



**KAJIAN FENOMENA STT (*SPIN TRANSFER TORQUE*) PADA
BAHAN PERMALLOY *NiFe* BERBENTUK *NANOWIRE*
MELALUI 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

Khiptiatun Ni'mah
NIM 141810201026

JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER

2018

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan dengan penuh rasa kasih sayang, syukur dan terima kasih yang sebesar-besarnya untuk:

1. Abah Lukman Hakim (Alm) dan Ibu Hasanah (Almh) atas segala do'a yang selalu dipanjatkan, motivasi, nasehat, kasih sayang serta pengorbanan yang tak terbatas. Semoga kalian selalu bahagia berada disana bersama orang-orang Shalih;
2. Ketiga kakak terhebat saya yang telah berjuang sekeras mungkin untuk bisa menggantikan posisi Abah dan Ibu;
3. Staf pengajar sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi yang telah memberikan ilmu dan membimbing saya selama ini;
4. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Terimakasih beribu teimakasih saya ucapkan, hanya sebuah karya kecil dan untaian kata-kata ini yang dapat saya persembahkan kepada kalian semua. Atas segala kekurangan dan kekhilafan saya, sudilah kiranya untuk mencurahkan maaf. Demikian skripsi ini saya persembahkan.

MOTTO

Dan tidak sepatutnya orang-orang mukmin itu semuanya pergi (ke medan perang).

Mengapa sebagian dari setiap golongan di antara mereka tidak pergi untuk memperdalam pengetahuan agama mereka dan untuk memberi peringatan kepada kaumnya apabila mereka telah kembali, agar mereka dapat menjaga dirinya.

(Q.S. At-Taubah: 112)*)



*) Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. *Al-Qur'an dan Terjemahannya*. Semarang: PT Kumudasmoro Grafindo.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Khipiatun Ni'mah

NIM : 141810201026

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Kajian Fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) pada Bahan Permalloy *NiFe* Berbentuk *Nanowire* Melalui Simulasi Mikromagnetik” adalah benar-benar hasil karya saya 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 sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 9 Juni 2018

Yang menyatakan,

Khipiatun Ni'mah

NIM 141810201026

SKRIPSI

**KAJIAN FENOMENA STT (*SPIN TRANSFER TORQUE*) PADA BAHAN
PERMALLOY *NiFe* BERBENTUK *NANOWIRE* MELALUI
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

Oleh

Khiptiatun Ni'mah
NIM 141810201026

Pembimbing

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

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

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Kajian Fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) pada Bahan Permalloy *NiFe* Berbentuk *Nanowire* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” karya Khipiatun Ni'mah 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.

Endhah Purwandari, S.Si., M.Si.

NIP. 197208201998021001

NIP. 198111112005012001

Anggota II,

Anggota III,

Supriyadi, S.Si., M.Si.

Wenny Maulina, S.Si., M.Si.

NIP. 198204242006041003

NIP. 198711042014042001

Mengesahkan

Dekan,

Drs. Sujito, Ph.D.

NIP. 196102041987111001

RINGKASAN

Kajian Fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) pada Bahan Permalloy *NiFe* Berbentuk *Nanowire* Melalui Simulasi Mikromagnetik; Khiptiatun Ni'mah, 141810201026; 2018: 51 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Spintronic merupakan divais yang bekerja dengan memanfaatkan perubahan konfigurasi spin elektron untuk mengontrol pergerakan pembawa muatan. Kebutuhan teknologi magnetik dengan kemampuan proses data yang cepat, ukuran divais yang lebih kecil, konsumsi energi yang rendah menjadi alasan utama untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas produk, khususnya dalam media penyimpanan. Salah satu cara guna meningkatkan kemampuan dan kapasitas penyimpanan yaitu dengan memanfaatkan kajian sifat kemagnetan dalam fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) suatu bahan magnetik. Bahan magnetik yang digunakan sebagai aplikasi divais *spintronic* adalah bahan paduan *NiFe*. Kajian fenomena STT ini menggunakan pemodelan 3D berbentuk *nanowire*. Hal ini dikarenakan *nanowire* merupakan suatu bentuk morfologi yang mudah dalam pengaplikasian rapat arus listrik injeksi. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui sifat kemagnetan bahan permalloy *NiFe* melalui kajian fenomena STT berbentuk *nanowire* yang dapat diaplikasikan dalam *storage device* berupa MRAM.

Kegiatan penelitian diawali dengan melakukan instalasi program NMAG, Mayavi dan Origin pada komputer. Tahap berikutnya adalah mempersiapkan *file input* dari kegiatan simulasi. *File* pertama yang dipersiapkan adalah parameter-paramter bahan *NiFe* (.py) berupa magnetisasi saturasi, konstanta anisotropi, konstanta *exchange*, konstanta *damping*, dan polarisasi bahan. Adapun *file* kedua berisi bentuk dan ukuran geometri bahan (.geo). Simulasi terhadap sifat magnetik bahan dilakukan pada variasi rapat arus listrik injeksi sebesar $5 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, $10 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, $15 \times 10^{10} \text{A/m}^2$, dan $20 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ dengan diameter *nanowire* 10 nm dan 20 nm, dan polarisasi bahan sebesar 1 dan 0.5. Data *output* yang diperoleh berupa nilai magnetisasi dan energi total bahan permalloy untuk seluruh variasi rapat arus listrik injeksi dan diameter bahan, serta kecepatan pergerakan dinding domain dalam setiap variasi polarisasi bahan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa rapat arus listrik injeksi berpengaruh terhadap magnetisasi bahan, energi total sistem dan kecepatan pergerakan dinding domain dari bahan. Magnetisasi bahan dalam hal ini dianalisis melalui perubahan posisi dinding domain, struktur domain dan grafik magnetisasi terhadap waktu (M-t). Dengan meningkatnya rapat arus listrik injeksi, kecepatan pergeseran posisi dinding domain mengalami peningkatan. Hal ini terjadi pada *nanowire* berdiameter 10 nm dan 20 nm. Akan tetapi, kecepatan pergeseran posisi dinding domain tersebut lebih kecil pada saat diameter *nanowire* berukuran 20 nm jika dibandingkan dengan diameter 10 nm. Analisis terhadap struktur domain dari sebuah *nanowire* dilakukan dengan mengamati pengaruh arus listrik injeksi terhadap arah perputaran spin yang menghasilkan perubahan posisi angular.

Untuk *nanowire* berukuran 10 nm, perputaran arah spin akibat adanya tekanan pada dinding domain terjadi saat arus listrik injeksi diaplikasikan sebesar $10 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$. Adapun bahan permalloy dengan diameter *nanowire* sebesar 20 nm hanya akan mengalami perputaran arah spin pada saat diberikan arus injeksi sebesar $15 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$. Sifat magnetik pada bahan permalloy diamati pula berdasarkan grafik hubungan antara magnetisasi dan waktu. Adanya peningkatan arus listrik injeksi menyebabkan terjadinya peningkatan pada amplitudo magnetisasi yang dihasilkan. Kerapatan osilasi semakin tinggi saat diameter *nanowire* diaplikasikan sebesar 20 nm.

Pemberian variasi arus listrik injeksi juga mempengaruhi besarnya energi yang berkontribusi dalam sistem bahan ferromagnetik (energi total, energi *exchange*, dan energi demagnetisasi), baik yang disimulasikan pada *nanowire* berdiameter 10 nm maupun 20 nm. Energi total yang dihasilkan akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya rapat arus listrik injeksi dan energi total tersebut juga akan semakin meningkat ketika diameter *nanowire* yang divariasikan semakin besar. Energi *exchange* akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya rapat arus listrik injeksi, akan tetapi energi tersebut akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya diameter *nanowire*. Seiring dengan meningkatnya rapat arus listrik yang diinjeksikan, maka energi demagnetisasi yang dihasilkan akan semakin menurun, dan semakin meningkat ketika diameter *nanowire* yang divariasikan semakin besar. Faktor polarisasi bahan berpengaruh pula pada kecepatan pergerakan dinding domain. Semakin besar polarisasi bahan yang dimiliki, maka semakin meningkat kecepatan pergerakan dinding domain yang dihasilkan. Kecepatan pergerakan dinding domain yang dimaksud disini merupakan kecepatan rata-rata dalam setiap rapat arus listrik injeksi.

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT. karena atas berkat, rahmat, serta hidayah-NYA, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Kajian Fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) pada Bahan Permalloy *NiFe* Berbentuk *Nanowire* Melalui Simulasi Mikromagnetik”. Sholawat dan salam semoga senantiasa selalu menuntun dan mengiringi langkah dan aktivitas kita dalam melangkah menggapai ridhlo-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 sekaligus Dosen Pembimbing Akademik, dan Ibu Endhah Purwandari, 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 Utama dan Wenny Maulina, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji Anggota yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Segenap Dosen dan Karyawan Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Jember yang selalu membantu dan mendukung;
4. Mas Arifin, Mas Miftahudin, Neng Nurlailil yang tiada henti memberikan motivasi, nasehat serta pengorbanan yang tak terbatas;
5. Teman-teman komputasi magnetik (Lutviana, Nazril, Alfi), Graphytasi 2014, anggota keluarga kosan 39, KKN UMD 31 dan Abal-abal's *squad* yang telah banyak membantu memberi semangat;
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu;

Penulis sadar bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu penulis berharap skripsi ini dapat dimanfaatkan sebagaimana mestinya.

Jember, 9 Juni 2018

Khiptiatun Ni'mah
NIM 141810201026

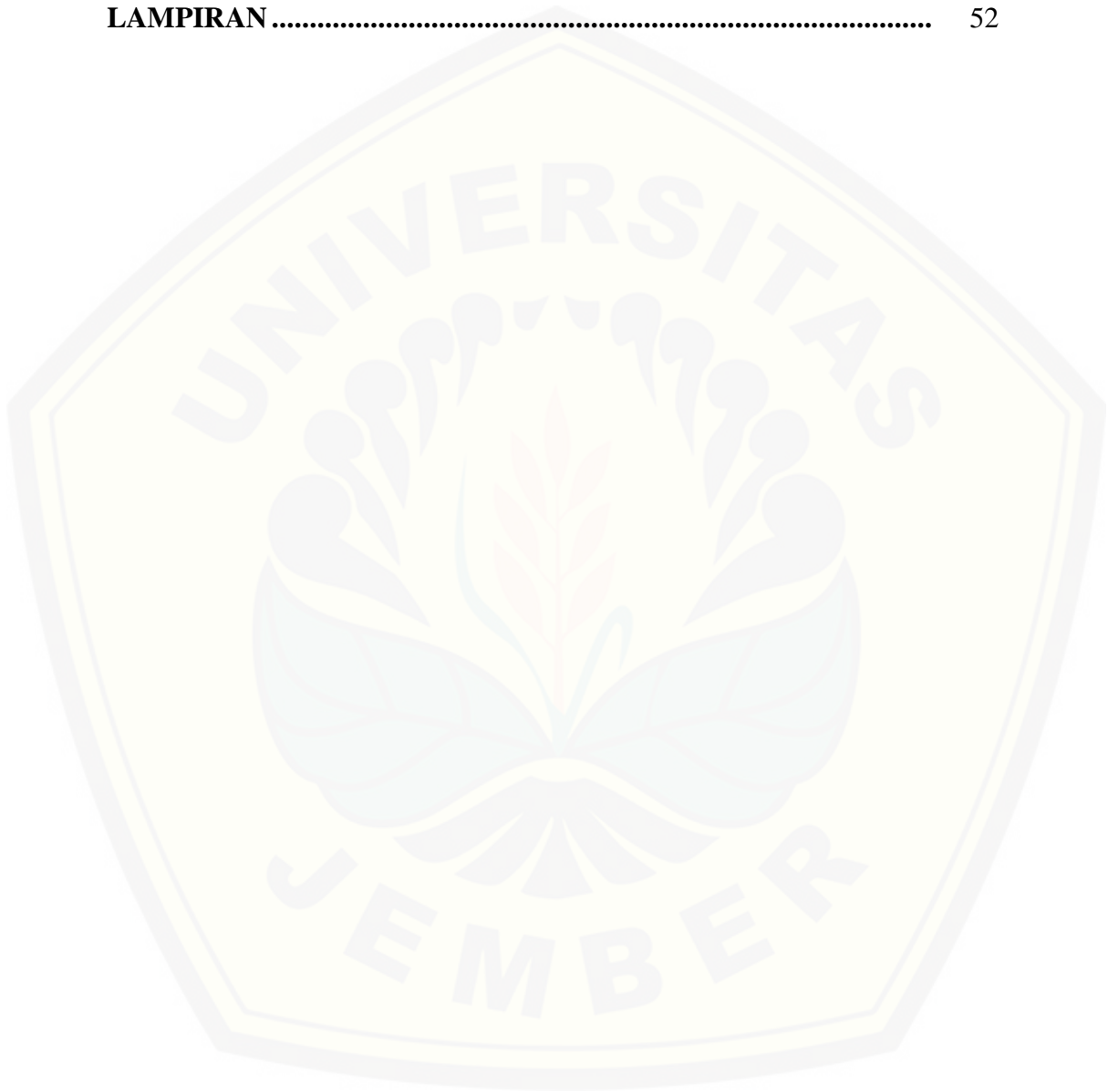


DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN	ii
MOTTO	iii
PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBING	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN.....	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Bahan Magnetik	6
2.2 Ferromagnetik	6
2.3 Momen Magnet	7
2.4 Domain Magnet	8
2.5 Proses STT (<i>Spin Transfer Torque</i>)	10
2.6 Bahan Permalloy <i>NiFe</i>	12
2.7 Dinamika Magnetisasi	13
2.7.1 Persamaan Landau-Lifshitz (LL)	14
2.7.2 Persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert	15

2.8 Energi Sistem Ferromagnetik	17
2.8.1 Energi <i>Exchange</i>	17
2.8.2 Energi Magnetostatik	17
2.8.3 Energi <i>Magneto Crystalline Anisotropy</i>	19
2.8.4 Energi Zeeman	19
2.9 Polarisasi Bahan	19
2.10 Simulasi Mikromagnetik	20
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Rancangan Penelitian	22
3.2 Jenis dan Sumber Data Penelitian	23
3.3 Definisi Operasional Variabel.....	24
3.4 Kerangka Pemecahan Masalah.....	24
3.5 Prosedur Penelitian	25
3.6 Metode Analisis Data.....	26
3.6.1 Analisis Pengaruh Variasi Rapat Arus Listrik Terhadap Magnetisasi Bahan.....	26
3.6.2 Analisis Pengaruh Diameter <i>Nanowire</i> Terhadap Energi Total Sistem.....	27
3.6.3 Analisis Pengaruh Variasi Polarisasi Bahan Terhadap Kecepatan Pergerakan Dinding Domain	29
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Pengaruh Variasi Rapat Arus Listrik Injeksi terhadap Magnetisasi Bahan Permalloy <i>NiFe</i> Berbentuk <i>Nanowire</i> pada Fenomena STT	29
4.2 Pengaruh Variasi Diameter <i>Nanowire</i> terhadap Energi Total Bahan Permalloy <i>NiFe</i> pada Fenomena STT.....	41
4.3 Pengaruh Variasi Polarisasi Bahan terhadap Kecepatan Pergerakan Dinding Domain pada Bahan Permalloy <i>NiFe</i> Berbentuk <i>Nanowire</i> yang dihasilkan pada Fenomena STT	44

BAB 5. PENUTUP	47
5.1 Kesimpulan	47
5.2 Saran	47
DAFTAR PUSTAKA	48
LAMPIRAN	52



DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 Parameter material permalloy <i>NiFe</i> untuk <i>input</i> data simulasi mikromagnetik	23
4.1 Kecepatan pergerakan arah spin domain polarisasi 1 diameter 10 nm dan 20 nm.....	36
4.2 Kecepatan pergerakan arah spin domain polarisasi 0.5 diameter 10 nm dan 20 nm.....	36
4.3 Kecepatan rata-rata pergerakan dinding domain ketika diinjeksikan rapat arus listrik pada diameter 10 nm dan 20 nm.....	44

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Momen magnet dengan orientasi 0° sampai 180°	7
2.2 Momen magnet yang berhubungan dengan (a) orbit elektron (b) perputaran elektron terhadap sumbunya	8
2.3 Torsi pada <i>fixed layer</i> dan <i>free layer</i> ketika diberikan arus pada arah yang berlawanan.....	11
2.4 Sebuah sketsa dari sistem (panah pada sumbu silinder mewakili magnetisasi)	12
2.5 Konfigurasi elektron pada sub kulit 3d untuk nikel (Ni)	12
2.6 Konfigurasi elektron pada sub kulit 3d untuk besi (Fe)	13
2.7 Gerak presisi dari momen magnet terhadap medan efektif (a) tanpa redaman (b) dengan redaman (damping)	15
2.8 Energi magnetostatik atau energi demagnetisasi akibat arah dari dipol magnet (a) dipol dengan arah yang sama (b) dipol anti-paralel (c) saling anti-paralel	18
3.1 Diagram alir rancangan penelitian	23
3.2 Diagram alir penelitian.....	25
3.3 Desain geometri diameter <i>nanowire</i> bahan permalloy <i>NiFe</i> pada fenomena STT (<i>Spin Transfer Torque</i>) (a) diameter 10 nm (b) diameter 20 nm	26
3.4 Grafik hubungan antara nilai magnetisasi bahan terhadap waktu (nano sekon)	28
3.5 Grafik hubungan antara energi sistem terhadap rapat arus listrik (a) diameter 10 nm (b) diameter 20 nm	29
3.6 Desain geometri yang digunakan untuk menentukan kecepatan dinding domain pada <i>nanowire</i> menggunakan metode <i>time</i> <i>resolved imaging</i>	30

4.1 Pergeseran posisi dinding domain dalam bahan permalloy <i>NiFe</i> dengan rapat arus listrik (a) $5 \times 10^{10} A/m^2$, (b) $10 \times 10^{10} A/m^2$, (c) $15 \times 10^{10} A/m^2$, (d) $20 \times 10^{10} A/m^2$ ketika polarisasi bahan bernilai 1	32
4.2 Pergeseran posisi dinding domain dalam bahan permalloy <i>NiFe</i> dengan rapat arus listrik (a) $5 \times 10^{10} A/m^2$, (b) $10 \times 10^{10} A/m^2$, (c) $15 \times 10^{10} A/m^2$, (d) $20 \times 10^{10} A/m^2$ ketika polarisasi bahan bernilai 0.5	33
4.3 Pergerakan posisi arah spin domain dalam bahan permalloy <i>NiFe</i> dengan rapat arus listrik (a) $5 \times 10^{10} A/m^2$, (b) $10 \times 10^{10} A/m^2$, (c) $15 \times 10^{10} A/m^2$, (d) $20 \times 10^{10} A/m^2$ ketika polarisasi bahan bernilai 1	35
4.4 Struktur dinding domain pada sumbu z dalam bahan permalloy <i>NiFe</i> dengan rapat arus listrik (a) $5 \times 10^{10} A/m^2$, (b) $10 \times 10^{10} A/m^2$ (c) $15 \times 10^{10} A/m^2$, (d) $20 \times 10^{10} A/m^2$ ketika polarisasi bahan bernilai 1	37
4.5 Struktur dinding domain pada sumbu z dalam bahan permalloy <i>NiFe</i> dengan rapat arus listrik (a) $5 \times 10^{10} A/m^2$, (b) $10 \times 10^{10} A/m^2$ (c) $15 \times 10^{10} A/m^2$, (d) $20 \times 10^{10} A/m^2$ ketika polarisasi bahan bernilai 0.5	38
4.6 Grafik magnetisasi terhadap waktu (M-t) untuk variasi rapat arus listrik pada polarisasi 1 dengan diameter (a) 10 nm, (b) 20 nm.....	40
4.7 Grafik magnetisasi terhadap waktu (M-t) untuk variasi rapat arus listrik pada polarisasi 0.5 dengan diameter (a) 10 nm, (b) 20 nm	40
4.8 Grafik hubungan energi terhadap rapat arus listrik pada diameter (a) 10 nm, (b) 20 nm dengan polarisasi bahan sebesar 1	41
4.9 Grafik hubungan energi terhadap rapat arus listrik pada diameter (a) 10 nm, (b) 20 nm dengan polarisasi bahan sebesar 0.5.....	42

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
4.1 Posisi Dinding Domain pada Diameter 10 nm dan 20 nm	52
4.1.1 Posisi dinding domain untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ dan polarisasi sebesar 1	52
4.1.2 Posisi dinding domain untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ dan polarisasi sebesar 1	53
4.1.3 Posisi dinding domain untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ dan polarisasi sebesar 1	54
4.1.4 Posisi dinding domain untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ dan polarisasi sebesar 1	55
4.1.5 Posisi dinding domain untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ dan polarisasi sebesar 0.5	56
4.1.6 Posisi dinding domain untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ dan polarisasi sebesar 0.5	57
4.1.7 Posisi dinding domain untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ dan polarisasi sebesar 0.5	58
4.1.8 Posisi dinding domain untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ dan polarisasi sebesar 0.5	59
4.2 Pergerakan Arah Spin Domain Arah Sumbu x untuk $t=0$ ns, $t= 2,5$ ns dan $t= 4,5$ ns.....	60
4.2.1 Struktur dinding domain ketika $J = 5 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm, polarisasi bahan sebesar 1 dan 0.5	60
4.2.2 Struktur dinding domain ketika $J = 10 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm, polarisasi bahan sebesar 1 dan 0.5	60
4.2.3 Struktur dinding domain ketika $J = 15 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm, polarisasi bahan sebesar 1 dan 0.5	61
4.2.4 Struktur dinding domain ketika $J = 20 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm, polarisasi bahan sebesar 1 dan 0.5	61

4.2.5 Kecepatan pergerakan arah spin domain pada polarisasi 1 diameter 10 nm dan 20 nm	62
4.2.6 Kecepatan pergerakan arah spin domain pada polarisasi 0.5 diameter 10 nm dan 20 nm	62
4.3 Struktur Dinding Domain dalam Arah Sumbu Z dalam Setiap Variasi Rapat Arus Listrik untuk Polarisasi Bahan 1 dan 0.5...	63
4.3.1 Struktur dinding domain untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ polarisasi bahan 1	63
4.3.2 Struktur dinding domain untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ polarisasi bahan 1	63
4.3.3 Struktur dinding domain untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ polarisasi bahan 1	64
4.3.4 Struktur dinding domain untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ polarisasi bahan 1	64
4.3.5 Struktur dinding domain untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ polarisasi bahan 0.5	65
4.3.6 Struktur dinding domain untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ polarisasi bahan 0.5	65
4.3.7 Struktur dinding domain untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ polarisasi bahan 0.5	66
4.3.8 Struktur dinding domain untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ polarisasi bahan 0.5	66
4.4 Energi Sistem pada Variasi Diameter Nanowire 10 nm dan 20 nm	67
4.4.1 Energi sistem ketika $J = 5 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi 1 dan 0.5	67
4.4.2 Energi sistem ketika $J = 10 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi 1 dan 0.5	68
4.3.3 Energi sistem ketika $J = 15 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi 1 dan 0.5	69

4.3.4 Energi sistem ketika $J = 20 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi 1 dan 0.5	70
4.5 Kecepatan Rata-rata Pergerakan Dinding Domain.....	71
4.5.1 Kecepatan rata-rata untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm, polarisasi 1 dan 0.5	71
4.5.2 Kecepatan rata-rata untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi bahan 1 dan 0.5	72
4.5.3 Kecepatan rata-rata untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi bahan 1 dan 0.5	73
4.5.4 Kecepatan rata-rata untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi bahan 1 dan 0.5	75
4.6 Nilai Magnetisasi Bahan dalam Setia Variasi Rapat Arus Listrik dengan Diameter <i>Nanowire</i> 10 nm, 20 nm dan polarisasi Bahan 1 dan 0.5.....	76
4.6.1 Nilai Magnetisasi untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm	76
4.6.2 Nilai Magnetisasi untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm	76
4.6.3 Nilai Magnetisasi untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm	77
4.6.4 Nilai Magnetisasi untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm	77
4.6.5 Nilai Magnetisasi untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 20 nm	77
4.6.6 Nilai Magnetisasi untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 20 nm	78
4.6.7 Nilai Magnetisasi untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 20 nm	78
4.6.8 Nilai Magnetisasi untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 20 nm	78

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada tahun 1998, Peter Grunberg dari Jurich Research Centre Jerman berhasil menemukan GMR (*Giant Magnetoresistance*). Pada saat yang bersamaan, Albert Fert dari University of Paris-Sud Perancis, menemukan GMR jenis *multilayer* Fe/Cr. Penemuan GMR ini dikenal sebagai tonggak kelahiran dari *spintronic* (*magnetoelectronics*). *Spintronic* merupakan divais yang bekerja dengan memanfaatkan perubahan konfigurasi spin elektron untuk mengontrol pergerakan pembawa muatan (Wolf *et al.*, 2001). Keunggulan dari divais *spintronic* adalah kemampuan proses data yang cepat, ukuran divais yang lebih kecil, konsumsi energi yang rendah dan bersifat *non-volatile* dibandingkan dengan divais semikonduktor konvensional lainnya (Ismail, 2013).

Salah satu material yang berpotensi untuk aplikasi divais *spintronic* ini adalah material ferromagnetik. Hal ini dikarenakan material ferromagnetik memiliki sifat magnetisasi spontan atau yang biasa dikenal sebagai domain magnet (*magnetic domain*). Konfigurasi struktur spin dalam domain magnet dapat dikontrol dengan menggunakan medan magnet (*magnetic field*), sehingga akan terjadi perubahan konfigurasi arah spin dalam domain magnet yang diinterpretasikan sebagai proses pembalikan magnetisasi (*magnetization reversal*). Pembalikan magnetisasi dalam material ferromagnetik merupakan hal yang sangat fundamental pada media penyimpanan data berbasis magnet (Widodo, 2013). Material ferromagnetik $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ atau bahan permalloy merupakan bahan alloy magnetik atau bahan campuran logam yang tersusun atas nikel 80% dan besi 20%. Permalloy dengan kandungan nikel lebih tinggi daripada besi cenderung memiliki permeabilitas lebih besar daripada permalloy nikel rendah namun induksinya lebih rendah pada keadaan jenuh. Bahan permalloy sensitif benturan dan kemagnetannya dipengaruhi tekanan (Putu, 2013).

Penelitian mengenai sifat magnetik pada lapisan tipis (*thin film*) dan dinding domain magnet (*magnetic domain-wall*) dalam material ferromagnetik ini telah banyak menarik perhatian para ilmuwan. Hal ini dikarenakan hasil penelitian

tersebut berpotensi sebagai media penyimpanan data berbasis magnet (*magnetic memory device*) dan sensor magnetik (*magnetic sensor*) yang mana penelitian tersebut dilakukan dengan memanfaatkan konfigurasi momen magnet dalam domain magnet (*magnetic domain*) dan dinding domain magnet (*magnetic domain wall*) (Wolf *et al.*, 2001). Penelitian domain magnet secara umum dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu penelitian yang berhubungan dengan struktur domain magnet dan dinamika *domain-wall* pada material ferromagnetik berbentuk *nanowire*. Pengamatan tersebut dilakukan dengan mengaplikasikan medan magnet luar (Michael dan Donahue, 1997) atau injeksi arus terpolarisasi (*current polarized*) yang dikenal dengan nama STT (*Spin Transfer Torque*) (Nakatani *et al.*, 2004). Hal tersebut menunjukkan bahwa struktur *domain-wall* atau *inner structure* memegang peranan yang sangat penting dalam dinamika *domain-wall* pada ferromagnetik *nanowire* (Mardona, 2012).

STT merupakan suatu pengontrolan arus spin dalam *spintronics*. Spintronika (*spintronics*) merupakan salah satu kajian baru dalam teknologi modern. Kemunculan spintronika dipicu oleh penemuan efek GMR pada logam ferromagnetik. *Spintronics* berasal dari kata *spin based electronics*, yang berarti pengontrolan arus dengan menggunakan spin elektron (Ismail, 2013). Efek GMR pada bahan ferromagnetik 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 sendiri dalam perkembangan piranti penyimpanan magnetik (Atmono dan Yunanto, 2002). Implementasi *spin transfer torque* dalam dunia teknologi memiliki potensi dalam pengembangan perangkat penyimpanan data berbasis magnet yakni MRAM (*Magnetoresistive Random Access Memory*) dengan menggabungkan arus listrik. Pengurangan kerapatan arus listrik merupakan suatu hal yang sangat fundamental dalam penelitian akademik mengenai spin elektronik (Ralph dan Stiles, 2008). Kajian fenomena STT ini menggunakan pemodelan 3D berbentuk *nanowire*. Hal ini dikarenakan *nanowire* merupakan suatu bentuk morfologi yang mudah dalam pengaplikasian rapat arus listrik injeksi.

STT secara sederhana dapat dihasilkan ketika bahan diinjeksi arus listrik sehingga dapat merubah orientasi spin pada momen dipol magnet elektron. Pada bahan *multilayer*, arus listrik yang diinjeksikan akan mengalir pada dua lapisan tipis ferromagnetik yang diselingi dengan bahan non-magnetik. Arus listrik akan lebih mudah mengalir ketika domain magnet dalam lapisan ferromagnetik berorientasi dalam satu arah dibandingkan berlawanan arah. Injeksi arus akan mempengaruhi domain magnet, nilai magnetisasi dan dapat menghasilkan tekanan dinding domain dalam arah aliran elektron. Tekanan dinding domain tersebut akan menghasilkan perubahan magnetisasi seiring peningkatan rapat arus yang terjadi (Franchin, 2009).

Beberapa penelitian sebelumnya telah dikaji mengenai fenomena STT, salah satunya yakni penelitian pada struktur magnetik lapisan *multilayer* oleh Chun-Yeol dari Inha University, Korea Selatan. Penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan simulasi mikromagnetik, yakni dengan mengimplementasikan kontribusi fenomena STT lapisan *multilayer* berdasarkan persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) (You, 2012). Penelitian yang serupa yakni mengenai studi fenomena STT pada material ferromagnetik *nanowire* dengan menggunakan simulasi mikromagnetik pada bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) dilakukan dengan menginjeksikan rapat arus, dan dihasilkan pergerakan dinding domain dengan disertai perubahan arah spin. Dengan menggunakan simulasi mikromagnetik, dapat ditunjukkan bahwa penerapan arus mampu menghasilkan perputaran atau tekanan dinding domain dalam arah aliran elektron (Musyarofah *et al.*, 2016). Tekanan dinding domain tersebut menghasilkan perubahan magnetisasi seiring peningkatan rapat arus yang terjadi. Untuk itu, dilakukan penelitian secara simulasi agar diperoleh pengaruh injeksi rapat arus listrik terhadap magnetisasi material. Semakin besar rapat arus yang diberikan, maka perputaran dinding domain pada *nanowire* dan proses magnetisasi akan semakin cepat (Gerretsen, 2008). Bahan yang digunakan dalam penelitian Musyarofah (2016) yakni bahan $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (*Lanthanum Strontium Manganese Oxide*) yang merupakan salah satu bahan magnetik CMR (*Colossal Magnetoresistance*) berbasis manganit, berbeda dengan bahan yang digunakan dalam penelitian ini

yakni bahan permalloy *NiFe*. Bahan tersebut merupakan bahan ferromagnetik GMR (*Giant Magnetoresistance*) yang berpotensi dalam pembuatan divais *spintronic*.

Berdasarkan uraian di atas, kajian tentang fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) pada bahan permalloy *NiFe* di bawah pengaruh injeksi rapat arus listrik menjadi menarik untuk disimulasikan. Hal tersebut dikarenakan simulasi ini dapat mengetahui karakteristik bahan magnetik yang diprediksi dengan melihat nilai magnetisasi bahan di bawah variasi rapat arus listrik injeksi serta dapat mengetahui sifat magnetik bahan akibat pengaruh ukuran atau dimensi bahan. Selain itu, kecepatan pergerakan dinding domain di bawah pengaruh variasi polarisasi bahan dapat diketahui melalui pengembangan kajian STT secara fenomenologi dengan pendekatan gerakan translasi dinding domain. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan program NMAG (*Nano Magnetic*).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian yang telah ditulis pada latar belakang, rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah:

1. Mengidentifikasi pengaruh variasi rapat arus listrik injeksi terhadap magnetisasi bahan permalloy *NiFe* berbentuk *nanowire* yang dihasilkan pada fenomena STT.
2. Mengidentifikasi pengaruh variasi diameter *nanowire* terhadap energi total bahan permalloy *NiFe* pada fenomena STT.
3. Mengidentifikasi pengaruh polarisasi bahan terhadap kecepatan pergerakan dinding domain bahan permalloy *NiFe* berbentuk *nanowire* dalam fenomena STT.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini difokuskan pada pemahaman fenomena STT bahan permalloy *NiFe* berbentuk *nanowire* dengan panjang 100 nm yang diaplikasikan untuk *storage devices* seperti MRAM, melalui karakteristik bahan magnetik

berupa nilai magnetisasi bahan akibat pengaruh variasi rapat arus listrik injeksi, energi total sistem akibat pengaruh diameter *nanowire*, serta kecepatan pergerakan dinding domain akibat pengaruh polarisasi bahan yang disimulasikan dalam waktu 6 ns melalui simulasi mikromagnetik pemodelan 3D dengan bantuan program NMAG (*Nano Magnetic*).

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh variasi rapat arus listrik injeksi terhadap magnetisasi bahan permalloy *NiFe* berbentuk *nanowire* yang dihasilkan pada fenomena STT.
2. Mengetahui pengaruh variasi diameter *nanowire* terhadap energi total bahan permalloy *NiFe* pada fenomena STT.
3. Mengetahui pengaruh variasi polarisasi bahan terhadap kecepatan pergerakan dinding domain pada bahan permalloy *NiFe* berbentuk *nanowire* yang dihasilkan pada fenomena STT.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan pengetahuan tentang fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) dalam bahan permalloy *NiFe* berbentuk *nanowire*.
2. Memberikan sumbangan penelitian dalam bidang fisika khususnya dalam bidang fisika komputasi mikromagnetik.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bahan Magnetik

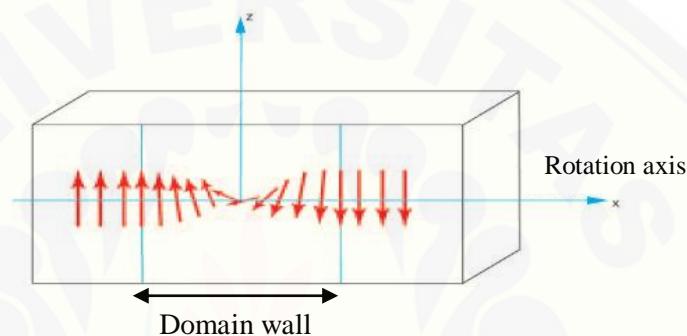
Tipe variasi dari material magnetik dapat diklasifikasikan berdasarkan suseptibilitasnya, χ yakni (Morecroft, 2013):

- a. Material diamagnetik, yang mempunyai nilai suseptibilitas kecil, bernilai negatif $\chi \approx -10^{-5}$, dan respon magnetiknya berlawanan dengan medan magnet luar. Contoh bahan diamagnetik adalah tembaga, perak, emas, bismuth, dan berillium.
- b. Material paramagnetik, yang mempunyai nilai suseptibilitas kecil dan bernilai positif ($\chi \approx 10^{-3} - 10^{-5}$). Bahan paramagnetik memiliki magnetisasi lemah dan respon magnetiknya sejajar dengan arah dari medan magnet. Contoh bahan paramagnetik adalah aluminium, platinum dan manganit.
- c. Material ferromagnetik, yang mempunyai nilai suseptibilitas lebih besar dari 1 dan bernilai positif. Bahan ini mempunyai magnetisasi spontan meskipun medan luar nol. Hal tersebut terjadi ketika momen magnet atom cenderung bersusun sejajar sesamanya. Contoh bahan ferromagnetik adalah besi, kobalt, nikel, dan alloy.
- d. Material antiferromagnetik, yang merupakan campuran ionik, seperti oksida, sulfida dan klorida. Bahan ini mirip dengan bahan paramagnetik yang memiliki nilai suseptibilitas kecil dan bernilai positif, akan tetapi nilai suseptibilitasnya memiliki ketergantungan pada temperatur serta memiliki struktur magnetik keseluruhan yang berbeda. Bahan ini juga memiliki magnetisasi spontan meskipun medan luar nol, akan tetapi momen magnetik atomnya tersusun antiparalel sesamanya.

2.2 Ferromagnetik

Salah satu sifat dasar magnetik dari material ferromagnetik ini yakni memiliki magnetisasi spontan yang bergantung pada temperatur. Jika bahan ferromagnetik dipanaskan sampai di atas temperatur Curie maka magnetisasi

spontan akan menghilang dan bahan menjadi paramagnetik. Hal ini dikarenakan momen magnet terorientasi secara acak. Bahan ferromagnetik walaupun memiliki magnetisasi spontan di bawah temperatur Curie, akan tetapi secara makroskopik bahan tersebut tidak menunjukkan adanya magnetisasi atau $M=0$ (Norita, 2008). Hal tersebut disebabkan karena adanya domain-domain magnet, yaitu daerah dimana orientasi momen dipol magnetnya searah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Daerah yang membatasi antara domain magnet dalam bahan tersebut disebut dinding domain (Bloch, 1932).



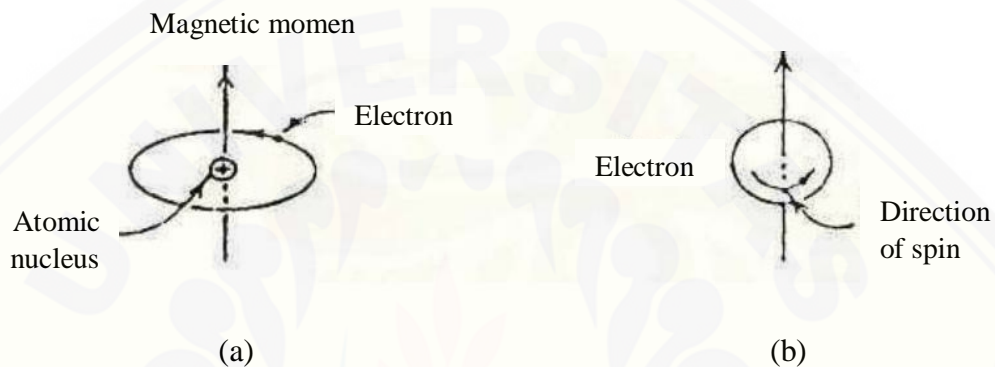
Gambar 2.1 Momen magnet dengan orientasi 0° sampai 180° (Sumber: Nicola, 2011)

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

2.3 Momen Magnet

Sifat magnetik makroskopik suatu material adalah akibat dari momen-momen magnetik yang berkaitan dengan elektron-elektron individual. Setiap elektron dalam atom mempunyai momen magnet yang berasal dari dua sumber. Yang pertama berasal dari gerakan elektron mengelilingi inti. Elektron yang mengelilingi inti ini dapat dianggap sebagai *loop* arus kecil, yang menghasilkan

medan magnet yang kecil pula, dan mempunyai momen magnet sepanjang sumbu rotasinya yang disebut sebagai momen magnet orbital yang diilustrasikan seperti pada Gambar 2.2.a. Sumber kedua berasal dari perputaran elektron mengelilingi sumbunya menghasilkan momen magnet spin seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.b. Momen magnet spin memiliki dua arah yaitu spin *up* dan spin *down*. Karena itu setiap elektron dalam atom memiliki momen magnet orbital dan momen magnet spin (Getzalf, 2007).



Gambar 2.2 Momen magnet yang berhubungan dengan (a) orbit elektron (b) perputaran elektron terhadap sumbunya (Sumber: Getzalf, 2007)

2.4 Domain Magnet

Domain magnet adalah daerah-daerah mikroskopik tempat atom-atom magnetik tersusun atau terkelompokkan. Dalam magnetik kristal, sebuah kristal dapat disusun oleh beberapa domain yang dipisahkan oleh dinding domain. Domain-domain tersebut terorientasi dalam arah random sehingga mengalami magnetisasi dalam medan eksternal. Jika bahan ferromagnetik diberi medan luar, maka domain-domain tersebut akan terorientasi. Jika magnetisasi domain ini tetap (tidak berubah) sekalipun medan eksternalnya dihilangkan, maka bahan tersebut dikatakan sebagai magnet permanen. Sebuah bahan magnet dapat berubah menjadi bahan non-magnetik, jika bahan tersebut dipanaskan sampai pada temperatur tertentu sehingga domain-domain yang ada perlahan-lahan hilang. Temperatur dimana sifat magnetik mengalami perubahan disebut dengan titik Curie (Aharoni, 1995). Domain magnet mewakili orientasi tertentu dari momen magnet. Momen magnet yang berorientasi sama bergabung dalam kelompok-

kelompok domain. Daerah batas antar momen magnet yang memiliki orientasi berbeda disebut *domain-wall*. Magnetisasi spontan yang diberikan pada suatu bahan mengakibatkan *domain-wall* mengalami perubahan atau perpindahan yang disebut *domain-wall displacement* (Chikazumi, 1997).

Pembentukan *domain-wall* magnet pada bahan ferromagnetik merupakan kompetisi antara energi *exchange* dengan energi anisotropi. Energi *exchange* berasal dari interaksi antara spin atom dengan spin tetangga. Energi *exchange* cenderung digunakan untuk mempertebal *domain-wall*. Namun transisi arah spin menyebabkan efek anisotropi meningkat dan cenderung untuk membuat tipis *domain-wall*. Pada kondisi kesetimbangan, energi dan lebar *domain-wall* dapat ditentukan dari energi *exchange* dan energi anisotropi (Mardona, 2012).

Sebuah spesimen bahan ferromagnetik terdiri dari beberapa daerah kecil yang disebut domain yang termagnetisasi secara spontan. Besar dari magnetisasi spontan dari spesimen ditentukan dengan penjumlahan vektor dari momen magnetik pada setiap domain. Bahan ferromagnetik terdiri dari N atom per satuan volume yang memiliki total momentum angular J , dengan sebuah analogi kita dapat menyatakan magnetisasi dalam persamaan sebagai berikut (Puri dan Babbar, 2001):

$$M = NgJ\mu_B B_J(x) \quad (2.1)$$

dimana

$$B_J(x) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{x}{2J}\right) \quad (2.2)$$

dan

$$x = \frac{gJ\mu_B B_{eff}}{kT} = \frac{gJ\mu_B}{kT} (B + \lambda M) \quad (2.3)$$

pada kasus magnetisasi spontan, $B=0$, maka

$$x = \frac{gJ\mu_B \lambda M}{kT} \quad (2.4)$$

$$M(T) = \frac{xkT}{\lambda gJ\mu_B} \quad (2.5)$$

Jika $T \rightarrow 0$ atau $x \rightarrow \infty$, $B_j(x) \rightarrow 1$, momen magnet mengarah sejajar ke arah medan dan magnetisasi menjadi magnetisasi saturasi, $M_s(0)$ sehingga

$$M_S(0) = NgJ\mu_B \quad (2.6)$$

dimana g adalah faktor Lande yang dapat diperoleh dari

$$g = 1 + \frac{J(J+1)+S(S+1)-L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (2.7)$$

Keterangan:

M = Magnetisasi

N = Jumlah atom

g = Faktor lande

J = Momentum angular

L = Momentum sudut orbital

S = Momentum sudut spin

μ_B = Magneton Bohr

B = Induksi medan magnet

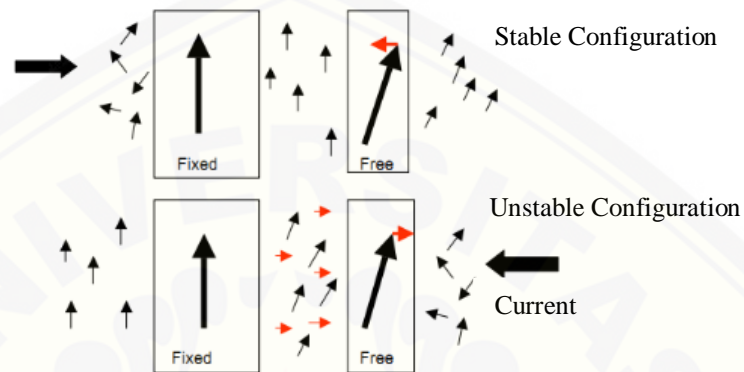
λ = Faktor redaman

2.5 Proses STT (*Spin Transfer Torque*) dalam Bahan Ferromagnetik

STT merupakan suatu proses 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 pada logam ferromagnetik. Aplikasi memori spintronika telah banyak dikaji seperti MRAM (*Magnetic Random Access Memory*) (Ismail, 2013).

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

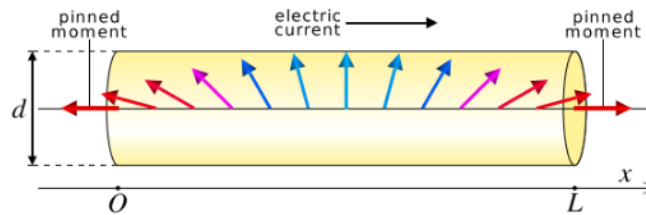
terlebih dahulu melewati *free layer* maka arus spin akan bergerak ke kiri dan mendesak torsi sehingga magnetisasi bahan berotasi ke arah antiparalel dengan spin pada *fixed layer* sehingga terjadi perubahan resistansi yang besar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 (Gerretsen, 2008).



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

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

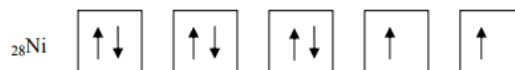
Gerakan *domain walls* dalam arah aliran arus dapat dihasilkan ketika spin terpolarisasi oleh arus. Penerapan arus tersebut mampu menghasilkan tekanan *domain walls* dalam arah aliran elektron. Suatu sistem mencapai kesetimbangan ditandai dengan rotasi dari tekanan *domain-walls* tersebut di sekitar 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)

2.6 Bahan Permalloy *NiFe*

Salah satu lapisan tipis magnetik yang sedang dikembangkan saat ini adalah lapisan tipis *alloy NiFe*. Lapisan ini merupakan salah satu material magnetik utama dan merupakan bahan dasar dalam sistem perekam data. Lapisan tipis *alloy NiFe* merupakan bahan yang mempunyai sifat magnetoresistif, sehingga baik untuk bahan dasar sensor magnet (Jannah, 2006). Material ferromagnetik $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ atau bahan permalloy merupakan bahan alloy magnetik atau bahan campuran logam yang tersusun atas nikel 80% dan besi 20%. Permalloy dengan kandungan nikel lebih tinggi daripada besi cenderung memiliki permeabilitas lebih besar daripada permalloy nikel rendah namun induksinya lebih rendah pada keadaan jenuh. Bahan permalloy sensitif terhadap benturan dan kemagnetannya sangat dipengaruhi tekanan (Putu, 2013). Bahan permalloy yang digunakan pada penelitian ini meliputi nikel dan besi. Nikel merupakan logam yang berwarna putih mengkilat, keras dan tahan korosi. Sifat-sifat seperti itu dapat dimanfaatkan untuk melapisi barang-barang yang terbuat dari besi, baja, atau tembaga, sehingga barang-barang itu terlindungi dari korosi. Nikel juga biasa digunakan sebagai paduan logam seperti *stainless steel*, monel (Ni, Cu, dan sedikit Fe), nikrom (Ni, Fe, dan Cr), alnico (Al, Ni, Fe, dan Co), dan paduan *NiFe*. Nikel mempunyai momen magnetik sebesar 2μ , nomor atom 28 dan 2 elektron yang tidak berpasangan pada sub kulit atom 3d dengan konfigurasi elektron seperti pada Gambar 2.5 (Smith, 1993).



Gambar 2.5 Konfigurasi elektron pada sub kulit 3d nikel (Ni) (Sumber:Smith, 1993)

Besi murni adalah logam yang berwarna putih mengkilat dan relatif lunak. Besi merupakan logam yang reaktif dan mudah terkorosi dalam udara lembab. Besi mudah dicampurkan dengan zat-zat lain, sehingga menjadi bahan yang keras dan tidak mudah berkarat. Besi mempunyai nomor atom 26 dan 4 elektron yang tidak berpasangan pada sub kulit 3d, sebagaimana konfigurasi elektron yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Momen magnet ini disebabkan karena adanya pergerakan elektron yang mengelilingi inti dan berputar pada sumbunya. Besar momen magnet besi yakni 4μ . Karena setiap elektron yang berputar mempunyai momen dipol magnet, maka momen dipol magnet tersebut atau yang biasa dikenal dengan magneton Bohr nilainya sebesar $\mu_B = 9,27 \times 10^{-24} Am^2$ (Smith, 1993)



Gambar 2.6 Konfigurasi elektron pada sub kulit 3d besi (Fe) (Sumber:Smith, 1993)

2.7 Dinamika Magnetisasi

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

Konsep dasar dinamika magnetisasi adalah suatu momen magnet \mathbf{m} yang mendapatkan medan eksternal \mathbf{H} sehingga menghasilkan torca dengan arah tegak lurus terhadap momen magnet dan medan magnet eksternal. Torca ini mengakibatkan momen magnet melakukan gerak presisi (*precession motion*) di sekitar arah dari medan magnet eksternal yang diberikan. Hubungan antara torca dan perubahan momentum angular terhadap waktu dapat dituliskan sebagai berikut (Widodo, 2013):

$$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{m} \times \mathbf{H} \quad (2.8)$$

dimana \mathbf{T} merupakan torca, \mathbf{L} momentum angular, \mathbf{m} momen magnet dan \mathbf{H} adalah medan eksternal.

Momen magnet mempunyai orde atom yang memiliki hubungan dengan momentum angular yang diekspresikan sebagai berikut:

$$\mathbf{m} = -\gamma\mathbf{L} \quad (2.9)$$

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

$$\gamma = g \frac{|e|\hbar}{2m_e c} \quad (2.10)$$

dimana $g \approx 2$ adalah *faktor Lande*, muatan elektron $e = -1,6 \times 10^{-19}c$ dan massa elektron $m_s = 9,1 \times 10^{-31}c kg$, kecepatan cahaya $c = 3 \times 10^8 ms^{-1}$.

Maka untuk persamaan momen magnetik \mathbf{m} terhadap waktu dapat ditulis:

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

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

$$\frac{1}{dV} \frac{d\Sigma\mathbf{m}}{dt} = -\gamma \frac{d\Sigma\mathbf{m}}{dV} \times \mathbf{H} \quad (2.12)$$

dimana $\mathbf{M} = \frac{d\Sigma\mathbf{m}}{dV}$, sehingga persamaan (2.12) menjadi:

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

2.7.1 Persamaan Landau-Lifshitz (LL)

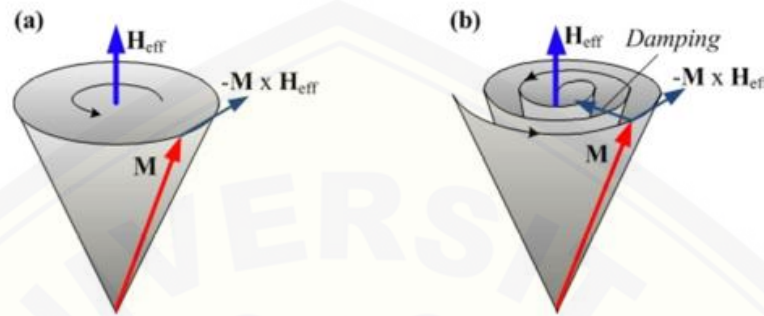
Pada dasarnya dinamika gerak spin magnet dapat digambarkan sebagai gerak rotasi dari momen magnet terhadap arah medan efektif \mathbf{H}_{eff} pada saat keadaan equilibrium, sehingga persamaannya dapat ditulis sebagai berikut (Ismail, 2013):

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

dari persamaan (2.14) tergambar fenomena yang mendeskripsikan bahwa tidak ada kecenderungan gerak spin magnet untuk menyearahkan diri terhadap \mathbf{H}_{eff} . Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.7(a) Landau-Lifshitz telah menyempurnakan dengan memasukkan *faktor redaman* pada Gambar 2.7(b) ke persamaan (2.14) sehingga menjadi:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} \frac{\lambda}{|\mathbf{M}|} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) \quad (2.15)$$

dimana $\lambda > 0$ merupakan *faktor* redaman Landau-Lifshitz dan $|\mathbf{M}| = M_S$. Persamaan (2.15) tersebut dikenal sebagai persamaan Landau-Lifshitz (LL).



Gambar 2.7 Gerak presisi dari momen magnet terhadap medan efektif (a) tanpa redaman (b) dengan redaman (damping) (Sumber: Widodo, 2013)

2.7.2 Persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)

Pada sebuah pendekatan yang berbeda diusulkan oleh Gilbert pada tahun 1955. Hal tersebut dilakukannya setelah mengalami adanya fenomena disipasi yang menyebabkan persamaan LL yang tidak akurat untuk kasus *faktor* redaman yang besar. Oleh karena itu Gilbert menambahkan persamaan torca (Widodo, 2013):

$$\frac{\alpha}{M_S} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.16)$$

sehingga persamaan (2.14) dapat ditulis:

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

dimana $\alpha > 0$ adalah konstanta redaman Gilbert. Maka persamaan tersebut dikenal sebagai persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert. Jika persamaan (2.17) dikalikan dengan \mathbf{M} , maka akan diperoleh bentuk persamaan:

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

dengan menggunakan sifat identitas vektor yaitu $\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})\mathbf{b} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})\mathbf{c}$ dan menganggap $\mathbf{M} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = 0$, maka persamaannya (2.18) dapat dituliskan kembali sebagai berikut:

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

maka dapat disubstitusikan persamaan (2.19) ke persamaan (2.17), sehingga diperoleh:

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

kemudian persamaan terakhir dapat diekspresikan menjadi:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1+\alpha^2)} (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) - \frac{\gamma}{(1+\alpha^2)M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) \quad (2.21)$$

Persamaan (2.21) merupakan ekspresi dari persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert dengan mengasumsikan:

$$\frac{\gamma}{L} = \frac{\gamma}{(1+\alpha^2)} \quad \text{dan} \quad \lambda = \frac{\gamma}{(1+\alpha^2)M_s} \quad (2.22)$$

Keterangan:

\mathbf{T} = Torca

\mathbf{m} = Momen magnet

\mathbf{H} = Medan luar

γ = Rasio *gyromagnetic*

\mathbf{L} = Momentum angular

g = Faktor lande

e = Muatan elektron

m_s = Massa elektron

c = Kecepatan cahaya

λ = Faktor redaman Landau-Lifshitz

α = Konstanta redaman

\mathbf{M} = Magnetisasi

M_s = Magnetisasi saturasi

\mathbf{H}_{eff} = Medan luar efektif

Suku pertama pada sisi kanan pada persamaan (2.21) menjelaskan proses gerakan presesi dari spin berotasi karena pengaruh medan magnet eksternal (*gyromagnetic precession*) atau dikenal dengan *Larmor precession* dan suku kedua menjelaskan efek disipasi dari gerakan presesi atau disebut juga *the*

damping effect of precession. Untuk nilai faktor damping α yang kecil, maka suku $(1 + \alpha^2)$ sama dengan satu, sehingga persamaan LLG dapat disederhanakan menjadi persamaan LL (Widodo, 2013).

2.8 Energi Sistem Ferrmoganetik

2.8.1 Energi Exchange

Energi *exchange* merupakan energi yang timbul dari interaksi spin dengan spin tetangganya melalui *exchange coupling*. Energi *exchange* E_{ex} dari interaksi antara spin dalam material ferromagnetik dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini (Getzlaff, 2008):

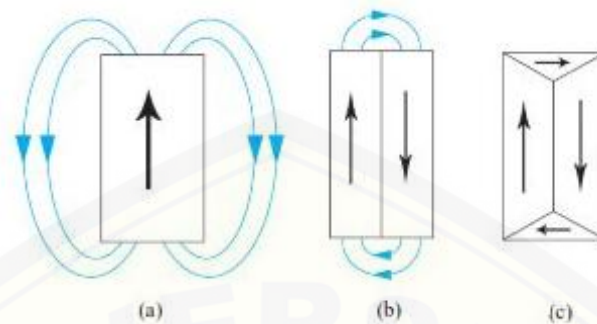
$$E_{ex} = -2J \sum_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \quad (2.23)$$

Dimana \mathbf{S}_i dan \mathbf{S}_j adalah unit vektor dua spin atom yang berinteraksi, persamaan (2.23) disebut juga dengan *Heisenberg model*. Interaksi dua spin tergantung pada spin paralel atau antiparalel yang harus mengikuti prinsip larangan pauli (*Pauli Exclusion*) yaitu tidak diperkenankan ada dua elektron yang mempunyai bilangan kuantum yang sama pada tempat dan waktu yang sama.

2.8.2 Energi Magnetostatik

Energi magnetostatik pada material magnet berasal dari interaksi muatan pada kutub-kutub seperti muatan positif dan negatif (dipol-dipol) yang berasal dari material itu sendiri (Alberto, 2009). Gambar 2.3 mengilustrasikan bahwa magnetisasi menyebabkan dipol-dipol berperilaku sebagai magnet dengan medan magnetik disekitarnya. Medan magnetik tersebut dikenal dengan medan demagnetisasi (*demagnetizing field*), H_d , sehingga energi magnetostatik sering juga disebut sebagai energi demagnetisasi. Besarnya energi magnetostatik sangat bergantung pada jumlah dipol serta arah yang sama antara dipol magnet satu dengan yang lainnya. Energi magnetostatik pada dipol magnet dengan arah yang sama, Gambar 2.8(a) lebih besar jika dibandingkan dengan material magnet dengan dipol-dipol anti paralel satu dengan lainnya, Gambar 2.8(b). Sedangkan

keadaan dipol-dipol seperti pada Gambar 2.8(c) dapat menyebabkan energi magnetostatik pada keadaan ini bernilai minimum (Nicola, 2011).



Gambar 2.8 Energi magnetostatik atau energi demagnetisasi akibat arah dari dipol magnet (a) dipol dengan arah yang sama (b) dipol anti-paralel (c) saling anti-paralel (b) (Sumber: Nursiyanto, 2014)

Menurut Alberto (2009), energi magnetostatik E_d , dianggap sebagai besarnya energi magnetisasi di dalam medan demagnetisasi yang dijelaskan oleh persamaan:

$$E_d = -\frac{1}{2}\mu_0 \int \mathbf{H}_d \cdot \mathbf{M} dV \quad (2.24)$$

dimana \mathbf{H}_d merupakan medan demagnetisasi dan \mathbf{M} adalah magnetisasi. Energi magnetostatik E_d dapat juga ditulis sebagai:

$$E_d = \frac{1}{2}\mu_0 \int_{all\ space} \mathbf{H}_d^2 dV \quad (2.25)$$

dengan

$$\mathbf{H}_d = -N_d \mathbf{M} \quad (2.26)$$

dimana N adalah faktor demagnetisasi yang bergantung pada bentuk bahan dan arah magnetisasi.

Keterangan:

E_d = Energi magnetostatik

\mathbf{H}_d = Medan demagnetisasi

V = Volume

N_d = Faktor demagnetisasi

2.8.3 Energi *Magneto Crystalline Anisotropy*

Energi *magneto crystalline anisotropy* adalah energi yang tergantung pada orientasi arah magnetisasi dan sumbu kristalografi (*crystallographic axes*). Energi anisotropi ini berasal dari interaksi spin-orbit dan tergantung pada orientasi arah magnetisasi relatif terhadap arah kristalografi. Jadi besarnya energi *magneto crystalline anisotropy* tergantung pada karakteristik kristalografi dari material (Getzlaff, 2008).

2.8.4 Energi Zeeman

Energi Zeeman adalah energi yang berasal dari interaksi medan vektor magnetisasi (momen magnet) dengan medan magnet eksternal \mathbf{H}_{ext} . Besarnya energi Zeeman diberikan oleh:

$$E_z = -\mu_0 \int \mathbf{H}_{\text{ext}} \cdot \mathbf{M} dV \quad (2.27)$$

dimana \mathbf{H}_{ext} merupakan medan eksternal yang diberikan pada material dan V adalah volume. Nilai energi Zeeman akan terminimalisasi jika orientasi arah magnetisasi searah dengan arah medan yang diberikan (Widodo, 2013).

2.9 Polarisasi Bahan

Medan listrik di sekitar bahan mengakibatkan atom-atom pada bahan membentuk momen-momen dipol listrik. Banyaknya momen-momen dipol listrik per satuan volume bahan disebut polarisasi bahan (Sarwate, 1990). Proses polarisasi tersebut mengindikasikan bahwa bahan memberikan respon terhadap adanya medan listrik di sekitar bahan. Polarisasi mengidentifikasi keberadaan medan listrik yang telah terkutubkan (polar). Polarisasi ini terjadi karena medan listrik cenderung memisahkan muatan positif dan muatan negatif di dalam atom. Pada proses pemisahan muatan positif (inti) dan negatif (elektron terikat) tersebut, elektron- elektron terikat di dalam atom bergeser dari kedudukan setimbangnya dengan jarak yang lebih kecil daripada diameter atom. Hasil akhir dari pembentukan momen-momen dipol listrik ini adalah terjadinya penumpukan muatan positif dan muatan negatif pada sisi-sisi yang berbeda pada bahan. Proses ini sering disebut dengan polarisasi bahan.

Polarisasi magnet, \mathbf{P} dari bahan ferromagnetik tidak selalu berbanding lurus terhadap pengaruh medan magnet luar. Polarisasi dalam magnet mula-mula bertambah dan agak terhambat karena berkenaan dengan nukleasi magnetisasi. Dalam hal ini penambahan polarisasi magnet berkenaan dengan pergerakan dinding domain dalam butir kristal sampai tercapai butir dengan domain tunggal dan akhirnya polarisasi magnet menjadi konstan pada medan magnet tertentu. Pada saat ini polarisasi mencapai nilai maksimum, yaitu telah mencapai tingkat saturasi, P_s atau polarisasi total. Pada keadaan ini seluruh momen magnet telah terorientasi searah dengan medan magnet luar. Jadi yang terjadi dalam proses ini adalah suatu rotasi polarisasi terhadap arah medan magnet luar. Hubungan antara medan magnet luar, induksi magnet, dan magnetisasi dapat dilihat dalam persamaan (Bertoti, 1998):

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.28)$$

karena:

$$\mathbf{P} = \mu_0\mathbf{M} \quad (2.29)$$

maka persamaan (2.28) menjadi:

$$\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H} + \mathbf{P} \quad (2.30)$$

Keterangan:

- \mathbf{B} = Induksi magnet (Tesla)
- \mathbf{H} = Medan magnet luar (A/m)
- \mathbf{M} = Magnetisasi (A/m)
- μ_0 = Permeabilitas ruang hampa
- \mathbf{P} = Polarisasi dalam satuan Tesla

2.10 Simulasi Mikromagnetik

Konsep dasar mikromagnetik adalah menggunakan konsep *continuum* yaitu suatu konsep fisika untuk menjelaskan sifat-sifat material ferromagnetik pada skala mikro menggunakan pendekatan mekanika klasik, dengan fungsi energi sistem yang bersifat kontinu pada kondisi kesetimbangan. Dengan menggunakan konsep *continuum* memungkinkan untuk perhitungan distribusi magnetisasi pada sampel dengan bentuk acak. Perhitungannya berdasarkan prinsip

minimalisasi pada fungsi energi sistem, sehingga perubahan magnetisasi dan profil energi dapat ditentukan (Ismail, 2003).

Program simulasi mikromagnetik ini menggunakan metode *Finite Element* (NMAG). NMAG merupakan sebuah program *open source* yang diaplikasikan dalam sistem operasi Linux. Program tersebut memiliki skrip *Python* (.py) yang merupakan salah satu input yang berisi parameter-parameter bahan yang akan dieksekusi pada terminal *Linux*. Beberapa keuntungan penting dari NMAG adalah: penggunaan NMAG didasarkan pada metode elemen hingga yang cocok untuk komputasi struktur non-kubus, deskripsi yang ada pada *Python* mempunyai tingkat fleksibilitas yang tinggi, penyimpanan data efisien karena kompresi biner, dan peluang dikembangkannya file .vtk untuk visualisasi yang masih tinggi. Visualisasi dari file .vtk meliputi data magnetisasi dinamis yang diolah menggunakan program Mayavi (Lefter dan Mihai, 2012).

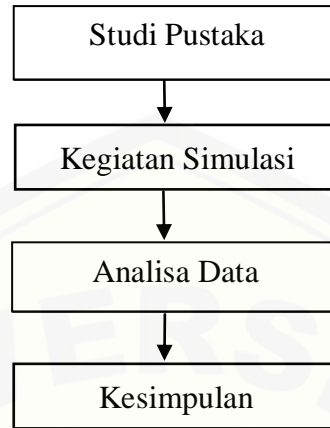
BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fisika Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Penelitian yang dilakukan meliputi kajian fenomena STT pada bahan permalloy *NiFe* berbentuk *nanowire* melalui simulasi mikromagnetik. Peralatan yang 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 4GB, *processor* Intel® Core™ i3-3240 CPU @ 3,40GHzx4 dan tipe sistem 64 bit.

Penelitian ini diawali dengan studi pustaka dari berbagai sumber berupa buku, jurnal ilmiah, skripsi, tesis dan disertasi. Hal ini dilakukan untuk observasi terhadap topik penelitian. Kemudian dilanjutkan dengan melakukan penginstalan *software* pada komputer. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah program NMAG, *software* Mayavi dan Origin. Program NMAG digunakan untuk *running* simulasi mikromagnetik berbasis *Finite Element*. Mayavi digunakan untuk membuat visualisasi struktur domain dalam 3 dimensi. Origin digunakan untuk membuat grafik-grafik dari pengolahan data simulasi. Setelah *software* terinstall dan siap digunakan maka dilakukan kegiatan simulasi. Simulasi dilakukan dengan membuat file bahan yang berisi parameter *input* bahan *NiFe* (.py) yaitu M_s (magnetisasi saturasi), K (konstanta anisotropi), A (konstanta *exchange*), konstanta *damping*, polarisasi bahan dan rapat arus listrik. Selain itu juga membuat file *input* yang berisi bentuk dan ukuran geometri bahan (.geo). Kedua file tersebut diletakkan dalam satu folder, kemudian dilakukan *running* simulasi. Simulasi mikromagnetik dijalankan dengan memvariasikan rapat arus listrik, diameter *nanowire*, dan polarisasi bahan. *Data output* yang diperoleh berupa magnetisasi bahan dalam variasi rapat arus, energi total dalam variasi diameter *nanowire*, dan kecepatan dinding domain dalam variasi polarisasi bahan. Kemudian dari data *output* tersebut dilakukan analisis. Hasil analisis ini menjadi

dasar untuk membuat kesimpulan. Diagram alir dari rancangan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir rancangan penelitian

3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis data yang terdapat dalam penelitian ini yakni berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif didapatkan dari hasil *running* simulasi dan data kualitatif didapatkan dari analisis visualisasi Gambar. Sumber data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder. Data input yang digunakan didapatkan dari hasil penelitian yang sudah ada sebelumnya. Data yang digunakan untuk *input* simulasi mikromagnetik pada permalloy *NiFe* sebagaimana ditunjukkan pada tabel 3.1. Data tersebut meliputi M_s (magnetisasi saturasi), K (konstanta anisotropi), A (konstanta *exchange*) dan konstanta damping. Adapun ide awal penelitian ini berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Musyarofah (2016).

Tabel 3.1. Parameter material permalloy *NiFe* untuk *input* data simulasi mikromagnetik

Bahan	M_s (A/m)	K (J/m)	A (J/m ³)	Konstanta damping
permalloy	8×10^5	5×10^3	1.3×10^{-11}	0.5

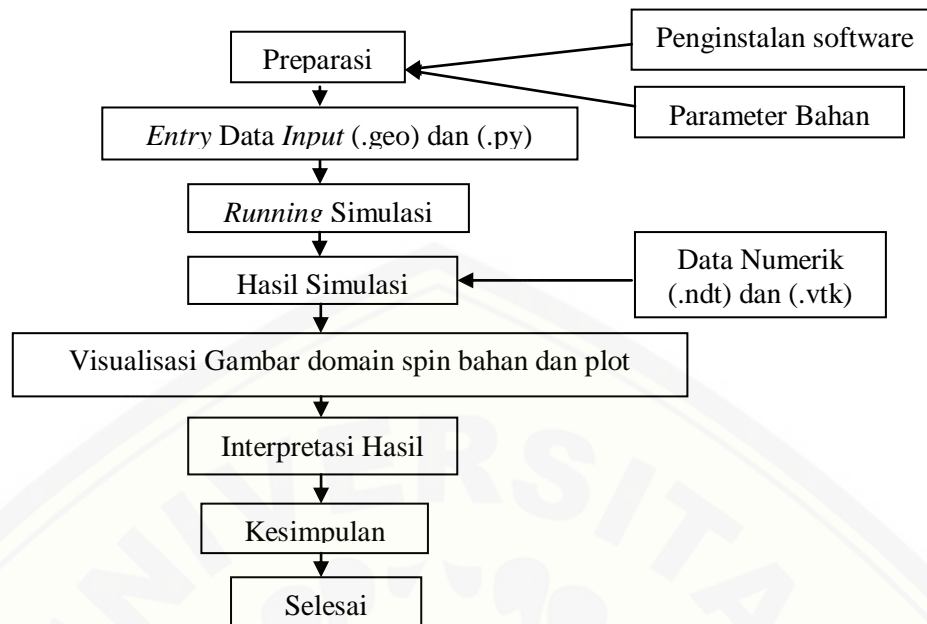
Sumber : Indrawati dan Suharyadi (2014)

3.3 Definisi Operasional Variabel

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Variabel bebas didefinisikan sebagai variabel yang mempengaruhi atau menyebabkan timbulnya variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah rapat arus listrik, diameter *nanowire* dan polarisasi bahan. Variasi rapat arus listrik yang digunakan dalam simulasi ini adalah 5×10^{10} , 10×10^{10} , 15×10^{10} , dan 20×10^{10} A/m². Variasi tersebut ditentukan berdasarkan observasi terlebih dahulu, dengan menginjeksikan rapat arus listrik di bawah 5×10^{10} A/m², maka posisi dinding domain yang teramati tidak menunjukkan adanya pergeseran seiring dengan semakin meningkatnya rapat arus listrik injeksi. Posisi dinding domain tersebut hanya dapat mengubah perputaran spin domain. Variasi diameter *nanowire* yang akan disimulasikan yakni 10 nm dan 20 nm, serta variasi polarisasi bahan sebesar 0.5 dan 1. Variabel terikat yang terdapat pada penelitian ini adalah magnetisasi bahan, energi total sistem ferromagnetik, dan kecepatan dinding domain. Menurut Bertoti (1998) keterkaitan polarisasi bahan dengan magnetisasi bahan yakni berbanding lurus. Variabel kontrol didefinisikan sebagai variabel yang dibuat sama selama proses simulasi. Variabel kontrol yang terdapat pada penelitian ini adalah waktu dan panjang *nanowire*. Objek magnetik yang dianalisis pada penelitian ini adalah *nanowire* dengan panjang sebesar 100 nm. Simulasi dilakukan pada waktu yang seragam di setiap perlakuan yakni 6 ns. Penentuan waktu simulasi tersebut didasarkan pada penelitian Musyarofah (2016). Semakin banyak waktu simulasi yang dilakukan, maka proses *running* akan semakin lama.

3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

Penelitian yang dilakukan secara umum digambarkan dalam diagram alir penelitian seperti pada Gambar 3.2 yakni:



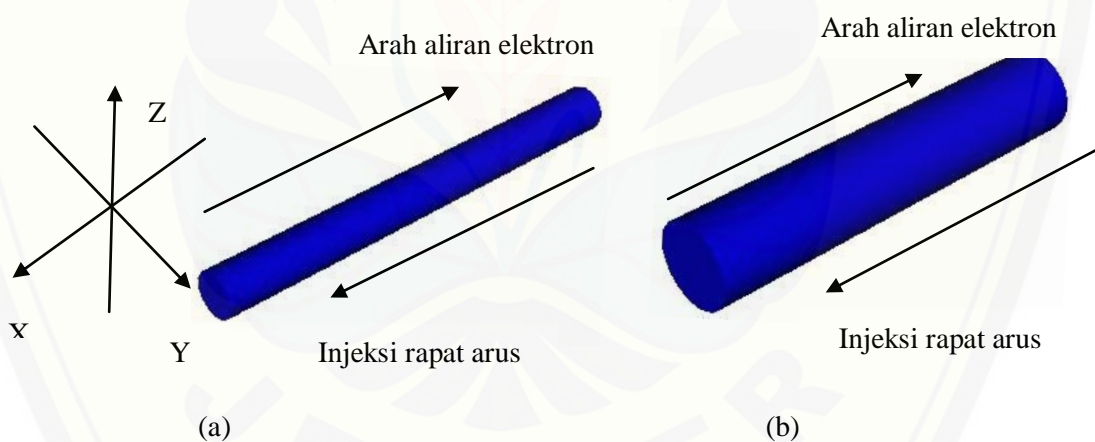
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

3.5 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan menggunakan software berlisensi *Public* yaitu NMAG (*Nano Magnetic*) yang dapat dijalankan pada sistem operasi GNU/Linux. Jenis metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Finite Element*. 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. Penggunaan metode elemen hingga dapat menyelesaikan permasalahan LLG dari sebuah sistem dengan mengkonversikan menjadi sistem diskrit sehingga memungkinkan untuk diselesaikan secara numerik.

Langkah pertama yang dilakukan dalam penelitian ini yakni dimulai dengan persiapan. Tahap persiapan tersebut meliputi penginstalan *software* (program NMAG, *software* Mayavi dan Origin) yang akan digunakan untuk *running* dan persiapan parameter-parameter bahan permalloy *NiFe* yang akan dimasukkan ke dalam *script*. Parameter-parameter bahan *NiFe* yang digunakan seperti pada tabel 3.1 yakni M_s (magnetisasi saturasi), K (konstanta anisotropi), A

(konstanta *exchange*) dan konstanta *damping*. Setelah parameter-parameter tersebut dimasukkan ke dalam *script*, data input simulasi meliputi file (.geo) berupa ukuran diameter dan panjang *nanowire* serta file (.py) berupa variasi rapat arus listrik injeksi dan variasi polarisasi bahan ditambahkan ke dalam *script*. Tahap selanjutnya adalah *running* simulasi pada terminal Linux. Hasil dari simulasi tersebut akan berupa data numerik yang terdiri dari file (.ndt) dan (.vtk) yang akan digunakan pada tahap visualisasi. Visualisasi Gambar domain spin bahan seperti pada Gambar 3.3 berikut dilakukan dengan menggunakan software mayavi melalui file (.vtk) yang dihasilkan. Langkah selanjutnya yakni pembuatan grafik dari file (.ndt) menggunakan software Origin untuk masing-masing parameter yang telah divariasikan. Hasil dari visualisasi Gambar dan grafik tersebut nantinya akan digunakan untuk proses interpretasi hasil atau analisis. Setelah dilakukan analisis, maka akan diperoleh suatu kesimpulan yang akan menjadi indikasi bahwasanya penelitian ini telah selesai dilakukan.



Gambar 3.3 Desain geometri diameter *nanowire* bahan Permalloy *NiFe* pada fenomena STT (*Spin Transfer Torque*) (a) diameter 10 nm dan (b) diameter 20 nm

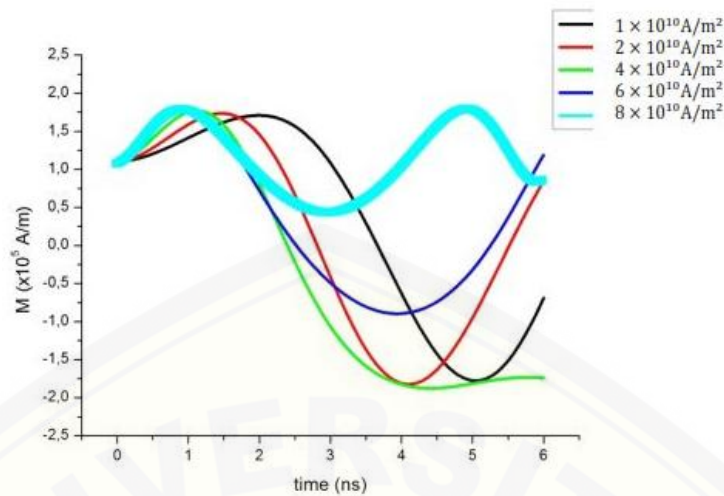
3.6 Metode Analisis Data

Analisis data yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

3.6.1 Analisis Pengaruh Variasi Rapat Arus Listrik Terhadap Magnetisasi Bahan

Analisis pengaruh variasi rapat arus listrik terhadap magnetisasi bahan ini dilakukan dengan mengamati posisi dinding domain, arah spin domain, struktur domain serta grafik hubungan magnetisasi terhadap waktu (M-t). Posisi dinding

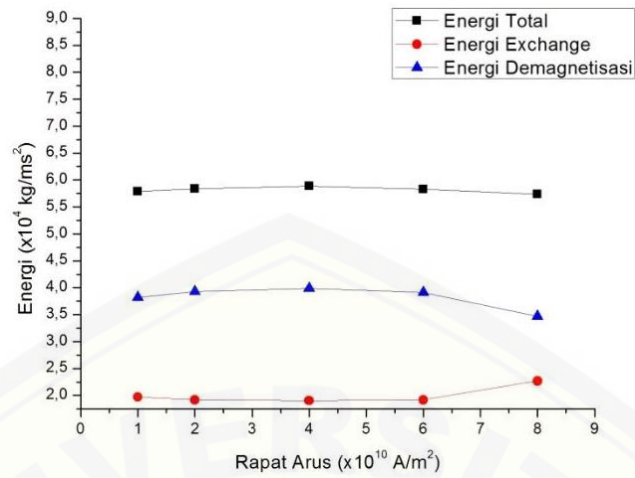
domain, pergerakan arah spin domain dan struktur domain diamati dengan membuat visualisasi menggunakan *software* mayavi terlebih dahulu. Posisi dinding domain dan struktur domain diamati dalam setiap variasi rapat arus listrik untuk masing-masing diameter *nanowire* dan polarisasi bahan ketika $t=6$ ns. Pergeseran dinding domain pada *nanowire* dan proses perubahan nilai magnetisasi akan semakin cepat seiring dengan meningkatnya rapat arus listrik yang diinjeksikan (Gerretsen, 2008). Tekanan dinding domain yang dihasilkan pada struktur dinding domain akan menghasilkan perubahan nilai magnetisasi seiring dengan peningkatan rapat arus yang terjadi (Franchin, 2009). Pergerakan arah spin domain diamati ketika $t=0$ ns, $t=2,5$ ns, dan $t=4,5$ ns dalam setiap variasi rapat arus injeksi. Hal ini dikarenakan pada waktu tersebut, arah spin domain dapat teramati dengan jelas. Hasil yang didapatkan dari simulasi program NMAG ini salah satunya berupa nilai magnetisasi dalam setiap variasi rapat arus listrik yang diinjeksikan dalam waktu yang sama (0-6 ns). Hasil tersebut diplotkan dalam grafik magnetisasi terhadap waktu (M-t) menggunakan *software* Origin. Dengan mengamati posisi dinding domain, pergerakan arah spin domain, struktur domain dan grafik hubungan antara magnetisasi bahan terhadap waktu ini, nantinya akan didapatkan pengaruh variasi rapat arus listrik injeksi terhadap magnetisasi bahan permalloy *NiFe* berbentuk *nanowire*. Karakteristik permalloy diantaranya mempunyai sifat *soft magnetic* dan mudah dalam merespon medan magnet luar yang diakibatkan oleh perubahan arus listrik. Penginjeksian rapat arus listrik dalam fenomena STT menggunakan bahan permalloy *NiFe* berukuran nano sangat berpotensi dalam pembuatan *storage device*, khususnya MRAM (*Magnetoresistive Random Access Memory*). Hal ini terbukti dengan adanya produk jenis MRAM terbaru yakni STT-MRAM (Indriawati, 2017). Contoh grafik hubungan antara magnetisasi terhadap waktu (M-t) dalam setiap variasi rapat arus listrik injeksi ditunjukkan pada Gambar 3.4.



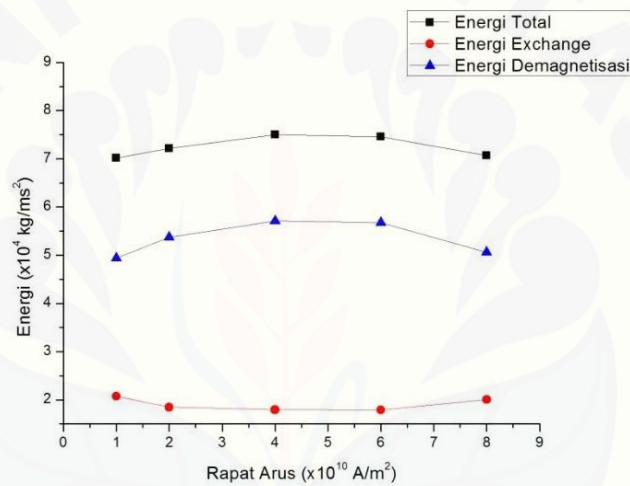
Gambar 3.4 Grafik hubungan antara nilai magnetisasi bahan terhadap waktu (nano sekon) (Sumber: Musyarofah, 2016)

3.6.2 Analisis Pengaruh Diameter *Nanowire* Terhadap Energi Total Sistem

Hasil simulasi program NMAG salah satunya yakni berupa besar energi sistem pada bahan permalloy *NiFe* yang meliputi energi total, energi *exchange* dan energi demagnetisasi (energi magnetostatik). Energi sistem dalam setiap rapat arus listrik injeksi dengan variasi diameter *nanowire* tersebut digambarkan dengan menggunakan *software* Origin. Grafik tersebut nantinya berupa grafik hubungan energi sistem terhadap rapat arus listrik injeksi dalam setiap variasi diameter *nanowire*. Analisis pengaruh variasi *diameter nanowire* terhadap energi total sistem bahan permalloy *NiFe* berbentuk *nanowire* dilakukan dengan melihat grafik hubungan antara energi sistem terhadap rapat arus listrik injeksi dalam setiap variasi diameter *nanowire*. Sehingga hasil yang diharapkan nanti yakni semakin meningkat diameter *nanowire* yang diberikan, maka akan menyebabkan energi total yang semakin meningkat (Mardona, 2012). Sedangkan seiring dengan meningkatnya diameter *nanowire*, energi demagnetisasi yang dihasilkan akan semakin meningkat, sementara energi *exchange* akan semakin menurun (Musyarofah, 2016). Contoh grafik hubungan energi total sistem terhadap rapat arus listrik ditunjukkan pada Gambar 3.5.



(a)



(b)

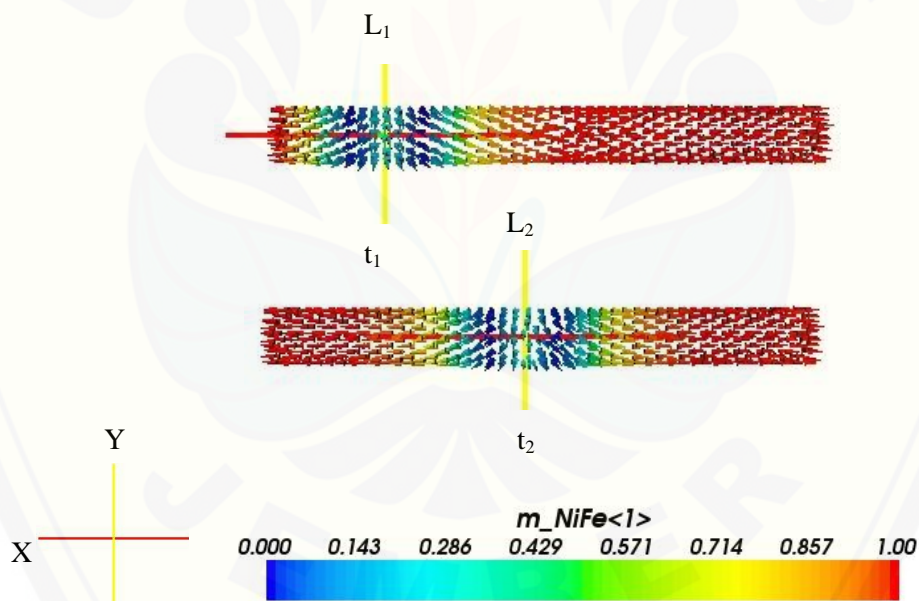
Gambar 3.5 Grafik hubungan antara energi sistem terhadap rapat arus listrik
(a) diameter 10 nm (b) diameter 20 nm (Sumber: Musyarofah, 2016)

3.6.3 Analisis Pengaruh Variasi Polarisasi Bahan Terhadap Kecepatan Pergerakan Dinding Domain

Analisis ini digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi polarisasi bahan terhadap kecepatan pergerakan dinding domain. Metode yang digunakan untuk menentukan nilai kecepatan pergerakan dinding domain pada *nanowire* adalah 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).

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

ΔL adalah perubahan posisi dinding domain (nm) dan Δt adalah perubahan waktu (ns). Metode *time resolved imaging* dapat diilustrasikan dengan visualisasi Gambar menggunakan *software* Mayavi seperti pada Gambar 3.6. Indeks warna pada skala tersebut menunjukkan nilai magnetisasi bahan. Pada Gambar tersebut, terdapat 3 sumbu yakni sumbu x yang ditunjukkan oleh garis warna merah, sumbu y ditunjukkan garis warna kuning. Arah aliran rapat arus listrik injeksi dalam fenomena STT ini mengalir menuju sumbu x positif. Sedangkan arah aliran elektron dalam hal ini akan berlawanan dengan arah aliran rapat arus listrik injeksi. Arah pergerakan dinding domain searah dengan arah aliran elektron atau berlawanan dengan arah aliran rapat arus listrik yakni bergerak dari sumbu x positif menuju x negatif (dari kiri ke kanan).



Gambar 3.6 Desain geometri yang digunakan untuk menentukan kecepatan dinding domain pada *nanowire* menggunakan metode *time resolved imaging* pada arah sumbu z

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Pengaruh variasi injeksi rapat arus listrik terhadap nilai magnetisasi bahan permalloy *NiFe* berbentuk *nanowire* ditinjau melalui posisi dinding domain, struktur domain serta grafik hubungan magnetisasi terhadap waktu (M-t). Adanya perbedaan posisi dinding domain mengindikasikan adanya kecepatan pergerakan dinding domain. Semakin besar nilai rapat arus yang diinjeksikan, maka posisi dinding domain yang dihasilkan akan bergeser lebih cepat sehingga proses magnetisasi juga akan semakin cepat. Tekanan dinding domain yang dihasilkan pada struktur domain mengakibatkan perubahan nilai magnetisasi. Perubahan nilai magnetisasi tersebut didukung oleh grafik hubungan magnetisasi terhadap waktu (M-t) yang beresilasi.
2. Pengaruh variasi diameter *nanowire* terhadap energi sistem bahan permalloy *NiFe* yakni semakin besar diameter yang diberikan, maka energi total yang dihasilkan akan semakin meningkat. Sedangkan secara keseluruhan analisis perbandingan energi demagnetisasi dan energi *exchange* yakni energi demagnetisasi cenderung lebih besar daripada energi *exchange*.
3. Pengaruh variasi polarisasi bahan terhadap kecepatan pergerakan dinding domain bahan permalloy *NiFe* berbentuk *nanowire* yakni semakin besar polarisasi yang diberikan pada diameter yang sama, maka kecepatan pergerakan dinding domain akan semakin besar. Sedangkan ketika polarisasi bahan yang diberikan sama, kecepatan dinding domain seiring dengan meningkatnya diameter *nanowire* yakni semakin menurun.

5.2 Saran

Saran pada penelitian berikutnya yaitu perlu dilakukan pengembangan penelitian dalam injeksi rapat arus listrik dan variasi bentuk dalam skala nano lebih banyak, seperti *nanocube*, *nanosphere*, dan *nanodisk* dengan waktu simulasi yang dibuat lebih lama. Hal ini digunakan untuk mengkaji fenomena STT lebih dalam lagi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aharoni, A. 1995. *Introduction to the theory of ferromagnetism*. New York: Oxford Science Publications.
- Alberto, P. 2009. *Principles of Nanomagnetism*. Rio de Janeiro: Springer.
- Atmono, T.M dan Yunanto. 2002. Efek Giant Magnetoresistance pada Logam Peralihan Co, Ni, Cu. *Jurnal Sains*. ISSN 0216-3128. 6(1): 58.
- Bertoti, G. 1998. *Hysteresis in magnetism*. New York: Academic Press.
- Bloch, F. 1932. Theory of exchange problem and remanence phenomena of ferromagnetic substabces. *Journal of Physic*. 74(295): 1-67.
- Chandra, H.T. 2008. Struktur dan Temperatur Curie Polikristal $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0;0,1$ dan $0,2$) Magnetoresistan. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Chikazumi, S. 1997. *Physics of Ferromagnetism*. New York: Oxford University Press.
- Franchin, M. 2009. Multiphysics Simulation of Magnetic Nanostructures. *Thesis*. Malaysia: University of Southampton.
- Gerretsen, T.L. 2008. Spin Transfer Torque in Ferromagnetic Materials. *Journal of Physic*. 8(1): 1-8.
- Getzalf, M. 2007. *Fundamentals of magnetism*. Germany: Springer.
- Getzalf, M. 2008. *Fundamentals of Magnetism*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Indriawati, A. 2017. Analisa Pergeseran *Domain Wall* Magnetik pada Permalloy dengan Ukuran Nano. *Jurnal Sains*. 14(2): 1-6.

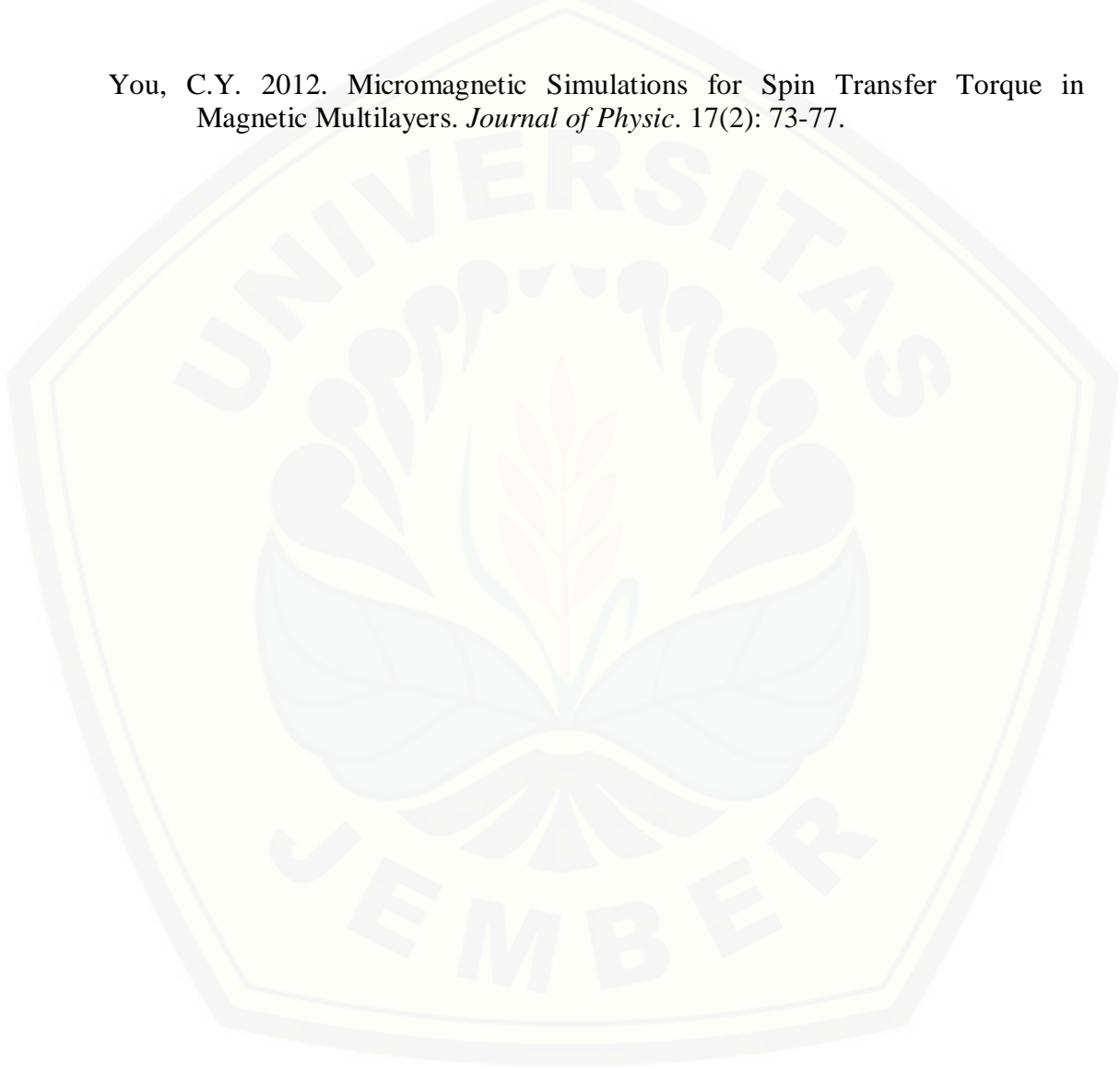
- Indriawati, A. dan Edi, S. 2014. Studi Pengaruh Bentuk terhadap Pergeseran Domain Wall Magnetik pada Lapisan Tipis Permalloy. *Jurnal Sains*. 2(1): 264-267.
- Ismail. 2013. Studi Mikromagnetik Proses Magnetisasi dan Spektrum Suseptibilitas Ferromagnetik Elemen Diamond-Spaped. *Tesis*. Depok: Universitas Indonesia.
- Jannah, F.E. 2006. Karakterisasi Lapisan Tipis Alloy NiFe Hasil Elektrodeposisi pada Substrat Cu dan ITO. *Skripsi*. Solo: Universitas Sebelas Maret.
- Lefter dan D. Mihai. 2012. Micromagnetic Analysis of Magnetization Behavior in permalloy Nanoparticles for Data Storage Applications. *Journal of Physic*. 6(1): 1-6.
- Mardona. 2012. Dinamika Domain Wall dan Efek Anisotropi pada Material Ferromagnet Co dan Ni Berbentuk *Nanowire*. *Tesis*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Michael, R.D dan M.J. Donahue. 1997. Head to head domain walls in soft nano-strips: a refined phase diagram. *Journal of Physic*. 3(1): 1-3.
- Morecroft, D. 2013. In-situ Magnetoresistance Measurement During Patterning of Spin Valve Devices. *Dissertation*. Cambridge: Downing College.
- Musyarofah, L. 2016. Studi Fenomena STT (Spin Transfer Torque) pada Bahan $\text{La}_{1-x}\text{S}_x\text{MnO}_3$ ($x=0,3$) Berbentuk *Nanowire* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Nakatani, Y., A. Thiaville., J. Miltat., dan N. Vernier. 2004. Domain wall motion by spin-polarized current: a micromagnetic study. *Journal of Physic*. 95(1):1.
- Nicola, A.S. 2011. *Magnetic Materials Fundamentals and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Norita. 2008. Studi Sifat-sifat Listrik Bahan Magnetik FeSi. *Tesis*. Depok: Universitas Indonesia.
- Nursiyanto, W. 2014. Analisis Osilasi dan Struktur Domain-wall di dalam Kontruksi Notch pada Bahan Ferromagnetik (Fe, Co, Ni) Berbentuk Nanowire. *Disertasi*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Puri, R.K dan V.K. Barbar. 2001. *Solid State Physics and Electronics*. New Delhi: Indian Institute of Technology.
- Putu, R.A. 2010. Bahan Isolasi Keramik. *Skripsi*. Denpasar: Universitas Udayana.
- Ralph, D.C dan Stiles, M.D. 2008. Spin Transfer Torques. *Jurnal Sains*. 14(369): 3617-3630.
- Rohman, L. 2013. Investigasi Sifat-sifat Magnetik Bahan LSMO ($\text{La}_{1-x}\text{S}_x\text{MnO}_3$) untuk Aplikasi Storage Device dengan Menggunakan Modelling Mikromagnetik. *Laporan Hibah Penelitian*. Jember: Universitas Jember.
- Sarwate, V.V. 1990. *Electromagnetic Field and Waves*. New York: John Wiley and Sons.
- Smith, W.F. 1993. *Foundation of Materials of Science and Engineering*. USA: Prentice Hall
- Tipler, P.A. 2001. *Fisika Untuk Sains dan Teknik Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Vlaminck, V dan M. Bailleul. 2008. Current-induced Spin Wave Doppler Shift. *Jurnal of Physics*. 322(1): 410-413.
- Wibowo, N.A. 2011. Simulasi Mikromagnetik Mode Magnetisasi Reversal Berbantuan Panas pada Nanodot Magnetic Beranisotropi Tegak Lurus dengan Menyelesaikan Persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert. *Tesis*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.

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

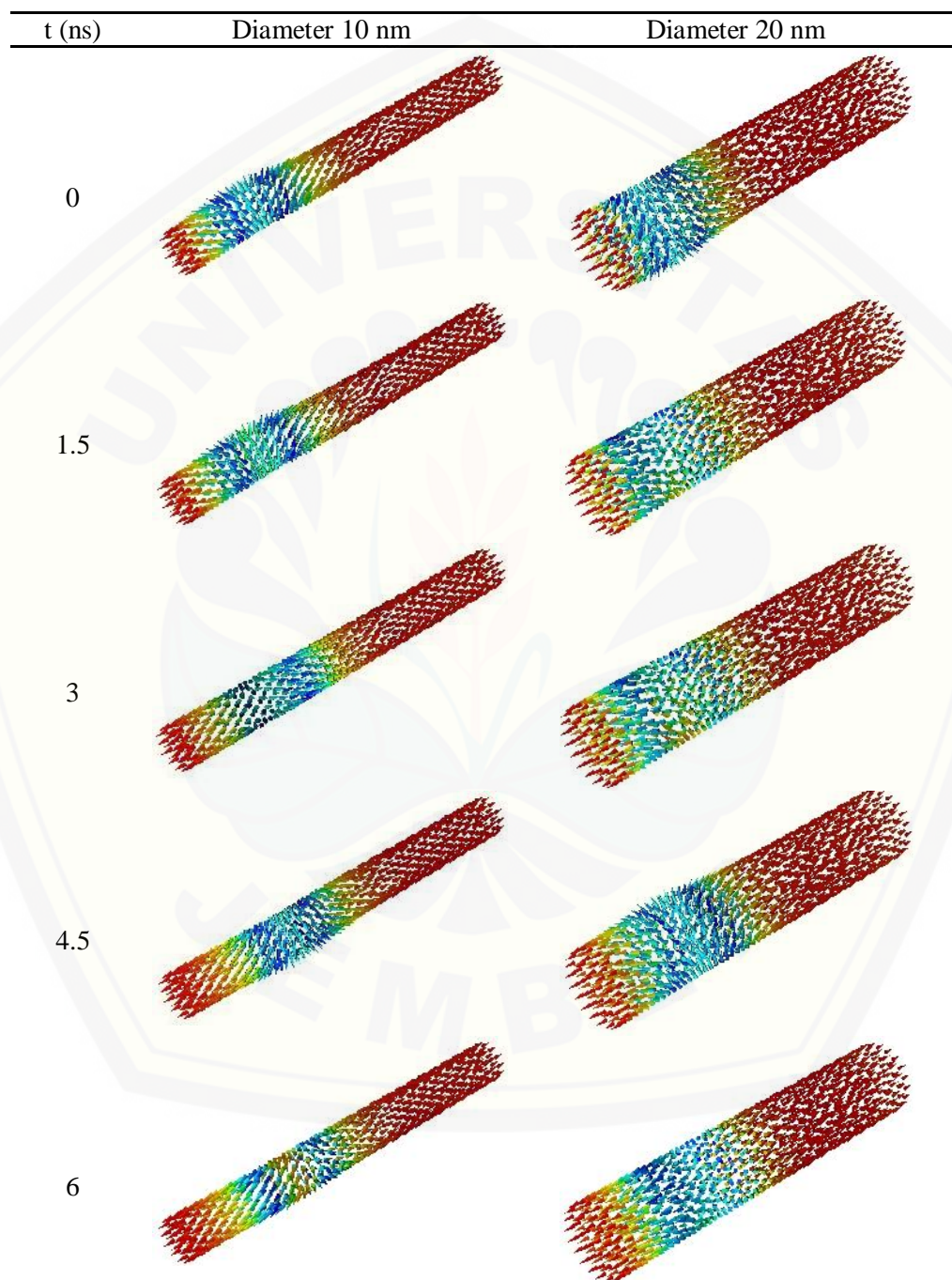
Wolf, S.A., D.D. Awschalom., dan R.A Buhrman. 2001. Spintronics: a spin based electronics vision for the future. *Journal of Physic*. 294(55): 1488-1495.

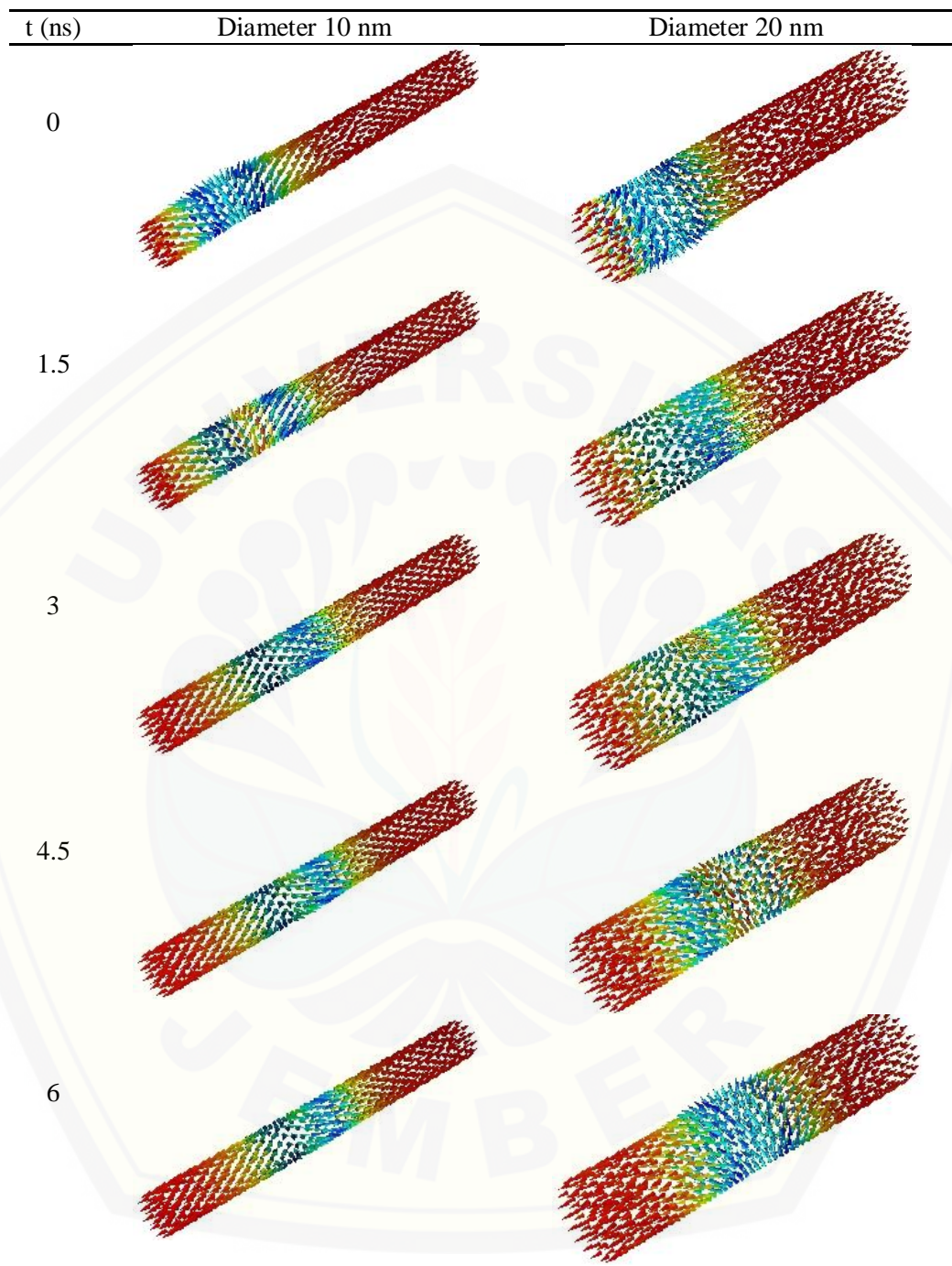
You, C.Y. 2012. Micromagnetic Simulations for Spin Transfer Torque in Magnetic Multilayers. *Journal of Physic*. 17(2): 73-77.

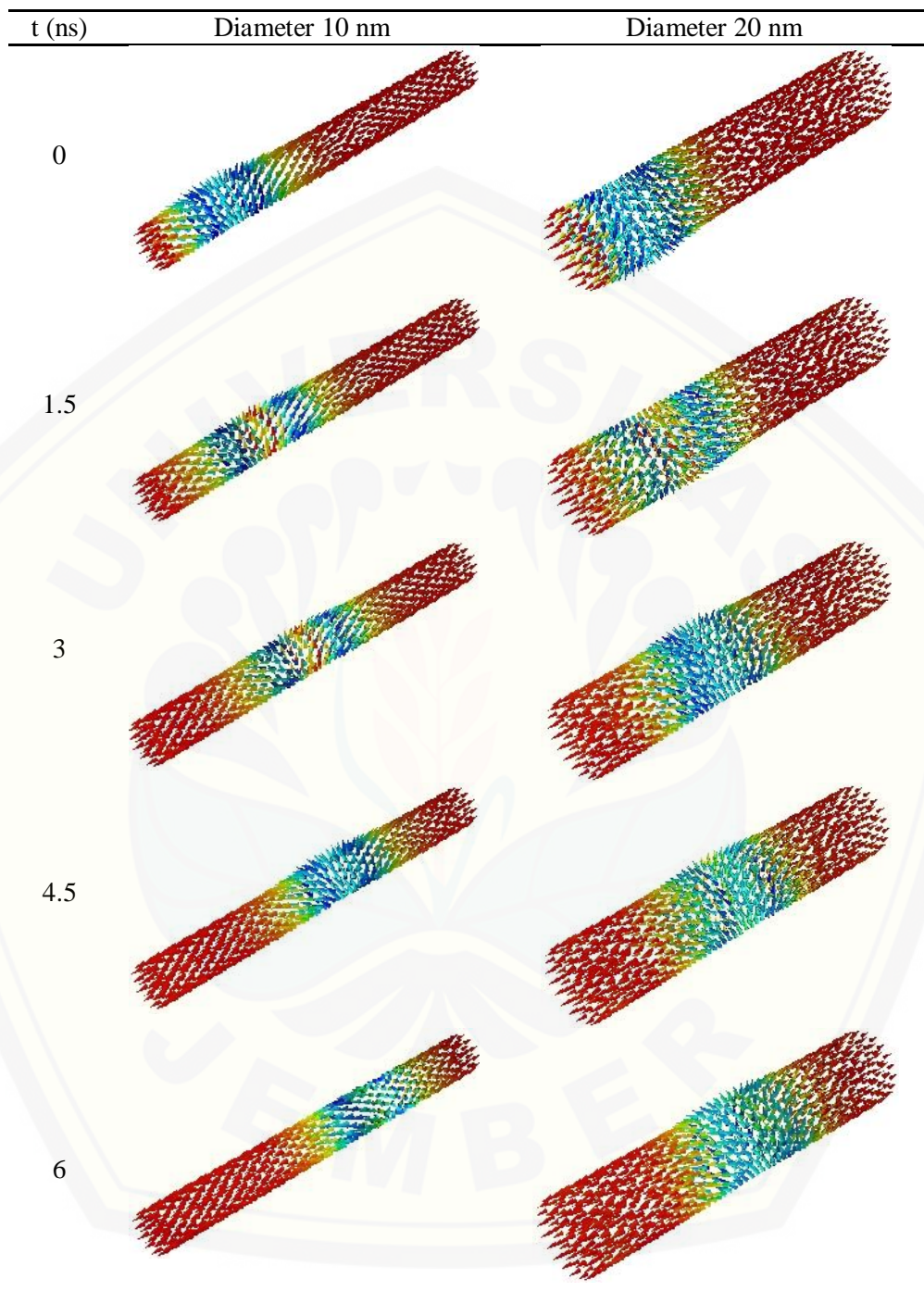


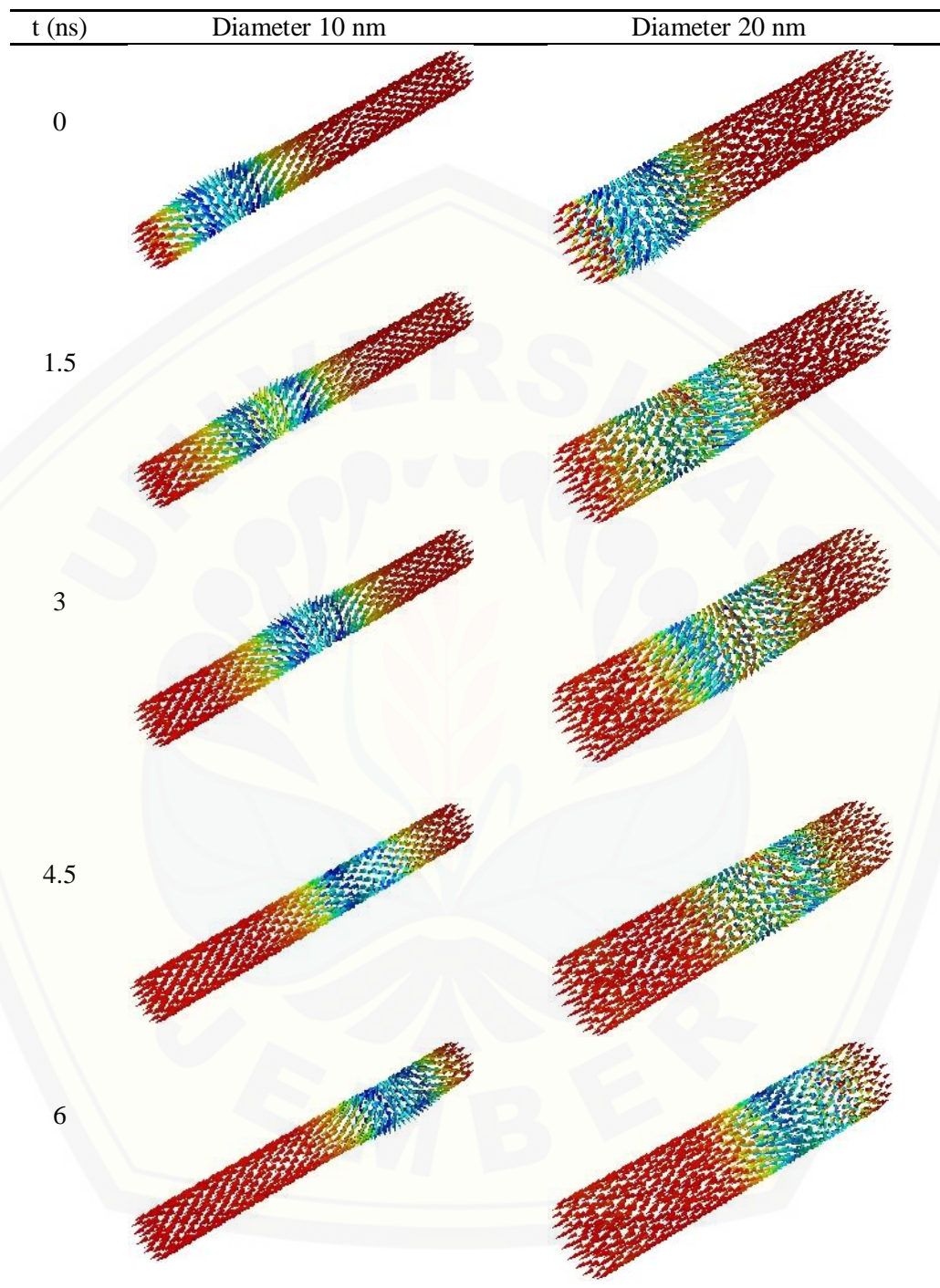
LAMPIRAN

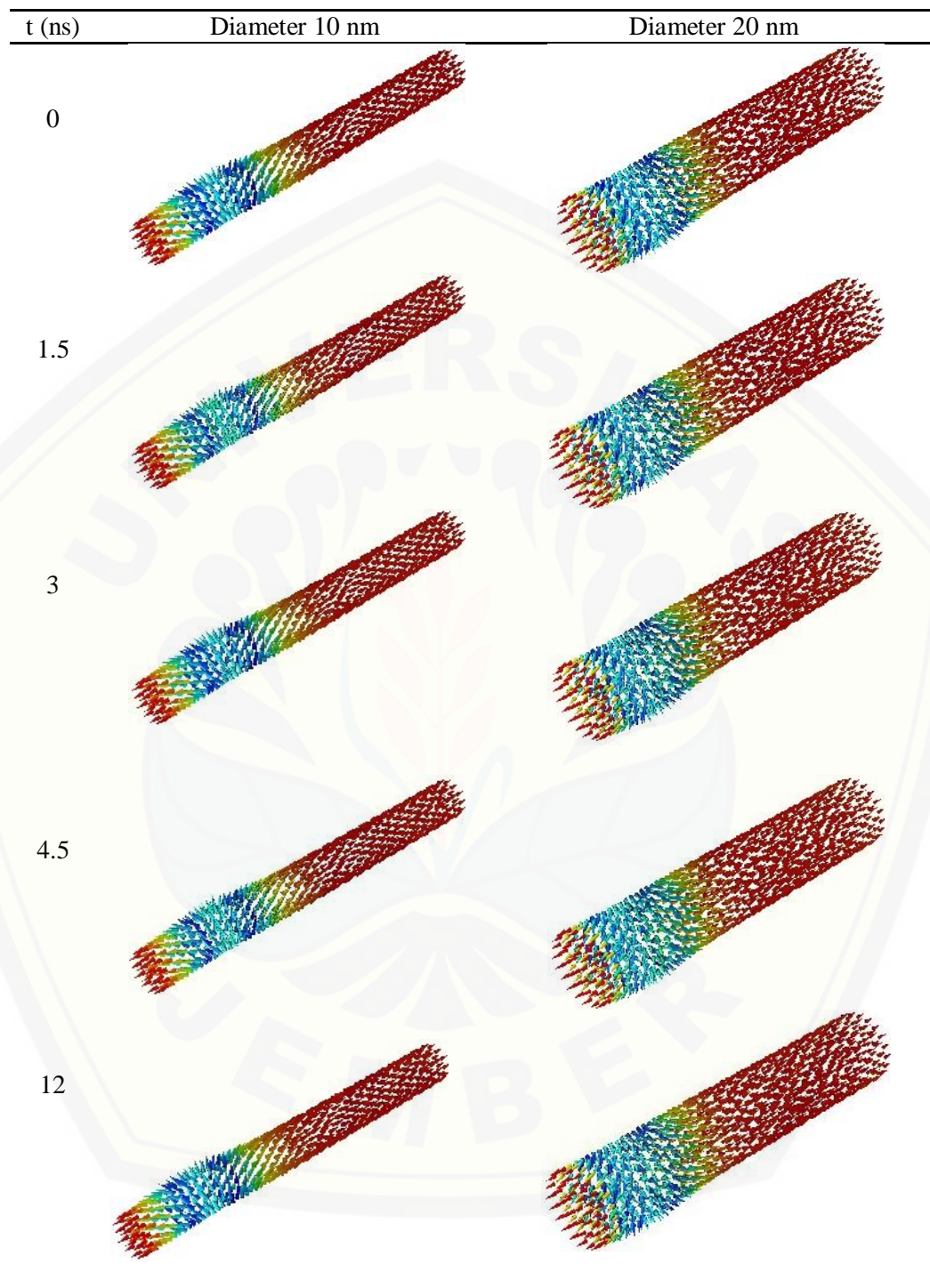
Lampiran 4.1 Posisi Dinding Domain pada diameter 10 nm dan 20 nm

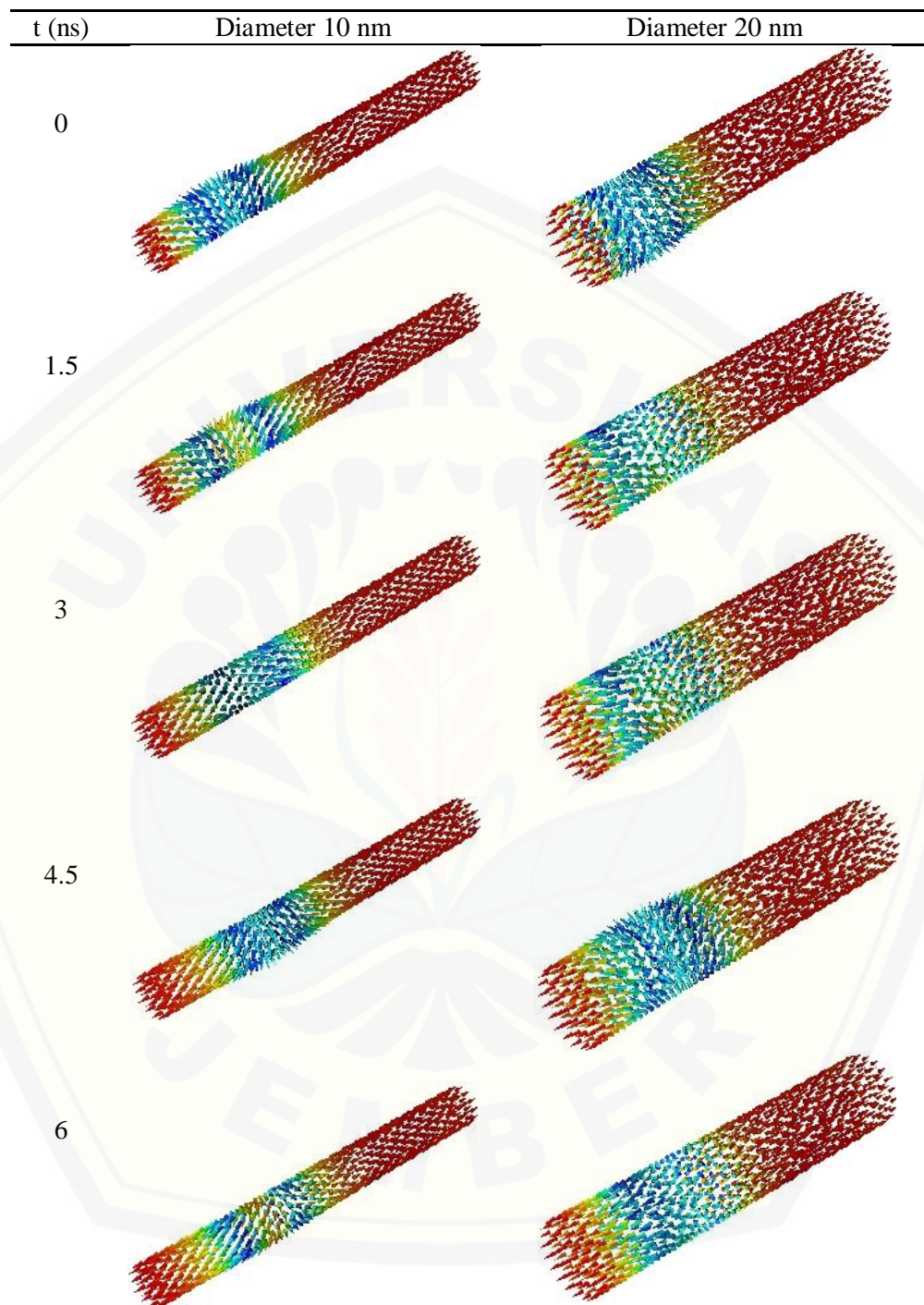
4.1.1 Posisi Dinding Domain untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ dan Polarisasi 1

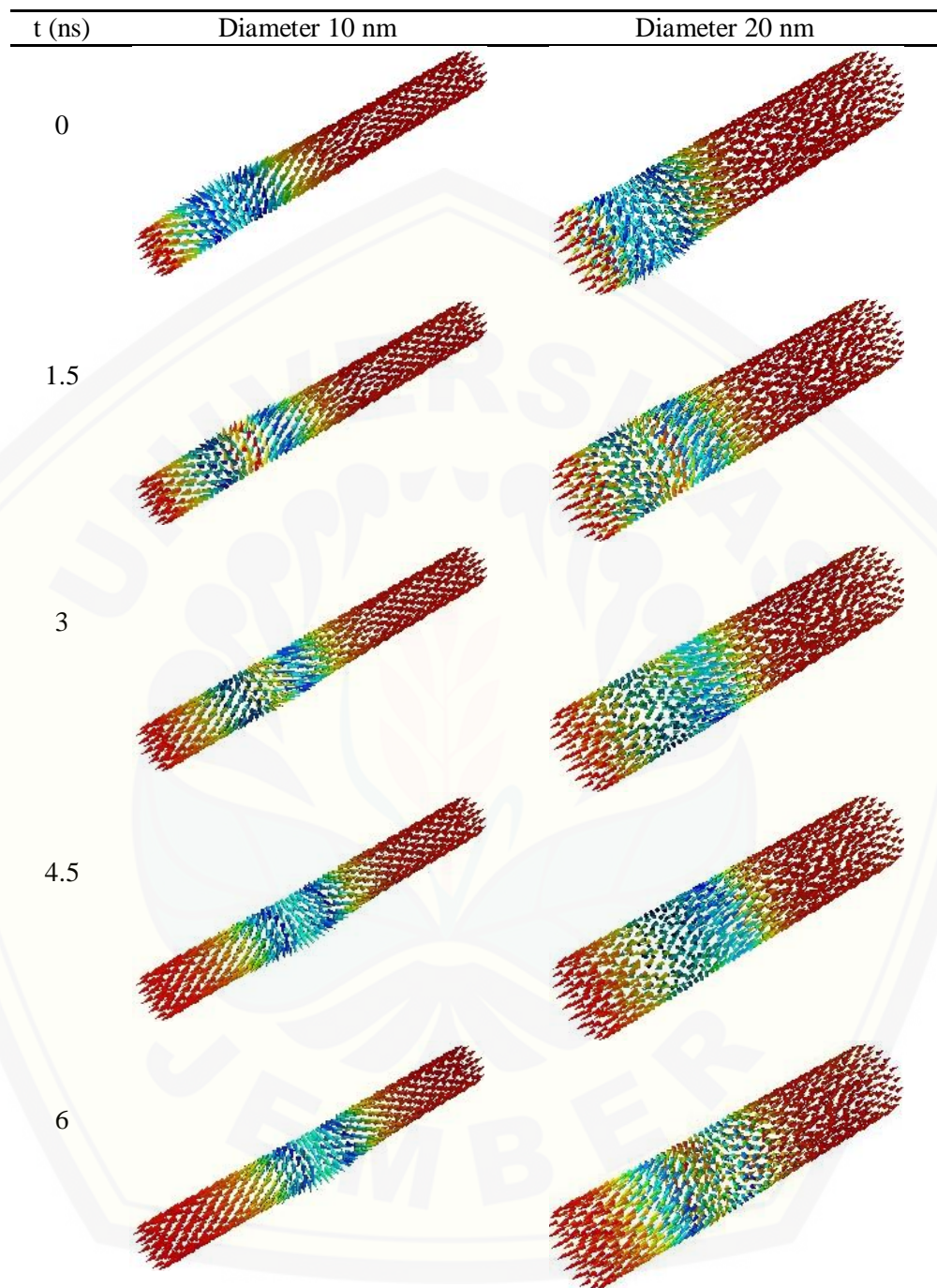
4.1.2 Posisi Dinding Domain untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ dan Polarisasi 1

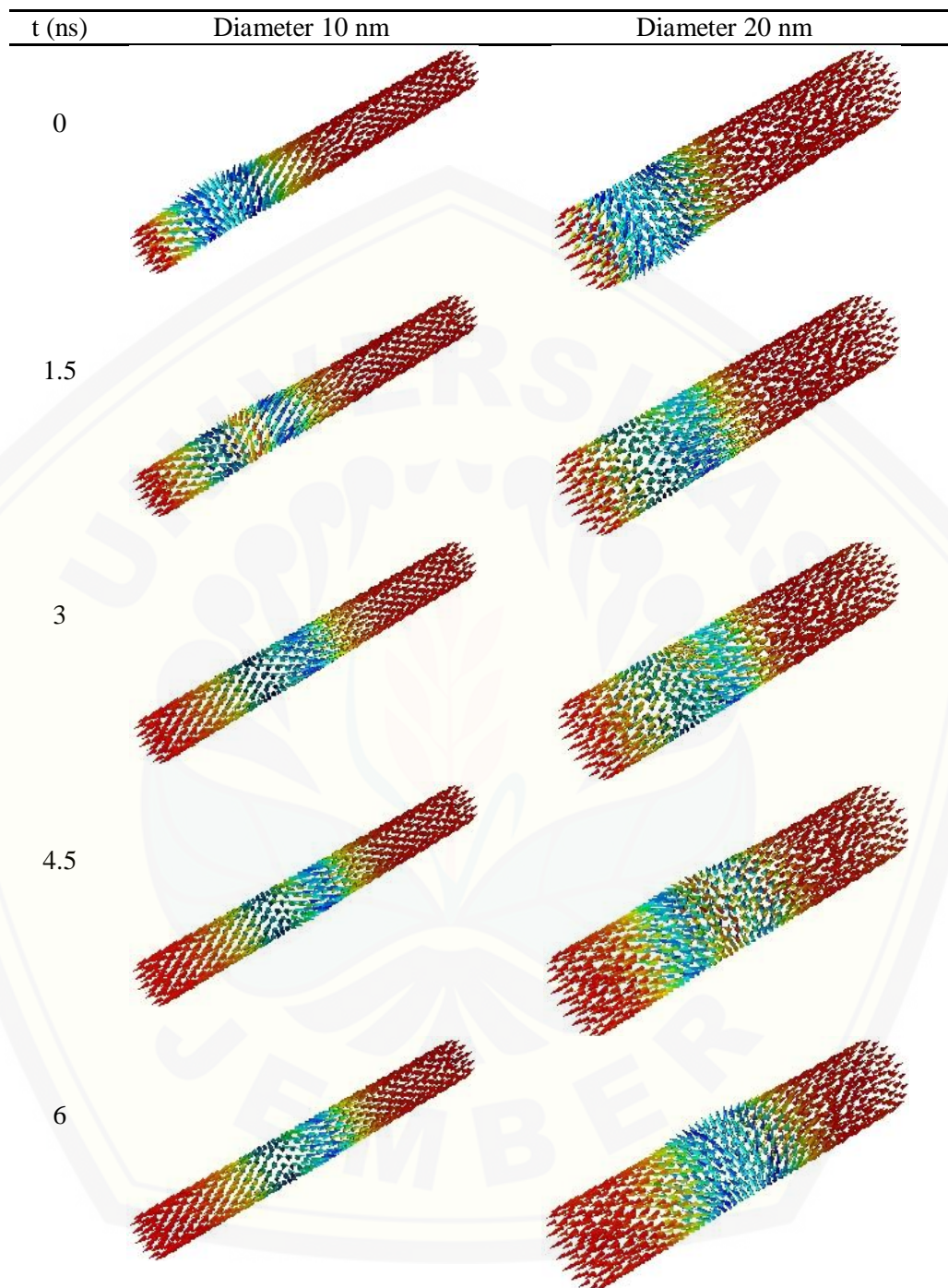
4.1.3 Posisi Dinding Domain untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ dan Polarisasi 1

4.1.4 Posisi Dinding Domain untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ dan Polarisasi 1

4.1.5 Posisi Dinding Domain untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ dan Polarisasi 0.5

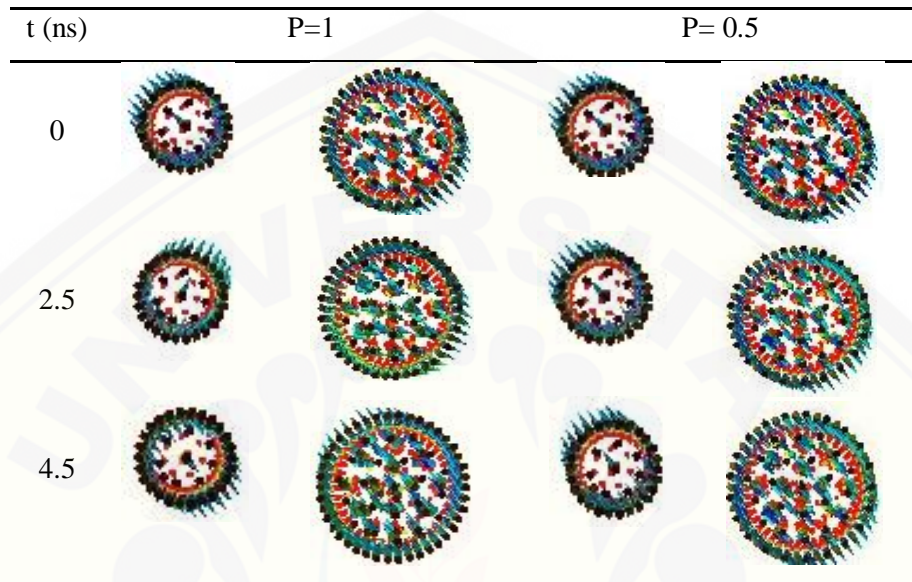
4.1.6 Posisi Dinding Domain untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ dan Polarisasi 0.5

4.1.7 Posisi Dinding Domain untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ dan Polarisasi 0.5

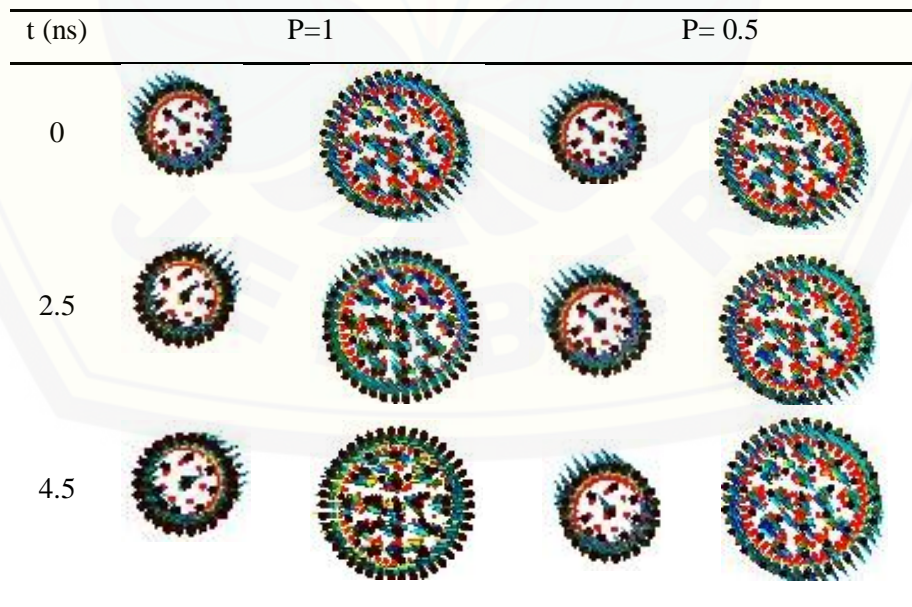
4.1.8 Posisi Dinding Domain untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ dan Polarisasi 0.5

Lampiran 4.2 Pergerakan Arah spin Domain sumbu x untuk t=0 ns, t=2,5 ns dan t=4,5 ns.

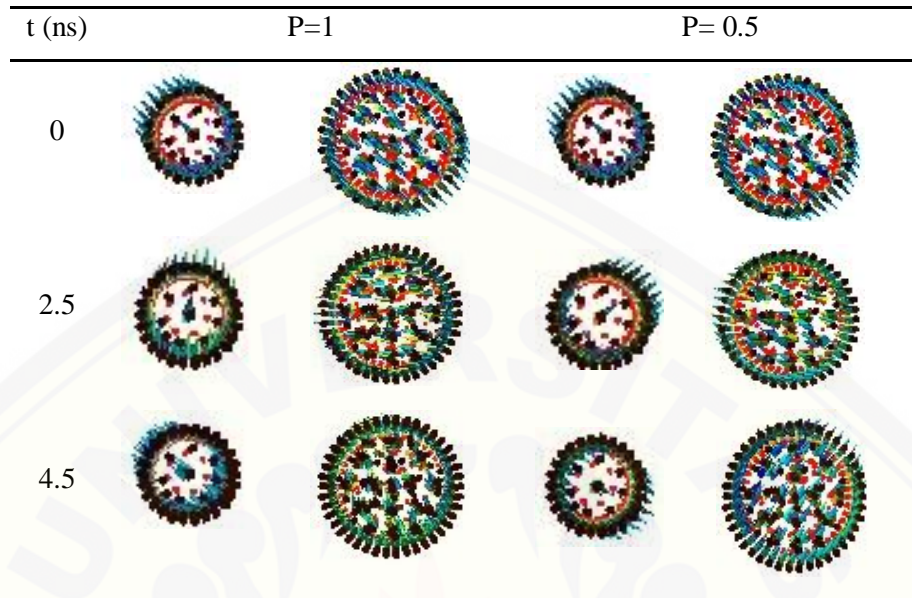
4.2.1 Struktur domain ketika $J = 5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ pada diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi bahan sebesar 1 dan 0.5



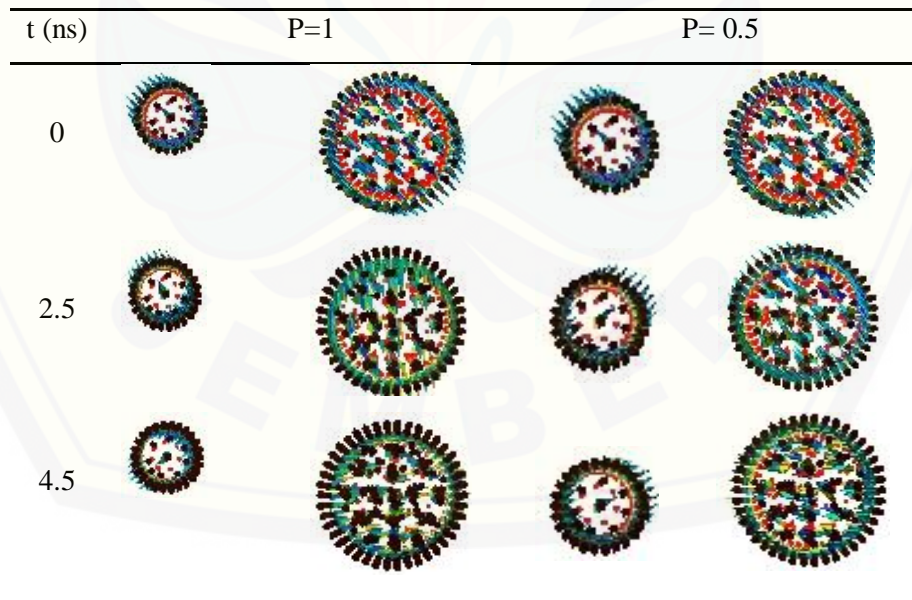
4.2.2 Struktur domain ketika $J = 10 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ pada diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi bahan sebesar 1 dan 0.5



4.2.3 Struktur domain ketika $J = 15 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ pada diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi bahan sebesar 1 dan 0.5



4.2.4 Struktur domain ketika $J = 20 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ pada diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi bahan sebesar 1 dan 0.5



4.2.5 Kecepatan pergerakan arah spin domain pada polarisasi 1 diameter 10 nm dan 20 nm

No.	Rapat Arus (A/m^2)	p	d (nm)	t_1 (ns)	t_2 (ns)	T Lingkaran (ns)	f (/ns)	ω	V (m/s)
1	5×10^{10}	1	10	0	4.5	9	0.11	0.70	0.14
2	1×10^{11}	1	10	0	4.5	18	0.06	0.35	0.07
3	1.5×10^{11}	1	10	0	4.5	1620	0.00	0.00	0.001
4	2×10^{11}	1	10	0	4.5	18	0.06	0.35	0.07

No.	Rapat Arus (A/m^2)	p	d (nm)	t_1 (ns)	t_2 (ns)	T Lingkaran (ns)	f (/ns)	ω	V (m/s)
1	5×10^{10}	1	20	0	4.5	9	0.11	0.70	0.07
2	1×10^{11}	1	20	0	4.5	12	0.08	0.52	0.05
3	1.5×10^{11}	1	20	0	4.5	9	0.11	0.70	0.07
4	2×10^{11}	1	20	0	4.5	12	0.08	0.52	0.05

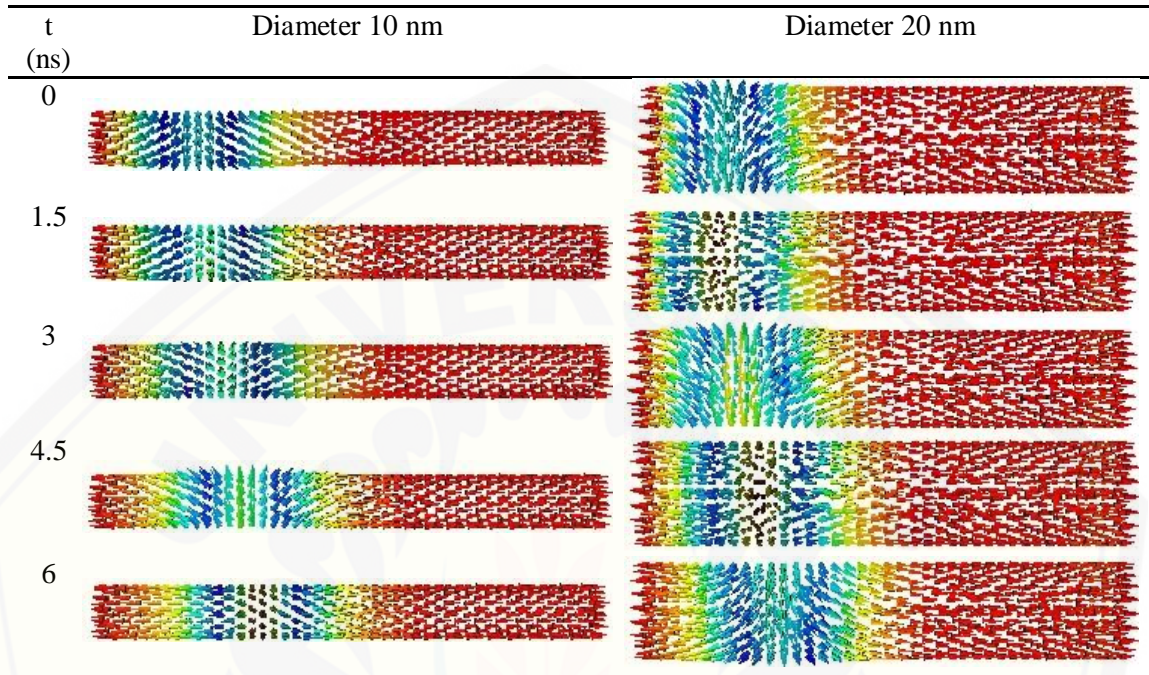
4.2.6 Kecepatan pergerakan arah spin domain pada polarisasi 0.5 diameter 10 nm dan 20 nm

No.	Rapat Arus (A/m^2)	p	d (nm)	t_1 (ns)	t_2 (ns)	T Lingkaran (ns)	f (/ns)	ω	V (m/s)
1	5×10^{10}	0.5	10	0	4.5	324	0.003	0.02	0.004
2	1×10^{11}	0.5	10	0	4.5	9	0.11	0.70	0.14
3	1.5×10^{11}	0.5	10	0	4.5	9	0.11	0.70	0.14
4	2×10^{11}	0.5	10	0	4.5	18	0.06	0.35	0.07

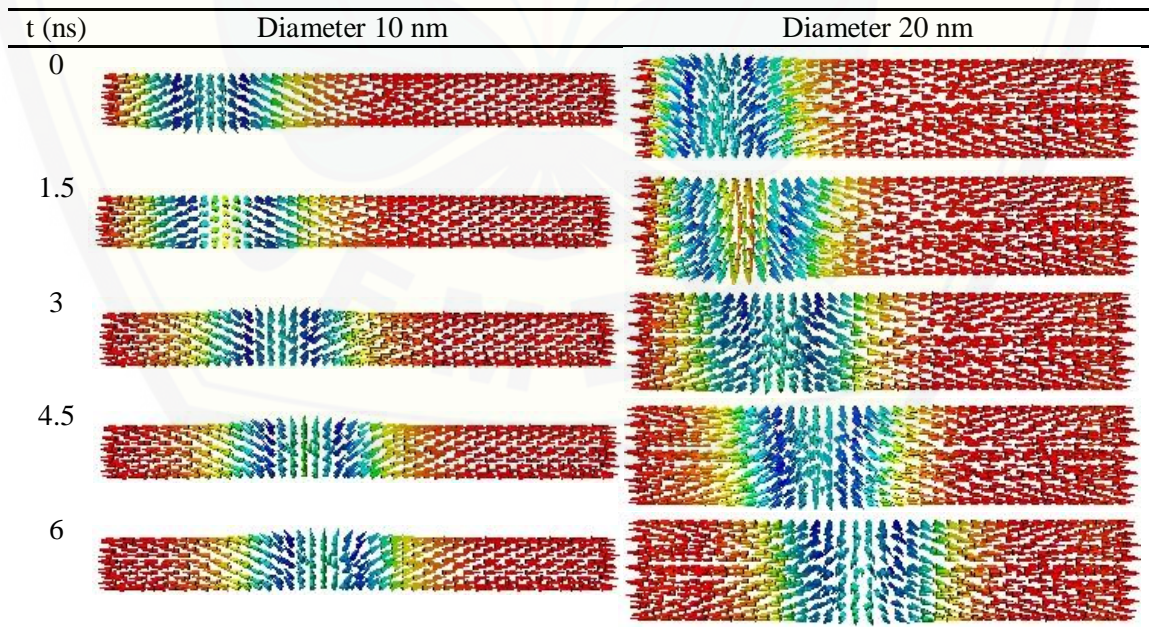
No.	Rapat Arus (A/m^2)	p	d (nm)	t_1 (ns)	t_2 (ns)	T Lingkaran (ns)	f (/ns)	ω	V (m/s)
1	5.00E+10	0.5	20	0	4.5	1620	0.001	0.00	0.001
2	1.00E+11	0.5	20	0	4.5	9	0.11	0.70	0.14
3	1.50E+11	0.5	20	0	4.5	18	0.06	0.35	0.07
4	2.00E+11	0.5	20	0	4.5	12	0.08	0.52	0.10

Lampiran 4.3 Struktur Dinding Domain dalam Arah Sumbu Z dalam Setiap Variasi Rapat Arus Listrik untuk Polarisasi Bahan 1 Dan 0.5

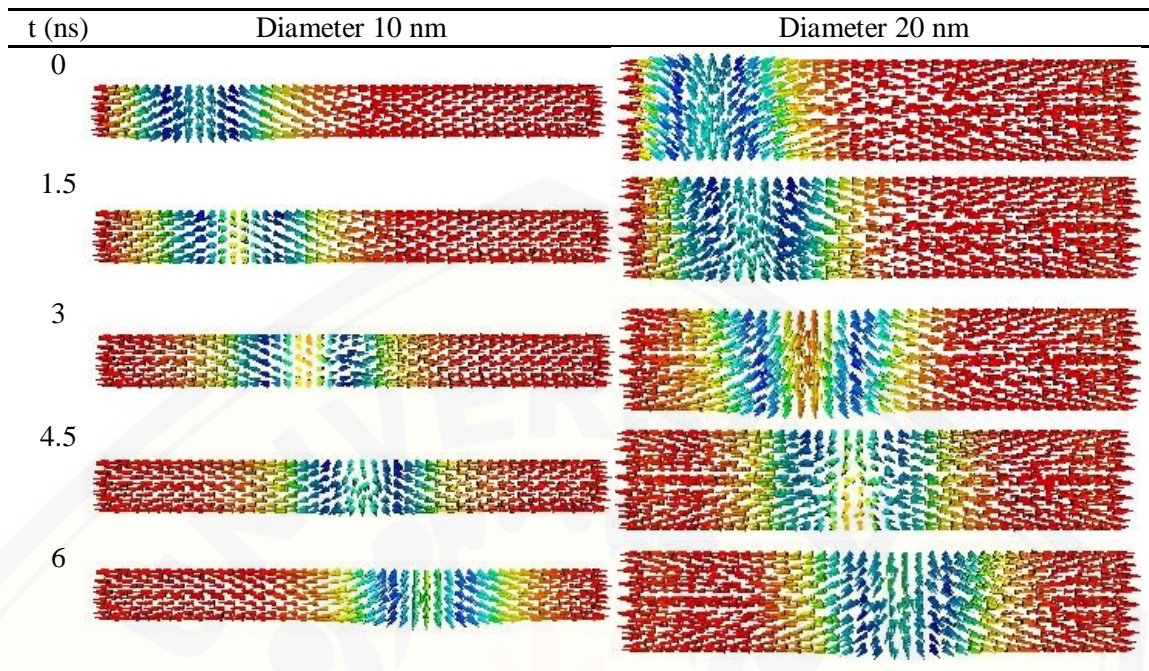
4.3.1 Struktur dinding domain untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ polarisasi bahan 1



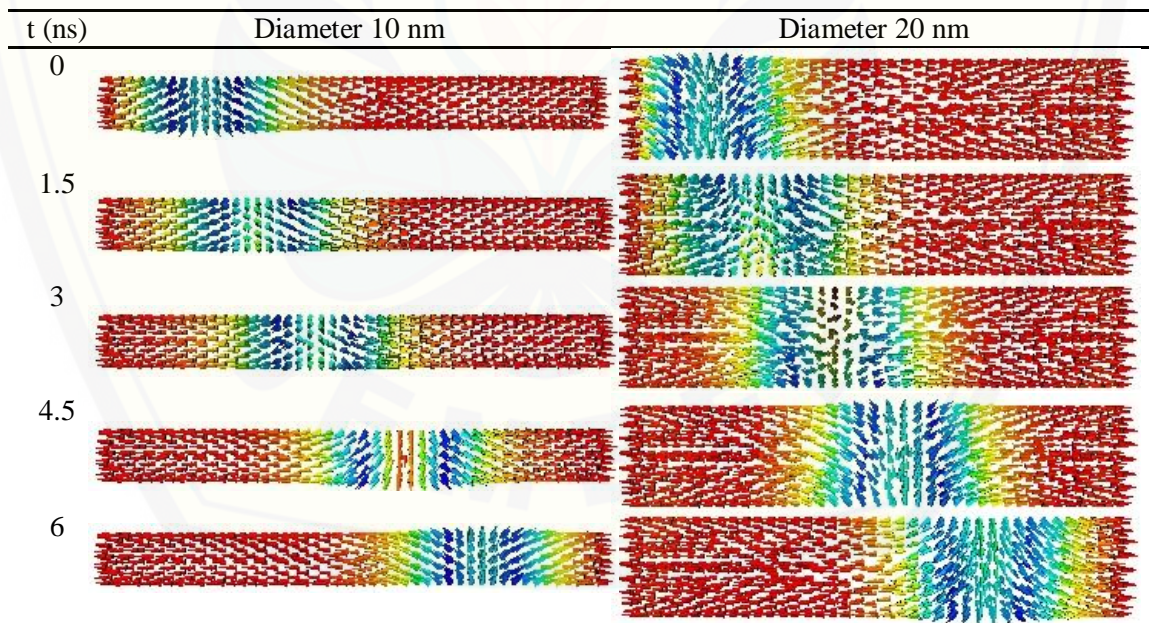
4.3.2 Struktur dinding domain untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ polarisasi bahan 1



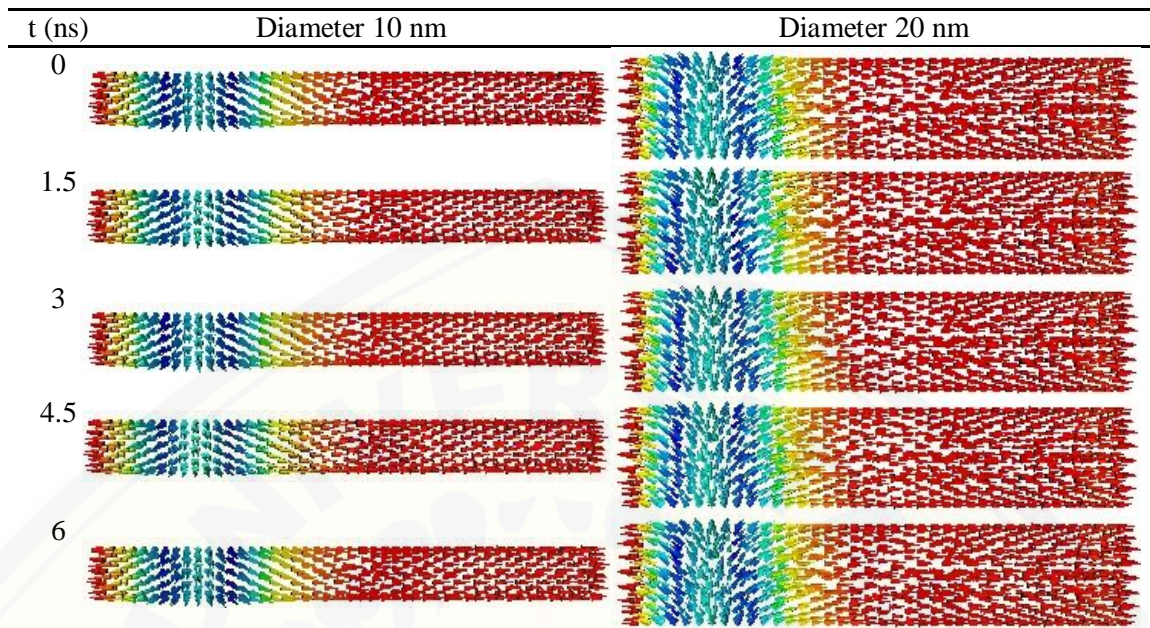
4.3.3 Struktur dinding domain untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ polarisasi bahan 1



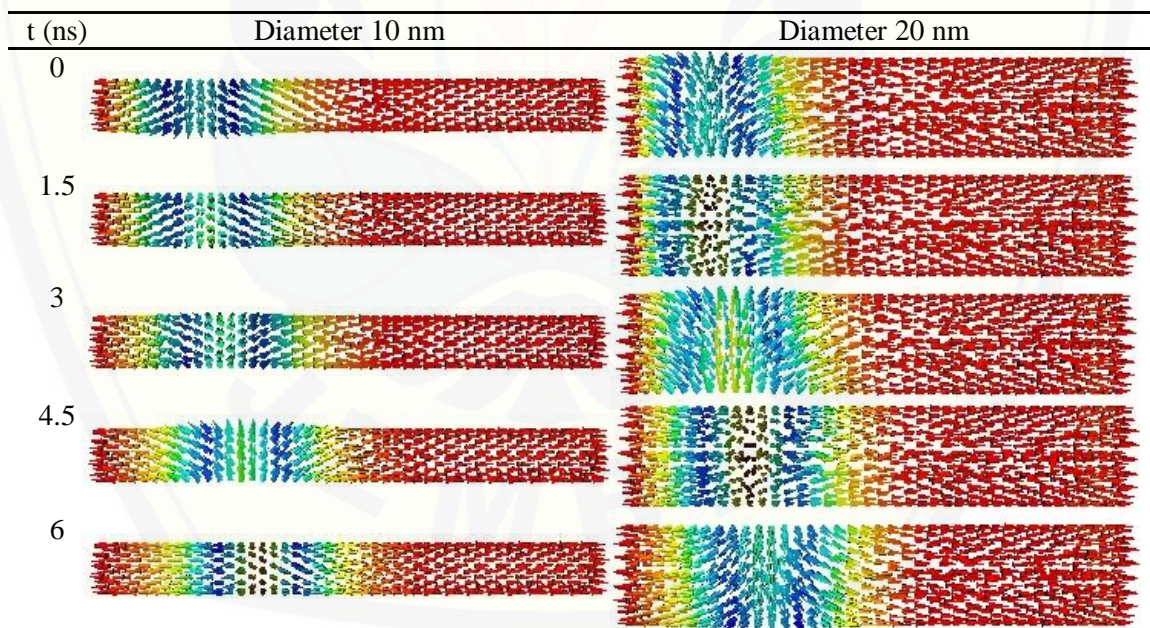
4.3.4 Struktur dinding domain untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ polarisasi bahan 1

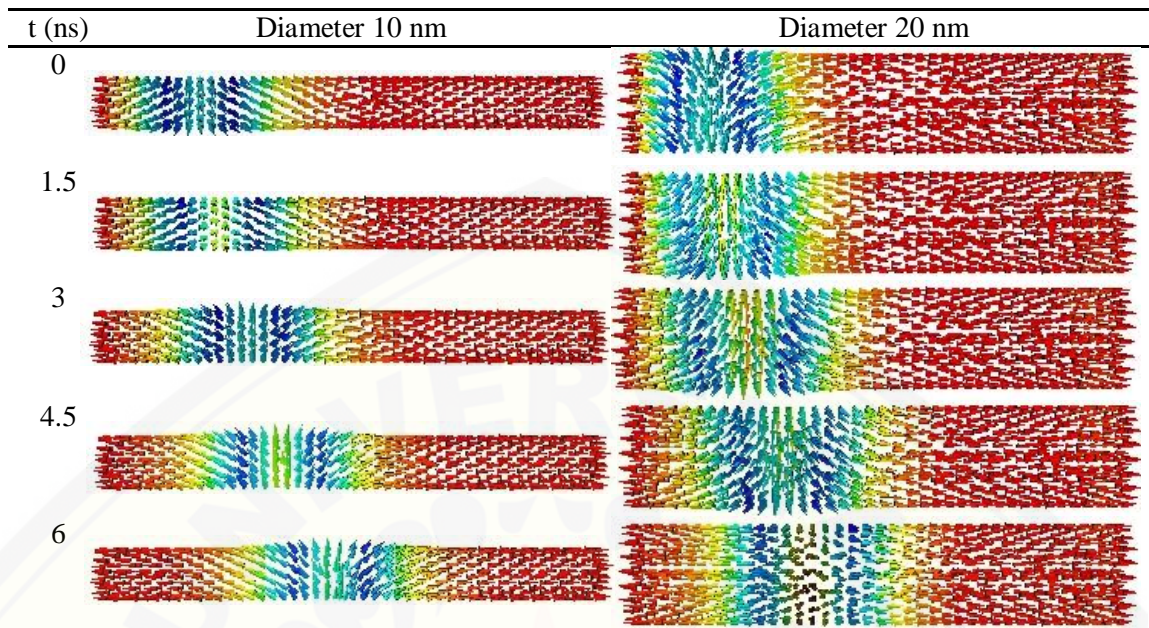
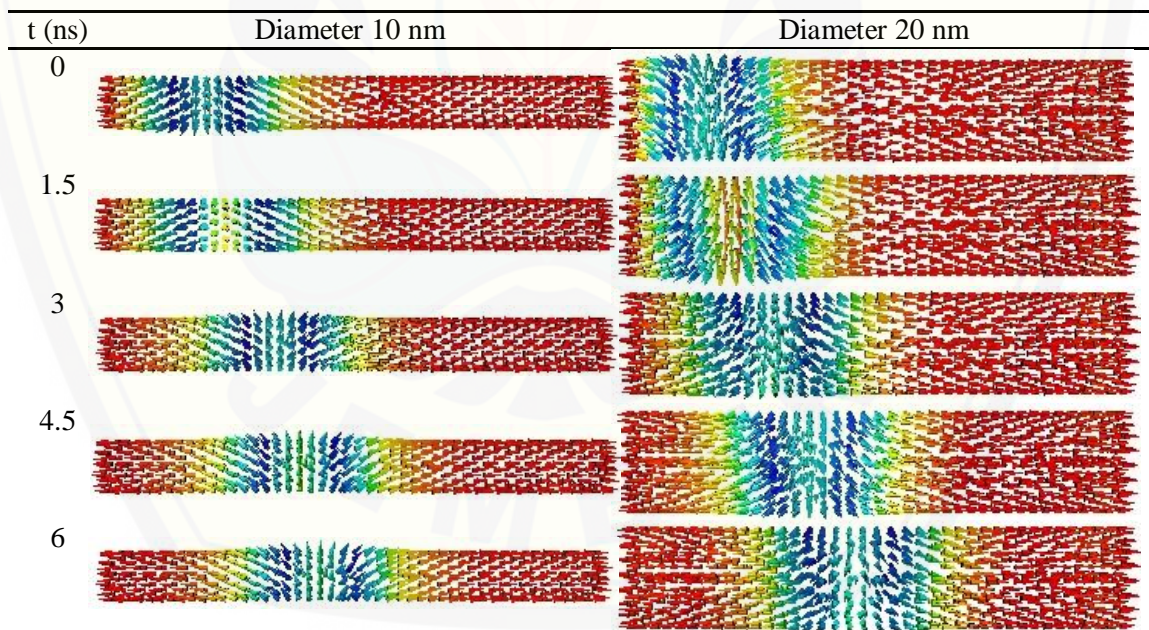


4.3.5 Struktur dinding domain untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ polarisasi bahan 0.5



4.3.6 Struktur dinding domain untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ polarisasi bahan 0.5



4.3.7 Struktur dinding domain untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ polarisasi bahan 0.54.3.8 Struktur dinding domain untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ polarisasi bahan 0.5

Lampiran 4.4 Energi Sistem pada Variasi Diameter Nanowire 10 nm dan 20 nm dengan Polarisasi Bahan 1 dan 0.5

4.4.1 Energi sistem ketika $J = 5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ pada polarisasi 1 dan 0.5

Polarisasi 1						
Waktu (ns)	diameter 10 nm			diameter 20 nm		
	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)
0	84553	52467	32486	102533	66296	36622
1	84659	53476	31539	102743	67404	35581
2	84802	53836	31232	103450	71881	31868
3	85100	55465	30033	104243	74903	29926
4	85388	55997	29760	104490	77011	28884
5	85627	56292	29655	105597	78834	28155
6	85865	57041	29545	106664	83397	27834

Polarisasi 0.5						
Waktu (ns)	diameter 10 nm			diameter 20 nm		
	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)
0	84553	52190	29545	102533	83397	27821
1	84558	52206	36176	102534	66755	32079
2	84560	52467	36490	102545	66438	32216
3	84566	52693	36620	102545	66300	32264
4	84572	52743	36622	102548	66296	32486
5	84581	52897	36890	102553	66032	32746
6	84583	57041	37021	102559	65903	32762

4.4.2 Energi sistem ketika $J = 10 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ pada polarisasi 1 dan 0.5

Polarisasi 1						
Waktu (ns)	diameter 10 nm			diameter 20 nm		
	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)
0	84553	56996	29519	102533	83243	27667
1	84921	56935	29538	103903	82885	27725
2	85532	56825	29643	106326	82648	27987
3	85933	56692	29552	107650	81129	28120
4	86107	56279	29553	108414	78337	28335
5	86184	54661	30909	109900	73291	30581
6	86193	52467	36622	110776	66296	32486

Polarisasi 0.5						
Waktu (ns)	diameter 10 nm			diameter 20 nm		
	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)
0	84553	57003	29553	102533	82895	27834
1	84558	52897	36176	102534	66755	32069
2	84560	52743	36490	102545	66438	32216
3	84572	52693	36620	102545	66300	32264
4	84581	52467	36622	102548	66296	32486
5	84583	52206	36890	102559	66032	32746
6	84687	52190	37021	107650	65903	32762

4.4.3 Energi sistem ketika $J = 15 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ pada polarisasi 1 dan 0.5

Polarisasi 1						
Waktu (ns)	diameter 10 nm			diameter 20 nm		
	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)
0	84553	57003	29575	102533	83389	27670
1	85226	56994	29612	105263	83338	27890
2	85955	56709	29650	108607	83100	28120
3	85984	56605	29827	110519	81293	28139
4	86190	55816	29992	110575	80134	28166
5	86193	55562	32486	111110	76815	28903
6	86246	52467	36622	111114	66296	29588

Polarisasi 0.5						
Waktu (ns)	diameter 10 nm			diameter 20 nm		
	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)
0	84553	57008	29544	102533	82169	27657
1	84778	56750	29551	103295	80998	27674
2	85199	56692	29599	104963	80134	28002
3	85272	56211	29688	106696	79065	28046
4	85587	55636	29940	108220	76171	29231
5	85941	54092	32064	109416	71606	31018
6	86158	52467	36622	110266	66296	32486

4.4.4 Energi sistem ketika $J = 20 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ pada polarisasi 1 dan 0.5

Polarisasi 1						
Waktu (ns)	diameter 10 nm			diameter 20 nm		
	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)
0	84553	57075	29644	102533	83293	27725
1	85227	56878	29678	106589	83277	27778
2	85507	56708	29958	109079	82786	28090
3	86074	56196	32486	110096	81664	28107
4	86099	55553	34781	110917	78908	28188
5	86197	52467	36518	111071	66407	29549
6	86335	50240	36622	111163	66296	29559

Polarisasi 0.5						
Waktu (ns)	diameter 10 nm			diameter 20 nm		
	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)	E total (Kg/ms ²)	E demag (Kg/ms ²)	E exch (Kg/ms ²)
0	84553	56997	29519	102533	83243	27666
1	84921	56936	29537	103903	82648	27725
2	85532	56825	29552	106326	81129	27987
3	85865	56279	29643	108414	78338	28335
4	85933	54661	30580	109900	74392	30191
5	86107	52886	32078	110776	73291	30909
6	86184	52467	36622	111072	66296	32486

Lampiran 4.5 Kecepatan Rata-rata Pergerakan Dinding Domain

4.5.1 Kecepatan rata-rata untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi bahan masing-masing 1 dan 0.5

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000			33	0.5	
2000			31	1	
3000			29	1.5	
4000			27	2	
5000			25	2.5	
6000	10 nm	1	23	3	5.56
7000			13	3.5	
8000			13	4	
9000			12	4.5	
10000			9	5	
11000			7	5.5	
12000			6	6	

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000			33	0.5	
2000			33	1	
3000			33	1.5	
4000			33	2	
5000			33	2.5	
6000			33	3	
7000	10 nm	0.5	33	3.5	0
8000			33	4	
9000			33	4.5	
10000			33	5	
11000			33	5.5	
12000			33	6	

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000			38	0.5	
2000			38	1	
3000			29	1.5	
4000			37	2	
5000			38	2.5	
6000			35	3	
7000	20 nm	1	34	3.5	5.09
8000			32	4	
9000			32	4.5	
10000			27	5	
11000			17	5.5	
12000			19	6	

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000			38	0.5	
2000			38	1	
3000			38	1.5	
4000			38	2	
5000			38	2.5	
6000	20 nm	0.5	38	3	0
7000			38	3.5	
8000			38	4	
9000			38	4.5	
10000			38	5	
11000			38	5.5	
12000			38	6	

4.5.2 Kecepatan rata-rata untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi bahan masing-masing 1 dan 0.5

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000			33	0.5	
2000			31	1	
3000			31	1.5	
4000			29	2	
5000	10 nm	1	22	2.5	6.67
6000			20	3	
7000			18	3.5	
8000			15	4	
9000			16	4.5	
10000			10	5	
11000			13	5.5	
12000			6	6	

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000			33	0.5	
2000			33	1	
3000			33	1.5	
4000			33	2	
5000			33	2.5	
6000	10 nm	0.5	29	3	3.71
7000			26	3.5	
8000			29	4	
9000			24	4.5	
10000			22	5	
11000			24	5.5	
12000			20	6	

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000			38	0.5	
2000			27	1	
3000			36	1.5	
4000			30	2	
5000			30	2.5	
6000	20 nm	1	25	3	5.82
7000			25	3.5	
8000			22	4	
9000			16	4.5	
10000			19	5	
11000			11	5.5	
12000			6	6	

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000			38	0.5	
2000			39	1	
3000			40	1.5	
4000			37	2	
5000			37	2.5	
6000	20 nm	0.5	35	3	3.09
7000			34	3.5	
8000			30	4	
9000			32	4.5	
10000			29	5	
11000			25	5.5	
12000			21	6	

4.5.3 Kecepatan rata-rata untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi bahan masing-masing 1 dan 0.5

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000			33	0.5	
2000			31	1	
3000			30	1.5	
4000			28	2	
5000			26	2.5	
6000	10 nm	1	24	3	7.64
7000			20	3.5	
8000			11	4	
9000			0	4.5	
10000			3	5	
11000			5	5.5	
12000			9	6	

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000			31	0.5	
2000			30	1	
3000			33	1.5	
4000			31	2	
5000			26	2.5	
6000	10 nm	0.5	22	3	4.55
7000			24	3.5	
8000			24	4	
9000			18	4.5	
10000			13	5	
11000			10	5.5	
12000			6	6	

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000			38	0.5	
2000			38	1	
3000			31	1.5	
4000			29	2	
5000			25	2.5	
6000	20 nm	1	22	3	6.91
7000			14	3.5	
8000			11	4	
9000			9	4.5	
10000			6	5	
11000			3	5.5	
12000			0	6	

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000			38	0.5	
2000			40	1	
3000			37	1.5	
4000			37	2	
5000			29	2.5	
6000	20 nm	0.5	31	3	4.00
7000			28	3.5	
8000			27	4	
9000			29	4.5	
10000			21	5	
11000			20	5.5	
12000			16	6	

4.5.4 Kecepatan rata-rata untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ diameter 10 nm dan 20 nm dengan polarisasi bahan masing-masing 1 dan 0.5

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000	10 nm	1	33	0.5	9.46
2000			29	1	
3000			22	1.5	
4000			20	2	
5000			14	2.5	
6000			6	3	
7000			3	3.5	
8000			1	4	
9000			6	4.5	
10000			20	5	
11000			25	5.5	
12000			30	6	

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000	10 nm	0.5	33	0.5	5.64
2000			31	1	
3000			31	1.5	
4000			29	2	
5000			23	2.5	
6000			20	3	
7000			18	3.5	
8000			16	4	
9000			11	4.5	
10000			9	5	
11000			5	5.5	
12000			2	6	

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000	20 nm	1	38	0.5	8.17
2000			35	1	
3000			30	2	
4000			24	2	
5000			17	2.5	
6000			15	3	
7000			9	3.5	
8000			6	4	
9000			8	4.5	
10000			8	5	
11000			11	5.5	
12000			21	6	

id	Diameter (nm)	Polarisasi	L (nm)	t (ns)	V Rata-rata (m/s)
1000			38	0.5	
2000			40	1	
3000			36	1.5	
4000			31	2	
5000			30	2.5	
6000	20 nm	0.5	24	3	5.27
7000			24	3.5	
8000			22	4	
9000			17	4.5	
10000			19	5	
11000			11	5.5	
12000			9	6	

Lampiran 4.6 Nilai magnetisasi bahan dalam setiap variasi rapat arus listrik dengan diameter *nanowire* 10 nm, 20 nm dan polarisasi bahan 1 dan 0.5

4.6.1 Nilai magnetisasi bahan untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ diameter 10 nm

t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)	t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)
0	1	10	-134387.5997	0	0.5	10	-134430.1185
1	1	10	-86867.64805	1	0.5	10	-108959.5996
2	1	10	10390.63083	2	0.5	10	-108538.2007
3	1	10	172149.343	3	0.5	10	-132634.3964
4	1	10	186408.0997	4	0.5	10	-101283.3144
5	1	10	57466.52894	5	0.5	10	-121530.0446
6	1	10	-91395.17792	6	0.5	10	-124283.4579

4.6.2 Nilai magnetisasi bahan untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ diameter 10 nm

t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)	t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)
0	1	10	-134387.5997	0	0.5	10	-134430.1185
1	1	10	-61000.31154	1	0.5	10	-86856.00873
2	1	10	102366.8373	2	0.5	10	10551.09176
3	1	10	173401.442	3	0.5	10	186311.1093
4	1	10	191993.7596	4	0.5	10	191945.8353
5	1	10	192507.0402	5	0.5	10	57277.11624
6	1	10	178506.0266	6	0.5	10	-91507.07931

4.6.3 Nilai magnetisasi bahan untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ diameter 10 nm

t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)	t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)
0	1	10	-134387.5997	0	0.5	10	-134430.1185
1	1	10	-63933.89103	1	0.5	10	-70254.22953
2	1	10	39220.27239	2	0.5	10	95131.70985
3	1	10	9309.55501	3	0.5	10	201248.09
4	1	10	-105076.0537	4	0.5	10	194483.3736
5	1	10	-205012.2458	5	0.5	10	179254.8232
6	1	10	-89433.27183	6	0.5	10	194107.2882

4.6.4 Nilai magnetisasi bahan untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ diameter 10 nm

t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)	t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)
0	1	10	-134387.5997	0	0.5	10	-134432.2593
1	1	10	-88124.30044	1	0.5	10	-61016.89401
2	1	10	-68504.67983	2	0.5	10	102353.4646
3	1	10	-141264.9376	3	0.5	10	173372.3569
4	1	10	-209604.4004	4	0.5	10	191945.8353
5	1	10	-19430.56235	5	0.5	10	192428.4546
6	1	10	159940.3345	6	0.5	10	178360.1775

4.6.5 Nilai magnetisasi bahan untuk $J = 5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ diameter 20 nm

t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)	t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)
0	1	10	131345.3826	0	0.5	10	131345.7
1	1	10	10505.25253	1	0.5	10	112430.4
2	1	10	-42584.35589	2	0.5	10	103430.6
3	1	10	-199670.0632	3	0.5	10	119940.4
4	1	10	-3521.08988	4	0.5	10	127344.5
5	1	10	216935.6634	5	0.5	10	113944.8
6	1	10	-29278.90912	6	0.5	10	107405.1

4.6.6 Nilai magnetisasi bahan untuk $J = 10 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ diameter 20 nm

t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)	t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)
0	1	10	131345.3826	0	0.5	10	131344
1	1	10	-201203.1121	1	0.5	10	10517.46
2	1	10	-57277.17402	2	0.5	10	-42646.2
3	1	10	210619.1858	3	0.5	10	-199647
4	1	10	-157724.0125	4	0.5	10	-3437.01
5	1	10	-182676.6973	5	0.5	10	216950.1
6	1	10	-126414.9397	6	0.5	10	-29343.9

4.6.7 Nilai magnetisasi bahan untuk $J = 15 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ diameter 20 nm

t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)	t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)
0	1	10	131345.3826	0	0.5	10	131344
1	1	10	-138073.7667	1	0.5	10	-175984
2	1	10	-60845.07859	2	0.5	10	124051.8
3	1	10	-163698.895	3	0.5	10	196484
4	1	10	-71472.4157	4	0.5	10	-194892
5	1	10	-122003.0444	5	0.5	10	199252.9
6	1	10	-222802.1321	6	0.5	10	-191387

4.6.8 Nilai magnetisasi bahan untuk $J = 20 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ diameter 20 nm

t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)	t (ns)	p	d (nm)	Magnetisasi (A/m)
0	1	10	131345.3826	0	0.5	10	131344
1	1	10	-98323.12954	1	0.5	10	-201205
2	1	10	148198.7888	2	0.5	10	-57266.1
3	1	10	27000.96299	3	0.5	10	210615.1
4	1	10	161669.1239	4	0.5	10	-157718
5	1	10	87.22955	5	0.5	10	-182679
6	1	10	197797.3351	6	0.5	10	-126418