



**INVESTIGASI SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN CoPd DAN
PENGARUH PENERAPAN *MICROWAVE ASSISTED*
MENGUNAKAN SIMULASI MIKROMAGNETIK**

SKRIPSI

Oleh
Bagus Fath Nagara H.T.
NIM 111810201056

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



**INVESTIGASI SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN CoPd DAN
PENGARUH PENERAPAN *MICROWAVE ASSISTED*
MENGUNAKAN SIMULASI MIKROMAGNETIK**

SKRIPSI

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

Oleh
Bagus Fath Nagara H.T.
NIM 111810201056

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

PERSEMBAHAN

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

1. Ayah Ahmad Rusli dan Mama Tri Murti yang tercinta terima kasih atas segala pengorbanan, kasih sayang, motivasi yang telah diberikan, senantiasa memberikan do'a dan semangat untuk menghadapi perjalanan studi hingga penulis mampu menyelesaikan jenjang studi ini;
2. Kakak Puri Rustianingtyas, S.Sos., Abang Fatiha Ardi Hatta, S.Kom.I., dan Fiddini Nurvita yang senantiasa memberikan kebahagiaan unik, penuh semangat hidup dan sangat penulis sayangi;
3. Guru-guru dari TK Jaya Kusuma I & II, SDN Babat Jerawat I, SMPN 26 Sby, SMAN 21 Sby dan dosen-dosen yang telah membimbing sekaligus memberikan ilmunya kepada penulis;
4. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Jember.

MOTO

Tidaklah sekali-kali aku bertukar pikiran dengan seseorang dengan tujuan aku lebih
suka ia salah.

(Imam Syafi'i)*

Perhatikan apa yang orang katakan, Jangan kau pandang siapa yang mengatakan.

(Ali bin Abi Thalib)**

*) Almath, M. F. 1991. *1100 Hadist Terpilih: Sinar Ajaran Muhammad*. Jakarta: Gema Insani Press

**) www.duniakata.com diakses pada tanggal 31 Mei 2016

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Bagus Fath Nagara H.T.

NIM : 111810201056

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Investigasi Sifat-Sifat Magnetik Bahan CoPd dan Pengaruh Penerapan *Microwave Assisted* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” adalah karya ilmiah bersama antara dosen pembimbing dan saya sebagai mahasiswa, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan hasil karya menjiplak. 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 secara akademik jika ternyata pernyataan ini tidak benar dikemudian hari.

Jember, Mei 2016

Yang menyatakan,

Bagus Fath Nagara H.T.

NIM 111810201056

SKRIPSI

**INVESTIGASI SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN CoPd DAN
PENGARUH PENERAPAN *MICROWAVE ASSITED*
MENGUNAKAN SIMULASI MIKROMAGNETIK**

Oleh

Bagus Fath Nagara H.T.

NIM 111810201056

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 CoPd dan Pengaruh Penerapan *Microwave 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.

NIP 19720820 199802 1 001

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

NIP 19671215 199802 1 001

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II

Ir. Misto, M.Si.

NIP 19591121 199103 1 002

Puguh Hiskiawan, S.Si., M.Si.

NIP 1974 1215 200212 1 001

Mengesahkan

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Drs. Sujito, Ph.D.

NIP 19610204 198711 1 001

RINGKASAN

Investigasi Sifat-Sifat Magnetik Bahan CoPd dan Pengaruh Penerapan *Microwave Assisted* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik; Bagus Fath Nagara H.T., 111810201056: 55 halaman; Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember.

Lapisan tipis kobalt paladium (CoPd) merupakan bahan feromagnetik yang memiliki tekstur kuat dengan dukungan nilai anisotropi magnetik dan medan koersivitas besar. Sifat ini membuka peluang bahan untuk dapat dipola dengan ukuran yang sangat kecil. Ukuran bahan yang kecil dapat diaplikasikan sebagai media perekam magnetik dengan kerapatan tinggi. Media perekam magnetik ini berhubungan dengan sistem penyimpanan data pada *Hard Disk Drive* (HDD).

Pada penelitian ini digunakan bahan CoPd bentuk *ellipsoid* pada aplikasi simulasi mikromagnetik OOMMF di *windows* dan Nmag di *linux*. Kedua aplikasi simulasi tersebut didasarkan oleh persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) dengan faktor redaman $\alpha = 0,05$. Penelitian ini dibagi menjadi 2 langkah kerja. Langkah pertama, penelitian pada ukuran diameter panjang (110-260) nm dan diameter pendek (55-130) nm. Pada penelitian ini diamati struktur domain dan energi sistem dalam kondisi tanpa medan luar. Berdasarkan hasil penelitian ini diperoleh informasi tentang terjadi perubahan struktur domain dari *single domain* (SD) menjadi *vortex state* (VS) yang dibatasi oleh titik diameter kritis. Struktur domain SD dimiliki oleh seluruh diameter yang berada di bawah diameter kritis, sedangkan VS berada di atas diameter kritis. Hasil ini diperkuat dengan energi sistem pada bahan CoPd. Dimana titik di bawah diameter kritis didominasi oleh energi demagnetisasi, selanjutnya titik di atas diameter kritis didominasi oleh energi *exchange*. Hasil simulasi ini diperoleh bahwa titik diameter kritis bahan CoPd berada pada ukuran diameter panjang 140 nm

dan diameter pendek 70 nm. Nilai ini berbeda dengan perhitungan secara teori Brown pada bentuk bola, dimana pada perhitungan secara teori diperoleh nilai diameter kritis bahan CoPd sebesar 118 nm.

Langkah kedua yaitu melihat pengaruh *microwave assisted* terhadap medan koersivitas dalam kurva histeresis. Hasil yang diperoleh yaitu semakin besar nilai amplitudo dan frekuensi yang digunakan, maka akan dihasilkan nilai medan koersivitas yang semakin kecil. Contoh hasil simulasi pada geometri $(15 \times 15 \times 45) \text{ nm}^3$ dengan amplitudo 10 mT dan frekuensi 0,08 GHz diperoleh medan koersivitas sebesar 13750 mT. Sedangkan pada saat digunakan nilai amplitudo 10000 mT dan frekuensi 80 GHz maka diperoleh nilai medan koersivitas sebesar 8750 mT. Hal ini dapat diperkuat pada pembentukan kurva histeresis yang semakin pipih atau tipis seiring dengan penambahan nilai amplitudo dan frekuensinya. Selain itu, pengaruh *microwave assisted* dapat diperjelas dalam kurva magnetisasi terhadap medan eksternal. Dimana, *microwave assisted* cenderung lebih cepat mengalami pembalikan magnetisasi dengan rentang medan eksternal yang lebih kecil daripada tanpa *microwave assisted*. Hasil ini diperkuat dengan profil energi sistem, dimana nilai energi sistem cenderung tinggi pada saat digunakan nilai medan koersivitas.

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Investigasi Sifat-Sifat Magnetik Bahan CoPd dan Pengaruh Penerapan *Microwave 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. Ir. Misto, M.Si., selaku Dosen Penguji I dan Puguh Hiskiawan, 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 proses studi penulis selama menjadi mahasiswa;
4. Segenap Dosen dan Karyawan Fakultas MIPA Universitas Jember yang selalu membantu dan mendukung;
5. Segenap karyawan dan teknisi fisika-MIPA, antara lain: Budiono, Edy Sutrisno, Taufik Usman Wibowo, Sunarto, Aji Priyono, Hadi, dan Ansori
6. Orang tuaku Ayah Ahmad Rusli dan Mama Tri Murti yang tercinta yang telah memberikan semangat, pengarahan, kasih sayang dan doanya;
7. Kakak Puri Rustianingtyas, S.Sos., Abang Fatiha Ardi Hatta, S.Kom.I., dan Fiddini Nurvita yang telah memberikan motivasi dan kebahagiaan;

8. Drs. Burhanuddin yang telah memberikan bimbingan, motivasi dan pencerahan kepada penulis selama studi;
9. Teman-teman seperjuangan angkatan 2011 (GP'11) yang telah memberikan bantuan dan dukungannya;
10. Teman-teman di Laboratorium Fisika Teori dan Komputasi yang selalu memberikan motivasi;
11. Dulur-dulur Merdeka Bicycle Community (MBC) Jember yang selalu memberikan *refreshing* pada *weekend*;
12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Dengan segala kerendahan hati penulis juga menerima segala kritik dan saran yang membangun* 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

*) Alamat gmail: 111810201056@students.unej.ac.id

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBINGAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Struktur Kristal	4
2.1.1 <i>Body Centered Cubic</i> (BCC)	4
2.1.2 <i>Face Centered Cubic</i> (FCC)	4
2.1.3 <i>Hexagonal Closed Packed</i> (HCP)	5
2.2 Permeabilitas	5

2.3	Bahan Mikromagnetik CoPd	7
2.4	Konsep Simulasi Mikromagnetik	8
2.5	Domain Magnet dan Domain Wall	9
2.6	Energi pada Sistem Feromagnetik	10
	2.6.1 Energi <i>Exchange</i>	10
	2.6.2 Energi Magnetostatik.....	12
	2.6.3 Energi Anisotropi	13
	2.6.4 Energi Zeeman	15
2.7	Konsep Mikromagnetik	15
2.8	Dinamika Magnetisasi Spin	17
	2.8.1 Persamaan Landau-Lifshitz (LL)	18
	2.8.2 Persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)	19
2.9	Konfigurasi Struktur Domain pada Nanopartikel	20
	2.9.1 Domain Tunggal (<i>Single-Domain</i>).....	20
	2.9.2 <i>Two-Domain</i> dan <i>Vorteks-State</i>	20
2.10	Diameter Kritis (<i>Critical Diameter</i>)	21
2.11	Kurva Histeresis	22
2.12	Mekanisme Pembalikan Magnetisasi	25
2.13	<i>Microwave Assisted</i>	26
BAB 3.	METODE PENELITIAN	27
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	27
3.2	Alat Penelitian	27
3.3	Prosedur Penelitian	28
	3.3.1 Diagram Penelitian	28
	3.3.2 Langkah Kerja	29
3.4	Analisis Data	32
	3.4.1 Menentukan Diameter Kritis.....	32
	3.4.2 Kurva Histeresis	33

3.4.3 Diagram Frekuensi dan Ampitudo Terhadap Perubahan Medan Koersivitas	33
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Pengaruh Variasi Diameter Terhadap Struktur Domain dari Bahan CoPd Bentuk <i>Ellipsoid</i>	34
4.2 Pengaruh <i>Microwave Assisted</i> Terhadap Medan Koersivitas dalam Kurva Histeresis	40
BAB 5. PENUTUP	51
5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran	52
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN	56

DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 Parameter bahan lapisan tipis CoPd untuk simulasi mikromagnetik.....	29
3.2 Desain geometri untuk mencari diameter kritis.....	30
3.3 Desain geometri diameter untuk mencari kurva histeresis menggunakan <i>microwave-assisted</i>	31

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Struktur kristal <i>Body Centered Cubic</i> (BCC).....	4
2.2 Struktur kristal <i>Face Centered Cubic</i> (FCC)	5
2.3 Struktur kristal <i>Hexagonal Close Packed</i> (HCP)	5
2.4 Struktur kristal FCC CoPd dengan Co berwarna merah dan Pd berwarna biru berukuran $n_x=5$, $n_y=5$, dan $n_z=5$ terdiri dari 500 atom..	7
2.5 Tempertur substrat bergantung pada $\Delta\theta_{\chi 50 (in-plane)}$ dan $\Delta\theta_{50 (out-of-plane)}$ perhitungan dilakukan untuk <i>alloy film</i> CoPt dan CoPd yang ditumbuhkan pada substrat MgO (111)	8
2.6 Konfigurasi momen magnet dalam <i>domain wall</i> berubah secara perlahan-lahan membentuk struktur <i>domain wall</i> 180^0 dikenal dengan <i>Bloch Wall</i>	9
2.7 Struktur <i>Neel Wall</i> dimana orientasi spinnya terjadi pada bidang <i>thin Film</i>	10
2.8 Pengurangan energi magnetostatik atau energi demagnetisasi akibat orientasi arah dari dipol-dipol magnet	12
2.9 Ilustrasi arah magnetisasi dari Fe (kiri) yang mempunyai $K_1 > 0$, arah <i>easy axis</i> pada [100], [010], dan [001]. Untuk arah <i>hard axis</i> pada [111]. Untuk Ni (kanan) dengan $K_1 < 0$, arah <i>easy axis</i> [111] dan arah <i>hard axis</i> [100], [010], dan [001]	14
2.10 Gerak Presisi dari momen magnet terhadap medan efektif. (a) tanpa redaman, (b) dengan menggunakan redaman (<i>damping</i>).....	18
2.11 Tiga kemungkinan yang dapat terjadi untuk keadaan konfigurasi domain magnet saat energi minimum (<i>groundstate</i>) dari partikel	

<p>magnetik bentuk bola (<i>spherical magnetic particle</i>). (a) <i>single-domain</i>, (b) <i>two-domain</i>, (c) <i>vortex-state</i></p>	21
<p>2.12 Kurva histeresis untuk bahan feromagnetik. (a) \mathbf{M} terhadap \mathbf{H}: M_r adalah magnetisasi remanen; H_{ct} adalah koersivitas intrinsik; M_s adalah magnetisasi saturasi; (b) \mathbf{B} terhadap \mathbf{H}: B_r adalah induksi magnet remanen; H_c adalah medan magnet koersivitas</p>	22
<p>2.13 Kurva perbandingan nilai medan koersivitas terhadap diameter partikel. Ditunjukkan tiga daerah: (1) daerah superparamagnetik dengan medan koersivitas $H_c = 0$, (2) daerah antara superparamagnetik hingga diameter kritis D_c , keadaan berstruktur <i>single-domain</i>, (3) daerah di atas diameter kritis D_c , keadaan berstruktur <i>multi-domain</i></p>	24
<p>2.14 Kurva hubungan besar nilai medan koersivitas terhadap ukuran dari partikel kecil bahan magnetik</p>	24
<p>2.15 Mekanisme pembalikan magnetisasi partikel magnetik berbentuk bola, (a) rotasi koheren (<i>coherent rotation</i>), (b) <i>curling</i></p>	25
<p>2.16 Lapisan tipis yang diorientasikan terhadap medan <i>quasistatic</i> dan medan <i>microwave</i></p>	26
<p>3.1 Bagan tahap-tahap penelitian</p>	28
<p>3.2 Diagram alir simulasi mikromagnetik</p>	29
<p>3.3 Rancangan geometri untuk mencari (a) diameter kritis, (b) kurva histeresis tanpa menggunakan <i>microwave assisted</i>, dan (c) kurva histeresis menggunakan <i>microwave assisted</i></p>	31
<p>3.4 Geometri bangun ruang <i>Ellipsoid</i>.....</p>	32
<p>3.5 Profil energi sistem dari material Co <i>nanosphere</i> terhadap perubahan variasi diameter</p>	32
<p>3.6 Kurva histeresis perubahan medan magnetik (H_x) terhadap magnetisasi bahan.....</p>	33

3.7	Diagram pengaruh <i>microwave assisted</i> (amplitudo dan frekuensi) terhadap medan koersivitas	33
4.1	Struktur domain magnet pada bahan CoPd bentuk <i>ellipsoid</i> dengan variasi diameter panjang, antara lain : (a) 110 nm, (b) 120 nm, (c) 130 nm, (d) 140 nm, (e) 150 nm, dan (f) 160 nm.....	35
4.2	Struktur domain magnet pada bahan CoPd bentuk <i>ellipsoid</i> dengan variasi diameter panjang, yaitu: (a) 170 nm, (b) 180 nm, (c) 190 nm, dan (d) 200 nm.....	36
4.3	Struktur domain magnet pada bahan CoPd bentuk <i>ellipsoid</i> dengan variasi diameter panjang, yaitu: (a) 210 nm, (b) 220 nm, (c) 190 nm, dan (d) 240 nm.....	37
4.4	Struktur domain magnet pada bahan CoPd bentuk <i>ellipsoid</i> dengan diameter panjang sebesar 260 nm.....	38
4.5	Profil energi sistem pada bahan CoPd bentuk <i>ellipsoid</i> terhadap variasi diameter	39
4.6	Struktur domain <i>groundstate</i> CoPd bentuk <i>ellipsoid</i> pada (a) Daerah I, (b) Daerah II, dan (c) Daerah III.....	40
4.7	Struktur domain bahan CoPd <i>ellipsoid</i> pada geometri $(15 \times 15 \times 45) \text{ nm}^3$	41
4.8	Kurva histeresis tanpa <i>microwave assisted</i> dengan geometri berukuran $(15 \times 15 \times 45) \text{ nm}^3$ dan contoh proses pembalikan magnetisasi dari bahan CoPd <i>ellipsoid</i>	42
4.9	Diagram pengaruh <i>microwave assisted</i> (amplitudo dan frukuensi) terhadap medan koersivitas pada ukuran $(15 \times 15 \times 45) \text{ nm}^3$	43
4.10	Diagram pengaruh <i>microwave assisted</i> (amplitudo dan frukuensi) terhadap medan koersivitas pada ukuran $(75 \times 75 \times 225) \text{ nm}^3$	43
4.11	Diagram pengaruh <i>microwave assisted</i> (amplitudo dan frukuensi) terhadap medan koersivitas pada ukuran $(90 \times 90 \times 270) \text{ nm}^3$	44

4.12 Diagram pengaruh <i>microwave assisted</i> (amplitudo dan frukuensi) terhadap medan koersivitas pada ukuran $(120 \times 120 \times 360) \text{ nm}^3$	45
4.13 Diagram pengaruh <i>microwave assisted</i> (amplitudo dan frukuensi) terhadap medan koersivitas pada ukuran $(150 \times 150 \times 450) \text{ nm}^3$	45
4.14 Diagram pengaruh <i>microwave assisted</i> (amplitudo dan frukuensi) terhadap medan koersivitas pada ukuran $(165 \times 165 \times 495) \text{ nm}^3$	46
4.15 Kurva pengaruh <i>microwave assisted</i> ditinjau dari medan eksternal terhadap magnetisasi pada geometri $(15 \times 15 \times 45) \text{ nm}^3$ dan struktur domainnya	48
4.16 Pengaruh <i>microwave assisted</i> dengan ukuran geometri $15 \times 15 \times 45 \text{ nm}^3$ berdasarkan profil energi sistem terhadap variasi medan eksternal, (a) energi total, (b) energi <i>exchange</i> dan demagnetisasi	49
4.17 Selisih rapat energi sistem pada ukuran $(15 \times 15 \times 45) \text{ nm}^3$ antara <i>microwave assisted</i> dengan tanpa <i>microwave assisted</i>	50

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Tanpa <i>Microwave Assisted</i> dengan geometri $(15 \times 15 \times 45) \text{ nm}^3$	53
B. <i>Microwave Assisted</i>	54
B.1 Geometri $(15 \times 15 \times 45) \text{ nm}^3$	54
B.2 Geometri $(75 \times 75 \times 225) \text{ nm}^3$	56
B.3 Geometri $(90 \times 90 \times 270) \text{ nm}^3$	58
B.4 Geometri $(120 \times 120 \times 360) \text{ nm}^3$	60
B.5 Geometri $(150 \times 150 \times 450) \text{ nm}^3$	62
B.6 Geometri $(165 \times 165 \times 495) \text{ nm}^3$	64

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam dua dekade terakhir ini, penelitian mengenai bahan feromagnetik berbentuk partikel, *disk*, *wires* pada skala nanometer mulai ramai untuk diteliti. Hal ini menunjang dalam bidang nanoteknologi tentang teknik fabrikasi magnet. Hasil penelitian tersebut adalah digunakannya divais *spintronic*. Divais ini dicari yang memiliki kemampuan penyimpanan yang besar, *non-volatile*, dan berharga murah, contohnya pada media perekam magnetik *hard disk drive* (HDD) (Rohman, 2013).

Kebutuhan HDD berkapasitas besar semakin meningkat. Kebutuhan ini dapat dicapai dengan cara meningkatkan kerapatan bit (*bit-areal-density*). Kerapatan bit dijadikan tolak ukur dalam perkembangan kemajuan bidang perekam magnetik. Namun, ada masalah yang dihadapi yaitu penyimpanan data menjadi tidak stabil karena efek superparamagnetik. Efek ini dapat terjadi jika nilai kerapatan bit ditingkatkan, maka energi magnetisasi menurun. Selanjutnya, terjadi proses demagnetisasi dan perubahan orientasi magnetisasi yang disebabkan oleh perubahan temperatur tinggi pada keadaan energi magnetisasi yang menurun (Dobisz, 2008).

Ada pendekatan yang diajukan untuk masalah ini yaitu membuat media perekam magnetik berbentuk *patterned media*. Media perekam ini disusun oleh bahan feromagnetik berstruktur nanopartikel berupa *magnetic island*. Satu *magnetic island* disusun oleh beberapa *grain* yang terisolasi secara magnetik. Satu *grain* hanya memiliki satu domain magnet (*single domain*). Selanjutnya, hasil yang diharapkan dalam satu *magnetic island* terdiri dari *single pre-patterned grain* yaitu sebuah *grain* berukuran nano, dimana untuk satu bit data hanya membutuhkan satu *magnetic island* (Robertson, 2010). Dimensi *magnetic island* dapat berbentuk bola (*nanospheres*), kubus (*nanocubes*), *ellipsoid*, silinder, heksagonal, dan bentuk lain yang lebih kompleks (Alvarez, 2008).

Magnetisasi HDD dilakukan dengan menggunakan metode *perpendicular magnetic recording*. Metode ini tentu dibutuhkan biaya yang tinggi. Ada cara untuk mengurangi biaya tersebut yaitu dilakukan pendekatan secara simulasi mikromagnetik. Beberapa hasil penelitian sifat magnetik bahan feromagnetik sebagai penyusun media perekam magnetik secara simulasi memiliki kesesuaian dengan eksperimen. Simulasi struktur domain bisa dilakukan pada keadaan *groundstate* ataupun diberikan pengaruh medan magnet eksternal. Keadaan *groundstate* adalah keadaan stabil pada energi minimum digunakan untuk investigasi titik diameter kritis. Titik ini merupakan ukuran diameter maksimum dari keadaan struktur *single domain* (SD) (Widodo, 2013). Sedangkan, pengaruh medan magnet eksternal dibandingkan pengaruh *microwave assisted* dan tanpa *microwave assisted*. Simulasi ini diamati pada pembentukan kurva histeresis dan mekanisme pembalikan struktur domain. Kurva histeresis yang diperoleh berisikan informasi mengenai medan nukleasi, medan remanen, medan koersivitas, dan medan saturasi. Kurva ini disusun oleh nilai magnetisasi pada sumbu y dan nilai medan *external* pada sumbu x. Mekanisme pembalikan struktur domain yang diperoleh memberikan informasi mengenai magnetisasi spontan. *Microwave assisted* yang digunakan mempunyai nilai amplitudo dan frekuensi yang bervariasi. Jika kedua nilai yang digunakan semakin besar, maka dapat membuat tipis medan *switching*. Kondisi lebar atau tipisnya medan ini dapat diamati dalam kurva histeresis (Li *et al.*, 2008).

Salah satu bahan feromagnetik adalah lapisan tipis CoPd. CoPd memiliki tekstur yang kuat dengan didukung nilai anisotropi magnetik dan medan koersivitas besar. Karakter anisotropi magnetik CoPd yang besar membuka peluang bahan ini dapat dipola (*patterned*) dengan ukuran yang sangat kecil (Salamah, 2014). Sehingga, bahan ini dapat diaplikasikan sebagai media perekaman magnetik dengan kerapatan tinggi. Oleh sebab itu, penelitian tentang struktur domain lapisan tipis CoPd dapat memberikan kontribusi yang penting pada perkembangan teknologi khususnya pada sistem penyimpanan data (Liu *et al.*, 2011).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang mendasari dilakukan penelitian kali ini, antara lain:

1. Bagaimana pengaruh variasi diameter terhadap struktur domain dari bahan CoPd bentuk *ellipsoid*?
2. Bagaimana pengaruh *microwave assisted* terhadap medan koersivitas dalam kurva histeresis dari bahan CoPd bentuk *ellipsoid*?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian kali ini, antara lain:

1. Penelitian simulasi mikromagnetik CoPd dilakukan dalam bentuk *ellipsoid*,
2. Penelitian ini digunakan simulasi mikromagnetik *Object Oriented Micromagnetic Framework* (OOMMF) pada windows dan atau Nmag pada Linux,
3. Variasi ukuran diameter yang digunakan ada 20 nilai dalam penelitian ini,
4. Bahan CoPd dipengaruhi oleh medan luar berupa *microwave assisted*.

1.4 Tujuan Masalah

Adapun tujuan penelitian kali ini, antara lain:

1. Penelitian ini untuk dapat diketahui pengaruh variasi diameter terhadap struktur domain dari bahan CoPd bentuk *ellipsoid*,
2. Penelitian ini untuk dapat diketahui pengaruh *microwave assisted* terhadap medan koersivitas dalam kurva histeresis dari bahan CoPd bentuk *ellipsoid*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan pandangan baru mengenai simulasi bahan mikromagnetik pada bidang ilmu fisika komputasi yang memberikan gambaran luas bahwa ilmu fisika dapat mengkaji bahan berskala mikro. Penelitian ini menjadi suatu pembuktian dalam hal penyamaan antara hasil eksperimen dengan hasil simulasi mikromagnetik, serta dapat digunakan sebagai acuan bahan dasar dari pembuatan media penyimpanan data berbasis magnetik.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Struktur Kristal

2.1.1 *Body Centered Cubic* (BCC)

Satu sel dari struktur kristal BCC diperlihatkan pada gambar 2.1. Pada gambar 2.1 terlihat bahwa terdapat satu sel utuh di tengah 8 sel satuan di tepi dan $1/8$ atom terdapat pada tiap-tiap sudut sel satuan sehingga dalam satu sel satuan BCC terdapat 2 atom. Contoh logam BCC yaitu Fe, Cr, Li. Berdasarkan gambar 2.1 maka dapat diketahui jari-jari atomnya dengan persamaan

$$\sqrt{3} a = 4R \text{ atau } a = \frac{4R}{\sqrt{3}} \quad (2.1)$$

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

$$APF = \frac{\text{Volume atom-atom dalam sel satuan}}{\text{Volume sel satuan}} \quad (2.2)$$

Dari hasil perhitungan harga untuk APF kristal BCC adalah 68% dan sisanya 32% adalah ruang kosong. Hal ini menunjukkan bahwa kristal BCC berstruktur padat.



Gambar 2.1 Struktur kristal *Body Centered Cubic* (BCC) (Mangonon, 1999)

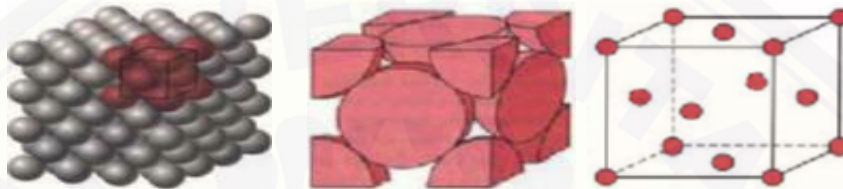
2.1.2 *Face Centered Cubic* (FCC)

Satu sel dari struktur kristal FCC dapat dilihat pada gambar 2.2. Gambar tersebut ditunjukkan 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

$$\sqrt{2} a = 4R \text{ atau } a = \frac{4R}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

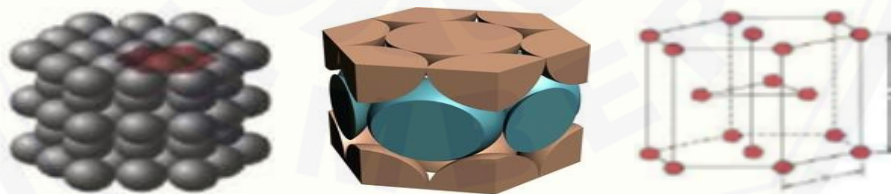
Persamaan 2.2 juga dapat digunakan untuk mengetahui nilai APF pada kristal FCC. APF sebesar 74% dan sisanya sebesar 26% merupakan ruang kosong. Hal ini mencirikan bahwa kristal FCC berstruktur padat. Contoh FCC yaitu Pd, Cu, Pb.



Gambar 2.2 Struktur kristal *Face Centered Cubic* (FCC) (Mangonon, 1999)

2.1.3 *Hexagonal Closed Packed* (HCP)

Pada Gambar 2.3 ditunjukkan sel satuan kristal HCP. Setiap logam struktur kristal HCP dikelilingi oleh 12 atom dan bilangan koordinasi sebanyak 12. Hal ini mencirikan bahwa kristal HCP berstruktur padat. Hal ini dapat dibuktikan dengan menyelesaikan persamaan 2.2 diperoleh besarnya harga APF sebesar 74% dan sisanya sebesar 26% adalah ruang kosong. Sel satuan HCP mempunyai 6 atom per sel satuan yaitu $2 \times 6 \times 1/6$ (pada sudut lapisan bawah dan atas) + $2 \times 1/2$ (pada pusat lapisan bawah dan atas) + 3 (lapisan tengah). Contoh logam HCP yaitu Co, Mg, Zn.



Gambar 2.3 Struktur kristal *Hexagonal Close Packed* (HCP) (Mangonon, 1999)

2.2 Permeabilitas

Permeabilitas (μ) adalah kemampuan suatu benda untuk dilewati garis gaya magnet. Benda yang mempunyai sifat mudah dilewati garis gaya magnet maka nilai

permeabilitasnya tinggi. Permeabilitas udara dan ruang hampa dianggap sama dengan satu. Permeabilitas benda yang dibandingkan dengan permeabilitas udara, maka diperoleh nilai permeabilitas relatif (μ_r). Besarnya permeabilitas untuk udara adalah $\mu_o = (4\pi \times 10^{-7})$ atau $(1,26 \times 10^{-6})$ Henry/meter. Hubungan dari ketiga jenis permeabilitas dijelaskan melalui persamaan berikut ini.

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_o \quad (2.4)$$

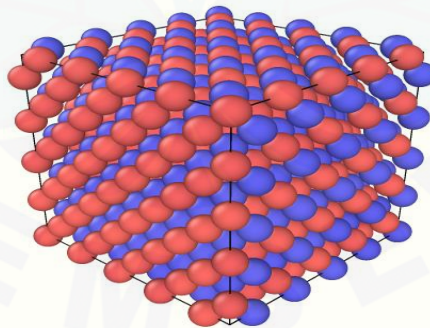
Berdasarkan nilai permeabilitas relatifnya, maka benda dapat dikelompokan yaitu:

1. Benda-benda feromagnetik merupakan benda dengan $\mu_r \gg 1$. Benda ini bila diletakkan pada medan magnet, maka garis-garis gaya magnet cenderung melewati benda tersebut. Oleh karena itu, benda ini mudah ditarik oleh magnet dan mudah dibuat magnet buatan. Contoh benda ini antara lain besi, baja, nikel, dan kobalt.
2. Benda-benda paramagnetik merupakan benda dengan $\mu_r > 1$. Benda ini tidak begitu kuat ditarik magnet. Benda ini bila diletakkan pada medan magnet, fluks yang mengalir di dalamnya sama dengan fluks magnet yang mengalir pada udara luar. Contoh benda ini antara lain aluminium, khrom, mangan dan platinum.
3. Benda-benda diamagnetik merupakan benda dengan $\mu_r < 1$. Benda ini sukar ditarik magnet. Benda ini bila diletakkan pada medan magnet, maka benda ini cenderung dihindari oleh garis-garis gaya magnet. Contoh benda ini antara lain bismuth, antimoni, tembaga, seng, merkuri, emas dan perak.
4. Benda-benda Ferimagnetik memiliki magnetisasi dua subkisi dengan besar berbeda dan nilai resultan non-zero dari magnetisasi total. Bahan ini memiliki sifat seperti bahan feromagnetik ketika berada di bawah temperatur *Curie*. Namun, memiliki sifat seperti bahan paramagnetik ketika berada di atas temperatur *Curie*. Bahan ini memiliki momen dipol yang besarnya tidak sama dan saling berlawanan arah. Bahan ini memiliki magnetisasi, meskipun dalam keadaan tanpa medan magnet. Contoh bahan ini adalah Fe_3O_4 dan FeO .
5. Benda-benda Antiferomagnetik memiliki interaksi antar momen magnetik cenderung untuk mensejajarkan diri dengan momen antiparalel yang berdekatan.

Antiferromagnetik berisi dua subkisi yang identik dari ion-ion magnetik. Ion magnetik secara spontan termagnetisasi di bawah temperatur Neel (temperatur yang menandai perubahan sifat magnet dari antiferromagnetik ke paramagnetik). Bahan ini tidak memiliki total magnetisasi spontan dan respon terhadap medan luar sama seperti bahan paramagnetik pada temperatur tertentu, magnetisasinya bersifat linier, suseptibilitas kecil (+). Suseptibilitas bahan ini di atas temperatur Neel sama seperti paramagnetik, namun akan menurun seiring menurunnya temperatur. Contoh bahan ini adalah MnO. Di atas temperatur Neel berstruktur FCC, namun di bawah temperatur Neel berstruktur *Simple Cubic* (Coey, 2009).

2.3 Bahan Mikromagnetik CoPd

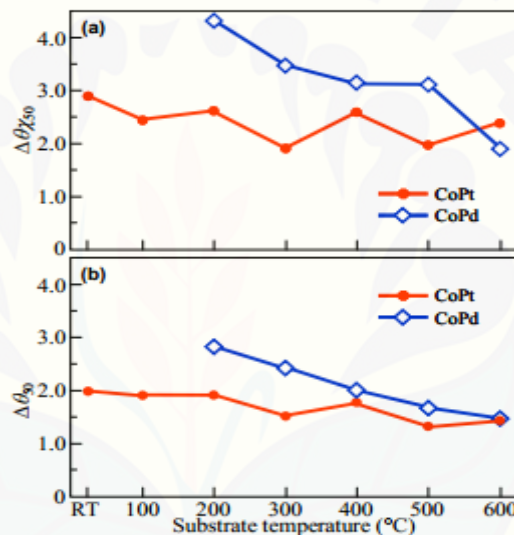
Pertama kali lapisan *multilayer* kobalt paladium (CoPd) dengan lapisan *ultrathin* kobalt telah diselidiki oleh Carcia *et al.* pada tahun 1985. Penelitian ini menunjukkan adanya magnetisasi luar bidang *multilayer* yang berkaitan dengan tegangan antarmuka dan efek polarisasi atom Pd di dalam lapisan atom Pd di antara lapisan kobalt. Tegangan antarmuka yang disebabkan oleh adanya ketidaksesuaian kisi (kobalt (HCP/FCC): 2,51Å/3,54Å, paladium (FCC): 3,89Å).



Gambar 2.4 Struktur kristal FCC CoPd dengan Co berwarna merah dan Pd berwarna biru berukuran $n_x=5$, $n_y=5$, dan $n_z=5$ terdiri dari 500 atom

Lapisan tipis CoPd memiliki struktur kristal berupa FCC. Lapisan ini biasanya hanya mempunyai 1 puncak utama yaitu bidang (111). Lapisan ini memiliki parameter-parameter antara lain magnetisasi saturasi (M_s) = $42,12 \times 10^4$ (A/m),

konstanta *exchange* (A) = $3 \times 10^{-11}(\text{J}/\text{m})$, dan konstanta anisotropi (K) = $5,4 \times 10^5(\text{J}/\text{m}^3)$, juga efek redaman yang digunakan $\alpha = 0,05$ (Salamah, 2014). Lapisan tipis CoPd dapat tumbuh di atas temperatur 200°C diterangkan pada gambar 2.5. Sedangkan, lapisan tipis CoPd berbentuk amorf dapat terbentuk pada temperatur dibawahnya. Lapisan tipis CoPd memiliki regangan kisi yang semakin menurun pada saat temperatur substrat dinaikkan. Lapisan tipis CoPd mempunyai sifat magnetik yang dipengaruhi oleh struktur kristal dan derajat orientasi magnetik (Suzuki *et al.*, 2012).



Gambar 2.5 Temperatur substrat bergantung pada $\Delta\theta_{\chi 50}$ (*in-plane*) dan $\Delta\theta_{50}$ (*out-of-plane*) perhitungan dilakukan untuk *alloy film* CoPt dan CoPd yang ditumbuhkan pada substrat MgO (111) (Suzuki *et al.*, 2012)

2.4 Konsep Simulasi Mikromagnetik

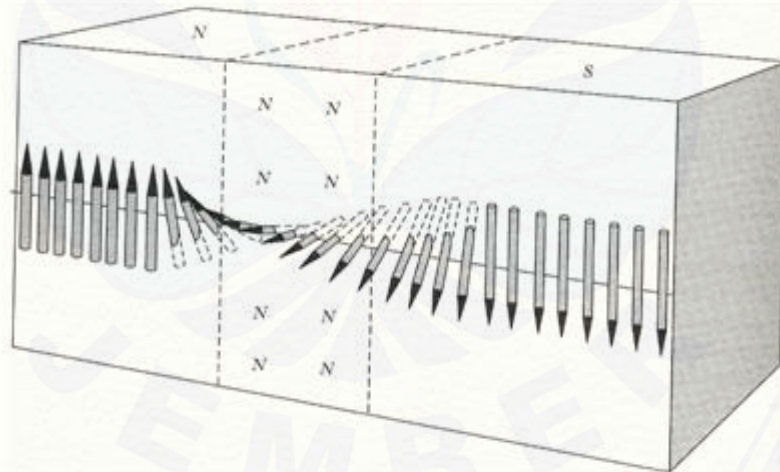
Simulasi mikromagnetik dapat digunakan aplikasi sebagai berikut ini.

1. OOMMF (*finite difference methods*) menggunakan bangun persegi/kotak sebagai atom penyusun 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* yang besar (<http://math.nist.gov/oommf/otherlinks.html>).

2. Nmag (*finite elements method*) menggunakan bangun lingkaran sebagai atom penyusun bahan. Hal ini dapat dianggap bahwa metode ini sangat sesuai untuk simulasi bangun kelengkungan (bidang melingkar). Metode ini perlu dibuat *mesh* untuk penentuan titik penting dalam susunan simulai ini. *Mesh* ini ditentukan perbandingan ukuran yang sesuai antara bangun dengan penyusunnya (<http://nmag.soton.ac.uk>).

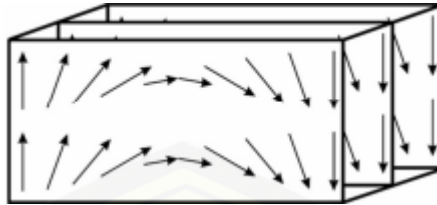
2.5 Domain Magnet dan Domain Wall

Konsep domain magnet dalam bahan feromagnetik tentang kondisi kesetimbangan momen magnet dengan arah tertentu (*magnetization*) di bawah temperatur Curie dinyatakan oleh P. Weiss pada tahun 1907. Pada tahun 1932 Felix Bloch menyampaikan konsep *domain wall* yaitu daerah transisi yang membatasi antar domain magnet dalam bahan feromagnetik. *Domain wall* berubah secara perlahan-lahan pada bidang kristal dikenal sebagai *Bloch Wall* seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Konfigurasi momen magnet dalam *domain wall* berubah secara perlahan-lahan membentuk struktur *domain wall* 180° dikenal dengan *Bloch Wall* (Kittel, 2005)

Bloch wall banyak terdapat pada bahan feromagnetik berbentuk *Bulk*, dimana spin berotasi pada bidang yang sejajar dengan *domain wall*. Bahan feromagnetik lain yang dibentuk oleh lapisan tipis (*thin film*) disebut *Neel Wall*. *Neell Wall* ini memiliki orientasi spin sepanjang bidang *thin film* seperti pada gambar 2.7 (Getzlaff, 2008).



Gambar 2.7 Struktur *Neel Wall* dimana orientasi spinnya terjadi pada bidang *thin film* (Getzlaff, 2008)

Domain wall yang dibentuk pada bahan feromagnetik merupakan hasil kompetisi antara energi *exchange* dan energi anisotropi. Energi *exchange* digunakan untuk mempertebal *domain wall*. Namun, semakin tebal *domain wall* akan menimbulkan transisi arah spin. Hal ini akan meningkatkan efek anisotropi. Jika efek ini ditingkatkan terus-menerus, maka dapat membuat tipis *domain wall*. Kompetisi antara energi *exchange* dan energi anisotropi ditandai dengan adanya *exchange length*

$$I_{ex} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}} \quad (2.5)$$

Dimana, I_{ex} adalah *exchange length* (m), A adalah konstanta *exchange stiffness* (J/m), μ_0 adalah permeabilitas udara (J/A^2m), M_s adalah magnetisasi saturasi (A/m) (Chikazumi dan Charap, 1964).

2.6 Energi pada Sistem Feromagnetik

2.6.1 Energi *Exchange*

Energi *exchange* (E_{ex}) merupakan energi yang ditimbulkan oleh interaksi spin dengan spin tetangganya melalui *exchange coupling*. Energi ini dapat dijelaskan dengan model Heisenberg sebagai berikut ini.

$$E_{ex} = -2J \sum_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \quad (2.6)$$

dimana, J adalah konstanta *exchange* (J/m), \mathbf{S}_i dan \mathbf{S}_j adalah unit vektor dua spin atom yang berinteraksi. 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. Persamaan 2.6 disederhanakan dengan ekspansi Taylor, maka diperoleh persamaan sebagai berikut ini.

$$\begin{aligned} E_{ex} &= -2JS^2 \sum_{ij} \cos \theta_{ij} \approx -2JS^2 \sum_{ij} \left(1 - \frac{1}{2} \theta_{ij}^2\right) \\ &= \text{const} + JS^2 \sum_{ij} \theta_{ij}^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dimana θ_{ij} adalah sudut antara m_j dan m_i , maka $|\theta_{ij}| = |\mathbf{m}_j - \mathbf{m}_i|$. Sehingga persamaan di atas menjadi

$$E_{ex} = \text{const} + JS^2 (\mathbf{m}_j - \mathbf{m}_i)^2 \quad (2.8)$$

Dimana \mathbf{m} adalah vektor magnetisasi dan S adalah nilai spin. Jarak vektor $\mathbf{m}_j - \mathbf{m}_i$ dapat dituliskan dalam bentuk fungsi kontinu \mathbf{m} yaitu $\mathbf{m}_j - \mathbf{m}_i = \Delta \mathbf{r}_j \cdot \nabla \mathbf{m}$ dengan $\Delta \mathbf{r}_j = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i$. Energi *exchange* dapat dituliskan

$$\begin{aligned} E_{ex} &= \text{const.} + JS^2 \sum_i (\Delta \mathbf{r}_j \cdot \nabla \mathbf{m}) \\ &= \text{const.} + JS^2 \sum_i \left[(\Delta \mathbf{r}_j \cdot \nabla m_x)^2 + (\Delta \mathbf{r}_j \cdot \nabla m_y)^2 + (\Delta \mathbf{r}_j \cdot \nabla m_z)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.9)$$

Karena sifat simetris bentuk kubik, maka $\sum x_j y_j = 0$ dan $\sum x_j^2 = \frac{1}{3} \sum \Delta \mathbf{r}_j^2$.

Penjumlahan seluruh indeks j dan total bilangan spin n per unit volume, maka energi *exchange* per unit volume ϵ_{ex} diberikan pada persamaan berikut ini.

$$\epsilon_{ex} = A \left[(\nabla m_x)^2 + (\nabla m_y)^2 + (\nabla m_z)^2 \right] \quad (2.10)$$

Dengan $A = \left(\frac{1}{6}\right) nJS^2 \sum \Delta \mathbf{r}_j^2$ merupakan konstanta *exchange stiffness* (J/m).

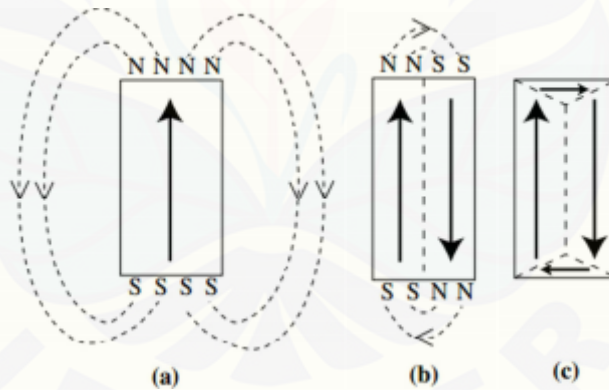
Sehingga, energi *exchange* untuk seluruh volume bahan magnet adalah

$$E_{ex} = A \int_V (\nabla \mathbf{m})^2 dV = \frac{A}{M_s^2} \int_V (\nabla \mathbf{M})^2 dV \quad (2.11)$$

Dengan $\mathbf{M} = M_s \cdot \mathbf{m}$, dimana \mathbf{M} adalah magnetisasi (A/m) dan M_s adalah magnetisasi saturasi (A/m). Persamaan di atas bersifat isotropik karena E_{ex} tidak bergantung pada arah perubahan magnetisasi (Getzlaff, 2008).

2.6.2 Energi Magnetostatik

Energi magnetostatik bahan magnet berasal dari interaksi muatan kutub-kutub seperti muatan kutub positif dan kutub negatif (dipol-dipol) yang berasal dari bahan itu sendiri. Gambar 2.8 mengilustrasikan bahwa magnetisasi menyebabkan dipol-dipol berperilaku sebagai magnet dengan medan magnetik di sekitarnya. Medan magnetik tersebut dikenal dengan sebutan medan demagnetisasi (*demagnetizing field*) H_d . Sehingga energi magnetostatik sering juga disebut sebagai energi demagnetisasi. Besarnya energi magnetostatik sangat bergantung pada jumlah dipol serta arah orientasi antara dipol-dipol. Ketika dipol-dipol pada bahan magnet memiliki orientasi arah yang sama satu dengan lainnya, energi magnetostatiknya akan lebih besar, seperti pada gambar 2.8 (a), bila dibandingkan dengan bahan magnet dengan dipol-dipol anti paralel satu dengan lainnya, seperti pada gambar 2.8 (b). Sedangkan keadaan dipol-dipol seperti pada gambar 2.8 (c) menyebabkan energi magnetostatik ini bernilai minimum (Guimarães, 2009).



Gambar 2.8 Pengurangan energi magnetostatik atau energi demagnetisasi akibat orientasi arah dari dipol-dipol magnet (Nicola, 2011)

Energi magnetostatik E_d , dapat dianggap sebagai besarnya energi magnetisasi di dalam medan demagnetisasi yang dituliskan oleh persamaan berikut

$$E_d = -\frac{1}{2}\mu_0 \int_V \mathbf{H}_d \mathbf{M} dV \quad (2.19)$$

Dimana \mathbf{H}_d adalah medan demagnetisasi dan \mathbf{M} adalah magnetisasi. Energi magnetostatik E_d dapat juga ditentukan nilainya menggunakan persamaan berikut

$$E_d = \frac{1}{2} \mu_0 \int_{\text{allspace}} \mathbf{H}_d^2 dV \quad (2.20)$$

Dimana nilai \mathbf{H}_d ditentukan oleh persamaan

$$\mathbf{H}_d = -N_d \mathbf{M} \quad (2.21)$$

Dimana N_d adalah faktor demagnetisasi yang bergantung pada bentuk bahan dan arah magnetisasi. Faktor demagnetisasi N_d untuk bahan berbentuk bola adalah $\frac{1}{3}$ (Guimarães, 2009).

2.6.3 Energi Anisotropi

Energi anisotropi adalah energi yang mengacu pada arah magnetisasi dan sumbu kristalografi (*crystallographic axis*). Pada banyak kasus yang ditemui, acuan magnetisasi memiliki kecenderungan untuk sejajar sepanjang arah sumbu mudah kristal (*easy axis direction*). Energi anisotropi per unit volume $E_{ani}(\mathbf{m})$ berbentuk bola dengan sudut magnetisasi disimbolkan \emptyset dan θ dalam bentuk persamaan

$$E_{ani}(\mathbf{m}) = \int_V E_{ani}(\mathbf{m}) dV \quad (2.22)$$

Dimana $\mathbf{m} = (\sin \theta \cos \emptyset e_x + \sin \theta \sin \emptyset e_y + \cos \theta e_z)$ dan vektor e_x , e_y , dan e_z bersesuaian dengan sumbu kristalografi a , b , dan c . Dalam kasus uniaksial, maka energi anisotropi dinyatakan dengan persamaan

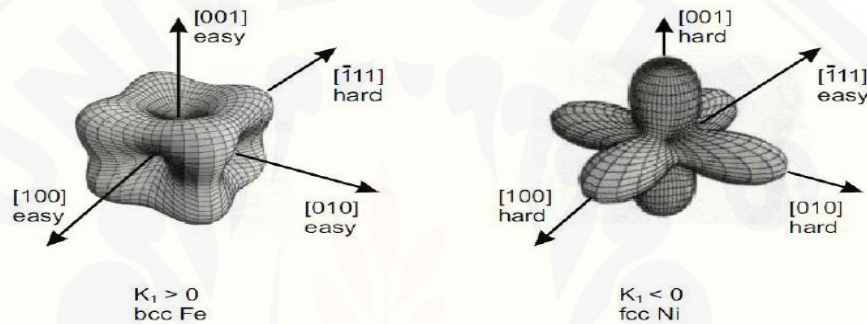
$$\epsilon_{ani} = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + K_3 \sin^6 \theta + \dots \quad (2.23)$$

Dengan K_1 , K_2 , dan K_3 adalah konstanta anisotropi dalam satuan J/m^3 dan θ merupakan sudut antar magnetisasi dengan sumbu kristalografi. K_1 adalah konstanta uniaksial anisotropi yang dapat bernilai positif atau negatif. Untuk nilai $K > 0$, maka energi minimumnya terletak pada $\theta = 0$ dan $\theta = \pi$. Hal ini dapat menunjukkan bahwa sumbu mudah (*easy axis*) sejajar dengan sumbu simetris dan dikenal sebagai *easy axis anisotropy*. Untuk nilai $K < 0$, maka energi minimumnya terletak pada $\theta = \pi/2$. Hal ini menunjukkan bahwa sudut ini biasa disebut sebagai *easy plane anisotropy* (Guimarães, 2009).

Sebagai contoh, besi (Fe) dengan struktur Kristal kubik mempunyai *easy axis* sepanjang (100) dan $K > 0$, Nikel (Ni) mempunyai *easy axis* sepanjang (111) dan $K < 0$, sedangkan kobalt (Co) dengan struktur Heksagonal mempunyai uniaksial anisotropi (Hughes, 2000). Untuk Kristal kubik, kerapatan energi anisotropi dapat ditulis dalam persamaan

$$\epsilon_{ani} = K_1 + K_2(a_1^2 a_2^2 + a_1^2 a_3^2 + a_2^2 a_3^2) + K_3(a_1^2 a_2^2 a_3^2) + \dots \quad (2.24)$$

Dengan arah dari a_n adalah cosinus.



Gambar 2.9 Ilustrasi arah magnetisasi dari Fe (kiri) yang mempunyai $K_1 > 0$, arah *easy axis* pada [100], [010], dan [001]. Untuk arah *hard axis* pada [111]. Untuk Ni (kanan) dengan $K_1 < 0$, arah *easy axis* [111] dan arah *hard axis* [100], [010], dan [001] (Boardman *et al.*, 2004)

Kontribusi energi anisotropi yang lain adalah energi anisotropi dari pengaruh bentuk (*shape anisotropy energy*). Anisotropi bentuk berasal dari interaksi magnetostatik yang bergantung pada bentuk sampel (bola, elips, dan kubus). Pengaruh bentuk ini dapat dinyatakan dalam sebuah faktor demagnetisasi N dalam 3 sumbu utama (x, y, z). Hal ini terdapat hubungan sederhana yaitu $N_a + N_b + N_c = 1$. Contoh pada bentuk bola yang mempunyai faktor demagnetisasi $N = 1/3$, dimana $N_a = N_b = N_c$, untuk bentuk silinder mempunyai nilai $N_a = N_b = 1/2$ dan $N_c = \infty$, dan untuk bidang datar mempunyai nilai $N_a = N_b = 0$ dan $N_c = 1$ (Hughes, 2000).

2.6.4 Energi Zeeman

Energi Zeeman adalah bentuk energi yang berasal dari interaksi medan vektor magnetisasi (momen magnet) dengan medan magnet luar \mathbf{H}_{ext} . Besarnya energi Zeeman dapat ditentukan dengan persamaan

$$E_z = -\mu_0 \int \mathbf{H}_{ext} \cdot \mathbf{M} dV \quad (2.25)$$

Dimana, \mathbf{M} adalah magnetisasi dan \mathbf{H}_{ext} adalah medan magnet eksternal yang diberikan pada bahan magnetik. Energi Zeeman akan bernilai kecil pada saat arah magnetisasi searah dengan arah medan luar (Guimarães, 2009).

2.7 Konsep Mikromagnetik

Konsep dasar mikromagnetik adalah menggunakan konsep *continuum* yaitu konsep bidang ilmu fisika yang menjelaskan sifat-sifat bahan feromagnetik khusus skala mikro dengan pendekatan mekanika klasik dengan fungsi energi sistem yang bersifat kontinum berkontidisi setimbang. Konsep *continuum* memungkinkan untuk perhitungan distribusi magnetisasi sampel dengan orientasi spin acak (Miltat, 2007).

Perhitungannya berdasarkan pada prinsip minimalisasi fungsi energi sistem, sehingga evolusi magnetisasi dan profil energi dapat ditentukan. Energi-energi yang terlibat langsung dalam proses magnetisasi dikenal dengan istilah energi bebas Gibb (*Gibb's free energy*). Secara termodinamika energi bebas ini sebagai fungsi medan magnet, magnetisasi, dan suhu dapat dituliskan dalam persamaan

$$G(H, M, T) = U(M) - TS - \mu_0 \mathbf{H} \cdot \mathbf{M} \quad (2.26)$$

Dengan nilai U adalah energi bebas, S adalah entropi, \mathbf{H} adalah medan magnet eksternal, dan \mathbf{M} adalah magnetisasi. Energi bebas Gibb, $G(H, M, T)$ dalam mikromagnetik dikenal dengan energi bebas Landau G_L . Energi bebas Landau terdiri dari beberapa energi antara lain energi *exchange*, energi anisotropi, energi demagnetisasi, dan energi Zeeman dalam elemen volume dapat dituliskan dengan persamaan

$$G_L(\mathbf{M}, \mathbf{H}) = \int \left(\frac{A}{|M_s|^2} (\nabla \mathbf{M})^2 + E_{ani}(\mathbf{M}) - \frac{1}{2} \mu_0 \mathbf{H}_d \mathbf{M} - \mu_0 \mathbf{H}_{ext} \mathbf{M} \right) dV \quad (2.27)$$

Dengan $\mathbf{M} = M_s \mathbf{m}$ dan M_s adalah magnetisasi saturasi. Kemudian berdasarkan prinsip minimum energi yaitu menurunkan energi bebas Landau terhadap magnetisasi atau dalam bentuk $\partial G_L / \partial \mathbf{M} = 0$, maka dapat dituliskan persamaannya

$$\partial G_L = - \int_V \left[2\nabla \cdot \left(A\nabla \mathbf{m} - \frac{\partial E_{ani}}{\partial \mathbf{m}} + \mu_0 M_s \mathbf{H}_d + \mu_0 M_s \mathbf{H}_{ext} \right) \right] \delta \mathbf{m} dV + \int_S \left[2A \frac{\delta \mathbf{m}}{\delta n} \right] dA = 0 \quad (2.28)$$

Dengan menggunakan sifat $\partial \mathbf{m} = \mathbf{m} \times \partial \boldsymbol{\theta}$, dimana vektor $\partial \boldsymbol{\theta}$ menyatakan rotasi pada sudut θ dan sifat $\mathbf{v} \cdot (\mathbf{w} \times \mathbf{u}) = \mathbf{u} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{w}) = -\mathbf{u} \cdot (\mathbf{w} \times \mathbf{v})$. Maka persamaan (2.28) dapat dituliskan menjadi

$$\begin{aligned} \partial G_L = - \int_V \mathbf{m} \times \left[2\nabla \cdot \left(A\nabla \mathbf{m} - \frac{\partial E_{ani}}{\partial \mathbf{m}} + \mu_0 M_s \mathbf{H}_d + \mu_0 M_s \mathbf{H}_{ext} \right) \right] \partial \boldsymbol{\theta} dV \\ + \int_S \left[2A \frac{\delta \mathbf{m}}{\delta n} \times \mathbf{m} \right] \partial \boldsymbol{\theta} dA = 0 \end{aligned} \quad (2.29)$$

Persamaan (2.29) akan dapat bernilai nol jika dan hanya jika mampu memenuhi syarat:

$$\begin{cases} \mathbf{m} \times \left[2\nabla \cdot \left(A\nabla \mathbf{m} - \frac{\partial E_{ani}}{\partial \mathbf{m}} + \mu_0 M_s \mathbf{H}_d + \mu_0 M_s \mathbf{H}_{ext} \right) \right] = 0 \\ \left[2A \frac{\delta \mathbf{m}}{\delta n} \times \mathbf{m} \right] = 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

Suku kedua pada persamaan bentuk $\frac{\delta \mathbf{m}}{\delta n} \times \mathbf{m} = 0$ atau $\frac{\delta \mathbf{m}}{\delta n} = 0$ mempunyai arti bahwa vektor \mathbf{m} dan $\frac{\delta \mathbf{m}}{\delta n}$ bersifat orthogonal. Selanjutnya, besar medan efektif \mathbf{H}_{eff} dapat didefinisikan sebagai:

$$\mathbf{H}_{eff} = \frac{2}{\mu_0 M_s} \nabla (A\nabla \mathbf{m}) - \frac{1}{\mu_0 M_s} \frac{\partial E_{ani}}{\partial \mathbf{m}} + \mathbf{H}_d + \mathbf{H}_{ext} \quad (2.31)$$

Masing-masing suku menyatakan interaksi *exchange*, anisotropi, demagnetisasi, dan medan magnet eksternal. Sehingga persamaan (2.30) dapat dituliskan menjadi

$$\mu_0 M_s \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{eff} = 0 \quad \text{dan} \quad \frac{\delta \mathbf{m}}{\delta n} = 0 \quad (2.32)$$

Persamaan (2.31) biasa dikenal sebagai persamaan Brown. Persamaan ini yang diselesaikan secara keseluruhan dapat untuk mengetahui distribusi magnetisasi bahan feromagnetik pada keadaan setimbang (Brown, 1968).

2.8 Dinamika Magnetisasi Spin

Persamaan Brown ini hanya diperoleh kesetimbangan magnetisasi dari bahan feromagnetik, tetapi tidak dijelaskan secara rinci proses dinamika magnetisasi yang terjadi saat menuju kesetimbangan. Dinamika magnetisasi pertama kali diperkenalkan oleh Landau dan Lifshitz (LL) pada tahun 1935. Perkembangan persamaan LL selanjutnya yaitu: dinamika magnetisasi dijelaskan dengan sangat baik hingga kondisi energi dan faktor redaman yang kecil. Pada tahun 1955, persamaan LL diformulasikan kembali oleh Gilbert dengan memperhitungkan parameter redaman. Formula ini dikenal sebagai persamaan Landau-lifshitz-Gilbert (LLG).

Konsep dasar dinamika magnetisasi adalah momen magnet \mathbf{m} yang dipengaruhi medan eksternal \mathbf{H} , sehingga dihasilkan torka dengan arah tegak lurus terhadap momen magnet dan medan magnet eksternal. Torka ini digunakan pada momen magnet untuk melakukan gerak secara presisi di sekitar arah medan magnet eksternal. Hubungan torka (\mathbf{T}) dengan perubahan momentum angular (\mathbf{L}) terhadap waktu dapat dituliskan dalam persamaan

$$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{m} \times \mathbf{H} \quad (3.33)$$

Momen magnet sendiri pada orde atom memiliki hubungan dengan momentum angular (\mathbf{L}) yang ditampilkan pada persamaan berikut ini.

$$\mathbf{m} = -\gamma \mathbf{L} \quad (3.34)$$

Dimana $\gamma = 2,11 \times 10^5 \text{ m A}^{-1}\text{s}^{-1}$ adalah nilai absolut dari *gyromagnetic ratio* untuk elektron, jika dituliskan persamaannya

$$\gamma = g \frac{|e|}{2m_e c} \quad (3.35)$$

Dimana $g \approx 2$ merupakan faktor Lande, muatan elektron $e = -1,6 \times 10^{-19}\text{C}$, massa elektron $m_e = 9,1 \times 10^{-31}\text{Kg}$ dan kecepatan cahaya $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Dengan menggunakan prinsip persamaan (3.34), maka persamaan gerak momen magnetik \mathbf{m} terhadap waktu dapat dituliskan kembali dalam persamaan berikut ini

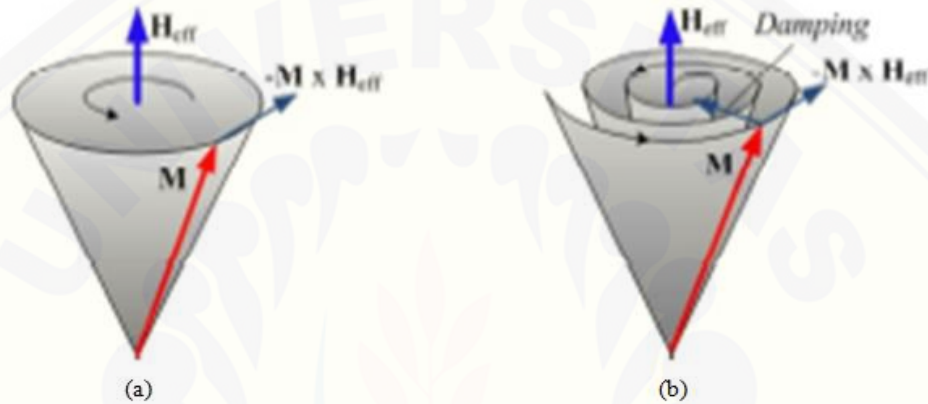
$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = -\gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H} \quad (3.36)$$

Dengan asumsi bahwa spin momen magnet bergerak sepanjang elemen volume dV , maka persamaan (3.36) dapat ditulis menjadi

$$\frac{1}{dV} \frac{d\Sigma \mathbf{m}}{dt} = -\gamma \frac{d\Sigma \mathbf{m}}{dV} \times \mathbf{H} \quad (3.37)$$

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

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H} \quad (3.38)$$



Gambar 2.10 Gerak presisi dari momen magnet terhadap medan efektif. (a) tanpa redaman, (b) dengan menggunakan redaman (*damping*) (Gilbert, 2004)

2.8.1 Persamaan Landau-Lifshitz (LL)

Dinamika gerak spin magnet merupakan hasil dari gerak rotasi momen magnet terhadap arah medan efektif \mathbf{H}_{eff} pada kondisi setimbang. Nilai \mathbf{H}_{eff} diberikan oleh persamaan (2.31), maka persamaan (2.38) dituliskan menjadi:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} \quad (2.39)$$

Dari persamaan di atas nampak peristiwa yang menjelaskan bahwa tidak ada kondisi kecenderungan gerak dari spin magnet untuk menyearahkan diri terhadap medan efektif \mathbf{H}_{eff} sesuai dengan gambar 2.10 (a), namun Landau-Lifshitz memasukkan faktor redaman sesuai gambar 2.10 (b) menjadi persamaan baru yaitu

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} - \frac{\lambda}{|\mathbf{M}|} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) \quad (2.40)$$

Dimana $\lambda > 0$ yang merupakan faktor redaman Landau-Lifshitz dan $|\mathbf{M}| = M_s$, untuk persamaan Landau-Lifshitz ini disingkat sebagai persamaan LL.

2.8.2 Persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)

Gilbert mengusulkan pendekatan berbeda mengenai faktor redaman yang terlalu besar dalam pengamatan peristiwa disipasi pada tahun 1955. Hal ini menyimpulkan bahwa persamaan LL tidak akurat, untuk mengatasinya Gilbert menambahkan persamaan torka, yaitu

$$\frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.41)$$

Sehingga mengubah persamaan (2.40), menjadi persamaan yang ditulis sebagai

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.42)$$

Dimana nilai $\alpha > 0$ merupakan konstanta redaman Gilbert. Secara umum persamaan 2.42 dikenal sebagai persamaan LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert). Jika ditambahkan faktor pengali magnetisasi (\mathbf{M}), maka persamaan LLG menjadi

$$\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) + \mathbf{M} \times \left(\frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right) \quad (2.43)$$

Dengan menggunakan sifat dasar dari identitas vektor $\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})\mathbf{b} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})\mathbf{c}$ dan menganggap bahwa $\mathbf{M} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = 0$, maka terbentuk persamaan

$$\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) - \alpha M_s \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.44)$$

Persamaan (2.44) disubstitusikan pada persamaan (2.42), maka terbentuk persamaan

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} - \frac{\gamma \alpha}{M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) - \alpha^2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.45)$$

Dengan cara lain Gilbert mengasumsikan untuk $\gamma_L = -\frac{\gamma}{(1+\alpha^3)}$ dan $\lambda = \frac{\gamma \alpha}{(1+\alpha^2)}$ persamaan di atas dapat diekspresikan kembali dalam bentuk

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1+\alpha^2)} (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) - \frac{\gamma \alpha}{(1+\alpha^2)M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) \quad (2.46)$$

Suku pertama pada bagian kanan pada persamaan (2.46) menjelaskan proses gerak secara presisi dari spin untuk dapat berotasi yang merupakan akibat pengaruh medan magnet eksternal (*giro magnetic precession*) yang biasa dikenal sebagai *Larmor Precision* dan suku kedua pada bagian paling kanan menjelaskan efek disipasi dari gerak presisi yang disebut *the damping effect of precision*. Jika nilai faktor damping

(α) kecil, maka dapat dihasilkan bahwa suku $(1 + \alpha^2) = 1$, hal ini mengakibatkan persamaan LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert) dapat disederhanakan menjadi persamaan LL (Landau-Lifshitz) (Gilbert, 2004).

2.9 Konfigurasi Struktur Domain pada Nanopartikel

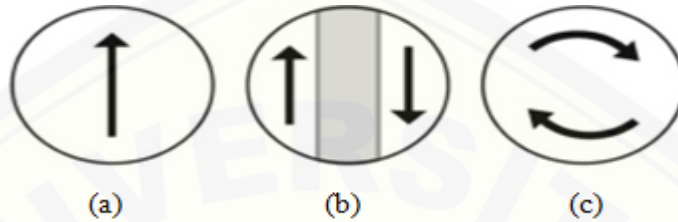
2.9.1 Domain Tunggal (*Single-Domain*)

Stoner dan Wohlfarth pada tahun 1948, mengusulkan model penggambaran fenomena magnetik pada partikel kecil (*small particles*). Model ini menggambarkan magnetik yang tersusun atas partikel kecil memiliki orientasi spin domain yang homogen (domain tunggal) dengan bentuk bangun *ellipsoid*. Pada keadaan ini, peristiwa magnetisasi menghasilkan dipol-dipol yang searah (baik ukuran dan arah). Magnetisasi total dari sistem merupakan hasil penjumlahan vektor dipol individu yang terkandung dalam sistem. Sehingga, magnetisasi sistem dapat digambarkan sebagai vektor tunggal $|\mathbf{M}| = \sum_i^N m_i = Nm$. Model ini menganggap spin-spin dalam sistem saling berinteraksi, namun lemah. Hal ini menjelaskan bahwa model ini mengabaikan interaksi energi *exchange* yang terjadi pada sistem. Pendekatan mikromagnetik pada saat *single-domain*, keseluruhan momen magnet sejajar sumbu anisotropi, maka kontribusi energi *exchange* dan energi anisotropi dari energi total sistem adalah nol. Energi yang bekerja pada kondisi ini adalah energi magnetostatik. Partikel berstruktur domain tunggal (*single domain*) biasa dinamakan sebagai partikel Stoner-Wohlfarth, seperti gambar 2.11 (a) (Guimarães, 2009).

2.9.2 *Two-Domain* dan *Vorteks-State*

Partikel kecil yang memiliki bentuk bola pada saat nilai diameter melewati batas angka tertentu yang dikenal dengan sebutan diameter kritis (*critical diameter*), maka yang terjadi struktur domain partikel ini akan berubah arah dari keadaan *single-domain* menjadi *two-domain* dan atau *vorteks*, seperti gambar 2.11 (b) dan 2.11 (c).

Energi magnetostatik bernilai minimum pada keadaan ini, walaupun semua spin tidak sejajar dengan perubahan arah secara bertahap cukup kecil, sehingga pengurangan nilai energi magnetostatiknya lebih besar bila dibandingkan dengan nilai kenaikan energi *exchange* (Guimarães, 2009).



Gambar 2.11 Tiga kemungkinan yang dapat terjadi untuk keadaan konfigurasi domain magnet saat energi minimum (*groundstate*) dari partikel magnetik bentuk bola (*spherical magnetic particle*). (a) *single-domain*, (b) *two-domain*, (c) *vortex-state* (Guimarães, 2009)

2.10 Diameter Kritis (*Critical Diameter*)

Diameter kritis untuk *single domain* dipaparkan oleh Kittel pada tahun 2005, dengan membandingkan energi yang diperlukan untuk membuat dinding domain terhadap pengurangan energi magnetostatik atau energi demagnetostatik selama pembentukan struktur domain, dirumuskan sebagai berikut ini.

$$DC_1 = \left(\frac{9\gamma_w}{2\pi M_s^2} \right) \quad (2.47)$$

Dengan $\gamma_w = 2\sqrt{AK}$ adalah energi permukaan *Bloch wall* bahan magnetik, A adalah konstanta *exchange*, K adalah konstanta anisotropi, M_s adalah magnetisasi saturasi.

Selanjutnya, Brown menghitung secara rinci batas nilai diameter kritis untuk keadaan *single-domain* dengan tinjauan energi minimumnya, diperoleh persamaan

$$DC_2 = 7,211 \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}} = 7,211 I_{ex} \quad (2.48)$$

Dengan nilai $I_{ex} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}}$ adalah *exchange length*.

Selanjutnya, R.Skomski pada tahun 2008 memprediksi besar nilai diameter kritis untuk partikel *single-domain* pada temperatur ruang dengan persamaan

$$DC_3 = \frac{72\sqrt{AK}}{\mu_0 M_s^2} \quad (2.49)$$

Sedangkan untuk energi sistem yang terjadi, Brown telah memprediksi secara rinci energi transisi saat keadaan struktur *single-domain* dan *multi-domain*.

Soft-magnet
$$DC_4 = \frac{9,0584 \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}}}{\left(1 - 2,8075 \frac{2K}{\mu_0 M_s^2}\right)} = \frac{9,0584}{1 - 2,8075\kappa} I_{ex} \quad (2.50)$$

Dengan $\kappa = \frac{2K}{\mu_0 M_s^2}$ adalah *hardness parameter*.

Hard-magnet
$$DC_4 = \frac{9\pi \sqrt{2A(K_1 + 2\sigma \mu M_s^2)}}{\mu_0 M_s^2 (3\sigma - 2)} = \frac{9\pi \sqrt{\kappa + 4\sigma}}{\sqrt{2}(3\sigma - 2)} \quad (2.51)$$

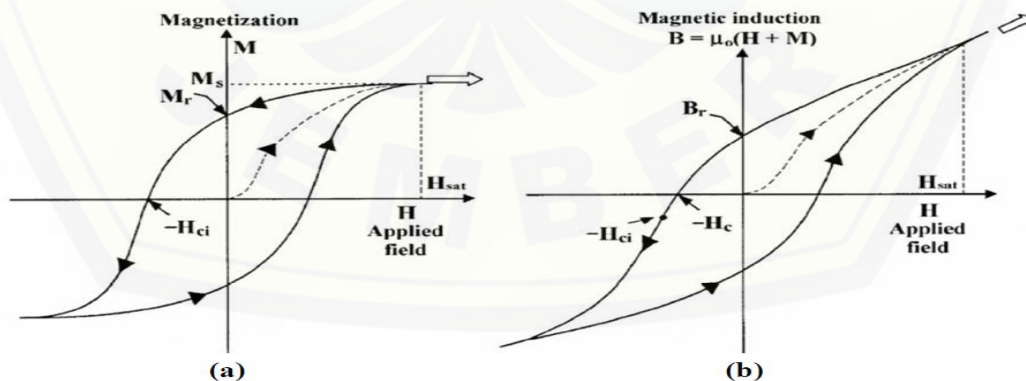
Dengan $\sigma = 0,785398$

2.11 Kurva Histeresis

Sifat pada bahan feromagnetik dapat dilihat dari bentuk *loop* kurva histeresis. Kurva ini memetakan magnetisasi bahan M untuk kuat medan magnet yang diberikan H . Ada cara lain yaitu dengan memetakan induksi magnet B di dalam bahan feromagnetik terhadap kuat medan magnet H . Kedua cara ini pada dasarnya mengikuti persamaan berikut ini

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.52)$$

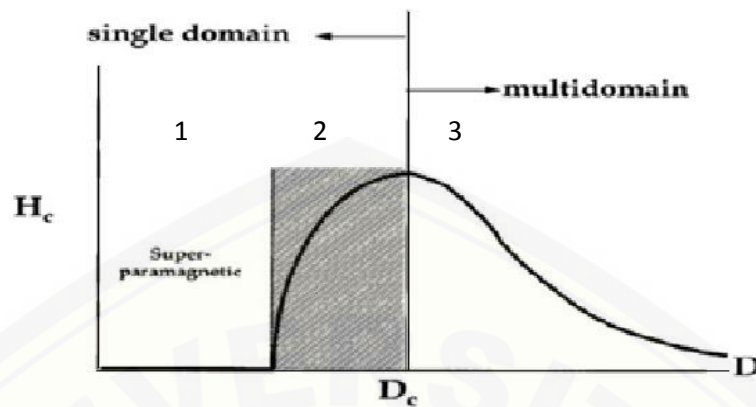
Dimana, B adalah induksi magnet (Tesla), μ_0 adalah permeabilitas ruang hampa, H adalah medan magnet eksternal (A/m), M adalah magnetisasi (A/m).



Gambar 2.12 Kurva histeresis untuk bahan feromagnetik. (a) M terhadap H : M_r adalah magnetisasi remanen; H_{ct} adalah medan magnet koersivitas intrinsik; M_s adalah magnetisasi saturasi, (b) B terhadap H : B_r adalah induksi magnet remanen; H_c adalah medan magnet koersivitas (Sung, 2003)

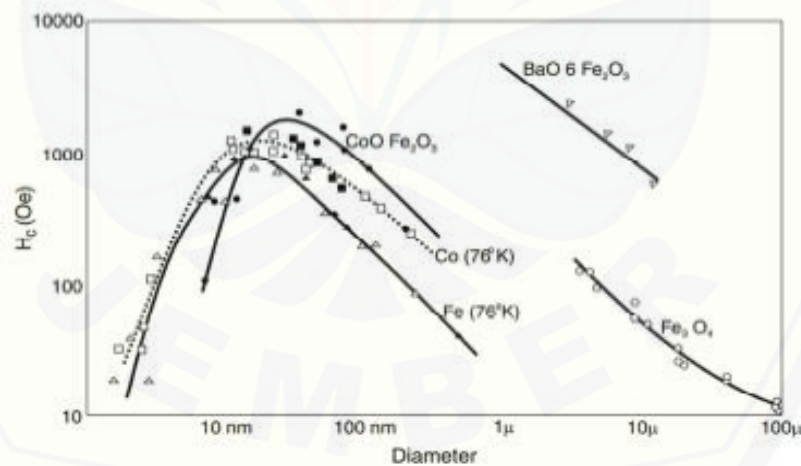
Kurva Histeresis menjelaskan bahwa bahan feromagnetik dengan kondisi awal belum termagnetisasi, selanjutnya medan magnet (H) diberikan yang mengakibatkan magnetisasi (M) meningkat. Nilai magnetisasi (M) meningkat diakibatkan adanya pergerakan domain magnet. Medan magnet (H) dan magnetisasi (M) akan meningkat sampai dengan keadaan jenuh (saturasi). Keadaan ini dikenal istilah baru yaitu magnetisasi saturasi M_s dan medan saturasi H_{sat} . Seluruh momen magnet membentuk domain tunggal yang terorientasi searah dengan medan magnet H . Medan magnet eksternal direduksi hingga keadaan yang disebut dengan medan nukleasi (*nucleation field*). Medan nukleasi adalah medan awal yang membuat keadaan struktur domain tidak lagi sejajar satu dengan lainnya (saturasi) (Shtrikman, 1957). Medan H direduksi hingga nol, namun kurva tidak kembali seperti semula tetapi memiliki magnetisasi yang tersisa, nilai ini dinamakan magnetisasi remanen M_r . Sebagian domain magnet juga tidak kembali seperti orientasi sebelum diberikan medan magnet eksternal H , sehingga sebagian bahan termagnetisasi. Proses diberikan pembalikan arah medan magnet H , hingga magnetisasi $M = 0$. Nilai arah medan balik H saat $M = 0$ disebut koersivitas, orientasi domain magnet kembali acak.

Pada skala nano, koersivitas yang terjadi pada proses magnetisasi bahan feromagnetik adalah terhambatnya gerak domain akibat gesekan antar domain dan ukuran bahan. Ukuran ini yang semakin kecil mengakibatkan batas-batas domain hilang, sehingga domain-domain mengelompok menjadi satu kesatuan yang disebut *single-domain particle*. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.13. Pada gambar ini ukuran diameter bahan magnetik dibagi menjadi 3 daerah berdasarkan besar medan koersivitas. Pada daerah itu terdiri dari: (1) daerah superparamagnetik dengan medan koersivitas bernilai 0, (2) daerah antara superparamagnetik hingga diameter kritis dengan medan koersivitas mengalami kenaikan hingga maksimal, keadaan berstruktur *single domain*, dan (3) daerah di atas diameter kritis dengan medan koersivitas mengalami penurunan seiring bertambahnya ukuran diameter, keadaan berstruktur *multi domain* (Leslie-Pelecky, 1996).



Gambar 2.13 Kurva perbandingan nilai medan koersivitas terhadap diameter partikel. Ditunjukkan tiga daerah: (1) daerah superparamagnetik dengan medan koersivitas $H_c = 0$, (2) daerah antara superparamagnetik hingga diameter kritis D_c , keadaan berstruktur *single-domain*, (3) daerah di atas diameter kritis D_c , keadaan berstruktur *multi-domain* (Leslie-Pelecky, 1996)

Gambar 2.14 memperlihatkan contoh hasil eksperimen dalam hubungan antara medan koersivitas terhadap ukuran partikel dari bahan Fe, Co, dan CoOFe_2O_3 pada temperatur nitrogen cair.



Gambar 2.14 Kurva hubungan besar nilai medan koersivitas terhadap ukuran dari partikel kecil bahan magnetik (Luborsky, 1961)

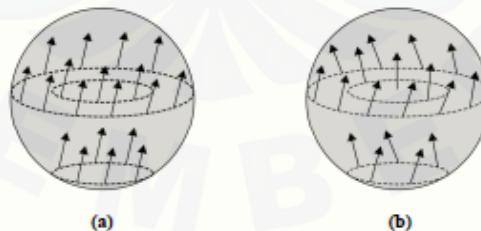
Ada dua jenis koersivitas yang dapat dibentuk melalui penggambaran kurva histeresis, pertama kurva histeresis $M - H$, medan koersivitas intrinsik (H_{ci}) yaitu kuat medan magnet yang diberikan untuk membuat nilai magnetisasi $M \rightarrow 0$. Kedua,

kurva histerisis $\mathbf{B} - \mathbf{H}$, medan koersivitas (H_c) adalah kuat medan magnet yang diperlukan untuk membuat induksi magnet bahan $\mathbf{B} \rightarrow 0$ (Sung, 2003).

Sifat magnetisasi bahan dapat dikarakterisasi melalui kurva histeresis yang didasarkan oleh parameter magnetisasi saturasi M_s , koersivitas H_c ataupun koersivitas intrinsik H_{ci} , dan magnetisasi remanen M_r . Bahan *soft magnet* memiliki nilai medan koersivitas dan magnetisasi remanen yang kecil, sehingga bentuk *loop* kurva sangat pipih/tipis. Sedangkan, bahan *hard magnet* memiliki nilai medan koersivitas dan magnetisasi remanen yang besar, sehingga bentuk *loop* kurva sangat tebal. Bentuk *loop* kurva histeresis yang dibutuhkan pada aplikasi perekam magnetik adalah magnetisasi besar, koersivitas sedang, dan idealnya berbentuk persegi (Leslie-Pelecky, 1996).

2.12 Mekanisme Pembalikan Magnetisasi

Mekanisme ada dua jenis yaitu pertama model rotasi koheren (*coherent rotation*) yang 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 pada gambar 2.15 (a). model pembalikan hanya terjadi pada struktur *single-domain* dan sering dikenal sebagai partikel Stoner-Wohlfarth (Coey, 2009).



Gambar 2.15 Mekanisme pembalikan magnetisasi partikel magnetik berbentuk bola. (a) rotasi koheren (*coherent rotation*), (b) *curling* (Skomski, 2008)

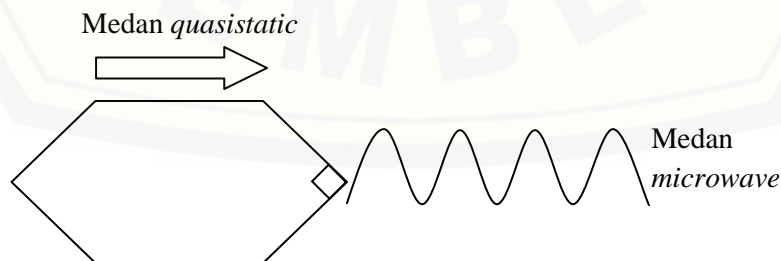
Model kedua adalah *curling*, ditampilkan pada gambar 2.15 (b). Proses pembalikan pada model ini, spin-spin dari partikel membentuk struktur *vorteks*. Model ini terjadi pada sebagian besar partikel magnetik berbentuk bola dengan

diameter di atas diameter kritis (Coey, 2009). Partikel yang berukuran besar, kontribusi energi *exchange* lebih mendominasi dibandingkan energi magnetostatik, sehingga mekanisme pembalikan mode *curling* lebih dipilih oleh sistem dibandingkan rotasi koheren (Skomski, 2008).

2.13 Microwave Assisted

Microwave merupakan gelombang elektromagnetik dengan frekuensi super tinggi. Frekuensi yang dimiliki *microwave* yaitu $300\text{MHz} - 300\text{GHz}$. Panjang gelombang (λ) yang dimiliki oleh *microwave* yaitu sekitar $1\text{mm} - 1\text{m}$. Jika *microwave* ini diserap oleh suatu benda, maka akan dimunculkan efek pemanasan pada benda tersebut. Efek pemanasan ini dapat diaplikasikan pada alat pemasak (*microwave oven*), alat komunikasi (*handphone*), radar (*Radio Detection and Ranging*), dan penginderaan jauh (PJ) aktif. Sistem aplikasi yang terjadi pada PJ aktif yaitu pulsa *microwave* ditembakkan ke sebuah target dan reflektansinya diukur untuk diperoleh karakteristik target (Adam, 1992).

Bahan mikromagnetik yang dipengaruhi *microwave assisted*, telah diteliti oleh Li *et al.* pada tahun 2008. Bahan pada kondisi awal akan digetarkan secara konstan oleh medan *quasistatic*. Bahan yang bergetar tentu memiliki frekuensi. Jika *microwave* diterapkan pada bahan dengan frekuensi yang sama seperti frekuensi bahan, maka hal ini akan dihasilkan resonansi feromagnetik. Akibat yang ditimbulkan adalah magnetisasi bahan akan bergetar pada sudut maksimal dan medan koersivitas pada bahan akan bernilai minimum.



Gambar 2.16 Lapisan tipis yang diorientasikan terhadap medan *quasistatic* dan medan *microwave* (Li *et al.*, 2008)

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat yang digunakan pada penelitian ini di Laboratorium Fisika Komputasi Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Waktu untuk kegiatan penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan Januari 2016 sampai dengan Mei 2016.

3.2 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain:

1. 1 set perangkat komputer dengan spesifikasi minimum untuk komputer yang dapat digunakan pada penelitian ini, yaitu:

Prosesor : Intel (R) Core (TM) i3-3240 CPU @ 3,40 GHz × 4

Sistem tipe : 64 bit

RAM : 3,8 GB (1,88 GB usable)

Sistem operasi : windows 7 ultimate dan linux 12.10

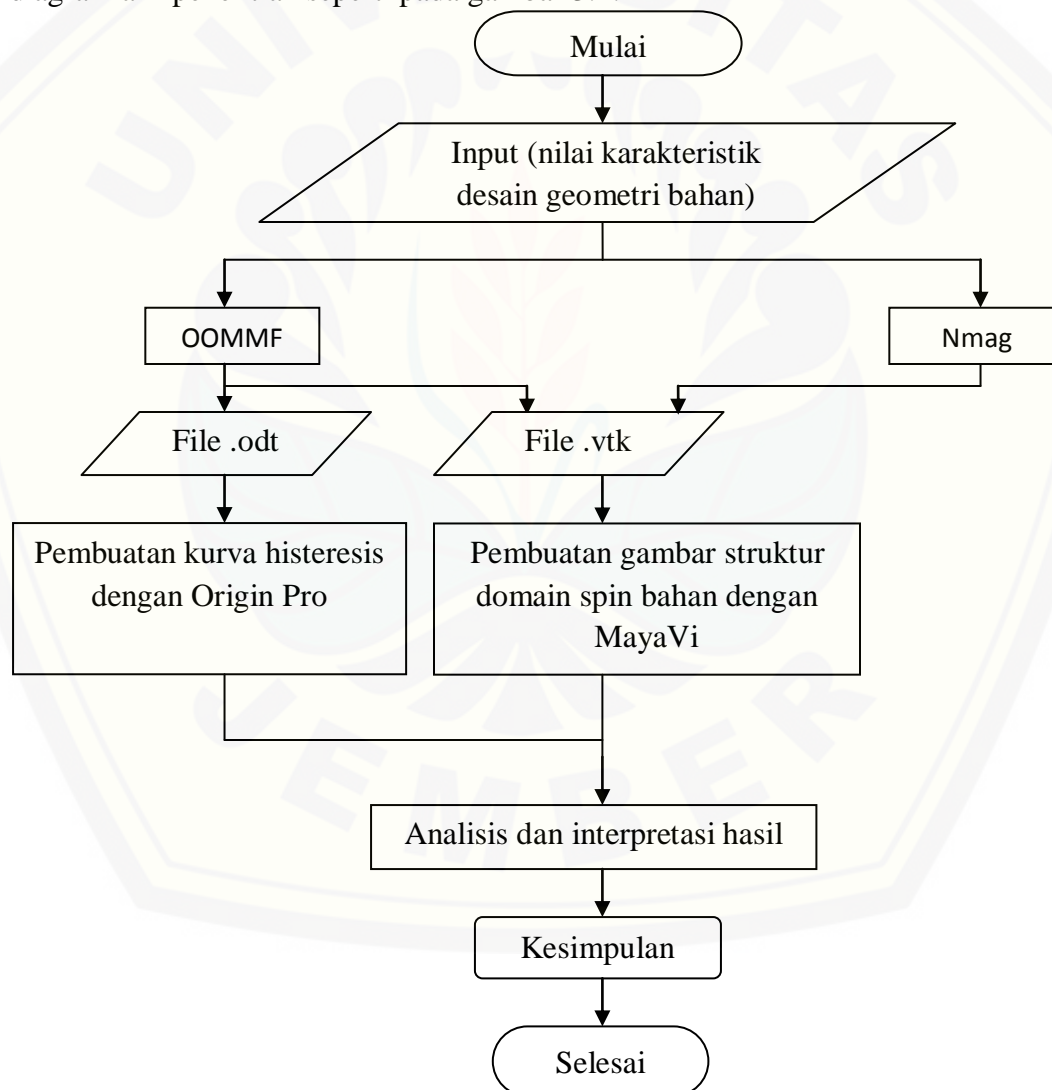
2. Aplikasi yang digunakan dalam simulasi mikromagnetik ini adalah:
 - a. OOMMF (*Object Oriented Micromagnetic Framework*), digunakan untuk *running* simulasi mikromagnetik berupa *finite different*. Aplikasi ini dijalankan pada sistem operasi *windows*.
 - b. Nmag, digunakan untuk *running* simulasi mikromagnetik berupa *finite element*. Aplikasi ini dijalankan pada sistem operasi *linux*.
 - c. Origin Pro, dimanfaatkan untuk pembentukan kurva histerisis dengan membuat plot nilai hasil *running* yang berupa ODT (*Open Document Text*).
 - d. Maya Vi, digunakan untuk pembuatan gambar spin domain yang menerangkan ukuran geometri bahan.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan pada investigasi sifat-sifat bahan CoPd dan pengaruh penerapan *microwave assisted* menggunakan simulasi mikromagnetik adalah sebagai berikut.

3.3.1 Diagram Penelitian

Secara umum, penelitian yang akan dilakukan dapat digambarkan dalam diagram alir penelitian seperti pada gambar 3.1.



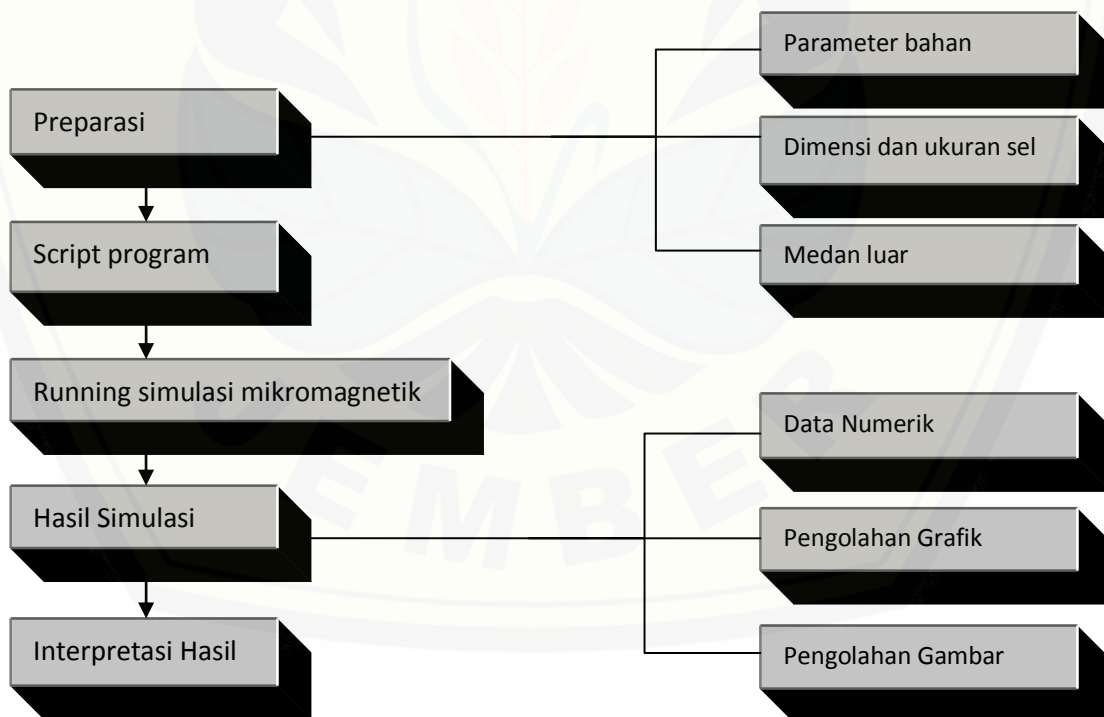
Gambar 3.1 Bagan tahap-tahap penelitian

3.3.2 Langkah Kerja

Parameter bahan lapisan tipis CoPd untuk simulasi mikromagnetik terdiri dari: magnetisasi saturasi M_s , konstanta *exchange stiffness* A , dan konstanta anisotropi K sebagaimana dijelaskan pada Tabel 3.1. Bahan ini muncul 1 puncak utama di titik [111] (Salamah, 2014). Ukuran sel yang digunakan pada simulasi ini berdasarkan ukuran *exchange length* dari bahan ini yaitu $I_{ex} = \sqrt{2A/\mu_0 M_s^2}$ sebesar 16,4 nm. Simulasi ini menggunakan ukuran sel (*cell size*) sebesar $1,5 \times 1,5 \times 1,5 \text{ nm}^3$ dan faktor redaman sebesar $\alpha = 0,05$.

Tabel 3.1 Parameter bahan lapisan tipis CoPd untuk simulasi mikromagnetik

Bahan feromagnetik	M_s (A/m)	A (J/m)	K (J/m ³)	I_{ex} (nm)
Lapisan tipis Co/Pd	$4,212 \times 10^5$	3×10^{-11}	$5,4 \times 10^5$	16,4



Gambar 3.2 Diagram alir simulasi mikromagnetik

Adapun langkah kerja yang dilakukan pada penelitian ini, antara lain:

a. Desain geometri dan dimensi bahan.

Nilai yang dimasukkan pada aplikasi simulasi mikromagnetik berupa ukuran geometri dan dimensi bahan adalah:

1) Desain geometri untuk mencari diameter kritis

Tabel 3.2 Desain geometri untuk mencari diameter kritis

No.	X (nm)	Y (nm)	Z (nm)
1.	110	55	55
2.	120	60	60
3.	130	65	65
4.	140	70	70
5.	150	75	75
6.	160	80	80
7.	170	85	85
8.	180	90	90
9.	190	95	95
10.	200	100	100
11.	210	105	105
12.	220	110	110
13.	240	120	120
14.	260	130	130

2) Desain geometri untuk mencari kurva histeresis tanpa menggunakan *microwave-assisted*. Simulasi ini menggunakan ukuran diameter sebesar $(15 \times 15 \times 45) \text{ nm}^3$.

3) Desain geometri untuk mencari kurva histeresis menggunakan *microwave-assisted*. Desain ini menggunakan Amplitudo (10;100;1000;10000) dalam satuan mT dan frekuensi (0,08;0,8;8;80) dalam satuan GHz, dan diameter seperti tabel berikut ini.

Tabel 3.3 Desain geometri diameter untuk mencari kurva histeresis menggunakan *microwave-assisted*

No.	X (nm)	Y(nm)	Z(nm)
1.	15	15	45
2.	75	75	225
3.	90	90	270
4.	120	120	360
5.	150	150	450
6.	165	165	495

b. Rancangan simulasi

Rancangan simulasi dalam penelitian ini, terdiri atas:

1) Simulasi untuk mencari diameter kritis

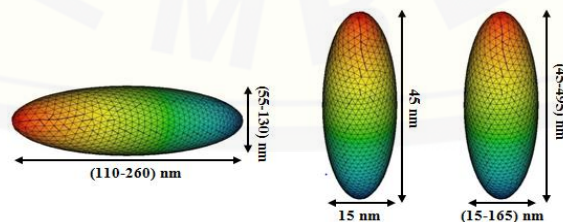
Simulasi ini dilakukan pada bahan feromagnetik CoPd untuk bentuk geometri *ellipsoid* dengan ukuran yang telah ditentukan mengacu pada tabel 3.2. Rancangan geometri bahan penelitian ini ditampilkan seperti pada gambar 3.3 (a).

2) Simulasi untuk mencari kurva histeresis tanpa menggunakan *microwave assisted*

Simulasi ini dilakukan pada bahan feromagnetik CoPd untuk bentuk geometri *ellipsoid* berukuran $(15 \times 15 \times 45) \text{ nm}^3$. Ukuran ini digunakan sebagai titik acuan. Rancangan geometri bahan penelitian ini ditampilkan seperti pada gambar 3.3 (b).

3) Simulasi untuk mencari kurva histeresis menggunakan *microwave assisted*

Simulasi ini dilakukan pada bahan feromagnetik CoPd untuk bentuk geometri *ellipsoid* dengan ukuran yang telah ditentukan mengacu pada tabel 3.3. Rancangan bahan pada penelitian ini ditampilkan seperti pada gambar 3.3 (c).



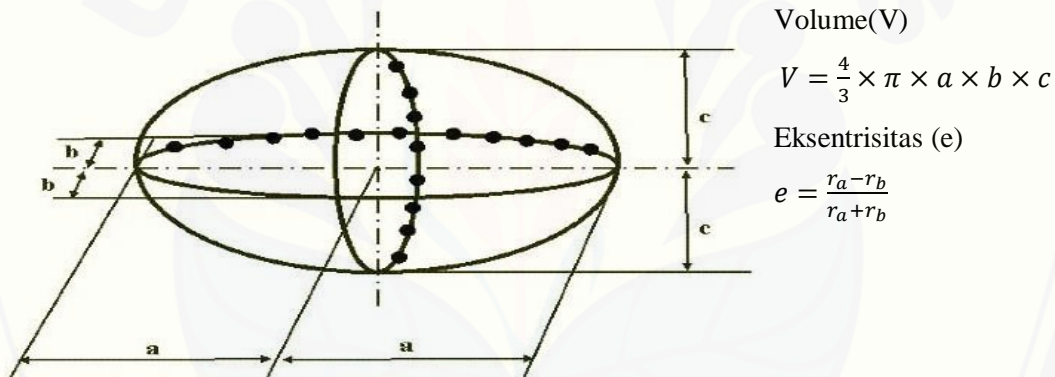
Gambar 3.3 Rancangan geometri untuk mencari (a) diameter kritis, (b) kurva histeresis tanpa menggunakan *microwave assisted*, dan (c) kurva histeresis menggunakan *microwave assisted*

3.4 Analisis Data

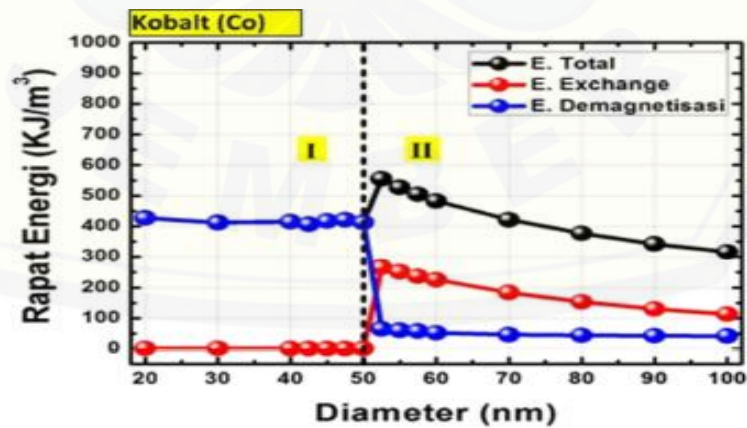
Analisis data yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain:

3.4.1 Menentukan diameter kritis

Penelitian ini digunakan bentuk geometri berupa *ellipsoid*. Sementara ini belum ada rumusan yang mendasari penentuan diameter kritis pada bentuk ini. Oleh sebab itu, penelitian ini mengacu pada hasil 3 nilai energi yaitu energi total, energi *exchange* dan energi demagnetisasi. Contoh grafik profil energi sistem terhadap perubahan diameter pada penelitian Agus tahun 2013. Penelitian ini dibandingkan 3 energi sistem dari simulasi dengan ukuran diameter kritis berupa bola pada persamaan Brown ini, $DC_2 = 7,211 \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}} = 7,211 I_{ex}$



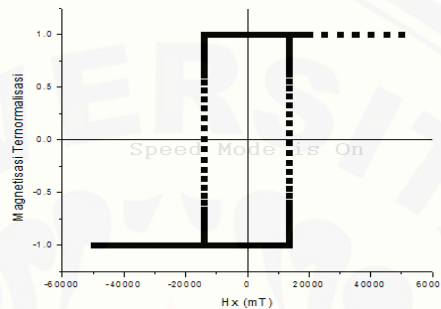
Gambar 3.4 Geometri bangun ruang *Ellipsoid*



Gambar 3.5 Profil energi sistem dari material Co *nanosphere* terhadap perubahan variasi diameter (Widodo, 2013)

3.4.2 Kurva Histeresis

Kurva histeresis yang digunakan berasal dari input data dari file .odt 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::mz sebagai sumbu y. contoh kurva histeresis diterangkan pada gambar 3.6 sebagai berikut ini.

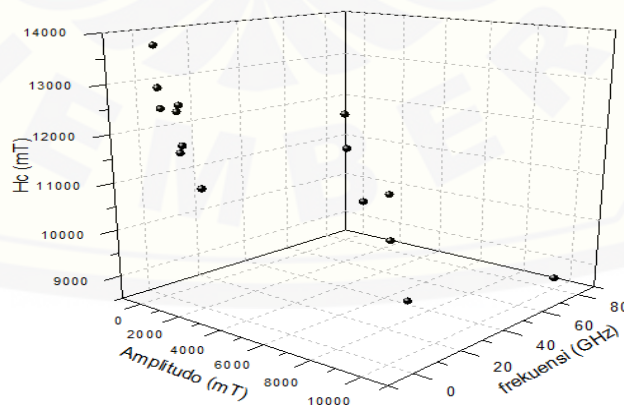


Gambar 3.6 Kurva histeresis perubahan medan magnetik (H_x) terhadap magnetisasi bahan

3.4.3 Diagram Frekuensi dan Ampitudo Terhadap Perubahan Medan Koersivitas

Frekuensi dan amplitudo yang digunakan sesuai pada bab langkah kerja geometri dan dimensi bahan menggunakan *microwave assisted*. Sedangkan, nilai medan koersivitas diperoleh dari unsur kurva histeresis yang disusun menjadi persamaan

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



Gambar 3.7 Diagram pengaruh *microwave assisted* (amplitudo dan frekuensi) terhadap medan koersivitas

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian investigasi sifat-sifat magnetik bahan CoPd dan pengaruh penerapan *microwave assisted* menggunakan simulasi mikromagnetik adalah:

1. Besarnya diameter kritis dari bahan CoPd bentuk *ellipsoid* adalah 140 nm. Nilai ini berada pada ukuran diameter panjang *ellipsoid*. Struktur domain pada diameter kritis dan di bawah diameter kritis memiliki bentuk *single domain*. Sedangkan, stuktur domain di atas diameter kritis memiliki bentuk *vortex state*. Hal ini diperkuat dengan grafik profil energi sistem yang ada, dimana energi *exchange* dan energi demagnetisasi mengalami perubahan setelah nilai diameter kritis.
2. Pengaruh *microwave assisted* yaitu semakin besar nilai amplitudo dan frekuensi yang digunakan pada proses simulasi mikromagnetik, maka akan dihasilkan nilai medan koersivitas yang semakin kecil. Hal ini dapat diperjelas dalam pembentukan kurva histeresis yang semakin pipih atau tipis seiring dengan penambahan nilai amplitudo dan frekuensinya. Selain itu, pengaruh *microwave assisted* dapat diperjelas dalam kurva magnetisasi terhadap medan eksternal. Dimana, *microwave assisted* cenderung lebih cepat mengalami pembalikan magnetisasi dengan rentang medan eksternal yang lebih kecil daripada tanpa *microwave assisted*. Hal ini diperkuat dengan profil energi sistem, dimana nilai energi sistem cenderung tinggi pada saat digunakan nilai medan koersivitas.

5.2 Saran

Penelitian yang telah dilakukan ini memunculkan saran. Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu pertama perlu untuk digunakan rentang diameter simulasi yang lebih kecil untuk memperoleh nilai diameter kritis yang lebih rinci. Kedua, dalam menentukan diameter kritis perlu dilakukan perbandingan antara diameter bola dengan diameter *ellipsoid* pada nilai volume yang sama. Ketiga, perlu untuk digunakan rentang nilai amplitudo dan frekuensi yang lebih kecil pada *microwave assisted* agar mendapatkan pengaruh *microwave assisted* terhadap medan koersivitas dan kurva histeresis yang lebih rinci.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, S. F. 1992. *Microwave theory and Applications*. California: Adam Microwave Consulting Inc.
- Alvarez, G. S. 2008. *Cubic versus spherical magnetic nanoparticles: the role of surface anisotropy*. J. Am. Chem. Socs. 130.
- Bloch, F. 1932. *Theory of exchange problem and remanence phenomena of ferromagnetic substances*. Zeitschrift für Physik **74**, 295.
- Boardman, R. P., Fangohr, H., Cox, S. J., Goncharov, A. V., dan Zhukov, A. A. 2004. *Micromagnetic simulation of ferromagnetic part-spherical particles*. J. Appl. Phys. **95**, 7037.
- Brown, W. F. 1968. *The Fundamental Theorem of Fine Ferromagnetic Particle Theory*. J. Appl. Phys. **39**,993.
- Carcia, P. F., Meinhardt, A. D., dan Suna, A. 1985. *Perpendicular magnetic anisotropy in Pd/Co thin film layered structures*. Applied Phisics Letters **47**,178.
- Chikazumi, S. dan Charap, S.H. 1964. *Physics of Magnetism*. John Wiley & Sons, Inc.
- Coey, J. M. D. 2009. *Magnetism and Magnetic of Materials*. New York: Cambridge University Press.
- Dobisz, E.A. 2008. *Patterned media: Nanofabrication challenges of future disk drives*. Proceedings of the IEEE, **11**, 96.
- Getzlaff, M. 2008. *Fundamentals of Magnetism*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Gilbert, T. L.2004. *Phenomenological theory of damping in ferromagnetic materials*. IEEE Trans. Magn. **40**, 3443.

- Guimarães, A.P. 2009. *Principles of Nanomagnetism*. Springer-Rio de Janeiro.
- Hughes, G.F. 2000. *Patterned media write design*. IEEE Trans. Magn. 36.
- Kittel, C. 2005. *Introduction Solid State Physics 8th*. John Wiley & Sons, Inc.
- Landau, L. dan Lifshitz, E. 1935. *On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies*. Physikalische zeitschrift der Sowjetunion, **8**, 153.
- Leslie-Pelecky, D.L. 1996. *Magnetic Properties of nanostructured materials*. Chem. Mater, **8**, 1770-1783.
- Li, P., Yang, X., dan Cheng, X. 2008. *Micromagnetic Simulation of Microwave Assisted Switching in Ni₈₀Fe₂₀ Thin Film Element*. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology.
- Liu, Z., Brandt, R., Hellwig, O., Florez, S., Thomson, T., Terris, B., dan Schmidt, H. 2011. *Thickness dependent magnetization dynamics of perpendicular anisotropy Co/Pd multilayer film*. ELSEVIER. Journal of magnetism and magnetic materials. Pp 1623-1626.
- Mangonon, P.L. 1999. *The Principles of Materials Selection for Engineering Design*. Printice-Hall International, Inc. Hal 29-81.
- Miltat, T. J. E. dan Donahue, M. J. 2007. *Numerical Micromagnetic : Finite Difference Methods*. USA : NIST University.
- Nicola, A.S. 2011. *Magnetic Materials Fundamentals and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Robertson, N. 2010. *Magnetic Data Storage with Patterned Media*. Hitachi Global Storage Technologies San Jose Research Center.
- Rohman, L. 2013. *Investigasi Sifat-sifat Magnetik Bahan LSMO (La_{1-x}Sr_xMnO₃) untuk Aplikasi Storage Device dengan Menggunakan Modeling Mikromagnetik*. Jember: Fisika-MIPA-Universitas Jember.
- Salamah, U. dan Suharyadi, E. 2014. *Analisa Pergeseran Magnetic Domain Wall pada Lapisan Tipis Free Layer Co/Pd terhadap Pengaruh Dimensi Sample*. Yogyakarta: Fisika-MIPA-Universitas Gajah Mada.

- Shtrikman, S., Frei, E.H., dan Treves, D. 1957. *Critical size and nucleation field of ideal ferromagnetic particles*. Phys. Rev. 106.
- Skomski, R. 2008. *Simple Models of Magnetism*. Oxford University Press.
- Stoner, E. C. dan Wohlfard, E. P. 1948. *A Mechanism of Magnetic Hysteresis in Heterogeneous Alloys*. Mathematical and Physical Sciences. 240.
- Sung, H.W.F. dan Rudowicz, C. 2003. *Physics behind the magnetic hysteresis loop-a survey of misconceptions in magnetism literatur*. J. Magn. Magn, Mater. 260.
- Suzuki, D., Ohtake, M., Ouchi, S., Kirino, F., dan Futamoto, M. 2012. *Structure Analysis of CoPt and CoPd Alloys Thin Films Foormed on MgO(111) Single-Crystal Substrates*. Tokyo: Faculty of Science and Engineering, Chuo University.
- Widodo, A. T. 2013. *Studi Mikromagnetik Dinamika Struktur Domain pada Material Feromagnetik Py, Ni, Fe, dan Co Model Nanosprehe*. Depok: Universitas Indonesia Press.
- Wiss, P. 1907. *Hypothesis of molecular field and ferromagnetic properties*. J. Phys, 4, 661.
- <http://nmag.soton.ac.uk>. Fangohr, H., Fischbacher, T., Franchin, M., Bordignon, G., Generowicz, J., Knittel, A., Walter, M. 2008. *NMAG User Manual (0.1 Beta Version)*. Diakses pada tanggal 30 September 2015.
- <http://math.nist.gov/oommf/otherlinks.html>. Donahue, M.J. dan Porter, D.G. 2002. *OOMMF User's Guide*. Diakses pada tanggal 30 September 2015.