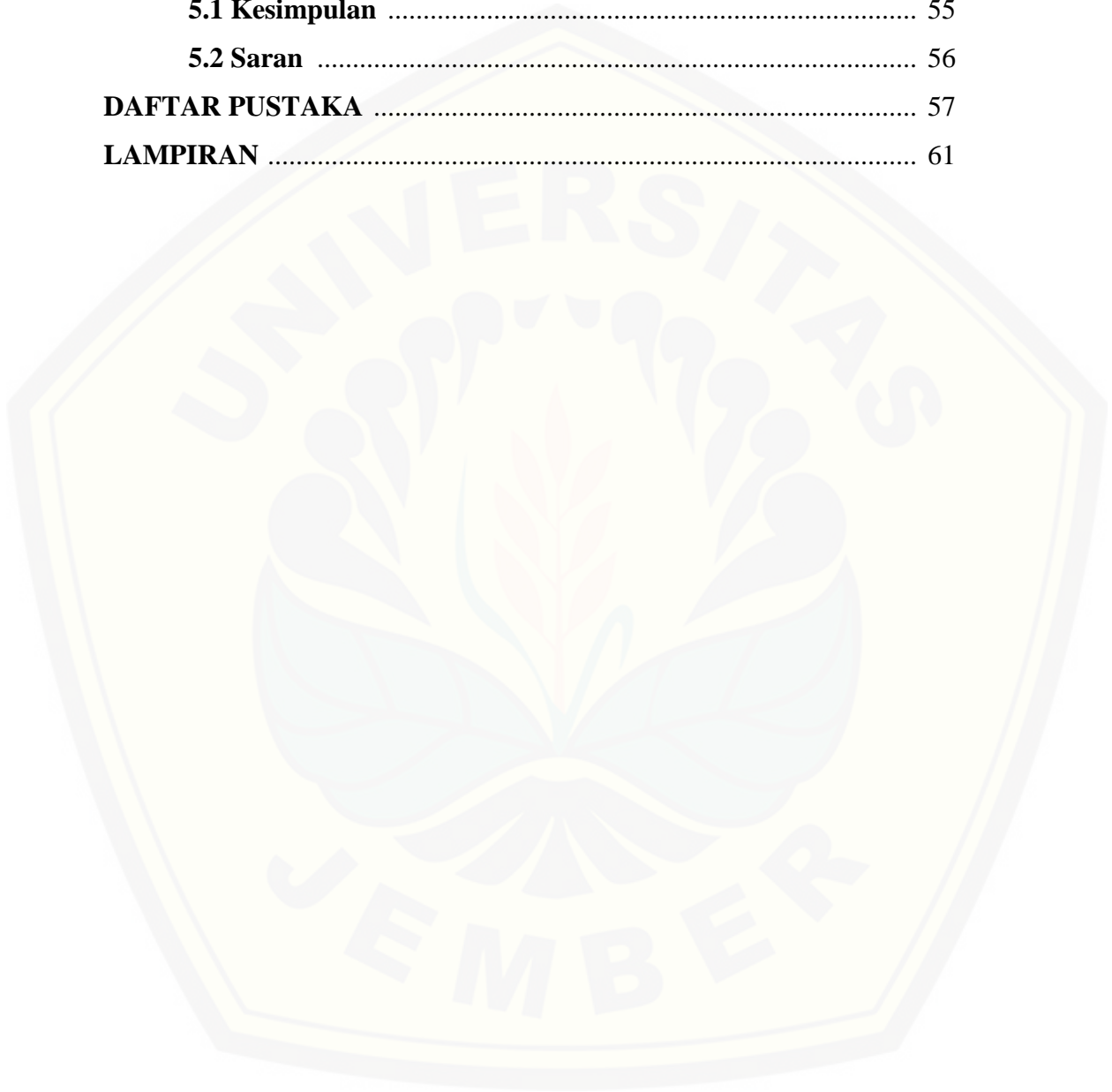
Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	ii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iii
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>HALAMAN PEMBIMBINGAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>RINGKASAN</b> .....	vii
<b>PRAKATA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xvii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	4
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	5
<b>1.4 Tujuan</b> .....	5
<b>1.5 Manfaat</b> .....	5
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
<b>2.1 Sifat dan Bahan Magnet</b> .....	6
<b>2.2 Domain Magnet dan Domain Wall</b> .....	8
<b>2.3 Energi Sistem Feromagnetik</b> .....	10
2.3.1 Energi <i>Exchange</i> .....	10

2.3.2 Energi Magnetostatik .....	11
2.3.3 Energi <i>Anisotropy</i> .....	12
2.3.4 Energi Zeeman .....	12
<b>2.4 Simulasi Mikromagnetik</b> .....	13
2.4.1 Program Simulasi Mikromagnetik <i>Finite Elements</i> .....	13
2.4.2 Program Simulasi Mikromagnetik Vampire .....	14
<b>2.5 Dinamika Magnetisasi</b> .....	14
2.5.1 Persamaan Landau-Lifshits (LL) .....	16
2.5.2 Persamaan Landau-Lifshits-Gilbert (LLG) .....	16
<b>2.6 Struktur Domain</b> .....	18
2.6.1 <i>Single Domain</i> .....	18
2.6.2 <i>Two Domain dan Vorteks-state</i> .....	18
<b>2.7 Diameter Kritis</b> .....	19
<b>2.8 Kurva Histerisis</b> .....	20
<b>2.9 Mekanisme Pembalikan</b> .....	25
<b>2.10 CoFeB</b> .....	26
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN</b> .....	28
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian .....	28
3.2 Alat Penelitian .....	28
3.3 Prosedur Penelitian .....	29
3.3.1 Diagram Penelitian .....	29
3.3.2 Langkah Kerja .....	30
3.4 Analisis Data .....	32
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	36
4.1 Karakteristik Diameter Kritis dari Bahan CoFeB .....	36
4.2 Karakteristik Kurva Histerisis dari Bahan CoFeB .....	42
4.3 Analisis Temperatur Curie dari Bahan CoFeB .....	44
4.4 Pengaruh <i>Heat Assisted</i> Terhadap Kurva Histerisis	

<b>dari Bahan CoFeB</b> .....	45
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....	55
<b>5.1 Kesimpulan</b> .....	55
<b>5.2 Saran</b> .....	56
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	57
<b>LAMPIRAN</b> .....	61



**DAFTAR TABEL**

	Halaman
2.1 Parameter bahan CoFeB yang digunakan dalam simulasi mikromagnetik .....	30
4.1 Perbandingan diameter kritis dari hasil perhitungan oleh persamaan (2.21) ( $DC_1$ ), persamaan (2.22) ( $DC_2$ ), persamaan (2.23) ( $DC_3$ ) terhadap hasil simulasi mikromagnetik .....	41
4.2 Perbandingan nilai diameter transisi dari hasil perhitungan oleh persamaan (2.24) ( $DC_4$ ) dan persamaan (2.25) ( $DC_5$ ) terhadap hasil simulasi mikromagnetik .....	41

DAFTAR GAMBAR

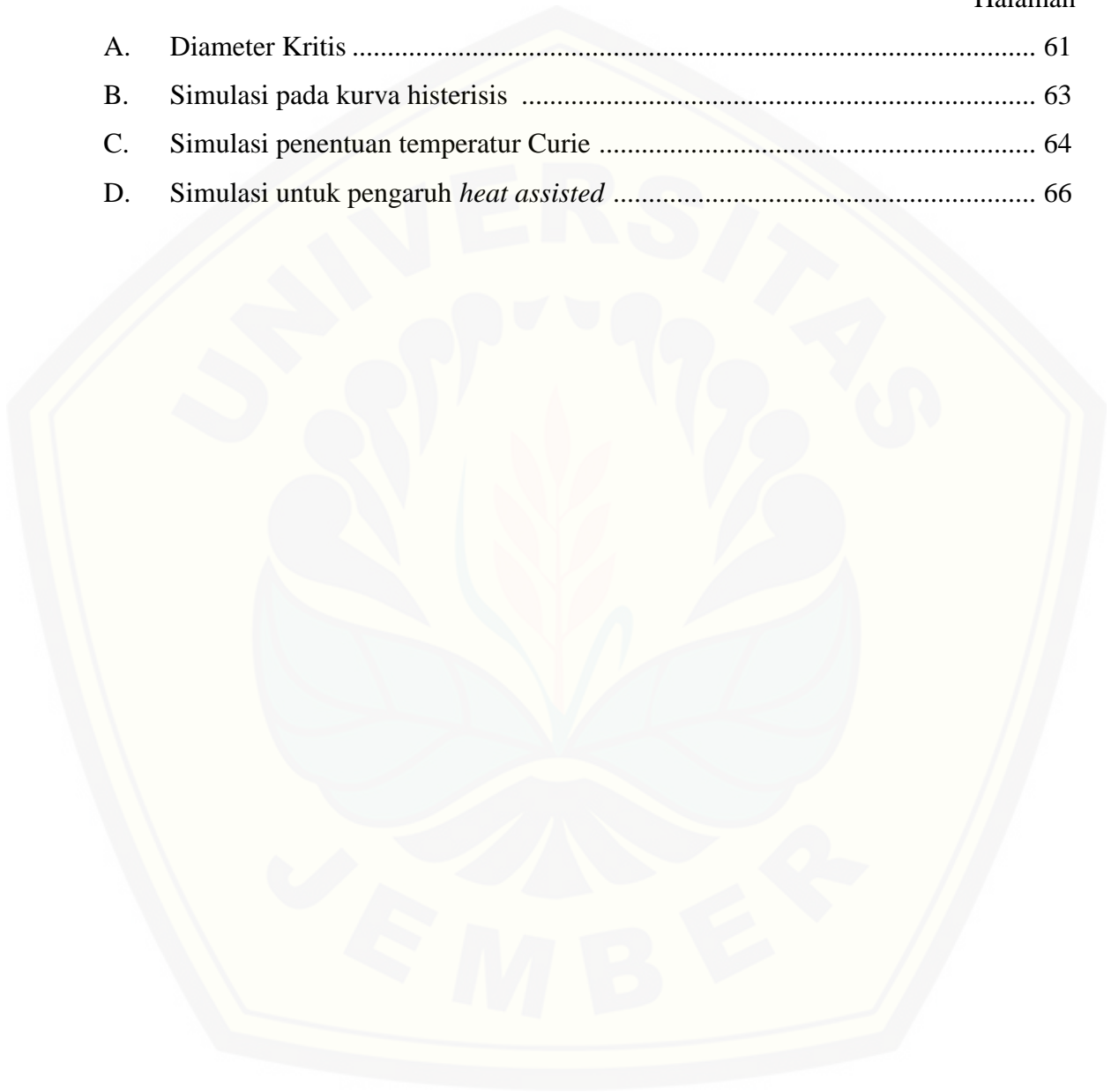
	Halaman
2.1 Konfigurasi momen magnet dalam domain-wall berubah secara perlahan-lahan membentuk struktur domain-wall 180° dikenal dengan <i>Bloch wall</i> .....	9
2.2 Struktur <i>Neelwall</i> dimana orientasi spinnya terjadi pada bidang <i>thin film</i> .....	9
2.3 Pengurangan energi magnetostatik atau energi demagnetisasi akibat orientasi arah dari dipol-dipol magnet .....	11
2.4 Bentuk bola dalam <i>Finite Element</i> .....	14
2.5 Gerak presisi dari momen magnet terhadap medan efektif. (a) tanpa redaman, (b) dengan redaman ( <i>damping</i> ) .....	16
2.6 Tiga kemungkinan keadaan konfigurasi domain magnet saat energi minimum ( <i>groundstate</i> ) dari partikel magnet bola ( <i>spherical magnetic particle</i> ). (a) <i>single-domain</i> , (b) <i>two-domain</i> , (c) <i>vortek-state</i> .....	19
2.7 Kurva histeresis untuk material feromagnetik. (a) M terhadap H : $M_r$ adalah magnetisasi remanen; $H_{ci}$ adalah koersivitas intrinsik; $M_s$ adalah magnetisasi saturasi; (b) B terhadap H : $B_r$ adalah remanen; $H_c$ adalah koersivitas .....	22
2.8 Kurva perbandingan nilai medan koersivitas terhadap diameter partikel .....	23
2.9 Kurva hubungan besar nilai medan koersivitas terhadap ukuran dari partikel material magnetik .....	24
2.10 Mekanisme pembalikan magnetisasi partikel magnetik berbentuk bola. (a) rotasi koheren ( <i>coherent rotation</i> ), (b) <i>curling</i> .....	25
2.11 Struktur kristal kubik berpusat muka (FCC) .....	27



2.12	Struktur kristal CoFeB .....	27
3.1	Bagan tahapan-tahapan penelitian .....	29
3.2	Contoh geometri nanosphere yang digunakan dalam simulasi .....	30
3.3	Contoh tampilan pada program Mayavi .....	33
3.4	Contoh tampilan pada program Origin .....	34
3.5	Contoh grafik penentuan temperatur Curie .....	34
3.6	Contoh tampilan pada program Pov-Ray .....	35
4.1	Grafik energi sistem dari bahan CoFeB terhadap variasi diameter .....	37
4.2	Contoh struktur domain bahan CoFeB pada masing-masing daerah bagian a) bagian 1 dengan struktur domain <i>single domain</i> , (b) bagian 2 dengan struktur domain <i>vortex</i> (c) bagian 3 dengan struktur domain <i>vortex</i> .....	38
4.3	Struktur domain magnet bahan CoFeB dengan variasi diameter 5 nm – 30 nm .....	39
4.4	Struktur domain magnet bahan CoFeB dengan variasi diameter 35 nm – 60 nm .....	40
4.5	Kurva histerisis dari bahan CoFeB terhadap variasi diameter .....	42
4.6	Kurva temperatur Curie dari bahan CoFeB dengan variasi diameter .....	44
4.7	Kurva histerisis dari bahan CoFeB pada suhu 0 K – 500 K terhadap variasi diameter a) 5 nm b) 10 nm c) 15 nm d) 20 nm e) 25 nm .....	48
4.8	Kurva histerisis dari bahan CoFeB pada suhu 600 K – 800 K terhadap variasi diameter a) 5 nm b) 10 nm c) 15 nm d) 20 nm e) 25 nm .....	51
4.9	Contoh proses perubahan magnetisasi bahan CoFeB pada diameter 5 nm dengan suhu 100 K .....	53

**DAFTAR LAMPIRAN**

	Halaman
A. Diameter Kritis .....	61
B. Simulasi pada kurva histerisis .....	63
C. Simulasi penentuan temperatur Curie .....	64
D. Simulasi untuk pengaruh <i>heat assisted</i> .....	66



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Industri teknologi khususnya dalam bidang komputer saat ini, telah mengalami perkembangan yang begitu cepat. Pesatnya kemajuan teknologi komputer saat ini, diikuti dengan kian maraknya berbagai produk komputer di pasaran yang memiliki spesifikasi dan harga yang beragam. Masyarakat akan bebas memilih sesuai dengan kebutuhan mereka. Masyarakat pada umumnya akan lebih memilih komputer dengan harga terjangkau dan spesifikasi yang tinggi. Hal inilah yang telah menjadi persoalan bagi perusahaan komputer. Perusahaan komputer saat ini mulai mengembangkan spesifikasi produk mereka demi memenuhi permintaan pasar yang ada. Salah satunya adalah dengan meningkatkan penyimpanan data dengan kapasitas yang lebih besar dari sebelumnya. Salah satu media penyimpanan data yang biasa digunakan oleh berbagai komputer adalah suatu media perekam magnetik *hard disk drive* (HDD). *Hard disk drive* (HDD) pada umumnya digunakan sebagai penyimpanan data jangka panjang pada komputer serta merupakan elemen yang tidak terpisahkan dari sistem komputer modern yang ada saat ini. Namun kapasitas *hard disk drive* yang ada dalam komputer saat ini dinilai masih terlalu sedikit kapasitasnya, maka perlu ditingkatkan lagi kapasitasnya agar memenuhi kebutuhan yang ada.

Salah satu upaya untuk memperbesar kapasitas penyimpanan data yaitu dengan cara meningkatkan kerapatan bit (*bit-area-density*). Kerapatan bit yang meningkat berarti akan meningkatkan kapasitas penyimpanan data dari media perekam data tersebut. Kerapatan bit dianggap sebagai salah satu patokan utama dalam perkembangan kemajuan di bidang teknologi media penyimpanan data berbasis magnetik. *Hard disk drive* dalam perkembangannya sampai saat ini, masih mengalami masalah yaitu adanya keterbatasan fisik. Masalah keterbatasan fisik dapat

menyebabkan adanya tingkat ketidakstabilan yang tinggi yang disebabkan oleh adanya pengaruh superparamagnetik yang ditimbulkannya. Efek superparamagnetik merupakan sifat yang muncul pada nanomaterial ferromagnet, sehingga konsekuensinya partikel tersebut akan sangat reaktif terhadap medan magnet luar (Sulanjari *et al.*, 2014). Energi magnetisasi dari media penyimpanan akan mengecil jika kerapatan data ditingkatkan. Akibat dari efek tersebut, jika terjadi perubahan sedikit temperatur akan menyebabkan proses efek superparamagnetik dan mengubah orientasi magnetisasi sehingga menyebabkan informasi data yang tersimpan dalam media penyimpanan menjadi tidak stabil. Kemungkinan terburuknya data dalam media penyimpanan tersebut akan rusak.

Salah satu bahan material yang berpotensi untuk diaplikasikan sebagai media penyimpanan data adalah bahan ferromagnetik. Dalam zaman modern saat ini, penelitian mengenai sifat magnetik pada bahan ferromagnetik masih menarik perhatian para ilmuwan. Hal ini dikarenakan bahan ferromagnetik sangat berpotensi sebagai media penyimpanan data, dengan memanfaatkan sifat domain magnet di dalam bahan ferromagnetik tersebut. Pengetahuan dan pemahaman mengenai struktur domain menjadi hal yang sangat mendasar dalam merealisasikan media penyimpanan data yang mempunyai kemampuan penyimpanan yang besar dan berharga murah.

Pengembangan bahan magnetik terus dilakukan oleh para ilmuwan, baik penelitian secara eksperimen maupun teori komputasi. Penelitian secara teori-komputasi dilakukan untuk mempelajari sifat bahan magnetik dengan lebih baik melalui simulasi mikromagnetik. Simulasi mikromagnetik pada umumnya menggunakan sebuah program yang diproses dalam komputer. Penelitian ini merujuk pada penelitian sebelumnya tentang studi mikromagnetik dinamika struktur domain pada material ferromagnetik Py, Ni, Fe dan Co model nanosphere (Widodo, 2013). Penelitian yang dilakukan oleh Widodo (2013) menunjukkan bahwa diameter kritis dari bahan Py, Ni, Fe, Co berturut-turut adalah 37,5nm, 57,5 nm, 25,0 nm, 50,0 nm. Penelitian yang dilakukan tersebut menyatakan bahwa medan saturasi yang dimiliki bahan Co lebih besar dibandingkan dengan bahan lainnya.

Penelitian ini dilakukan menggunakan simulasi mikromagnetik dengan bahan feromagnetik. Bahan feromagnetik mempunyai magnetisasi yang terjadi secara spontan tanpa kehadiran medan magnet luar. Ada beberapa bahan yang termasuk dalam golongan ini, antara lain adalah besi (Fe), nikel (Ni), cobalt (Co) dan beberapa bahan campuran seperti CoFeB (Sudjatmoko, 2005). Bahan campuran pada umumnya memiliki momen magnetik spontan walaupun berada pada medan magnet eksternal nol. Keberadaan magnetisasi spontan ini menunjukkan bahwa spin elektron dan momen magnetik bahan campuran tersusun secara teratur (Yani *et al.*, 1998). CoFeB merupakan bahan magnet permalloy yang bersifat hard magnetik. Hard magnetik merupakan material magnet yang memiliki medan koersif kuat (Sawitri *et al.*, 2010). Dalam mempelajari sifat magnet yang ada dalam bahan CoFeB dapat digunakan pendekatan secara teori komputasi. Salah satu metode yang bisa digunakan adalah *Heat Assisted Magnetik Recording* (HAMR). HAMR merupakan sistem magnetisasi berbantuan panas untuk menurunkan medan *switching* yang telah dilakukan. HAMR digunakan sebagai pendekatan untuk memungkinkan peningkatan besar dalam kapasitas penyimpanan *hard disk drive*. Mekanisme sistem HAMR secara umum adalah laser-pulsa dengan daya tinggi yang diterapkan pada *storage cell memory* sehingga suhu mendekati temperatur Curie (Sadnawanto, 2014). Temperatur Curie adalah suatu temperatur dimana suatu bahan feromagnetik akan mengalami perubahan menjadi bahan paramagnetik (Purnama *et al.*, 2013). Metode HAMR ini dapat digunakan dengan simulasi mikromagnetik. Simulasi mikromagnetik dapat dilakukan dengan menggunakan metode *finite element* (FE) dan atomistik. Hasil yang diperoleh dari simulasi mikromagnetik diantaranya dapat berupa kurva histeresis, diameter kritis, temperatur Curie dari bahan CoFeB. Program yang dapat digunakan dalam simulasi mikromagnetik antara lain *Vampire* dan *Nmag*. Program *Nmag* merupakan suatu program yang dapat digunakan untuk simulasi mikromagnetik dengan bahan feromagnetik yang dapat dioperasikan dengan baik pada sistem operasi *linux* (Rohman, 2013). Program *Vampire* merupakan salah satu program simulasi mikromagnetik yang memodel bahan secara atomistik. Dalam menggunakan simulasi

mikromagnetik terlebih dahulu disiapkan *script* programnya agar *running* pada program tersebut dapat dijalankan. Simulasi mikromagnetik dengan bahan feromagnetik dibutuhkan pemahaman tentang konsep magnetik bahan yang digunakan dengan lebih baik. Karakteristik bahan magnetik dapat berupa seperti magnetisasi saturasi, konstanta anisotropi, konstanta *exchange*. Sifat magnetik bahan tersebut dapat diinputkan ke dalam simulasi mikromagnetik. Kemudian hasil dari simulasi tersebut diolah dengan program Origin dan Mayavi atau Pov-Ray. Origin merupakan program yang digunakan untuk menggambarkan kurva *hysteresis*. Sedangkan Mayavi dan Pov-Ray digunakan untuk menampilkan *domain wall* dari struktur *nanosphere* bahan CoFeB. Penelitian ini bertujuan untuk memahami diameter kritis yang dimiliki oleh bahan CoFeB dan pengaruh medan luar terhadap medan koersivitas dari bahan CoFeB, serta pengaruh *heat assisted* terhadap medan koersivitas. Oleh karena itu hasil penelitian dengan pendekatan teori-komputasi ini diharapkan dapat digunakan untuk prediksi dan optimasi dalam penelitian eksperimen lanjutan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berikut ini permasalahan yang akan dibahas pada penelitian investigasi sifat-sifat magnet bahan CoFeB dan pengaruh penerapan *heat assisted* dengan menggunakan simulasi mikromagnetik, antara lain:

1. Bagaimana analisa karakteristik diameter kritis bahan CoFeB berdasarkan hasil simulasi?
2. Bagaimana karakteristik magnetik bahan CoFeB berdasarkan analisis kurva *hysteresis* dengan variasi diameter yang ada?
3. Bagaimana analisa temperatur Curie yang dihasilkan melalui simulasi mikromagnetik?
4. Bagaimana perubahan medan koersivitas setelah adanya pengaruh *heat assisted* secara simulasi mikromagnetik?

### 1.3 Batasan Masalah

Berikut ini adalah batasan masalah dalam penelitian investigasi sifat-sifat magnet bahan CoFeB dan pengaruh penerapan *heat assisted* dengan menggunakan simulasi mikromagnetik, antara lain:

1. Program Simulasi mikromagnetik yang digunakan adalah program *Nmag* dan *Vampire* (atomistik model).
2. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah CoFeB.
3. Struktur model bahan yang digunakan adalah *nanosphere*.
4. *Heat assisted* digunakan untuk melihat pengaruh perubahan suhu terhadap kurva histerisis

### 1.4 Tujuan

Tujuan diadakannya penelitian investigasi sifat-sifat magnet bahan CoFeB dan pengaruh penerapan *heat assisted* dengan menggunakan simulasi mikromagnetik antara lain mengetahui energi sistem yang terbentuk serta pengaruh *heat assisted* terhadap medan koersivitas. Serta menganalisis keunggulan potensi bahan CoFeB sebagai bahan penyimpanan data berbasis magnet secara simulasi mikromagnetik.

### 1.5 Manfaat

Manfaat dari hasil penelitian investigasi sifat-sifat magnet bahan CoFeB dan pengaruh penerapan *heat assisted* dengan menggunakan simulasi mikromagnetik yang dapat digunakan sebagai acuan bahan dasar dari pembuatan media penyimpanan data berbasis magnetik yang mempunyai peluang untuk meningkatkan kapasitas yang besar.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sifat dan Bahan Magnet

Magnet adalah suatu obyek yang mempunyai suatu medan magnet. Benda yang dapat menarik besi atau baja inilah yang disebut magnet. Magnet dapat dibuat dari bahan besi, baja, dan campuran logam. Magnet terdiri atas magnet-magnet kecil yang memiliki arah yang sama (tersusun teratur). Magnet memiliki dua kutub, yaitu: utara dan selatan. Kutub magnet adalah daerah yang berada pada ujung-ujung magnet dengan kekuatan magnet yang paling besar berada pada kutub-kutubnya. Satuan intensitas magnet menurut sistem Satuan Internasional (SI) adalah Tesla dan SI unit untuk total fluks magnetik adalah weber ( $1 \text{ weber/m}^2 = 1 \text{ tesla}$ ) yang mempengaruhi luasan satu meter persegi.

Medan magnet adalah daerah disekitar yang masih merasakan adanya gaya magnet. Jika sebatang magnet diletakkan dalam suatu ruang, maka terjadi perubahan dalam ruang ini yaitu dalam setiap titik dalam ruang akan terdapat medan magnetik. Arah medan magnetik di suatu titik didefinisikan sebagai arah yang ditunjukkan oleh kutub utara jarum kompas ketika ditempelkan pada titik tersebut (Sawitri *et al.*, 2010)

Bahan magnetik adalah suatu bahan yang memiliki sifat kemagnetan dalam komponen pembentuknya. Berdasarkan nilai suseptibilitas, bahan magnetik terdiri atas tiga kategori, yaitu paramagnetik, feromagnetik dan diamagnetik (Warsiti, 2005). Suseptibilitas magnetik merupakan kesebandingan antara vektor medan magnetik dan magnetisasi pada suatu bahan (Subekti, 2010).

#### 1. Paramagnetik

Bahan Paramagnetik adalah bahan-bahan yang memiliki suseptibilitas yang positif dan sangat kecil. Paramagnetisme muncul dalam bahan yang atom-atomnya



memiliki momen magnetik permanen yang berinteraksi satu sama lain secara lemah. Apabila tidak terdapat medan magnetik luar, momen magnetik ini akan berorientasi acak. Dengan daya medan magnetik luar, momen magnetik ini cenderung menyetarakan sejajar dengan medannya. Pada medan magnetik luar yang kuat dalam temperatur yang sangat rendah, hampir seluruh momen akan disetarakan dengan medannya. Pada temperatur biasa pergerakan atom cenderung mempertahankan arah acak momen magnetik.

## 2. Diamagnetik

Bahan diamagnetik merupakan bahan yang memiliki nilai suseptibilitas negatif yang sangat kecil. Bahan ini ialah bahan dimana momen magnetik dari seluruh elektron dalam setiap atom saling meniadakan, yang membuat setiap atom memiliki momen magnetik nol tanpa adanya medan luar. Dalam medan luar, momen magnetik yang sangat kecil diinduksikan dan cenderung memperlemah medan tersebut. Pengaruh ini tidak tergantung pada temperatur. Superkonduktor merupakan contoh bahan diamagnetik sempurna dengan suseptibilitas sebesar  $-1$ .

## 3. Feromagnetik

Bahan feromagnetik adalah merupakan bahan yang memiliki nilai suseptibilitas magnet positif, yang sangat tinggi. Dalam bahan feromagnetik ini sejumlah kecil medan magnet luar dapat menyebabkan derajat penyetarakan yang tinggi pada momen dipol magnetik atomnya. Penyetarakan ini dapat bertahan meskipun medan pemagnetannya telah hilang. Pada temperatur di atas temperatur kritis, yang disebut temperatur Curie, gerak termal acak sudah cukup besar untuk merusak keteraturan penyetarakan ini dan bahan feromagnetik berubah menjadi para magnetik (Tipler, 2001).

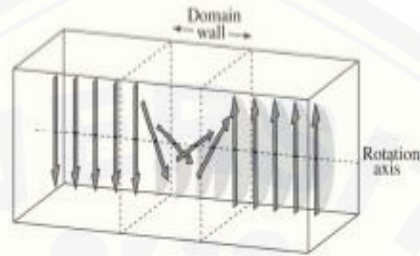
## 2.2 Domain Magnet dan Domain-wall

Domain adalah daerah-daerah mikroskopik magnetik tempat atom-atom tersusun atau terkelompokkan. Dalam magnetik kristal, sebuah bahan magnet dapat disusun atas beberapa domain yang dipisahkan oleh dinding domain. Domain-domain tersebut terorientasi dalam arah random hingga mengalami magnetisasi dalam medan eksternal. Bahan feromagnetik jika diberi medan magnet luar, maka domain-domain tersebut akan terorientasi. Jika magnetisasi domain ini tetap (tidak berubah) sekalipun medan eksternalnya dihilangkan, maka bahan tersebut dikatakan menjadi permanen magnet. Sebuah bahan magnet dapat berubah menjadi bahan non-magnetik, jika bahan tersebut dipanaskan sampai pada temperatur tertentu hingga domain-domain yang ada perlahan-lahan hilang. Temperatur dimana sifat magnetik mengalami perubahan disebut dengan titik Curie (Ismail, 2013).

Konsep domain magnet dalam bahan feromagnetik pertama kali dinyatakan oleh P. Weiss pada tahun 1907 yang memberikan pernyataan bahwa ada sejumlah wilayah yang kecil yang disebut dengan magnetik domain *wall*. Masing-masing domain *wall* menghasilkan magnetisasi saturasi. Arah magnetisasi dari domain yang berbeda tidak perlu paralel. Kehadiran dari domain dapat diterangkan dengan pengamatan beberapa sampel feromagnetik tentang magnetisasi saturasinya di atas keseluruhan sampel melalui penerapan medan magnetik sangat lemah. Dalam masalah ini medan magnetik tidak harus mengarahkan momen magnetik namun hanya mengarahkan domain magnetik. Hal ini juga memungkinkan untuk magnetisasi menjadi nol dalam tidak adanya medan magnet. Dalam setiap arah domain, magnetisasi sampai pada saturasi, perbedaan arah dari magnetisasi di setiap domain menyebabkan magnetisasi dibatalkan dan memberikan magnetisasi nol (Rohman, 2013).

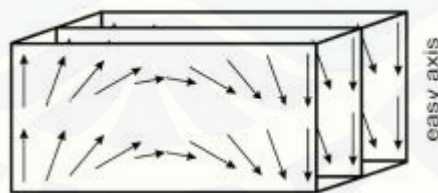
Tahun 1927 Felix Bloch menyampaikan konsep magnetik domain-wall yaitu daerah transisi yang membatasi antara domain magnet dalam material feromagnetik.

*Bloch* mengamati konfigurasi spin dalam domain-wall berubah secara perlahan-lahan pada bidang Kristal dan dikenal sebagai *Bloch wall*. Seperti diilustrasikan pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Konfigurasi momen magnet dalam domain-wall berubah secara perlahan-lahan membentuk struktur domain-wall  $180^\circ$  kenal dengan *Bloch wall* (Kittel, 1996).

*Bloch wall* umumnya ditemukan pada material ferromagnet berbentuk *bulk*, dimana spin berotasi pada bidang yang sejajar dengan domain-wall (Mardona, 2012). Untuk material ferromagnet bentuk lapisan tipis (*thin film*) dikenal dengan *Neel wall* dengan orientasi spin sepanjang bidang *thin film*. *Neel wall* diilustrasikan pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Struktur *Neelwall* dimana orientasi spinnya terjadi pada bidang *thin film* (Widodo, 2013).

Pembentukan domain-wall magnet pada material ferromagnetik merupakan kompetisi antara energi *exchange* dan energi anisotropi. Energi *exchange* berasal dari interaksi antara spin atom dengan tetangganya. Energi *exchange* cenderung untuk mempertebal domain-wall namun karena transisi arah spin menyebabkan efek

anisotropi meningkat yang cenderung untuk membuat tipis *domain wall*. Pada kondisi kesetimbangan, energi dan lebar *domain-wall* dapat ditentukan dari energi *exchange* dan energi anisotropi.

Kompetisi antara energi *exchange* dan energi anisotropi ditandai dengan adanya *exchange length*.

$$l_{ex} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_S^2}} \quad (2.1)$$

Lebar *domain wall*  $\delta$  merupakan karakteristik dari lebar daerah transisi yang terjadi antara dua domain magnetik

$$\delta = \pi \sqrt{\frac{A}{K}} \quad (2.2)$$

Besarnya energi *domain wall* per unit area pada bahan feromagnetik dengan kristal kubik

$$\gamma_{DW} = 4\sqrt{AK} \quad (2.3)$$

Di mana  $\gamma_{DW}$  adalah energi *domain* per unit area ( $\text{Jm}^{-1}$ ),  $K$  adalah konstanta anisotropi ( $\text{J/m}^3$ ), dan  $A$ =konstanta *exchange stiffness* ( $\text{J/m}$ ) (Widodo, 2013).

## 2.3 Energi Sistem Feromagnetik

### 2.3.1 Energi *Exchange*

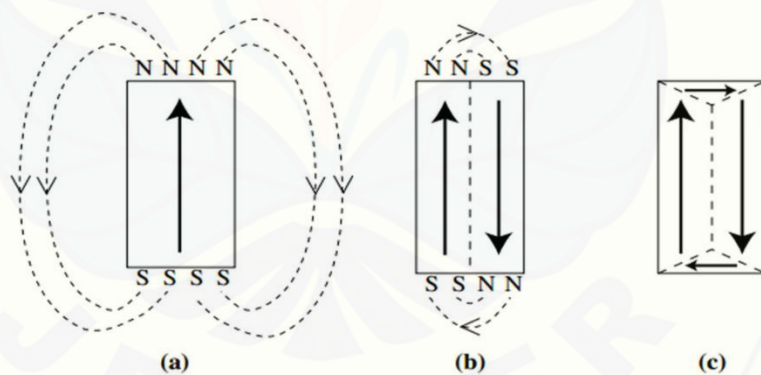
Energi *exchange* merupakan energi yang timbul dari interaksi spin dengan spin tetangganya melalui *exchange coupling* (Djuhana *et al.*, 2013). Energi *exchange* ( $E_{ex}$ ) dari interaksi antara spin dalam material feromagnet dapat dinyatakan

$$E_{ex} = -2J \sum_{ij} S_i \cdot S_j \quad (2.4)$$

dimana  $S_i$  dan  $S_j$  adalah unit vektor dua spin atom yang berinteraksi. Persamaan 2.4 disebut juga dengan Heisenberg model. Interaksi dua spin tergantung pada spin parallel atau antiparalel yang harus mengikuti prinsip larangan Pauli yaitu tidak diperkenankan ada dua elektron yang mempunyai bilangan kuantum yang sama pada tempat dan waktu yang sama (Widodo, 2013).

### 2.3.2 Energi Magnetostatik

Energi magnetostatik pada material feromagnetik berasal dari interaksi muatan pada kutub-kutub magnet mirip dengan interaksi muatan dalam medan listrik (Djuhana *et al.*, 2013). Gambar 2.3 mengilustrasikan bahwa magnetisasi menyebabkan dipol-dipol berperilaku sebagai magnet dengan medan magnetik di sekitarnya. Medan magnetik tersebut dikenal dengan medan demagnetisasi (*demagnetizing field*),  $H_d$ . Sehingga energi magnetostatik sering juga disebut sebagai energi demagnetisasi.



Gambar 2.3 Pengurangan energi magnetostatik atau energi demagnetisasi akibat orientasi arah dari dipol-dipol magnet (Jiles, 1998).

Besarnya energi magnetostatik sangat bergantung pada jumlah dipol serta arah orientasi antara dipol-dipol. Ketika dipol-dipol dari material magnet memiliki orientasi arah yang sama satu dengan lainnya, energi magnetostatiknya besar, seperti pada Gambar 2.3 (a), dibandingkan dengan material magnet dengan dipol-dipol anti paralel satu dengan lainnya, Gambar 2.3 (b). Sedangkan keadaan dipol-

dipol seperti pada Gambar 2.3 (c) menyebabkan energi magnetostatik pada keadaan ini adalah minimum.

Energi magnetostatik  $E_d$ , dianggap sebagai besarnya energi magnetisasi di dalam medan demagnetisasi, yang dijelaskan oleh

$$E_d = -\frac{1}{2}\mu_0 \int_v H_d M dV \quad (2.5)$$

Dimana  $H_d$  = medan demagnetisasi dan  $M$  = magnetisasi (Widodo, 2013).

### 2.3.3 Energi Anisotropy

Energi *anisotropy* adalah energi yang timbul karena pengaruh orientasi arah magnetisasi dan sumbu kristalografi (*crystallographic axes*) (Djuhana *et al.*, 2013). Energi *anisotropy* ini berasal dari interaksi spin-orbit dan tergantung pada orientasi arah magnetisasi relatif terhadap arah kristalografi. Jadi, besarnya energi *magneto crystalline anisotropy* tergantung pada karakteristik kristalografi dari material. Ada dua jenis *magneto crystalline anisotropy* yakni *uniaxial anisotropy* dan *cubic anisotropy*.

### 2.3.4 Energi Zeeman

Energi Zeeman adalah energi yang berasal dari interaksi medan magnetisasi atau momen magnet dengan medan magnet luar (Djuhana *et al.*, 2013). Besarnya energi Zeeman diberikan oleh:

$$E_s = -\mu_0 \int_v H_{ext} M dv \quad (2.6)$$

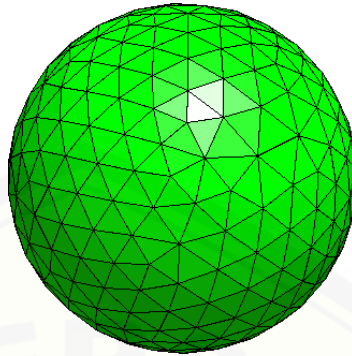
Dimana  $H_{ext}$  merupakan medan eksternal yang diberikan pada material. Nilai energi Zeeman akan terminimalisasi jika orientasi arah magnetisasi searah dengan arah medan yang diberikan (Widodo, 2013).

## 2.4 Simulasi Mikromagnetik

Seperti yang telah dijelaskan, konsep dasar mikromagnetik adalah menggunakan konsep *continuum* yaitu suatu konsep fisika untuk menjelaskan sifat-sifat material feromagnetik pada skala mikro menggunakan pendekatan mekanika klasik dengan fungsi energi sistem yang bersifat kontinu pada kondisi kesetimbangan. Dengan menggunakan konsep *continuum* memungkinkan untuk perhitungan distribusi magnetisasi pada sampel dengan bentuk acak. Perhitungannya berdasarkan prinsip minimalisasi pada fungsi energi sistem, sehingga perubahan magnetisasi dan profil energi dapat ditentukan (Ismail, 2013)

### 2.4.1 Program simulasi mikromagnetik Finite Elements (NMAG)

Program ini NMAG 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 penggalian di *.vtk* file digunakan lebih lanjut untuk visualisasi. Untuk menentukan 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 Mayavi. Dalam simulasi kita dapat membuat analisis loop histeresis untuk berbagai bentuk partikel dalam skala nanometrik. Bentuk umum yang biasa dipakai adalah: silinder, bola, ellipsoid dan kubus, yang memiliki volume yang sama. Untuk menghasilkan mesh, pertama membuat file geometri (*.geo*) yang berisi primitif untuk mengembangkan mesh yang diinginkan. Dengan menggunakan file geometri dan Netgen. File output dari Netgen adalah format *.neutral*, tetapi menggunakan perintah *nmeshimport* kami dikonversi ke dalam format file *.nmesh.h5* (Lefter,2012).



Gambar 2.4 Bentuk *sphere* dalam Finite Elemen (Fangohr *et al.*, 2009).

#### 2.4.2 Program simulasi mikromagnetik Vampire

*Vampire* merupakan simulasi atomistik untuk nanomaterial magnetik. Software bertujuan untuk membuat simulasi atomistik dari bahan magnetik yang tersedia secara open source. Software dirancang dengan kemudahan dalam penggunaan pikiran dan termasuk serangkaian luas parameter masukan untuk mengontrol simulasi melalui file *input*. Software ini dapat digunakan untuk menentukan temperatur Curie pada suatu bahan. *Vampire* dapat berjalan pada komputer berbasis *Linux* maupun *Windows*. Beberapa keuntungan penting dari *Vampire* adalah didasarkan pada metode elemen hingga, yang cocok untuk komputasi struktur non-kubus. Visualisasi dari file output, yang meliputi data magnetisasi, dapat diolah menggunakan program Pov-Ray. Hasil simulasi dapat kita olah sehingga memperoleh kurva histeresis (Evans *et al.*, 2014).

### 2.5 Dinamika Magnetisasi

Dinamika magnetisasi pertama kali diperkenalkan oleh *Landau* dan *Lifshitz* (*LL*) pada tahun 1935. Pada perkembangannya, persamaan *LL* sangat baik dalam menjelaskan dinamika magnetisasi pada kondisi energi kecil dan dengan faktor redaman yang kecil. Pada tahun 1955, *Gilbert* memformulasikan kembali persamaan *LL* dengan memperhitungkan parameter redaman dan dikenal sebagai persamaan *Landau-Lifshitz-Gilbert* (*LLG*) (Mardona, 2012).



Konsep dasar dinamika magnetisasi adalah suatu momen magnet  $\mathbf{m}$  yang mendapatkan medan eksternal  $\mathbf{H}$  sehingga menghasilkan torka dengan arah tegak lurus terhadap momen magnet dan medan magnet eksternal. Torka ini mengakibatkan momen magnet melakukan gerak presisi (*precession motion*) disekitar arah dari medan magnet eksternal yang diberikan. Hubungan antara torka dan perubahan momentum angular terhadap waktu dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{m} \times \mathbf{H} \quad (2.7)$$

Pada momen magnet sendiri terdapat orde atom yang memiliki hubungan dengan momentum angular yang diekpresikan sebagai berikut :

$$\mathbf{m} = -\gamma\mathbf{L} \quad (2.8)$$

dimana,  $\gamma = 2,11 \times 10^5 \text{mA}^{-1}\text{s}^{-1}$  ialah nilai absolut dari *gyromagnetik rasio* untuk sebuah elektron :

$$\gamma = g \frac{|e|\hbar}{2m_e c} \quad (2.9)$$

dimana,  $g \approx 2$  adalah faktor *Lande*, muatan elektron  $e = -1,6 \times 10^{-19} \text{C}$  dan massa elektron  $m_s = 9,1 \times 10^{-31} \text{kg}$ , kecepatan cahaya  $c = 3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ . Maka untuk persamaan momen magnetik  $\mathbf{m}$  terhadap waktu dapat ditulis:

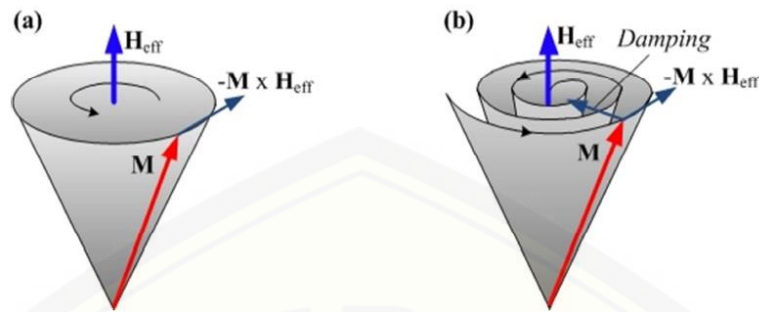
$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = -\gamma\mathbf{m} \times \mathbf{H} \quad (2.10)$$

Dapat diasumsikan untuk spin momen magnet yang bergerak sepanjang elemen volume  $dV$ , maka dapat persamaannya dapat dituliskan :

$$\frac{1}{dV} \frac{d\sum \mathbf{m}}{dt} = -\gamma \frac{d\sum \mathbf{m}}{dV} \times \mathbf{H} \quad (2.11)$$

dimana,  $\mathbf{M} = \frac{d\sum \mathbf{m}}{dV}$ , sehingga persamaan (2.11) menjadi :

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H} \quad (2.12)$$



Gambar 2.5 Gerak presisi dari momen magnet terhadap medan efektif. (a) tanpa redaman, (b) dengan redaman (*damping*) (Widodo, 2013).

### 2.5.1 Persamaan Landau-Lifshits (LL)

Pada dasarnya, dinamika gerak spin magnet dapat digambarkan sebagai gerak rotasi dari momen magnet terhadap arah medan magnet efektif  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$  pada saat keadaan equilibrium. Maka persamaannya dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} \quad (2.13)$$

Dari persamaan (2.13) tergambar fenomena yang mendeskripsikan bahwa tidak ada kecenderungan gerak dari spin magnet untuk menyearahkan diri terhadap  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ . Seperti yang diilustrasikan pada gambar (2.5) (a). Landau-Lifshitz telah menyempurnakan dengan memasukkan faktor redaman pada gambar (2.5) (b) ke persamaan (2.13) sehingga menjadi :

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} \frac{\lambda}{|\mathbf{M}|} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) \quad (2.14)$$

dimana  $\lambda > 0$  merupakan faktor redaman Landau-Lifshitz dan  $|\mathbf{M}| = M_s$ . Persamaan (2.14) tersebut dikenal sebagai persamaan Landau-Lifshitz (LL) (Ismail, 2013).

### 2.5.2 Persamaan Landau-Lifshits-Gilbert (LLG)

Pada sebuah pendekatan yang berbeda diusulkan oleh Gilbert pada tahun 1955. Hal tersebut dilakukannya setelah mengamati adanya fenomena disipasi yang menyebabkan persamaan LL yang tidak akurat untuk kasus faktor redaman yang

besar. Sehingga Gilbert menambahkan persamaan torca :

$$\frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.15)$$

Sehingga persamaan (2.14) dapat ditulis :

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.16)$$

dimana  $\alpha > 0$  adalah konstanta redaman Gilbert. Maka persamaan tersebut dikenal sebagai persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert. Jika persamaan (2.16) dikalikan  $\mathbf{M}$ , maka akan diperoleh bentuk persamaan:

$$\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) + \mathbf{M} \times \left( \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right) \quad (2.17)$$

Dengan menggunakan sifat identitas vektor yaitu  $\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})\mathbf{b} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})\mathbf{c}$  dan menganggap  $\mathbf{M} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = 0$ , maka persamaannya (2.17) dapat dituliskan kembali sebagai berikut:

$$\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) - \alpha M_s \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.18)$$

Maka dapat disubstitusikan persamaan (2.18) pada persamaan (2.16), maka diperoleh :

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} - \frac{\gamma \alpha}{M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) - \alpha^2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.19)$$

Sehingga, persamaan terakhir dapat diekspresikan menjadi :

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1+\alpha^2)} (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) - \frac{\gamma}{(1+\alpha^2)M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) \quad (2.20)$$

Persamaan (2.20) merupakan ekspresi dari persamaan Landau-Lifshitz. Pada dalam persamaan Gilbert, dengan mengasumsikan :

$$\gamma/L = \frac{\gamma}{(1+\alpha^2)}, \lambda = \frac{\gamma}{(1+\alpha^2)}$$

Suku pertama pada sisi kanan pada persamaan (2.20) menjelaskan proses gerakan precesi dari spin berotasi karena pengaruh medan magnet eksternal (*gyromagnetik precession*) atau dikenal dengan *Larmor precession* dan suku kedua menjelaskan efek disipasi dari gerakan precesi atau disebut juga *the damping effect of precession*. Untuk nilai faktor damping  $\alpha$  yang kecil, maka suku  $(1 + \alpha^2)$  sama

dengan satu. Sehingga persamaan LLG dapat disederhanakan menjadi persamaan LL (Widodo, 2013).

## 2.6 Struktur Domain

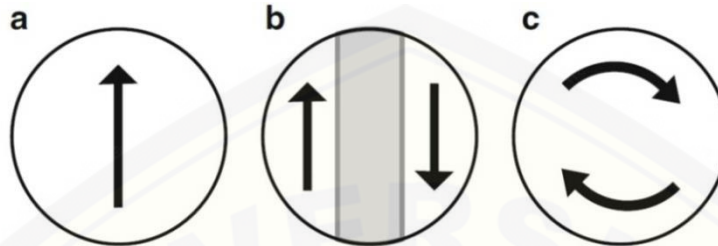
### 2.6.1 *Single Domain*

Stoner dan Wohlfarth pada tahun 1948 mengusulkan model yang menggambarkan fenomena magnetik pada partikel kecil (*small particles*). Model ini menganggap bahwa partikel magnetik memiliki domain yang homogen (domain tunggal) dengan bentuk elipsoid. Pada keadaan ini, magnetisasi dihasilkan oleh dipol-dipol yang searah (baik besar maupun arah). Magnetisasi total dari sistem merupakan penjumlahan vektor dipol individu yang terkandung di dalam sistem. Sehingga magnetisasi sistem dapat digambarkan sebagai vektor tunggal  $|M| = \sum_i^N m_i = Nm$ . Model ini menganggap spin-spin dalam sistem berinteraksi sangat lemah, dalam arti lain, model ini mengabaikan interaksi *exchange* yang terjadi dalam sistem. 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).

### 2.6.2 *Two Domain dan Vorteks-state*

Untuk partikel magnetik berbentuk bola, setelah melewati daerah diameter tertentu, yang dikenal sebagai diameter kritis (*critical diameter*), umumnya struktur domainnya berubah dari keadaan *single-domain* menjadi *two-domain* atau *vorteks*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 (b) dan (c). 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*.



Gambar 2.6 Tiga kemungkinan keadaan konfigurasi domain magnet saat energi minimum (*groundstate*) dari partikel magnet bola (*spherical magnetik particle*). (a) *single-domain*, (b) *two-domain*, (c) *vortek-state* (Widodo,2013)

### 2.7 Diameter Kritis (*Critical Diameter*)

Estimasi awal mengenai diameter kritis *single-domain* dipaparkan oleh Kittel 1996 dengan cara membandingkan energi yang diperlukan untuk membuat dinding domain terhadap pengurangan energi magnetostatik atau energi demagnetostatik selama penciptaan/pembuatan struktur domain, diberikan:

$$DC_1 = \left( \frac{9\gamma_w}{2\pi M_s^2} \right) \quad (2.21)$$

Dengan  $\gamma_w = 2\sqrt{AK}$  adalah energi permukaan *Blochwall* dalam material,  $A$  adalah konstanta *exchange*, dan  $K$  adalah konstanta anisotropi,  $M_s$  adalah magnetisasi saturasi. Kemudian, Brown, menghitung secara rinci batas ukuran diameter kritis untuk keadaan struktur *single-domain* dengan meninjau energi minimumnya dengan menggunakan persamaan (2.22) sebagai berikut:

$$DC_2 = 7,211 \sqrt{\frac{2A}{\mu M_s^2}} = 7,211 l_{ex} \quad (2.22)$$

dengan,  $l_{ex} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}}$ ,  $l_{ex}$  adalah *exchange length*.

Selanjutnya, R Skomski, memprediksi diameter kritis untuk struktur *single-domain* pada temperatur ruang dengan persamaan :

$$DC_3 = \frac{72\sqrt{AK}}{\mu_0 M_s^2} \quad (2.23)$$

Sedangkan untuk energi sistem, Brown secara terperinci telah memprediksi energi transisi yang terjadi dari keadaan struktur *single-domain* menjadi *multi-domain*. Untuk material *soft-magnet* maka, diberikan oleh :

$$DC_4 = \frac{9,0584 \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}}}{\left(1 - 2,8075 \frac{2K}{\mu_0 M_s^2}\right)} = \frac{9,0584}{1 - 2,8075k} l_{ex} \quad (2.24)$$

Dengan  $k = \frac{2K}{\mu_0 M_s^2}$ , adalah *Hardness parameter*.

Sedangkan untuk *Hard-magnet*:

$$DC_5 = 9\pi \sqrt{\frac{2A(K_1 + 2\sigma\mu_0 M_s^2)}{\mu_0 M_s^2(3\sigma - 2)}} = \frac{9\pi\sqrt{k+4\sigma}}{\sqrt{2(3\sigma-2)}} l_{ex} \quad (2.25)$$

Dengan  $\sigma = 0,785398$  (Widodo, 2013).

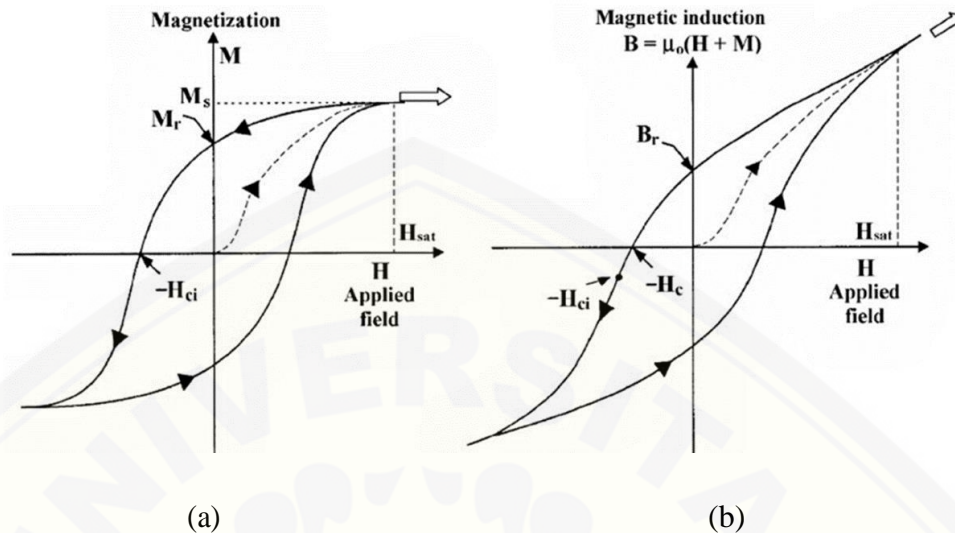
## 2.8 Kurva Histerisis

Histeresis adalah suatu sifat yang dimiliki oleh sistem dimana sistem tidak secara cepat mengikuti gaya yang diberikan kepadanya, tetapi memberikan reaksi secara perlahan, atau bahkan sistem tidak kembali lagi ke keadaan awalnya (Yani *et al.*, 1998). Karakteristik suatu material feromagnetik dapat dilihat dari bentuk *loop* kurva histeresisnya. Kurva histeresis dapat diperoleh dengan memetakan magnetisasi material  $\mathbf{M}$  untuk besar kuat medan magnet yang diberikan  $\mathbf{H}$ . Cara

lain adalah dengan memetakan induksi medan magnet  $\mathbf{B}$  di dalam material feromagnetik terhadap kuat medan magnet  $\mathbf{H}$  yang berbeda-beda. Gambar 2.7 (a) merupakan kurva histeresis antara  $\mathbf{M}$  dan  $\mathbf{H}$  atau antara  $\mathbf{J}$  ( $\mathbf{J} = \mu_0 \mathbf{M}$ ) dan  $\mathbf{H}$  disebut juga dengan kurva histeresis intrinsik. Sedangkan Gambar 2.7 (b) adalah kurva histeresis antara  $\mathbf{B}$  dan  $\mathbf{H}$  yang biasanya disebut sebagai kurva histeresis normal. Kedua cara tersebut memberikan informasi yang sama karena antara  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{M}$  dan  $\mathbf{H}$  memenuhi persamaan:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.26)$$

Dari kurva histeresis Gambar 2.7 terlihat bahwa material feromagnetik pada awalnya belum termagnetisasi. Medan magnet  $\mathbf{H}$  yang diberikan pada material menyebabkan magnetisasi meningkat sebanding dengan medan magnet  $\mathbf{H}$ . Pertambahan nilai magnetisasi  $\mathbf{M}$  ini diakibatkan oleh pergerakan dari domain magnet. Jika besar medan magnet  $\mathbf{H}$  yang diberikan meningkat terus-menerus, magnetisasi akhirnya akan mencapai keadaan jenuh (saturasi). Besarnya nilai magnetisasi pada keadaan saturasi ini dikenal sebagai magnetisasi saturasi  $M_s$ . Sedangkan besar medan yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan saturasi dikenal sebagai medan saturasi  $\mathbf{H}_{sat}$ . Pada keadaan ini seluruh momen magnet membentuk domain tunggal yang terorientasi searah dengan medan magnet  $\mathbf{H}$  yang diberikan.

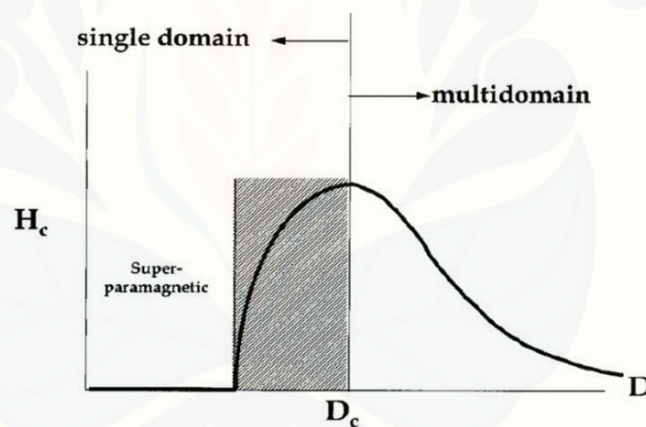


Gambar 2.7 Kurva histeresis untuk material feromagnetik. (a)  $\mathbf{M}$  terhadap  $\mathbf{H}$  :  $M_r$  adalah magnetisasi remanen;  $H_{ci}$  adalah koersivitas intrinsik;  $M_s$  adalah magnetisasi saturasi; (b)  $\mathbf{B}$  terhadap  $\mathbf{H}$  :  $B_r$  adalah remanen;  $H_c$  adalah koersivitas (Yani *et al.*, 1998).

Dari keadaan saturasi, saat medan magnet eksternal  $\mathbf{H}$  direduksi hingga pada keadaan yang dikenal sebagai medan nukleasi (*nucleation field*). Medan nukleasi  $H_n$  didefinisikan sebagai medan awal yang membuat keadaan struktur domain tidak lagi sejajar satu dengan lainnya (saturasi). Dari keadaan ini, kemudian  $\mathbf{H}$  direduksi hingga menjadi nol, ternyata kurva tidak kembali seperti semula tetapi masih memiliki magnetisasi yang tersisa, yang disebut magnetisasi remanen  $M_r$ . Pada keadaan ini, sebagian domain-domain magnet tidak kembali ke orientasi sebelum diberi medan eksternal  $\mathbf{H}$ , sehingga material termagnetisasi sebagian. Proses dilanjutkan dengan membalik arah medan magnet  $\mathbf{H}$  yang diberikan, dan terus ditambah sehingga dicapai nilai magnetisasinya menjadi nol. Nilai medan arah balik  $\mathbf{H}$  pada saat  $\mathbf{M}=0$  disebut koersivitas. Pada keadaan ini, orientasi domain magnet kembali acak.

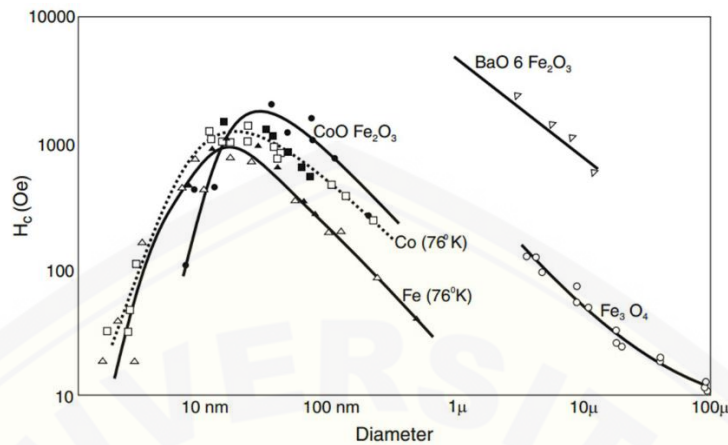


Pada skala nano, terjadinya koersivitas saat proses magnetisasi material feromagnetik adalah terhambatnya gerak domain akibat gesekan antar domain, serta disebabkan oleh ukuran dari material itu sendiri. Di mana ketika ukuran material makin kecil, batas-batas domain menjadi hilang sehingga domainnya mengelompok menjadi satu keadaan, *single-domain particle*. Karakteristik mengenai perubahan medan koersivitas terhadap ukuran partikel material magnetik di perlihatkan pada Gambar 2.8. Gambar 2.8 terbagi dari tiga daerah; (1) daerah superparamagnetik, dengan medan koersivitas  $H_c=0$ , (2) daerah antara superparamagnetik hingga diameter kritis  $D_c$ , keadaan struktur *single-domain*, (3) daerah di atas diameter diameter kritis  $D_c$ , keadaan struktur *multi-domain*.



Gambar 2.8 Kurva perbandingan nilai medan koersivitas terhadap diameter partikel (Mardona, 2012).

Gambar 2.9 memperlihatkan contoh lain dari hasil eksperimen mengenai hubungan antara besar medan koersivitas terhadap ukuran partikel dari material Fe, Co, dan  $\text{CoFe}_2\text{O}_3$  pada suhu nitrogen cair



Gambar 2.9 Kurva hubungan besar nilai medan koersivitas terhadap ukuran dari partikel material magnetik (Cullity, 2009).

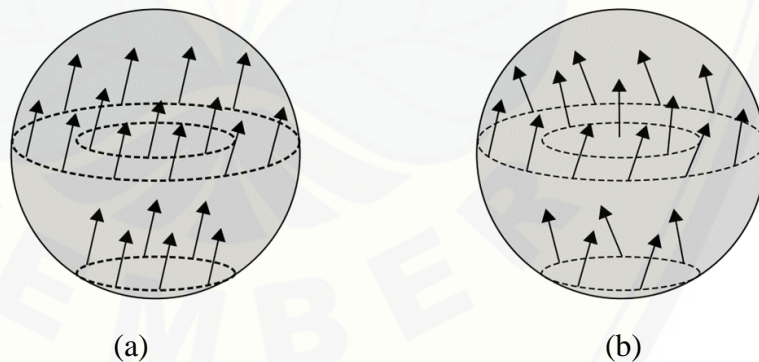
Ada dua jenis koersivitas. Pertama, untuk kurva histeresis **M-H**, koersivitas intrinsik ( $H_{ci}$ ), yaitu kuat medan magnet yang diberikan untuk membuat magnetisasi suatu material menjadi nol.  $H_{ci}$  digunakan pada kurva histeresis **M-H**. Kedua, pada kurva histeresis **B-H**, koersivitas ( $H_c$ ) adalah kuat medan magnet yang diperlukan untuk membuat induksi magnet material menjadi nol. Terdapat perbedaan yang jelas antara  $H_c$  dan  $H_{ci}$ , khususnya pada material *hard-magnet*.

Dari uraian di atas diharapkan dapat dikarakterisasi sifat magnetik suatu material dari *loop* kurva histeresis yang terbentuk berdasarkan parameter magnetisasi saturasi  $M_r$ , koersivitas  $H_c$  ataupun koersivitas intrinsik  $H_{ci}$ , serta remanen  $M_r$ . *Soft-magnet* memiliki nilai koersivitas dan remanen yang kecil, sehingga bentuk *loop* kurva sangat pipih. Sedangkan untuk *hard-magnet* memiliki nilai koersivitas dan remanen yang cukup besar, dengan bentuk *loop* kurva yang besar. Bentuk *loop* kurva histeresis yang dibutuhkan pada aplikasi perekam magnetik adalah magnetisasi remanen besar, koersivitas sedang, dan idealnya memiliki bentuk persegi.

## 2.9 Mekanisme pembalikan

Ada dua jenis mekanisme pembalikan yang dibahas pada bagian ini. Pertama, model rotasi koheren (*coherent rotation*) di mana mekanisme pembalikannya terjadi secara seragam dan berputar secara serempak. Selama proses pembalikan, spin-spin dalam partikel selalu mempertahankan keadaan agar tetap paralel antara satu dengan lainnya seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.10 (a). Model pembalikan ini terjadi pada partikel berstruktur *single-domain* atau yang dikenal sebagai partikel *Stoner-Wohlfarth*. Sehingga mode ini sering dikenal sebagai model Stoner-Wohlfarth.

Kedua, model *curling*, seperti pada Gambar 2.10 (b). Pada model ini, selama proses pembalikan, spin-spin dari partikel membentuk struktur *vortex*. Model ini terjadi pada sebagian besar partikel magnetik berbentuk bola dengan diameter di atas diameter kritis. Untuk partikel dengan ukuran yang besar, kontribusi energi *exchange* lebih mendominasi dibandingkan energi magnetostatik, sehingga mekanisme pembalikan mode *curling* lebih dipilih sistem dibandingkan rotasi koheren.



Gambar 2.10 Mekanisme pembalikan magnetisasi partikel magneti berbentuk bola. (a) rotasi koheren (*coherent rotation*), (b) *curling* (Widodo, 2013).

## 2.10 CoFeB

CoFeB merupakan salah satu material campuran dari feromagnetik. Lapisan tipis CoFeB merupakan lapisan feromagnetik yang dijadikan sebagai *free layer* untuk *spin-valve* sensor TMR. Komposisi CoFeB dipilih karena mempunyai keunggulan tersendiri. CoFeB memiliki tekstur yang kuat dan memiliki medan koersivitas yang besar (Setiawan, 2013).

*Nanocrystalline* pada material CoFeB berbentuk kristal FCC. Kristal CoFeB mempunyai spin polarisasi yang tinggi pada suhu kamar (Burton *et al.*, 2013). CoFeB memiliki parameter sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Magnetisasi Saturasi (Ms)} &= 1.16 \times 10^6 \text{ (A/m)} \\ \text{Konstanta Exchange (A)} &= 1.37 \times 10^{-11} \text{ (J/m)} \\ \text{Konstanta Anisotropy (K)} &= 1273 \text{ (J/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

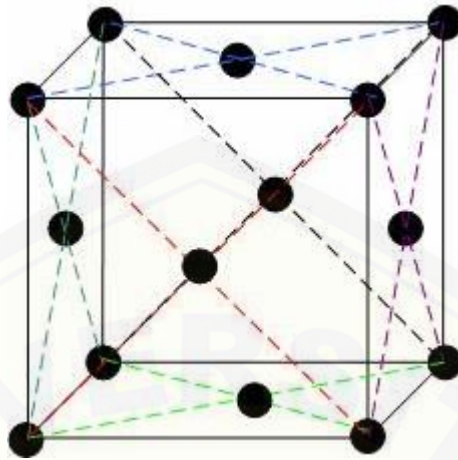
CoFeB memiliki struktur kristal FCC dan memiliki konstanta kisi sebesar 2.86 Å (Park *et al.*, 2006). Satu sel dari struktur kristal FCC pada gambar 2.11 terlihat bahwa terdapat satu titik *lattice* pada setiap sudut dan satu titik *lattice* pada setiap sisi kubus. Struktur Kristal FCC memiliki jumlah efektif atom sama dengan  $8(1/8) + 6(1/2)$ , maka Kristal FCC memiliki jumlah 4 atom disetiap satuan sel. Jika panjang tepi kubus ( $a$ ), dan jari-jari atom ( $r$ ), maka dapat ditulis dengan persamaan

$$\sqrt{2} a = 4r \quad (2.27)$$

Fraksi *Packing*  $f$ , dituliskan dengan

$$f = \frac{4 \left(\frac{4}{3}\right) \pi r^3}{a^3} = 0.74 \quad (2.28)$$

Dari hasil diatas menandakan bahwa Kristal FCC berstruktur padat. Contoh bahan yang memiliki struktur Kristal FCC adalah Cu, Ag, Au, Al, dll (Puri, 2001).



Gambar 2.11 Struktur Kristal kubik berpusat muka (FCC) (Petkov, 2009)

Struktur Kristal dari bahan CoFeB dapat dilihat pada gambar 2.12. pada gambar 2.12 bahan Co diwakili oleh warna pink, bahan Fe diwakili oleh warna biru, bahan B diwakili oleh warna hijau.



Gambar 2.12 Struktur Kristal CoFeB (Paluskar *et al.*, 2013)

## BAB 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Fisika Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Penelitian dilakukan mulai Bulan Desember 2015 sampai bulan April 2016.

### 3.2 Alat Penelitian

Adapun peralatan minimal yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

#### 1. Komputer

Processor : Intel (R) Core (TM) i5-3470 CPU @ 3.20GHz  
3.60GHz  
Installed memory (RAM) : 4.00 GB  
Sistem type : 64-bit  
OS : *Windows dan Linux Ubuntu*

#### 2. Program aplikasi yang digunakan pada simulasi antara lain:

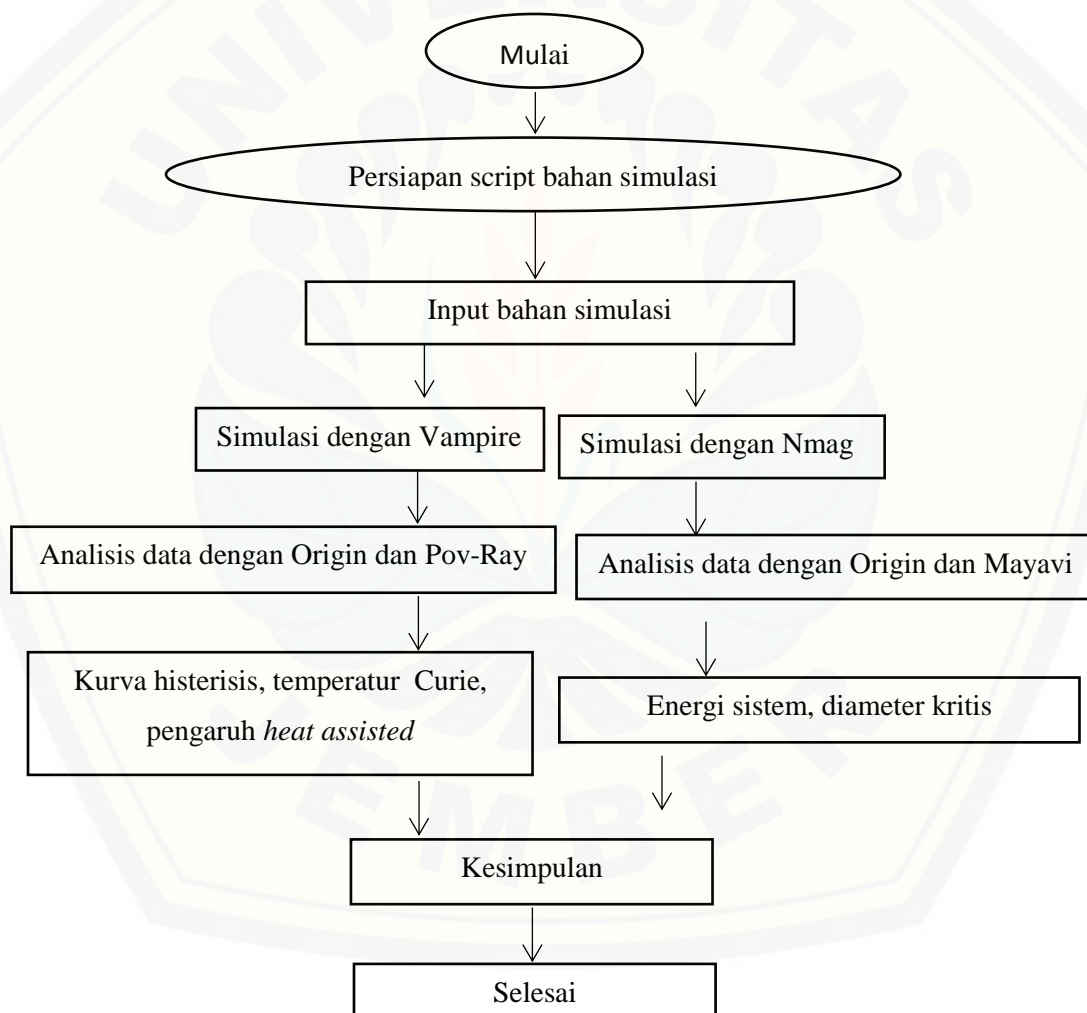
- a. *Nmag* untuk *running* simulasi mikromagnetik berbasis *Finite Element*.
- b. *Vampire* untuk *running* simulasi mikromagnetik berbasis model atomistic.
- c. Origin untuk membuat grafik-grafik dari pengolahan data simulasi.
- d. Mayavi untuk membuat visualisasi struktur domain dalam 3 dimensi.
- e. Pov-Ray untuk membuat visualisasi magnetisasi dari hasil simulasi.

### 3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

#### 3.3.1 Diagram Penelitian

Penelitian yang dilakukan secara umum digambarkan dengan diagram penelitian berikut:



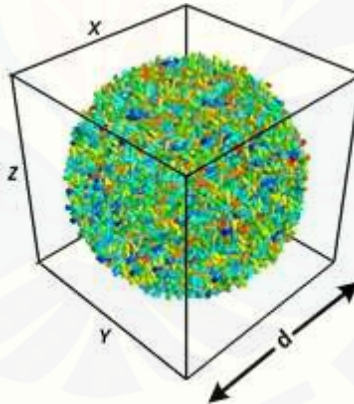
Gambar 3.1 Bagan tahapan-tahapan penelitian

### 3.3.2 Langkah Kerja

Langkah kerja dalam penelitian investigasi sifat-sifat magnetik bahan CoFeB dan pengaruh penerapan *heat assisted* menggunakan simulasi mikromagnetik, antara lain:

#### A. Penentuan Parameter Bahan CoFeB

Parameter bahan CoFeB untuk simulasi mikromagnetik terdiri dari parameter: magnetisasi saturasi  $M_s$ , konstanta *exchange*  $A$  dan  $K$  adalah konstanta anisotropi sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 3.1. Ukuran sel pada simulasi ini berdasarkan ukuran *exchange length* dari material CoFeB yaitu  $l_{ex} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}}$ . Simulasi ini menggunakan faktor *damping* sebesar 0.05. Contoh gambar geometri dari model *nanosphere* yang digunakan dalam simulasi ini ditunjukkan pada gambar 3.2



Gambar 3.2 Contoh geometri *nanosphere* yang digunakan dalam simulasi

Tabel 3.1 Parameter bahan CoFeB yang digunakan dalam simulasi mikromagnetik

Bahan	$M_s$ (A/m)	$A$ (J/m)	$K$ (J/m <sup>3</sup> )	$l_{ex}$ (nm)
CoFeB	$1.16 \times 10^6$	$1.37 \times 10^{-11}$	1273	1.26

Sumber : Setyawan, (2013)



## B. Simulasi Mikromagnetik

Simulasi mikromagnetik pada penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan, antara lain:

### 1. Simulasi untuk menentukan diameter kritis bahan CoFeB

Simulasi untuk menentukan diameter kritis bahan dilakukan dengan membuat *input* simulasi berupa file *script* yang antara lain berisi konstanta *exchange*, konstanta anisotropi, magnetisasi saturasi. Setelah *input* selesai dibuat maka diletakkan dalam satu *folder*. Simulasi Mikromagnetik dijalankan dengan variasi diameter dengan menggunakan program *Nmag*. Variasi diameter dilakukan untuk mencari diameter kritis dari bahan CoFeB. Diameter yang disimulasikan antara lain: diameter di bawah diameter kritis, diameter kritis dan diameter di atas diameter kritis. Hasil simulasi kemudian dianalisis dengan program Mayavi untuk mengetahui struktur domain dari bahan pada setiap diameter. Hasil simulasi juga dianalisis menggunakan program Origin untuk mengetahui energi sistem yang terbentuk.

### 2. Simulasi untuk pembuatan kurva *hysteresis* dari bahan CoFeB

Simulasi untuk pembuatan kurva *hysteresis* dilakukan pada diameter di bawah diameter kritis, diameter kritis dan di atas diameter kritis. Simulasi dilakukan dengan membuat file *script* terlebih dahulu dan diletakkan dalam satu *folder*. Setelah itu simulasi dijalankan dengan menggunakan program *Vampire*. Simulasi dilakukan dengan variasi diameter. Hasil simulasi kemudian dianalisis dengan menggunakan program Origin, dengan cara membuat kurva *hysteresis* antara magnetisasi dan medan luar yang diberikan.

### 3. Simulasi untuk mencari temperatur Curie bahan CoFeB

Simulasi untuk penentuan temperatur Curie bahan dilakukan dengan membuat *input* simulasi berupa file *script* yang diantaranya berisi konstanta *exchange*,

konstanta anisotropi, magnetisasi saturasi. Setelah *input* selesai dibuat maka diletakkan dalam satu *folder*. Simulasi Mikromagnetik dijalankan dengan menggunakan program *Vampire*. Simulasi dilakukan dengan menvariasikan diameter, dimana diameter yang disimulasikan sebesar 5nm, 10 nm, 15 nm, 20nm dan 25 nm. Hasil simulasi kemudian dianalisis menggunakan program Origin, dengan membuat kurva antara magnetisasi dengan perubahan suhu.

#### 4. Simulasi untuk melihat pengaruh *heat assisted* terhadap bahan CoFeB

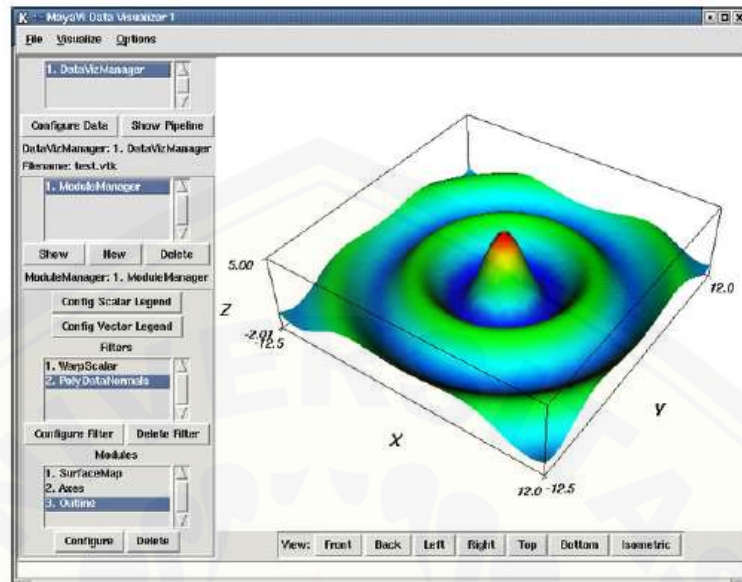
Simulasi untuk penentuan pengaruh *heat assisted* terhadap bahan dilakukan dengan membuat *input* simulasi berupa file *script* yang diantaranya berisi konstanta *exchange*, konstanta anisotropi, magnetisasi saturasi. File *script* yang dibuat diberi masukan *input* berupa temperatur. Temperatur yang digunakan sebesar 100 K sampai 800 K. Setelah *input* selesai dibuat, maka diletakkan dalam satu folder. Simulasi Mikromagnetik dijalankan dengan menggunakan program *Vampire*. Simulasi dilakukan dengan menvariasikan diameter, yaitu 5nm sampai 25 nm. Hasil simulasi dianalisa dengan menggunakan program Origin untuk membuat kurva histerisis. Hasil simulasi juga dianalisis magnetisasinya dengan menggunakan program *Pov-Ray*.

### 3.4 Analisis Data

Langkah-langkah menganalisis hasil simulasi antara lain:

#### 1. Analisis data Simulasi untuk menentukan diameter kritis bahan CoFeB

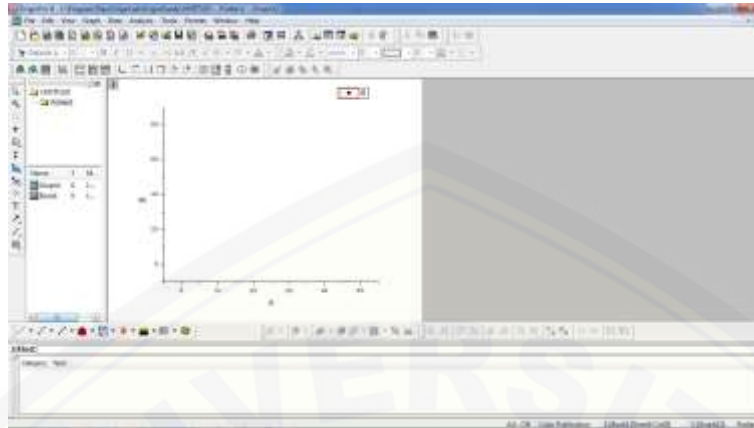
Hasil simulasi untuk penentuan diameter kritis bahan yang dilakukan pada program *Nmag* berupa file *.vtk*. File ini kemudian dianalisis menggunakan program *Mayavi*. Hal ini dilakukan untuk melihat arah dari spin dalam struktur domain bahan CoFeB pada setiap diameter. Struktur spin kemudian dianalisis keadaannya, apakah berada dalam *single domain* atau *vortex state*.



Gambar 3.3 Contoh tampilan pada program Mayavi

## 2. Analisis data simulasi untuk pembuatan kurva *Hysterisis* bahan CoFeB

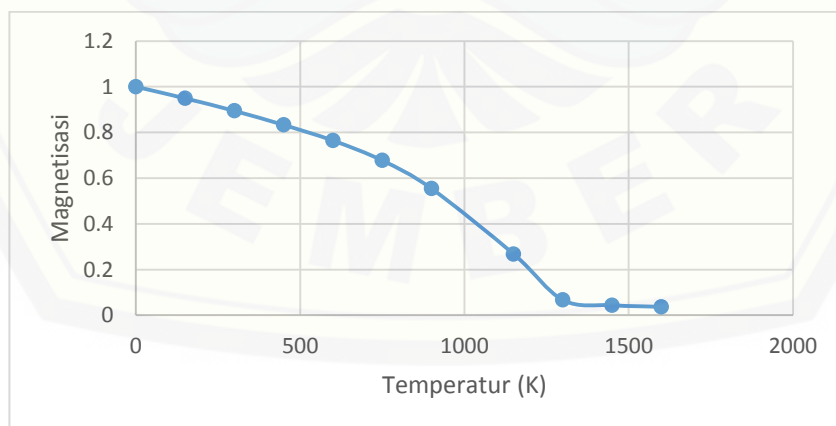
Hasil Simulasi untuk pembuatan kurva *hysterisis* yang dilakukan pada program *vampire* berupa file *output*. File ini kemudian dianalisis menggunakan program Origin. Analisis dilakukan dengan membuat kurva antara magnetisasi dan medan eksternal. Hal ini dilakukan untuk melihat medan koersivitas yang terbentuk dari bahan CoFeB. Analisis dilakukan untuk setiap diameter yang divariasikan.



Gambar 3.4 Contoh tampilan pada program Origin

### 3. Analisis data simulasi untuk mencapai temperatur Curie bahan CoFeB

Hasil Simulasi untuk penentuan temperatur Curie yang dilakukan pada program *vampire* berupa file *output*. File tersebut kemudian dianalisis menggunakan program Origin. Analisis dilakukan dengan membuat kurva antara magnetisasi dan temperatur. Hal ini dilakukan untuk melihat perubahan magnetisasi terhadap bertambahnya temperatur dari bahan CoFeB. Analisis dilakukan pada semua variasi diameter yang diberikan.



Gambar 3.5 Contoh grafik penentuan temperatur Curie



## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapatkan dari hasil penelitian investigasi sifat-sifat magnetik bahan CoFeB dan pengaruh penerapan *Heat Assisted* menggunakan simulasi mikromagnetik adalah:

1. Karakteristik diameter kritis dari bahan CoFeB ditunjukkan pada diameter 10 nm. Pada diameter 10 nm tersebut merupakan batas dari keadaan struktur domain berada pada keadaan *single domain*. Hasil tersebut diperkuat dengan data grafik energi sistem yang menunjukkan bahwa pada diameter 10 nm energi demagnetisasi lebih besar dibandingkan dengan energi *exchange*.
2. Karakteristik kurva histerisis dari bahan CoFeB berdasarkan hasil simulasi memperlihatkan bahwa terdapat perbedaan perubahan medan koersivitas pada bahan CoFeB. Medan koersivitas pada diameter 5 nm sampai 10 nm mempunyai pola meningkat, seiring bertambahnya diameter. Sedangkan medan koersivitas pada diameter 15 nm sampai diameter 25 nm mempunyai pola menurun seiring bertambahnya diameter.
3. Temperatur Curie pada bahan CoFeB berdasarkan hasil simulasi diperoleh bahwa pada temperatur 700 K perubahan magnetisasi konstan seiring penambahan suhu. Variasi diameter tidak berpengaruh terhadap temperatur Curie dari bahan CoFeB. Hal ini dikarenakan temperatur Curie yang dihasilkan tetap berada pada temperatur 700 K.
4. Pengaruh *heat assisted* terhadap kurva histerisis dari bahan CoFeB berdasarkan hasil simulasi diperlihatkan adanya 3 pola perbedaan perubahan medan koersivitas. Pola pertama yaitu terjadi pada temperatur 0 K sampai 100 K. Pola kedua terjadi pada saat medan koersivitas menunjukkan pola menurun seiring bertambahnya temperatur yaitu pada temperatur 100 K

sampai 500 K. Pola ketiga berada pada temperatur 600 K – 800 K, pada rentang temperatur tersebut kurva histerisis bahan CoFeB menunjukkan medan koersifitas sudah rusak.

## 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diketahui sifat-sifat magnetik dari bahan CoFeB dan pengaruh *Heat Assisted* menggunakan simulasi mikromagnetik. Namun terdapat beberapa hal yang masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut, diantaranya perubahan besar medan koersifitas pada diameter 5 nm sampai 10 nm, serta perubahan medan koersifitas pada rentang suhu 0 K sampai 100 K, sehingga dengan adanya penelitian lebih lanjut tersebut dapat mengetahui faktor yang mempengaruhi perubahan medan koersifitas.

## DAFTAR PUSTAKA

### Buku

- Cullity, B. D dan C.D. Graham. 2009. *Introduction To Magnetic Materials*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Jiles, David. 1998. *Introduction To Magnetism and Magnetic Materials Second Edition*. London: Chapman & Hall.
- Kittel, Charles. 1996. *Introduction To Solid State Physics Seventh Edition*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Puri, R. K dan V. K. Babbar. 2001. *Solid State Physics and Electronics*. New Delhi: S. Chand & Company LTD.
- Tipler, Paul A. 2001. *Fisika Untuk Sains dan Teknik Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.

### Jurnal

- Burton, J. D., S. S. Jaswal, E. Y. Tsybal, O. N. Mryasov dan O. G. Heinonen. 2006. Atomic and electronic structure of the CoFeB/MgO interface from first principles. *Applied Physics Letters*, 142507. **89**: 1-3.
- Juan G. Alzate, Pedram Khalil Amiri, Guoqiang Yu, Premey Upadhyaya, Jordan A. Katine, Juergen Langer, Berthold Ocker, Ilya N. Krivorotov, and Kang L. Wang. 2014. *Temperature dependence of the voltage-controlled perpendicular anisotropy in nanoscale MgO/CoFeB/Ta magnetic tunnel junctions*. *Applied Physics Letters*, 112410. 104: 1-5.
- Mark H. Kryder, Edward C. Cage, Terry W. McDaniel, William A. Challener, Robert E. Rottmayer, Ganding Ju, Yio-tee Hsia, and M. Fatih Erden. 2008. Heat Assisted Magnetic Recording. *Proceeding of the IEEE*, 0018-9219. **96**: 1810-1835.
- Michiko Yamanouchi, Alberht Jander, Pallavi Dhagat, Shoji ikeda, Fumihiro Matsukura and Hideo Ohno. 2012. Domain structure in CoFeB thin Films with perpendicular magnetic anisotropy. *Center for spintronic integrated system*, 980-8577: 1-13.



- Park. Chando, Jian-Gang Zhu, Matthew T. Moneck, Yinggou Peng dan David E. Laughlin. 2006. Annealing effects on structural and transport properties of rf-sputtered CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions. *Journal Of Applied Physics*, 08A901. **99**: 1-3.
- Paluskar. P. V, J. J. Attema, G. A de Wijs, S. Fiddy, E. Snoeck, J. T. Kohlhepp, H. J. M. Swagten, R. A. de Groot dan B. Koopmans. 2013. Spin tunneling in junctions with disordered ferromagnets. *Materials Science*, Physical Review letters, 100: 057205.
- Purnama, Budi, Ismail dan Suharyana. 2013. Kajian Simulasi Mikromagnetik: Ketergantungan Medan Koersif dengan Besaran Intrinsik Nano-Dot Magnetik dengan Anisotropi Tegak Lurus. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, **9** (1): 30-33.
- Sadnawanto, W. dan B. Purnama. 2014. Modifikasi Model Thermally pada Heat Assisted Magnetisasi Reversal Nano Partikel Magnetik. *Jurnal MIPA*, ISSN: 0215-9945. **37** (2): 136-140.
- Setyawan, Galih dan Edi Suharyadi. 2013. Analisa Pergeseran Magnetic Domain Wall Pada Lapisan Tipis Free Layer CoFeB Untuk Sistem Spin-Valve Tunneling Magneto-Resistance (TMR) Sensor. *Jurnal Fisika Indonesia*, ISSN: 1410-2994. **17** (49).
- Sudjatmoko. 2005. Kajian Sifat Bahan Lapisan Tipis Feromagnetik NiFe Hasil Deposisi dengan Teknik Evaporasi Hampa. *Jurnal GANENDRA*, ISSN: 1410-6957. **8** (2): 37-43.
- Sulanjari, Winda Noor Santi, Annisa Ayu Artanti, Edi Suharyadi, Takeshi Kato dan Satoshi Iwata. 2014. Kajian Sifat Kemagnetan pada NanoPartikel Cobalt Ferrite (CoFeO) yang dicoating dengan Polyethylene Glykol (PEG-4000) dan Silika. *Jurnal Fisika Indonesia*, ISSN: 1410-2994. **18** (54): 103-107.
- Yani, Ahmad, Ridwan dan Mujamilah. 2014. Simulasi Histerisis Pada Bahan Feromagnetik Dengan Model JILES-ATHERTON. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, ISSN: 1411-1098: 85-90.

### Tesis

- Evans, R. F. L., W. J. Fan, P. Chureemart, T. A. Ostler, M. O. A. Ellis dan R. W. Chantrell. 2013. *Atomistic spin model simulations of magnetic nanomaterials*. York: The University of York.

Ismail. 2013. *Studi Mikromagnetik Proses Magnetisasi dan Spektrum Suseptibilitas Feromagnetik Elemen Diamond Shaped*. Jakarta: Universitas Jakarta.

Lefter dan Mihai Dimian. 2012. *Micromagnetic analysis of magnetization behavior in Permalloy nanoparticles for data storage applications*. Suceava: Stefan cel Mare University.

Mardona. 2012. *Dinamika Domain Wall dan Efek Anisotropi Pada Material Feromagnet Co Dan Ni Berbentuk Nanowire*. Jakarta: Universitas Jakarta.

Widodo, Agus Tri. 2013. *Studi Mikromagnetik Dinamika Struktur Domain Pada Material Feromagnetik Py, Ni, Fe Dan Co Model Nanosphere*. Jakarta: Universitas Jakarta.

### Skripsi

Sawitri, Dyah dan Ratih Resti Astari. 2010. *Pengaruh Variasi Komposisi dan Proses Pendinginan Terhadap Karakteristik Magnet Barrium Ferrite*. Surabaya: Insitut Teknologi Sepuluh November.

Subekti. 2010. *Pengukuran Anisotropi Suseptibilitas Magnetik*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.

Warsiti. 2005. *Studi Pengaruh Suhu Annealing Terhadap Struktur Kristal dan Magnetoresistansi Permalloy NiFe Hasil Elektrodeposisi*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.

### Disertasi

Rohman, Lutfi. 2013. *Investigasi sifat- sifat magnetik bahan LSMO ( $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ) untuk aplikasi Storage Divice Dengan Menggunakan Modelling Mikromagnetik*. Jember: Universitas Jember.

### Riset

Djuhana, Dede, Widya Nursiyanto dan Dita Oktri Chusnul Chotimah. 2013. *Analisis Spektrum Suseptibilitas dan Struktur Domain Magnet dengan Modeling Time Resolved Imaging Micromagnetic dan Pengukuran Absorpsi Gelombang Mikro Menggunakan Vektor Network Analyzer (VNA) pada Material NanoFerromagnet*. Jakarta: Universitas Jakarta.

**Internet**

Fangohr, H., Fischbacher, T., Franchin, M., Bordignon, G., Generowicz, J., Knittel, A., Walter, M. 2008. *NMAG User Manual (0.1 Beta Version)*. <http://nmag.soton.ac.uk>. [30 September 2015].

Petkov, V., 2009. *The Solid State*. <http://www.chemprofessor.com/solids.htm>. [07 November 2015].

