



**STUDI RESONANSI FEROMAGNETIK BAHAN  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$   
(LSMO) BERBAGAI BENTUK PILAR MENGGUNAKAN  
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

**SKRIPSI**

Oleh

**MOH. IMRON**

**NIM 151810201065**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2019**



**STUDI RESONANSI FEROMAGNETIK BAHAN  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$   
(LSMO) BERBAGAI BENTUK PILAR MENGGUNAKAN  
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

**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

**MOH. IMRON**

**NIM 151810201065**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2019**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Ibu Hj. Fatimah (Almh) dan Bapak H. Faisol yang tercinta;
2. Nenek Hj. Aminatus Suhriyah, Kakek H. Nur Fahri (Alm), Paman Syamsul Arifin dan kakak Ach. Taufik Hidayatullah yang tercinta;
3. Guru-guru sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi yang telah membimbing dan memberikan ilmunya kepada saya selama ini;
4. Almater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

**MOTTO**

“Life is only once and always have to remember the purpose of life”



**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : MOH. IMRON

NIM : 151810201065

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Studi Resonansi Feromagnetik Bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) Berbagai Bentuk Pilar Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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

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

Jember, 30 September 2019

Yang menyatakan,

MOH. IMRON

NIM 151810201065

**SKRIPSI**

**STUDI RESONANSI FEROMAGNETIK BAHAN  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$   
(LSMO) BERBAGAI BENTUK PILAR MENGGUNAKAN  
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

Oleh

MOH. IMRON  
NIM 151810201065

Pembimbing

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

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Studi Resonansi Feromagnetik Bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) Berbagai Bentuk Pilar Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” karya MOH. IMRON 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.

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

NIP. 197208201998021001

NIP. 196712151998021001

Anggota II,

Anggota III,

Supriyadi, S.Si., M.Si.

Drs. Sujito, Ph.D.

NIP. 198204242006041003

NIP. 196102041987111001

Mengesahkan

Dekan,

Drs. Sujito, Ph.D.

NIP. 196102041987111001

## RINGKASAN

**Studi Resonansi Feromagnetik Bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) Berbagai Bentuk Pilar Menggunakan Simulasi Mikromagnetik;** MOH. IMRON, 151810201065; 2019: 45 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Resonansi feromagnetik (FMR) adalah teknik yang digunakan untuk meneliti dinamika magnetisasi dari struktur magnetik. Kinerja dari divais berbasis magnetik dipengaruhi oleh pembalikan magnetisasi (*switching field*) dan resonansi feromagnetik (FMR) yang dapat meningkatkan kecepatan pembacaan serta penulisan data pada divais. Proses pembacaan dan penulisan data pada divais dapat diaplikasikan pada media penyimpanan atau *storage device* berupa MRAM. MRAM (*Magnetoresistive Random Acces Memory*) adalah sebuah *non-volatile* memori dengan menggunakan muatan magnet untuk menyimpan data. Bahan magnetik yang digunakan sebagai bahan kajian dalam proses pembacaan dan penulisan pada divais adalah bahan paduan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO). Bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (*Lanthanum Strontium Manganese Oxide*) adalah bahan yang memiliki energi bandwith (W) besar dan lebar karena pengaruh doping ion  $\text{Sr}^{2+}$  dengan jari-jari atom yang besar serta memiliki fase feromagnetik yang stabil. Tujuan pada penelitian ini adalah untuk mengetahui sifat magnetik bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) dan pengaruh variasi ketebalan serta variasi diameter pada berbagai bentuk pilar (*nano hexagonal*, *nano cylinder*, *nano square*) yang diaplikasikan dalam media penyimpanan atau *storage device* berupa MRAM.

Kegiatan penelitian ini diawali dengan melakukan studi pustaka dengan mengumpulkan dan mencari berbagai pustaka atau referensi seperti buku, jurnal ilmiah, skripsi, tesis, dan disertasi yang digunakan untuk menunjang serta mendukung penelitian ini. Tahap selanjutnya adalah melakukan instalasi program NMAG, Mayavi, dan Origin Pro pada komputer dan mempersiapkan *file input* seperti parameter-parameter bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) (.py) dan ukuran bentuk geometri bahan (.geo). Simulasi ini menggunakan variasi ketebalan dari 24 nm sampai 180 nm dan diameter tetap 12 nm untuk menentukan sifat bahan magnetik dan resonansi feromagnetik. Variasi diameter yang digunakan yaitu diameter 12 nm, 24 nm, 48 nm, dan 96 nm dan ketebalan tetap yaitu 12 nm. Data *output* yang dihasilkan berupa nilai medan koersivitas untuk menentukan sifat bahan magnetik yang dilihat dari kurva histerisis dan grafik nilai resonansi feromagnetik terhadap variasi ketebalan serta diameter dengan arah medannya tegak lurus pada setiap bentuk pilarnya.

Hasil penelitian yang diperoleh menunjukkan bahwa sifat feromagnetik bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) pada berbagai bentuk pilar dapat dilihat berdasarkan kurva histerisisnya. Kurva histerisis dapat memberikan informasi mengenai besarnya medan koersivitas pada saat Magnetisasi ( $M_s$ ) sama dengan nol. Medan koersivitas ( $H_c$ ) memiliki fenomena yaitu nilai medan koersivitas ( $H_c$ ) berbanding terbalik dengan ketebalan yang diberikan pada berbagai bentuk pilar. Ketebalan yang diberikan semakin besar maka akan menghasilkan nilai

medan koersivitas ( $H_c$ ) yang semakin kecil dan semakin besar medan koersivitas ( $H_c$ ) yang diperoleh, maka energi magnetik yang dihasilkan semakin besar. Hasil simulasi didapatkan medan koersivitas sebesar  $H_c < 1 \text{ kA/m}$ , sehingga bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) merupakan bahan feromagnetik yang bersifat *soft magnet*.

Hasil simulasi yang diperoleh menunjukkan bahwa variasi ketebalan yang diberikan dapat berpengaruh terhadap besar frekuensi resonansi feromagnetik bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) yang dihasilkan. Variasi ketebalan yang diberikan antara 24 nm sampai 180 nm dan diameter tetap 12 nm pada setiap bentuk pilarnya diperoleh nilai frekuensi resonansi yang semakin besar atau seiring dengan meningkatnya ketebalan yang diberikan dan domain spin yang dihasilkan terlihat jelas dan teratur. Sedangkan, besarnya nilai frekuensi resonansi yang diperoleh pada variasi diameter antara 12 nm, 24 nm, 48 nm, dan 96 nm dengan ketebalan tetap 12 nm yaitu semakin besar variasi diameter yang diberikan pada berbagai bentuk pilar bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO), maka menghasilkan frekuensi resonansi yang semakin menurun dan posisi spin terlihat tidak teratur dengan bertambahnya diameter. Frekuensi resonansi memiliki fenomena yaitu memiliki besar yang sebanding dengan ketebalan dan berbanding terbalik dengan diameter yang diberikan, karena semakin besar diameter yang diberikan maka menghasilkan frekuensi resonansi yang semakin kecil.

## PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT. karena atas berkat, rahmat, serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi Resonansi Feromagnetik Bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) Berbagai Bentuk Pilar Menggunakan Simulasi Mikromagnetik”. Sholawat dan salam semoga senantiasa selalu menuntun dan mengiringi langkah serta aktivitas kita dalam melangkah menggapai ridho-Nya. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S-1) Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis ingin mengucapkan beribu-ribu terimakasih kepada pihak-pihak yang telah membantu, mendampingi, dan mengarahkan penulis dalam menyusun skripsi ini. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Lutfi Rohman, S.Si, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Dr. Edy Supriyanto, S.Si, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, tenaga, dan perhatian dalam membantu penulisan skripsi ini;
2. Supriyadi, S.Si, M.Si., selaku Dosen Penguji I dan Drs. Sujito, Ph.D., selaku Dosen Penguji Anggota yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Wenny Maulina, S.Si, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa;
4. Segenap Dosen dan Karyawan Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam yang selalu membantu dan mendukung;
5. Orang tuaku Bapak H. Faisol dan Ibu Hj. Fatimah tercinta yang telah memberikan semangat, doa, kasih sayang dan dukungan selama ini;
6. Nenekku Hj. Aminatus Suhriyah, Kakek H. Nur Fahri (Alm), Paman Syamsul Arifin dan kakak Ach. Taufik Hidayatullah yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama ini;

7. Teman-teman komputasi magnetik (Arum, Edy, Ifa, Intan, Irma, Suci) Ganesha Phi'15, KKN TIK 114 dan Kost Buhadi 62 yang telah memberikan dukungan dan semangat;
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis sadar bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan dipergunakan sebagaimana mestinya.

Jember, 30 September 2019

MOH. IMRON

NIM 151810201065

DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	ii
<b>MOTTO</b> .....	iii
<b>PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>HALAMAN PEMBIMBING</b> .....	v
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>RINGKASAN</b> .....	vii
<b>PRAKATA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xviii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b>	
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	4
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	4
<b>1.4 Tujuan</b> .....	5
<b>1.5 Manfaat</b> .....	5
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
<b>2.1 Struktur Kristal</b> .....	6
2.1.1 <i>Body Centered Cubic</i> (BCC) .....	6
2.1.2 <i>Face Centered Cubic</i> (FCC) .....	6
2.1.3 <i>Hexagonal Close Packed</i> (HCP) .....	7
<b>2.2 Bahan Magnetik</b> .....	7
2.2.1 Diamagnetik .....	8
2.2.2 Paramagnetik .....	8
2.2.3 Feromagnetik .....	8

<b>2.3 Material Perovskite</b> .....	10
2.3.1 Bahan Magnetik Berbasis Manganit .....	10
2.3.2 Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ ( <i>Lanthanum Strontium Manganese Oxide</i> ) .....	11
<b>2.4 Mekanisme Pembalikan Magnetisasi</b> .....	12
<b>2.5 Struktur Domain pada Nanopartikel</b> .....	13
2.5.1 <i>Single Domain</i> .....	13
2.5.2 <i>Two Domain dan Vortex-state</i> .....	13
<b>2.6 Resonansi Feromagnetik</b> .....	14
<b>2.7 Kurva Histerisis</b> .....	17
<b>2.8 Simulasi Mikromagnetik</b> .....	19
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN</b>	
<b>3.1 Rancangan Penelitian</b> .....	21
<b>3.2 Jenis dan Sumber Data Penelitian</b> .....	22
<b>3.3 Definisi Operasional Variabel</b> .....	23
3.3.1 Variabel Bebas .....	23
3.3.2 Variabel Terikat .....	23
3.3.3 Variabel Kontrol .....	23
<b>3.4 Metode Analisis Data</b> .....	23
3.4.1 Analisis Data Simulasi digunakan untuk Menentukan Kurva Histerisis Hubungan antara Magnetisasi terhadap Medan Magnet Eksternal pada Berbagai Bentuk Pilar Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) .....	23
3.4.2 Analisis Data Simulasi digunakan untuk Menentukan Grafik Hubungan antara Frekuensi Resonansi (FMR) terhadap Variasi Ketebalan pada Berbagai Bentuk Pilar Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) .....	24
3.4.3 Analisis Data Simulasi digunakan untuk Menentukan Grafik Hubungan antara Frekuensi Resonansi (FMR) terhadap Diameter pada Berbagai Bentuk Pilar Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) .....	25

<b>3.5 Prosedur Penelitian</b> .....	26
3.5.1 Simulasi untuk Mendapatkan Kurva Histerisis Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) pada Berbagai Bentuk Pilar terhadap Variasi Ketebalan .....	26
3.5.2 Simulasi untuk Mendapatkan Kurva Frekuensi Resonansi Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) pada Berbagai Bentuk Pilar dengan Menggunakan Amplitudo Sebesar 1000 A/m.....	26
3.5.3 Desain Geometri Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) pada Berbagai Bentuk Pilar (nano <i>hexagonal</i> , nano <i>cylinder</i> , dan nano <i>square</i> ) .....	28
<b>3.6 Kerangka Pemecahan Masalah</b> .....	29
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
<b>4.1 Kurva Histerisis</b> .....	30
<b>4.2 Resonansi Feromagnetik (FMR)</b> .....	36
<b>BAB 5. PENUTUP</b>	
<b>5.1 Kesimpulan</b> .....	40
<b>5.2 Saran</b> .....	41
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	42
<b>LAMPIRAN</b> .....	46

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Struktur kristal BCC ( <i>Body Centered Cubic</i> ) .....	6
2.2 Struktur kristal FCC ( <i>Face Centered Cubic</i> ) .....	7
2.3 Kristal HCP ( <i>Hexagonal Close Packed</i> ) .....	7
2.4 Momen magnet saat orientasi 0° sampai 180° .....	9
2.5 Struktur domain pada bahan feromagnetik (a) tanpa diberi medan magnet luar (b) diberi medan magnet luar .....	9
2.6 Struktur <i>perovskite</i> dengan formula $ABO_3$ , dimana A yaitu kation berukuran besar, B yaitu kation berukuran kecil, dan O yaitu sebagai pembentuk oktahedral .....	12
2.7 Mekanisme pembalikan magnetisasi pada partikel magnetik yang berbentuk bola (a) rotasi koheren ( <i>coherent rotation</i> ) (b) curling .....	12
2.8 Tiga keadaan konfigurasi domain magneti saat energi minimum ( <i>groundstate</i> ) pada partikel magnetik bola ( <i>spherical magnetic particle</i> ) (a) <i>single-domain</i> , (b) <i>two-domain</i> , dan (c) <i>vortex-state</i> .....	14
2.9 (a) Prinsip pengukuran alat FMR dengan meletakkan sampel di dalam <i>microwave resonans cavity</i> pada medan magnet tertentu dan diaplikasikan pada gelombang mikro atau radio dalam arah tegak lurus dengan medan magnet (b) Kurva hasil pengukuran dengan alat FMR .....	16
2.10 Kurva histerisis material feromagnetik (a) <b>M</b> terhadap <b>H</b> : $M_r$ adalah magnetisasi remanen; $H_{ci}$ adalah koersivitas intrinsik; $M_s$ adalah magnetisasi saturasi; (b) <b>B</b> terhadap <b>H</b> : $B_r$ adalah remanen; $H_c$ adalah koersivitas .....	18
2.11 Kurva perbandingan nilai medan koersivitas terhadap diameter partikel .....	19
2.12 Program komputasi mikromagnetik NMAG .....	20
3.1 Diagram alir rancangan penelitian .....	22

3.2	Kurva histerisis hubungan antara magnetisasi terhadap medan magnet eksternal .....	24
3.3	Grafik hubungan antara frekuensi resonansi (FMR) dengan berbagai ketebalan pada diameter <i>hexagonal</i> 12 nm berdasarkan simulasi dan perhitungan Kittel .....	25
3.4	Grafik hubungan antara frekuensi resonansi (FMR) dengan diameter <i>hexagonal</i> bahan BaM pada ketebalan 12 nm .....	25
3.5	Desain geometri berbentuk nano <i>hexagonal</i> bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) dengan variasi diameter 12 nm dan ketebalan 12 nm .....	28
3.6	Desain geometri berbentuk nano <i>cylinder</i> bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) dengan variasi diameter 12 nm dan ketebalan 12 nm .....	28
3.7	Desain geometri berbentuk nano <i>square</i> bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) dengan variasi diameter 12 nm dan ketebalan 12 nm .....	28
3.8	Diagram <i>fishbone</i> prosedur penelitian .....	29
4.1	Kurva histerisis dan proses pembalikan magnetisasi bentuk <i>hexagonal</i> pada diameter 12 nm serta ketebalan 24 nm bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) dengan medan tegak lurus terhadap <i>hexagonal</i> .....	31
4.2	Kurva histerisis dan proses pembalikan magnetisasi bentuk <i>cylinder</i> pada diameter 12 nm serta ketebalan 24 nm bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) dengan medan tegak lurus terhadap <i>cylinder</i> .....	32
4.3	Kurva histerisis dan proses pembalikan magnetisasi bentuk <i>square</i> pada diameter 12 nm serta ketebalan 24 nm bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) dengan medan tegak lurus terhadap <i>square</i> .....	33
4.4	Grafik hubungan antara ketebalan (nm) terhadap medan koersivitas ( $A/m$ ) pada berbagai bentuk pilar .....	36
4.5	Grafik hubungan antara frekuensi resonansi feromagnetik (FMR) dengan berbagai ketebalan dan diameter tetap 12 nm pada berbagai bentuk pilar berdasarkan simulasi dan perhitungan Kittel .....	38

4.6 Grafik hubungan antara frekuensi resonansi feromagnetik (FMR) terhadap variasi diameter pada berbagai bentuk pilar dengan ketebalan tetap 12 nm ..... 39



**DAFTAR TABEL**

	Halaman
3.1 Parameter bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) .....	22
3.2 Data geometri untuk mendapatkan kurva histerisis dengan variasi ketebalan pada berbagai bentuk pilar (nano <i>hexagonal</i> , nano <i>silinder</i> , dan nano <i>square</i> ) .....	26
3.3 Data geometri untuk mendapatkan kurva frekuensi resonansi dengan variasi ketebalan pada berbagai bentuk pilar (nano <i>hexagonal</i> , nano <i>silinder</i> , dan nano <i>square</i> ) .....	27
3.4 Data geometri untuk mendapatkan kurva frekuensi resonansi dengan variasi diameter berbagai bentuk pilar (nano <i>hexagonal</i> , nano <i>silinder</i> , dan nano <i>square</i> ) .....	27
4.1 Besar medan koersivitas terhadap variasi ketebalan dan diameter tetap 12 nm dengan arah medan tegak lurus pada berbagai bentuk pilarnya .....	35
4.2 Besar frekuensi resonansi feromagnetik (FMR) terhadap variasi ketebalan pada berbagai bentuk pilar dengan diameter tetap 12 nm ..	37
4.3 Besar frekuensi resonansi feromagnetik (FMR) terhadap variasi diameter pada berbagai bentuk pilar dengan ketebalan tetap 12 nm ..	38

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Perhitungan Frekuensi Resonansi Feromagnetik (FMR) Menggunakan Persamaan Kittel .....	46
B. Visualisasi Struktur Domain Kurva Histerisis Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) pada Bentuk <i>Hexagonal</i> Berdasarkan Variasi Ketebalan .....	49
C. Visualisasi Struktur Domain Kurva Histerisis Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) pada Bentuk <i>Cylinder</i> Berdasarkan Variasi Ketebalan .....	59
D. Visualisasi Struktur Domain Kurva Histerisis Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) pada Bentuk <i>Square</i> Berdasarkan Variasi Ketebalan .....	69

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada setiap tahunnya, teknologi telah mengalami suatu perkembangan atau peningkatan yang sangat besar. Pengembangan teknologi tersebut yaitu dengan memanfaatkan bahan feromagnetik dalam skala nano sebagai bahan dasarnya. Feromagnet adalah suatu jenis bahan ketika diberikan medan magnet luar akan termagnetisasi dan tetap termagnetisasi dalam beberapa waktu yang lama setelah bahan tersebut tidak diberikan medan magnet luar kembali (Blundell, 2001). Bahan feromagnetik merupakan suatu bahan yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik besar dan memiliki nilai yang positif (Mardiansyah, 2013). Bahan feromagnetik mempunyai magnetisasi spontan yang bergantung terhadap temperatur. Bahan feromagnetik memiliki magnetisasi spontan di bawah temperatur Curie, dimana saat bahan feromagnetik yang dipanaskan di atas temperatur Curie maka magnetisasi spontan akan hilang dan menjadi bahan paramagnetik (Norita, 2008).

Perovskite merupakan suatu oksida logam yang memiliki rumus umum  $ABO_3$  dengan A merupakan ion-ion logam (logam tanah jarang dari deret lantanida dan aktanida) yang memiliki ukuran besar dan B merupakan ion-ion logam transisi (Zeng *et al.*, 2007). Perovskit merupakan material yang berpotensi dapat meningkatkan hasil konversi dengan struktur oksida logam  $ABO_3$ , dimana struktur oksida logam tersebut secara konsisten direkombinasikan sebagai katalis untuk *deep oxidation* hidrokarbon (Pecchi, 2008). Oksida-oksida perovskit ( $ABO_3$ ) sudah lama dikenal sebagai bahan yang dapat mentransfer ion-ion oksigen sebagai penyusun strukturnya (oksigen kisi) tanpa mengalami perubahan strukturnya sendiri.

Material berstruktur perovskite memiliki sifat yang unik dan baik secara teoritis maupun eksperimental. Sifat yang terkandung di dalam perovskite meliputi: *colossal magnetoresistance*, *ferroelectricity*, *superconductivity*, *charge ordering*, *spin dependent transport*, dan sebagainya. Bahan magnetik CMR (*Colossal Magnetoresistance*) yaitu bahan berbasis manganit khususnya oksida

mangan yang memiliki rumus umum  $A(\text{MnO}_3)$  dengan A yaitu unsur bervalensi tiga yang biasanya berupa unsur tanah jarang (misal: La, Nd, Pr, dan Sm). Penambahan *doping* dengan unsur yang bervalensi dua seperti alkali tanah (misal: Sr, Ca, Ba, dan Pb), maka akan mengubah rumus umumnya menjadi  $(\text{A}_{1-x}\text{B}_x)(\text{MnO}_3)$ . Rumus umum tersebut dikenal dengan bahan magnetik oksida mangan seperti:  $\text{LaMnO}_3$ ,  $\text{PrMnO}_3$ , atau  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ,  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$  (Rohman, 2013).

Bahan  $\text{LaMnO}_3$  adalah bahan manganit kompleks yang terbentuk dari unsur logam dan unsur transisi seperti lanthanium yang dikombinasikan dengan bahan manganit lain dan juga oksigen (Chatterji *et al.*, 2000). Bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  merupakan bahan yang terbentuk dari bahan  $\text{LaMnO}_3$  dengan penambahan dopan ion Sr (divalen) yang dapat mengubah sifat *transport* listrik bahan  $\text{LaMnO}_3$ . Bahan  $\text{LaMnO}_3$  yang didopan ion  $\text{Sr}^{2+}$  (divalen) akan memiliki fase feromagnetik yang stabil, sehingga memiliki peranan penting dalam bidang teknologi dan diikuti oleh ion transisi  $\text{Mn}^{3+}$  menjadi ion  $\text{Mn}^{4+}$ . Pada ion Mn yang bervalensi empat terdapat satu elektron yang hilang. Elektron yang hilang akan menimbulkan lubang (*hole*) dan memungkinkan terjadinya lompatan elektron, sehingga bahan tersebut bersifat logam (Gor'kov dan Kresin, 2004).

Resonansi feromagnetik (FMR) adalah teknik yang digunakan untuk meneliti dinamika magnetisasi dari struktur magnetik. Kinerja dari divais berbasis magnetik dipengaruhi oleh pembalikan magnetisasi (*switching field*) dan resonansi feromagnetik (FMR) yang dapat meningkatkan kecepatan pembacaan serta penulisan data pada divais (Liu, 2007). Resonansi spin pada frekuensi gelombang mikro di feromagnet pada prinsipnya mirip dengan resonansi spin nuklear. Resonansi feromagnetik dapat terjadi karena adanya bahan magnetik yang berosilasi saat diberikan medan magnet dan dapat berosilasi secara periodik (Ismail, 2013). Frekuensi rosonansi bahan feromagnetik diukur dengan menggunakan alat yaitu feromagnetik resonansi (FMR) dan dilakukan dengan meletakkan sampel dalam sebuah *microwave resonant cavity* serta sampel tersebut berbentuk lapisan tipis. Sampel tersebut diberi medan magnet yang berasal dari kumparan elektromagnet dan proses ini akan menyebabkan momen magnet atau spin yang bergerak *precision*. Sampel tersebut juga diberi medan

elektromagnetik berupa gelombang mikro atau radio yang tegak lurus terhadap medan magnet. Hasil antara frekuensi yang bergerak *precision* pada spin jika sama dengan frekuensi dari gelombang mikro yang berasal dari *cavity*, maka akan terjadi suatu resonansi yang ditandai dengan meningkatnya absorpsi gelombang mikro (Wicaksono, 2016).

Pada penelitian ini telah dianalisa adanya pengaruh variasi ketebalan dan variasi diameter pada berbagai bentuk pilar terhadap studi resonansi feromagnetik dengan metode *running* simulasi mikromagnetik. Penelitian studi resonansi feromagnetik ini pernah dilakukan oleh Wicaksono (2016) dengan menggunakan bahan Barium Hexaferit ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) berbentuk hexagonal pada variasi ketebalan dan variasi diagonal. Penelitian tersebut dilakukan untuk mengkaji sifat-sifat magnetik bahan BaM dengan menggunakan simulasi mikromagnetik agar dapat menunjukkan bahwa variasi ketebalan dan diagonal *hexagonal* mampu menghasilkan perubahan nilai frekuensi FMR serta perubahan posisi spin. Variasi ketebalan dan diagonal *hexagonal* memiliki pengaruh yang sangat besar. Semakin besar ketebalan yang diberikan, maka frekuensi FMR semakin besar dan posisi spin menjadi teratur. Sedangkan, semakin besar diagonal *hexagonal* yang diberikan, maka frekuensi FMR semakin kecil dan posisi spin menjadi tidak teratur. Bahan yang digunakan dalam penelitian Wicaksono (2016) yaitu bahan Barium Hexaferit ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) yang dikenal dengan bahan golongan Ferrite tipe-M (BaM) dan merupakan oksida keramik yang banyak dimanfaatkan secara komersial.

Bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (*Lanthanum Strontium Manganese Oxide*) telah banyak diteliti dalam beberapa tahun terakhir ini. Bahan tersebut pernah digunakan oleh Rohman (2013) untuk investigasi sifat-sifat magnetik dan untuk aplikasi *storage device* dengan menggunakan modeling mikromagnetik, serta telah dilakukan studi fenomena STT (Spin Transfer Torque) berbentuk *nanowire* menggunakan simulasi mikromagnetik Musyarofah (2016). Berdasarkan hal tersebut, maka pada penelitian ini akan digunakan bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (*Lanthanum Strontium Manganese Oxide*) yang merupakan bahan magnetik CMR (*Colossal Magnetoresistance*) berbasis manganit. Struktur Kristal yang

diamati yaitu pada berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*).

Bahan berbasis feromagnetik sudah banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang teknologi sebagai media penyimpanan atau *storage device*, seperti MRAM. MRAM (*Magnetoresistive Random Acces Memory*) adalah sebuah *non-volatile* memori yang menggunakan muatan magnet untuk menyimpan data. Data pada MRAM tidak disimpan sebagai muatan listrik, tetapi disimpan oleh elemen penyimpan yang bersifat magnetik. Elemen penyimpan tersebut terbentuk dari dua bahan feromagnetik yang dipisahkan oleh lapisan isolator (Musyarofah, 2016). Media penyimpanan atau *storage device* dapat dimodelkan menggunakan simulasi mikromagnetik dan menggunakan input data dasar dari sifat magnetik. Data dasar dari sifat magnetik yang diinputkan pada simulasi mikromagnetik yaitu magnetisasi saturasi, koefisien anisotropi, *exchange coupling*, dan parameter *damping*. Hasil permodelan dari simulasi mikromagnetik yaitu berupa kurva histerisis dan medan koersivitas (Rohman, 2013). Simulasi mikromagnetik permodelan 3D ini dilakukan dengan menggunakan software mikromagnetik berbasis NMAG.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana perbandingan sifat feromagnetik bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) pada berbagai bentuk pilar berdasarkan kurva histerisisnya?
2. Bagaimana pengaruh variasi ketebalan dan diameter pada berbagai bentuk pilar terhadap frekuensi resonansi bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) yang dilakukan secara simulasi?

## 1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini difokuskan pada pemahaman mengenai studi resonansi feromagnetik bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) dengan berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*) yang diaplikasikan dalam media

penyimpanan atau *storage device* berupa MRAM melalui simulasi mikromagnetik permodelan 3D dengan menggunakan software mikromagnetik berbasis NMAG.

#### 1.4 Tujuan

Tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui perbandingan sifat feromagnetik bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) pada berbagai bentuk pilar berdasarkan kurva histerisisnya.
2. Mengetahui pengaruh variasi ketebalan dan diameter pada berbagai bentuk pilar terhadap frekuensi resonansi bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) yang dilakukan secara simulasi.

#### 1.5 Manfaat

Manfaat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan pengetahuan mengenai studi resonansi feromagnetik bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) pada berbagai bentuk pilar dengan menggunakan simulasi mikromagnetik.
2. Memberikan informasi mengenai sifat magnetik bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) dan sifat resonansi feromagnetik pada berbagai bentuk pilar.
3. Memberikan sumbangan penelitian dalam bidang fisika khususnya dalam fisika komputasi mikromagnetik.

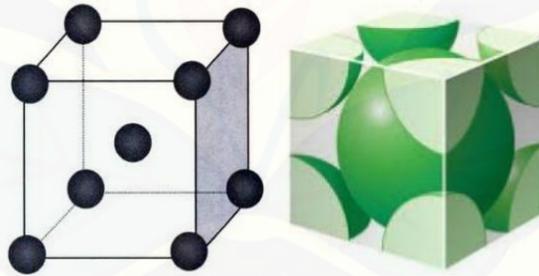
## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Struktur Kristal

Pada umumnya, struktur kristal logam memiliki tiga jenis struktur yang relatif sederhana yaitu *Body Centered Cubic (BCC)*, *Face Centered Cubic (FCC)*, dan *Hexagonal Close Packed (HCP)* (Callister dan Rethwisch, 2009). Uraian mengenai struktur kristal dapat dilihat di bawah ini:

#### 2.1.1 *Body Centered Cubic (BCC)*

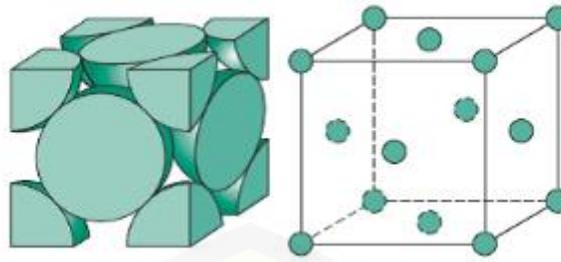
Struktur kristal BCC adalah struktur yang dibentuk oleh satu atom yang terdapat pada pusat kubus dan terdapat satu atom pada setiap sudut kubusnya (Chung, 2007). Kubus tersebut memiliki delapan sudut dan satu unit atom pada setiap sudutnya serta memiliki satu unit atom di tengah. Struktur kristal BCC diilustrasikan seperti Gambar 2.1. Struktur kristal BCC telah banyak dijumpai pada elemen-elemen transisi seperti Fe (Borg, 1992).



Gambar 2.1 Struktur kristal BCC (*Body Centered Cubic*) (Sumber: Ebbing dan Gammon, 2017; Mulyani, 2017)

#### 2.1.2 *Face Centered Cubic (FCC)*

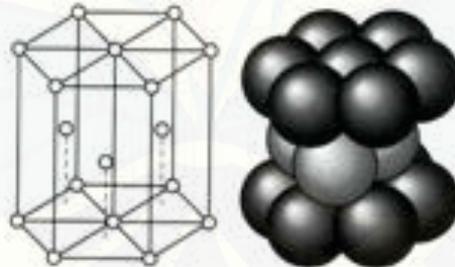
Struktur kristal FCC adalah struktur yang dibentuk oleh satu per delapan atom pada setiap sudut kubus dan setengah atom pada setiap permukaan kubus (Chung, 2007). Kubus tersebut terdapat delapan sudut dan enam bidang permukaan, sehingga jumlah atom dari satu unit sel yaitu empat atom. Struktur kristal FCC ditunjukkan seperti Gambar 2.2. Struktur kristal ini terdapat pada beberapa bahan seperti Ag, Al, Au, Cu, Ni, dan Pt (Borg, 1992).



Gambar 2.2 Struktur kristal FCC (*Face Centered Cubic*) (Sumber: Ebbing dan Gammon, 2017; Mulyani, 2017)

### 2.1.3 *Hexagonal Close Packed* (HCP)

Struktur kristal HCP adalah struktur yang dibentuk oleh dua bidang heksagonal. Struktur ini mirip dengan prisma segienam. Struktur kristal ini terdapat satu atom pada setiap sudut bidang heksagonal, satu atom pada permukaan bidang heksagonal, dan tiga atom berada di tengah ruang heksagonal (Chung, 2007). Kristal HCP memiliki dua belas sudut dan dua bidang permukaan heksagonal, sehingga jumlah atom dalam satu unit sel yaitu tujuh belas atom. Struktur kristal HCP ditunjukkan seperti Gambar 2.3. Contoh bahan dengan struktur HCP yaitu Be, Cd, Mg (Borg, 1992).



Gambar 2.3 Kristal HCP (*Hexagonal Close Packed*) (Sumber: Tisza, 2001; Chung, 2007; Mulyani, 2017)

## 2.2 Bahan Magnetik

Bahan magnetik merupakan bahan yang memiliki sifat kemagnetan dalam komponen pembentuknya. Berdasarkan nilai suseptibilitasnya, bahan magnetik dibagi menjadi tiga yaitu diamagnetik, paramagnetik, dan feromagnetik. Suseptibilitas magnetik merupakan kesebandingan antara vektor medan magnetik dan magnetisasi pada bahan (Subekti, 2010).

### 2.2.1 Diamagnetik

Bahan diamagnetik adalah bahan yang memiliki nilai suseptibilitas negatif dan sangat kecil (Puri dan Babbar, 2001). Diamagnetisme adalah sifat suatu bahan untuk menciptakan medan magnet yang bersifat tidak permanen dan memiliki efek yang sangat lemah. Bahan ini jika diberi medan magnet luar, maka elektron-elektron di dalam atom akan mengubah gerakannya, sehingga menghasilkan momen magnet yang arahnya berlawanan dengan medan magnet luar. Contoh bahan yang memiliki sifat diamagnetik adalah Au, Ag, Zn, Hg, dan Si. Superkonduktor merupakan contoh bahan diamagnetik sempurna dengan nilai suseptibilitas sebesar -1 (Callister dan Rethwisch, 2009).

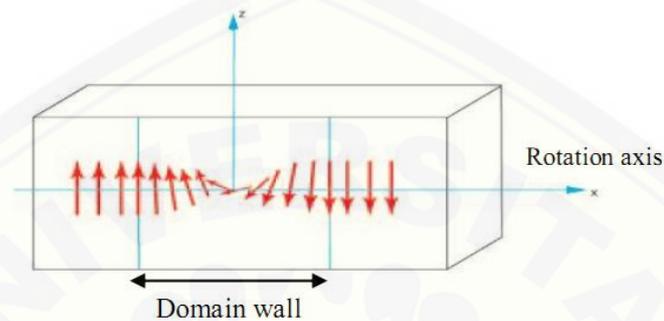
### 2.2.2 Paramagnetik

Bahan paramagnetik adalah bahan yang memiliki nilai suseptibilitas positif dan sangat kecil (Donald *et al.*, 2011). Paramagnetisme muncul pada bahan yang memiliki atom-atom momen magnetik permanen yang berinteraksi satu sama lain secara lemah. Momen magnetik ini akan berorientasi secara acak apabila tidak terdapat medan magnet luar dan momen magnetik akan menyearahkan sejajar dengan medan luarnya ketika diberikan medan magnet luar. Contoh bahan yang memiliki sifat paramagnetik adalah Al, Cr, Mo, Na, Ti, Pt, dan Zr (Callister dan Rethwisch, 2009).

### 2.2.3 Feromagnetik

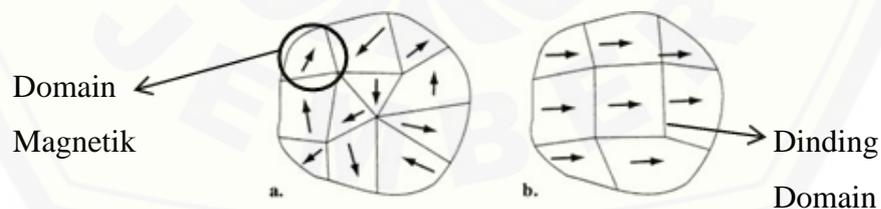
Bahan feromagnetik adalah bahan yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik tinggi, bernilai positif, bahan yang atom-atomnya memiliki momen magnet permanen, dan berinteraksi kuat satu sama lain. Bahan ini mampu mempertahankan sifat-sifat magnetiknya meskipun medan magnet luar dihilangkan (Mardiansyah, 2013). Bahan feromagnetik dengan medan magnet luar yang kecil dapat menyebabkan derajat penyearahan yang tinggi pada momen dipol magnetik atomnya. Penyearahan ini dapat bertahan meskipun medan kemagnetannya sudah hilang. Keteraturan penyearahan momen magnet sangat dipengaruhi oleh temperatur. Apabila temperatur yang diberikan melebihi

temperatur kritis, maka akan berubah bahan feromagnetik menjadi bahan paramagnetik. Temperatur kritis disebut dengan temperatur Curie (Tipler, 2001). Hal tersebut disebabkan karena adanya domain magnet yang orientasi momen dipol magnetnya searah dan ditunjukkan seperti pada gambar 2.4. Daerah yang membatasi domain magnet pada bahan disebut dinding domain (Bloch, 1932).



Gambar 2.4 Momen magnet saat orientasi  $0^\circ$  sampai  $180^\circ$  (Sumber: Nicola, 2011)

Menurut Ida (2004) bahan feromagnetik merupakan suatu bahan yang memiliki permeabilitas relatifnya lebih besar dari satu dan memiliki suseptibilitas yang bernilai positif. Bahan feromagnetik yang diberi medan magnet luar, maka momen magnet dalam domain magnet akan searah dengan arah medan magnet luar tersebut. Momen magnet akan tetap searah walaupun medan magnet luar dihilangkan, sehingga bahan ini dapat dijadikan magnet permanen. Domain magnet pada bahan feromagnetik pada saat tanpa diberi medan magnet luar dan diberi medan magnet luar ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.5 Struktur domain pada bahan feromagnetik (a) tanpa diberi medan magnet luar (b) diberi medan magnet luar (Sumber: Ida, 2004)

Bahan feromagnetik dapat terbentuk dari daerah-daerah mikroskopik yang termagnetisasi pada arah yang berbeda-beda. Daerah-daerah tersebut adalah sebagai domain magnet. Pada satu domain terdapat momen-momen magnetik

dengan arah yang sama. Satu domain dengan domain yang lainnya dipisahkan oleh sebuah dinding dan disebut dinding domain (Aharoni, 1996).

### 2.3 Material Perovskite

Perovskite merupakan suatu oksida logam yang memiliki rumus umum  $ABO_3$  dengan A merupakan ion-ion logam (logam tanah jarang dari deret lantanida dan aktanida) yang memiliki ukuran besar dan B merupakan ion-ion logam transisi (Zeng *et al.*, 2007). Perovskit merupakan material yang berpotensi dapat meningkatkan hasil konversi dengan struktur oksida logam  $ABO_3$ , dimana struktur oksida logam tersebut secara konsisten direkombinasikan sebagai katalis untuk *deep oxidation* hidrokarbon (Pecchi, 2008). Oksida-oksida *perovskit* ( $ABO_3$ ) dikenal sebagai bahan yang dapat mentransfer ion-ion oksigen pada penyusun strukturnya (oksigen kisi) tanpa mengalami perubahan strukturnya. Kelebihan bahan perovskit yaitu ion-ion oksigen penyusun strukturnya dapat dilepaskan (mengalami reduksi) tanpa mengalami perubahan strukturnya. Material berstruktur perovskite memiliki sifat yang unik, baik secara teoritis maupun eksperimental. Sifat yang terkandung di dalam material ini adalah *colossal magnetoresistance*, *ferroelectricity*, *superconductivity*, *charge ordering*, *spin dependent transport*, dan sebagainya. *Colossal Magnetoresistance* (CMR) merupakan fenomena dimana suatu bahan akan berkurang hambatan listriknya dalam orde  $10^4$  sampai  $10^6$  ketika diberikan medan magnet sebesar beberapa tesla saja (Motome, 2003). Bahan yang dapat menimbulkan suatu fenomena *colossal magnetoresistance* adalah material perovskite oksida, dimana salah satunya adalah bahan manganit. Fenomena dalam colossal magnetoresistansi ini banyak digunakan dalam media penyimpanan data, seperti hardisk dan penyimpanan lainnya (Salomon, 2001).

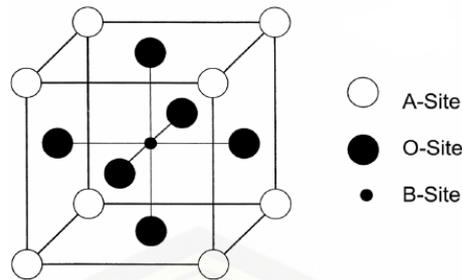
#### 2.3.1 Bahan Magnetik Berbasis Manganit

Bahan magnetik CMR (*Colossal Magnetoresistance*) yaitu bahan berbasis manganit khususnya oksida mangan yang memiliki rumus umum  $A(MnO_3)$ , dengan A adalah unsur bervalensi tiga dan berupa unsur tanah jarang (misal: La,

Nd, Pr, dan Sm). Penambahan *doping* dengan unsur bervalensi dua seperti alkali tanah (misal : Sr, Ca, Ba, dan Pb), maka akan mengubah rumus umumnya menjadi  $(A_{1-x}B_x)(MnO_3)$ . Rumus tersebut dikenal dengan bahan magnetik oksida mangan seperti:  $LaMnO_3$ ,  $PrMnO_3$ ,  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ , dan  $La_{1-x}Ca_xMnO_3$ . Bahan  $LaMnO_3$  merupakan bahan manganit kompleks yang terbentuk dari unsur logam dengan unsur transisi seperti lanthanum yang dikombinasikan dengan bahan manganit lain dan juga oksigen (Rohman, 2013).

### 2.3.2 Bahan $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$ (*Lanthanum Strontium Manganese Oxide*)

Bahan  $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$  merupakan bahan yang terbentuk dari bahan  $LaMnO_3$  dengan penambahan dopan ion Sr (divalen) yang dapat mengubah sifat *transport* listrik bahan  $LaMnO_3$ . Bahan  $LaMnO_3$  yang didopan ion  $Sr^{2+}$  (divalen) akan diikuti oleh ion transisi  $Mn^{3+}$  menjadi ion  $Mn^{4+}$ . Pada ion Mn yang bervalensi empat terdapat satu elektron yang hilang. Elektron yang hilang akan menciptakan lubang (*hole*) dan memungkinkan terjadinya lompatan elektron, sehingga bahan tersebut bersifat logam (Gor'kov dan Kresin, 2004). Bahan  $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$  (*Lanthanum Strontium Manganese Oxide*) adalah bahan yang memiliki energi bandwith (W) besar dan lebar karena pengaruh doping ion  $Sr^{2+}$  dengan jari-jari atom yang besar serta memiliki fase feromagnetik yang stabil. Bahan ini memiliki temperatur Curie sebesar 370K (97°) (Urushibara *et al.*, 1995), sehingga memiliki peranan penting dalam berbagai aplikasi teknologi. Bahan  $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$  merupakan bahan campuran dari bahan feromagnetik yang berbentuk *perovskit*. Struktur kristal *perovskit* pada sistem kristal yaitu orthorombik dan formula umum bahan ini yaitu  $(ABO_3)$ , dengan A dan B adalah kation yang ukurannya berbeda. Struktur kristal *perovskit* berbentuk oktahedral seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.6 (Gor'kov dan Kresin, 2004). Bahan LSMO memiliki ion  $La^{3+}$  yang bervalensi tiga dan ion  $Sr^{2+}$  yang bervalensi dua dengan menempati A *site*. Muatan ion Mn dengan 3+ dan 4+ terletak di pusat pada bidang oktahedral. Posisi B *site* ditempati oleh ikatan oksigen (Musyarofah, 2016).

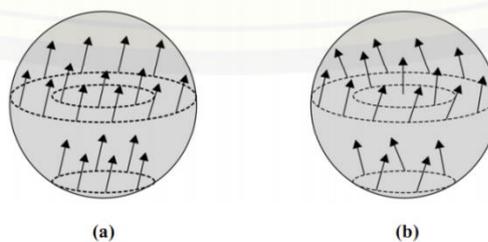


Gambar 2.6 Struktur *perovskite* dengan formula  $ABO_3$ , dimana A yaitu kation berukuran besar, B yaitu kation berukuran kecil, dan O yaitu sebagai pembentuk oktahedral (Sumber : Huajun, 2007)

#### 2.4 Mekanisme Pembalikan Magnetisasi

Mekanisme pembalikan magnetisasi memiliki dua jenis yaitu model rotasi koheren (*coherent rotation*) dan model *curling*. Model rotasi koheren (*coherent rotation*) yaitu mekanisme pembalikan yang terjadi secara seragam dan berputar secara serempak. Pada proses pembalikan, spin-spin dalam partikel selalu mempertahankan keadaannya agar tetap paralel antara yang satu dengan lainnya seperti pada Gambar 2.7 (a). Model pembalikan ini terjadi pada partikel yang memiliki struktur *single-domain* atau dikenal sebagai partikel Stoner-Wohlfarth. Model ini sering dikenal dengan model Stoner-Wohlfarth (Coey, 2009).

Model *curling* yang diilustrasikan seperti pada Gambar 2.7 (b). Proses pembalikan pada model ini yaitu spin-spin dari partikel membentuk struktur *vortex*. Model ini terjadi pada sebagian besar partikel magnetik yang berbentuk bola dengan diameter di atas diameter kritis (Coey, 2009). Pada partikel dengan ukuran besar, kontribusi energi *exchange* lebih mendominasi dibandingkan dengan energi magnetostatik, sehingga mekanisme pembalikan model *curling* lebih dipilih oleh sistem dibandingkan model rotasi koheren (Skomski, 2008).



Gambar 2.7 Mekanisme pembalikan magnetisasi pada partikel magnetik yang berbentuk bola. (a) rotasi koheren (*coherent rotation*), (b) curling (Sumber: Skomski, 2008).

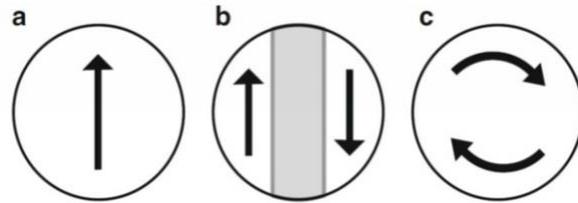
## 2.5 Struktur Domain pada Nanopartikel

### 2.5.1 *Single Domain*

Model untuk menggambarkan fenomena magnetik dari partikel kecil (*small particles*) pernah diusulkan oleh Stoner dan Wohlfarth pada tahun 1948. Model pada partikel magnetik ini memiliki domain yang homogen (domain tunggal) dengan bentuk elipsoid. Magnetisasi total dari sistem merupakan hasil penjumlahan vektor dipol individu yang terkandung di dalam sistem. Sistem magnetisasi dapat digambarkan sebagai vektor tunggal  $|\mathbf{M}| = \sum_i^N m_i = Nm$ . Model spin-spin pada sistem ini berinteraksi sangat lemah dengan mengabaikan interaksi *exchange* yang terjadi di dalam sistem. Pendekatan mikromagnetik pada *single-domain* yaitu keseluruhan momen magnet sejajar dengan sumbu anisotropinya, maka kontribusi energi *exchange* dan energi anisotropi dari total energi sistem adalah nol. Satu-satunya energi yang relevan yaitu energi magnetostatik. Partikel yang memiliki struktur domain tunggal (*single-domain*) sering disebut sebagai partikel Stoner-Wohlfarth dan ditunjukkan seperti pada Gambar 2.8 (a) (Mardona, 2012).

### 2.5.2 *Two Domain dan Vortex-state*

Partikel magnetik yang berbentuk bola akan melewati daerah diameter tertentu dan dikenal sebagai diameter kritis (*critical diameter*). Struktur domainnya berubah dari keadaan *single-domain* menjadi *two-domain* atau *vortex* yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8 (b) dan (c). Energi magnetostatik pada keadaan ini akan minimum meskipun spinnya tidak sejajar, namun perubahan arah secara bertahap cukup kecil sehingga pengurangan energi magnetostatiknya menjadi lebih besar dibandingkan kenaikan energi *exchange* (Widodo, 2013).



Gambar 2.8 Tiga keadaan konfigurasi domain magnetik saat energi minimum (*groundstate*) pada partikel magnetik bola (*spherical magnetic particle*). (a) *single-domain*, (b) *two-domain*, dan (c) *vortex-state* (Sumber: Widodo, 2013).

## 2.6 Resonansi Feromagnetik (FMR)

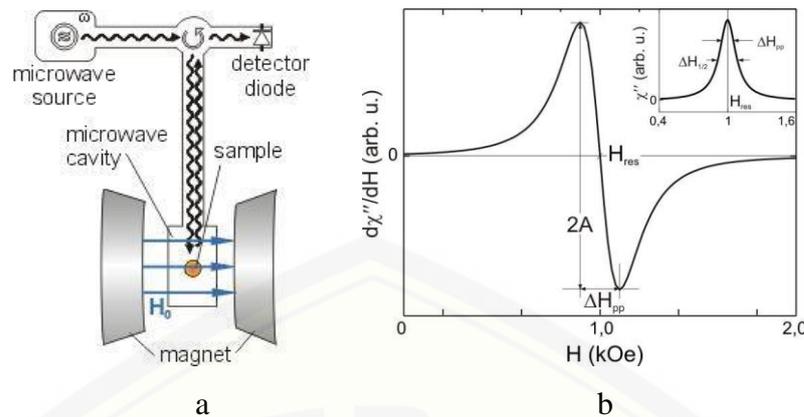
Resonansi feromagnetik (FMR) adalah suatu teknik yang digunakan untuk meneliti dinamika magnetisasi dari struktur magnetik. Kinerja dari divais berbasis magnetik dipengaruhi oleh pembalikan magnetisasi (*switching field*) dan resonansi feromagnetik (FMR) yang dapat meningkatkan kecepatan pembacaan serta penulisan data pada divais. Hasil penelitian mengenai pembalikan magnetisasi dan resonansi feromagnetik pada nano elemen sudah banyak dipublikasikan, baik secara eksperimen maupun secara simulasi dengan memberikan medan magnet luar. Hasil pengamatan pada proses magnetisasi dan resonansi feromagnetik menunjukkan bahwa medan pembalikan (*switching field*) pada material feromagnetik berkisar antara 10 mT sampai 70 mT dan resonansi feromagnetik dalam rentang GHz. Kecepatan membaca dan menulis data pada divais magnetik ini dapat meningkat serta menjadi lebih efisien, baik efisien dari segi waktu maupun energi (Liu, 2007).

Resonansi spin pada frekuensi gelombang mikro yang terdapat di feromagnet pada prinsipnya mirip dengan resonansi spin *nuclear*. Total elektron momen magnetik dari presisi benda uji mengenai arah medan magnet dan energi yang diserap kuat pada bidang transversal ketika frekuensi radio (rf) sama dengan frekuensi presisinya. Vektor makroskopik  $\mathbf{S}$  mewakili spin total feromagnet seperti terkuantisasi dalam medan magnet statis, tingkat energi yang dipisahkan oleh frekuensi Zeeman, dan aturan pemilihan magnetik  $\Delta m_s = \pm 1$  memungkinkan bahwa transisinya antara level yang berdekatan (Ismail, 2013).

Menurut Kittel (2005) fitur yang terdapat pada resonansi feromagnet adalah sebagai berikut :

1. Komponen suseptibilitas transversal real ( $\chi'$ ) dan imajiner ( $\chi''$ ) yang sangat besar, karena magnetisasi dari feromagnet dalam medan statis yang diberikan sangat besar daripada magnetisasi paramagnet pada medan yang sama.
2. Bentuk bahan yang diuji memiliki peran yang penting, karena magnetisasi yang besar dan medan demagnetisasi yang besar.
3. Kopling pertukaran (exchange) yang kuat antara elektron feromagnet cenderung untuk menekan kontribusi dipol dengan lebar garis (*line width*). Garis resonansi feromagnet bisa sangat tajam ( $<1\text{G}$ ) pada kondisi yang menguntungkan.
4. Efek saturasi terjadi pada tingkat frekuensi radio (rf) yang rendah. Hal ini tidak mungkin, karena sistem spin *nuclear* dapat mendorong sistem spin feromagnetik yang sangat keras dan magnetisasi  $M_z$  berkurang menjadi nol atau terbalik. Eksitasi resonansi feromagnetik terurai menjadi mode gelombang spin sebelum vektor magnetisasinya dapat diputar secara berarti dari arah awal.

Frekuensi resonansi pada bahan feromagnetik dapat diukur dengan menggunakan FMR, ESR, EPR, dan VNA yang dilakukan secara eksperimen. Pengukuran dengan FMR yaitu dengan meletakkan sampel dalam sebuah *microwave resonant cavity* dan sampel berbentuk lapisan tipis. Sampel tersebut diberi medan magnet statis yang berasal dari kumparan elektromagnet, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.9 (a) dan proses ini akan menyebabkan momen magnet atau spin bergerak *precession*. Sampel tersebut juga diberi medan elektromagnetik berupa gelombang mikro atau radio yang tegak lurus terhadap medan magnet statis. Hasil antara frekuensi gerak *precession* pada spin jika sama dengan frekuensi dari gelombang mikro yang berasal dari *cavity*, maka akan terjadi suatu resonansi yang ditandai dengan meningkatnya absorpsi gelombang mikro. Kurva hasil pengukuran ditunjukkan pada Gambar 2.9 (b) dan kurva tersebut menyatakan kurva absorpsi (Wicaksono, 2016).



Gambar 2.9 (a) Prinsip pengukuran alat FMR dengan meletakkan sampel di dalam *microwave resonans cavity* pada medan magnet tertentu dan diaplikasikan pada gelombang mikro atau radio dalam arah tegak lurus dengan medan magnet, (b) Kurva hasil pengukuran dengan alat FMR (Sumber: Wicaksono, 2016).

Menurut Kittel (1948) pengembangan teori mengenai FMR yaitu dilakukan berdasarkan bentuk sampel dan orientasi relatif antara H dan M. Faktor magnetisasi memiliki peran penting pada pengaruh bentuk (*shape*) material feromagnetik terhadap proses resonansi. Penurunan formulasi tentang dinamika magnetisasi pada pengukuran FMR dalam bentuk hubungan antara medan magnet luar, faktor demagnetisasi, dan magnetisasi. Persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\omega = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{[H_0 + H_k + (N_y - N_x)M_s][H_0 + H_k + (N_z - N_x)M_s]} \quad (2.1)$$

Dengan faktor demagnetisasi  $N_y = N_z$ , sehingga persamaan tersebut menjadi :

$$\omega = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{[H_0 + H_k + (N_y - N_x)M_s][H_0 + H_k + (N_z - N_x)M_s]} \quad (2.2)$$

$$\omega = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{[H_0 + H_k + (N_y - N_x)M_s]^2} \quad (2.3)$$

$$\omega = \frac{\gamma}{2\pi} [H_0 + H_k + (N_y - N_x)M_s] \quad (2.4)$$

Keterangan :

$\gamma$  = Gyromagnetic ratio ( $2.21 \times 10^5 \text{ mA}^{-1}\text{S}^{-1}$ )

$H_0$  = Medan Magnet Luar

$N_x, N_y, N_z$  = Faktor Demagnetisasi

$M_s$  = Magnetisasi Saturasi

## 2.7 Kurva Histerisis

Karakteristik pada material feromagnetik dapat dilihat dari bentuk *loop* kurva histerisisnya. Kurva histerisis tersebut dapat diperoleh dengan memetakan magnetisasi material  $\mathbf{M}$  untuk besar medan magnet  $\mathbf{H}$  yang diberikan dan cara lainnya yaitu dengan memetakan induksi medan magnet  $\mathbf{B}$  pada material feromagnetik terhadap kuat medan magnet  $\mathbf{H}$  yang berbeda-beda. Kurva histerisis antara  $\mathbf{M}$  dan  $\mathbf{H}$  atau antara  $\mathbf{J}$  ( $\mathbf{J} = \mu_0 \mathbf{M}$ ) dan  $\mathbf{H}$  disebut sebagai kurva histerisis intrinsik yang diilustrasikan seperti pada Gambar 2.10 (a). Kurva histerisis antara  $\mathbf{B}$  dan  $\mathbf{H}$  disebut sebagai kurva histerisis normal yang diilustrasikan seperti pada Gambar 2.10 (b). Kedua cara tersebut memberikan informasi yang sama, karena antara  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{M}$ , dan  $\mathbf{H}$  memenuhi persamaan (2.10) (Yani *et al.*, 2014):

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

Keterangan :

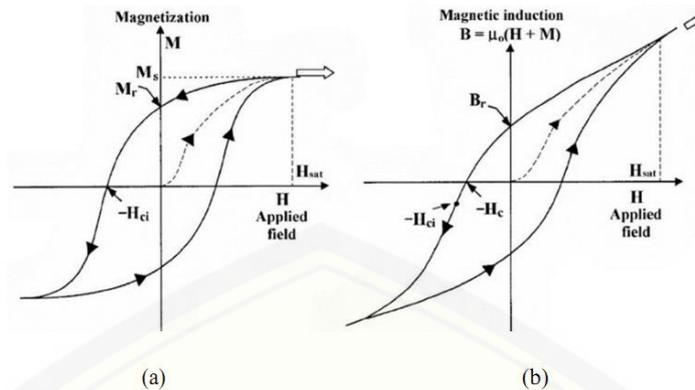
$\mathbf{B}$  = Induksi magnet (Tesla)

$\mathbf{H}$  = Medan magnet yang diberikan (A/m)

$\mathbf{M}$  = Magnetisasi (A/m)

$\mu_0$  = Permeabilitas ruang hampa

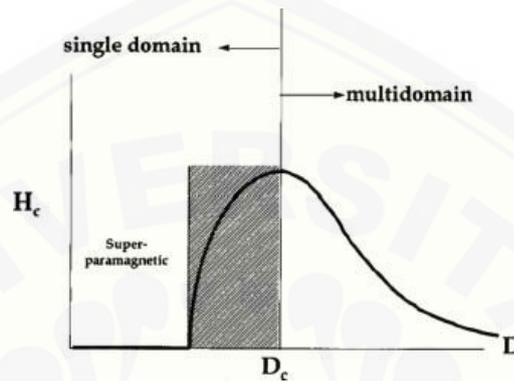
Kurva histerisis pada Gambar 2.10 dapat dilihat bahwa material feromagnetik awalnya belum termagnetisasi. Medan magnet  $\mathbf{H}$  yang diberikan pada material dapat menyebabkan magnetisasinya meningkat dan sebanding dengan medan magnet  $\mathbf{H}$ . Bertambahnya nilai magnetisasi  $\mathbf{M}$  diakibatkan oleh adanya pergerakan domain magnet. Besar medan magnet  $\mathbf{H}$  yang diberikan meningkat secara terus-menerus, maka magnetisasi akhirnya akan mencapai keadaan jenuh (saturasi). Besarnya nilai magnetisasi pada keadaan saturasi ini dikenal sebagai magnetisasi saturasi  $\mathbf{M}_s$ . Besar medan yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan saturasi dikenal sebagai medan saturasi  $\mathbf{H}_{sat}$ . Pada keadaan ini seluruh momen magnet akan membentuk domain tunggal yang terorientasi searah dengan medan magnet  $\mathbf{H}$  yang diberikan.



Gambar 2.10 Kurva histerisis material feromagnetik. (a)  $\mathbf{M}$  terhadap  $\mathbf{H}$ :  $M_r$  adalah magnetisasi remanen;  $H_{ci}$  adalah koersivitas intrinsik;  $M_s$  adalah magnetisasi saturasi; (b)  $\mathbf{B}$  terhadap  $\mathbf{H}$ :  $B_r$  adalah remanen;  $H_c$  adalah koersivitas (Yani *et al.*, 1998).

Pada keadaan saturasi, medan magnet eksternal  $\mathbf{H}$  direduksi sampai pada keadaan yang dikenal sebagai medan nukleasi (*nucleation field*). Medan nukleasi ( $H_n$ ) didefinisikan sebagai medan awal dan membuat keadaan struktur domain tidak lagi sejajar satu sama lain (saturasi). Medan magnet eksternal  $\mathbf{H}$  pada keadaan ini direduksi sampai menjadi nol, sehingga kurva tidak kembali seperti semula akan tetapi masih memiliki magnetisasi yang tersisa dan disebut sebagai magnetisasi remanen  $M_r$ . Domain magnet sebelum diberi medan eksternal  $\mathbf{H}$ , keadaan ini sebagian tidak kembali ke orientasi awalnya dan material termagnetisasi sebagian. Proses ini dilanjutkan dengan membalikkan arah medan magnet  $\mathbf{H}$  yang diberikan dan terus ditambah sehingga tercapai nilai magnetisasinya menjadi nol. Nilai medan magnet  $\mathbf{H}$  ketika  $M=0$  disebut sebagai koersivitas. Pada keadaan ini, orientasi domain magnet kembali acak. Pada skala nano, koersivitas terjadi saat proses magnetisasi material feromagnetik. Pergerakan domain pada material feromagnetik tersebut dapat terhambat yang diakibatkan adanya gesekan antar domain dan disebabkan oleh ukuran dari material itu sendiri. Ukuran material yang semakin kecil, maka batas-batas domain akan menjadi hilang dan domainnya akan mengelompok menjadi satu keadaan (*single-domain particle*). Karakteristik mengenai perubahan medan koersivitas terhadap ukuran partikel material magnetik diilustrasikan seperti pada Gambar 2.11. Pada Gambar 2.11 diperlihatkan hubungan  $D$  (diameter partikel)

terhadap  $H$ , dan kurva terbagi dalam tiga daerah. Daerah pertama yaitu superparamagnetik dengan medan koersivitas  $H_c=0$ , daerah kedua yaitu daerah antara superparamagnetik hingga diameter kritis  $D_c$  atau keadaan struktur *single-domain*, dan daerah ketiga yaitu daerah di atas diameter kritis  $D_c$  atau keadaan struktur *multi-domain*.



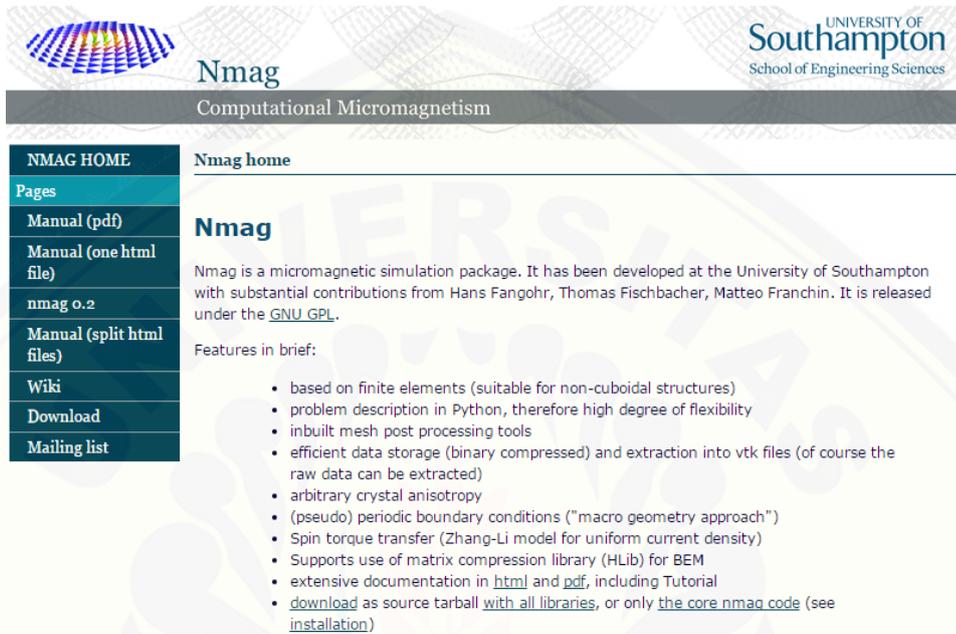
Gambar 2.11 Kurva perbandingan nilai medan koersivitas terhadap diameter partikel (Mardona, 2012).

## 2.8 Simulasi Mikromagnetik

Konsep *continuum* merupakan konsep dasar dari mikromagnetik. Konsep *continuum* yaitu konsep fisika yang menjelaskan tentang sifat-sifat material feromagnetik pada skala mikro dengan menggunakan pendekatan mekanika klasik dan fungsi energi sistem yang bersifat kontinu pada kondisi kesetimbangan. Konsep *continuum* digunakan untuk menghitung distribusi magnetisasi pada sampel dalam bentuk acak. Perhitungan ini berdasarkan prinsip minimalisasi pada fungsi energi sistem, sehingga perubahan magnetisasi dan profil energi dapat ditentukan (Ismail, 2013).

Simulasi mikromagnetik ini dilakukan dengan menggunakan program komputasi mikromagnetik berbasis NMAG (Gambar 2.12). NMAG merupakan sebuah program *open source* yang dijalankan dengan sistem operasi *Linux*. Program ini memiliki *script Python* (.py) yang merupakan salah satu input berisi parameter-parameter bahan dan dieksekusi pada terminal *Linux*. NMAG memiliki suatu keuntungan yaitu penggunaan NMAG didasarkan pada metode elemen hingga yang cocok untuk komputasi struktur non-kubus, deskripsi yang ada pada *Python* memiliki tingkat fleksibilitas yang tinggi, penyimpanan data yang efisien

karena adanya kompresi biner, dan perkembangan file *output* .vtk untuk visualisasi yang masih tinggi. Visualisasi menggunakan file *output* .vtk yang meliputi data magnetisasi dinamis dan diolah menggunakan program Mayavi (Ni'mah, 2018).



**Nmag**  
UNIVERSITY OF  
**Southampton**  
School of Engineering Sciences

Computational Micromagnetism

**NMAG HOME** Nmag home

**Pages**

**Manual (pdf)** **Nmag**

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

**nmag 0.2**

**Manual (split html files)** Features in brief:

**Wiki**

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

**Download**

**Mailing list**

Gambar 2.12 Program komputasi mikromagnetik NMAG (Sumber: Fangohr, 2012)

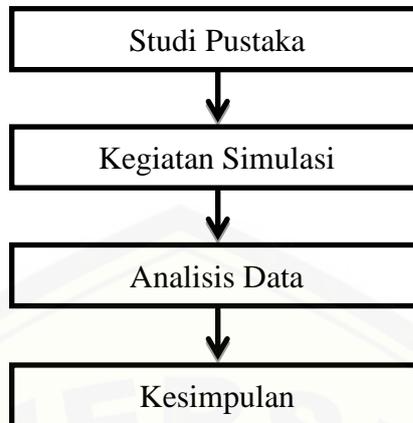
### BAB 3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian merupakan bagian yang menjelaskan bagaimana penelitian ini dilakukan. Metode penelitian ini terdiri dari beberapa komponen. Komponen tersebut terdiri atas rancangan penelitian, jenis dan sumber data penelitian, definisi operasional variabel, metode analisis data, prosedur penelitian, dan kerangka pemecahan masalah.

#### 3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fisika Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari 2019 sampai selesai. Pada penelitian ini akan dilakukan studi resonansi feromagnetik bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) berbagai bentuk pilar berdasarkan kurva histerisisnya dan terhadap frekuensi resonansi menggunakan simulasi mikromagnetik. Peralatan yang digunakan yaitu komputer dengan sistem operasi Linux Ubuntu yang dapat menjalankan program NMAG untuk melakukan simulasi mikromagnetik. Komputer yang digunakan yaitu memiliki spesifikasi processor Intel® Core™ i3-3240 CPU @ 3,40GHzx4 dan tipe sistem 64-bit dengan RAM sebesar 4 GB.

Langkah awal dalam melakukan penelitian ini yaitu melakukan studi pustaka. Melalui studi pustaka ini, peneliti mengumpulkan dan mencari berbagai pustaka atau referensi seperti buku, jurnal ilmiah, skripsi, tesis, dan disertasi yang digunakan untuk menunjang serta mendukung penelitian ini. Selanjutnya yaitu melakukan kegiatan simulasi dengan menggunakan *software* atau program NMAG, Mayavi, dan Origin Pro. *Software* tersebut digunakan sebagai *running* simulasi mikromagnetik, visualisasi struktur domain, dan membuat grafik dari data pengolahan simulasi. Data hasil simulasi tersebut, akan diperoleh hasil berupa gambar dan grafik yang kemudian dianalisis. Hasil analisis ini digunakan sebagai bahan dasar untuk membuat atau mendapatkan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan. Skema dari rancangan kegiatan penelitian ini ditampilkan dalam bentuk diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir rancangan penelitian

### 3.2 Jenis dan Sumber Data Penelitian

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini bersifat kuantitatif. Jenis data tersebut disimulasikan dan dianalisis secara langsung, kemudian dinyatakan dalam bentuk gambar dan juga grafik. Data pada penelitian ini merupakan data yang diperoleh dari hasil simulasi mikromagnetik dan analisis visualisasi gambar.

Sumber data yang di peroleh dari penelitian ini yaitu dari hasil penelitian secara objektif dan termasuk data sekunder. Data penelitian ini langsung dikumpulkan oleh peneliti dari hasil *running* simulasi mikromagnetik dan analisis gambar atau grafik. Sumber data sekunder dalam penelitian ini adalah parameter bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) sebagai *input* simulasi mikromagnetik dan sudah digunakan sebelumnya. Parameter bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 3.1 Parameter bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO)

Parameter	Keterangan	Nilai
$M_s$	Magnetisasi Saturasi	$590 \times 10^3 \text{ A/m}$
$A$ ( <i>exchange_coupling</i> )	<i>Exchange coupling</i>	$5 \times 10^{-12} \text{ J/m}$
$K$	Konstanta kubus anisotropi	$-0,3 \times 10^3 \text{ J/m}^3$
$l_{ex}$	<i>Excange length</i>	4,78 nm
$a$ ( <i>llg_damping</i> )	Parameter damping	0,5
$\xi$ ( <i>llg_xi</i> )	Derajat non adiabatik	0,01
$P$ ( <i>llg_polarisation</i> )	Polarisasi	1

Sumber : Ziese, 2006.

### 3.3 Definisi Operasional Variabel

Definisi operasional variabel terdapat 3 macam variabel yang digunakan dalam penelitian ini, diantaranya yaitu :

#### 1. Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi ketebalan dan diameter pada berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *silinder*, dan nano *square*). Variasi ketebalan dan diameter dapat mempengaruhi terjadinya perubahan pada variabel terikat dalam berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *silinder*, dan nano *square*).

#### 2. Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kurva histerisis dan frekuensi resonansi (FMR) pada bahan. Kurva histerisis dan frekuensi resonansi (FMR) merupakan faktor yang diamati serta diukur untuk menentukan ada tidaknya pengaruh dari variabel bebas.

#### 3. Variabel Kontrol

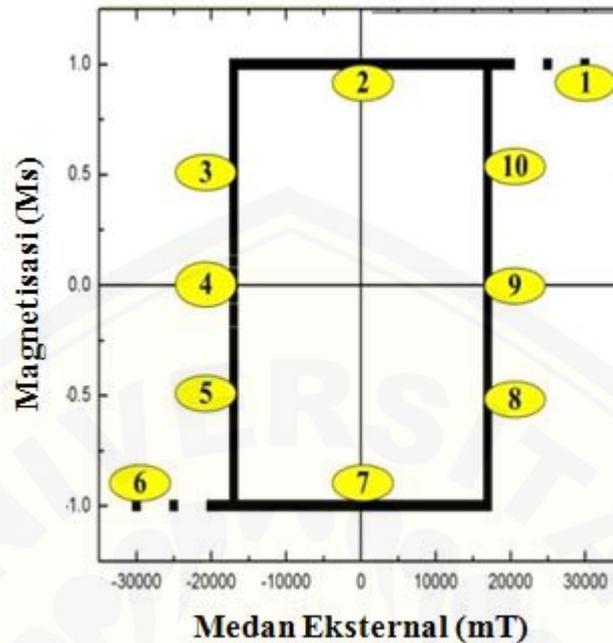
Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *silinder*, dan nano *square*). Berbagai bentuk pilar ini dijadikan sebagai acuan untuk menentukan ada tidaknya pengaruh variabel bebas dan variabel terikat.

### 3.4 Metode Analisis Data

Metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

3.4.1 Analisis data simulasi digunakan untuk menentukan kurva histerisis hubungan antara magnetisasi terhadap medan magnet eksternal pada berbagai bentuk pilar bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO).

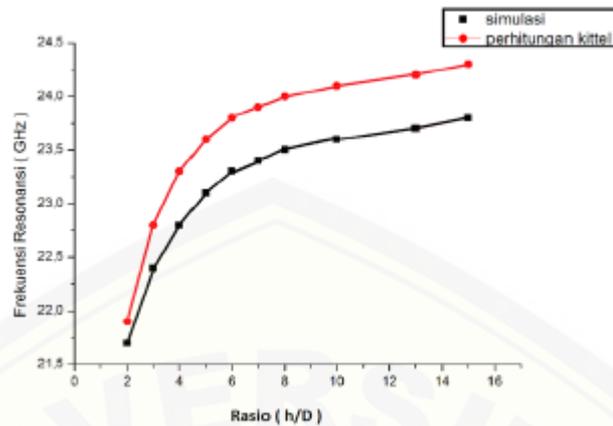
Analisis ini dilakukan untuk membuat kurva histerisis pada berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*) bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO). Contoh kurva histerisis ditunjukkan pada Gambar 3.2 yang dilakukan secara simulasi mikromagnetik.



Gambar 3.2 Kurva histerisis hubungan antara magnetisasi terhadap medan magnet eksternal (Wicaksono, 2016)

3.4.2 Analisis data simulasi digunakan untuk menentukan grafik hubungan antara frekuensi resonansi (FMR) terhadap variasi ketebalan pada berbagai bentuk pilar bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO).

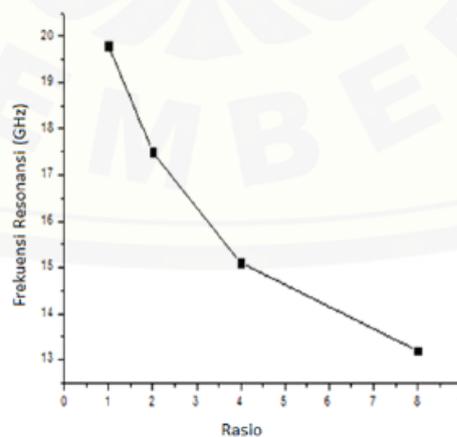
Analisis ini dilakukan untuk membuat grafik hubungan antara frekuensi resonansi (FMR) dengan berbagai ketebalan pada berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*) bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO). Contoh grafik hubungan antara frekuensi resonansi (FMR) dengan berbagai ketebalan ditunjukkan pada Gambar 3.3 yang dilakukan secara simulasi mikromagnetik maupun dengan perhitungan Kittel (persamaan 2.4).



Gambar 3.3 Grafik hubungan antara frekuensi resonansi (FMR) dengan berbagai ketebalan pada diameter *hexagonal* 12 nm berdasarkan simulasi dan perhitungan Kittel (Wicaksono, 2016)

3.4.3 Analisis data simulasi digunakan untuk menentukan grafik hubungan antara frekuensi resonansi (FMR) terhadap diameter pada berbagai bentuk pilar bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO).

Analisis ini dilakukan untuk membuat grafik hubungan antara frekuensi resonansi (FMR) dengan diameter pada berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*) bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO). Contoh grafik hubungan antara frekuensi resonansi (FMR) dengan diameter ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Grafik hubungan antara frekuensi resonansi (FMR) dengan diameter *hexagonal* bahan BaM pada ketebalan 12 nm (Wicaksono, 2016)

### 3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

3.5.1 Simulasi untuk mendapatkan kurva histerisis bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) pada berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*) dengan variasi ketebalan dan diberi medan eksternal *quasi-static* ke arah *hard-axis* dari sebesar  $-10 \text{ A/m}$  sampai  $10 \text{ A/m}$ . Simulasi ini menggunakan ukuran sel sebesar  $(2,5 \times 2,5 \times 2,5) \text{ nm}^3$  dan faktor damping ( $\alpha$ ) sebesar 0,5.

Tabel 3.2 Data geometri untuk mendapatkan kurva histerisis dengan variasi ketebalan pada berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*)

No.	Diameter (nm) (D)	Ketebalan (nm) (h)			Rasio (D/h)
		<i>Hexagonal</i>	<i>Cylinder</i>	<i>Square</i>	
1.	12	24	24	24	2
2.	12	36	36	36	3
3.	12	48	48	48	4
4.	12	60	60	60	5
5.	12	72	72	72	6
6.	12	84	84	84	7
7.	12	96	96	96	8
8.	12	120	120	120	10
9.	12	156	156	156	13
10.	12	180	180	180	15

3.5.2 Simulasi untuk mendapatkan kurva frekuensi resonansi bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) pada berbagai bentuk pilar dengan menggunakan amplitudo sebesar  $1000 \text{ A/m}$ .

1. Desain geometri pada variasi ketebalan berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*) bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO).

Tabel 3.3 Data geometri untuk mendapatkan kurva frekuensi resonansi dengan variasi ketebalan pada berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*)

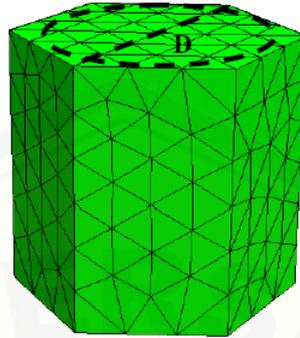
No.	Diameter (nm) (D)	Ketebalan (nm) (h)			Rasio (D/h)
		<i>Hexagonal</i>	<i>Cylinder</i>	<i>Square</i>	
1.	12	24	24	24	2
2.	12	36	36	36	3
3.	12	48	48	48	4
4.	12	60	60	60	5
5.	12	72	72	72	6
6.	12	84	84	84	7
7.	12	96	96	96	8
8.	12	120	120	120	10
9.	12	156	156	156	13
10.	12	180	180	180	15

2. Desain geometri pada variasi diameter berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *silinder*, dan nano *square*) bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO).

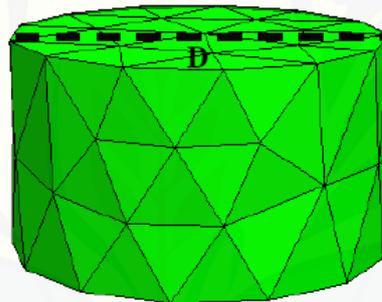
Tabel 3.4 Data geometri untuk mendapatkan kurva frekuensi resonansi dengan variasi diameter berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*)

No.	Diameter (nm) (D)	Ketebalan (nm) (h)			Rasio (D/h)
		<i>Hexagonal</i>	<i>Cylinder</i>	<i>Square</i>	
1.	12	12	12	12	1
2.	24	12	12	12	2
3.	48	12	12	12	4
4.	96	12	12	12	8

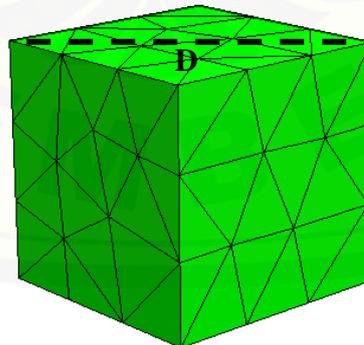
2.5.3 Desain geometri bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) pada berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*).



Gambar 3.5 Desain geometri berbentuk nano *hexagonal* bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) dengan variasi diameter 12 nm dan ketebalan 12 nm.



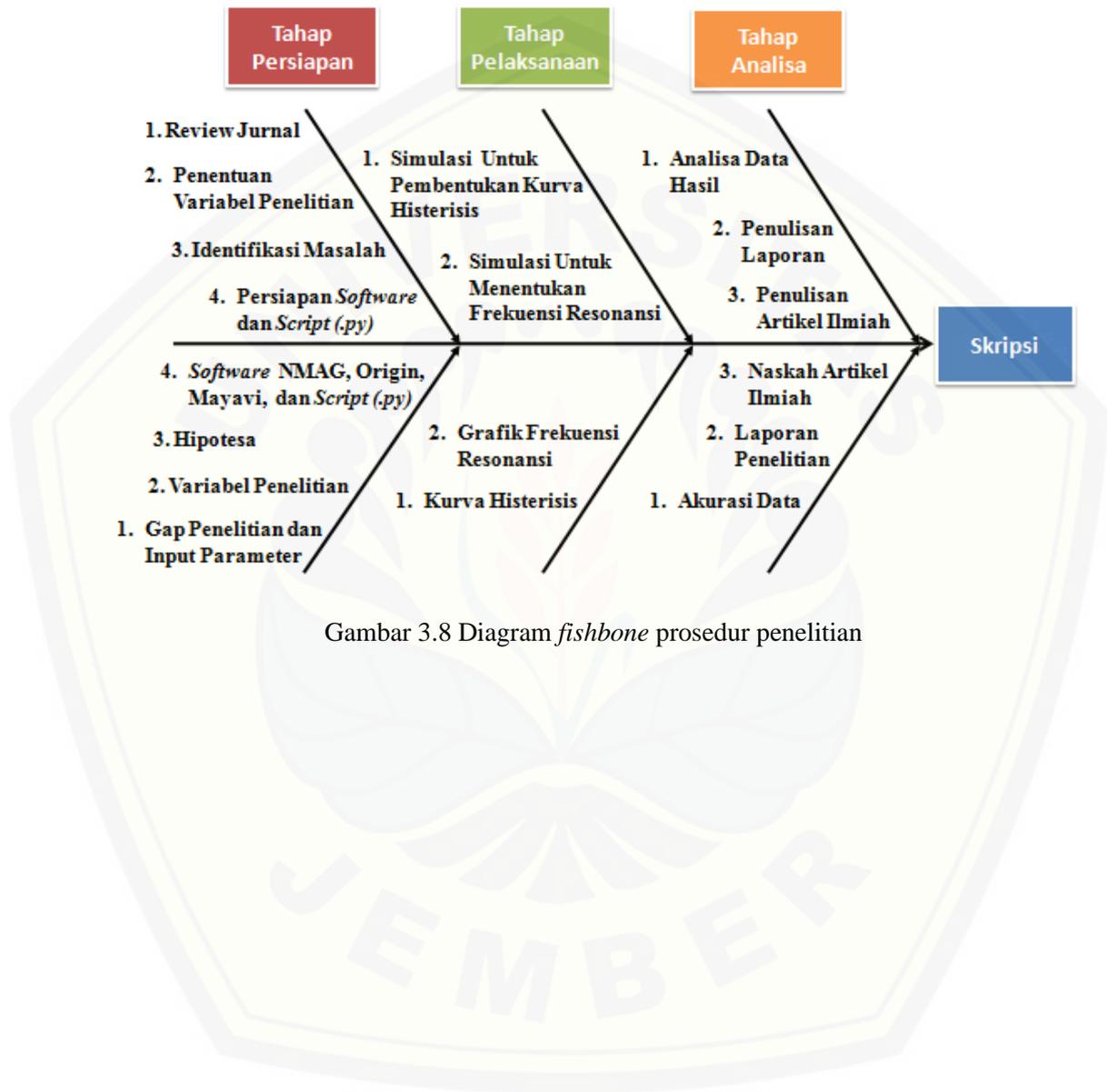
Gambar 3.6 Desain geometri berbentuk nano *cylinder* bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) dengan variasi diameter 12 nm dan ketebalan 12 nm.



Gambar 3.7 Desain geometri berbentuk nano *square* bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) dengan variasi diameter 12 nm dan ketebalan 12 nm.

### 3.6 Kerangka Pemecahan Masalah

Secara garis besar, skema dari kerangka pemecahan masalah penelitian ini ditampilkan dalam bentuk diagram *fishbone* yang ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Diagram *fishbone* prosedur penelitian

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dihasilkan dalam penelitian studi resonansi feromagnetik bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) berbagai bentuk pilar menggunakan simulasi mikromagnetik adalah sebagai berikut :

1. Perbandingan sifat feromagnetik bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) pada berbagai bentuk pilar dapat dilihat berdasarkan kurva histerisisnya. Kurva histerisis dapat memberikan informasi mengenai besarnya medan koersivitas pada saat Magnetisasi ( $M_s$ ) sama dengan nol dan dapat memberikan informasi mengenai struktur domain pada bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO). Bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) memiliki struktur domain berupa *single-domain* dikarenakan domain tersebut terorientasi searah dengan medan magnet eksternal yang diberikan. Struktur domain yang menghadap ke atas diasumsikan memiliki nilai magnetisasi sebesar 0,143 dan struktur domain yang menghadap ke bawah memiliki nilai magnetisasi sebesar -0,143. Medan koersivitas yang dihasilkan pada berbagai bentuk pilar dengan variasi ketebalan terhadap sifat bahan feromagnetik dalam kurva histerisis yaitu pada saat medan koersivitas  $H_c > 1 \text{ kA/m}$  bahan tersebut bersifat *hard magnet* dan saat medan koersivitas  $H_c < 1 \text{ kA/m}$  bahan tersebut bersifat *soft magnet*. Sifat feromagnetik bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) dapat disimpulkan bahwa bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) pada berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*) merupakan bahan feromagnetik yang bersifat *soft magnet*.
2. Pengaruh variasi ketebalan terhadap frekuensi resonansi adalah semakin besar variasi ketebalan bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) pada berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*) dengan diameter yang sama, maka nilai frekuensi resonansi yang dihasilkan akan semakin besar atau meningkat dan posisi spin terlihat sangat teratur. Pengaruh variasi diameter terhadap frekuensi resonansi adalah semakin besar variasi diameter bahan  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) pada berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*,

nano *cylinder*, dan nano *square*) dengan ketebalan yang sama, maka nilai frekuensi resonansi yang dihasilkan akan semakin kecil atau menurun dan posisi spin terlihat tidak teratur.

## 5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu perlu dilakukan pengembangan dengan menggunakan bahan yang berbeda dan menggunakan variasi ketebalan serta diameter yang berbeda pada skala nano terhadap berbagai bentuk pilar (nano *hexagonal*, nano *cylinder*, dan nano *square*). Hal ini dilakukan agar dapat mengetahui perbedaan atau perbandingan feromana resonansi feromagnetik dari setiap bahan magnetik.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Aharoni, A. 1996. *Introduction to The Theory of Ferromagnetic*. New York: Oxford Science Publication.
- Askeland. D. R., P. P. Fulay., dan W. J. Wright. 2011. *The Science and Engineering of Materials Sixth Edition*. USA: Cengage Learning.
- Bloch, F. 1932. Theory of Exchange Problem and Remanence Phenomena of Ferromagnetic Substables. *Journal of Physics*. 74(295): 1-67.
- Blundell, S. 2001. *Magnetism in Condensed Matter*. New York: Oxford University Press.
- Borg, R. J. 1992. *The Physical Chemistry of Solids*. USA: Academic Press, Inc.
- Callister, W. D. dan D. G. Rethwisch. 2009. *Material Science and Engineering An Intoduction Eight Edition*. New York: Oxford University Press, Inc.
- Chatterji T., G. J. McIntyre., and A. Stunault. 2000. Understanding colossal magnetoresistance. *Neutron and New Materials*.
- Coey, J. M. D. 2009. *Magnetism and Magnetic Materials*. New York: Cambridge University Press.
- Chung, Y. 2007. *Introduction to Material Science and Engineering*. USA: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Ebbing, D. D. dan S. D. Gammon. 2017. *General Chemistry Eleventh Edition*. USA: Cengage Learning.
- Fangohr, H., T. Fischbacher., M. F. G. Bordignon., J. Generowicz., A. K. M. Walter., dan M. Albert. 2012. NMAG: Computational Micromagnetism. <http://nmag.soton.ac.uk/nmag>. [Diakses pada 12 Februari 2019].

- Gor'kov, L. P., & V. Z. Kresin. 2004. Mixed-valence Manganites: Fundamental and Main Properties. *Physics Report*. Vol. **400**. 149-208.
- Huajun, L. 2007. *Magnetotransport Properties of Strontium Doped Lanthanum Manganite Nanoconstriction Array*. Singapore: National University of Singapore.
- Ida, N. 2004. *Engineering Electromagnetics Second Edition*. USA: Springer.
- Ismail. 2013. Studi Mikromagnetik Proses Magnetisasi dan Spektrum Suseptibilitas Ferromagnetik Elemen Diamon-Spaped. *Tesis*. Depok: Universitas Indonesia.
- Kittel, C. 2005. *Introduction to Solid State Physics 8th*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Kittel, C. 1948. On the Theory of Ferromagnetic Resonance Absorption. *Phys. Rev.* Vol. **73**. 155.
- Liu, Z. 2007. *Magnetization Dynamic In The Presence of Nanoscale Spatial Inhomogeneity*, Departement of Physics, Edmonton, Fall.
- Mardiansyah, D. 2013. Analisa Sifat Ferromagnetik Material Menggunakan Metode Monte Carlo. *Jurnal Ilmiah Edu Research*. Vol. **2**. 65.
- Mardona. 2012. Dinamika Domain Wall dan Efek Anisotropi pada Material Ferromagnetik Co dan Ni Berbentuk *Nanowire*. *Tesis*. Jakarta: Universitas Jakarta.
- Motome, Y., N.Furukawa., dan N. Nagaosa. 2003. Competing Orders and Disorder-Induced Insulator to Metal Transition in Manganites. *Phys. Rev. Lett.* **91**, 167204.
- Mulyani, Y. T. 2017. Investigasi Sifat-sifat Magnetik Alloy  $\text{Co}_{(1-x)}\text{Fe}_x$  *Nanocube* dan *Nanosphere* dalam Variasi Komposisi  $\text{Fe}_{(x)}$ . *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.

- Musyarofah, L. 2016. Studi Fenomena STT (Spin Transfer Torque) pada Bahan  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x=3$ ) Berbentuk *Nanowire* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Ni'mah, K. 2018. Kajian Fenomena STT (Spin Transfer Torque) pada Bahan Permalloy NiFe Berbentuk *Nanowire* Melalui Simulasi Mikromagnetik. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Nicola, A. S. 2011. *Magnetic Materials Fundamental and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Norita. 2008. Studi Sifat-sifat Listrik Bahan Magnetik FeSi. *Tesis*. Depok: Universitas Indonesia.
- Pecchi, G. 2008. *Struktural Magnetic and Catalytic Properties of Perovskite-type Mixed Oxides  $\text{LaMn}_{1-y}\text{Co}_y\text{O}_3$  ( $y = 0,0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1$ )*. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 282, 158-166.
- Puri, R. K. dan V. K. Babbar. 2001. *Solid State Physics and Electronics*. New Delhi: S. Chand & Company LTD.
- Rohman, L. 2013. Investigasi Sifat-sifat Magnetik Bahan LSMO ( $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ) untuk Aplikasi Storage Device dengan Menggunakan Modeling Mikromagnetik. *Laporan Hibah Doktor*. Jember: Universitas Jember.
- Skomski, R. 2008. *Simple Models of Magnetism*. New York: Oxford University Press.
- Salomon, M. B. dan M. Jaime. 2001. The Physics of Manganites: Structure and Transport. *Reviews of Modern Physics*. Vol. **73**. 583.
- Subekti. 2010. Pengukuran Anisotropi Suseptibilitas Magnetik. *Skripsi*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Tipler, P. A. 2001. *Fisika Untuk Sains dan Teknik Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.

Tisza, M. 2001. *Physical Metallurgy for Engineers*. London: Freund Publishing House ltd.

Urushibara, A., Y. Maritomo., T. Arima., A. Asamitsu., G. Kido., dan Y. Tokura. 1995. Insulator-Metal Transition and Giant Magnetoresistance in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ . *Phys Rev B Condens Matter*. Vol. **51** (20). 14103-14109.

Wicaksono, A. 2016. Studi Resonansi Feromagnetik  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  Berbentuk Hexagonal Menggunakan Simulasi Mikromagnetik. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.

Yani, A., Ridwan dan Mujamilah. 2014. Simulasi Histerisis Pada Bahan Feromagnetik Dengan Model JILES-ATHERTON. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, ISSN: 1411-1098: 85-90.

Zeng, P. Y., Z. Chen., W. Zhou, H. X. Gu., Z. Shao & S. Liu. 2007. Re-evaluation of  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$  Perovskit As Oxygen Semi-permeable Membrane. *Journal of Membrane Science*, Vol. 291, pp. 148-156.