



**STUDI FENOMENA STT (*SPIN TRANSFER TORQUE*) PADA BAHAN
 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) BERBENTUK *NANOWIRE* MENGGUNAKAN
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

SKRIPSI

Oleh

**Latifathul Musyarofah
NIM 121810201047**

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



**STUDI FENOMENA STT (*SPIN TRANSFER TORQUE*) PADA BAHAN
 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) BERBENTUK *NANOWIRE* MENGGUNAKAN
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

SKRIPSI

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

Oleh

Latifathul Musyarofah
NIM 121810201047

JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2016

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Ibunda Usmiyati (Almh) dan Ayahanda Maeno (Alm) yang tercinta yang telah membesarkan dan mendidik dengan penuh kasih sayang;
2. guru-guru sejak taman kanak-kanak sampai dengan perguruan tinggi yang telah membimbing serta memberikan ilmunya pada penulis;
3. Kakak-kakakku Imam Muhayat, S.Ag., Mustaqimah, Istiqomah dan seluruh keluarga besar yang selalu mendukung, menyemangati dan menyayangi penulis;
4. Moch. Shobirin Kusuma, S.Si., telah memotivasi serta memberi dukungan kepada penulis;
5. teman-teman perguruan tinggi (Lorentz'12) yang telah menemani proses kehidupan penulis;
6. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

MOTTO

“Katakanlah, apakah sama orang-orang yang mengetahui dengan orang-orang yang tidak mengetahui? Sebenarnya hanya orang yang berakal sehat yang dapat menerima pelajaran.”
(terjemahan Surat *Az-Zumar* ayat 9)^{*)}

“Engkau tak dapat meraih ilmu kecuali dengan enam hal yaitu cerdas, selalu ingin tahu, tabah, punya bekal dalam menuntut ilmu, bimbingan dari guru dan dalam waktu yang lama.”
(Ali bin Abi Thalib)^{**)}

^{*)} Departemen Agama Republik Indonesia. 2005. *Al Qur'an dan Terjemahan*. Jakarta. Al Huda.
^{**)} <http://www.duniakata.com/2014/11/45-kata-mutiara-tentang-pentingnya-ilmu.html>.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : Latifathul Musyarofah

NIM : 121810201047

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Studi Fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) pada Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) Berbentuk *Nanowire* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” 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.

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

Jember, 28 Oktober 2016

Yang menyatakan

Latifathul Musyarofah
NIM 121810201047

SKRIPSI

**STUDI FENOMENA STT (*SPIN TRANSFER TORQUE*) PADA BAHAN
 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) BERBENTUK *NANOWIRE* MENGGUNAKAN
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

Oleh

Latifathul Musyarofah
NIM 121810201047

Pembimbing

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

Dosen Pembimbing Anggota : Endhah Purwandari, S.Si., M.Si.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Studi Fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) pada Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) Berbentuk *Nanowire* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember

Tim Penguji:

Dosen Pembimbing Utama,

Dosen Pembimbing Anggota,

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

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

Dosen Penguji I,

Dosen Penguji II,

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

Puguh Hiskiawan, S.Si., M.Si.
NIP 197412152002121001

Mengesahkan
Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,

Drs. Sujito, Ph.D.
NIP 196102041987111001

RINGKASAN

Studi Fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) pada Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) Berbentuk *Nanowire* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik ; Latifathul Musyarofah, 121810201047; 2016; 39 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (*Lanthanum Strontium Manganese Oxide*) merupakan salah satu bahan magnetik CMR (*Colossal Magnetoresistance*) berbasis manganit khususnya oksida mangan yang mempunyai rumus umum $\text{A}(\text{MnO}_3)$ dengan A adalah unsur bervalensi tiga, biasanya berupa unsur tanah jarang (misal: La, Nd, Pr, Sm). Penambahan *doping* unsur bervalensi dua seperti alkali tanah (misal: Sr, Ca, Ba, Pb) akan mengubah rumusnya menjadi $(\text{A}_{1-x}\text{B}_x)\text{MnO}_3$. Bahan ini dapat diaplikasikan sebagai media penyimpanan data atau *storage device*. Secara umum, penelitian tentang bahan magnetik yang diaplikasikan sebagai media penyimpanan data dapat dibagi menjadi dua yaitu yang berhubungan dengan struktur domain magnet dan yang berhubungan dengan dinamika dinding domain. Kedua penelitian tersebut dilakukan dengan mengaplikasikan medan magnet luar atau arus listrik melalui fenomena STT (*Spin Transfer Torque*).

Spin Transfer Torque secara sederhana dapat dihasilkan ketika bahan diinjeksi arus listrik sehingga dapat merubah orientasi spin pada momen magnet. Pada bahan *multilayer*, arus listrik yang diinjeksikan akan mengalir pada dua lapisan tipis feromagnetik yang diselingi bahan non-magnetik. Arus listrik mengalir lebih mudah ketika domain magnet dalam lapisan feromagnetik berorientasi dalam satu arah dibandingkan berlawanan arah. Penerapan arus yang dialirkan dapat menghasilkan tekanan dinding domain dalam arah aliran elektron. Tekanan dinding domain tersebut menghasilkan perubahan magnetisasi seiring peningkatan rapat arus yang terjadi.

Perubahan nilai magnetisasi tersebut dapat berpengaruh terhadap karakteristik magnetik dari bahan itu sendiri.

Pada penelitian ini telah dilakukan dua variasi pada simulasi fenomena *spin transfer torque*. Pertama yaitu untuk menggambarkan pengaruh variasi arus terhadap magnetisasi yang dapat direpresentasikan dalam bentuk grafik hubungan magnetisasi terhadap waktu (M-t). Kedua, dilakukan simulasi pengaruh variasi diameter terhadap energi total yang meliputi energi demagnetisasi dan energi *exchange* yang dapat direpresentasikan dalam grafik hubungan Energi terhadap arus. Simulasi dilakukan dengan memodelkan bahan ke dalam geometri *nanowire* dengan panjang 70 nm dan diameter 10 nm, 20 nm dan 30 nm. Injeksi arus yang diberikan sedemikian rupa sehingga rapat arus (J) yang diberikan yaitu $1 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, $2 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, $4 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, $6 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, dan $8 \times 10^{10} \text{A/m}^2$. Selanjutnya mempersiapkan parameter *input* bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$). *Output* dari simulasi akan diperoleh beberapa data, diantaranya file .vtk yang digunakan untuk visualisasi struktur domain dan file .ndt yang dapat diolah untuk menghasilkan grafik-grafik hasil simulasi.

Hasil pertama dalam penelitian ini menggambarkan posisi dinding domain yang berputar ketika arus diberikan, dimana semakin besar arus yang diberikan perubahan posisi dinding domain semakin besar. Perubahan posisi dinding domain tersebut dapat digunakan untuk menentukan kecepatan dinding domain. Kecepatan dinding domain bertambah seiring bertambahnya arus. Kecepatan maksimum sebesar 7,38 m/s diperoleh ketika bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) diinjeksi rapat arus paling besar yaitu $8 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ pada diameter 30 nm. Fenomena ini didukung dengan hasil grafik M-t dimana peningkatan arus menunjukkan osilasi yang semakin rapat dengan bertambahnya diameter. Hasil kedua memperlihatkan energi total meningkat dengan bertambahnya diameter *nanowire*. Hal tersebut dapat disebabkan oleh kontribusi energi demagnetisasi yang meningkat dengan bertambahnya volume. Sedangkan pada energi *exchange* lebih kecil dibandingkan energi demagnetisasi untuk pertambahan diameter.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat serta nikmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi Fenomena STT (*Spin Trasfer Torque*) pada Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) Berbentuk *Nanowire* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

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

1. Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama, dan Endhah Purwandari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, serta perhatian demi selesainya penelitian dan penulisan skripsi ini;
2. Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D., selaku Dosen Penguji I dan Puguh Hiskiawan, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan, kritikan dan saran demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Nurul Priyantari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama penulis jadi mahasiswa;
4. teman-teman satu laboratorium Komputasi yang telah memotivasi serta memberi dukungan kepada penulis;
5. sahabat-sahabat fisika: Ernik Dwi Safitri, Himmah Khasanah, Lutfi Halimatus Sa'diyah, Nur Irvansyah M., Avkarina Agustin, Dianita Ajeng R., Ajeng Yulianawati, Elok Hidayah, Esti Wulandari, Elfa Nurul F., Fitriana F.Z., Maya Alfatun N., Samsul Arifin, , Ervin Irayanti, Agnes Dara S., Siti Lailatul A., Greta Andika F., serta seluruh angkatan 2012 (Lorentz'12) yang telah mengisi hari-hari penulis selama menimba ilmu di Universitas Jember;

6. HIMAFI (Himpunan Mahasiswa Fisika) FMIPA Universitas Jember yang telah memberikan ilmu dan pengalaman kepada penulis;
7. Edy Sutrisno, Taufik Usman, Sunarto, Ansori, Budiyo, Aji Priyono serta segenap keluarga besar FMIPA Universitas Jember;
8. semua pihak yang turut membantu demi selesainya skripsi ini.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap tulisan ini dapat bermanfaat bagi disiplin ilmu Fisika serta kepada setiap pembacanya.

Jember, Oktober 2016

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iv
HALAMAN PEMBIMBINGAN.....	v
HALAMAN PENGESAHAN.....	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Bahan Ferromagnetik	5
2.2 Proses STT (<i>Spin Transfer Torque</i>) dalam Bahan Feromagnetik	6
2.3 Bahan Magnetik Berbasis Manganit.....	8
2.3.1 Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$)	9

2.3.2 Struktur Kristal $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$).....	9
2.4 Penelitian lain tentang Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) dan STT (<i>Spin Transfer Torque</i>).....	10
2.5 Persamaan LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert)	11
2.6 Simulasi Mikromagnetik.....	15
BAB 3. METODE PENELITIAN	17
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	17
3.2 Alat Penelitian	17
3.3 Prosedur Penelitian	17
3.3.1 Geometri Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$).....	20
3.3.2 Parameter Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$).....	21
3.3.3 Pembuatan Gambar Domain Spin.....	21
3.3.4 Pembuatan Grafik.....	22
3.4 Analisis Data... ..	23
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	25
4.1 Pengaruh Variasi Arus Listrik Injeksi terhadap Magnetisasi Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) pada Fenomena STT (<i>Spin Transfer Torque</i>).....	25
4.2 Pengaruh Variasi Diameter <i>Nanowire</i> terhadap Energi Total Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$).....	32
BAB 5 PENUTUP.....	35
5.1 Kesimpulan.....	35
5.2 Saran.....	35
DAFTAR PUSTAKA	37
LAMPIRAN.....	40

DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 Geometri panjang dan diameter <i>nanowire</i>	21
3.2 Parameter bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$).....	21
4.1 Kecepatan rata-rata dinding domain	28

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Momen magnet dengan orientasi 0° sampai 180°	5
2.2 Pengurangan energi demagnetisasi akibat orientasi arah dari dipol-dipol magnet	6
2.3 Menunjukkan torsi pada <i>free layer</i> ketika diberikan arus pada arah yang berlawanan.....	7
2.4 Sebuah sketsa dari sistem. Panah pada sumbu silinder mewakili magnetisasi	8
2.5 Struktur ideal <i>perovskite</i> dengan formula ABO_3 , dimana A adalah kation berukuran besar, B adalah kation berukuran kecil dan O sebagai pembentuk oktahedralnya.....	10
2.6 Gerak presisi dari momen magnet terhadap medan efektif yaitu (a) tanpa redaman (b) dengan redaman (<i>damping</i>)	12
3.1 Ilustrasi proses penelitian	18
3.2 Diagram alir kegiatan simulasi	20
3.3 Menentukan nilai kecepatan dinding domain pada <i>nanowire</i> menggunakan metode <i>time resolved imaging</i>	24
4.1 Evolusi posisi dinding domain dalam bahan $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x=0,3$) dengan variasi rapat arus: (a) $1 \times 10^{10}A/m^2$, (b) $2 \times 10^{10}A/m^2$, (c) $4 \times 10^{10}A/m^2$, (d) $6 \times 10^{10}A/m^2$, (e) $8 \times 10^{10}A/m^2$, dimana masing-masing indeks warna di sisi bawah merepresentasikan skala nilai magnetisasi	27
4.2 Grafik magnetisasi terhadap waktu untuk variasi arus dengan diameter bahan 10 nm.....	31

4.3 Grafik magnetisasi terhadap waktu untuk variasi arus dengan diameter bahan 20 nm.....	31
4.4 Grafik magnetisasi terhadap waktu untuk variasi arus dengan diameter bahan 30 nm.....	32
4.5 Grafik hubungan energi terhadap rapat arus untuk diameter bahan 10 nm	33
4.6 Grafik hubungan energi terhadap rapat arus untuk diameter bahan 20 nm	33
4.7 Grafik hubungan energi terhadap rapat arus untuk diameter bahan 30 nm	34

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Struktur Domain pada $t=0$ ns, $t=3$ ns dan $t=6$ ns	40
A.1 Posisi Dinding Domain untuk $J = 1 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$	40
A.2 Posisi Dinding Domain untuk $J = 2 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$	41
A.3 Posisi Dinding Domain untuk $J = 4 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$	41
A.4 Posisi Dinding Domain untuk $J = 6 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$	42
A.5 Posisi Dinding Domain untuk $J = 8 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$	43
B. Nilai Kecepatan Dinding Domain.....	44
B.1 Kecepatan Dinding Domain untuk $J = 1 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ untuk Diameter 10 nm, 20 nm dan 30 nm	44
B.2 Kecepatan Dinding Domain untuk $J = 2 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ untuk Diameter 10 nm, 20 nm dan 30 nm	46
B.3 Kecepatan Dinding Domain untuk $J = 4 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ untuk Diameter 10 nm, 20 nm dan 30 nm	47
B.4 Kecepatan Dinding Domain untuk $J = 6 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ untuk Diameter 10 nm, 20 nm dan 30 nm	49
B.5 Kecepatan Dinding Domain untuk $J = 8 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ untuk Diameter 10 nm, 20 nm dan 30 nm	50

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengembangan teknologi bahan telah sampai pada upaya pembuatan bahan dalam ukuran minimalis, hingga berskala nanometer. Salah satu aplikasinya dalam bidang teknologi informasi adalah dimanfaatkannya bahan feromagnetik berskala nanometer sebagai media penyimpanan data, atau *data storage*. Selain mampu bekerja lebih cepat, bahan feromagnetik dalam skala nanometer dapat menekan biaya produksi bahan (Piramanayagam, 2007). Oleh karena itu, teknologi media penyimpanan data berbasis bahan feromagnetik menjadi perhatian besar bagi saintis di seluruh dunia.

Bahan feromagnetik merupakan bahan yang mempunyai kemampuan tinggi untuk membentuk medan magnet di dalamnya. Momen magnet spontan tetap dihasilkan walaupun berada pada medan magnet eksternal nol. Keberadaan momen magnet spontan ini menandakan bahwa spin elektron dan momen magnet bahan feromagnetik tersusun secara teratur (Yani, *et al.*, 2014). Susunan momen magnet dalam domain magnet yang teratur tersebut dapat dikembangkan dalam penelitian tentang sifat magnetik bahan. Konfigurasi tersebut dapat dikontrol menggunakan medan magnet. Secara umum penelitian tentang domain magnet dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu yang berhubungan dengan struktur domain magnet dan yang berhubungan dengan dinamika dinding domain. Kedua penelitian tersebut dilakukan dengan mengaplikasikan medan magnet luar atau arus listrik melalui fenomena *Spin Transfer Torque* (Ismail, 2013).

Spin Transfer Torque secara sederhana dapat dihasilkan ketika bahan diinjeksi arus listrik sehingga merubah orientasi spin pada momen magnet. Pada bahan *multilayer*, arus listrik yang diinjeksikan akan mengalir pada dua lapisan tipis feromagnetik yang diselingi bahan non-magnetik. Arus listrik mengalir lebih mudah

ketika domain magnet dalam lapisan feromagnetik berorientasi dalam satu arah dibandingkan berlawanan arah. Ketika arus diberikan maka arus akan mempengaruhi domain magnet dan nilai magnetisasi. Penerapan arus yang dialirkan dapat menghasilkan tekanan dinding domain dalam arah aliran elektron. Tekanan dinding domain tersebut menghasilkan perubahan magnetisasi seiring peningkatan rapat arus yang terjadi (Franchin, 2009). Menurut Atmono dan Yunanto (2002), perubahan orientasi spin dalam bahan feromagnetik berhubungan dengan fenomena GMR (*Giant Magnetoresistance*). Efek GMR pada bahan feromagnetik berhubungan dengan spin elektron yang memiliki dua nilai berbeda (*up* dan *down*) dimana ketika spin-spin tersebut melintasi bahan yang telah dimagnetisasi maka salah satu spin mengalami hambatan yang berbeda dari yang dialami spin lainnya. Perubahan orientasi spin tersebut menjadi daya tarik dalam perkembangan pada piranti penyimpanan magnetik di masa depan.

Pada penelitian yang pernah dilakukan, telah diinvestigasi sifat-sifat magnetik bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) yang diaplikasikan sebagai *storage device*, menggunakan pemodelan mikromagnetik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa diameter kritis bahan berada pada nilai 125 nm. Ini berarti bahwa bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) akan bersifat *multi domain* bila diameternya melebihi nilai 125 nm (Rohman, 2013). Dengan demikian, nampak bahwa faktor ukuran bahan sangat menentukan karakteristik magnetik dari bahan itu sendiri.

Berbagai hasil penelitian telah banyak dipublikasikan tentang sifat-sifat intrinsik yang dimiliki bahan feromagnetik pada skala nanometer menggunakan simulasi mikromagnetik, misalnya penelitian tentang dinamika proses magnetisasi yang dapat ditunjukkan dengan memberikan medan magnet eksternal. Dalam penelitian tersebut teramati dua tipe struktur domain yaitu tipe *single domain* dan tipe *vortex*. Tipe *single domain* ditunjukkan dengan energi demagnetisasi yang dominan dibandingkan energi *exchange*. Sedangkan tipe *vortex* ditandai dengan energi *exchange* lebih dominan dibandingkan energi demagnetisasinya (Ismail, 2013). Pada penelitian lain tentang *Spin Transfer Torque* pada bahan feromagnetik oleh Gerretsen

(2008), menunjukkan bahwa pada bahan Py perubahan arah spin membutuhkan waktu 0,15 ns dengan besar arus yang diberikan yaitu 0,98 mA, sedangkan pada bahan Co perubahan arah spinnya membutuhkan waktu 0,11 ns dengan arus yang diberikan yaitu 1,96 mA. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar arus yang diberikan maka semakin cepat perubahan arah spin pada bahan.

Berdasarkan uraian di atas, kajian tentang fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) di bawah pengaruh injeksi arus listrik menjadi menarik untuk disimulasikan. Karakteristik magnetik bahan dalam hal ini dapat diprediksikan dengan melihat nilai magnetisasi bahan di bawah variasi arus injeksi. Selain faktor tersebut, di dalam penelitian ini akan dilakukan pula simulasi sifat magnetik bahan akibat pengaruh ukuran/dimensi dari bahan. Beberapa data dasar sifat magnetik bahan nantinya akan digunakan dalam simulasi mikromagnetik, seperti magnetisasi saturasi, koefisien anisotropi, koefisien pertukaran, parameter *damping*, polarisasi dan lain-lain. Simulasi fenomena STT pada bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) dilakukan dengan menggunakan program NMAG, sebuah program *open source* yang diaplikasikan dalam sistem operasi *Linux*.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana pengaruh variasi arus listrik injeksi terhadap magnetisasi bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) berbentuk *nanowire* pada fenomena *Spin Transfer Torque*?
2. Bagaimana pengaruh variasi diameter *nanowire* terhadap energi total bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$)?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini difokuskan pada pemahaman fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) pada bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ berbentuk *nanowire* yang diaplikasikan untuk

storage device khususnya MRAM melalui pemodelan dan simulasi mikromagnetik dengan bantuan *software* NMAG (*Nano Magnetic*).

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh variasi arus listrik injeksi terhadap magnetisasi bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) berbentuk *nanowire* pada fenomena *Spin Transfer Torque*.
2. Mengetahui pengaruh variasi diameter *nanowire* terhadap energi total bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$).

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penelitian yang akan dilakukan adalah:

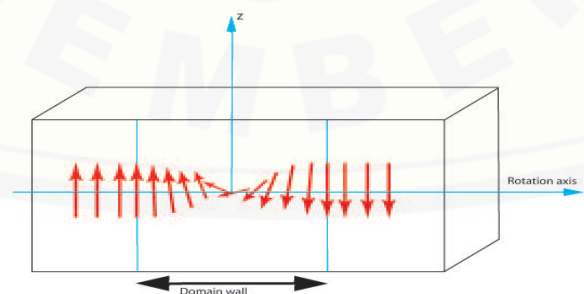
1. Memberikan pengetahuan tentang fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) pada bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) berbentuk *nanowire*.
2. Memberikan informasi tentang potensi bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) sebagai *storage device* khususnya MRAM yang berbasis *Spin Transfer Torque*.
3. Memberikan sumbangan penelitian dalam bidang fisika khususnya dalam bidang fisika komputasi mikromagnetik.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bagian tinjauan pustaka, dijelaskan beberapa pokok pembahasan meliputi bahan feromagnetik, proses STT (*Spin Transfer Torque*) dalam bahan feromagnetik, bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$), penelitian lain tentang bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) dan STT (*Spin Transfer Torque*), persamaan LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert) serta simulasi mikromagnetik.

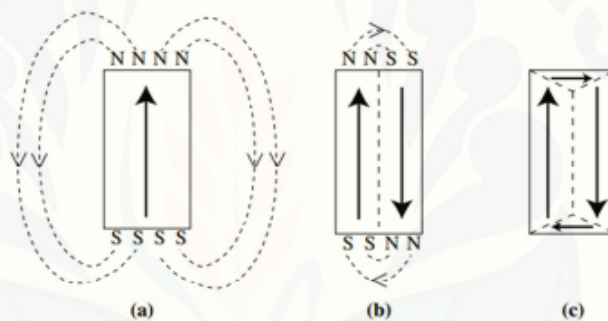
2.1 Bahan Feromagnetik

Salah satu dasar dari bahan feromagnetik adalah memiliki magnetisasi spontan yang bergantung pada temperatur. Jika bahan feromagnetik dipanaskan sampai di atas temperatur Curie maka magnetisasi spontan menghilang dan bahan menjadi paramagnetik karena momen magnetnya terorientasi secara acak. Bahan feromagnetik walaupun memiliki magnetisasi spontan di bawah temperatur Curie, tetapi secara makroskopik bahan feromagnetik tidak menunjukkan adanya magnetisasi atau $M=0$ (Norita, 2008). Hal tersebut disebabkan adanya domain-domain magnet, yaitu daerah dimana orientasi dipol momen magnetnya searah sehingga memiliki magnetisasi spontan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Daerah yang membatasi antara domain magnet dalam bahan disebut dinding domain (Bloch, 1932).



Gambar 2.1 Momen magnet dengan orientasi 0° sampai 180° (Sumber: Nicola, 2011)

Perilaku dari *domain walls* dalam pengaruh medan magnet luar H dapat dilihat pada Gambar 2.2. Perilaku domain magnet dan *domain walls* sangat penting dalam memahami sifat-sifat magnet bahan feromagnetik (Norita, 2008). Perilaku domain magnet dapat memengaruhi besarnya energi demagnetisasi yaitu energi yang terkait dengan dipol-dipol momen magnet bahan (Ismail, 2013). Gambar 2.2 (a) menunjukkan saat dipol-dipol dari bahan magnetik memiliki orientasi arah yang sama satu dengan lainnya, maka energi demagnetisasinya menjadi besar, dibandingkan dengan gambar 2.2 (b) dengan bahan magnetik saat dipol-dipol momen magnet anti paralel satu dengan lainnya, sedangkan gambar 2.2 (c) merupakan keadaan dimana energi demagnetisasinya minimum (Nicola, 2011).

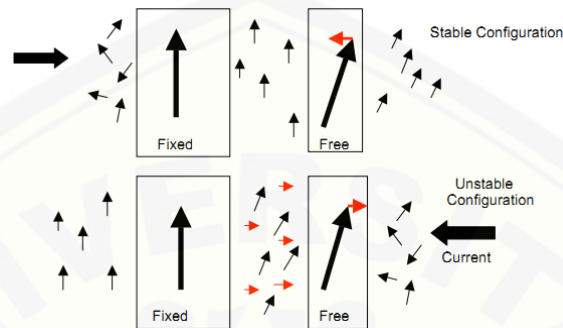


Gambar 2.2 Pengurangan energi demagnetisasi akibat orientasi arah dari dipol-dipol momen magnet (Sumber: Nicola, 2011)

2.2 Proses STT (*Spin Transfer Torque*) dalam Bahan Feromagnetik

Spin Transfer Torque dapat dilihat pada bahan magnetik *multilayer* yang terdiri dari *free layer*, *spacer*, dan *fixed layer*. Jika arus melewati *fixed layer* terlebih dahulu maka arus spin akan bergerak ke kanan dan mendesak torsi untuk mensejajarkan spin pada *free layer* dengan spin pada *fixed layer* (Gerretsen, 2008). Pada kondisi ini terjadi perubahan resistansi yang kecil, karena magnetisasi bahan berotasi ke arah paralel (Atmono dan Yunanto, 2002). Sebaliknya, jika arus terlebih dahulu melewati *free layer* maka arus spin akan bergerak ke kiri dan mendesak torsi sehingga magnetisasi bahan berotasi ke arah antiparalel dengan spin pada *fixed layer* sehingga

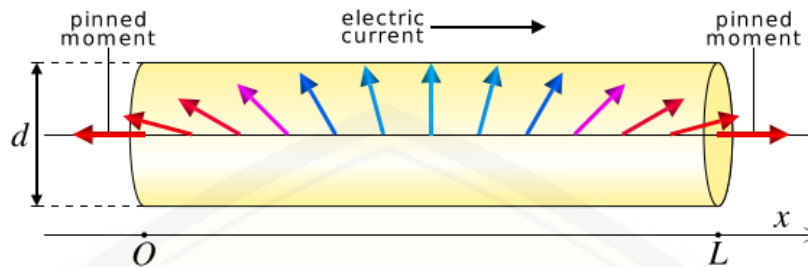
terjadi perubahan resistansi yang besar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 (Gerretsen, 2008).



Gambar 2.3 Menunjukkan torsi pada *fixed layer* dan *free layer* ketika diberikan arus pada arah yang berlawanan (Sumber: Gerretsen, 2008)

Bahan feromagnetik yang diinjeksikan dengan arus akan menyebabkan perubahan orientasi arah spin yang dikenal sebagai *Spin Transfer Torque*. Arus lebih mudah mengalir pada spin yang berorientasi searah dibandingkan yang berlawanan arah. (Henny, 2008). Salah satu riset yang dikembangkan oleh Vlaminic dan Baillieu (2008) adalah mengamati aliran arus spin dalam bahan feromagnetik *nanowire*. Bahan feromagnetik *nanowire* pada saat diinjeksi arus maka akan menggerakkan *domain walls* dengan disertai perubahan arah spin.

Gerakan *domain walls* dalam arah aliran arus dapat dihasilkan ketika spin terpolarisasi oleh arus. Penerapan arus tersebut mampu menghasilkan tekanan *domain walls* dalam arah aliran elektron. Suatu sistem mencapai kesetimbangan ditandai dengan rotasi dari tekanan *domain walls* tersebut di sekitar sumbu *nanowire* yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Momen magnet yang menjepit berada di ujung kanan dan kiri *nanowire* yang bergerak menuju ke kanan dan kiri di sepanjang permukaan *nanowire* sehingga dinding domain menjadi mengembang (Franchin, 2009).



Gambar 2.4 Sebuah sketsa dari sistem. Panah pada sumbu silinder mewakili magnetisasi (Sumber: Franchin, 2009)

STT (*Spin Transfer Torque*) dapat disebut sebagai proses manipulasi dan pengontrolan arus spin dalam bidang *spintronics*. Spintronika (*spintronics*) merupakan bidang baru dalam teknologi modern. *Spintronics* berasal dari kata *spin based electronics*, yakni elektronika yang mengontrol arus menggunakan spin elektron. Kemunculan spintronika dipicu oleh penemuan efek GMR (*Giant Magnetoresistance*) pada logam feromagnetik. Aplikasi memori spintronika telah banyak dikaji seperti MRAM (*Magnetic Random Acces Memory*) (Ismail, 2013).

MRAM (*Magnetic Random Acces Memory*) merupakan sebuah *non volatile* memori yang menggunakan muatan magnet untuk menyimpan data. Terdapat beberapa jenis MRAM seperti STT-MRAM, NV-RAM, dan lain-lain yang menjanjikan kapasitas penyimpanan yang lebih besar dengan biaya lebih murah. Data dalam MRAM tidak disimpan sebagai muatan listrik tapi oleh elemen penyimpan yang bersifat magnetis. Elemen tersebut terbentuk dari dua bahan feromagnetik yang dipisahkan oleh lapisan isolator (Machsuni, *et al.*, Tanpa Tahun).

2.3 Bahan Magnetik Berbasis Manganit

Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (*Lanthanum Strontium Manganese Oxide*) merupakan salah satu bahan magnetik CMR (*Colossal Magnetoresistance*) berbasis manganit khususnya oksida mangan yang mempunyai rumus umum $\text{A}(\text{MnO}_3)$ dengan A adalah unsur bervalensi tiga, biasanya berupa unsur tanah jarang (misal: La, Nd, Pr, Sm).

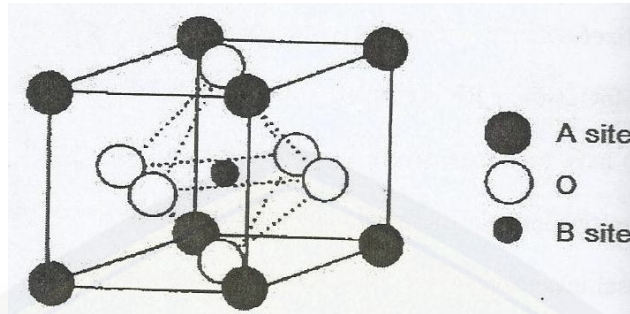
Penambahan *doping* unsur bervalensi dua seperti alkali tanah (misal: Sr, Ca, Ba, Pb) akan mengubah rumusnya menjadi $(A_{1-x}B_x)MnO_3$. Berdasarkan rumus tersebut dikenal beberapa bahan magnetik oksida mangan seperti: $LaMnO_3$, $PrMnO_3$, atau $La_{1-x}Sr_xMnO_3$, $La_{1-x}Ca_xMnO_3$ (Rohman, 2013).

2.3.1 Bahan $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x=0,3$)

Bahan $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x=0,3$) terbentuk dari bahan $LaMnO_3$ yang mendapat penambahan dopan ion divalen Sr yang dapat mengubah sifat *transport* listrik bahan $LaMnO_3$. Bahan $LaMnO_3$ yang didopan oleh ion Sr^{2+} akan diikuti transisi ion Mn^{3+} menjadi ion Mn^{4+} artinya terdapat satu elektron hilang dan menciptakan lubang (*hole*) yang memungkinkan terjadinya lompatan elektron sehingga bahan bersifat logam. Perubahan konsentrasi dopan (x) akan menghasilkan variasi yang beragam dilihat dari sifat magnetik bahan (Gor'kov dan Kresin, 2004). Bahan $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x=0,3$) memiliki sifat feromagnetik pada konsentrasi doping (x) di sekitar $x \approx 0,33$ dengan temperatur Curie sebesar 370K (97°C). Ini adalah alasan bahan $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x=0,3$) diperlakukan sebagai aplikasi penyimpanan data karena memiliki temperatur Curie di atas temperatur kamar (Urushibara, *et al.*, 1995).

2.3.2 Struktur Kristal $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x=0,3$)

Bahan $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x=0,3$) merupakan salah satu bahan campuran dari feromagnetik yang berbentuk *perovskite*. Struktur kristal *perovskite* dalam sistem kristal adalah orthorombik. Formula umum bahan ini adalah ABO_3 dimana A dan B adalah kation yang ukurannya berbeda. Struktur ideal *perovskite* berbentuk oktahedral seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5 (Gor'kov dan Kresin, 2004). Pada bahan LSMO, ion La^{3+} yang bervalensi tiga dan ion Sr^{2+} dengan valensi dua menempati A *site*. Sedangkan ion Mn dengan muatan 3+ dan 4+ terletak di pusat dari bidang oktahedral. Posisi B *site* diduduki oleh ikatan oksigen.



Gambar 2.5 Struktur ideal *perovskite* dengan formula ABO_3 , dimana A adalah kation berukuran besar, B adalah kation berukuran kecil dan O sebagai pembentuk oktahedralnya (Sumber: Huajun, 2007)

2.4 Penelitian lain tentang Bahan $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x=0,3$) dan STT (*Spin Transfer Torque*)

Beberapa penelitian tentang bahan $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x=0,3$) dan STT (*Spin Transfer Torque*) terdahulu adalah sebagai berikut:

1. Rohman (2013), dalam simulasinya tentang investigasi bahan $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x=0,3$) dalam aplikasi *thin film* dalam berbagai bentuk dan ukuran. Bahan ini dalam bentuk *nanodisk* bersifat *single domain* untuk ketebalan *thin film* sampai dengan 15 nm. Selain itu, ditinjau dari analisis energinya menunjukkan bahwa semakin bertambah diameter, energi demagnetisasi cenderung lebih dominan dibandingkan energi *exchange*. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur domain akan cenderung lebih dominan pada keadaan *single domain*.
2. Gerretsen (2008), dalam penelitiannya menunjukkan bahwa pada bahan Py perubahan arah spin membutuhkan waktu 0,15 ns dengan besar arus yang diberikan yaitu 0,98 mA, sedangkan pada bahan Co perubahan arah spinnya membutuhkan waktu 0,11 ns dengan arus yang diberikan yaitu 1,96 mA.
3. Mardona (2012), dalam penelitiannya melakukan pengamatan dinamika *domain wall* dan efek anisotropi pada bahan feromagnetik Co dan Ni dalam bentuk *nanowire*. Hasil pengamatan memperlihatkan kecepatan *domain wall* meningkat dengan bertambahnya medan magnet luar setelah medan Walker *breakdown* atau

medan magnet di bawah medan magnet kritis. Struktur *domain wall* memperlihatkan struktur berbentuk *transverse* sebelum medan Walker *breakdown* dan timbul struktur *vorte*, anti *vortex wall* sesudah medan Walker *breakdown*.

4. Franchin (2009), dalam simulasinya tentang penerapan arus listrik pada nanopilar dengan panjang 40 nm dan diameter 20 nm, menghasilkan bahwa dinding domain memampat di sepanjang arah aliran elektron dengan rapat arus yang diberikan sebesar 10^{11}A/m^2 . Dalam hasilnya menunjukkan bahwa magnetisasi di sumbu x adalah nol. Magnetisasi di sumbu y dan z menunjukkan osilasi yang rapat sampai waktu 6,6 ns.

2.5 Persamaan LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert)

Konsep dasar dalam kemagnetan adalah momen magnet. Pada sistem magnet klasik, momen magnet timbul ketika terdapat arus listrik I di sekitar daerah A yang sangat kecil yang disebut *loop*, maka momen magnet diperoleh dari

$$\mathbf{m} = IA \quad (2.1)$$

Besarnya \mathbf{m} sebanding dengan luas bidang *loop* dan arahnya ditentukan oleh arus tersebut. Momen magnet merupakan vektor normal terhadap bidang dari *loop* yang berupa paralel atau antiparalel dengan vektor momentum sudut. Ketika arus datang dari aliran muatan negatif, maka momen magnet akan memiliki arah antiparalel terhadap sudut vektor momentumnya (Rohman, 2013).

Di dalam pengaruh medan magnet luar, momen magnet tersebut akan mengalami torsi. Torsi ini berhubungan dengan momentum angular melalui persamaan

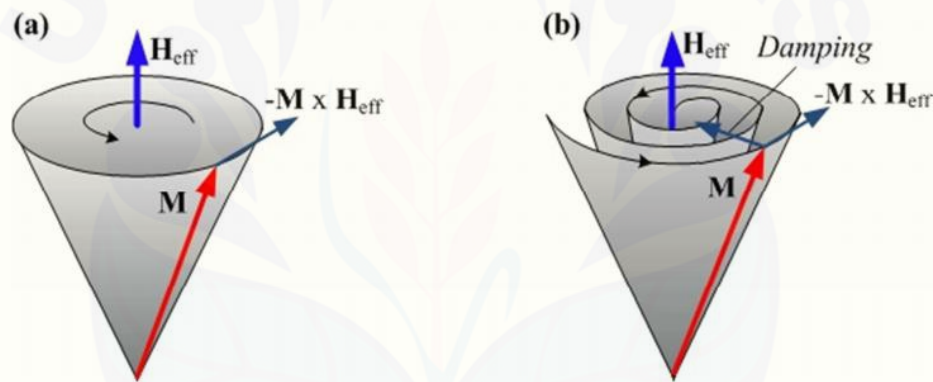
$$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} = (\mathbf{m} \times \mu_0)\mathbf{H} \quad (2.2)$$

Dari persamaan di atas dapat memunculkan persamaan gerak untuk momen magnet terhadap medan magnet eksternal

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = -\frac{e}{2m_e}(\mathbf{m} \times \mu_0)\mathbf{H} \quad (2.3)$$

Persamaan (2.3) diberikan tanpa ada proses *damping* (peredaman). Sebagai hasilnya, momen magnetik hanya mengalami lenggokan dan tidak berotasi ke arah medan eksternal (Rohman, 2013).

Model persamaan Landau-Lifshitz merujuk pada dinamika gerak spin magnet yang digambarkan sebagai gerak rotasi dari momen magnet terhadap arah medan efektif \mathbf{H}_{eff} pada kondisi kesetimbangan. Medan efektif ini ditambahkan untuk menganalogikan peredaman. Medan efektif mampu mengarahkan momen magnet secara perlahan untuk paralel terhadap medan efektif.



Gambar 2.6 Gerak presisi dari momen magnet terhadap medan efektif yaitu (a) tanpa redaman (b) dengan redaman (*damping*) (Sumber: Gilbert, 2004)

Besar \mathbf{H}_{eff} dapat diberikan melalui persamaan berikut:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} \quad (2.4)$$

dengan $\gamma = 2,11 \times 10^5 \text{ mA}^{-1}\text{s}^{-1}$ adalah nilai absolut dari rasio giromagnetik. Dari persamaan di atas tergambar fenomena yang menjelaskan bahwa tidak ada kecenderungan gerak dari spin magnet untuk menyearahkan diri terhadap \mathbf{H}_{eff} seperti pada Gambar 2.6 (a). Kemudian Landau-Lifshitz menyempurnakannya dengan memasukkan faktor redaman (Gambar 2.6 (b)) ke dalam persamaan sehingga:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} - \frac{\lambda}{|\mathbf{M}|} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) \quad (2.5)$$

dimana $\lambda > 0$ merupakan faktor redaman Landau-Lifshitz dan $|\mathbf{M}| = M_s$. Persamaan (2.5) disebut sebagai Persamaan LL (Landau-Lifshitz) (Widodo, 2013).

Menurut Gilbert (1955), persamaan LL tidak akurat untuk kasus dengan faktor redaman yang besar. Selanjutnya Gilbert menambahkan persamaan torca:

$$\frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.6)$$

Sehingga persamaan LL sebelumnya menjadi:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.7)$$

dimana $\alpha > 0$ adalah konstanta redaman Gilbert. Secara umum persamaan (2.7) disebut sebagai Persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert. Jika persamaan (2.7) dikalikan \mathbf{M} , maka akan diperoleh bentuk persamaan:

$$\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) + \mathbf{M} \times \left(\frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right) \quad (2.8)$$

Dengan menggunakan sifat identitas vektor yaitu $\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = (\mathbf{b} \cdot \mathbf{a})\mathbf{c} - (\mathbf{c} \cdot \mathbf{a})\mathbf{b}$ dan menganggap $\mathbf{M} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = 0$, maka persamaannya (2.8) dapat dituliskan kembali sebagai berikut:

$$\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) - \alpha M_s \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.9)$$

Maka dapat disubstitusikan persamaan (2.9) pada persamaan (2.7), diperoleh :

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} - \frac{\gamma \alpha}{M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) - \alpha^2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.10)$$

Sehingga, persamaan terakhir dapat diekspresikan menjadi :

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) - \frac{\gamma}{(1 + \alpha^2) M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) \quad (2.11)$$

Persamaan (2.11) merupakan bentuk dari persamaan Landau-Lifshitz. Dalam persamaan Gilbert, dengan mengasumsikan :

$$\gamma_L = -\frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} \quad , \quad \lambda = \frac{\gamma \alpha}{(1 + \alpha^2)}$$

Suku pertama pada sisi kanan pada persamaan (2.11) menjelaskan tentang proses gerakan precesi dari spin yang berotasi karena pengaruh medan magnet eksternal dan suku kedua menjelaskan mengenai efek disipasi dari gerakan precesi. Suku $(1 + \alpha^2)$ sama dengan satu untuk nilai faktor *damping* α yang kecil. Sehingga persamaan LLG dapat disederhanakan menjadi persamaan LL (Widodo, 2013).

NMAG menyediakan dukungan simulasi untuk model Zhang-Li untuk persamaan LLG dengan tujuan penggambaran interaksi antara rapat arus dan magnetisasi. Persamaan tersebut dapat diberikan sebagai berikut (Massoud, *et al.*, 2009):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = & -\gamma' \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} - \frac{\alpha \gamma'}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) \dots \\ & - \frac{b'_j}{M_s^2} (1 + \alpha \xi) \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times (\nabla \cdot \mathbf{J}) \mathbf{M}) \dots \\ & - \frac{\xi b'_j}{M_s} (\xi - \alpha) \mathbf{M} \times (\nabla \cdot \mathbf{J}) \mathbf{M} \end{aligned} \quad (2.12)$$

dengan pendekatan:

$$\gamma' = \frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} \quad , \quad b'_j = \frac{b_j}{(1 + \alpha^2)}$$

dimana bagian sisi kanan bentuk pertama dan kedua merupakan persamaan normal

LLG, dan bentuk tambahan yang terakhir berasal dari model Zhang-Li.

Keterangan:

\mathbf{M} adalah magnetisasi

\mathbf{H}_{eff} adalah medan magnet efektif

M_s adalah magnetisasi saturasi

γ adalah rasio gyromagnetik

α adalah parameter *damping*

b_j adalah konstanta penggabungan antara arus dan magnetisasi

$\nabla \cdot \mathbf{J}$ adalah turunan \mathbf{J} , arah dari arus

Sedangkan bentuk yang ketiga menunjukkan metode yang dapat digunakan untuk mengatur medan. Besarnya rapat arus bergantung pada besarnya b_j , yang didefinisikan sebagai (Massoud, *et al.*, 2009):

$$b_j = \frac{PJ\mu_B}{eM_s(1 + \xi^2)} \quad (2.13)$$

Keterangan:

\mathbf{J} adalah rapat arus

P adalah polarisasi dari arus spin

ξ adalah derajat non adiabatik

μ_B adalah magneton Bohr

e adalah muatan elektron

2.6 Simulasi Mikromagnetik

Konsep dasar simulasi mikromagnetik ini adalah menggunakan konsep *continuum* yaitu konsep fisika untuk menjelaskan sistem gerak benda dengan menggunakan pendekatan mekanika klasik (Miltat dan Donahue, 2007). Mikromagnetik dengan kata lain adalah menjelaskan tentang sifat-sifat bahan feromagnetik dalam skala mikrometer dan sub-mikrometer terutama pada interaksi

antara momen magnet, konfigurasi momen magnet, dan energi sistem saat perubahan magnetisasi (Ismail, 2013).

Konsep *continuum* memungkinkan untuk perhitungan distribusi magnetisasi pada sampel dengan bentuk acak (Miltat dan Donahue, 2007). Dua metode yang banyak dijumpai dalam simulasi mikromagnetik yaitu Metode FD (*Finite Differences*) dan Metode FE (*Finite Element*). Penggunaan kedua metode ini tetap mengacu pada persamaan LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert). Simulasi mikromagnetik dapat dilakukan menggunakan software NMAG (*Nano Magnetic*). NMAG hanya dapat dijalankan dalam sistem operasi *Linux*. NMAG berbasiskan Metode *Finite Element* yang membagi ruang ke dalam banyak tetrahedra kecil. Secara khas, geometri tetrahedra ini bertukar sepanjang daerah yang ditirukan (Rohman, 2013).

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Kegiatan penelitian dilakukan pada bulan Februari 2016 sampai dengan September 2016.

3.2 Alat Penelitian

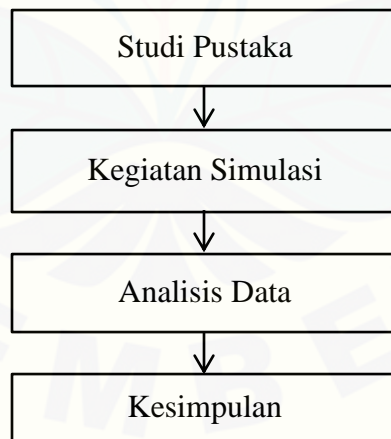
Alat yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah komputer dengan sistem operasi Linux Ubuntu yang dapat menjalankan program NMAG dan Mayavi untuk melakukan simulasi mikromagnetik. Spesifikasi komputer yang digunakan yaitu RAM 3,8 GB, *processor* Intel^(R) CoreTM i3-3240 CPU @ 3,40GHz × 4 dan *system type* 64 bit. Program yang digunakan dalam simulasi ini diantaranya NMAG untuk *running* simulasi mikromagnetik berbasis *Finite Element*, Mayavi untuk membuat visualisasi struktur domain dalam 3 dimensi dan program visualisasi data *spreadshet* untuk membuat grafik-grafik dari pengolahan data simulasi.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian dilakukan menggunakan *software* berlisensi *Public* yaitu NMAG (*Nano Magnetic*) yang dapat dijalankan pada sistem operasi GNU/Linux. Metode yang digunakan dalam penelitian yaitu metode elemen hingga (*finite element method*) (Rohman, 2013). Konsep dasar metode elemen hingga adalah menyelesaikan suatu permasalahan dengan cara membagi objek analisa menjadi bagian-bagian kecil yang terhingga. Bagian-bagian kecil ini kemudian dianalisa dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian keseluruhan daerah. Membagi bagian analisa menjadi bagian-bagian kecil disebut diskritisasi.

Simulasi mikromagnetik ini berdasarkan persamaan LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert) yang merupakan persamaan diferensial orde satu fungsi waktu. Persamaan LLG fungsi waktu ini diselesaikan menggunakan pendekatan metode elemen hingga. Penggunaan metode elemen hingga dapat menyelesaikan permasalahan LLG dari sebuah sistem dengan mengkonversikan menjadi sistem diskrit sehingga memungkinkan untuk diselesaikan secara numerik.

Tahap awal yang dilakukan meliputi studi pustaka sebagai dasar untuk kajian dalam penelitian. Selanjutnya dilakukan kegiatan simulasi dengan hasil simulasi berupa pengaruh variasi arus terhadap magnetisasi yang dapat direpresentasikan dalam bentuk grafik hubungan magnetisasi terhadap waktu (M-t). Selain itu, dilakukan simulasi pengaruh variasi diameter terhadap energi totalnya yang dapat direpresentasikan dalam grafik hubungan energi total terhadap arus pada masing-masing diameter. Setelah diperoleh hasil simulasi tersebut dilakukan analisa data, sehingga diperoleh kesimpulan. Proses penelitian yang telah diuraikan di atas, lebih jelasnya diilustrasikan ke dalam Gambar 3.1.

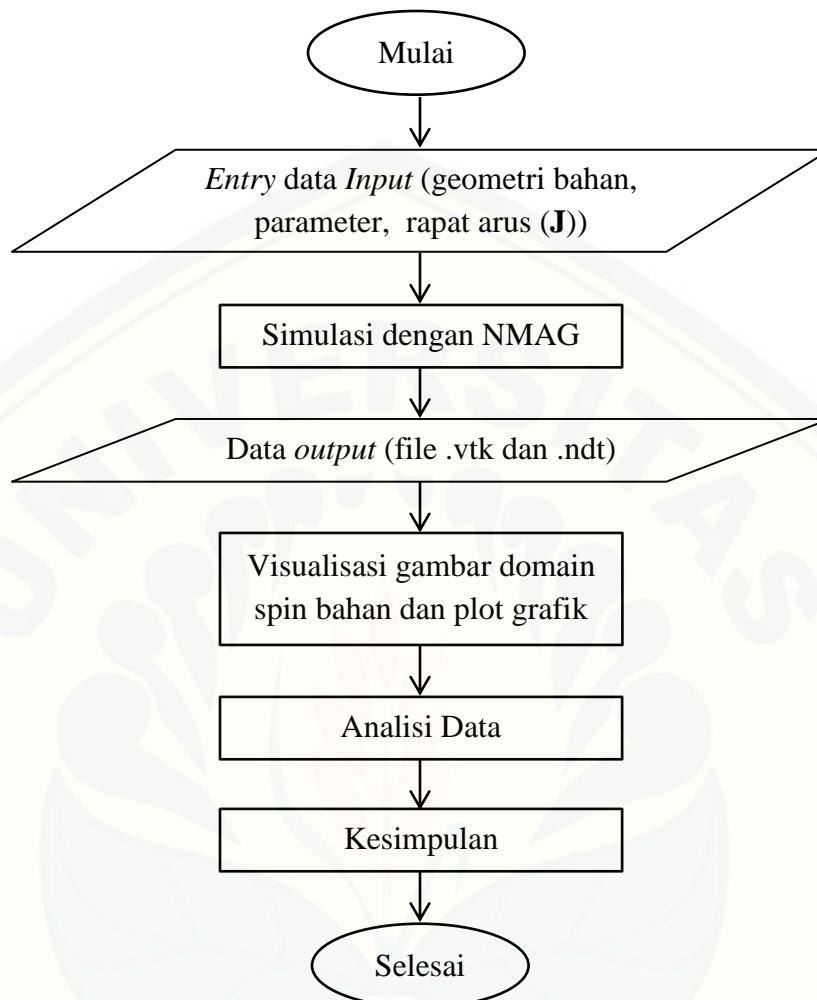


Gambar 3.1 Ilustrasi proses penelitian

Kegiatan simulasi yang dilakukan antara lain pembuatan geometri bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$), penentuan parameter bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$), pembuatan gambar domain spin bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) serta pembuatan grafik hubungan

magnetisasi terhadap waktu ($M-t$) dan grafik hubungan energi total terhadap perubahan arus. Pembuatan geometri untuk bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ dengan nilai x (jumlah atom Sr) yaitu 0,3 dilakukan dengan melihat nilai *exchange length*nya terlebih dahulu, kemudian disimulasikan dengan arus, panjang dan diameter *nanowire* yang divariasikan. Selanjutnya, penentuan parameter bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) diperoleh berdasarkan hasil studi pustaka yang dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Setelah semua parameter bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) dimasukkan, maka akan diperoleh beberapa data *output*, diantaranya file *.vtk* dan file *.ndt*. Parameter yang divariasikan dalam simulasi yaitu arus dan diameter *nanowire*. Ketika besar arus berubah maka posisi dinding domain pada bahan akan berubah. Perubahan posisi dinding domain tersebut dapat digambarkan pada gambar domain spin dengan variasi ukuran yang telah ditentukan. Arus yang diinjeksikan akan mempengaruhi domain magnet dan nilai magnetisasi. Penerapan arus dapat menghasilkan tekanan dinding domain dalam arah aliran elektron. Tekanan dinding domain tersebut menghasilkan perubahan magnetisasi seiring peningkatan arus yang terjadi (Franchin, 2009). Akhirnya, akan diperoleh nilai magnetisasi yang berbeda-beda di setiap variasi arus dan daerah geometri bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$). Ketika arus diberikan maka arus akan memberikan energi anisotropi yang cenderung membuat tipis dinding domain, sehingga pada waktu tertentu domain magnet akan berotasi mengikuti arah magnetisasi. Parameter kedua yang diubah adalah diameter bahan, dimana perubahan besar diameter dapat mempengaruhi energi total pada bahan tersebut. Energi yang berkontribusi terdiri atas energi total, energi demagnetisasi dan energi *exchange*. Gambar 3.2 merupakan diagram alir yang menjelaskan proses kegiatan simulasi.



Gambar 3.2 Diagram alir kegiatan simulasi

3.3.1 Geometri Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$)

Geometri bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ dimodelkan dalam bentuk *nanowire* 3 dimensi dengan variasi ukuran seperti dalam Tabel 3.1, dan injeksi arus yang diberikan sedemikian rupa sehingga rapat arus (\mathbf{J}) yang diberikan yaitu $1 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, $2 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, $4 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, $6 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, dan $8 \times 10^{10} \text{A/m}^2$.

Tabel 3.1 Geometri panjang dan diameter *nanowire*

No.	L (nm)	d (nm)
1.	70	10
2.	70	20
3.	70	30

Keterangan: L = panjang
d = diameter

3.3.2 Parameter Bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$)

Parameter bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) berbentuk *nanowire* dapat dilihat pada Tabel 3.2. Menentukan sistem ukuran pada simulasi ini dapat menggunakan persamaan $l_{ex} = \sqrt{2A/\mu_0 M_s^2}$ yang artinya dimensi ukuran sistem harus lebih besar dari *exchange length*nya dan ukuran selnya juga harus lebih kecil atau sama dengan *exchange length*nya (Rohman, 2013).

Tabel 3.2 Parameter bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$)

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

Sumber: Ziese (2006).

3.3.3 Pembuatan Gambar Domain Spin

Pada proses simulasi akan diperoleh beberapa data *output* salah satunya file .vtk. File tersebut lebih lanjut digunakan visualisasi yang meliputi data magnetisasi

yang diolah menggunakan program Mayavi. Visualisasi tersebut untuk melihat arah dari spin dan nilai magnetisasi bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$). Visualisasi juga dapat menunjukkan posisi dinding domain pada tiap-tiap waktu sehingga diperoleh kecepatan dinding domain dengan memberikan variasi arus listrik pada geometri yang telah ditentukan.

3.3.4 Pembuatan Grafik

Penggunaan metode elemen hingga yaitu dengan membagi geometri bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) menjadi elemen-elemen kecil yang memungkinkan setiap elemen dalam geometri mengandung magnetisasi. Hal ini menjadi kelebihan dari metode elemen hingga karena dapat menampilkan magnetisasi dalam setiap bagian melalui perbedaan warna pada geometri bahan. Ketika arus diinjeksikan pada suatu sistem, maka secara teori akan menyebabkan perubahan orientasi arah spin yang disebut *spin transfer torque*. Pada simulasi mikromagnetik menunjukkan bahwa penerapan aliran arus mampu menghasilkan tekanan dinding domain dalam arah aliran elektron. Tekanan dinding domain tersebut menghasilkan perubahan perubahan posisi dinding domain pada geometri yang telah ditentukan sehingga diperoleh nilai magnetisasi sebagai fungsi waktu yang berbeda-beda di setiap variasi arus dan daerah geometri bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$). Hasil tersebut dipresentasikan dalam bentuk grafik hubungan magnetisasi terhadap arus (M-t) pada masing-masing diameter.

Selain itu, di dalam penelitian ini dilakukan simulasi pengaruh variasi diameter terhadap energi total yang meliputi energi demagnetisasi dan energi *exchange* yang berhubungan dengan dinamika dinding domain akibat pengaruh diameter *wire* bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$), pada fenomena *spin transfer torque*. Pengaruh tersebut direpresentasikan dalam bentuk grafik hubungan energi total terhadap peningkatan arus pada masing-masing diameter.

3.4 Analisis Data

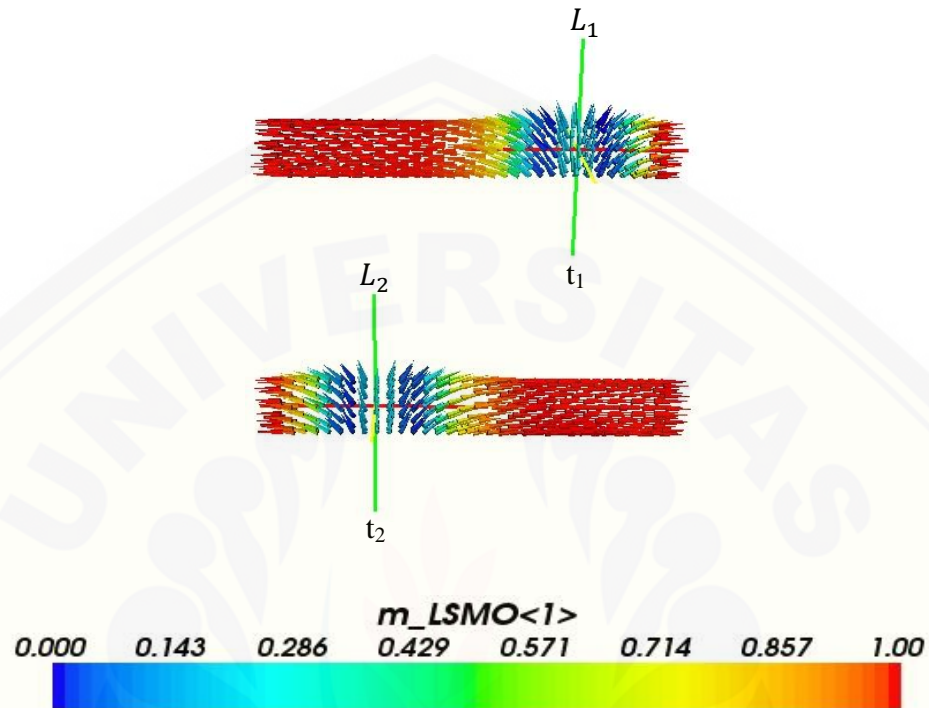
Pada kegiatan simulasi dilakukan variasi arus dan diameter bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$), sehingga diperoleh magnetisasi yang berbeda-beda di setiap variasi arus dan daerah geometri bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) yang selanjutnya dihasilkan grafik M-t. Panjang *nanowire* yang disimulasikan yaitu 70 nm, dengan diameter yaitu 10 nm, 20 nm dan 30 nm serta variasi rapat arus yang diberikan yaitu $1 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, $2 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, $4 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, $6 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, dan $8 \times 10^{10} \text{A/m}^2$.

Setiap variasi tersebut dilakukan analisis terhadap fenomena *spin transfer torque* meliputi perubahan posisi pada tiap-tiap waktu dinding domain sehingga diperoleh kecepatan dinding domain. Dalam penelitian ini, untuk mengestimasi nilai kecepatan dinding domain pada *nanowire* menggunakan metode *time resolved imaging* yaitu menghitung perubahan posisi dan waktu dinding domain yang direpresentasikan dalam citra yang bersesuaian. Secara sederhana metode *time resolved imaging* dapat dinyatakan seperti berikut (Mardona, 2012):

$$v_{rata-rata} = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1} (\text{ms}^{-1}) \quad (3.1)$$

dengan ΔL adalah perubahan posisi dinding domain (nm) dan Δt adalah perubahan waktu (ns). Ilustrasi dari metode *time resolved imaging* diperlihatkan pada Gambar 3.3.

Sedangkan indeks warna pada skala menunjukkan nilai magnetisasi bahan. Jika diurutkan sesuai perubahan arah spin maka nilai magnetisasi paling besar berada pada ujung-ujung *nanowire*. Dimana terdapat 3 sumbu yakni sumbu x yang ditunjukkan oleh garis warna merah, sumbu y ditunjukkan garis warna kuning dan sumbu z ditunjukkan garis warna hijau.



Gambar 3.3 Menentukan nilai kecepatan dinding domain pada *nanowire* menggunakan metode *time resolved imaging*.

Penelitian ini menggunakan bentuk geometri berupa nanowire dengan 3 variasi diameter yaitu 10 nm, 20 nm dan 30 nm. Analisis energi pada *nanowire* juga dilakukan guna mendukung hasil analisis kecepatan dinding domain dan struktur domain. Secara umum, energi yang berkontribusi terdiri atas energi total, energi demagnetisasi dan energi *exchange* sebagai fungsi waktu untuk setiap arus yang diaplikasikan. Energi sistem untuk setiap arus ditentukan pada kondisi ketika arus mencapai waktu 1 ns sampai 6 ns. Energi pada sistem direpresentasikan dalam energi per satuan volume pada ketebalan berbeda dengan variasi arus.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari hasil penelitian studi fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) pada bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) berbentuk *nanowire* menggunakan simulasi mikromagnetik adalah sebagai berikut:

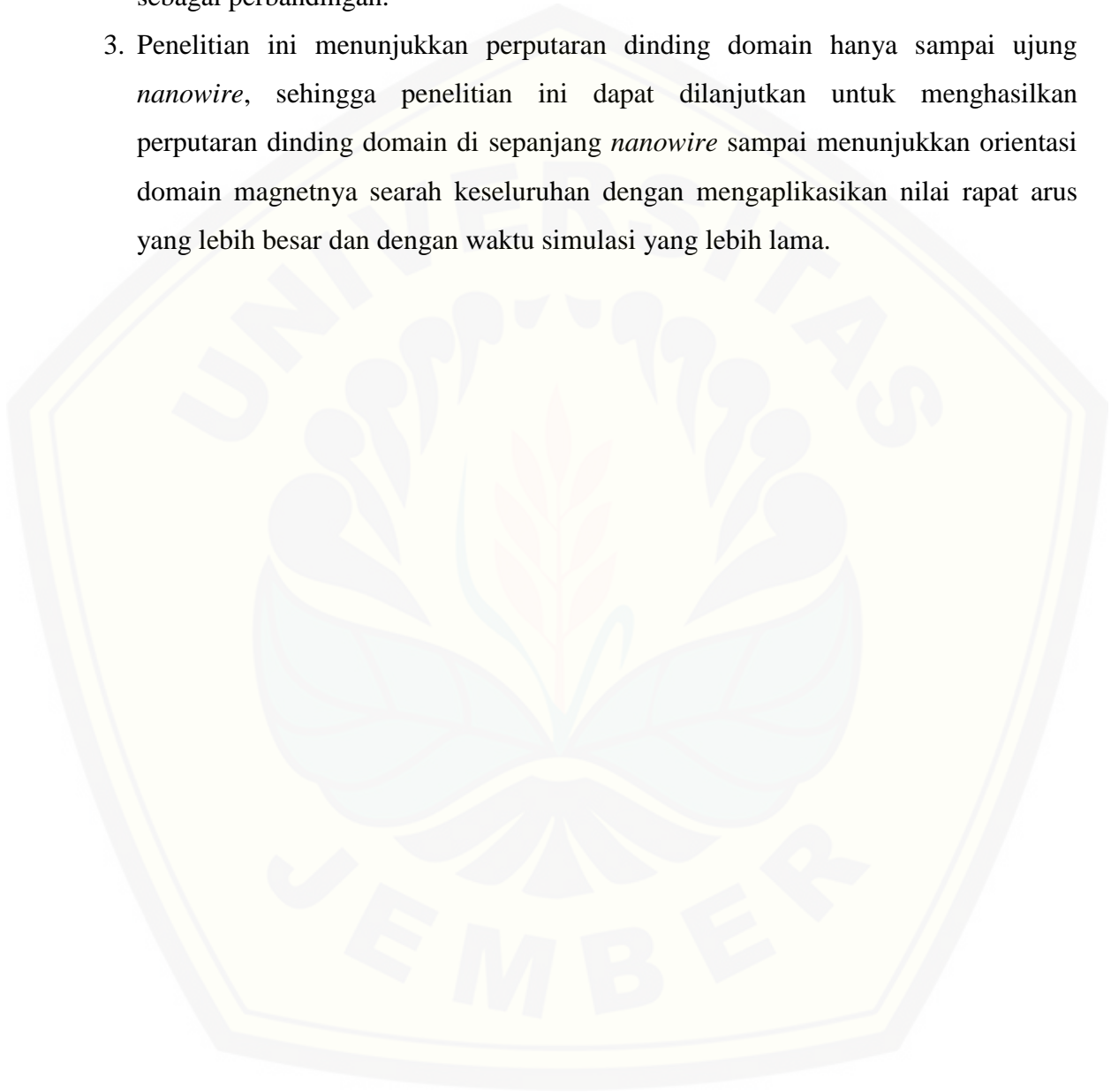
1. Pada seluruh variasi rapat arus yang diberikan pada bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) dengan diameter berbeda menghasilkan magnetisasi yang berbeda yang ditunjukkan dengan indeks warna pada struktur domain. Hasil menunjukkan semakin besar rapat arus yang diberikan maka perputaran dinding domain pada *nanowire* semakin cepat sehingga proses magnetisasi juga semakin cepat. Kecepatan dinding domain maksimum dihasilkan pada saat bahan diinjeksi rapat arus $8 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ pada diameter 30 nm yaitu 7,38 m/s. Sedangkan kecepatan minimum dihasilkan pada saat bahan diinjeksi rapat arus $1 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ pada diameter 30 nm yaitu 0,51 m/s.
2. Analisis energi total memperlihatkan energi total meningkat dengan bertambahnya diameter *nanowire*. Hal tersebut dapat disebabkan oleh kontribusi energi demagnetisasi yang meningkat dengan bertambahnya volume. Sedangkan pada energi *exchange* lebih kecil dibandingkan energi demagnetisasi untuk diameter berbeda.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Variasi panjang lebih diperbanyak karena penelitian ini dilakukan dengan satu model panjang untuk mengetahui struktur dinding domain dari bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$).

2. Penelitian ini dilakukan pada bahan berbentuk *nanowire*, sehingga penelitian selanjutnya dapat dilakukan baik dalam bentuk bola maupun bentuk *elipsoid* sebagai perbandingan.
3. Penelitian ini menunjukkan perputaran dinding domain hanya sampai ujung *nanowire*, sehingga penelitian ini dapat dilanjutkan untuk menghasilkan perputaran dinding domain di sepanjang *nanowire* sampai menunjukkan orientasi domain magnetnya searah keseluruhan dengan mengaplikasikan nilai rapat arus yang lebih besar dan dengan waktu simulasi yang lebih lama.



DAFTAR PUSTAKA

Buku

- Franchin, M. 2009. *Multiphysics Simulation of Magnetic Nanostructures*. University of Southampton.
- Huajun, L. 2007. *Magnetotransport Properties of Strontium Doped Lanthanum Manganite Nanoconstriction Array*. Singapore: National University of Singapore.
- Nicola, A. S. 2011. *Magnetic Materials Fundamentals and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.

Jurnal

- Atmono, T. M., dan Yunanto. 2002. Efek Giant Magnetoresistance pada Logam Peralihan Co,Ni,Cu. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*. Kassel-University-Germany. ISSN 0216-3128.
- Bloch, F. 1932. Theory of exchange problem and remanence phenomena of ferromagnetic substances, *Zeitschrift fur Physik* Vol. **74**, 295.
- Gerretsen, S. 2008. Spin Transfer Torque in Ferromagnetic Materials. *Dept. of Physics and Astronomy, University Of California, Los Angeles, Ca, 90095*.
- Gilbert, T. L. 2004. Phenomenological Theory of Damping in Ferromagnetic Materials. *IEEE Trans. Magn.* Vol. **40**, 3443.
- Gor'kov, L. P., dan Kresin, V.Z. 2004. Mixed valence manganites: fundamentals and main propertis. *Physics Report* Vol. **400**. 149-208.
- Machsuni, Ahmad Henry. Tanpa Tahun. MRAM: Teknologi Terbaru Memori Komputer. Bandung: Institut Teknologi Telkom.

- Massoud, N., Kriiger, B., Bohlens, S. 2009. Proposal for a Standard Problem for Micromagnetic Simulations Including Spin-Transfer-Torque. PACS numbers: 75.40.Mg.75.00.00, 85-75.-d, 72.25.Ba.
- Miltat, J. E. dan Donahue, M.J. 2007. Numerical micromagnetic: Finite difference methods. Vol. 2, pp. 742-764. USA: NIST University.
- Piramanayagam, S. N. 2007. Perpendicular recording Media for hard Disk Drive. *J. Appl. Phys.* Vol. 102, 011301.
- Urushibara, A., Maritomo y., Arima T., Asamitsu A., Kido G dan Tokura, Y. 1995. Insulator-Metal Transition and Giant Magnetoresistance in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$. *Phys. Rev. B*, Vol. 51, pp. 14103-14109.
- Vlaminck, V. and Bailleul, M. 2008. Current-Induced Spin Wave Doppler Shift. *Science*. Vol. 322, 410.
- Yani, A., Ridwan dan Mujamilah. 2014. Simulasi Histerisis Pada Bahan Feromagnetik Dengan Model JILES-ATHERTON. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, ISSN: 1411-1098: 85-90.
- Ziese, M. 2006. Study of micromagnetic structure of a $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ film. *Phys. State Sol. (b)* Vol. 243, No.6, 1383-1389.

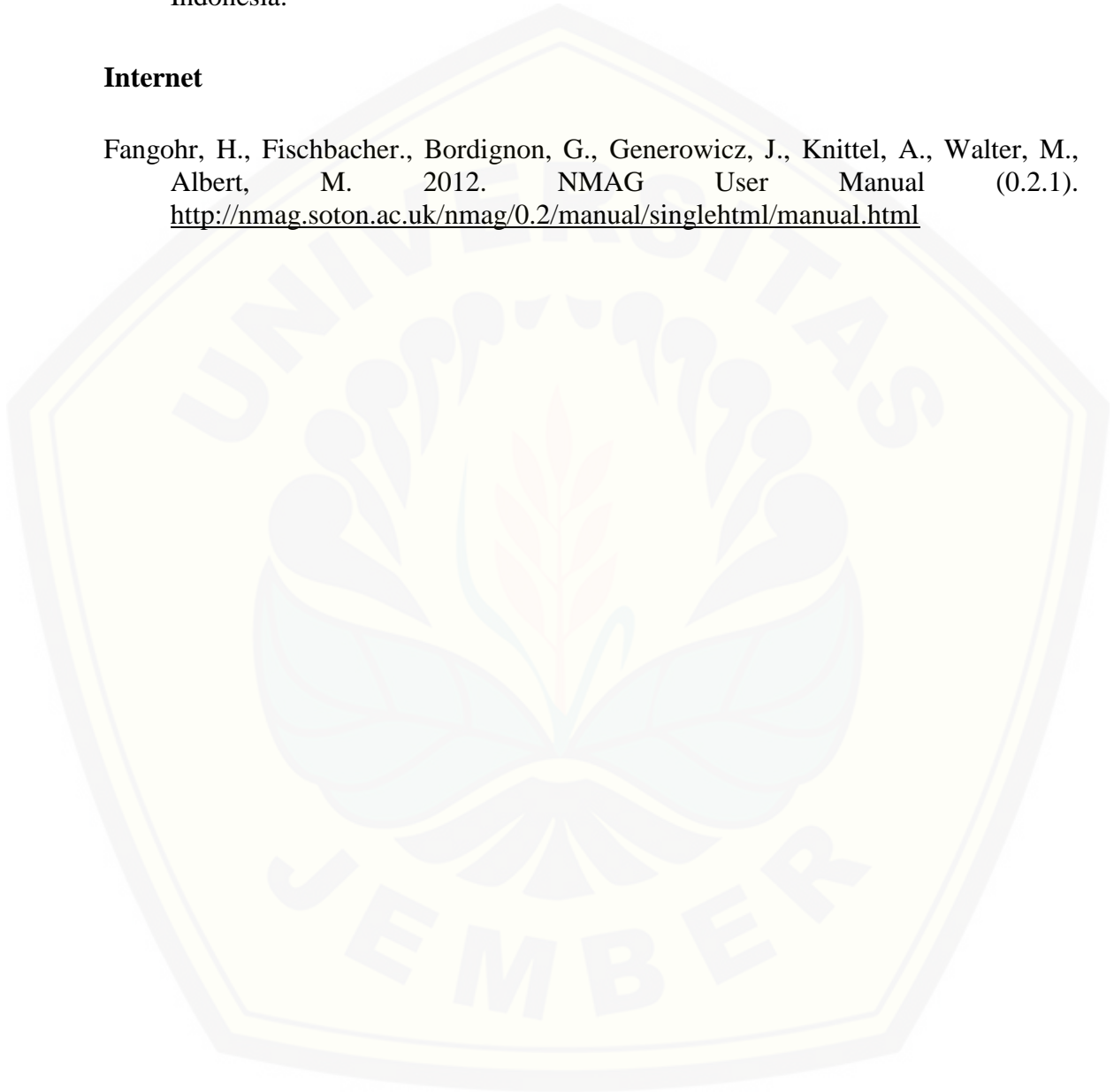
Skripsi/Tesis/Disertasi

- Henny, T. C. 2008. *Struktur dan Temperatur Curie Polikristal $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($X=0;0,1$; dan $0,2$) Magnetoresistan*. Jember: Universitas Jember.
- Ismail. 2013. *Studi Mikromagnetik Proses Magnetisasi dan Spektrum Suseptibilitas Feromagnetik Elemen Diamond-Spaped*. Depok: Universitas Indonesia.
- Mardona. 2012. *Dinamika Domain Wall dan Efek Anisotropi pada Material Feromagnetik Co dan Ni Berbentuk Nanowire*. Depok: Universitas Indonesia.
- Norita. 2008. *Studi Sifat-Sifat Listrik Bahan Magnetik FeSi*. Depok: Universitas Indonesia.
- 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 Modelling Mikromagnetik*. Jember: Universitas Jember.

Widodo, A. T. 2013. *Studi Mikromagnetik Dinamika Struktur Domain pada Material Feromagnetik Py, Ni, Fe, dan Co Model Nanosprehe*. Depok: Universitas Indonesia.

Internet

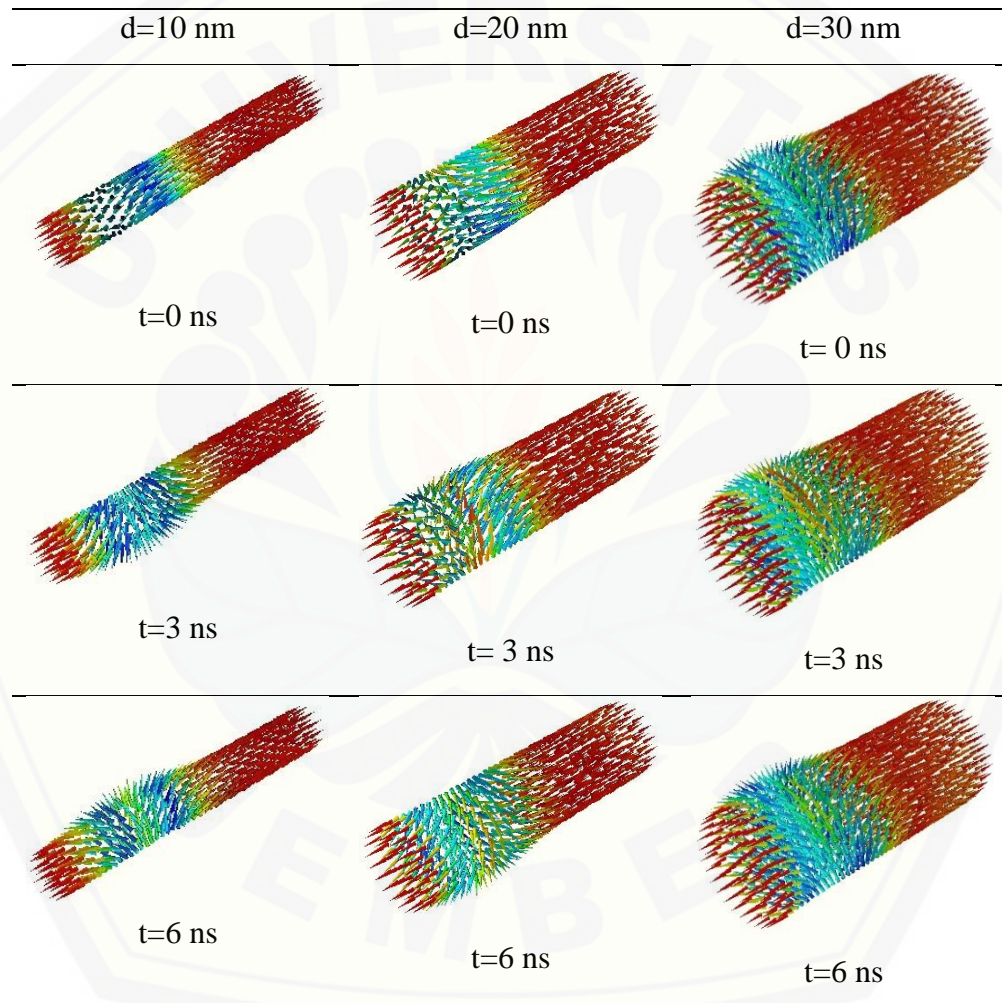
Fangohr, H., Fischbacher., Bordignon, G., Generowicz, J., Knittel, A., Walter, M., Albert, M. 2012. NMAG User Manual (0.2.1).
<http://nmag.soton.ac.uk/nmag/0.2/manual/singlehtml/manual.html>

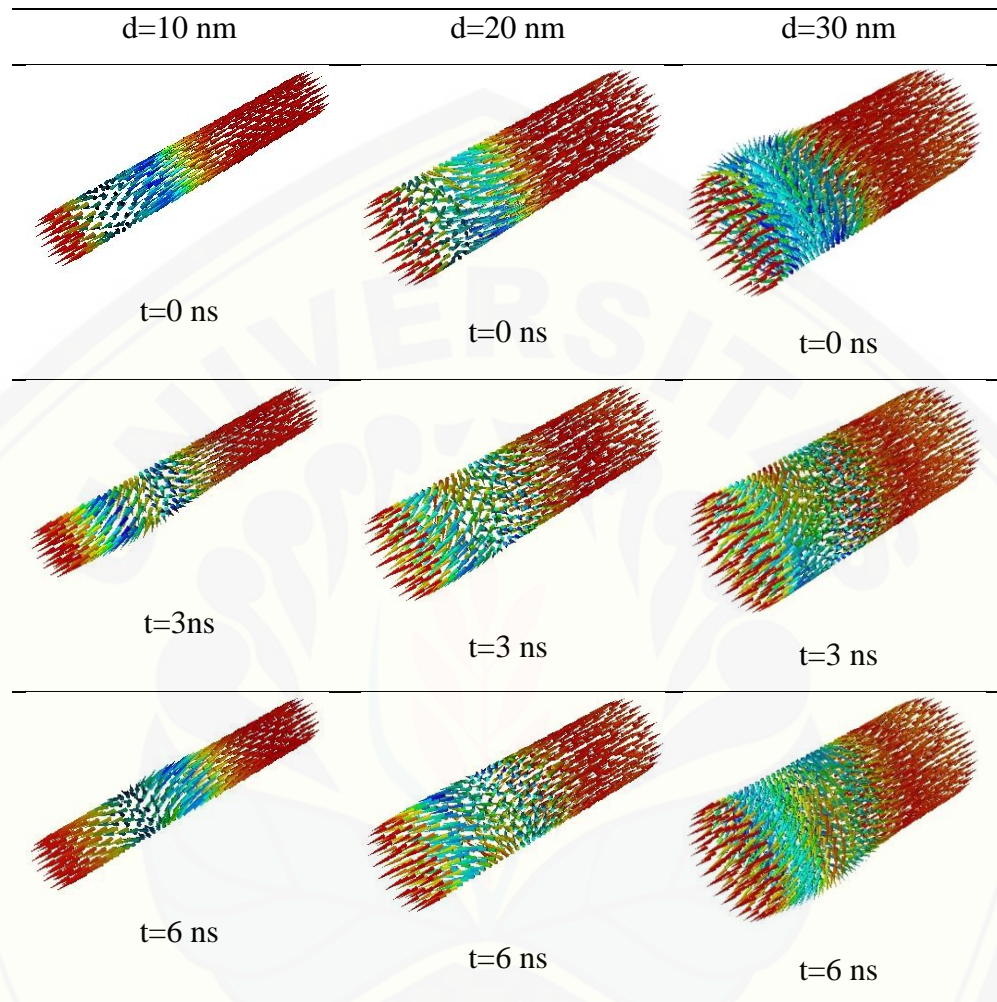
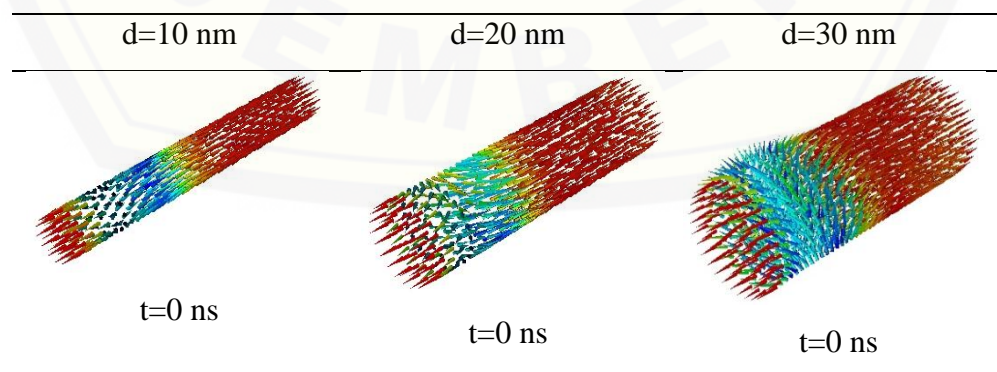


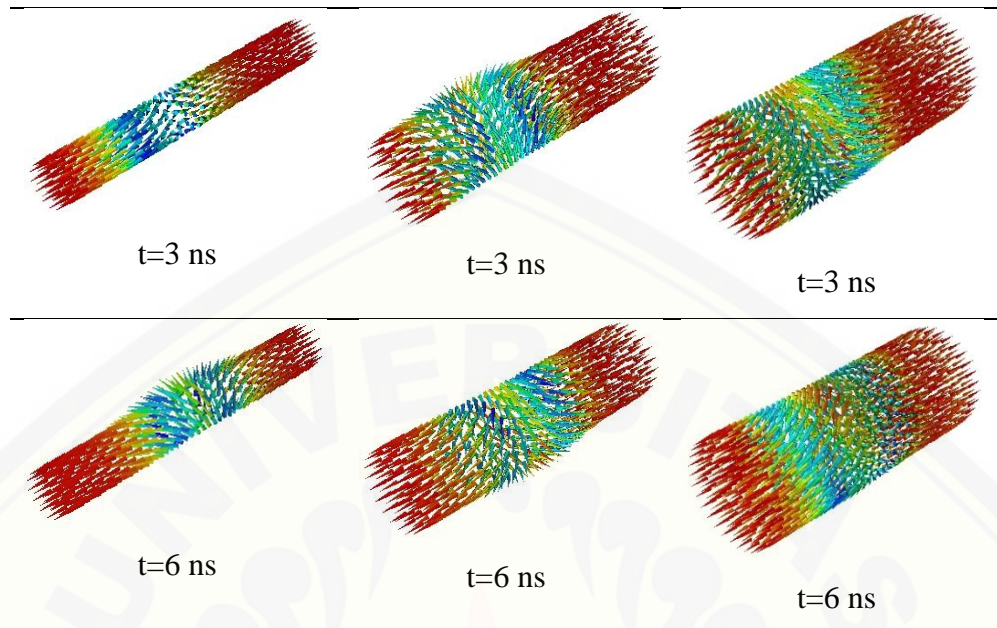
LAMPIRAN

Lampiran A. Struktur Domain pada $t=0$ ns, $t=3$ ns dan $t=6$ ns

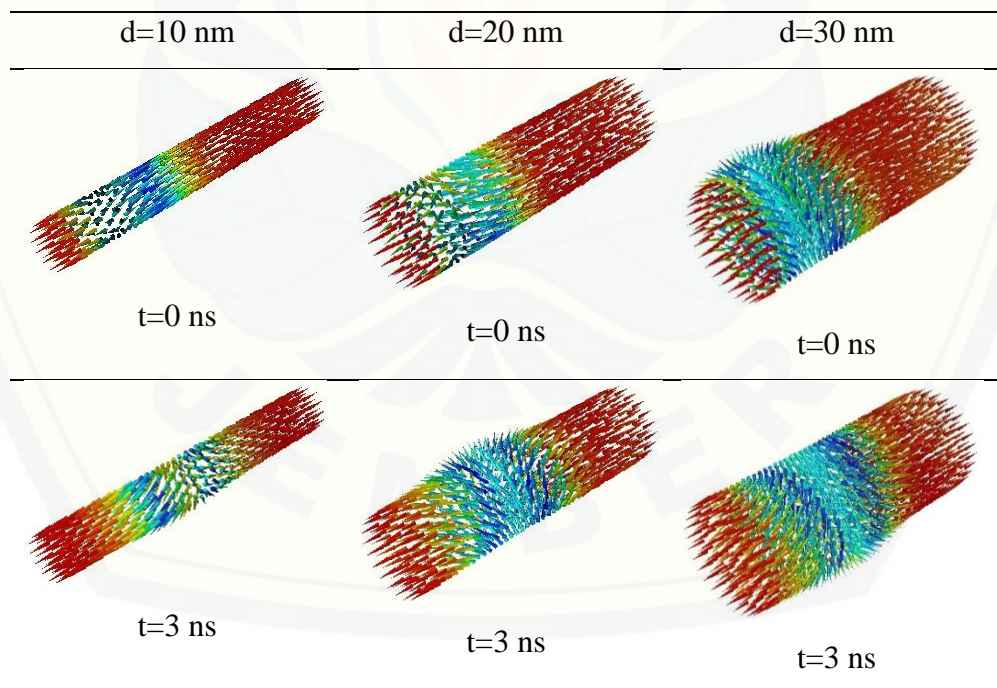
A.1 Posisi Dinding Domain untuk $J = 1 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$

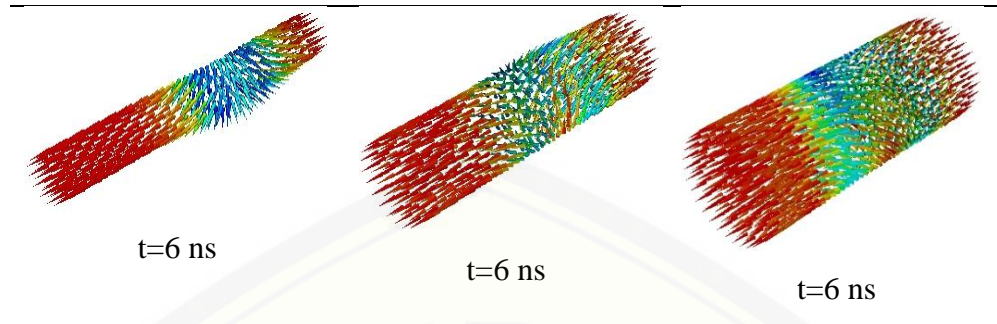


A.2 Posisi Dinding Domain untuk $J = 2 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ **A.3 Posisi Dinding Domain untuk $J = 4 \times 10^{10} \text{A/m}^2$** 

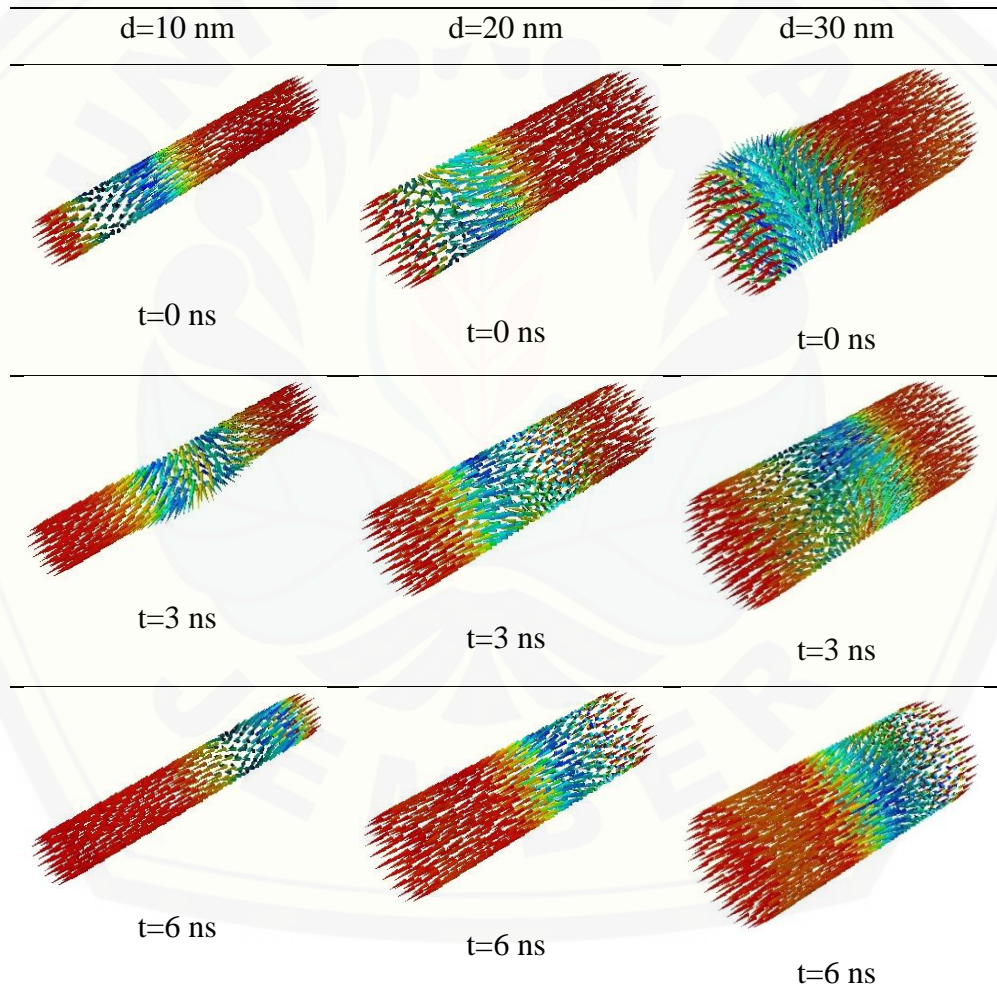


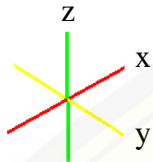
A.4 Posisi Dinding Domain untuk $J = 6 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$





A.5 Posisi Dinding Domain untuk $J = 8 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$





Lampiran B. Nilai Kecepatan Dinding Domain

B.1 Kecepatan Dinding Domain untuk $J = 1 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ untuk Diameter 10 nm, 20 nm dan 30 nm

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	18,9	0,5	
2000	18,9	1	
3000	18,9	1,5	
4000	18,2	2	
5000	17,5	2,5	
6000	17,5	3	
7000	16,9	3,5	0,76
8000	16,8	4	
9000	15,4	4,5	
10000	15,4	5	
11000	15,4	5,5	
12000	14,7	6	

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	23,1	0,5	0,63
2000	22,4	1	
3000	22,4	1,5	
4000	21,7	2	
5000	21	2,5	
6000	21	3	
7000	21	3,5	
8000	20,3	4	
9000	20,3	4,5	
10000	19,6	5	
11000	19,6	5,5	
12000	19,6	6	

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	22,4	0,5	0,51
2000	22,4	1	
3000	22,4	1,5	
4000	21,7	2	
5000	21,7	2,5	
6000	21,7	3	
7000	21	3,5	
8000	21	4	
9000	20,3	4,5	
10000	20,3	5	
11000	20,3	5,5	
12000	19,6	6	

B.2 Kecepatan Dinding Domain untuk $J = 2 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ untuk Diameter 10 nm, 20 nm dan 30 nm

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	18,9	0,5	
2000	18,2	1	
3000	17,5	1,5	
4000	16,8	2	
5000	15,4	2,5	
6000	14,7	3	
7000	13,3	3,5	1,78
8000	12,6	4	
9000	11,2	4,5	
10000	10,5	5	
11000	9,8	5,5	
12000	9,1	6	

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	22,4	0,5	
2000	21,7	1	
3000	21	1,5	
4000	19,6	2	
5000	18,9	2,5	
6000	18,2	3	
7000	16,8	3,5	1,40
8000	16,8	4	
9000	16,6	4,5	
10000	15,4	5	
11000	15,4	5,5	
12000	14,7	6	

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	21,7	0,5	
2000	21,7	1	
3000	20,3	1,5	
4000	20,3	2	
5000	19,6	2,5	
6000	19,6	3	
7000	18,9	3,5	1.01
8000	18,2	4	
9000	16,8	4,5	
10000	16,8	5	
11000	16,8	5,5	
12000	16,1	6	

B.3 Kecepatan Dinding Domain untuk $J = 4 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ untuk Diameter 10 nm, 20 nm dan 30 nm

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	18,2	0,5	
2000	16,8	1	
3000	15,4	1,5	
4000	13,3	2	
5000	11,2	2,5	
6000	9,1	3	
7000	7	3,5	3,43
8000	5,6	4	
9000	3,5	4,5	
10000	1,4	5	
11000	0,7	5,5	
12000	-0,7	6	

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	22,4	0,5	3,30
2000	20,3	1	
3000	18,2	1,5	
4000	16,8	2	
5000	14,7	2,5	
6000	13,3	3	
7000	11,2	3,5	
8000	9,8	4	
9000	9,1	4,5	
10000	7,7	5	
11000	4,9	5,5	
12000	4,2	6	

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	21	0,5	2,92
2000	19,6	1	
3000	18,2	1,5	
4000	16,1	2	
5000	14,7	2,5	
6000	14	3	
7000	12,6	3,5	
8000	11,2	4	
9000	9,1	4,5	
10000	7,7	5	
11000	6,3	5,5	
12000	4,9	6	

B.4 Kecepatan Dinding Domain untuk $J = 6 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ untuk Diameter 10 nm, 20 nm dan 30 nm

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	17,5	0,5	
2000	14,7	1	
3000	11,2	1,5	
4000	9,1	2	
5000	7	2,5	
6000	3,5	3	
7000	0,7	3,5	5,21
8000	-1,4	4	
9000	-4,9	4,5	
10000	-7	5	
11000	-9,1	5,5	
12000	-11,2	6	

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	21,7	0,5	
2000	18,9	1	
3000	16,1	1,5	
4000	14	2	
5000	11,2	2,5	
6000	7,7	3	
7000	6,3	3,5	5.09
8000	3,5	4	
9000	-1,4	4,5	
10000	-1,4	5	
11000	-4,2	5,5	
12000	-6,3	6	

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	21	0,5	
2000	19,6	1	
3000	16,8	1,5	
4000	14	2	
5000	11,2	2,5	
6000	8,4	3	
7000	6,3	3,5	5,09
8000	4,2	4	
9000	0,7	4,5	
10000	-0,7	5	
11000	-4,2	5,5	
12000	-7	6	

B.5 Kecepatan Dinding Domain untuk $J = 8 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ untuk Diameter 10 nm, 20 nm dan 30 nm

id	L (nm)	t (ns)	v rata (m/s)
1000	16,8	0,5	
2000	13,3	1	
3000	9,09	1,5	
4000	5,6	2	
5000	2,1	2,5	
6000	-0,7	3	
7000	-4,9	3,5	6,87
8000	-8,4	4	
9000	-12,6	4,5	
10000	-16,1	5	
11000	-18,2	5,5	
12000	-21	6	

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	19,6	0,5	
2000	16,8	1	
3000	14	1,5	
4000	9,8	2	
5000	4,9	2,5	
6000	2,8	3	
7000	-1,4	3,5	6,87
8000	-4,9	4	
9000	-10,5	4,5	
10000	-12,6	5	
11000	-14	5,5	
12000	-18,2	6	

id	L (nm)	t (ns)	v rata-rata (m/s)
1000	21	0,5	
2000	15,4	1	
3000	12,6	1,5	
4000	10,5	2	
5000	7,7	2,5	
6000	3,5	3	
7000	0,7	3,5	7,38
8000	-4,2	4	
9000	-7	4,5	
10000	-11,2	5	
11000	-16,1	5,5	
12000	-19,6	6	