



**SIMULASI PENGARUH SUDUT DATANG
MEDAN MAGNET LUAR TERHADAP BENTUK
KURVA HISTERESIS PERMALLOY (NiFe)
FEROMAGNETIK**

SKRIPSI

Oleh

**Merinda Lestari
NIM 131810201072**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2017**



**SIMULASI PENGARUH SUDUT DATANG
MEDAN MAGNET LUAR TERHADAP BENTUK
KURVA HISTERESIS PERMALLOY (NiFe)
FEROMAGNETIK**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan studi pada Program Studi Fisika (S-1)
dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh

Merinda Lestari

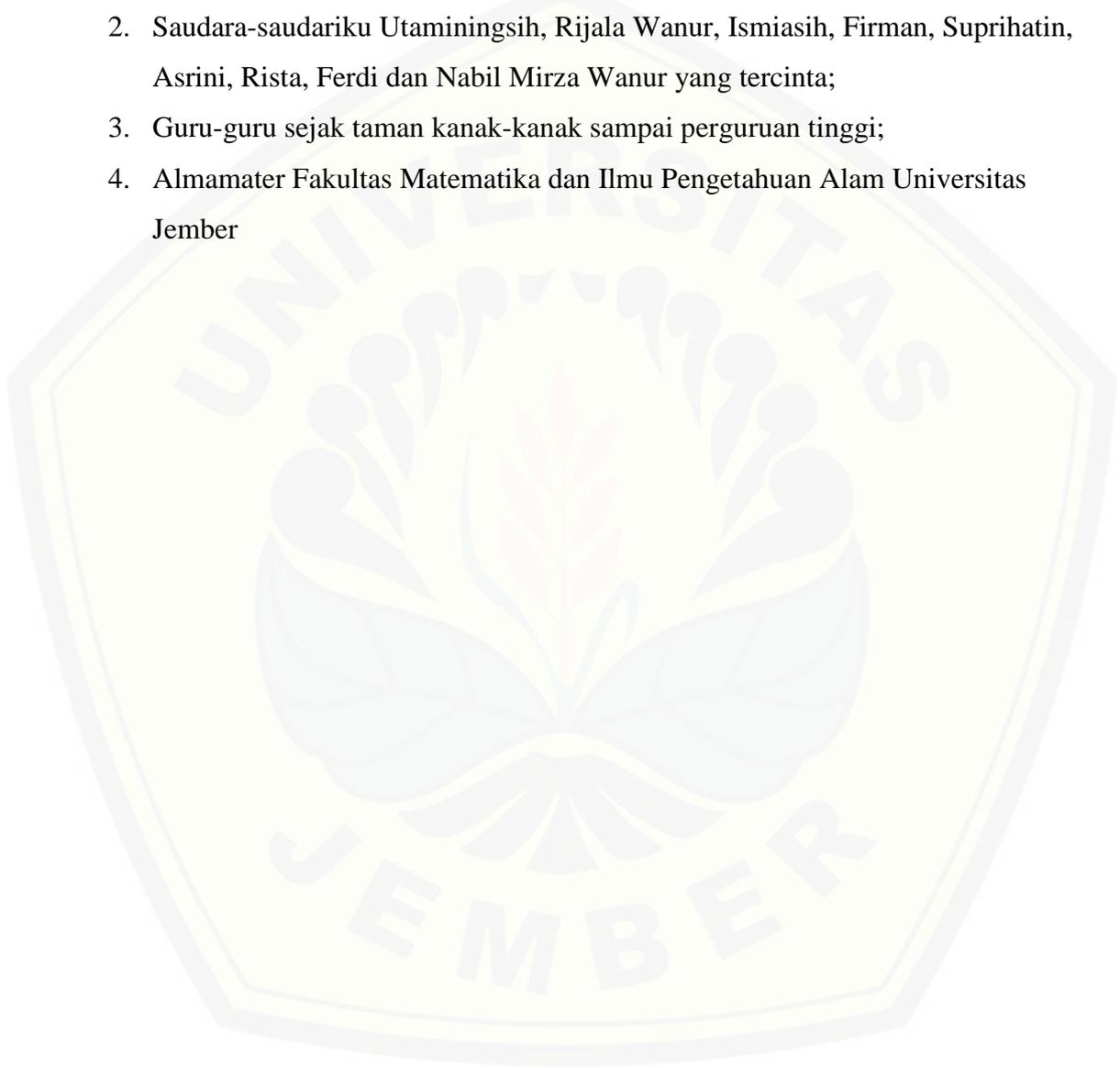
NIM 131810201072

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2017**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini penulis persembahkan untuk:

1. Ibunda Sumirahayu, Alm Nenek Tarmi dan Kakek Pardi;
2. Saudara-saudariku Utaminingsih, Rijala Wanur, Ismiasih, Firman, Suprihatin, Asrini, Rista, Ferdi dan Nabil Mirza Wanur yang tercinta;
3. Guru-guru sejak taman kanak-kanak sampai perguruan tinggi;
4. Almamater Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember



MOTTO

(Ancora Imparo: I Am Still Learning)

“Saya masih belajar”



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : Merinda Lestari

NIM : 131810201072

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Simulasi Pengaruh Sudut Datang Medan Magnet Luar Terhadap Bentuk Kurva Histerisis Permalloy (NiFe) Feromagnetik” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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

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

Jember, Desember 2017

Yang menyatakan,

Merinda Lestari

NIM 131810201072

SKRIPSI

**SIMULASI PENGARUH SUDUT DATANG
MEDAN MAGNET LUAR TERHADAP BENTUK
KURVA HISTERESIS PERMALLOY (NiFe)
FEROMAGNETIK**

Oleh

Merinda Lestari
NIM 131810201072

Pembimbing

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

Dosen Pembimbing Anggota : Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M. Phill., Ph.D.

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul “Simulasi Pengaruh Sudut Datang Medan Magnet Luar Terhadap Bentuk Kurva Histerisis Permalloy (NiFe) Feromagnetik” karya Merinda Lestari telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas
Jember

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I

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

Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M. Phill., Ph.D.
NIP 196812191994021001

Anggota II

Anggota III

Supriyadi, S.Si., M.Si.
NIP. 198204242006041003

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

Mengesahkan
Dekan,

Drs. Sujito, Ph.D.
NIP 196102041987111001

RINGKASAN

Simulasi Pengaruh Sudut Datang Medan Magnet Luar Terhadap Bentuk Kurva Histerisis *Permalloy* (NiFe) Feromagnetik; Merinda Lestari, 131810201072: 67 halaman; Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember.

Sensor magnetik merupakan sel memori magnetik yang menjadi inti pada media penyimpanan, mengatur pembacaan dan perekaman data. Salah satu media penyimpanan yang menggunakan sensor magnetik adalah MRAM dengan jenis sensor magnetoresistif. Kelemahan pada sensor magnetoresistif adalah kesalahan pembacaan dan perekaman data yang berasal dari lapisan kemiringan bahan yang menyebabkan sensor tidak bekerja secara maksimal. Salah satu contoh material magnetik yang digunakan sebagai bahan kajian pembuatan sensor magnetoresistif adalah bahan *permalloy* $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. Bahan *permalloy* mempunyai arah magnetisasi tunggal dan merespon perubahan medan magnet luar yang diakibatkan oleh perubahan arus dengan cepat.

Tujuan pada penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi sudut datang medan magnet luar terhadap bentuk kurva histerisis bahan *permalloy* $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ feromagnetik yang difokuskan pada beberapa bagian dalam kurva. Bagian yang dianalisis merupakan medan magnet luar, medan saturasi, medan koersivitas dan magnetisasi. Hasil analisis kurva histerisis kemudian menjadi dasar untuk membuat kesimpulan.

Metode penelitian yang dilakukan diawali dengan studi pustaka dari berbagai sumber berupa buku, jurnal ilmiah, skripsi dan tesis. Program simulasi mikromagnetik yang digunakan dalam penelitian ini adalah OOMMF. Program lain yang digunakan adalah Notepad++, Origin, dan MayaVi. File input yang dimasukkan pada program OOMMF berupa script dengan format .MIF. File tersebut disusun dalam program Notepad++ kemudian dilakukan *running* simulasi. Simulasi mikromagnetik dilakukan dengan memvariasikan sudut $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ dan 90° serta variasi geometri yaitu berbentuk *nanocube* pada ukuran 5 nm dan 20 nm. Hasil dari simulasi yang digunakan pada pembentukan kurva histerisis adalah magnetisasi (M) dan medan magnet luar (H).

Hasil yang diperoleh berdasarkan simulasi yang telah dilakukan adalah variasi sudut dan geometri berpengaruh pada medan koersivitas yang terbentuk. Nilai magnetisasi tertinggi berada pada kurva histerisis dengan pengaruh sudut 0° pada kedua variasi geometri. Kemudian saat diaplikasikan variasi sudut $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ dan 90° nilai magnetisasi semakin menurun hingga mencapai nol. Hasil ini terjadi karena kurva histerisis pada sudut diatas 0° telah mengalami perubahan bentuk dari persegi menjadi kurva menyerupai huruf S atau semakin kecil medan koersivitasnya sehingga tidak dapat terdeteksi medan nukleasinya sesuai dengan model Stoner-Wohlfarth. Proses magnetisasi dan pembalikan magnetisasinya terjadi sebagian reversibel dan sebagian irreversibel. Variasi ukuran geometri juga berperan pada penurunan nilai medan koersivitas karena semakin besar ukuran

bahan maka semakin kecil medan koersivitas yang terbentuk. Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa semakin besar variasi sudut yang diaplikasikan maka semakin kecil medan koersivitas yang terbentuk.



PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Simulasi Pengaruh Sudut Datang Medan Magnet Luar Terhadap Bentuk Kurva Histerisis Permalloy (NiFe) Feromagnetik”. 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 lepas dari bimbingan dan pengarahan berbagai pihak. Karena itu, penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M. Phill., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing Anggota, yang telah meluangkan waktu untuk pembimbingan skripsi;
2. Supriyadi, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji I dan Endhah Purwandari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktunya untuk memberi kritik dan saran skripsi ini;
3. Supriyadi, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa;
4. Segenap Dosen dan karyawan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.;
5. Teman-temanku angkatan Physicopat 13 Hz dan klub fisika komputasi material magnetik.
6. Sahabat – sahabat saya, Ina, Zilmi, Lusy, Nia, dan Putri.
7. Pihak – pihak yang tidak dapat disebutkan satu – persatu.

Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta perkembangan ilmu pengetahuan di bidang Fisika.

Jember, Desember 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBING	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Magnet	5
2.2 Material Magnet	5
2.2.1 Bahan Diamagnetik	5
2.2.2 Bahan Paramagnetik	6
2.2.3 Bahan Feromagnetik	6
2.3 Karakteristik Bahan Permalloy NiFe	8
2.4 Kurva Histerisis	9
2.5 Energi Pada Sistem Feromagnetik	13
2.5.1 Energi <i>Exchange</i>	13
2.5.2 Energi Magnetostatik.....	14

2.5.3 Energi Anisotropi.....	15
2.5.4 Energi Zeeman.....	16
2.6 Dinamika Magnetisasi	16
2.7 Mekanisme Pembalikan Magnetisasi	20
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	23
3.1 Rancangan Penelitian	23
3.2 Jenis dan Sumber Data.....	24
3.3 Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukurannya	25
3.4 Metode Analisis Data.....	26
3.5 Langkah Kerja	28
3.6 Kerangka Pemecahan Masalah	30
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Replikasi Kurva Histerisis	31
4.2 Kurva Histerisis Pengaruh Variasi Sudut dan Geometri	34
BAB 5. PENUTUP.....	50
5.1 Kesimpulan.....	50
5.2 Saran	51
DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN.....	56

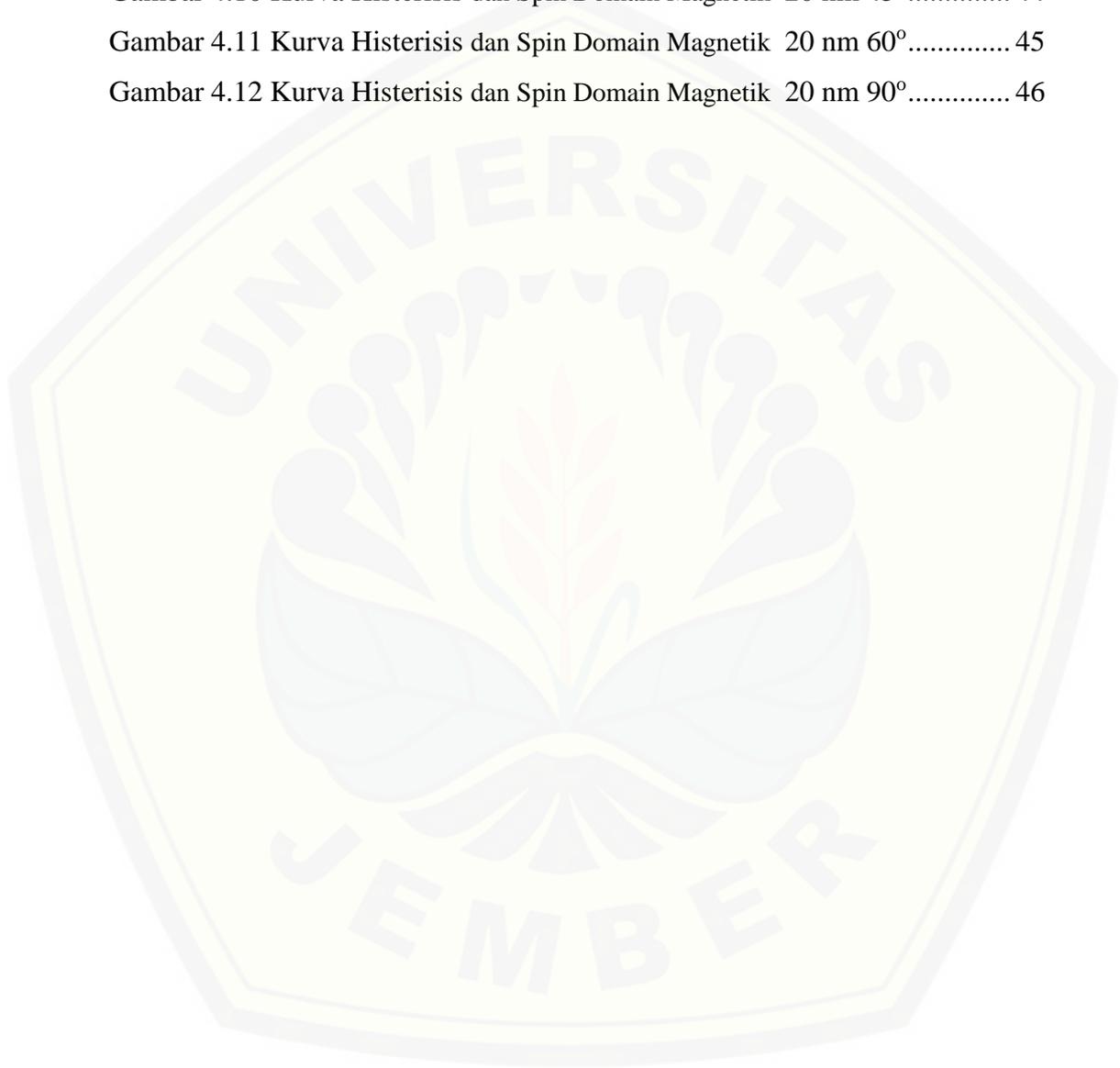
DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Parameter Material <i>Permalloy</i> Ni ₈₀ Fe ₂₀	24
Tabel 3.2 Ukuran Geometri dan Variasi Sudut	24
Tabel 3.3 Parameter Material <i>Permalloy</i> Ni ₈₀ Fe ₂₀ Replikasi	24
Tabel 3.4 Ukuran Geometri dan Sudut Replikasi	24
Tabel 4.1 Perbandingan Hasil	32
Tabel 4.2 <i>Mesh Details</i>	33
Tabel 4.3 Hasil Penelitian 5 nm	48
Tabel 4.4 Hasil Penelitian 20 nm	48

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Arah Domain Material Feromagnetik (a) Tanpa Medan Luar (b) Dengan Medan Luar	7
Gambar 2.2 Struktur Kristal FCC Pada Material Gabungan NiFe	8
Gambar 2.3 Kurva Histerisis	11
Gambar 2.4 Kurva Magnetisasi Bahan Magnetik Lunak dan Permanen.....	11
Gambar 2.5 Kurva Histerisis Untuk Material Feromagnetik.....	12
Gambar 2.6 Pengurangan Energi Magnetostatik Akibat Orientasi Arah Dipol – Dipol Magnet	14
Gambar 2.7 Momen Magnet.....	17
Gambar 2.8 Gerak Presisi Dari Momen Magnet Terhadap Medan Efektif (a) Tanpa Redaman, (b) Dengan Redaman (damping)...	19
Gambar 2.9 (a) Skema <i>Prolate Ellipsoidal</i> dengan M – H. Loop Histerisis (b) <i>Easy Axis</i> ($\theta = 0^0$) dan <i>Hard Axis</i> ($\theta = 90^0$)	20
Gambar 2.10 Mekanisme Pembalikan magnetisasi partikel magnetik berbentuk bola (a) rotasi koheren, (b) curling	22
Gambar 3.1 Pemberian Variasi Sudut Medan Magnet Luar	25
Gambar 3.2 Kurva Histerisis Dari Bentuk <i>nanocube</i>	26
Gambar 3.3 Kurva histerisis menggunakan model Stoner – Wohlfarth	27
Gambar 3.4 Tampilan Oxsii pada Program OOMMF	28
Gambar 3.5 Tampilan Program Origin	29
Gambar 3.6 Tampilan Program MayaVi.....	29
Gambar 3.7 Diagram Alir Penelitian	30
Gambar 4.1 Kurva Histerisis Acuan	33
Gambar 4.2 Kurva Histerisis Replikasi.....	33
Gambar 4.3 Kurva Histerisis dan Spin Domain Magnetik 5 nm 0^0	35
Gambar 4.4 Kurva Histerisis dan Spin Domain Magnetik 5 nm 30^0	36
Gambar 4.5 Kurva Histerisis dan Spin Domain Magnetik 5 nm 45^0	38

Gambar 4.6 Kurva Histerisis dan Spin Domain Magnetik 5 nm 60°	39
Gambar 4.7 Kurva Histerisis dan Spin Domain Magnetik 5 nm 90°	40
Gambar 4.8 Kurva Histerisis dan Spin Domain Magnetik 20 nm 0°	41
Gambar 4.9 Kurva Histerisis dan Spin Domain Magnetik 20 nm 30°	42
Gambar 4.10 Kurva Histerisis dan Spin Domain Magnetik 20 nm 45°	44
Gambar 4.11 Kurva Histerisis dan Spin Domain Magnetik 20 nm 60°	45
Gambar 4.12 Kurva Histerisis dan Spin Domain Magnetik 20 nm 90°	46



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Perhitungan Nilai Medan Magnet Luar (H) Dipengaruhi Sudut.....	56
B. Kurva Histerisis Pada Sumbu Y Ukuran Geometri 5 nm.....	60
1. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 5 nm dan sudut 0°	60
2. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 5 nm dan sudut 30°	60
3. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 5 nm dan sudut 45°	61
4. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 5 nm dan sudut 60°	61
5. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 5 nm dan sudut 90°	62
C. Tabel Hasil Penelitian 5 nm Pada Sumbu Y	62
D. Kurva Histerisis Pada Sumbu Y Ukuran Geometri 5 nm.....	63
1. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 20 nm dan sudut 0°	63
2. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 20 nm dan sudut 30°	63
3. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 20 nm dan sudut 45°	64
4. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 20 nm dan sudut 60°	64
5. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 20 nm dan sudut 90°	65
E. Tabel Hasil Penelitian 5 nm Pada Sumbu Y	65
F. Kurva Histerisis Replikasi	66
G. Spin Domain Magnetik.....	67

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Magnet adalah suatu benda yang memiliki gejala dan sifat yang dapat mempengaruhi bahan – bahan tertentu yang berada di sekitarnya (Coey, 2009). Material – material yang ada di bumi pasti mempunyai sifat magnet dan merespons adanya medan magnet. Material magnetik sudah diakui dan digunakan sejak abad ke – 18. Material magnetik banyak digunakan sebagai bahan pembuatan benda – benda seperti generator dan motor listrik. Partikel terkecilnya juga digunakan dalam beberapa aplikasi sensor magnetik. Teknologi penyimpanan data seperti hard disk, kaset, dan sejenisnya juga didasarkan pada partikel magnetik dalam material magnetik (Donald, dkk, 2011).

Pengembangan material magnetik salah satunya yakni pada aplikasi media penyimpanan seperti hard disk, MRAM dan sensor magnetik. Sensor magnetik merupakan sel memori magnetik yang digunakan dalam pembacaan dan perekaman data. Sensor magnetik tidak melakukan pengukuran fisik pada besaran secara langsung namun berdasarkan perubahan medan magnetik yang disebabkan gerak dan posisi suatu benda yang dijadikan obyek pengukuran (Fraden, 1996). Salah satu contoh sensor magnetik dalam media penyimpanan MRAM adalah sensor magnetoresistif, merupakan salah satu jenis sensor magnetik yang memanfaatkan perubahan hambatan yang disebabkan oleh perubahan medan magnet. Sensor magnetoresistif mempunyai banyak kelebihan yaitu tingkat sensitivitasnya tinggi, tidak akan berubah fungsi meski berada pada suhu yang tidak stabil, dan penampilan yang baik (Gopel, dkk, 1989). Salah satu contoh material magnetik yang cocok digunakan sebagai bahan kajian pembuatan sensor magnetoresistif adalah bahan *permalloy* $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (Fahru, dkk, 2000).

Struktur bahan feromagnetik ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) memiliki 80 atom nikel dan 20 atom besi. Sifat fisis bahan feromagnetik $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ yang menguntungkan adalah kemampuan bahan untuk hanya menerima satu keadaan magnetisasi. Bahan $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ mempunyai arah magnetisasi tunggal atau polarisasi magnetik tunggal.

Bahan ini juga merespon medan magnet yang diakibatkan oleh perubahan arus dengan cepat. Karakteristik unggul dari bahan feromagnetik $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ yaitu medan koersivitas dan magnetostriksi bernilai kecil (Budi, dkk, 2004).

Karakteristik suatu bahan feromagnetik dapat ditentukan berdasarkan loop kurva histerisis. Terdapat dua jenis karakterisasi berdasarkan kurva histerisisnya yaitu *soft* magnet dan *hard* magnet. Apabila medan koersivitasnya kecil, loop cenderung berbentuk pipih maka bahan dikategorikan dalam bahan *soft* magnet. Bahan yang menghasilkan kurva histerisis dengan medan koersivitas dan remanennya besar merupakan bahan *hard* magnet (Diandra, 1996).

Penelitian mengenai pengaruh sudut datang medan magnet luar bahan *permalloy* terhadap kurva histerisis dengan simulasi mikromagnetik pernah dilakukan oleh Lefter dan Dimian (2012) menggunakan program simulasi NMAG. Penelitian tersebut fokus pada analisis hasil simulasi untuk magnetisasi bahan *permalloy* pada objek berukuran nano seperti *cube*, *sphere*, *cylinder*, dan *ellipsoid*. Variasi sudut yang dilakukan adalah 0° , 30° , 45° , 60° , dan 90° pada sistem vektor tiga dimensi (x, y, z). Hasil yang didapatkan adalah pengaruh sudut, fenomena loop histerisis dan formasi vortex dengan aplikasi medan magnet luar. Analisis dilakukan dengan simulasi mikromagnetik pada aplikasi NMAG dengan berdasarkan pada *scripts* program Phyton yang dijalankan di komputer berbasis Linux.

Penelitian yang dilakukan mereplikasi penelitian Lefter dan Dimian (2012), dengan beberapa modifikasi. Bahan dan variasi sudut yang digunakan sama dengan penelitian sebelumnya yakni *permalloy* dan sudut 0° , 30° , 45° , 60° . Perbedaan mendasar penelitian yang dilakukan dengan penelitian yang sudah ada yaitu penelitian ini menggunakan program OOMMF dengan pendekatan metode *Finite Difference* dan penelitian yang sudah ada menggunakan program NMAG yang didasari pendekatan metode *Finite Element*. Variasi geometri bahan *nanocube* juga ditambahkan dengan ukuran 5 nm dan 20 nm. Parameter – parameter bahan *permalloy* yang dimasukkan dalam program simulasi OOMMF berupa konstanta *exchange*, magnetisasi saturasi, dan konstanta anisotropi untuk mendefinisikan bahan pada *script* di program Notepad++. Analisis dilakukan pada kurva histerisis

yang telah dipengaruhi sudut dan yang belum dipengaruhi sudut. Kurva histerisis dibentuk dengan memasukkan hasil H (medan magnet luar) dan magnetisasi pada program Origin.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana kurva histerisis bahan Permalloy (NiFe) feromagnetik dengan parameter penelitian acuan apabila diterapkan pada aplikasi berbasis *Finite Difference OOMMF* ?
2. Bagaimana pengaruh variasi sudut datang medan magnet luar pada medan koersivitas dalam kurva histerisis bahan *permalloy* NiFe berbentuk *nanocube* ukuran geometri 5 nm dan 20 nm ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah:

1. Mengetahui hasil kurva histerisis bahan Permalloy (NiFe) feromagnetik dengan parameter penelitian acuan menggunakan aplikasi berbasis *Finite Difference OOMMF*.
2. Mengetahui pengaruh variasi sudut datang medan magnet luar pada medan koersivitas dalam kurva histerisis bahan *permalloy* dengan ukuran geometri 5 nm dan 20 nm.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan pada penelitian pengaruh sudut datang medan magnet luar terhadap kurva histerisis bahan *permalloy* ini yaitu dapat memberikan informasi mengenai pengaruh sudut datang pada medan koersivitas dan magnetisasi *permalloy* terhadap bentuk kurva histerisis. Penelitian ini dapat dijadikan acuan untuk penelitian selanjutnya mengenai analisis sudut datang medan magnet luar

pada kurva histerisis dengan simulasi program OOMMF pendekatan metode *Finite Difference*.



BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Magnet

Magnet adalah objek yang memiliki medan magnet (Buschow dan De Boer, 2004). Medan magnet merupakan ruang sekitar magnet yang membuat benda – benda tertentu mengalami gaya magnet. Awalnya sumber medan magnet hanyalah magnet permanen namun seiring berkembangnya ilmu pengetahuan banyak sekali jenis sumber medan magnet, salah satu contohnya adalah aliran arus pada kumparan. Arah medan magnet di suatu titik didefinisikan sebagai arah yang ditunjukkan oleh kutub utara jarum kompas (Kartini, 2015). Medan magnet yang muncul pada persamaan Maxwell dan hukum Biot-Savart pada ruang vakum di definisikan sebagai B . Medan magnet luar didefinisikan sebagai H , merupakan medan luar yang bekerja pada sebuah sampel dengan arus listrik stabil atau bidang magnet yang menyimpang dari ruang sampel disebut juga medan terapan/*applied field*/ H (Coey, 2009).

2.2 Material Magnet

Setiap bahan di dunia ini pasti memiliki medan magnetik karena pasti bahan mengandung atom, atom mengandung elektron yang berputar di sekitar bahan dan menghasilkan medan magnet. Munculnya sifat kemagnetan bahan berasal dari spin – spin elektron terluar dari bahan (Donald, dkk, 2011). Bahan magnetik dibedakan menjadi tiga berdasarkan nilai suseptibilitasnya yaitu bahan diamagnetik, paramagnetik, dan feromagnetik.

2.2.1 Bahan Diamagnetik

Bahan diamagnetik adalah bahan yang memiliki nilai suseptibilitas sangat kecil dan negatif. Bahan diamagnetik juga memiliki nilai resultan medan magnet masing – masing atom nol namun orbit dan spinnya tidak nol. Apabila medan

magnet luar diberikan pada bahan diamagnetik maka yang terjadi adalah elektron – elektron dalam atom akan berubah gerakan sedemikian hingga sampai menghasilkan medan magnet yang arahnya berlawanan, dengan kata lain arah magnetisasi (M) berlawanan dengan arah medan magnet luar (H). Bahan diamagnetik biasanya merupakan bahan ‘non magnetik’ seperti tembaga, perak, silicon, emas dan aluminium pada suhu kamar (Donald, dkk, 2011). Diamagnetisme adalah sifat suatu bahan diamagnetik. Diamagnetik merupakan magnet yang lemah namun pengecualian untuk superkonduktor yang memiliki magnet yang kuat dan merupakan diamagnetik sempurna (Halliday dan Resnick, 1989).

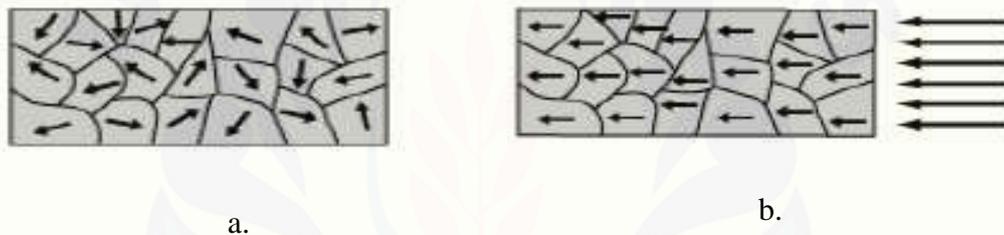
2.2.2 Bahan Paramagnetik

Bahan Paramagnetik adalah bahan yang memiliki nilai suseptibilitas sangat kecil namun positif (Donald, dkk, 2011). Bahan paramagnetik memiliki nilai resultan medan magnet tiap molekul tidak nol namun resultan seluruh molekul di dalam bahan nol karena gerakan spin yang acak menyebabkan medan magnet masing – masing molekul saling meniadakan. Apabila bahan paramagnetik diberi medan magnet luar maka elektronnya akan berusaha membuat resultan medan magnet molekulnya searah dengan medan magnet luar (Coey, 2009). Paramagnetisme merupakan sifat bahan paramagnetik yang hanya terjadi apabila diaplikasikan medan magnet luar (H). Bahan paramagnetik tertarik dengan medan magnet maka dari itu memiliki nilai permeabilitas cenderung lebih besar dari satu atau suseptibilitasnya positif. Contoh bahan paramagnetik diantaranya adalah magnesium, lithium, dan tantalum (Halliday dan Resnick, 1989).

2.2.3 Bahan Feromagnetik

Material feromagnetik adalah bahan – bahan yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik tinggi dan bernilai positif, serta muncul dalam bahan yang atom – atomnya memiliki momen magnet permanen berinteraksi kuat satu sama

lain dan mampu mempertahankan sifat – sifat magnetik meskipun medan magnet luarnya dihilangkan (Dedi, 2013). Momen magnetik permanen pada bahan feromagnetik disebabkan oleh gerakan spin elektron. Peran momen magnetik orbital tetap ada meskipun kecil apabila dibandingkan dengan momen spin. Interaksi gabungan tersebut menyebabkan momen magnetik spin elektron saling sejajar satu sama lain meskipun tidak ada medan magnet luar yang diaplikasikan. Kesejajaran momen magnetik ini membentuk daerah yang cukup luas dari kristal yang disebut domain (Lilik, 2010). Tanpa adanya medan magnet luar maka domainnya akan tersusun acak, sehingga jumlah magnetisasi secara makroskopis adalah nol. Domain yang acak tersebut dipisahkan oleh dinding domain yang mengalami perubahan arah magnetisasi.



Gambar 2.1 Arah domain material feromagnetik (a) tanpa pengaruh medan luar (b) dengan pengaruh medan luar (Reitz, 1993)

Material feromagnetik yang diberikan pengaruh medan magnet luar maka momen magnetik tiap – tiap atomnya akan tersusun sejajar medan luar yang diberikan. Vektor momen atomnya akan berputar dari arah sebelum diberikan medan luar dan menuju sejajar medan luar. Dinding pemisah antar kedua ruang tersebut dinamakan *domain wall*.

Magnetisasi bergantung pada nilai medan magnet luar (H), apabila mencapai maksimum maka atomnya akan sejajar dan disebut dengan magnetisasi jenuh atau magnetisasi saturasi (M_s) (Jiles, 1991). Hubungan besarnya magnetisasi dengan medan magnet luar (H) didefinisikan

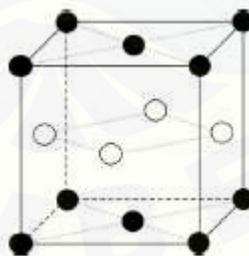
$$B = H + 4\pi M \quad (2.1)$$

Semakin besar medan magnet luar (H) yang diaplikasikan maka semakin besar nilai magnetisasinya (M) (Callister, 2001). Perbandingan antara magnetisasi (M) dengan

intensitas medan magnet luar (H) disebut dengan suseptibilitas. Suseptibilitas berperan sebagai pengelompok unsur karena merupakan besaran skalar tanpa dimensi. Nilai suseptibilitas dapat berubah mengikuti temperatur (Reitz, 1993).

2.3 Karakteristik Bahan *Permalloy* NiFe

Bahan *permalloy* atau material feromagnetik $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ adalah bahan *alloy* magnetik atau bahan campuran logam yang tersusun atas nikel 80 % dan besi 20 %. *Permalloy* dengan kandungan nikel lebih tinggi daripada besi cenderung memiliki permeabilitas lebih besar daripada *permalloy* nikel rendah namun induksinya lebih rendah pada keadaan jenuh. Bahan *permalloy* sensitif terhadap benturan dan kemagnetannya sangat dipengaruhi tekanan (Putu, 2013). *Permalloy* mempunyai magnetisasi tunggal atau hanya satu keadaan polarisasi magnetik. Analisis sifat magnetik dari material *permalloy* dilakukan dengan XRD yang mengindikasikan bahwa struktur lapisan yang terbentuk didominasi oleh suatu karakteristik kubus berpusat sisi (FCC). Perubahan struktur kristal dari BCC ke FCC pada saat komposisi Ni 30% dan struktur BCC terjadi pada komposisi 0 – 32,3% Ni dan FCC pada komposisi 31 – 80% Ni (Crangle dan Hallam, 1962). Berikut merupakan struktur kristal *permalloy*:



Gambar 2.2 Struktur kristal FCC pada material gabungan NiFe (○ atom Ni, ● atom Fe)
(Sumber: Vernyhora, 2009)

Penjelasan tentang bahan nikel dan besi menurut (Smith, 1993) :

1) Nikel

Nikel merupakan logam yang berwarna putih mengkilat, keras, dan tahan terhadap korosi. Sifat bahan nikel tersebut dapat dimanfaatkan untuk melapisi barang – barang yang terbuat besi, baja atau tembaga sehingga barang – barang itu

dapat tahan korosi. Contoh paduan logam nikel yaitu *stainless steel*, monel (Ni, Cu, dan sedikit Fe), nikrom (Ni, Fe, dan Cr), paduan NiFe dan alnico (Al, Ni, Fe, dan Co). Nikel mempunyai nomor atom 28 dan dua elektron terluar pada sub kulit 3d. Konfigurasi elektron dari atom ${}_{28}\text{Ni}$ adalah $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^8$ (Smith, 1993).

2) Besi

Besi murni merupakan logam yang berwarna putih mengkilat, relatif lunak, reaktif dan mudah terkorosi dalam udara yang lembab. Besi merupakan logam yang mudah bercampur dengan zat – zat lain sehingga mampu menjadi bahan baru yang keras dan tidak mudah terkorosi. Konfigurasi elektron dari atom ${}_{26}\text{Fe}$ adalah $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 4s^2 3d^6$. Besi mempunyai nomor atom 26 dan empat elektron terluar dari sub kulit 3d. Elektron terluar kulit 3d yang tidak berpasangan menyebabkan besi mempunyai momen magnetik yang tidak nol. Terciptanya momen magnetik ini karena pergerakan elektron mengelilingi inti dan berputar pada sumbunya (Smith, 1993).

2.4 Kurva Histerisis

Kurva histerisis adalah kurva yang memperlihatkan hubungan antara magnetisasi (M) yang terjadi pada suatu bahan dengan medan magnetik yang menimbulkannya atau medan magnet luar (H). Bahan – bahan seperti paramagnetik memiliki kurva hubungan (M) dan (H) yang cenderung linier namun pada bahan seperti feromagnetik tidak lagi linier (Braislfold, 1951). Karakteristik suatu material feromagnetik dapat dilihat dari loop kurva histerisisnya. Material feromagnetik mempunyai karakteristik yang berbeda dari jenis material magnetik lainnya apabila diberi medan magnet luar (H) (Sung, dkk, 2003). Kurva histerisis diperoleh dengan memberikan medan magnet yang cukup besar pada suatu arah kemudian diperkecil sehingga menuju nol dan selanjutnya dibalikkan pada arah yang berlawanan (Aharoni, 1998). Cara lain adalah dengan memetakan induksi medan magnet B di dalam material feromagnetik terhadap kuat medan magnet H yang berbeda – beda dan memenuhi persamaan :

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.2)$$

B adalah induksi magnet (Tesla), H adalah medan magnet yang diberikan (A/m), M adalah magnetisasi (A/m), dan μ_0 adalah permeabilitas ruang hampa, sesuai dengan :

$$\vec{J} = \mu_0\vec{M} \quad (2.3)$$

J adalah polarisasi dalam satuan Tesla, maka :

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H} + \vec{J} \quad (2.4)$$

Suseptibilitas magnetik bahan (χ) diperoleh dari persamaan :

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H} \quad (2.5)$$

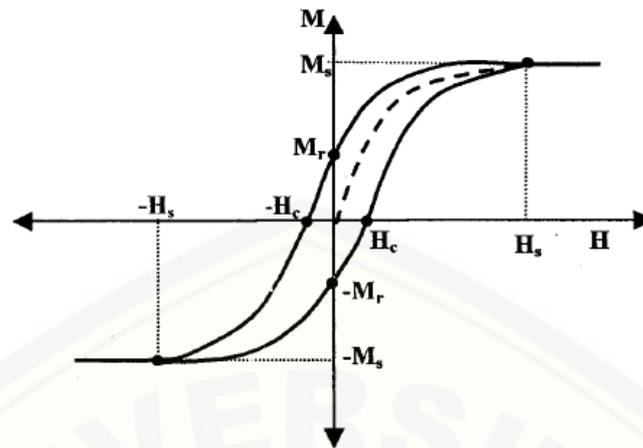
Permeabilitas magnetik pada dasarnya sama dengan suseptibilitas magnetik. Permeabilitas dapat mendeskripsikan sifat kemagnetan bahan terhubung dengan suseptibilitas pada persamaan :

$$\mu_r = \chi + 1 \quad (2.6)$$

(Sung, dkk, 2003).

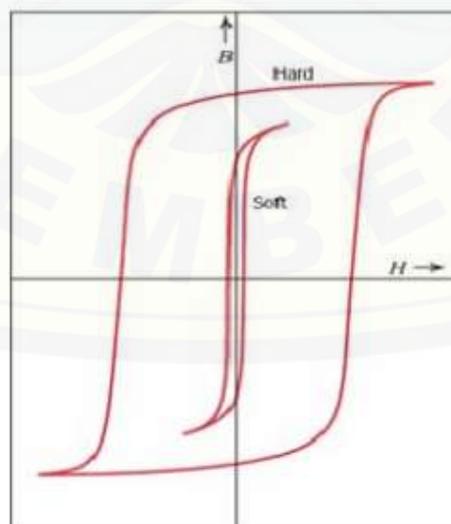
Magnetisasi (M) dan medan magnet (B) akan memberikan informasi mengenai parameter – parameter magnetik yang mungkin diperlukan dalam kajian mengenai suatu bahan. Parameter – parameter tersebut diantaranya :

- M_s merupakan magnetisasi saturasi (maksimum).
- M_r merupakan magnetisasi remanen atau magnetisasi sisa.
- H_s merupakan besarnya medan magnetik saat saturasi.
- H_c merupakan besarnya medan magnetik saat mencapai koersivitas.



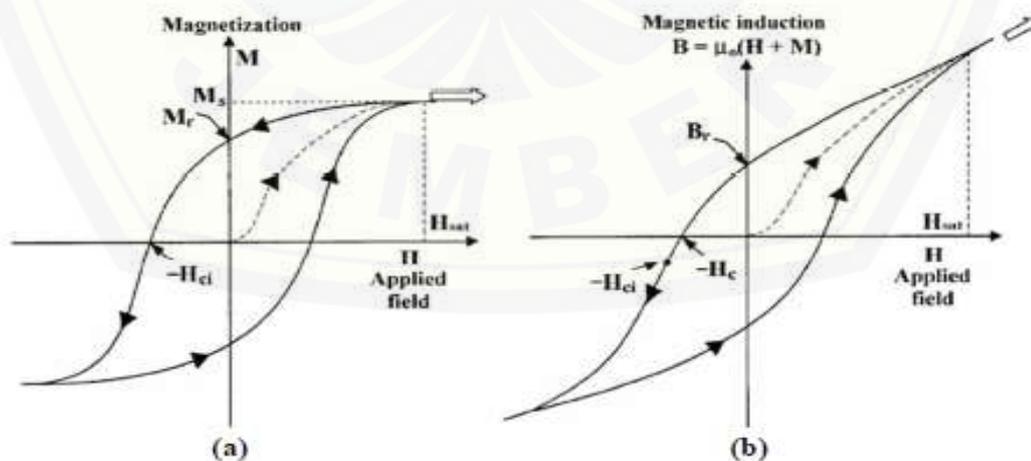
Gambar 2.3 Kurva histerisis (Dunlop dan Ozdemir, 1997)

Lebar kedua sisi loop histerisis sepanjang sumbu H disebut medan koersivitas sedangkan tinggi loop histerisis sepanjang sumbu B disebut remanensi (Dunlop dan Ozdemir, 1997). Kurva histerisis juga dapat digunakan untuk membedakan antara magnet permanen dan magnet lunak, seperti pada Gambar 2.4. Bahan magnet permanen dengan koersivitas tinggi berarti tidak mudah hilang kemagnetannya dengan H yang kecil. Bahan magnet lunak dengan medan koersivitas rendah mempunyai permeabilitas yang maksimum namun cenderung mudah hilang kemagnetannya.



Gambar 2.4 Kurva magnetisasi bahan magnet lunak (*soft magnet*) dan permanen (*hard magnet*) (Lilik, 2010)

Kurva histerisis pada Gambar 2.5 terlihat bahwa material feromagnetik pada awalnya belum termagnetisasi kemudian pemberian medan magnet H menyebabkan magnetisasi bertambah terus sebanding dengan medan magnet H . Pertambahan nilai magnetisasi disebabkan oleh pergerakan domain magnet. Besar medan magnet H yang diaplikasikan terus – menerus membuat magnetisasi mencapai keadaan saturasi (jenuh) yang dikenal sebagai keadaan M_s magnetisasi saturasi. Besar medan magnet yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan saturasi dikenal sebagai medan saturasi H_s . Keadaan ini membuat seluruh momen magnet membentuk domain tunggal yang searah aplikasi medan magnet H . Keadaan saturasi saat medan magnet luar H direduksi hingga pada keadaan yang disebut medan nukleasi (*nucleation field*). Medan nukleasi H_n didefinisikan sebagai medan awal yang membuat keadaan struktur domain tidak lagi sejajar satu sama lain (Frei, dkk, 1957). Medan magnet luar H direduksi hingga mencapai nol, namun sisa magnetisasi membuat kurva tidak kembali seperti bentuk semula, magnetisasi sisa dikenal dengan magnetisasi remanen M_r . Domain – domain magnet tidak kembali pada orientasi sebelum diberi medan magnet luar H , sehingga material termagnetisasi sebagian. Proses selanjutnya pembalikan arah medan magnet H dan terus ditingkatkan nilainya hingga mencapai nilai magnetisasi nol. Nilai medan arah balik H pada saat $M = 0$ disebut koersivitas. Arah domain magnet kembali acak (Sung, dkk, 2003).



Gambar 2.5 Kurva histerisis untuk material feromagnetik. (a) $M - H$ (b) $B - H$ (Sung, dkk, 2003)

Ada dua jenis medan koersivitas, yang pertama koersivitas intrinsik (H_{ci}) ada pada kurva histerisis M-H yaitu kuat medan magnet yang diberikan untuk membuat magnetisasi suatu material menjadi nol. Kedua, koersivitas (H_c) ada pada kurva histerisis B-H yaitu kuat medan magnet yang diperlukan untuk membuat induksi magnet material menjadi nol. Perbedaan jelas antara H_{ci} dan H_c terdapat pada material *hard magnet* atau magnet permanen (Sung, dkk, 2003).

2.5 Energi Pada Sistem Ferromagnetik

2.5.1 Energi *Exchange*

Energi *exchange* merupakan energi yang timbul dari interaksi spin dengan spin tetangganya melalui *exchange coupling*. Interaksi *exchange* termasuk interaksi *short – range* dan besarnya interaksi tersebut menunjukkan energi yang dibutuhkan untuk menyearahkan spin tetangganya (Dita, 2013). Energi *exchange* E_{ex} dari interaksi antara spin dalam material ferromagnet dapat dinyatakan

$$E_{ex} = -2 \sum_{ij} S_i \cdot S_j \quad (2.7)$$

dimana S_i dan S_j adalah unit vektor dua spin atom yang berinteraksi. Persamaan diatas disebut juga dengan *Heisenberg model*. Interaksi dua spin tergantung pada spin paralel atau antiparalel yang harus mengikuti prinsip larangan Pauli (*Pauli exclusion*) yaitu tidak diperkenankan ada dua elektron yang mempunyai bilangan kuantum yang sama pada tempat dan waktu yang sama (Hubert dan Schafer, 2009).

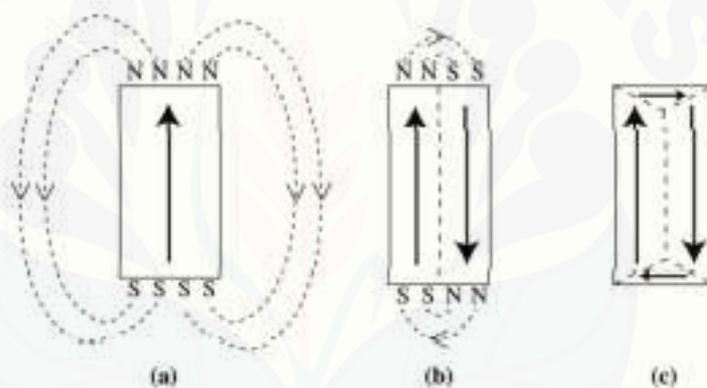
Penjumlahan seluruh indek per unit volume, maka energi *exchange* per unit volume U_{ex} adalah

$$U_{ex} = \frac{A}{M_s^2} \int [(\nabla \mathbf{m}_x)^2 + (\nabla \mathbf{m}_y)^2 + (\nabla \mathbf{m}_z)^2] dr \quad (2.8)$$

dengan A adalah *exchange stiffness constant* dalam J/m (Hubert dan Schafer, 2009).

2.5.2 Energi Magnetostatik

Energi magnetostatik pada material magnet berasal dari interaksi muatan pada kutub-kutub seperti muatan positif dan negatif pada muatan listrik yang berasal dari material itu sendiri atau disebut juga dengan energi demagnetisasi H_d . Besarnya energi magnetostatik sangat bergantung pada jumlah dipol serta arah orientasi antara dipol – dipol. Dipol – dipol dari material magnetik memiliki orientasi arah yang sama satu sama lainnya, maka energi magnetostatiknya besar. Gambar 2.6 (a) menunjukkan apabila material magnet dengan dipol – dipol anti parallel satu dengan yang lainnya, sedangkan pada Gambar 2.6 (b) keadaan dipol – dipol seperti Gambar 2.6 (c) menyebabkan energi magnetostatik pada keadaan ini adalah minimum (Guimaraes, 2009).



Gambar 2.6 Pengurangan energi magnetostatik atau energi demagnetisasi akibat orientasi arah dipol – dipol magnet (Spaldin, 2011)

Energi magnetostatik E_d per unit volume adalah

$$E_d = -\frac{1}{2}\mu_0 \int H_d \cdot M \, dV = \frac{1}{2}\mu_0 \int H_d^2 \, dV \quad (2.9)$$

dimana H_d = medan demagnetisasi dan M = magnetisasi saturasi (Guimaraes, 2009).

2.5.3 Energi Anisotropi

Energi *anisotropy* adalah energi yang timbul karena pengaruh orientasi arah magnetisasi dan sumbu kristalografi (*crystallographic axes*) (Djuhana, dkk, 2013). Energi anisotropi ini berasal dari interaksi spin-orbit dan tergantung pada orientasi arah magnetisasi relatif terhadap arah kristalografi. Jadi, besarnya energi *magneto crystalline anisotropi* tergantung pada karakteristik kristalografi dari material. Ada dua jenis *magneto crystalline anisotropi* yakni *uniaxial anisotropy* dan *cubic anisotropy* (Getzlaff, 2008). *Uniaxial anisotropy* berbentuk *hexagonal* (material cobalt) dan tetragonal. Energi anisotropi pada keadaan ini dinyatakan dengan :

$$E_{ani}^{uniax} = \int_V [K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + K_3 \sin^6 \theta + \dots] dV \quad (2.10)$$

K adalah konstanta uniaxial anisotropi yang dapat bernilai positif atau negatif (J/m^3) dan θ adalah sudut magnetisasi terhadap sumbu z. *Cubic anisotropy* misalkan untuk material Besi dan Nikel. Besarnya energi anisotropi pada material ini didefinisikan dengan :

$$E_{ani}^{cubic} = \int_V [K_0 K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + K_2 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2) + \dots)] dV \quad (2.11)$$

dimana α_n adalah arah kosinus magnetisasi terhadap sumbu x, y, dan z (Getzlaff, 2008).

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 (bentuk bola, elips, dan persegi). Pengaruh bentuk dapat dinyatakan sebagai faktor demagnetisasi N dalam 3 sumbu pokok (*sumbu x, y, z*) (Chikazumi dan Charap, 1964). Material *soft magnet* biasanya memiliki nilai energi anisotropi kecil karena konstanta anisotropinya juga kecil tetapi material *hard magnet* konstanta anisotropi yang dimiliki umumnya besar. Besar kecilnya energi anisotropi tersebut menunjukkan kecenderungan material untuk mengarahkan magnetisasinya sesuai sumbu *easy axis*-nya (Dita, 2013).

2.5.4 Energi Zeeman

Energi Zeeman adalah energi yang muncul akibat interaksi antara material dengan medan eksternal. Energi ini muncul sebagai konsekuensi efek Zeeman yang berlaku pada spin – spin yang dikenai medan magnet luar, saat dikenai medan magnet luar energi terendah dari spin dalam material akan terpecah, dengan jarak pecahan bergantung pada besar medan magnet luar yang diberikan. Besarnya energi Zeeman didefinisikan oleh :

$$E_z = -\mu_0 \int \mathbf{H}_{ext} \cdot \mathbf{M} dV \quad (2.12)$$

H_{ext} merupakan medan magnet eksternal yang dikenai pada material. Nilai energi Zeeman akan terminimisasi jika orientasi magnetisasi searah dengan arah medan yang diberi (Dita, 2013).

2.6 Dinamika Magnetisasi

Dinamika spin pada material magnet dapat dijelaskan secara sederhana dari momen magnet dengan pengaruh medan magnet luar. Interaksi ini menghasilkan torka dan energi tertentu. Momen magnet sendiri berasal dari gerak muatan yang membentuk loop. Akibat gerakan muatan maka akan timbul arus I sepanjang loop tersebut dengan luasan S , maka momen magnetik \mathbf{m} dapat dinyatakan

$$|\mathbf{m}| = \mu_0 I S \quad (2.13)$$

Vektor momen magnetik \mathbf{m} tegak lurus pada bidang loop. Sekarang perhatikan luasan lingkaran kecil $S = \pi r^2$ yang diilustrasikan pada Gambar 2.7. Arus yang dihasilkan oleh muatan listrik q disekitar luasan dengan frekuensi ω adalah $I = q(\omega/2\pi)$. Maka momen magnet yang dihasilkan oleh rotasi muatan listrik dapat ditulis sebagai berikut:

$$\mathbf{m} = \frac{q\mu_0}{2} r^2 \omega = -\frac{e\mu_0}{2} \mathbf{r} \times \mathbf{v} \quad (2.14)$$

dengan muatan elektron $q = -e$ dan hubungan antara kecepatan anguler dan kecepatan tangensial adalah $\mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$, maka momen magnet dapat ditulis

$$\mathbf{m} = -\frac{e\mu_0}{2} (\mathbf{r} \times \mathbf{v}) \quad (2.15)$$

momentum angular ditulis

$$\mathbf{l} = m_e(\mathbf{r} \times \mathbf{v}) = m_e r^2 \omega \quad (2.16)$$

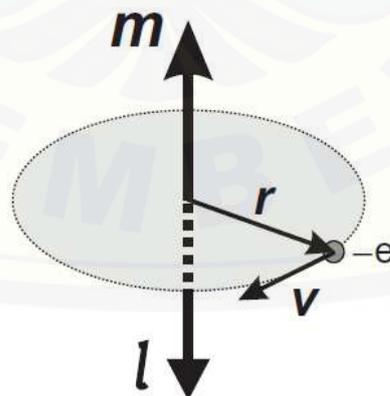
dengan substitusi persamaan (2.15) dan persamaan (2.16), hubungan momen magnet dengan momentum angular adalah

$$\mathbf{m} = -\frac{e\mu_0}{2m_e} \mathbf{l} \quad (2.17)$$

Berdasarkan model atom Bohr, besar momentum angular sebanding dengan konstanta Planck $\mathbf{l} = n\hbar$. Untuk keadaan dasar $n = 1$ maka $\mathbf{l} = \hbar$, maka besar momentum angular adalah:

$$\mathbf{m} = -\frac{e\mu_0}{2m_e} \hbar = -\frac{g|e|\hbar}{2m_e} \mathbf{l} \quad (2.18)$$

Dimana $\mu_B = (\mu_0 e \hbar / 2m_e)$ adalah *Magneton Bohr* dan $\hbar = 1,15 \times 10^{-34}$ Js. Konstanta g adalah faktor Lande, dimana $g = 2$ untuk spin momen magnet. Muatan elektron $e = -1,6 \times 10^{-19}$ C dan massa elektron $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ kg. Sedangkan $\gamma = (ge/2m_e)$ dikenal sebagai rasio gyromagnetik elektron. Untuk elektron, rasio gyromagnetik adalah $\gamma = 1,759 \times 10^{11} \text{ rads}^{-1} \text{ T}^{-1}$.



Gambar 2.7 Momen magnet (Stohr dan Siegmann, 2006)

Ketika momen magnetik \mathbf{m} diberikan medan magnet luar \mathbf{H} akan timbul torka dengan arah tegak lurus momen magnet dan medan magnet luar. Torka ini muncul

karena momen magnetik melakukan gerak berpresesi di sekitar arah medan magnet. Hubungan torca dengan momentum angular adalah

$$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{l}}{dt} = \mathbf{m} \times \mathbf{H} \quad (2.19)$$

Dengan menggunakan prinsip pada persamaan (2.19), persamaan gerak momen magnet \mathbf{m} terhadap waktu dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = -\frac{e}{2m_e} (\mathbf{m} \times \mu_0 \mathbf{H}) = -\gamma \mu_0 (\mathbf{m} \times \mathbf{H}) \quad (2.20)$$

Dari persamaan (2.20), kita dapat memperoleh frekuensi Larmor (*Larmor frequency*) dari \mathbf{m} pada frekuensi sudut $\omega = -\gamma \mathbf{H}$ (Mardona, 2012).

Persamaan gerak dinamika spin magnet pertama kali dinyatakan oleh Landau dan Lifshitz pada tahun 1935 yang dikenal dengan persamaan Landau-Lifshitz (LL). Persamaan ini menjelaskan tentang respon material ferromagnet ketika diberikan medan magnet luar. Akibatnya terjadi torca antara medan magnet luar dan spin magnet pada suatu domain magnet dan bergerak presesi pada frekuensi tertentu yaitu frekuensi *Larmor* (dalam orde gigahertz). Pada perkembangannya persamaan LL sangat baik menjelaskan dinamika spin pada kondisi energi disipasi rendah atau faktor damping kecil. Tetapi untuk kondisi dengan energi disipasi yang besar, persamaan LL memperlihatkan hasil yang tidak akurat. Pada tahun 1955, Gilbert memformulasikan kembali persamaan LL dengan memperhitungkan kondisi disipasi yang besar atau faktor damping besar dan dikenal dengan persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) (Mardona, 2012).

Persamaan LLG dapat dijelaskan dari persamaan (2.20) dengan memperkenalkan gerak presesi momen magnet yang dapat dianalogikan sebagai gerak disipasi. Gerak presesi cenderung membuat momen magnetik sejajar dengan medan efektif, sehingga persamaan (2.20) dapat dituliskan

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \left(\mathbf{H}_{eff} - \eta \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right) \quad (2.21)$$

dimana η adalah konstanta positif dan konstanta damping $\alpha = \gamma |\mathbf{M}| \eta$, maka diperoleh

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} + \frac{\alpha}{|\mathbf{M}|} \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \quad (2.22)$$

persamaan (2.22) kemudian dikalikan dengan \mathbf{M} , maka diperoleh

$$\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) + \frac{\alpha}{|\mathbf{M}|} \mathbf{M} \times \left(\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right) \quad (2.23)$$

dengan menggunakan sifat identitas vektor $\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})\mathbf{b} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})\mathbf{c}$

$$\mathbf{M} \times \left(\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right) = \left(\mathbf{M} \cdot \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right) \mathbf{M} - M^2 \frac{d\mathbf{M}}{dt} \quad (2.24)$$

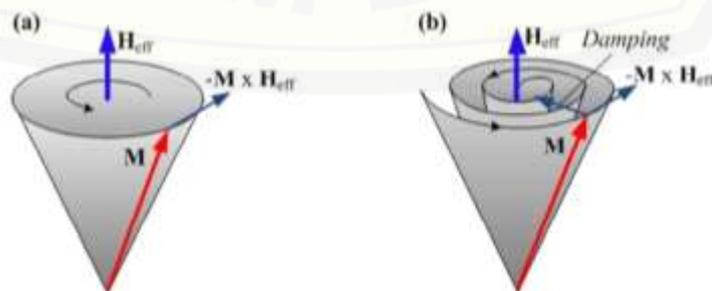
maka persamaan (2.24) dapat ditulis kembali menjadi

$$\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) + \alpha M \frac{d\mathbf{M}}{dt} \quad (2.25)$$

Substitusi persamaan (2.25) pada persamaan (2.22), maka akan menghasilkan persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\frac{\gamma}{(1+\alpha^2)} (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) - \frac{\gamma\alpha}{(1+\alpha^2)M} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) \quad (2.26)$$

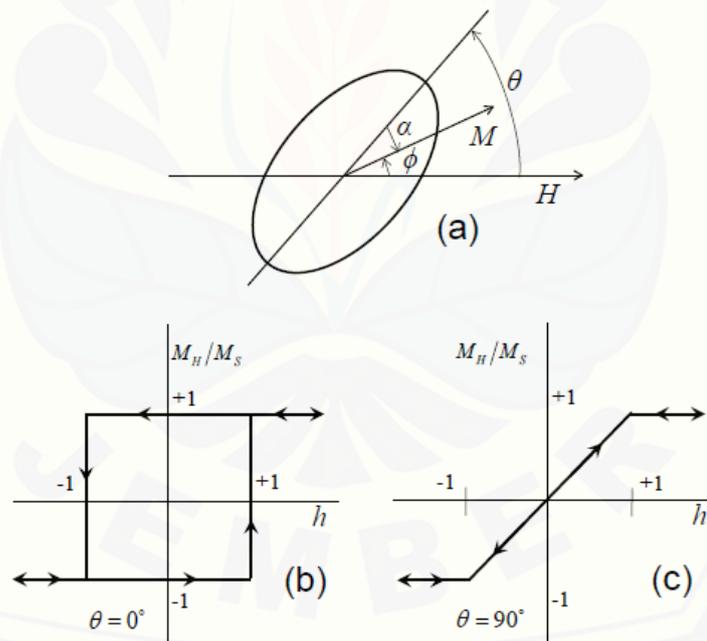
Suku pertama pada sisi kanan pada persamaan (2.26) menjelaskan proses gerakan precesi dari spin berotasi akibat pengaruh medan magnet luar (*gyromagnetic precession*) atau dikenal dengan *Larmor precession* dan suku kedua menjelaskan efek disipasi dari gerakan precesi atau disebut juga *the damping effect of precession*. Untuk nilai faktor redaman α yang kecil, maka suku $(1 + \alpha^2)$ sama dengan satu. Sehingga persamaan LLG dapat disederhanakan menjadi persamaan LL (Widodo, 2013).



Gambar 2.8 Gerak precesi dari momen magnet terhadap medan efektif (a) tanpa redaman, (b) dengan redaman (*damping*) (Widodo, 2013)

2.7 Mekanisme Pembalikan Magnetisasi

Mekanisme pembalikan magnetisasi terdapat dua model. Pertama, model rotasi koheren (*coherent rotation*) yaitu mekanisme pembalikannya terjadi secara seragam dan berputar bersama - sama. Model pembalikan ini terjadi pada partikel berstruktur *single-domain* atau yang dikenal sebagai partikel Stoner-Wohlfarth (Coey, 2009). Ketika sampel dimagnetisasi menuju saturasi, atau ketika sampel cukup kecil dimana magnetisasi seragam seluruhnya, sampel bisa jadi terdiri atas *single domain* magnetik. Proses magnetisasi dari *single domain* dibawah pengaruh medan luar disini berbeda dari biasanya, dimana pembalikan magnetisasi terjadi oleh rotasi - rotasi pada medan kritis tanpa pergerakan *domain wall*. Model Stoner-Wohlfarth mendeskripsikan kurva magnetisasi dari kumpulan partikel *single domain* dengan uniaxial anisotropi sebagai hasil dari bentuk partikel atau dari *magnetocrystalline anisotropy* (Morecroft, 2003).



Gambar 2.9 (a) Skema *prolate ellipsoidal* dengan M - H. Loop histerisis (b) *easy axis* ($\theta = 0^\circ$) dan (c) *hard axis* ($\theta = 90^\circ$) (Morecroft, 2003)

Pada model penyederhanaan dari elipsoid dengan *uniaxial anisotropi*, *anisotropy* dirumuskan sebagai

$$E_{an} = K \sin^2 \theta \quad (2.27)$$

Dimana magnetisasi terorientasi pada sudut θ terhadap *easy direction*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9 (b), yang menaikkan torque

$$\tau_{an} = \frac{-dE_{an}}{d\theta} = -2K \sin\theta \cos\theta \quad (2.28)$$

Torsi yang dihasilkan oleh medan H yang bergantung pada sudut ϕ antara magnetisasi dan arah medan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\tau_H = \mu_0 M_s \times H = \mu_0 M_s H \sin\phi \quad (2.29)$$

Keadaan setimbang dicapai ketika torsi yang dihasilkan oleh medan τ_H sama dengan torsi pada anisotropi τ_{an} seperti pada persamaan dibawah:

$$\tau_H = \tau_{an} \quad (2.30)$$

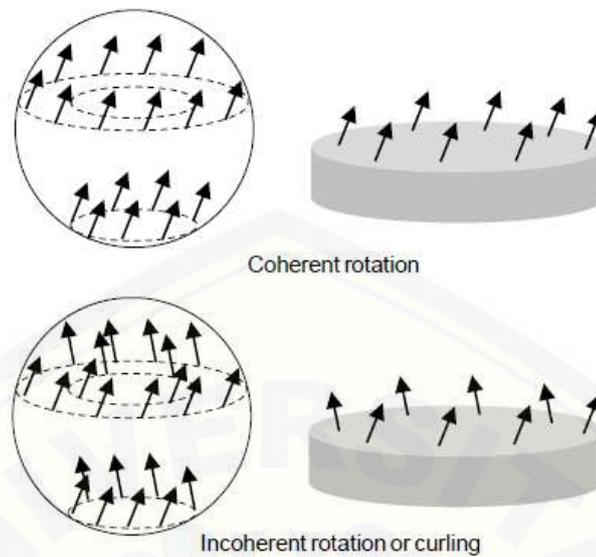
$$\mu_0 M_s H \sin\phi = 2K \sin\theta \cos\theta \quad (2.31)$$

Kekuatan medan H_s yang dibutuhkan untuk mensaturasi sampel *polycrystalline* adalah medan yang dibutuhkan untuk merotasi magnetisasi dari *easy axis* menuju arah medan, yang diasumsikan berada pada 90° terhadap *easy axis*. Berdasarkan persamaan diatas, medan saturasi akan terjadi jika

$$H_s = \frac{2K}{\mu_0 M_s} \quad (2.32)$$

Stoner dan Wolfarth menggunakan model simpel ini untuk menunjukkan bahwa nilai kritis dari medan ternormalisasi h yang dibutuhkan untuk pembalikan magnetisasi, dimana pembalikan magnetisasi meloncat secara diskontinu, tergantung pada sudut antara medan dan *easy axis* seperti ditunjukkan Gambar 2.10 (b).

Kedua, mode *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 (Coey, 2009). 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 (Skomski, 2008).



Gambar 2.10 Mekanisme pembalikan magnetisasi partikel magnetik berbentuk bola. (a) rotasi koheren, (b) curling (Sumber: Skomski, 2008)

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus sampai Oktober 2017. Tempat yang digunakan pada penelitian ini adalah Laboratorium Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Alat yang digunakan pada penelitian ini berupa 1 set perangkat computer yang terdiri atas layar monitor, CPU, keyboard, dan mouse dengan spesifikasi minimum adalah:

Prosesor	: Intel (R) Core (TM) i5-3470 CPU @ 3.20GHz 3.60GHz
Sistem tipe	: 64 bit
RAM	: 4.00 GB (3.90 GB usable)
Sistem operasi	: windows 7 ultimate

Program aplikasi yang digunakan pada simulasi adalah:

- OOMMF (*Object Oriented Micromagnetic Framework*), digunakan untuk simulasi mikromagnetik berbasis *Finite Different (FD)*.
- MayaVi, berfungsi untuk pembentukan gambar spin bahan mikromagnetik.
- Microsoft Excel, berfungsi sebagai pengolah data variasi sudut datang medan magnet luar.
- Origin Pro, berfungsi sebagai pembentuk kurva histerisis dengan menggunakan nilai hasil running yang berupa file ODT (*OOMMF Document Text*).
- Notepad ++, berfungsi sebagai program penyusunan *script* dan pengeditan hasil data.

Langkah awal penelitian dilakukan dengan melakukan kajian pustaka. Kajian pustaka dilakukan guna mendapatkan referensi tentang parameter – parameter dari bahan yang akan disimulasikan. Parameter yang didapatkan kemudian akan disusun menjadi sebuah *script* atau MIF dalam program Notepad++ lalu disimulasikan menggunakan program OOMMF. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah *permalloy* Ni₈₀Fe₂₀, dengan parameter – parameter yang ada

pada bahan seperti konstanta anisotropi, konstanta *exchange*, dan magnetisasi saturasi. Struktur material *permalloy* dalam model *nanocube*. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan sudut datang medan magnet luar.

3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis dan sumber data yang digunakan dalam penelitian ini, berupa jenis data sekunder yang diperoleh dari berbagai referensi. Jenis data yang berupa parameter *permalloy* NiFe digunakan dalam simulasi dalam Tabel 3.1 dan 3.2.

Tabel 3.1 Parameter material *permalloy* Ni₈₀Fe₂₀

Bahan	Ms (A/m)	K (J/m)	A (J/m ³)
<i>Permalloy</i>	860 x 10 ³	5 x 10 ³	1,3 x 10 ⁻¹¹

Sumber : Indriawati dan Suharyadi (2014)

Tabel 3.2 Ukuran geometri dan variasi sudut

Atribut Simulasi	Ukuran dan Variasi	Satuan
Ukuran geometri	5, 20	nm
Sudut	0 , 30 , 45 ,60 , 90	derajat

Parameter yang digunakan pada replikasi kurva histerisis Lefter dan Dimian (2012) pada OOMMF terdapat dalam Tabel 3.3 dan Tabel 3.4.

Tabel 3.3 Parameter material *permalloy* Ni₈₀Fe₂₀ replikasi

Bahan	Ms (A/m)	K (J/m)	A (J/m ³)
<i>Permalloy</i>	796 x 10 ³	0	1,3 x 10 ⁻¹¹

Sumber : Lefter dan Dimian (2012)

Tabel 3.4 Ukuran geometri dan sudut replikasi

Atribut Simulasi	Ukuran dan Variasi	Satuan
Ukuran geometri	85	nm
Sudut	0	derajat

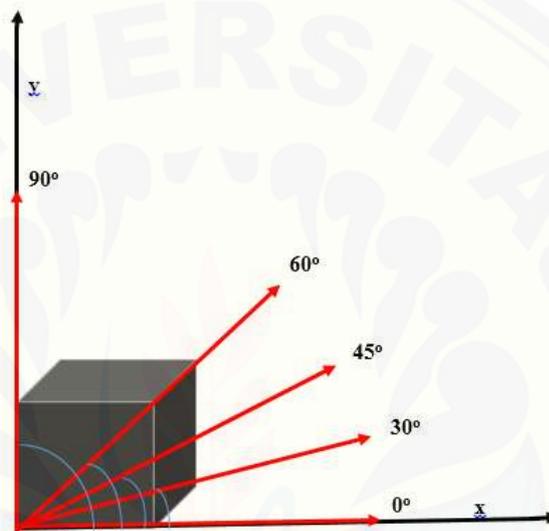
Sumber : Lefter dan Dimian (2012)

3.3 Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukurannya

Pada penelitian ini, terdapat tiga variabel penelitian yang terdiri dari:

1) Variabel Bebas

Variabel bebas pada penelitian ini adalah medan magnet luar (H), variasi sudut 0° , 30° , 45° , 60° , 90° dan variasi ukuran geometri bahan *nanocube* 5 nm dan 20 nm. Ilustrasi pemberian variasi sudut medan magnet luar :



Gambar 3.1 Pemberian variasi sudut medan magnet luar.

2) Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah magnetisasi (M) dan kurva histerisis, kurva ini didapat dengan cara variasi sudut 0° , 30° , 45° , 60° , 90° dan variasi ukuran geometri bahan dengan bentuk *nanocube* 5 nm dan 20 nm pada variabel bebas di atas akan menghasilkan data magnetisasi dan medan magnet luar yang kemudian akan digambarkan pada aplikasi Origin lalu menghasilkan kurva histerisis yang merupakan hubungan antara magnetisasi dan medan magnet luar.

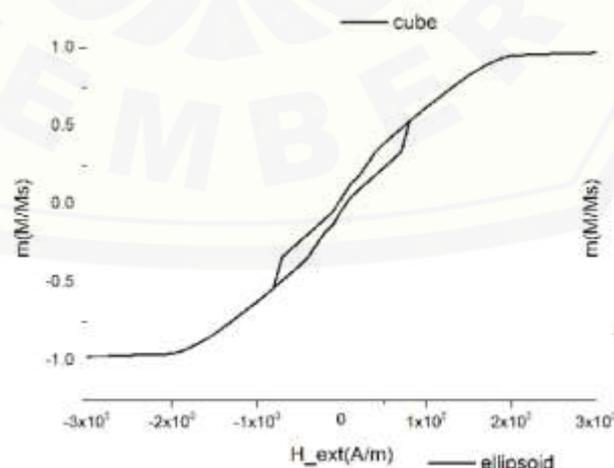
3) Variabel Kontrol

Variabel kontrol pada penelitian ini adalah parameter – parameter bahan *permalloy* seperti magnetisasi saturasi, konstanta anisotropi, dan konstanta *exchange* yang dapat dilihat pada Tabel 3.2 dan 3.4.

3.4 Metode Analisis Data

1) Analisis hasil replikasi kurva histerisis jurnal acuan berdasarkan ukuran geometri dan parameter terhadap magnetisasi bahan.

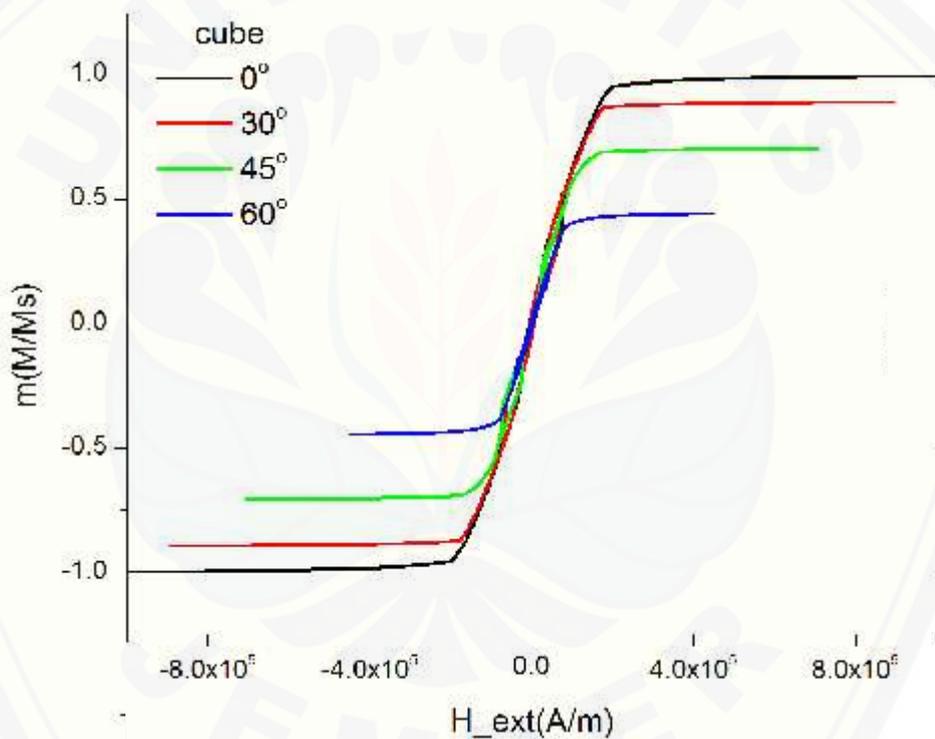
Simulasi OOMMF dilakukan dengan menggunakan parameter bahan *permalloy* pada penelitian Lefter dan Dimian (2012). Hal tersebut dilakukan guna melihat perbedaan bahan *permalloy* apabila disimulasikan menggunakan program OOMMF dan NMAG. Hasil dari OOMMF berupa file ODT kemudian dianalisis pada program Origin dan menghasilkan kurva histerisis. Bentuk bahan yang digunakan hanya *nanocube* dengan ukuran geometri 85 nm. Pada penelitian yang dilakukan Lefter dan Dimian (2012), digunakan variasi ukuran nano seperti *cube*, *cylinder*, *elipsoid*, dan *sphere*. Berikut hasil kurva histerisisnya pada bentuk bahan *nanocube* :



Gambar 3.2 Kurva histerisis dari bentuk *nanocube* medan magnet luar pada sumbu mudah (Lefter dan Dimian, 2012).

- 2) Analisis hasil berdasarkan variasi ukuran geometri dan sudut pada bentuk kurva histerisis.

Simulasi program OOMMF menghasilkan file berupa ODT yang kemudian dianalisis pada program Origin dan menggambarkan kurva histerisis. Hal ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besarnya pengaruh sudut datang medan magnet luar pada bentuk kurva histerisisnya dari bahan NiFe. Analisis dilakukan pada setiap variasi sudut dan variasi ukuran geometri bahan *permalloy*. Pada penelitian Lefter dan Dimian, 2012 kurva histerisisnya dibentuk berdasarkan semua pengaruh variasi sudut, dapat dilihat pada Gambar 3.3.



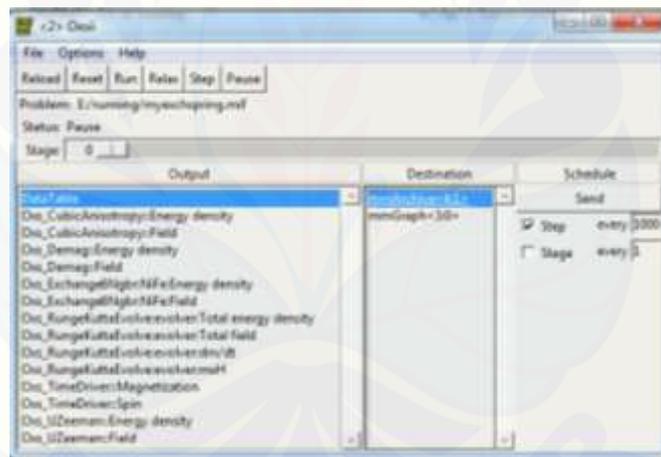
Gambar 3.3 Kurva histerisis menggunakan model Stoner – Wohlfarth (Lefter dan Dimian, 2012)

3.5 Langkah Kerja

Simulasi mikromagnetik pada penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan:

1) Simulasi pada program OOMMF (*Object Oriented Micromagnetic Framework*)

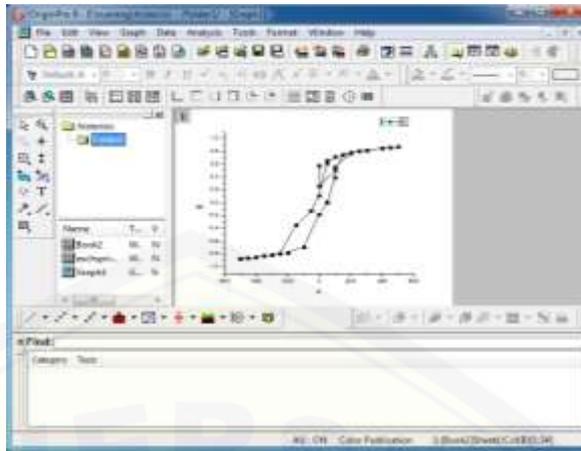
Simulasi pada program OOMMF dilakukan dengan memasukkan file *script* berbentuk .MIF yang sebelumnya telah disusun dalam program Notepad ++. Masukkan MIF pada program OOMMF dengan *load file* dan di jalankan. Variasi sudut datang digunakan untuk mencari kurva histerisis yang cocok apabila ditinjau dari beberapa sisi seperti bentuk kurva, medan koersivitas dan lain – lain. Berikut merupakan tampilan program OOMMF:



Gambar 3.4 Tampilan Oxii pada program OOMMF

2) Simulasi pada program Origin

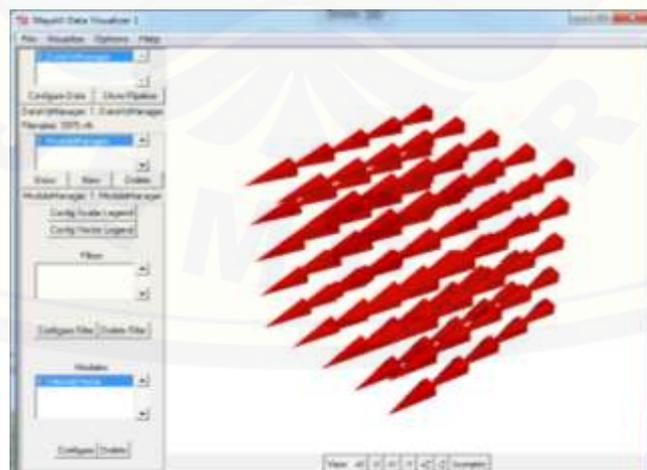
Simulasi pada program Origin dilakukan apabila hasil keluaran dari OOMMF sudah selesai. Hasil tersebut berupa file ODT kemudian di masukkan pada program Origin. Hasil magnetisasi dan medan magnet luar dianalisis kemudian dibentuk menjadi kurva histerisis. Hasil pada kurva histerisis juga dapat menjadi acuan pengaruh ukuran geometri bahan pada kurva histerisisnya. Berikut merupakan tampilan program Origin:



Gambar 3.5 Tampilan program Origin

3) Simulasi pada MayaVi

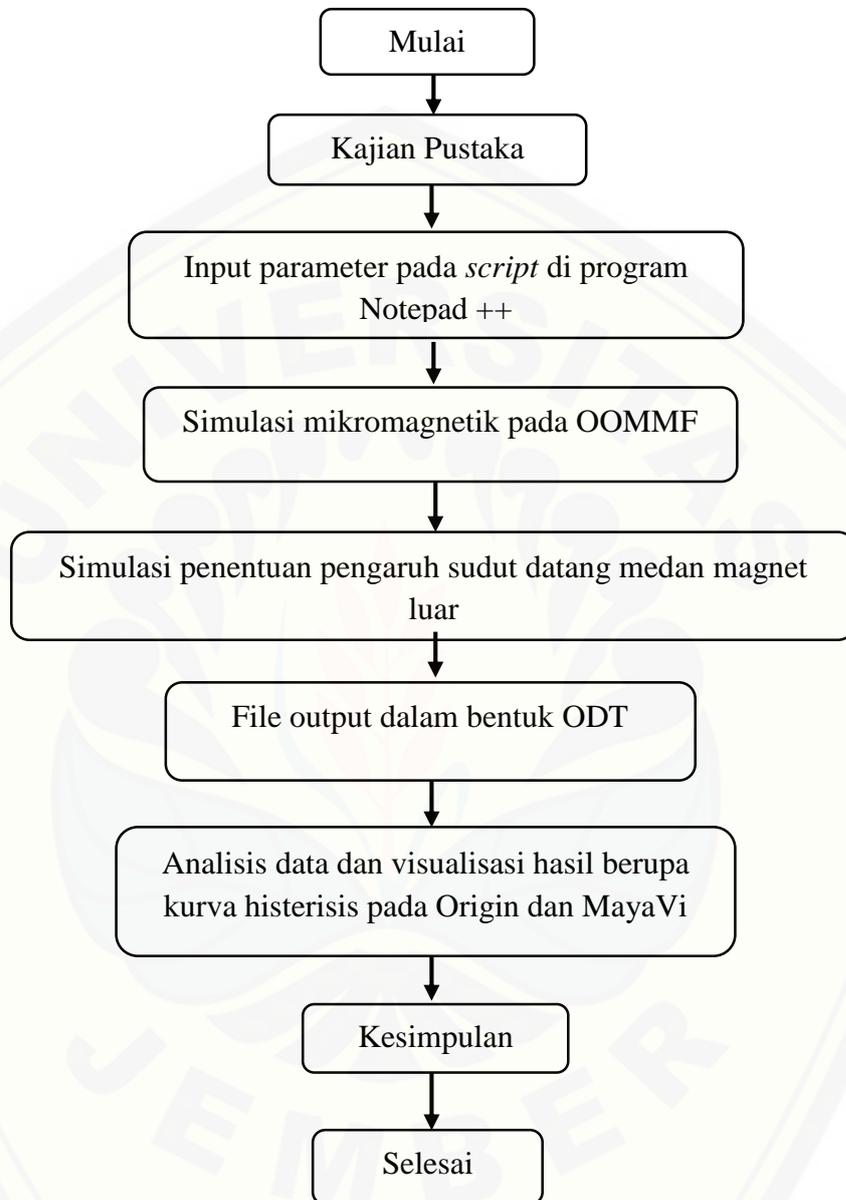
Simulasi pada program MayaVi dilakukan setelah mendapatkan hasil kurva histerisis. Pada hasil kurva histerisis ditandai beberapa titik yang merupakan daerah yang mewakili magnetisasi dan pembalikan magnetisasi. Data hasil simulasi dari OOMMF berupa OMF dikonversi menjadi OVF dan kemudian dikonversi lagi menjadi VTK. VTK tersebut baru dapat diproses pada program MayaVi untuk menggambarkan struktur domain yang dihasilkan pada simulasi OOMMF. Berikut merupakan tampilan program MayaVi:



Gambar 3.6 Tampilan program MayaVi

3.6 Kerangka Pemecahan Masalah

Penelitian yang akan dilakukan digambarkan pada diagram alir berikut ini:



Gambar 3.4 Diagram alir penelitian

BAB 5. PENUTUP

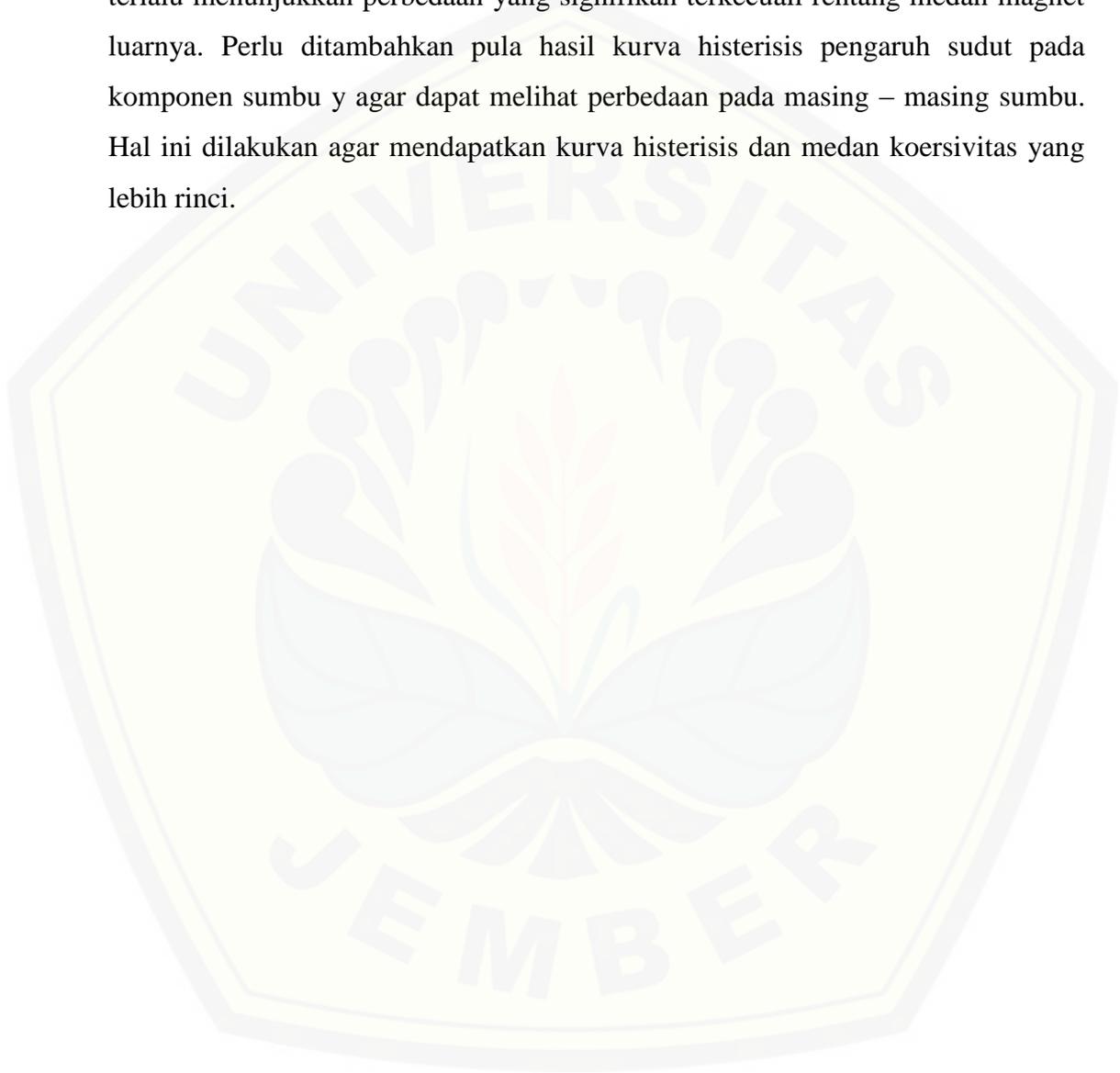
5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian simulasi pengaruh sudut datang medan magnet luar terhadap bentuk kurva histerisis *permalloy* feromagnetik adalah:

1. Hasil replikasi kurva histerisis dengan menggunakan parameter acuan menghasilkan kurva histerisis dengan pemberian medan magnet luar yang relatif kecil yakni 500 mT. Proses magnetisasi dan pembalikan magnetisasi berlangsung lebih cepat dikarenakan nilai parameter anisotropi nol dan magnetisasi saturasi kecil. Kurva histerisis hasil replikasi menggunakan program berbasis *Finite Difference* OOMMF memasukkan semua nilai hasil simulasi sehingga bentuk kurva yang dihasilkan tidak terlalu bagus, sedangkan pada program berbasis *Finite Element* NMAG hasil kurva yang didapatkan merupakan nilai yang paling konvergen dari simulasi.
2. Pengaruh sudut 0° , 30° , 45° dan 60° pada medan magnet luar terhadap bentuk kurva histerisis adalah berbanding terbalik karena semakin besar variasi sudut yang diaplikasikan semakin kecil medan koersivitas dalam kurva histerisis yang dihasilkan. Pada variasi sudut 90° tidak menghasilkan kurva histerisis karena arah medan magnet luar menuju sumbu x sedangkan saat sudut 90° medan magnet luar yang dipengaruhi adalah sumbu y sehingga kurva yang dihasilkan nol. Medan magnet luar yang digunakan pada ukuran 5 nm berada pada rentang 10000 mT sampai -10000 mT dengan medan koersivitas -5000 mT sampai 5000 mT. Medan magnet luar yang digunakan pada ukuran 20 nm berada pada rentang 1000 mT sampai -1000 mT dengan medan koersivitas -390 mT sampai 390 mT. Pada ukuran 5 nm dan 20 nm, magnetisasi variasi sudut 0° , 30° , 45° , 60° secara berurutan yaitu 1, 0,866, 0,704, 0,494 dan 1, 0,868, 0,710, 0,503. Struktur domain yang terbentuk adalah domain tunggal atau *Single Domain* (SD) karena domain selalu searah.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu perlu digunakan variasi bentuk bahan *permalloy* daripada variasi ukuran geometri karena apabila telah diaplikasikan sudut pada medan magnet luar, variasi ukuran geometri tersebut tidak terlalu menunjukkan perbedaan yang signifikan terkecuali rentang medan magnet luarnya. Perlu ditambahkan pula hasil kurva histerisis pengaruh sudut pada komponen sumbu y agar dapat melihat perbedaan pada masing – masing sumbu. Hal ini dilakukan agar mendapatkan kurva histerisis dan medan koersivitas yang lebih rinci.



DAFTAR PUSTAKA

- Aharoni, A. 1998. *Introduction to the Theory of Ferromagnetism*. Oxford: Clarendon Press.
- Ardiansyah, E. M. 2011. Investigasi Sifat - Sifat Magnetik Bahan CoFeB dan Pengaruh Penerapan *heat assisted* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik. *Skripsi*. Jember: FMIPA Universitas Jember.
- Behrel C., Neu V., Schultz L., dan Fahler S. 2013. Magnetically and thermally induced switching processes in hard magnets. *Journal of Applied Physics*. 112(083919). 1-5.
- Brailsford F. 1951. *Magnetic Material*. Manchester: Metropolitan Vickers Electrical Company LTD.
- Budi P., Nurosyid F., Abraha K., dan Sudjatmoko. 2004. Analisis Sifat Listrik dan Magnetik Lapisan Tipis Ni₈₀Fe₂₀ Hasil Deposisi *Sputtering* Sebagai Bahan Dasar Sensor Magnet. *Majalah IPTEK*. 15(2). 55-60.
- Buschow K. H. J. dan De Boer F. R. 2004. *Physics of Magnetism and Magnetic Materials*. USA: Kluwer Academic Publishers.
- Callister, W. D. 2001. *Fundamentals of Materials Science and Engineering Fifth Edition*. New York : John Willey and Sons, Inc.
- Chikazumi, S. dan Charap, S.H. 1964. *Physics of Magnetism*. John Wiley & Sons, Inc.
- Coey, J. M. D. 2009. *Magnetism and Magnetic Materials*. New York: Cambridge University Press.
- D. Djuhana, H.-G. Piao, S.-C. Yu, S. K. Oh, dan D.-H. Kim. 2009. Magnetic Domain Wall Collision Around Walker Breakdown in Ferromagnetic Nanowires. *Journal of Applied Physics*. 106(10). 103926.
- Diandra L. Leslie-Pelecky. 1996. Magnetic Properties of Nanostructured Materials. *Chem. Mater*. 8(8). 1770-1783.

- Dita O. 2013. Studi Perilaku Magnetik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ Berbentuk Hexagonal Dengan Menggunakan Simulasi Mikromagnetik. *Skripsi*. Depok: FMIPA Universitas Indonesia.
- Donald R. A., Pradeep P. F., dan Wendelin J. W. 2011. *The Science and Engineering of Materials Sixth Edition*. USA: Cengage Learning.
- Dunlop, D. J. dan Ozdemir, O. 1997. *Rock Magnetism: Fundamental and Frontiers*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Fahru N., Abraha K., dan Bambang S. U. A. 2000. Kajian Pembuatan Sensor Magnetoresistif Berbasis Bahan Lapisan Tipis Permalloy $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2(1). 1-6.
- Fraden, J. 1996. *Third Edition Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*. New York: Springer.
- Frei, E. H., Shtrikman, S., dan Treves, D. 1957. Critical Size and Nucleation Field of Ideal Ferromagnetic Particles. *Phys. Rev.* 106(3). 446.
- Getzlaff, M. 2008. *Fundamentals of Magnetism*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Gilbert, T.L. 2004. "A phenomenological theory of damping in ferromagnetic materials", *IEEE Trans. Magn.* 40, 3443. 5, 7.
- Gopel W., Hesse J., dan Zemel J. N. 1989. *Sensors, comprehensive Survey*. Germany: Zehnersche Buchdruckerei D-6720 Speyer.
- Guimarães, A.P. 2009. *Principle of Nanomagnetism*. Rio de Janeiro: Springer.
- Halliday, D. dan Resnick, R. 1989. *FISIKA*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Hubert A. dan Schäfer R. 2009. *Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructure*. Berlin: Springer.
- Indrawati A. dan Suharyadi E. 2014. Studi Pengaruh Shape terhadap Pergeseran Domain Wall Magnetik pada Lapisan Tipis Permalloy. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2(1). 264-267.

- Jiles, David. 1991. *Introduction to Magnetism and magnetic Material*. New Delhi: Thomson Press Ltd.
- Kartikasari K. 2015. Rancang Bangun Sumber Medan Magnet Dinamik Untuk Identifikasi Anomali Magnetik Lapisan Tanah. *Skripsi*. Bandung: FMIPA Universitas Pendidikan Indonesia.
- Kittel, C. 1996. *Introduction To Solid State Physics Seventh Edition*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Lefter C. dan Dimian M. 2012. Micromagnetic Analysis of Magnetization Behavior in *Permalloy* Nanoparticles for Data Storage Applications. *11th International Conference on DEVELOPMENT AND APPLICATIONS SYSTEMS, Romania*.
- Lilik H. K. R. 2010. Fabrikasi dan Karakterisasi Sifat Mekanik Kaca Magnetik Berbasis Barium Ferit. *Skripsi*. Semarang: FMIPA Universitas Negeri Semarang.
- Mardiansyah D. 2013. Analisa Sifat Ferromagnetik Material Menggunakan Metode Monte Carlo. *Jurnal Ilmiah Education Research* . 2(2). 65-74.
- Mardona. 2012. Dinamika Domain Wall dan Efek Anisotropi Pada Material Ferromagnetik Co dan Ni Berbentuk Nanowire. *Tesis*. Depok: FMIPA Universitas Indonesia.
- Morecroft, D. 2003. *In-Situ Magnetoresistance Measurements During Patterning Of Spin Valve Devices*. A dissertation submitted for the Degree of doctor. Downing College; Cambridge.
- Omar, M.A. 1975. *Elementary Solid State Physics*. New York: Addison-Wesley Publishing Company.
- Putu R. A. 2010. Bahan Isolasi Keramik. *Skripsi*. Denpasar: Fakultas Teknik Universitas Udayana.
- Reitz, J.,R. 1993. *Foundations of Electromagnetic Theory*. New York : Addisonwesley Publishing Company.

- Rohman L., Djuhana D., Soegijono B., dan Nursiyanto W. 2013. Dynamics Micromagnetic Simulation of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) Disk Array Patterned Ferromagnetic. *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS – IJENS*. 13(03). 17-20.
- Smith, W. F. 1993. *Foundations of Materials Science and Engineering*. USA: . Prentice Hall.
- Skomski, R. 2008. *Simple Models of Magnetism*. Oxford: Oxford University Press.
- Spaldin, Nicola A. 2011. *Magnetic Materials Fundamentals and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Stohr, J. dan Siegmann, H.C. 2006. *Magnetism from Fundamental to Nanoscale Dynamics*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Sung, H. W. F. dan Rudowicz, C. 2003. *Physics behind the magnetic hysteresis loop-a survey of misconceptions in magnetism literature*. *J. Magn. Magn, Mater.* 260.
- Widodo, A. T. 2013. Studi Mikromagnetik Dinamika Struktur Domain pada Material Feromagnetik Py, Ni, Fe, dan Co Model Nanosperehe. *Tesis*. Depok: FMIPA Universitas Indonesia.

LAMPIRAN

Lampiran A. Perhitungan Nilai Medan Magnet Luar (H) Dipengaruhi Sudut

1. H pada sumbu X

$$H_X = H \cos \theta$$

2. H pada sumbu Y

$$H_Y = H \sin \theta$$

Ukuran 5 nm

H = 10000 Sumbu X

- a) Pada sudut 0°

$$H_X = H \cos \theta$$

$$H_X = 10000 \cos 0$$

$$H_X = 10000$$

- b) Pada sudut 30°

$$H_X = H \cos \theta$$

$$H_X = 10000 \cos 30$$

$$H_X = 8660,25$$

- c) Pada sudut 45°

$$H_X = H \cos \theta$$

$$H_X = 10000 \cos 45$$

$$H_X = 7071,06$$

- d) Pada sudut 60°

$$H_X = H \cos \theta$$

$$H_X = 10000 \cos 60$$

$$H_X = 5000$$

- e) Pada sudut 90°

$$H_X = H \cos \theta$$

$$H_X = 10000 \cos 90$$

$$H_X = 0$$

Ukuran 5 nm

H = 10000 Sumbu Y

- a) Pada sudut 0°

$$H_Y = H \sin \theta$$

$$H_Y = 10000 \sin 0$$

$$H_Y = 0$$

- b) Pada sudut 30°

$$H_Y = H \sin \theta$$

$$H_Y = 10000 \sin 30$$

$$H_Y = 5000$$

- c) Pada sudut 45°

$$H_Y = H \sin \theta$$

$$H_Y = 10000 \sin 45$$

$$H_Y = 7071,06$$

- d) Pada sudut 60°

$$H_Y = H \sin \theta$$

$$H_Y = 10000 \sin 60$$

$$H_Y = 8660,25$$

- e) Pada sudut 90°

$$H_Y = H \sin \theta$$

$$H_Y = 10000 \sin 90$$

$$H_Y = 10000$$

Ukuran 5 nm

H = 5000 Sumbu X

- a) Pada sudut 0°
 $H_x = H \cos \theta$
 $H_x = 5000 \cos 0$
 $H_x = 5000$
- b) Pada sudut 30°
 $H_x = H \cos \theta$
 $H_x = 5000 \cos 30$
 $H_x = 4330,12$
- c) Pada sudut 45°
 $H_x = H \cos \theta$
 $H_x = 5000 \cos 45$
 $H_x = 3535,53$
- d) Pada sudut 60°
 $H_x = H \cos \theta$
 $H_x = 5000 \cos 60$
 $H_x = 2500$
- e) Pada sudut 90°
 $H_x = H \cos \theta$
 $H_x = 5000 \cos 90$
 $H_x = 0$

Ukuran 5 nm

H = 5000 Sumbu Y

- a) Pada sudut 0°
 $H_y = H \sin \theta$
 $H_y = 5000 \sin 0$
 $H_y = 0$
- b) Pada sudut 30°
 $H_y = H \sin \theta$
 $H_y = 5000 \sin 30$
 $H_y = 2500$
- c) Pada sudut 45°
 $H_y = H \sin \theta$
 $H_y = 5000 \sin 45$
 $H_y = 3535,53$
- d) Pada sudut 60°
 $H_y = H \sin \theta$
 $H_y = 5000 \sin 60$
 $H_y = 4330,12$
- e) Pada sudut 90°
 $H_y = H \sin \theta$
 $H_y = 5000 \sin 90$
 $H_y = 5000$

Ukuran 20 nm

H = 1000 Sumbu X

- a) Pada sudut 0°
 $H_x = H \cos \theta$
 $H_x = 1000 \cos 0$
 $H_x = 1000$
- b) Pada sudut 30°
 $H_x = H \cos \theta$
 $H_x = 1000 \cos 30$
 $H_x = 866,02$
- c) Pada sudut 45°
 $H_x = H \cos \theta$
 $H_x = 1000 \cos 45$
 $H_x = 707,10$
- d) Pada sudut 60°
 $H_x = H \cos \theta$
 $H_x = 1000 \cos 60$
 $H_x = 500$
- e) Pada sudut 90°
 $H_x = H \cos \theta$
 $H_x = 1000 \cos 90$
 $H_x = 0$

Ukuran 20 nm

H = 1000 Sumbu Y

- a) Pada sudut 0°
 $H_y = H \sin \theta$
 $H_y = 1000 \sin 0$
 $H_y = 0$
- b) Pada sudut 30°
 $H_y = H \sin \theta$
 $H_y = 1000 \sin 30$
 $H_y = 500$
- c) Pada sudut 45°
 $H_y = H \sin \theta$
 $H_y = 1000 \sin 45$
 $H_y = 707,10$
- d) Pada sudut 60°
 $H_y = H \sin \theta$
 $H_y = 1000 \sin 60$
 $H_y = 866,02$
- e) Pada sudut 90°
 $H_y = H \sin \theta$
 $H_y = 1000 \sin 90$
 $H_y = 1000$

Ukuran 20 nm

H = 500 Sumbu X

a) Pada sudut 0°

$$H_x = H \cos \theta$$

$$H_x = 500 \cos 0$$

$$H_x = 500$$

b) Pada sudut 30°

$$H_x = H \cos \theta$$

$$H_x = 500 \cos 30$$

$$H_x = 433,01$$

c) Pada sudut 45°

$$H_x = H \cos \theta$$

$$H_x = 500 \cos 45$$

$$H_x = 353,55$$

d) Pada sudut 60°

$$H_x = H \cos \theta$$

$$H_x = 500 \cos 60$$

$$H_x = 250$$

e) Pada sudut 90°

$$H_x = H \cos \theta$$

$$H_x = 500 \cos 90$$

$$H_x = 0$$

Ukuran 20 nm

H = 500 Sumbu Y

a) Pada sudut 0°

$$H_y = H \sin \theta$$

$$H_y = 500 \sin 0$$

$$H_y = 0$$

b) Pada sudut 30°

$$H_y = H \sin \theta$$

$$H_y = 500 \sin 30$$

$$H_y = 250$$

c) Pada sudut 45°

$$H_y = H \sin \theta$$

$$H_y = 500 \sin 45$$

$$H_y = 353,55$$

d) Pada sudut 60°

$$H_y = H \sin \theta$$

$$H_y = 500 \sin 60$$

$$H_y = 433,01$$

e) Pada sudut 90°

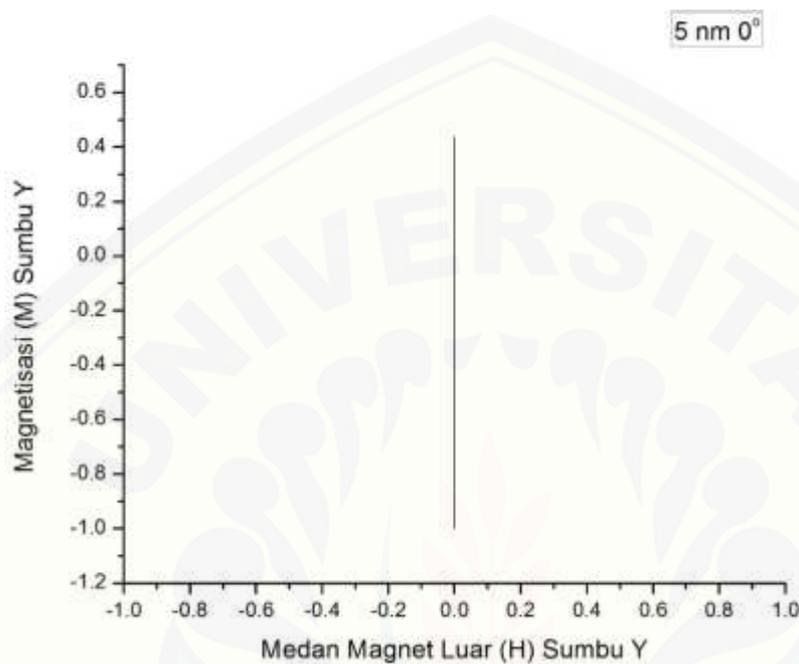
$$H_y = H \sin \theta$$

$$H_y = 500 \sin 90$$

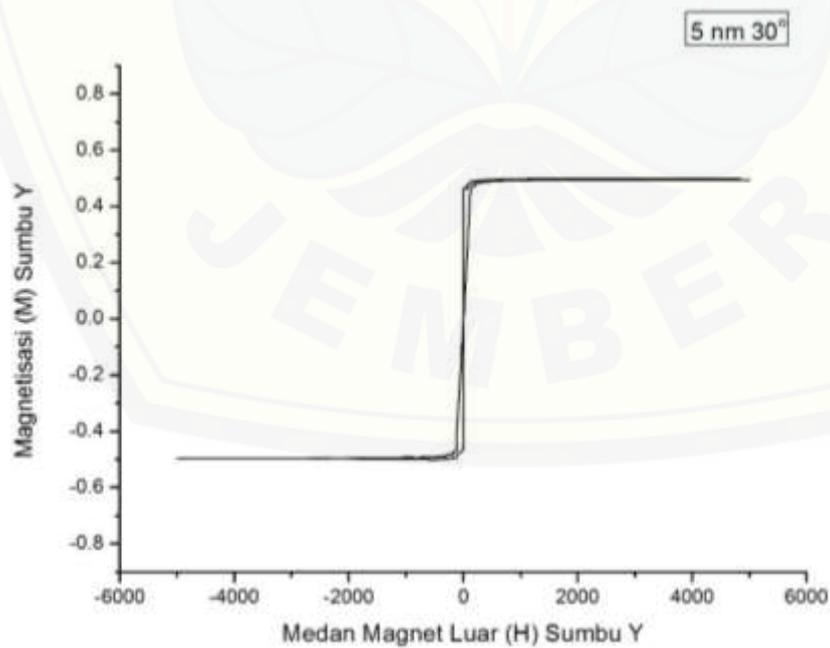
$$H_y = 500$$

Lampiran B. Kurva Histerisis Pada Sumbu Y Ukuran Geometri 5 nm

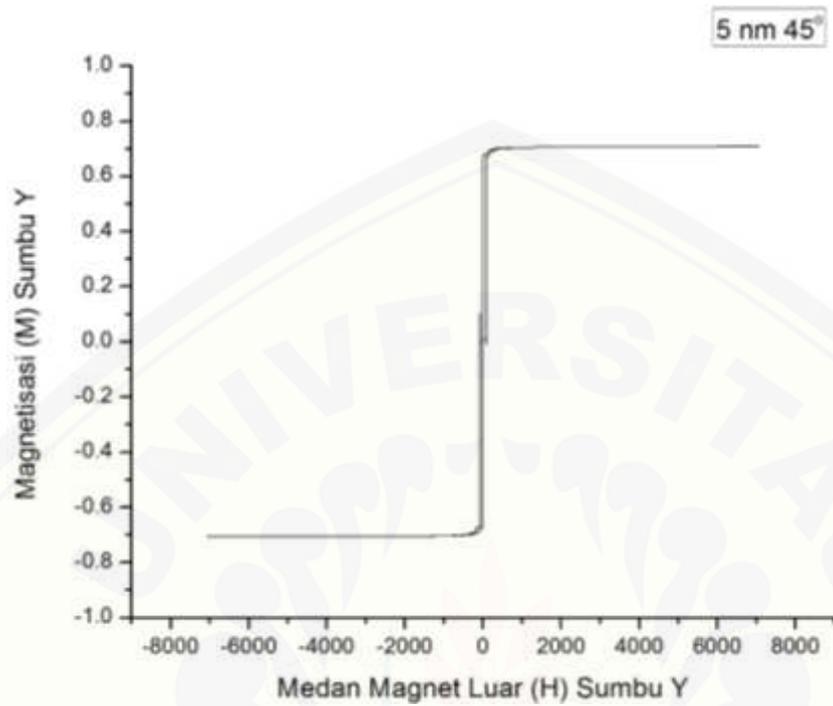
1. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 5 nm dan sudut 0° .



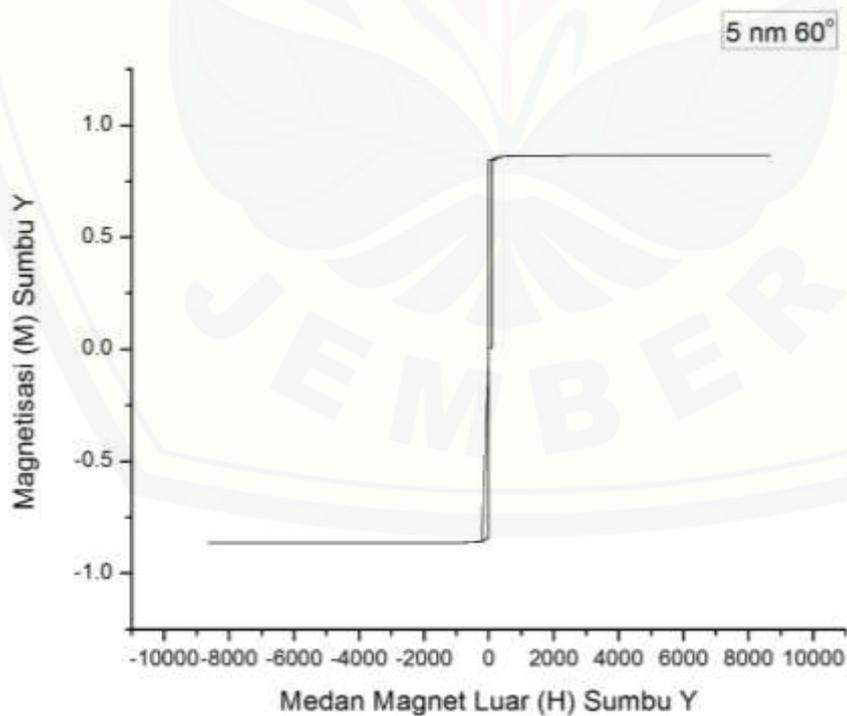
2. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 5 nm dan sudut 30° .



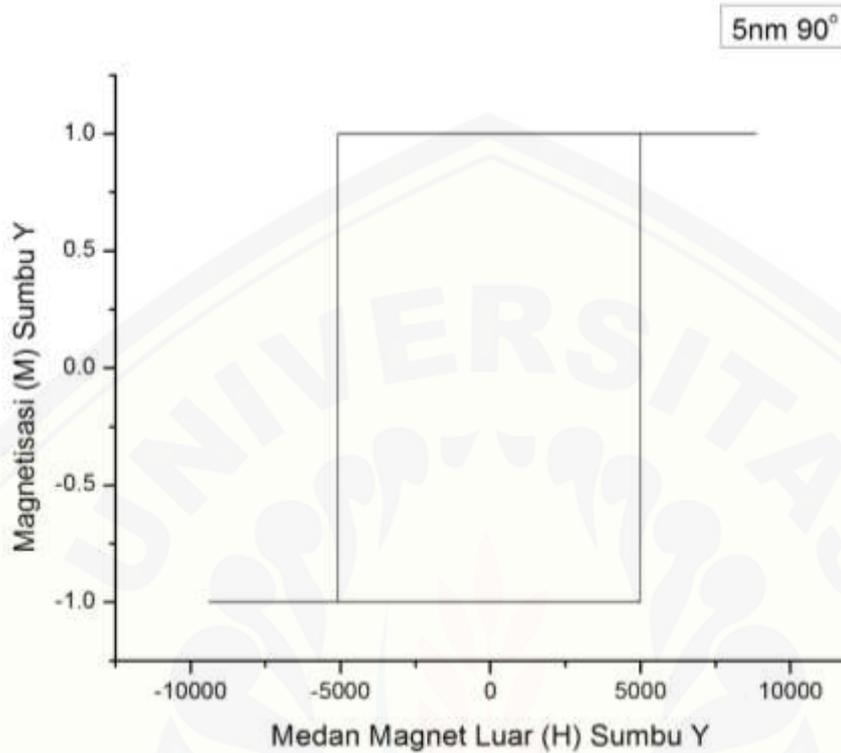
3. Kurva histeresis sumbu y pada ukuran 5 nm dan sudut 45° .



4. Kurva histeresis sumbu y pada ukuran 5 nm dan sudut 60° .



5. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 5 nm dan sudut 90°.

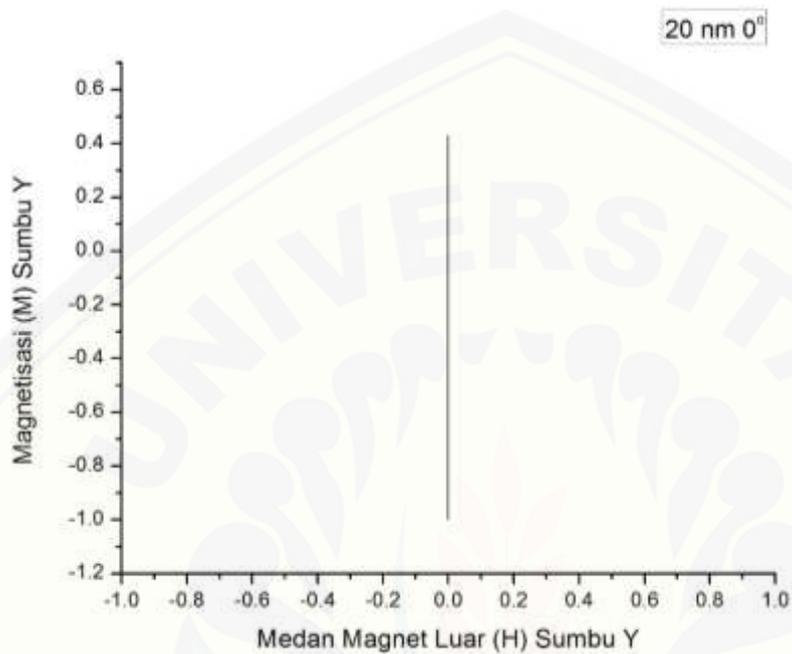


Lampiran C. Tabel Hasil Penelitian 5 nm Pada Sumbu Y

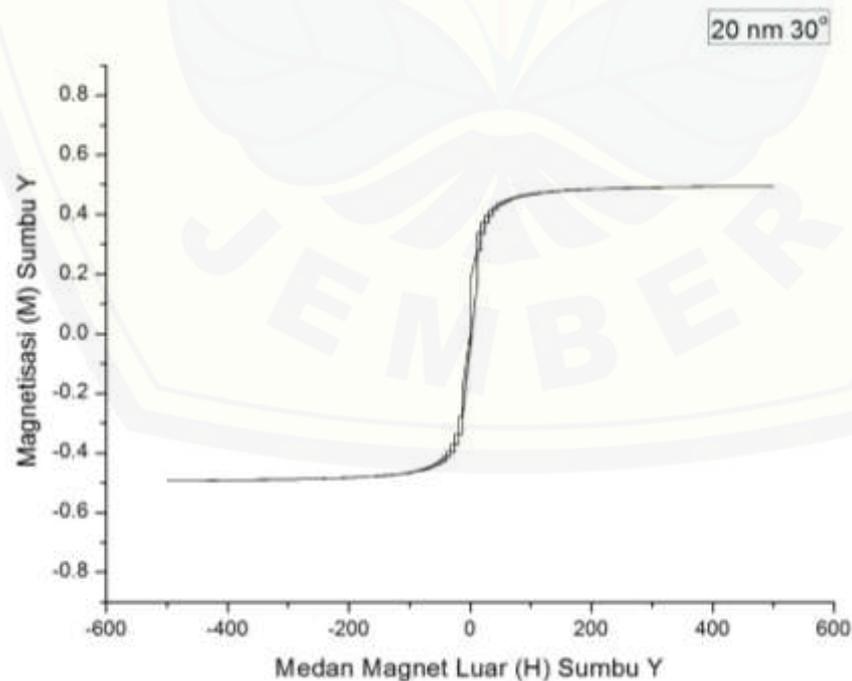
Hasil Simulasi	Ukuran				
	5 nm				
Sudut	0°	30°	45°	60°	90°
Medan Eksternal (H)	0 T	5000 mT	7071 mT	8660 mT	10000 mT
Medan Saturasi (Hs)	0 mT	4833 mT	6717 mT	8227 mT	9400 mT
Medan Koersivitas (Hc)	0 mT	108 mT	88,4 mT	108 mT	5000 mT
Magnetisasi Sumbu Y	0	0,48	0,70	0,86	1

Lampiran D. Kurva Histerisis Pada Sumbu Y Ukuran Geometri 20 nm

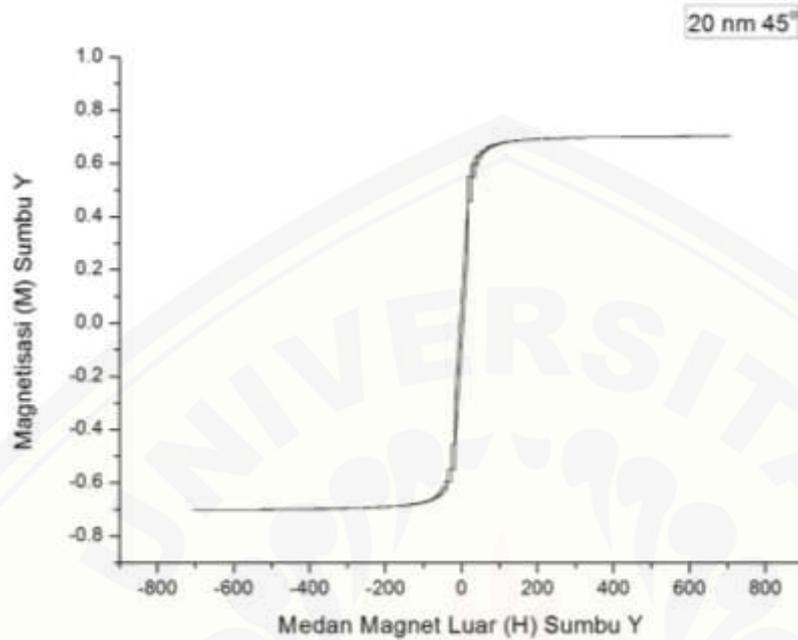
1. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 20 nm dan sudut 0° .



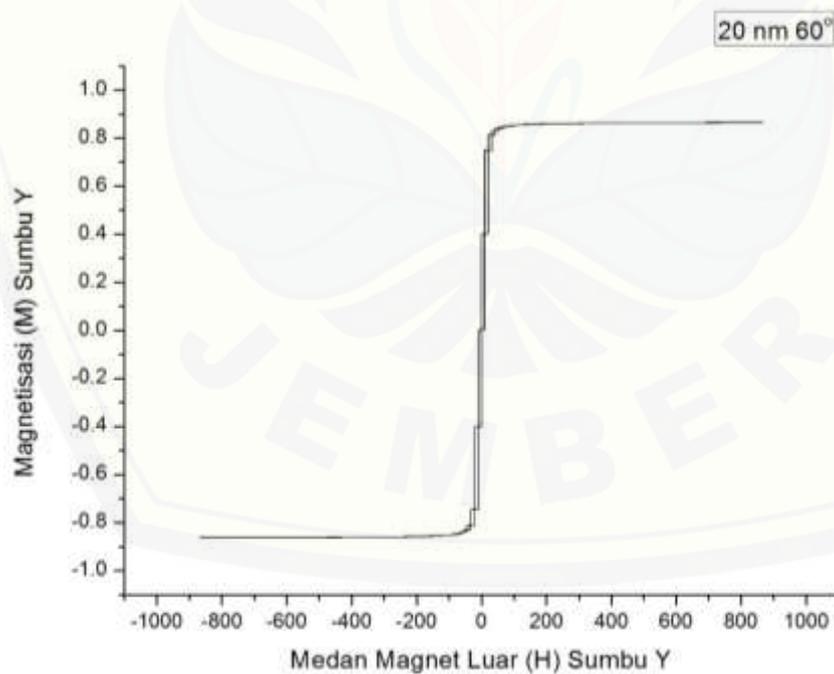
2. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 20 nm dan sudut 30° .



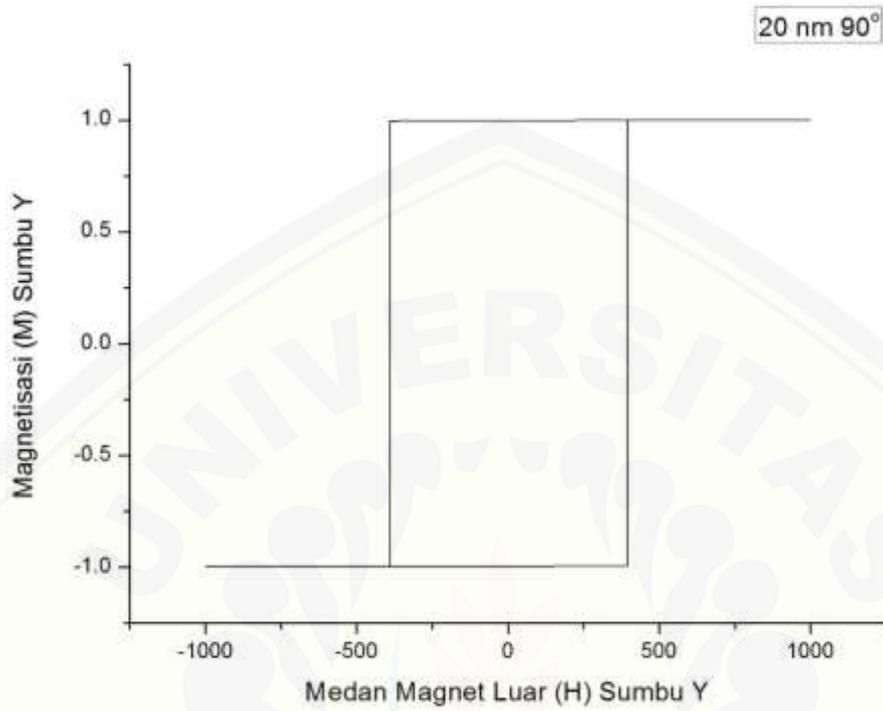
3. Kurva histeresis sumbu y pada ukuran 20 nm dan sudut 45° .



4. Kurva histeresis sumbu y pada ukuran 20 nm dan sudut 60° .



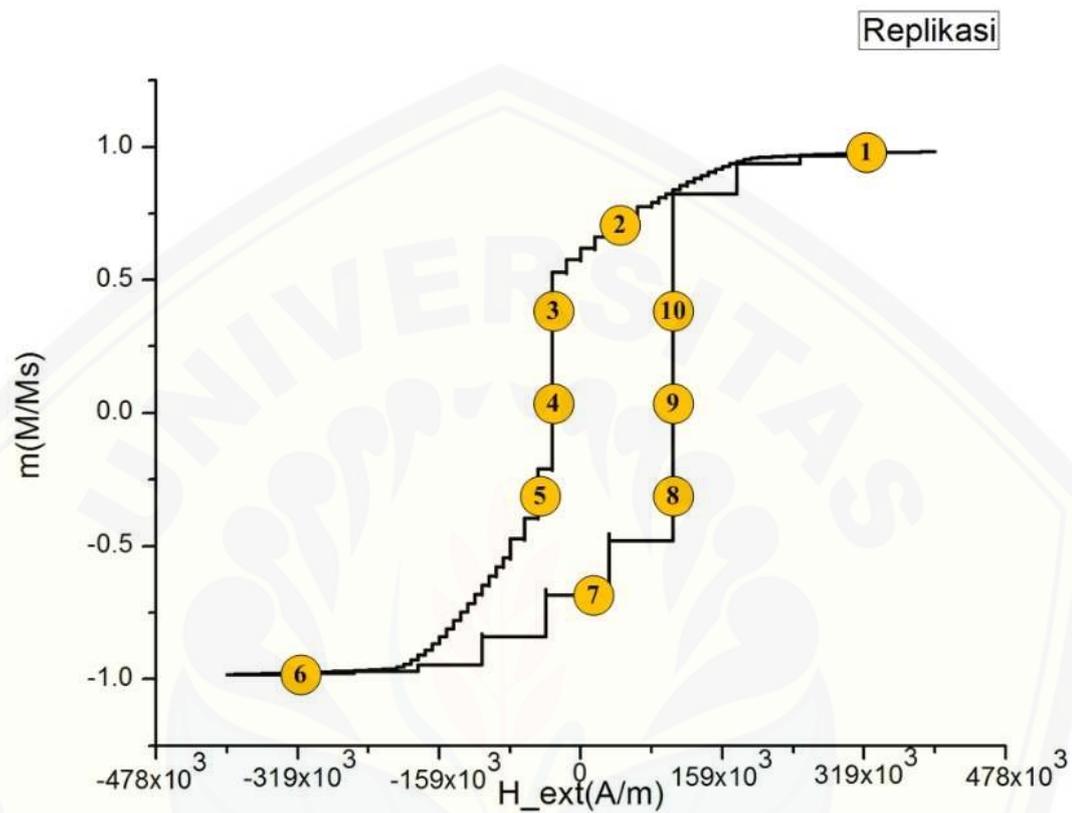
5. Kurva histerisis sumbu y pada ukuran 20 nm dan sudut 90°.



Lampiran E. Tabel Hasil Penelitian 20 nm Pada Sumbu Y

Hasil Simulasi	Ukuran				
	20 nm				
Sudut	0°	30°	45°	60°	90°
Medan Eksternal (H)	0 mT	500 mT	707 mT	866 mT	1000 mT
Medan Saturasi (Hs)	0 mT	483 mT	636 mT	822 mT	996 mT
Medan Koersivitas (Hc)	0 mT	6,15 mT	8,25 mT	10,9 mT	390 mT
Magnetisasi Sumbu Y	0	0,49	0,70	0,86	1

Lampiran F. Kurva Histerisis Replikasi



Lampiran G. Spin Domain Magnetik

