



UNIVERSITAS INDONESIA

**DINAMIKA DOMAIN WALL DAN EFEK ANISOTROPI
PADA MATERIAL FERROMAGNET Co DAN Ni
BERBENTUK NANOWIRE**

TESIS

**MARDONA
1006786820**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM PASCA SARJANA FISIKA
DEPOK
Mei 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**DINAMIKA DOMAIN WALL DAN EFEK ANISOTROPI
PADA MATERIAL FERROMAGNET Co DAN Ni
BERBENTUK NANOWIRE**

TESIS

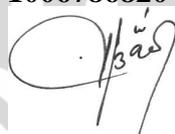
Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains

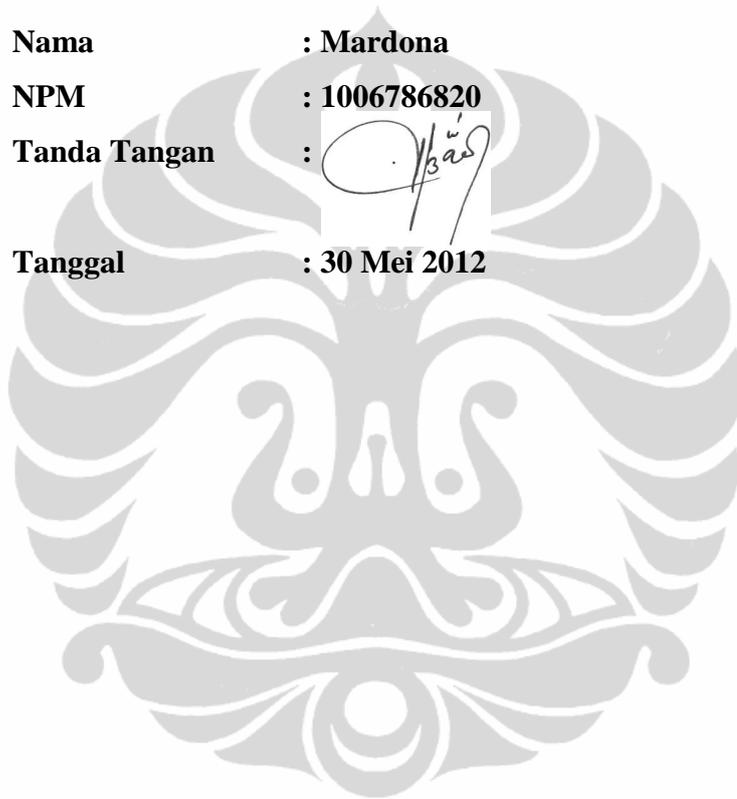
**MARDONA
1006786820**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
KEKHUSUSAN FISIKA MURNI DAN TERAPAN
DEPOK
Mei 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Mardona
NPM : 1006786820
Tanda Tangan : 
Tanggal : 30 Mei 2012



HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Mardona

NPM : 1006786820

Program Studi : Magister Fisika

Judul : Dinamika Domain Wall dan Efek Anisotropi pada Material Ferromagnet Co dan Ni Berbentuk Nanowire

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Dede Djuhana

Penguji : Dr. M. Aziz Majidi

Penguji : Dr. Bambang Soegijono

Penguji : Dr. Budhy Kurniawan



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Mei 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Yang Maha Kuasa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar magister sains Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Dede Djuhana, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing penulis dalam menyusun tesis ini;
2. Dinas Pendidikan provinsi Jambi, yang telah memberikan kesempatan belajar dan bantuan dana selama penulis kuliah di Universitas Indonesia;
3. Bapak dan ibu (almh) yang senantiasa memberikan semangat dan kasih sayang kepada penulis.
4. Istri tercinta, Feronia Angestia yang selalu memberikan semangat dan motivasi kepada penulis serta Sang buah hatiku tersayang Nayla Elysia yang menjadi motivator bagi penulis.
5. Teman-teman seperjuangan Bang Hery, Mas Gagus, Pak Hamid, Mbak Prilla, Buk Eka, Pak Tukimin, Pak Syahril, dan Mas Joko yang telah memberikan motivasi untuk selalu berjuang bersama.
6. Teman-teman di Lab. ManDra Group Pak Erwin, Pak Yasir, Mas Agus Tri Widodo, Bang Ismael, dan Bang Mohsin yang telah banyak membantu penelitian maupun penyusunan tesis ini.

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 30 Mei 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIK**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Mardona
NPM : 1006786820
Program Studi : Magister Fisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah yang berjudul:

**Dinamika Domain Wall dan Efek Anisotropi pada Material Ferromagnet
Co dan Ni Berbentuk Nanowire**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 30 Mei 2012
Yang menyatakan


(Mardona)

ABSTRAK

Nama : Mardona
Program Studi : Magister Fisika
Judul : Dinamika Domain Wall dan Efek Anisotropi pada Material Ferromagnet Co dan Ni Berbentuk Nanowire

Dalam penelitian ini telah dilakukan pengamatan dinamika domain-wall dan efek anisotropi pada material ferromagnet Co dan Ni dalam bentuk nanowire. Pengamatan dinamika domain-wall dan efek anisotropi dilakukan dengan menggunakan simulasi micromagnetic berdasarkan persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) menggunakan perangkat lunak micromagnetic OOMMF. Ukuran dan geometri nanowire simulasi micromagnetic mempunyai panjang 2000 nm dengan variasi lebar 100 nm, 150 nm, dan 200 nm dan tebal 2,5 nm dan 5,0 nm. Faktor damping 0,01 dan ukuran sel $5 \times 5 \times t \text{ nm}^3$ dengan t adalah ketebalan nanowire. Simulasi micromagnetic dilakukan secara sistematis dengan memberikan medan magnet luar dalam bentuk pulsa dengan waktu pulsa 1 ns dan variasi amplitudo sebagai besarnya medan magnet luar. Hasil pengamatan memperlihatkan kecepatan domain-wall meningkat dengan bertambahnya medan magnet luar sampai mencapai medan magnet luar maksimum yang dikenal dengan medan Walker breakdown. Kemudian kecepatan domain-wall menurun dengan bertambahnya medan magnet luar setelah medan Walker breakdown. Hal yang sangat menarik dari hasil pengamatan bahwa struktur domain-wall memperlihatkan struktur berbentuk transverse sebelum Walker breakdown dan timbul struktur vortex/anti-vortex wall sesudah Walker breakdown. Selanjutnya, analisis energi sistem juga dilakukan yaitu energi total, energi Zeeman, energi exchange, energi anisotropi, dan energi demagnetisasi. Hasil analisis menunjukkan energi demagnetisasi meningkat dengan bertambahnya medan magnet luar sebelum Walker breakdown dan menurun ketika struktur vortex/antivortex wall terbentuk sesudah Walker breakdown. Efek anisotropi dari material Co dan Ni diperlihatkan pada profil kecepatan domain-wall dan kerapatan energi total nanowire. Profil kecepatan domain-wall memperlihatkan kecepatan menurun secara landai di sekitar Walker breakdown dibandingkan material Py yang menurun cukup curam. Kerapatan energi total untuk material Co lebih besar dari material Py karena pengaruh nilai konstanta anisotropi bernilai positif dan material Ni yang lebih kecil dibandingkan material Py karena nilai konstanta anisotropi bernilai negatif. Hasil ini memperlihatkan efek anisotropi mempengaruhi dinamika domain-wall dalam nanowire dan harus dipertimbangkan dalam merealisasikan devais-devais berbasis magnet di masa depan.

Kata kunci: domain-wall, ferromagnet nanowire, Walker breakdown, struktur transverse, struktur vortex/anti-vortex, uniaksial anisotropi, kubik anisotropi.

ABSTRACT

Name : Mardona
Study Program : Magister Fisika
Title : Domain Wall Dynamic and Anisotropy Effect of
Materials Co and Ni in Ferromagnetic Nanowire

In this work, we have investigated the domain wall dynamic and anisotropy effect of materials Co and Ni in ferromagnetic nanowires by means of micromagnetic simulation. The simulation is carried out by the public micromagnetic software based on Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation. The length of ferromagnetic nanowire is set to be 2000 nm corresponds to width variation from 100 nm to 200 nm and the thickness variation are 2.5 nm and 5.0 nm. The damping factor is 0.01 and the cell size is $5 \times 5 \times t \text{ nm}^3$ with t is the thickness. The simulation is applied by the external magnetic pulsed with length of 1 ns and the variation the external magnetic field strength. The calculation showed the domain wall velocity increases as the external magnetic field increases and reach the maximum the external field as known the Walker breakdown. Then the domain wall velocity abruptly decreases after the Walker breakdown. Very interestingly, before the Walker breakdown, the domain wall exhibits the transverse wall while the vortex/anti-vortex wall after the Walker breakdown. We have also investigated the energy system that consists of the total energy, Zeeman energy, the exchange energy, the demagnetization, and the anisotropy energy. The analyzed showed that the demagnetization increases as the external field increases before the Walker breakdown and decreases as the vortex/anti-vortex formed after the Walker breakdown. The anisotropy effect of Co and Ni ferromagnetic is shown by the domain wall velocity and the total energy density profile. The velocity shows slightly decreasing around the Walker breakdown compare with the material Py. The total energy density of Co shows large than Py since the anisotropy constant is positive ($K > 0$) and Ni shows small than Py since the anisotropy is negative ($K < 0$). This means that the effect anisotropy also contributes the domain wall motion in ferromagnetic nanowire and must be considered in the realization magnetic devices in the future.

Key words: domain wall, ferromagnetic nanowire, Walker breakdown, transverse wall, vortex/anti-vortex wall, uniaxial anisotropy, cubic anisotropy.

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|---|-----------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS..... | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN..... | iii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI..... | v |
| ABSTRAK | vi |
| ABSTRACT | vii |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR GAMBAR | ix |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xi |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Tujuan Penelitian..... | 2 |
| 1.3 Sistematika Penulisan | 2 |
| BAB II LANDASAN TEORI | 4 |
| 2.1 Domain Magnet dan Domain-Wall | 4 |
| 2.2 Energi pada Sistem Ferromagnet..... | 7 |
| 2.2 Dinamika Spin Magnet..... | 11 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | 15 |
| 3.1 Sistem Micromagnetic | 15 |
| 3.2 Prosedur Simulasi Micromagnetic | 15 |
| 3.3 Metode Time-Resolved Imaging..... | 17 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 19 |
| 4.1 Posisi dan Kecepatan Domain-Wall..... | 19 |
| 4.2 Analisis Energi Sistem | 28 |
| 4.3 Efek Anisotropi Pada Kecepatan dan Energi Domain-Wall | 32 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... | 36 |
| 5.1 Kesimpulan | 36 |
| 5.2 Saran-Saran..... | 37 |
| DAFTAR REFERENSI | 38 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Konfigurasi momen magnet dalam domain-wall berubah secara berlahan-lahan membentuk struktur domain-wall 180° dikenal dengan <i>Bloch wall</i> | 5 |
| Gambar 2.2 | Struktur <i>Néel wall</i> dimana orientasi spinnya terjadi pada bidang thin film | 5 |
| Gambar 2.3 | Ilustrasi arah magnetisasi dari Fe (kiri) mempunyai $K_1 > 0$, arah sumbu mudah pada [100],[010], dan [001]. Untuk arah sumbu sulit pada [111]. Untuk Ni (kanan) dengan $K_1 < 0$, arah sumbu mudah [111] dan arah sumbu sulit [100],[010], dan [001] | 10 |
| Gambar 2.4 | Momen magnetik yang dihasilkan oleh muatan elektron yang bergerak disekitar loop dengan jari-jari r , kecepatan tangensial \mathbf{v} dan kecepatan anguler ω . Untuk elektron, yang arah momentum anguler \mathbf{l} berlawanan dengan momen magnetik. | 11 |
| Gambar 3.1 | (a) Geometri dari bentuk nanowire, $L = 2000 \text{ nm}$, $w = 100 \text{ nm}, 150 \text{ nm}, 200 \text{ nm}$, dan $t = 2,5 \text{ nm}, 5 \text{ nm}$. Konfigurasi struktur <i>head-to-head</i> di tengah nanowire pada keadaan medan magnet luar nol. (b). Bentuk pulsa medan magnet luar fungsi waktu dengan amplitudo menyatakan besar medan magnet luar. Medan magnet luar nol diberikan sampai dengan 5 ns, <i>rise time</i> sebesar 0,1 ns, dan durasi pulsa sebesar 1 ns. Medan magnet luar diberikan dalam arah x positif dan cakram warna menyatakan arah magnetisasi (+y(hijau) dan +x (merah))...... | 16 |
| Gambar 3.2 | Menentukan nilai kecepatan domain-wall pada nanowire dengan menggunakan metode <i>time-resolved imaging</i> dimana x_1 dan x_2 adalah posisi awal dan akhir dari domain-wall (nm) dan t_1 dan t_2 adalah waktu awal dan akhir domain-wall (ns). | 18 |
| Gambar 4.1 | Kurva posisi domain-wall fungsi waktu untuk material Co (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5 \text{ nm}$ dengan variasi lebar w 100 nm, 150 nm, dan 200 nm..... | 20 |
| Gambar 4.2 | Kurva posisi domain-wall fungsi waktu untuk material Ni (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5 \text{ nm}$ dengan variasi lebar w 100 nm, 150 nm, dan 200 nm..... | 21 |
| Gambar 4.3 | Kurva kecepatan domain-wall fungsi medan magnet luar untuk material Co dengan tebal (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5 \text{ nm}$ untuk variasi lebar w 100 nm, 150 nm, dan 200 nm..... | 23 |
| Gambar 4.4 | Kurva kecepatan domain-wall fungsi medan magnet luar untuk material Ni dengan tebal (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5 \text{ nm}$ untuk variasi lebar w 100 nm, 150 nm, dan 200 nm..... | 23 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 4.5 | (a) Mekanisme pergerakan domain-wall dalam nanowire akibat medan magnet luar (H_a) menghasilkan torka (<i>field torque</i>) dan (b). Medan torka menghasilkan medan demagnetisasi (<i>demagnetization torque</i>) berkontribusi pada pergerakan domain-wall dan sudut easy plane membentuk sudut (ψ) maksimum mencapai nilai $\pi/4$ menghasilkan kecepatan maksimum (Walker breakdown field). | 24 |
| Gambar 4.6 | Evolusi posisi domain-wall dalam material Co (a) sebelum medan Walker breakdown ($B = 2 \text{ mT}$) dan (b) sesudah medan Walker breakdown ($B = 3 \text{ mT}$) untuk ketebalan 2,5 nm dan lebar 150 nm. | 27 |
| Gambar 4.7 | Evolusi posisi domain-wall dalam material Ni (a) sebelum medan Walker breakdown ($B = 2 \text{ mT}$) dan (b) sesudah medan Walker breakdown ($B = 3 \text{ mT}$) untuk ketebalan 2,5 nm dan lebar 150 nm. | 27 |
| Gambar 4.8 | Kurva kerapatan energi total fungsi medan magnet luar pada material Co untuk (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5,0 \text{ nm}$ | 29 |
| Gambar 4.9 | Kurva kerapatan energi total fungsi medan magnet luar pada material Ni untuk (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5,0 \text{ nm}$ | 29 |
| Gambar 4.10 | Kurva kerapatan energi fungsi medan magnet luar pada material Co untuk (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5,0 \text{ nm}$ | 30 |
| Gambar 4.11 | Kurva kerapatan energi fungsi medan magnet luar pada material Ni untuk (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5,0 \text{ nm}$ | 31 |
| Gambar 4.12 | Kurva kecepatan domain-wall fungsi medan magnet luar dengan tebal $t = 2,5 \text{ nm}$ dan $t = 5 \text{ nm}$ (a) material Py (b) Material Co untuk variasi lebar w 100 nm, 150 nm, dan 200 nm. | 32 |
| Gambar 4.13 | Kurva kecepatan domain-wall fungsi medan magnet luar dengan tebal $t = 2,5 \text{ nm}$ dan $t = 5 \text{ nm}$ (a) material Py (b) Material Ni untuk variasi lebar w 100 nm, 150 nm, dan 200 nm. | 33 |
| Gambar 4.14 | Kurva kerapatan energi total fungsi medan magnet luar (a) material Py dan (b) material Co untuk $t = 2,5 \text{ nm}$ dan $t = 5,0 \text{ nm}$ | 34 |
| Gambar 4.15 | Kurva kerapatan energi total fungsi medan magnet luar (a) material Py dan (b) material Ni untuk $t = 2,5 \text{ nm}$ dan $t = 5,0 \text{ nm}$ | 35 |

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Program MIF simulasi dinamika domain-wall dengan menggunakan medan pulsa pada material Co nanowire.....41
- Lampiran 2. Program MIF simulasi dinamika domain-wall dengan menggunakan medan pulsa pada material Ni nanowire.....44



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penemuan efek GMR (*Giant Magnetoresistance*) pada tahun 1988 oleh Albert Fert (Perancis) dan Peter Grünberg (Jerman) telah menjadi tonggak kelahiran dari era *spintronic* [1,2]. *Spintronic* adalah memanfaatkan arah spin elektron sebagai sumber informasi digital dibandingkan dengan muatan elektron itu sendiri. Proses manipulasi arah spin memberikan paradigma baru mengenai proses penyimpan data. Material yang berpotensi sebagai divais *spintronic* di masa depan adalah material ferromagnet nanowire. Sebagai contoh adalah *Racetrack memory* (RM) yang dikembangkan oleh Parkin dari IBM dalam material ferromagnet berbentuk nanowire dengan memanfaatkan dinamika dari *domain-wall magnet* (DW) [3].

Dalam dua dekade terakhir ini, penelitian mengenai dinamika domain-wall pada material ferromagnet, baik bentuk nanowire atau bentuk elemen-magnet telah banyak menarik perhatian para ilmuwan karena berpotensi sebagai media penyimpan data (*magnetic memory device*) dan sensor magnetik (*magnetic sensor*) di masa mendatang [3,4]. Pengetahuan dan pemahaman mengenai dinamika dan struktur domain-wall dalam nanowire menjadi hal yang sangat esensial dalam merealisasikan divais *spintronic* yang mempunyai kemampuan penyimpanan yang besar, *non-volatile*, dan berharga murah.

Beberapa hasil penelitian mengenai dinamika domain-wall dalam nanowire telah banyak dipublikasikan, baik eksperimen maupun secara simulasi dengan memberikan medan magnet luar atau injeksi arus [5-9]. Hasil pengamatan memperlihatkan struktur domain-wall berbentuk sederhana atau *transverse domain-wall* (TW) pada aplikasi medan magnet rendah atau di bawah dari medan kritis atau *Walker breakdown field* (WB) [5,8]. Pada aplikasi medan magnet di atas medan Walker breakdown terlihat terjadi perubahan struktur domain-wall dari struktur *transverse* menjadi *vortex/anti-vortex* [5,8]. Selain itu kecepatan

domain-wall terus meningkat dengan bertambahnya medan magnet luar sampai mencapai medan Walker breakdown, setelah mencapai medan Walker breakdown kecepatan domain-wall turun secara tiba-tiba [5,10]. Selain itu juga telah dilaporkan bahwa struktur dan kecepatan domain-wall juga dipengaruhi oleh ukuran dari nanowire (lebar dan ketebalan) serta material dari sampel [11]. Dengan menggunakan variasi lebar dan ketebalan, struktur domain-wall seperti transverse dan vortex/anti-vortex direpresentasi oleh diagram fase [5]. Hal ini menunjukkan bahwa struktur domain-wall atau *inner structure* memegang peranan yang sangat penting dalam dinamika domain-wall pada ferromagnet nanowire.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk menyelidiki dinamika domain-wall dan efek anisotropi pada material ferromagnet berbentuk nanowire dengan simulasi mikromagnetic. Simulasi menggunakan aplikasi medan magnet luar berbentuk pulsa dengan variasi amplitudo (*magnetic strength*) dan durasi pulsa sebesar 1 ns untuk menentukan kecepatan domain-wall terhadap perubahan medan magnet termasuk medan magnet kritis atau Walker breakdown, analisis struktur domain-wall pada kondisi sebelum dan sesudah medan Walker breakdown, analisis energi sistem yaitu energi total, energi demagnetisasi, dan energi exchange, serta analisis efek anisotropi terhadap kecepatan dan energi domain-wall disekitar Walker breakdown.

1.3. Sistematika Penulisan Tesis

Sistematika penulisan tesis ini dapat diuraikan sebagai berikut :

Bab 1 menjelaskan latar belakang mengenai potensi material ferromagnet berbentuk nanowire sebagai devais penyimpan data berbasis dinamika domain-wall magnet dan spintronic. Menunjukkan beberapa hasil penelitian yang intensif mengenai dinamika domain-wall magnet dalam ferromagnet berbentuk nanowire. Kemudian menjelaskan tujuan penelitian dan sistematika penulisan tesis.

Bab 2 menjelaskan konsep dasar domain magnet dan domain-wall magnet pada material ferromagnet. Tipe-tipe domain-wall magnet yaitu *Bloch wall* pada material berbentuk *bulk* dan *Néel wall* pada material berbentuk *thin-film*. Dinamika momen magnet dalam domain magnet mengikuti persamaan differensial fungsi waktu Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG).

Bab 3 menjelaskan prosedur simulasi mikromagnetic dan parameter simulasi termasuk parameter saturasi magnetik, konstanta Exchange, ukuran sel, medan magnet luar, faktor damping, dan jenis material. Simulasi ini menggunakan perangkat lunak bersifat publik (*free software*) OOMMF (*Object Oriented Micromagnetic Framework*).

Bab 4 menjelaskan hasil dan pembahasan posisi dan kecepatan domain-wall magnet pada material Nickel (Ni) dan Cobalt (Co) dengan variasi ketebalan dan lebar dari nanowire. Menentukan medan kritis atau dikenal dengan Walker breakdown untuk masing-masing material. Menganalisis struktur domain-wall magnet sebelum dan sesudah Walker breakdown. Kemudian menganalisis energi sistem termasuk energi total, energi demagnetisasi, dan energi exchange untuk kondisi sebelum dan sesudah kondisi Walker breakdown serta menganalisis efek anisotropi terhadap kecepatan dan energi domain-wall.

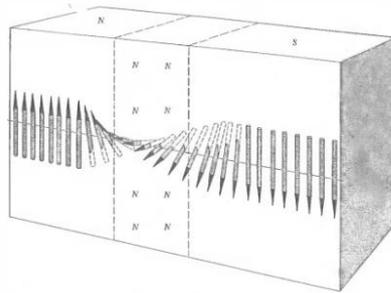
Bab 5 berisi kesimpulan dan saran dari tesis ini.

BAB II LANDASAN TEORI

Pada bagian landasan teori, pertama akan dijelaskan konsep dasar domain magnet dan domain-wall magnet dalam material ferromagnet. Struktur domain-wall pada bentuk *bulk* dikenal *Bloch wall* dan lapisan tipis (*thin film*) dikenal dengan *Néel wall* termasuk energi dan lebar dari domain-wall. Bagian kedua menjelaskan energi-energi yang berkontribusi pada sistem seperti energi exchange, energi magnetostatik, energi anisotropi, dan energi Zeeman. Bagian ketiga mengenai dinamika momen magnet dalam domain-wall dengan menggunakan prinsip torca dan persamaan diferensial Landau–Lifshitz-Gilbert (LLG). Dari persamaan LLG akan didapatkan informasi magnetisasi dan energi yang berkontribusi pada sistem ferromagnet.

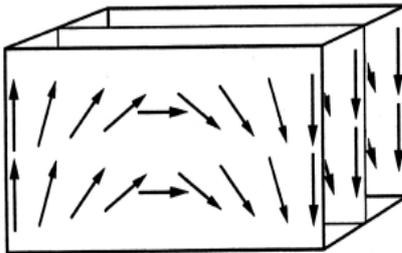
2.1 Domain Magnet dan Domain-Wall

Konsep domain magnet dalam bahan ferromagnet pertama kali dinyatakan oleh P. Weiss pada tahun 1907 dalam publikasinya yang berjudul *hypothesis of molecular field and ferromagnetic properties* menjelaskan pada kondisi kesetimbangan momen magnet mempunyai arah tertentu (*magnetization*) di bawah temperatur Curie [12]. Pada tahun 1927 Felix Bloch menyampaikan konsep *magnetic domain-wall* atau domain-wall yaitu daerah transisi yang membatasi antara domain magnet dalam material ferromagnet [13]. Bloch mengamati konfigurasi spin dalam domain-wall berubah secara berlahan-lahan pada bidang kristal dan dikenal sebagai *Bloch wall* seperti diilustrasikan pada Gambar 2.1 [14].



Gambar 2.1. Konfigurasi momen magnet dalam domain-wall berubah secara berlahan-lahan membentuk struktur domain-wall 180° dikenal dengan *Bloch wall* [14].

Bloch wall umumnya ditemukan pada material ferromagnet berbentuk *bulk*, dimana spin berotasi pada bidang yang sejajar dengan domain-wall. Untuk material ferromagnet bentuk lapisan tipis (*thin film*) dikenal dengan *Néel wall* dengan orientasi spin sepanjang bidang thin film. *Néel wall* diilustrasikan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Struktur *Néel wall* dimana orientasi spinnya terjadi pada bidang thin film [15].

Pembentukan domain-wall magnet pada material ferromagnet merupakan kompetisi antara energi exchange dan energi anisotropi. Energi exchange berasal dari interaksi antara spin atom dengan tetangganya. Energi exchange cenderung untuk mempertebal domain-wall namun karena transisi arah spin menyebabkan efek anisotropi meningkat yang cenderung untuk membuat tipis domain-wall. Pada kondisi kesetimbangan, energi dan lebar domain-wall dapat ditentukan dari energi exchange dan energi anisotropi.

Energi exchange dapat dijelaskan dengan model Heisenberg yaitu interaksi antara atom i dan j dengan spin elektron masing-masing atom S_i dan S_j , $E_{ex} = -2JS_i \cdot S_j = -2JS_i S_j \cos\theta$, dimana J adalah konstanta exchange (J). Ketika $\theta = 0$, maka energi exchange $E_{ex} = -2JS^2$ dan ketika $\theta = \pi$, maka energi exchange $E_{ex} = 2JS^2$. Pendekatan energi exchange pada domain-wall

dapat dinyatakan dalam model *simple cubic* (sc). Ketika berotasi π dalam langkah sejumlah N , maka sudut antara spin dengan spin tetangga adalah π/N . Sehingga energi exchange adalah

$$E_{ex} = \frac{JS^2\pi^2}{N^2} \quad (2.1)$$

Dimana $\theta = \pi/N$, dan γ_{ex} adalah energi pertukaran per unit daerah dinding. Pada struktur simpel kubik dengan konstanta kisi a , bilangan atom per unit area adalah $1/a^2$ energi pertukaran per unit lapisan transisi adalah:

$$\gamma_{ex} = JS^2 \frac{\pi^2}{Na^2} \quad (2.2)$$

Untuk energi anisotropi dengan model *simple cubic* dapat dinyatakan

$$\gamma_{ans} = KNa \quad (2.3)$$

dimana K adalah konstanta anisotropi dan γ_{DW} adalah energi domain-wall

$$\gamma_{DW} = \gamma_{ex} + \gamma_{ans} = \frac{JS^2\pi^2}{Na^2} + KNa \quad (2.4)$$

nilai N dapat ditentukan dengan menurunkan persamaan (2.4) terhadap N pada kondisi minimum yaitu

$$\frac{\partial \gamma_{DW}}{\partial N} = -\frac{JS^2\pi^2}{N^2a^2} + Ka = 0 \quad (2.5)$$

maka nilai N adalah

$$N = \pi \sqrt{\frac{JS^2}{Ka^3}} \quad (2.6)$$

ketebalan domain-wall adalah

$$\delta = Na = \pi \sqrt{\frac{JS^2}{Ka}} = \pi \sqrt{\frac{A}{K}} \quad (2.7)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (2.6) kedalam persamaan (2.4) maka diperoleh energi domain-wall γ_{DW} :

$$\gamma_{DW} = \pi \sqrt{\frac{JS^2K}{a}} + \pi \sqrt{\frac{JS^2K}{a}} = 2\pi \sqrt{\frac{JS^2K}{a}} = \pi \sqrt{AK} \quad (2.8)$$

dimana γ_{DW} adalah energi domain wall (J), K adalah konstanta anisotropi (J/m^3), δ = Ketebalan domain wall (nm), γ_{ans} adalah energi anisotropi (J), a = konstanta kisi, dan A = konstanta exchange stiffness (J/m). Untuk diketahui nilai A sangat dipengaruhi pada struktur kisi. Sebagai contoh sederhana dengan model kristal *simple cubic* $A = JS^2/a$, pada kisi *body center cubic* (bcc) $A = 2JS^2/a$, pada kisi *face center cubic* $A = 4JS^2/a$. Untuk besi (Fe), $J = 2,16 \times 10^{-21}$ J, $S = 1$, $K = 4,2 \times 10^4$ J/m^3 , dan $a = 2,86 \times 10^{-10}$ m, jadi tebal domain-wall (δ) adalah 42 nm sedangkan energi domain-wall (γ_{DW}) $1,1 \times 10^{-3}$ J/m^2 [16].

2.2 Energi pada Sistem Ferromagnet

2.2.1 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 ferromagnet dapat dinyatakan

$$E_{ex} = -2J \sum_{ij} S_i \cdot S_j \quad (2.9)$$

dimana S_i dan S_j adalah unit vektor dua spin atom yang berinteraksi. persamaan (2.9) disebut juga dengan *Heisenberg model*. Interaksi dua spin tergantung pada spin parallel 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. Dengan menggunakan ekspansi Taylor energi exchange pada persamaan (2.9) dapat dituliskan [17].

$$\begin{aligned} E_{ex} &= -2JS^2 \sum_{ij} \cos \theta_{ij} \approx -2JS^2 \sum_{ij} \left(1 - \frac{1}{2} \theta_{ij}^2\right) \quad (2.10) \\ &= \text{const} + JS^2 \sum_{ij} \theta_{ij}^2 \end{aligned}$$

dimana θ_{ij} adalah sudut antara m_j dan m_i dan $|\theta_{ij}| = |\mathbf{m}_j - \mathbf{m}_i|$. Sehingga persamaan (2.10) dapat ditulis

$$E_{ex} = \text{const.} + JS^2 (\mathbf{m}_j - \mathbf{m}_i)^2 \quad (2.11)$$

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

$$\begin{aligned} E_{ex} &= const. + JS^2 \sum_i (\Delta \mathbf{r}_j \cdot \nabla \mathbf{m}) \\ &= const. + JS^2 \sum_j [(\Delta \mathbf{r}_j \cdot \nabla \mathbf{m}_x)^2 + (\Delta \mathbf{r}_j \cdot \nabla \mathbf{m}_y)^2 + (\Delta \mathbf{r}_j \cdot \nabla \mathbf{m}_z)^2] \end{aligned} \quad (2.12)$$

karena sifat simetris bentuk kubik, maka $\sum x_j y_j = 0$ dan $\sum x_j^2 = 1/3 \sum \Delta \mathbf{m}_j^2$. Penjumlahan seluruh indeks j dan total bilangan spin n per unit volume, maka energi exchange per unit volume ϵ_{ex} adalah

$$\epsilon_{ex} = A [(\nabla \mathbf{m}_x)^2 + (\nabla \mathbf{m}_y)^2 + (\nabla \mathbf{m}_z)^2] \quad (2.13)$$

dengan $A = \left(\frac{1}{6}\right) n JS^2 \sum \nabla \mathbf{r}_j^2$ adalah *exchange stiffness constant* dalam J/m. Sebagai contoh untuk Permalloy (Py) mempunyai $A = 13 \times 10^{-11} \text{ J/m}$, Co $A = 2 \times 10^{-11} \text{ J/m}$, dan Fe $A = 1,49 \times 10^{-11} \text{ J/m}$. Sehingga, energi exchange untuk seluruh volume material magnet adalah

$$E_{ex} = A \int_V (\nabla \mathbf{m})^2 dV = \frac{A}{M_s^2} \int_V (\nabla \mathbf{M})^2 dV \quad (2.14)$$

dengan $\mathbf{M} = M_s \mathbf{m}$ dan M_s adalah magnetisasi saturasi. Persamaan (2.14) bersifat isotropik karena E_{ex} tidak tergantung pada arah perubahan magnetisasi [17].

2.2.2 Energi Magnetostatik

Energi magnetostatik pada material magnet berasal dari interaksi muatan pada kutub-kutub seperti muatan positif dan negatif pada muatan listrik yang berasal dari material itu sendiri atau disebut juga dengan energi demagnetisasi H_d . Energi magnetostatik E_d per unit volume adalah

$$E_d = -\frac{1}{2} \mu_0 \int \mathbf{H}_d \cdot \mathbf{M} dV = \frac{1}{2} \mu_0 \int H_d^2 dV \quad (2.15)$$

dimana H_d = medan demagnetisasi dan \mathbf{M} = magnetisasi saturasi.

2.2.3 Energi Anisotropi

Energi anisotropi adalah energi yang tergantung pada orientasi arah magnetisasi dan sumbu kristalografi (*crystallographic axes*). Pada banyak kasus, orientasi magnetisasi lebih cenderung sejajar sepanjang arah sumbu kristal mudah (*easy axis direction*). Energi anisotropi per unit volume $E_{ani}(\mathbf{m})$ berbentuk bola dengan sudut magnetisasi ϕ dan θ dalam bentuk

$$E_{ani}(\mathbf{m}) = \int_V E_{ani}(\mathbf{m}) dV \quad (2.16)$$

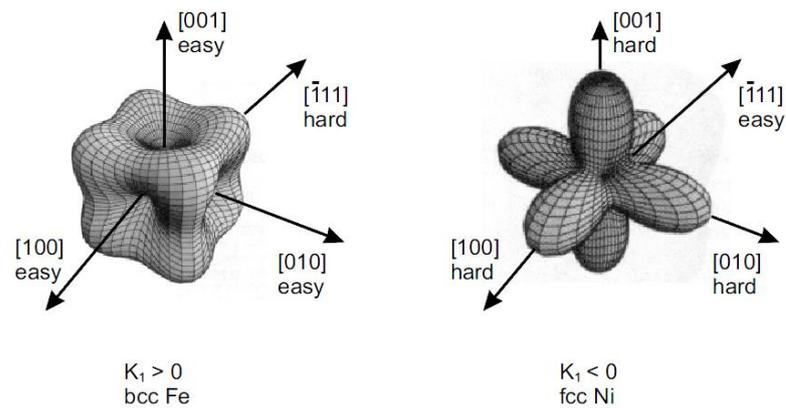
dimana $\mathbf{m} = (\sin \theta \cos \phi \mathbf{e}_x + \sin \theta \sin \phi \mathbf{e}_y + \cos \theta \mathbf{e}_z)$ dan vektor $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \text{ dan } \mathbf{e}_z$ bersesuaian dengan sumbu kristalografi $a, b, \text{ dan } c$. Untuk uniaksial anisotropi, energi anisotropi dapat dinyatakan dengan

$$\epsilon_{ani} = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + K_3 \sin^6 \theta + \dots \quad (2.17)$$

dengan $K_1, K_2, \text{ dan } K_3$ adalah konstanta anisotropi dalam satuan J/m^3 dan θ sudut antara magnetisasi dengan sumbu kristalografi. K_1 adalah konstanta uniaksial anisotropi dapat bernilai positif atau negatif. Untuk $K > 0$, maka energi minimumnya pada $\theta = 0$ dan $\theta = \pi$. Hal ini menunjukkan bahwa sumbu mudah (*easy axis*) sejajar dengan sumbu simetris dan dikenal sebagai *easy axis anisotropy*. Untuk $K < 0$, energi menjadi minimum ketika $\theta = \pi/2$ dan dikenal sebagai *easy plane anisotropy*. Untuk contoh, Besi (Fe) dengan struktur kristal kubik mempunyai *easy axis* sepanjang (100) dan $K > 0$, Nickel (Ni) mempunyai *easy axis* sepanjang (111) dan $K < 0$, dan Cobalt (Co) dengan struktur heksagonal mempunyai uniaksial anisotropi [16]. Untuk kristal kubik, kerapatan energi anisotropi dapat ditulis

$$\epsilon_{ani} = K_1 + K_2(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2) + K_3(\alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2) + \dots \quad (2.18)$$

dimana α_n adalah arah cosinus.



Gambar 2.3. Ilustrasi arah magnetisasi dari Fe (kiri) mempunyai $K_1 > 0$, arah sumbu mudah pada [100],[010], dan [001]. Untuk arah sumbu sulit pada [111]. Untuk Ni (kanan) dengan $K_1 < 0$, arah sumbu mudah [111] dan arah sumbu sulit [100],[010], dan [001] [15].

Kontribusi energi anisotropi yang lain adalah energi anisotropi dari pengaruh bentuk (*shape anisotropy energy*). Anisotropi bentuk berasal dari interaksi magnetostatik yang bergantung pada bentuk sampel (bentuk bola, elips, dan persegi). Pengaruh bentuk dapat dinyatakan sebagai faktor demagnetisasi N dalam 3 sumbu pokok (*sumbu* x , y , z), ada hubungan sederhana $N_a + N_b + N_c = 1$. Contoh, bentuk bola mempunyai faktor demagnetisasi $N = 1/3$ dimana $N_a = N_b = N_c$, untuk silinder dengan $N_a = N_b$ dan $N_c = \infty$, silinder mempunyai $N_a = N_b = 1/2$, dan untuk bidang datar $N_a = N_b = 0$ dan $N_c = 1$ [16].

2.2.4 Energi Zeeman

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

$$E_z = -\mu_0 \int \mathbf{H}_{ext} \cdot \mathbf{M} dV \quad (2.19)$$

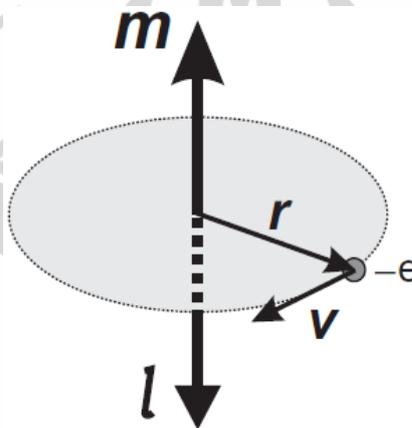
2.3 Dinamika Spin Magnet

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

$$|\mathbf{m}| = \mu_0 I S \quad (2.20)$$

Vektor momen magnetik \mathbf{m} tegak lurus pada bidang loop. Sekarang perhatikan luasan lingkaran kecil $S = \pi r^2$ yang diilustrasikan pada Gambar 2.4. Arus yang dihasilkan oleh muatan listrik q disekitar luasan dengan frekuensi ω adalah $I = q(\omega/2\pi)$. Maka momen magnet yang dihasilkan oleh rotasi muatan listrik dapat ditulis sebagai berikut:

$$\mathbf{m} = \frac{q\mu_0}{2} r^2 \omega = -\frac{e\mu_0}{2} \mathbf{r} \times \mathbf{v} \quad (2.21)$$



Gambar 2.4. Momen magnet yang dihasilkan oleh muatan elektron yang bergerak disekitar loop dengan jari-jari r , kecepatan tangensial \mathbf{v} dan kecepatan angular ω . Untuk elektron, yang arah momentum angular \mathbf{l} berlawanan arah dengan momen magnet [18].

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

$$\mathbf{m} = -\frac{e\mu_0}{2} (\mathbf{r} \times \mathbf{v}) \quad (2.22)$$

momentum angular ditulis

$$\mathbf{l} = m_e(\mathbf{r} \times \mathbf{v}) = m_e r^2 \omega \quad (2.23)$$

dengan substitusi persamaan (2.22) dan persamaan (2.23), hubungan momen magnet dengan momentum angular adalah

$$\mathbf{m} = -\frac{e\mu_0}{2m_e} \mathbf{l} \quad (2.24)$$

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

$$\mathbf{m} = -\frac{e\mu_0}{2m_e} \hbar = -\frac{g|e|\hbar}{2m_e} \mathbf{l} \quad (2.25)$$

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

Ketika momen magnetik \mathbf{m} diberikan medan magnet luar \mathbf{H} akan timbul torka dengan arah tegak lurus momen magnet dan medan magnet luar. Torka ini muncul karena momen magnetik melakukan gerak berpresesi disekitar arah medan magnet. Hubungan torka dengan momentum angular adalah

$$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{l}}{dt} = \mathbf{m} \times \mathbf{H} \quad (2.26)$$

Dengan menggunakan prinsip pada persamaan (2.26), persamaan gerak momen magnet \mathbf{m} terhadap waktu dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = -\frac{e}{2m_e} (\mathbf{m} \times \mu_0 \mathbf{H}) = -\gamma \mu_0 (\mathbf{m} \times \mathbf{H}) \quad (2.27)$$

Dari persamaan (2.27), kita dapat memperoleh frekuensi Larmor (*Larmor frequency*) dari \mathbf{m} pada frekuensi sudut $\omega = -\gamma \mathbf{H}$.

Persamaan gerak dinamika spin magnet pertama kali dinyatakan oleh Landau dan Lifshitz pada tahun 1935 yang dikenal dengan persamaan Landau-Lifshitz (LL) [19]. Persamaan ini menjelaskan tentang respon material ferromagnet ketika diberikan medan magnet luar. Akibatnya terjadi torka antara medan magnet luar dan spin magnet pada suatu domain magnet dan bergerak preesi pada frekuensi tertentu yaitu frekuensi *Larmor* (dalam orde gigahertz). Pada perkembangannya persamaan LL sangat baik menjelaskan dinamika spin pada kondisi energi disipasi rendah atau faktor damping kecil. Tetapi untuk kondisi dengan energi disipasi yang besar, persamaan LL memperlihatkan hasil yang tidak akurat. Pada tahun 1955, Gilbert memformulasikan kembali persamaan LL dengan memperhitungkan kondisi disipasi yang besar atau faktor damping besar [20] dan dikenal dengan persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG).

Secara sederhana persamaan LLG dapat dijelaskan dari persamaan (2.27) dengan memperkenalkan gerak preesi momen magnet yang dapat dianalogikan sebagai gerak disipasi. Gerak preesi ini sebanding dengan perubahan magnetisasi terhadap waktu atau $\left(\frac{d\mathbf{M}}{dt}\right)$ dan medan magnet efektif \mathbf{H}_{eff} . Gerak preesi cenderung membuat momen magnetik sejajar dengan medan efektif, sehingga persamaan (2.27) dapat dituliskan

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma\mathbf{M} \times (\mathbf{H}_{eff} - \eta \frac{d\mathbf{M}}{dt}) \quad (2.28)$$

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

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} + \frac{\alpha}{|\mathbf{M}|}\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \quad (2.29)$$

kemudian persamaan (2.29) dikalikan dengan \mathbf{M} , maka diperoleh

$$\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma\mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) + \frac{\alpha}{|\mathbf{M}|}\mathbf{M} \times \left(\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt}\right) \quad (2.30)$$

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

$$\mathbf{M} \times \left(\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt}\right) = \left(\mathbf{M} \cdot \frac{d\mathbf{M}}{dt}\right)\mathbf{M} - M^2 \frac{d\mathbf{M}}{dt} \quad (2.31)$$

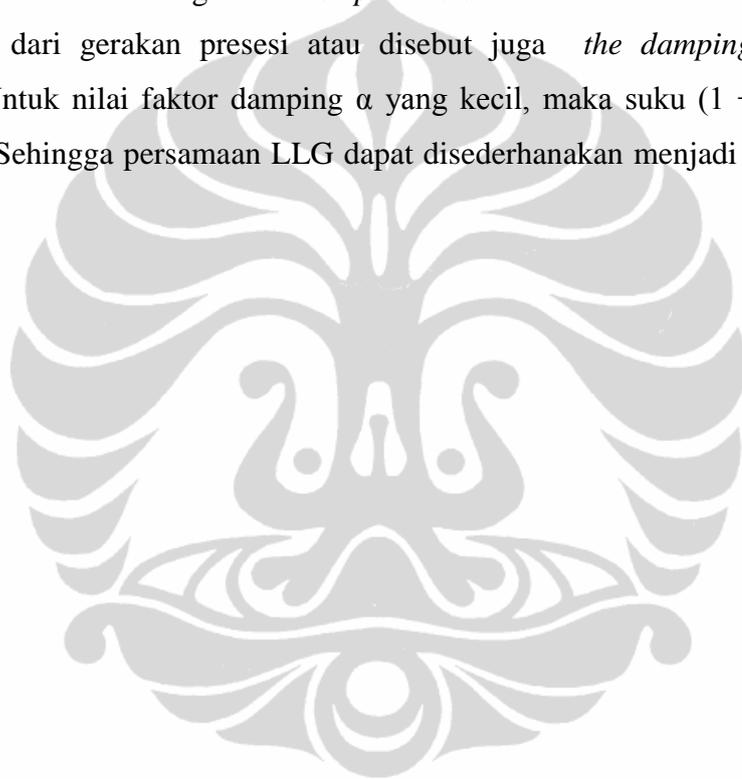
maka persamaan (2.30) dapat ditulis kembali menjadi

$$\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) + \alpha M \frac{d\mathbf{M}}{dt} \quad (2.32)$$

Substitusi persamaan (2.32) pada persamaan (2.29), maka akan menghasilkan persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) - \frac{\gamma\alpha}{(1 + \alpha^2)M} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) \quad (2.33)$$

Suku pertama pada sisi kanan pada persamaan (2.33) menjelaskan proses gerakan precesi dari spin berotasi akibat pengaruh medan magnet luar (*gyromagnetic precession*) atau dikenal dengan *Larmor precession* dan suku kedua menjelaskan efek disipasi dari gerakan precesi atau disebut juga *the damping effect of precession*. Untuk nilai faktor damping α yang kecil, maka suku $(1 + \alpha^2)$ sama dengan satu. Sehingga persamaan LLG dapat disederhanakan menjadi persamaan LL.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Sistem Micromagnetic

Dalam penelitian dinamika domain-wall pada material ferromagnet berbentuk nanowire dilakukan dengan menggunakan simulasi micromagnetic. Simulasi micromagnetic menggunakan perangkat lunak bersifat publik (*freeware*) bernama *Object Oriented Micromagnetic Framework* (OOMMF) [21]. Sistem micromagnetic ini berdasarkan persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) [22] yang merupakan persamaan differensial fungsi waktu dengan pendekatan metode beda-hingga (*finite difference*) dalam bentuk 3 dimensi. Pada program OOMMF proses magnetisasi \vec{M} dalam arah sumbu x, y, dan z dilakukan oleh OXS (*OOMMF eXtensible Solver*) yang merupakan bagian untuk mencari energi minimum dari sistem berdasarkan prinsip energi bebas (*free energy*) dari persamaan Brown [23]. Proses diskritisasi dilakukan untuk menggambarkan dinamika dari tiap spin pada material ferromagnet. Diskritisasi pada micromagnetic dikenal dengan ukuran sel (*cell size*). Pemilihan ukuran sel pada diskritisasi berdasarkan ukuran dari *exchange length* (l_{exc})

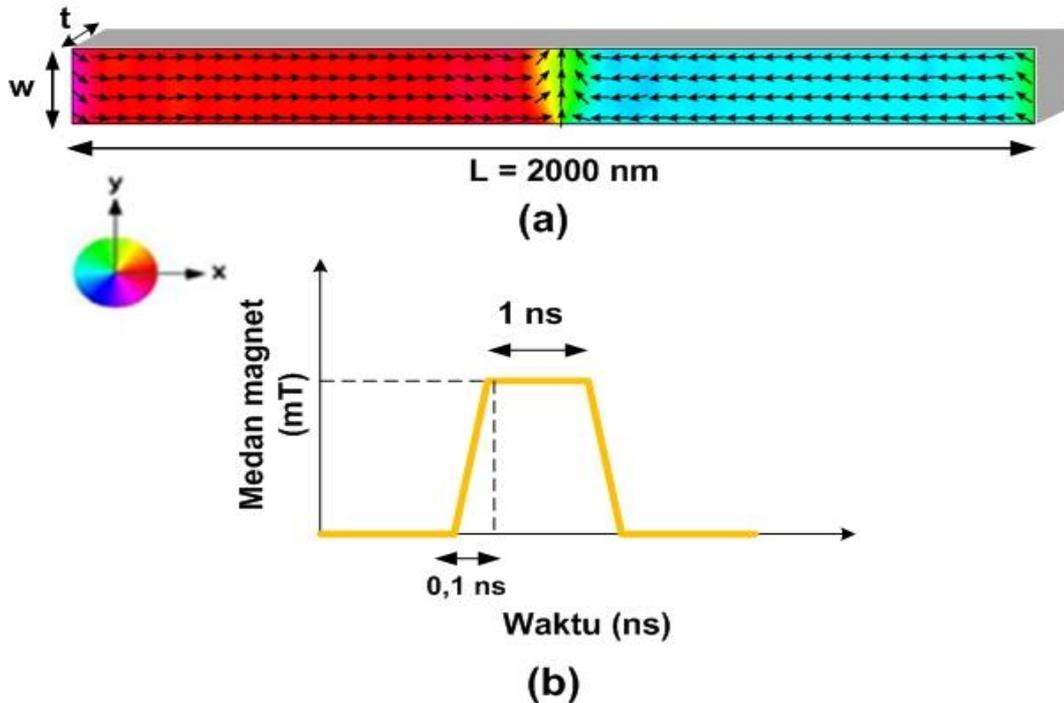
$$l_{exc} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}} \quad (3.1)$$

dimana A adalah konstanta exchange dan M_s adalah magnetisasi saturasi. Selain informasi magnetisasi juga dihasilkan informasi energi sistem yaitu energi total, energi exchange, energi anisotropi, energi demagnetisasi, dan energi Zeeman.

3.2 Prosedur Simulasi Micromagnetic

Pada simulasi ini, ukuran nanowire yang digunakan adalah panjang $L = 2000 \text{ nm}$ [8], lebar w bervariasi dari 100 nm sampai 200 nm, dan ketebalan $t = 2,5 \text{ nm}$ dan $t = 5,0 \text{ nm}$. Ukuran sel yang digunakan adalah $5 \times 5 \times t \text{ nm}^3$ dan faktor redaman (*damping constant*) $\alpha = 0,01$ [8].

Ukuran dan geometri dari bentuk nanowire yang digunakan dalam simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3.1.(a) Geometri dari bentuk nanowire, $L = 2000 \text{ nm}$, $w = 100 \text{ nm}$, 150 nm , 200 nm , dan $t = 2,5 \text{ nm}$, 5 nm . Konfigurasi struktur *head-to-head* di tengah nanowire pada keadaan medan magnet luar nol. (b). Bentuk pulsa medan magnet luar fungsi waktu dengan amplitudo menyatakan besar medan magnet luar. Medan magnet luar nol diberikan sampai dengan 5 ns , *rise time* sebesar $0,1 \text{ ns}$, dan durasi pulsa sebesar 1 ns . Medan magnet luar diberikan dalam arah x positif dan cakram warna menyatakan arah magnetisasi ($+y$ (hijau) dan $+x$ (merah)).

Material ferromagnet yang digunakan terdiri dari Permalloy ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$), Cobalt (Co), dan Nickel (Ni). Parameter material sebagai masukan untuk simulasi micromagnetic seperti magnetisasi saturasi (M_s), konstanta exchange (A), dan konstanta anisotropi (K) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Proses simulasi micromagnetic dilakukan dengan tahapan berikut, pertama simulasi dilakukan tanpa medan magnet luar dengan kondisi konfigurasi momen magnet berbentuk *head-to-head* diletakkan ditengah-tengah dari nanowire sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1. Kemudian diberikan medan magnet berbentuk pulsa dari 0 sampai 5 ns untuk mendapatkan konfigurasi domain-wall yang stabil pada keadaan energi minimum (*ground state*). Setelah itu medan

magnet luar aktif dalam arah sumbu x positif dari 0,5 mT sampai 10 mT dengan waktu pulsa sebesar 1 ns.

Tabel 3.1. Parameter beberapa material yang digunakan untuk simulasi micromagnetic berbentuk nanowire; Permalloy [8], Cobalt [24], dan Nickel [25].

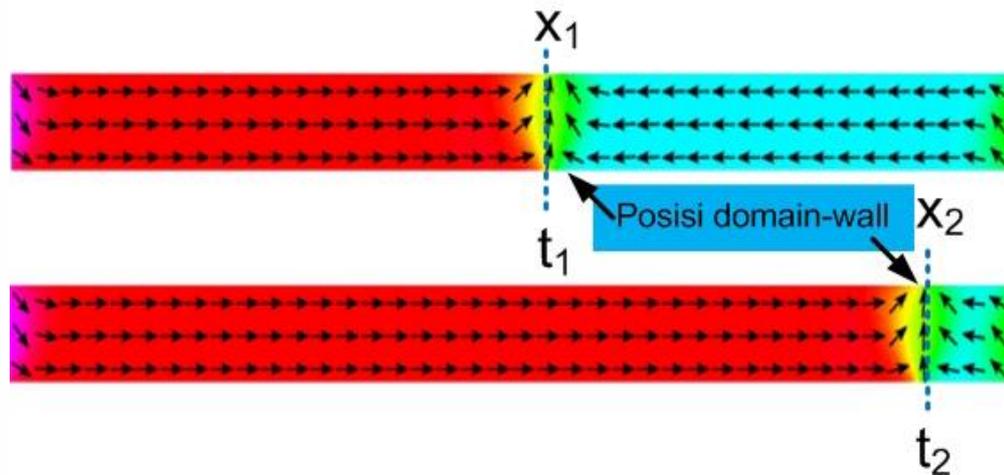
| Material | Magnetisasi Saturasi (A/m) | Konstanta exchange (J/m) | Konstanta anisotropi (J/m ³) |
|----------------|----------------------------|--------------------------|--|
| Permalloy (Py) | 8×10^5 | 13×10^{-12} | 0 |
| Cobalt (Co) | 14×10^5 | 20×10^{-12} | 530×10^3 |
| Nickel (Ni) | $4,9 \times 10^5$ | 9×10^{-12} | $- 5,7 \times 10^3$ |

3.3 Metode time-resolved imaging

Dalam penelitian ini, untuk mengestimasi nilai kecepatan domain-wall pada nanowire menggunakan dua pendekatan. Pertama dengan menggunakan metode *time-resolved imaging* yaitu menghitung perubahan posisi dan waktu domain-wall yang dipresentasikan dalam citra yang bersesuaian. Secara sederhana metode time-resolved imaging dapat dinyatakan seperti berikut:

$$v_{rerata} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \text{ (ms}^{-1}\text{)} \quad (3.2)$$

dengan Δx adalah perubahan posisi domain-wall (nm) dan Δt adalah perubahan waktu (ns). Ilustrasi dari metode *time-resolved imaging* diperlihatkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Menentukan nilai kecepatan domain-wall pada nanowire dengan menggunakan metode *time-resolved imaging* dimana x_1 dan x_2 adalah posisi awal dan akhir dari domain-wall (nm) dan t_1 dan t_2 adalah waktu awal dan akhir domain-wall (ns).

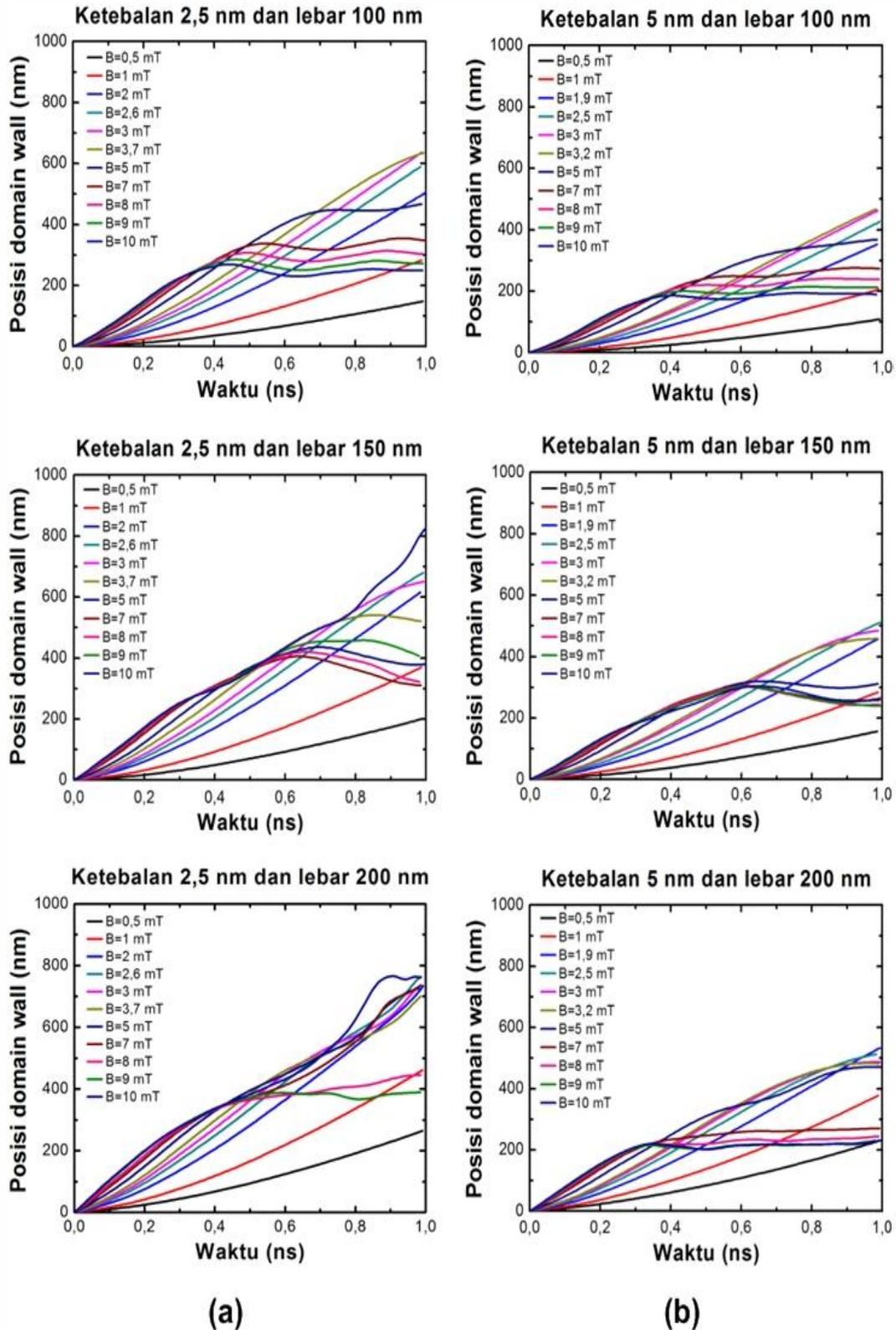
Kedua dengan menggunakan metode *least-square* dengan pendekatan linier. Dari kurva posisi domain-wall fungsi waktu, kecepatan rata-rata domain-wall dalam nanowire merupakan kemiringan (*gradient*). Hasil perhitungan kecepatan domain-wall dengan kedua pendekatan diatas menghasil nilai yang sama.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

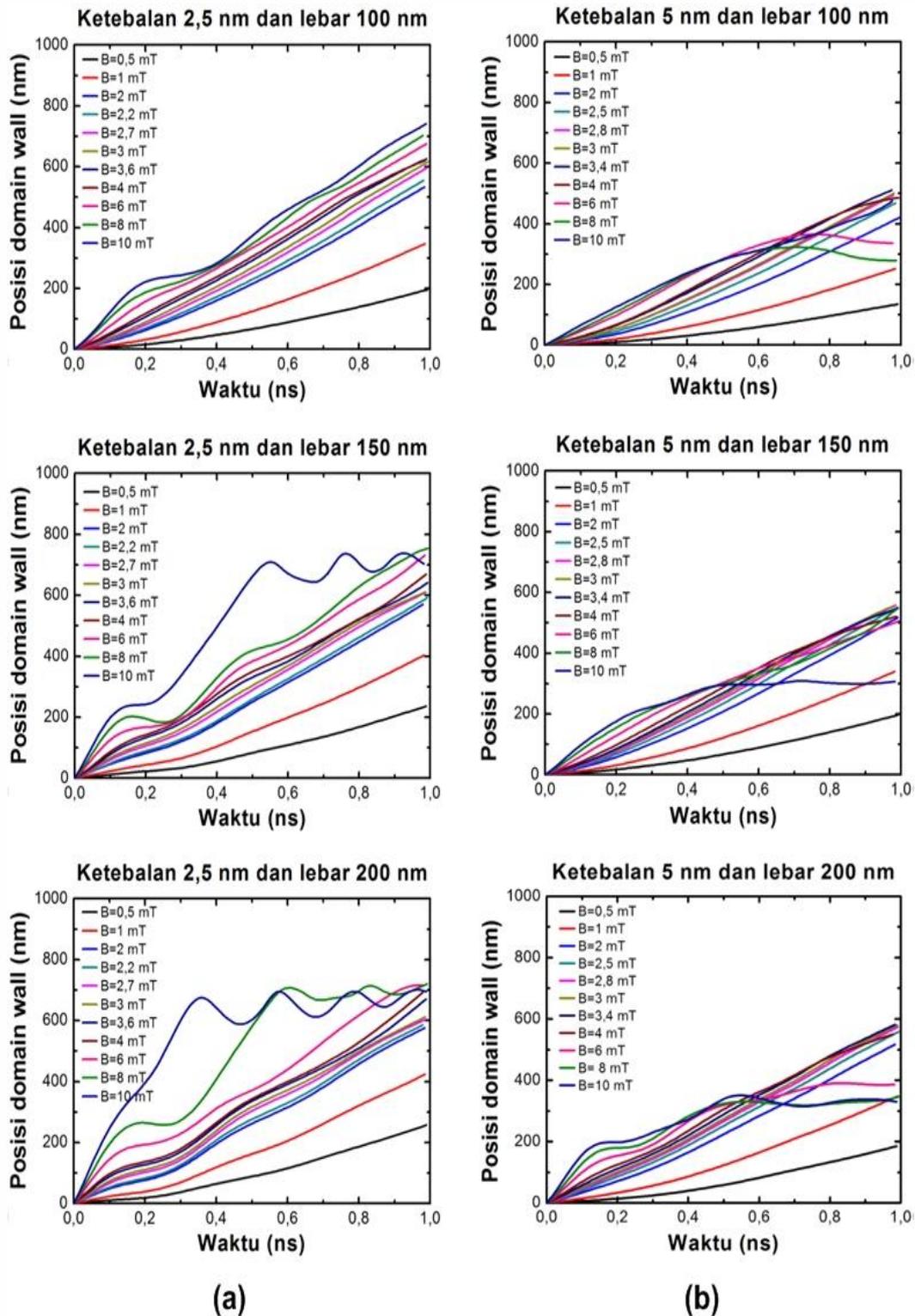
Pada bagian ini menjelaskan hasil dan pembahasan mengenai dinamika domain-wall pada material ferromagnet berbentuk nanowire dengan simulasi micromagnetic. Secara umum bagian pertama menjelaskan mengenai posisi domain-wall sebagai fungsi waktu dan kecepatan domain-wall sebagai fungsi medan magnet luar. Dari kecepatan domain-wall selanjutnya dapat diidentifikasi medan magnet kritis atau Walker breakdown untuk masing-masing material yaitu Co dan Ni nanowire. Bagian kedua menjelaskan bentuk struktur domain-wall sebelum dan sesudah medan Walker breakdown. Kemudian analisis energi-energi yang berhubungan dengan dinamika domain-wall seperti energi total, energi exchange, dan energi demagnetisasi sebelum dan sesudah Walker breakdown, serta efek anisotropi pada kecepatan dan energi domain-wall.

4.1 Posisi dan Kecepatan Domain-Wall

Posisi domain-wall yang bergerak sepanjang nanowire ditentukan dengan menggunakan magnetisasi arah sumbu x (M_x) sebagai fungsi waktu untuk variasi tebal dan lebar dari nanowire. Posisi domain-wall ditentukan saat pulsa medan magnet aktif dalam waktu 1 ns dengan variasi amplitudo sebagai besarnya medan luar. Besarnya medan magnet luar yang diberikan mulai dari $B = 0,5 \text{ mT}$ sampai dengan $B = 10 \text{ mT}$. Nilai magnetisasi untuk arah sumbu x merupakan nilai rata-rata dari nilai magnetisasi yang dihasilkan dari simulasi terhadap nilai medan magnet saturasi (M_x/M_s) sehingga maksimum dan minimum magnetisasi bernilai masing-masing $+1$ dan -1 . Dengan menggunakan prinsip perbandingan (interpolasi) dari nilai M_x fungsi waktu dari setiap data magnetisasi arah sumbu x maka posisi domain-wall bergerak dari pusat nanowire dan mencapai ujung dari nanowire berjarak 1000 nm yang direpresentasikan dengan nilai $M_x = 1$. Posisi domain-wall untuk ketebalan $t = 2,5 \text{ nm}$ dan $t = 5 \text{ nm}$ dengan variasi lebar 100 nm, 150 nm, dan 200 nm ditunjukkan pada Gambar 4.1 untuk material Co dan 4.2 untuk material Ni.



Gambar 4.1. Kurva posisi domain-wall fungsi waktu untuk material Co
 (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5 \text{ nm}$ dengan variasi lebar w
 100 nm, 150 nm, dan 200 nm.

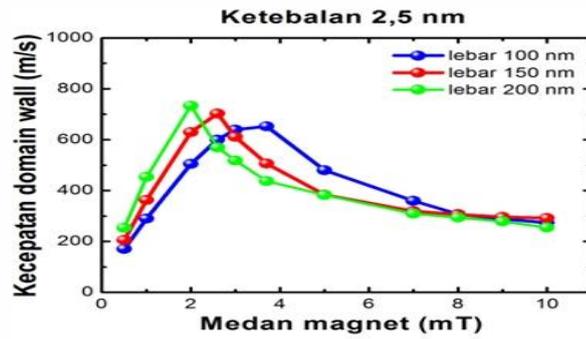


Gambar 4.2. Kurva posisi domain-wall fungsi waktu untuk material Ni
 (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5 \text{ nm}$ dengan variasi lebar w 100 nm, 150 nm, dan 200 nm.

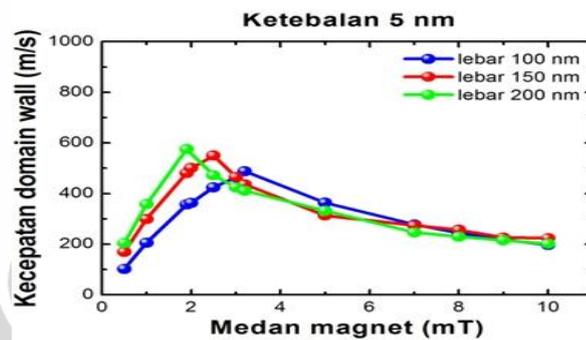
Dari gambar di atas terlihat bahwa posisi domain-wall bergerak sepanjang nanowire memperlihatkan perilaku linier untuk aplikasi medan magnet rendah. Kemudian posisi domain-wall terlihat mengalami defleksi untuk medan magnet luar tertentu. Defleksi kurva posisi domain-wall terhadap waktu menunjukkan terjadinya perlambatan dari gerak domain-wall sepanjang nanowire pada durasi 1 ns.

Selanjutnya adalah menghitung kecepatan domain-wall yang bergerak pada nanowire. Nilai kecepatan domain-wall ditentukan dari data posisi domain-wall fungsi waktu untuk variasi ketebalan dan lebar nanowire. Perhitungan kecepatan domain-wall pada nanowire menggunakan metode yang telah dijelaskan pada bab 3, yaitu metode *time-resolved imaging* dan metode *least-square*. Hasil perhitungan dengan kedua metode di atas menghasilkan nilai kecepatan yang sama. Hasil perhitungan kecepatan domain-wall dengan ketebalan yang berbeda sebagai fungsi medan magnet luar ditunjukkan pada Gambar 4.3 untuk material Co dan 4.4 untuk material Ni.

Dari kurva kecepatan domain-wall fungsi medan magnet luar pada Gambar 4.3 dan 4.4 terlihat kecepatan domain-wall meningkat secara linier dengan bertambahnya medan magnet luar. Hasil ini memperlihatkan pola yang sama, sebagaimana telah ditunjukkan dari beberapa hasil publikasi, baik eksperimen maupun simulasi [5,6,26,27]. Kecepatan domain-wall terus bertambah sampai mencapai nilai maksimum atau medan kritis yang dikenal dengan medan Walker breakdown [28], kecepatan domain-wall akan menurun setelah medan Walker breakdown. Untuk medan magnet luar yang sangat besar memperlihatkan transformasi struktur domain-wall dari struktur transverse ke struktur vortex/anti-vortex.

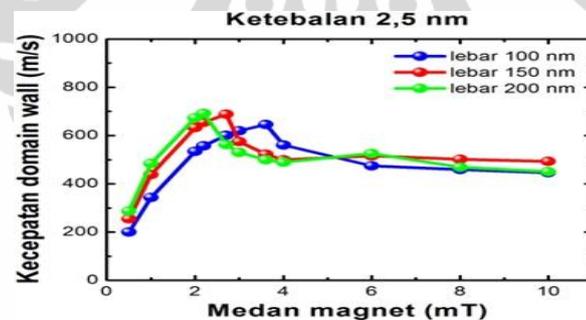


(a)

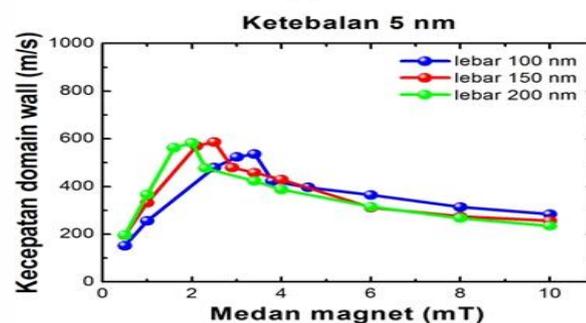


(b)

Gambar 4.3. Kurva kecepatan domain-wall fungsi medan magnet luar untuk material Co dengan tebal (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5 \text{ nm}$ untuk variasi lebar w 100 nm, 150 nm, dan 200 nm.



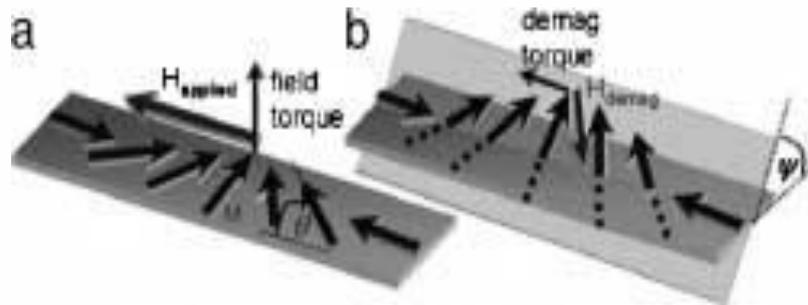
(a)



(b)

Gambar 4.4. Kurva kecepatan domain-wall fungsi medan magnet luar untuk material Ni dengan tebal (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5 \text{ nm}$ untuk variasi lebar w 100 nm, 150 nm, dan 200 nm.

Pergerakan domain-wall dalam nanowire dapat dijelaskan dengan prinsip torka antara konfigurasi spin dalam domain magnet terhadap medan magnet luar, $T = \mathbf{m} \times \mathbf{H}$. Kemudian timbul medan demagnetisasi yang arahnya berlawanan dengan torka dan tegak lurus bidang. Medan demagnetisasi ini yang berkontribusi pada pergerakan domain-wall pada nanowire [7] seperti diilustrasikan pada Gambar di bawah ini:



Gambar 4.5. (a) Mekanisme pergerakan domain-wall dalam nanowire akibat medan magnet luar (H_a) menghasilkan torka (*field torque*) dan (b). Medan torka menghasilkan medan demagnetisasi (*demagnetization torque*) berkontribusi pada pergerakan domain-wall dan sudut easy plane membentuk sudut (ψ) maksimum mencapai nilai $\pi/4$ menghasilkan kecepatan maksimum (Walker breakdown field) [7].

Pada gambar di atas menjelaskan bahwa arah gerak dari domain-wall pada nanowire searah dengan medan magnet luar. Kecepatan domain-wall meningkat dengan bertambahnya medan magnet luar. Tetapi pada medan magnet luar tertentu atau di kenal dengan medan Walker breakdown, kecepatan domain-wall pada nanowire menurun. Menurunnya kecepatan domain-wall setelah medan Walker breakdown dapat dijelaskan dari bidang domain-wall (*easy plane magnetization*) yang mencapai sudut $\pi/4$ terhadap bidang datar pada kondisi Walker breakdown. Sehingga pada medan magnet luar yang besar dari medan Walker breakdown, kecepatan konfigurasi spin pada domain-wall menjadi menurun. Nilai Walker breakdown dengan variasi tebal dan lebar ditunjukkan pada Tabel 4.1 untuk material Co dan 4.2 untuk material Ni.

Tabel 4.1. Nilai medan Walker breakdown untuk material Co dengan variasi tebal dan lebar dari nanowire.

| Lebar (w) | Medan Walker breakdown (H_{WB}) | |
|---------------|-------------------------------------|--------------------|
| | $t = 2,5 \text{ nm}$ | $t = 5 \text{ nm}$ |
| 100 nm | 3,7 mT | 3,2 mT |
| 150 nm | 2,6 mT | 2,5 mT |
| 200 nm | 2,0 mT | 1,9 mT |

Tabel 4.2. Nilai medan Walker breakdown untuk material Ni dengan variasi tebal dan lebar dari nanowire.

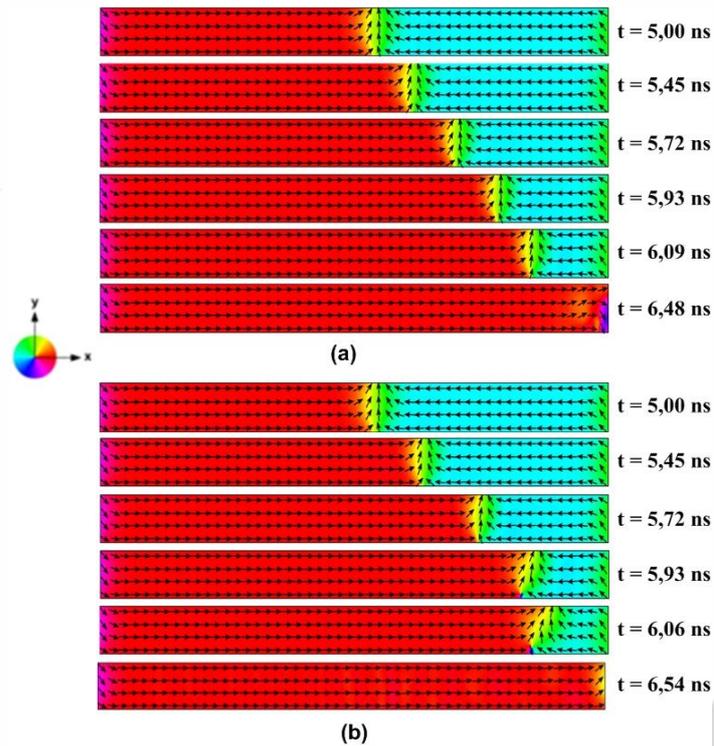
| Lebar (w) | Medan Walker breakdown (H_{WB}) | |
|---------------|-------------------------------------|--------------------|
| | $t = 2,5 \text{ nm}$ | $t = 5 \text{ nm}$ |
| 100 nm | 3,6 mT | 3,4 mT |
| 150 nm | 2,7 mT | 2,5 mT |
| 200 nm | 2,2 mT | 2,0 mT |

Pada Tabel di atas memperlihatkan nilai medan Walker breakdown menurun dengan bertambahnya ketebalan dan lebar dari nanowire. Hasil nilai medan Walker breakdown pada simulasi ini memperlihatkan kecenderungan yang sama dengan hasil yang sudah dipublikasikan [5,9].

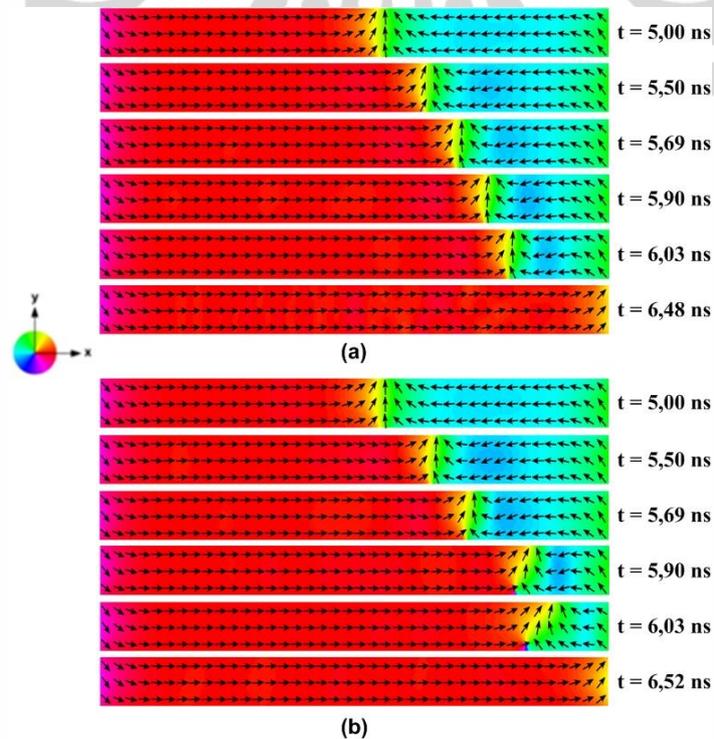
Analisis berikutnya adalah pengamatan struktur domain-wall dilakukan sebelum dan sesudah Walker breakdown. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa sebelum medan Walker breakdown, struktur domain-wall memperlihatkan struktur berbentuk transverse (*transverse domain-wall*) dan sesudah medan Walker breakdown memperlihatkan struktur anti-vortex (*antivortex domain-wall*) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6 untuk material Co dan Gambar 4.7 untuk material Ni. Sebagai contoh struktur domain-wall pada daerah sebelum Walker breakdown ditunjukkan pada Gambar 4.6 (a) dan 4.7 (a) pada medan magnet luar sebesar $B = 2 \text{ mT}$. Setelah keadaan dasar (*ground state*) tercapai terlihat struktur domain-wall mempertahankan bentuk yang stabil dalam konfigurasi *head-to-head* pada $t = 5,00 \text{ ns}$. Aplikasi medan magnet luar selama 1 ns, memperlihatkan struktur domain-wall yang tetap dalam bentuk struktur transverse-wall. Sangat berbeda sekali dengan medan magnet luar lebih besar dari medan Walker

breakdown, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6 (b) dan 4.7 (b), pada keadaan dasar struktur berbentuk transverse-wall, setelah aplikasi medan magnet luar terlihat struktur transverse berubah secara berlahan-lahan menjadi bentuk struktur transverse yang tidak simetris dan mulai terlihat bentuk antivortex pada bagian bawah nanowire ($t = 5,93 \text{ ns}$ untuk material Co dan $t = 5,90 \text{ ns}$ untuk material Ni). Pusat anti-vortex terus bergerak sampai ke tengah-tengah dari nanowire dan beresilasi sampai medan magnet luar kembali nol.

Sebagaimana telah dijelaskan pada Gambar 4.5 pada kondisi medan magnet luar yang lebih besar dari medan Walker breakdown, bidang magnetisasi (*easy plane*) membentuk sudut tertentu. Hal ini berpengaruh pada struktur domain-wall selama bergerak sepanjang nanowire untuk mempertahankan strukturnya akibat medan magnet luar. Sehingga dapat dimengerti struktur anti-vortex akan mulai timbul dari bagian bawah nanowire dari konfigurasi awal *head-to-head*. Hal yang menarik juga dari pengamatan struktur domain-wall, ternyata setelah medan magnet luar tidak aktif (*off*) atau medan magnet luar kembali bernilai nol, struktur domain-wall tetap bergerak sepanjang nanowire sampai hilang pada ujung nanowire. Hal ini dapat diinterpretasikan bahwa domain-wall dapat dianggap sebagai benda rigid selama bergerak sepanjang nanowire atau sifat inersia membutuhkan energi minimum untuk berhenti.



Gambar 4.6. Evolusi posisi domain-wall dalam material Co (a) sebelum medan Walker breakdown ($B = 2 \text{ mT}$) dan (b) sesudah medan Walker breakdown ($B = 3 \text{ mT}$) untuk ketebalan 2,5 nm dan lebar 150 nm.



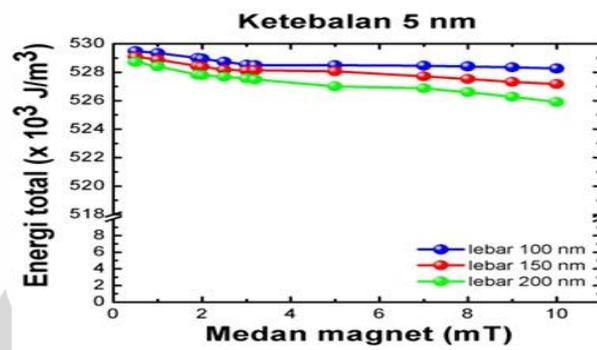
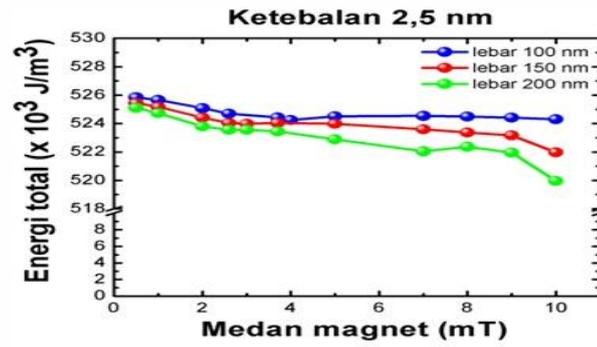
Gambar 4.7. Evolusi posisi domain-wall dalam material Ni (a) sebelum medan Walker breakdown ($B = 2 \text{ mT}$) dan (b) sesudah medan Walker breakdown ($B = 3 \text{ mT}$) untuk ketebalan 2,5 nm dan lebar 150 nm.

4.2 Analisis Energi Sistem

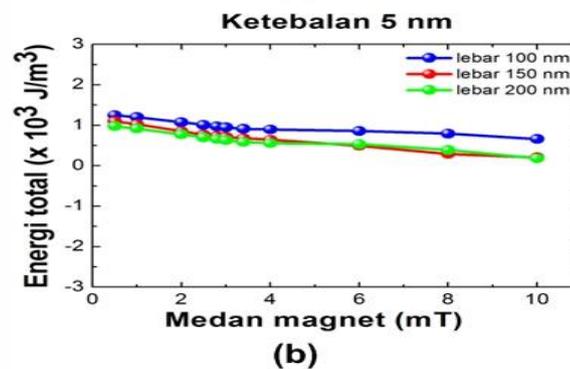
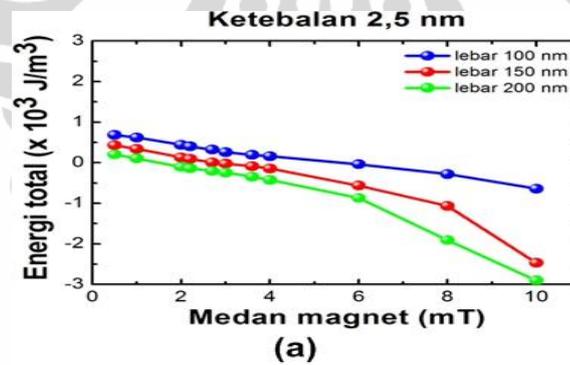
Pada bagian di atas telah dijelaskan secara detail kecepatan domain-wall dan struktur domain-wall pada kondisi sebelum dan sesudah medan Walker breakdown. Untuk mendukung hasil analisis kecepatan domain-wall dan struktur domain-wall pada nanowire, analisis energi pada nanowire juga dilakukan sebelum dan sesudah medan Walker breakdown. Secara umum, energi yang berkontribusi terdiri atas energi total, energi demagnetisasi, energi anisotropi, dan energi exchange sebagai fungsi waktu untuk setiap medan magnet luar yang diaplikasikan. Energi sistem untuk setiap medan magnet luar ditentukan pada kondisi relaksasi, yaitu ketika medan magnet luar mencapai waktu 1 ns.

Analisis pada energi sistem, pertama dilakukan adalah analisis energi total. Energi pada sistem direpresentasikan dalam energi per satuan volume pada ketebalan berbeda dengan variasi medan magnet luar, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.8 untuk material Co dan gambar 4.9 untuk material Ni. Energi total merupakan penjumlahan dari energi-energi yang berkontribusi pada sistem nanowire yaitu energi Zeeman, energi exchange, energi demagnetisasi, dan energi anisotropi. Pada gambar terlihat kerapatan energi total sebagai fungsi medan luar memperlihatkan meningkat dengan bertambahnya ketebalan. Bertambahnya volume nanowire, kerapatan energi totalnya akan bertambah. Tetapi, untuk nilai ketebalan tertentu, kerapatan energi total cenderung menurun dengan bertambahnya volume nanowire.

Kecenderungan ini dapat dijelaskan dari kontribusi kerapatan energi demagnetisasi yang bertambah dengan bertambahnya volume. Energi demagnetisasi berasal dari energi magnetostatik. Kontribusi *magnetic free pole* pada sistem nanowire akan mempengaruhi energi magnetostatik. Sehingga jelas, dengan bertambahnya volume akan bertambahnya energi magnetostatik yang mana kerapatan energi anisotropi dalam keadaan tetap. Maka kerapatan energi total akan menurun dengan bertambahnya volume [16].

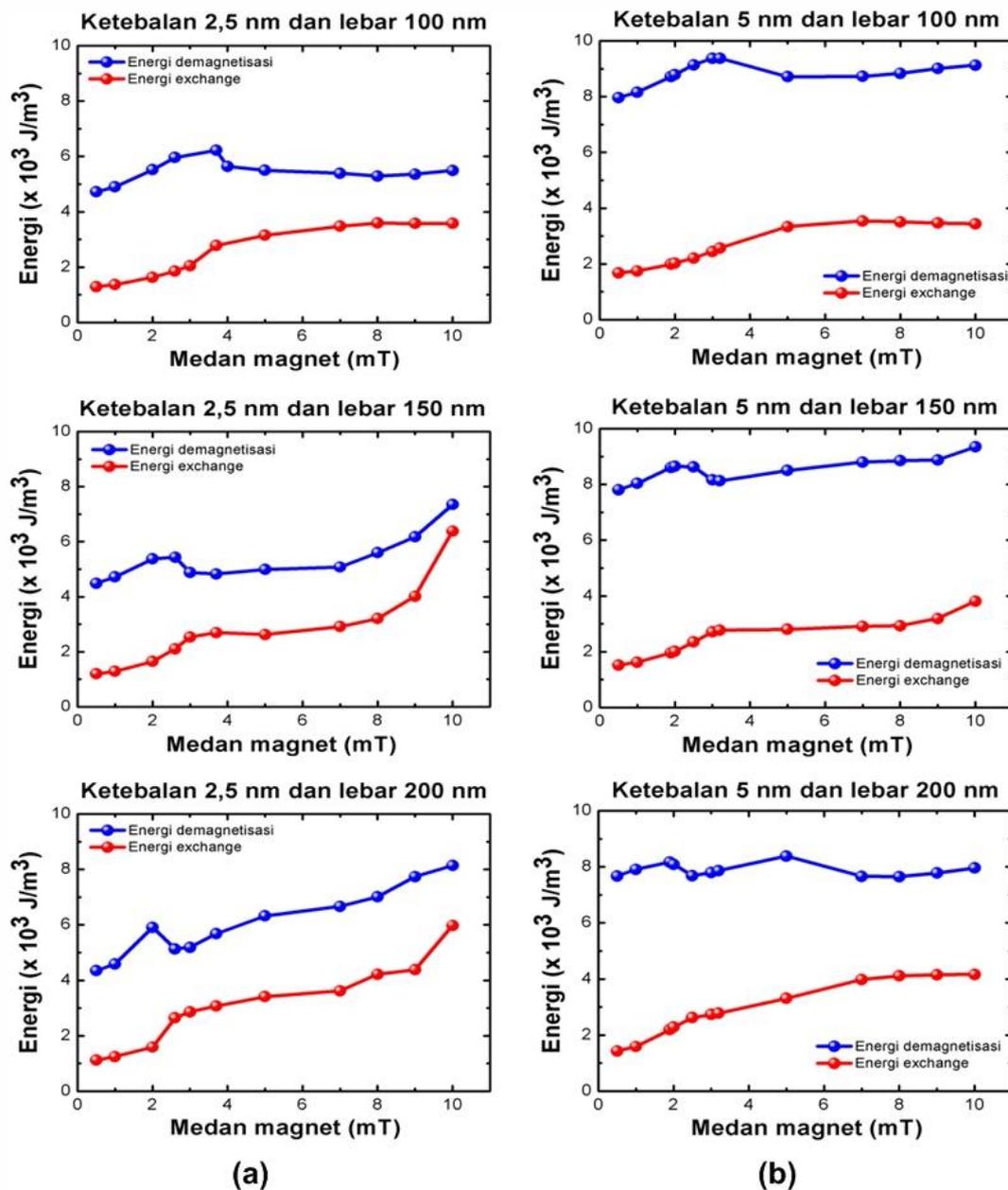


Gambar 4.8. Kurva kerapatan energi total fungsi medan magnet luar pada material Co untuk (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5,0 \text{ nm}$.

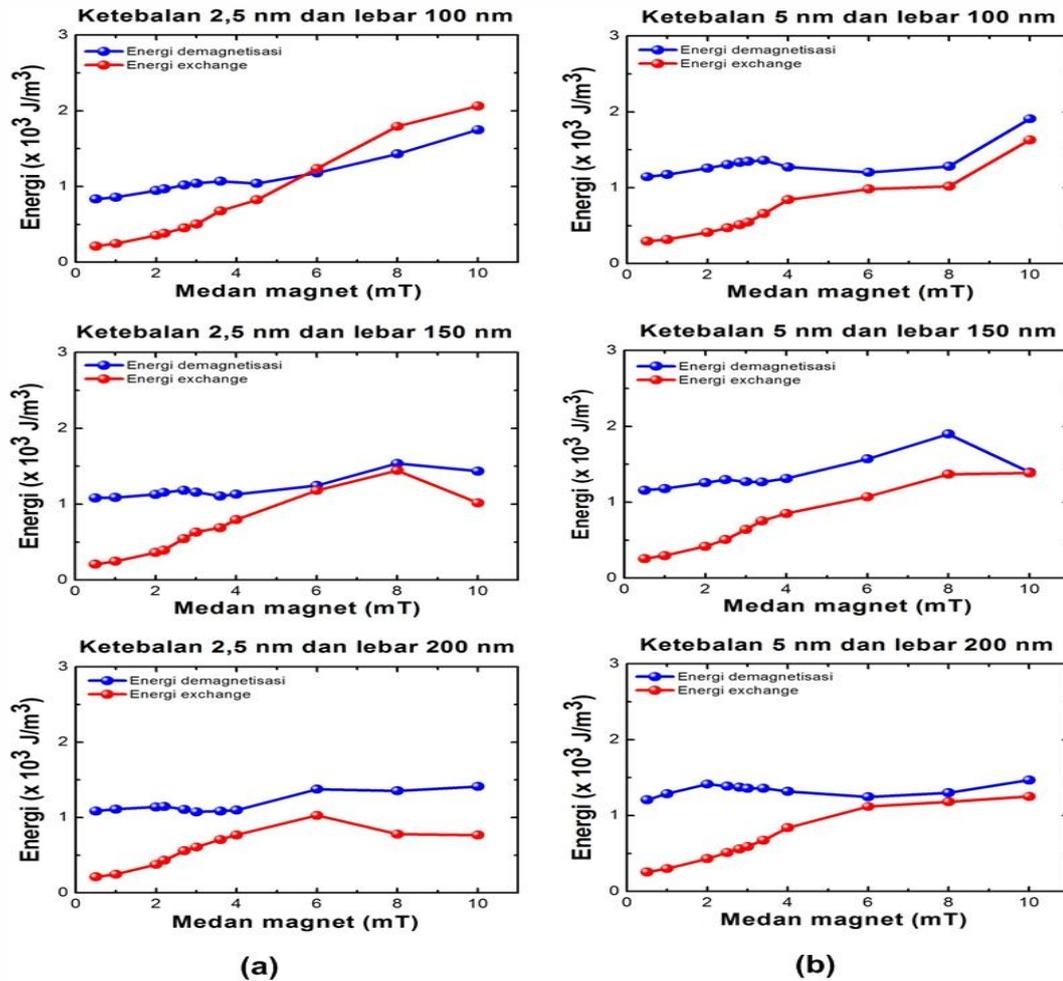


Gambar 4.9. Kurva kerapatan energi total fungsi medan magnet luar pada material Ni untuk (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5,0 \text{ nm}$.

Selain analisis kerapatan energi total sistem, penelitian ini juga menganalisis kerapatan energi exchange dan demagnetisasi yang berhubungan dengan struktur domain-wall pada nanowire sebelum dan sesudah Walker breakdown. Hasil analisis kerapatan energi demagnetisasi dan energi exchange memperlihatkan bahwa energi demagnetisasi lebih besar dibandingkan dengan kerapatan energi exchange untuk ketebalan berbeda sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.10 untuk material Co dan 4.11 untuk material Ni .



Gambar 4.10. Kurva kerapatan energi total fungsi medan magnet luar pada material Co untuk (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5,0 \text{ nm}$.

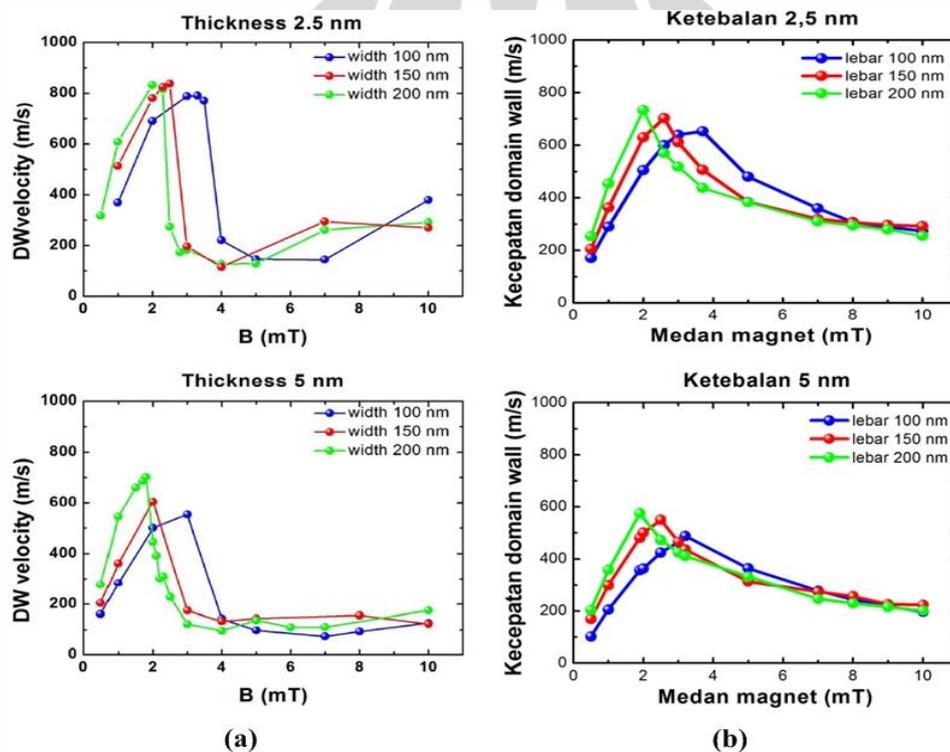


Gambar 4.11. Kurva kerapatan energi total fungsi medan magnet luar pada material Ni untuk (a) $t = 2,5 \text{ nm}$ dan (b) $t = 5,0 \text{ nm}$.

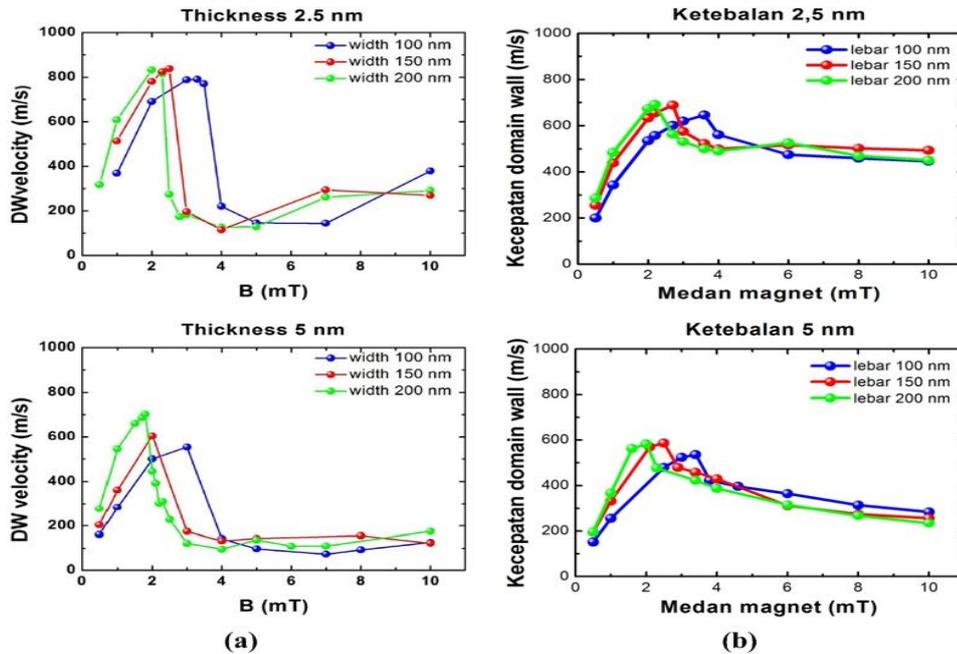
Sebelum medan Walker breakdown, kedua profil kerapatan energi memperlihatkan naik dengan bertambahnya medan magnet luar sampai mencapai medan Walker breakdown. Kemudian, kerapatan energi demagnetisasi terlihat menurun dan kerapatan energi exchange cenderung meningkat di sekitar medan Walker breakdown. Pengamatan ini dapat dimengerti bahwa pada kondisi sebelum Walker breakdown, struktur domain-wall memperlihatkan struktur transverse yang sebagaimana sudah dijelaskan sebelumnya bahwa *magnetic free pole* banyak memberikan kontribusi pada energi demagnetisasi. Kemudian berlahan-lahan energi demagnetisasi menurun dengan timbulnya struktur anti-vortex wall pada nanowire sesudah Walker breakdown. Timbulnya struktur anti-vortex wall terlihat meningkatnya energi exchange.

4.3 Efek Anisotropi pada Kecepatan dan Energi Domain-Wall

Material Co mempunyai struktur *hexagonal closed package* (hcp) yang mempunyai *easy axis crystalline* dalam arah [001] atau dikenal dengan *uniaxial anisotropy*. Untuk material Ni mempunyai struktur *face center cubic* (fcc) dengan *easy axis crystalline* pada arah [111] dan hard axis [100] atau dikenal juga *cubic anisotropy* [15]. Pada penelitian ini, efek anisotropi dari kedua material yaitu Co dan Ni dapat diperlihatkan pada profil kecepatan domain-wall sebagai fungsi medan magnet luar dibandingkan dengan material Permalloy, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.12 untuk Co dan 4.13 untuk Ni.



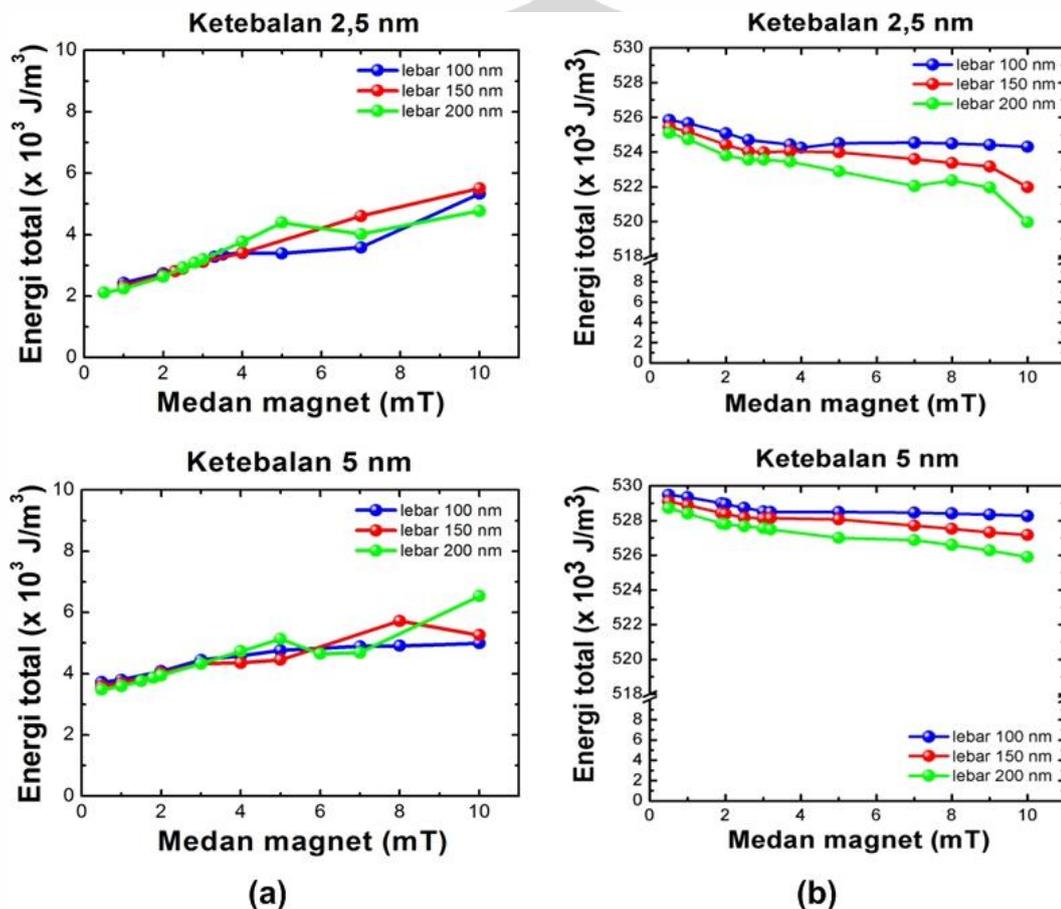
Gambar 4.12. Kurva kecepatan domain-wall fungsi medan magnet luar dengan tebal $t = 2,5 \text{ nm}$ dan $t = 5 \text{ nm}$ (a) material Py [29] (b) Material Co untuk variasi lebar w 100 nm, 150 nm, dan 200 nm.



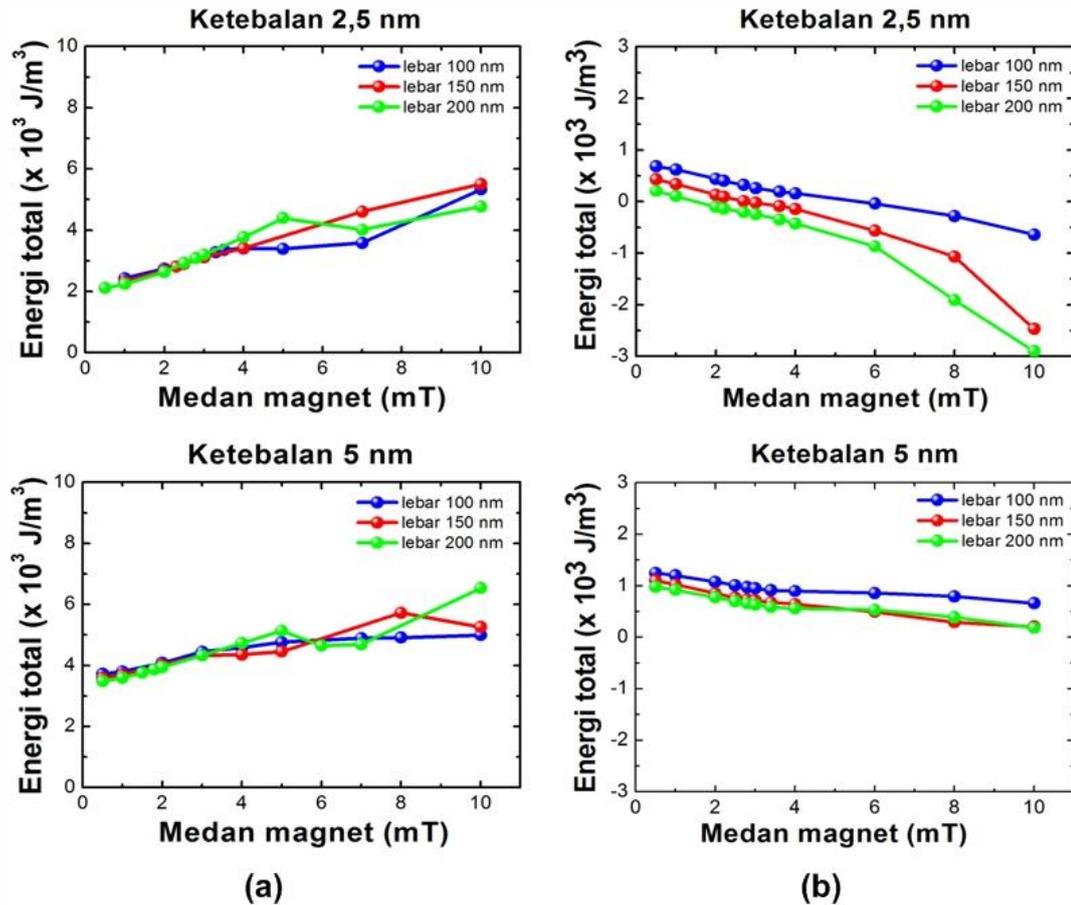
Gambar 4.13. Kurva kecepatan domain-wall fungsi medan magnet luar dengan tebal $t = 2,5 \text{ nm}$ dan $t = 5 \text{ nm}$ (a) material Py [29] (b) Material Ni untuk variasi lebar w 100 nm, 150 nm, dan 200 nm.

Dari kedua gambar di atas, profil kecepatan domain-wall fungsi medan magnet luar menurun secara landai untuk material Co dan Ni yang mana sangat berbeda yang diperlihatkan oleh material Py dimana kecepatan domain-wall menurun secara curam di sekitar Walker breakdown. Hal ini dapat dijelaskan dari sifat *easy axis* dan *hard axis* kedua material tersebut. Dalam simulasi medan magnet luar diaplikasikan dalam arah sumbu x atau arah [100] yang mana arah ini merupakan *hard axis* dalam kedua material diatas. Sehingga jelas sekali untuk mendorong domain-wall sepanjang nanowire dibutuhkan energi yang lebih besar dibandingkan material Permalloy. Akibatnya kecepatan domain wall bergerak lebih lambat dibandingkan dengan kecepatan domain wall pada material Py. Untuk kasus $t = 2.5 \text{ nm}$, kecepatan domain wall mencapai sekitar 800 m/s untuk Py sedangkan untuk Co dan Ni mencapai 700 m/s (Gambar 4.12(b)). Untuk $t = 5,0 \text{ nm}$, kecepatan domain-wall mencapai 700 m/s untuk Py sedangkan untuk Co dan Ni sekitar 600 m/s (Gambar 4.13(b)).

Efek anisotropi juga terlihat jelas pada profil kerapatan energi total sebagai fungsi medan magnet luar. Untuk material Co, kerapatan energi total sangat besar dibandingkan dengan material Py. Kerapatan energi total yang besar ini berasal dari nilai konstanta anisotropi Co yang bernilai positif ($K > 0$). Makin bertambah volume, energi total makin bertambah besar. Hal yang berbeda, diperlihatkan pada material Ni, kerapatan energi cenderung menurun dibandingkan dengan material Py. Hal ini disebabkan dari nilai konstanta anisotropi dari Ni bernilai negatif ($K < 0$), seperti ditunjukkan pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.15.



Gambar 4.14. Kurva kerapatan energi total fungsi medan magnet luar (a) material Py [29] dan (b) material Co untuk $t = 2,5 \text{ nm}$ dan $t = 5,0 \text{ nm}$.



Gambar 4.15. Kurva kerapatan energi total fungsi medan magnet luar (a) material Py [29] dan (b) material Ni untuk $t = 2,5 \text{ nm}$ dan $t = 5,0 \text{ nm}$.

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini telah dilakukan secara sistematis pada “dinamika domain wall dan efek anisotropi material ferromagnet Co dan Ni berbentuk nanowire” dengan menggunakan simulasi micromagnetic berdasarkan persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert. Simulasi micromagnetic menggunakan program publik bernama OOMMF dengan material Cobalt (Co) dan Nickel (Ni).

Analisis kecepatan domain-wall pada nanowire sebagai fungsi medan luar meningkat secara linier sebelum Walker breakdown dan tiba-tiba menurun sesudah Walker breakdown. Medan Walker breakdown menurun dengan bertambahnya tebal dan lebar. Struktur domain-wall memperlihatkan struktur tranverse sebelum Walker breakdown dan struktur vortex/anti-vortex sesudah Walker breakdown.

Kemudian, analisis energi memperlihatkan sebelum Walker breakdown, struktur domain-wall berbentuk transverse-wall dengan energi demagnetisasi meningkat dengan bertambahnya medan magnet luar. Struktur vortex/anti-vortex wall timbul setelah Walker breakdown ditandai dengan peningkatan energi exchange di sekitar Walker breakdown.

Efek anisotropi dari material Co dan Ni terlihat jelas pada profil kecepatan domain-wall pada nanowire fungsi medan magnet luar dibandingkan material Py. Kecepatan domain-wall pada material Co dan Ni disekitar Walker breakdown menurun tidak drastis dibandingkan material Py.

5.2 Saran-Saran

Saran-saran menurut penulis yang perlu dilakukan ke depan adalah pertama variasi tebal dan lebar agar dapat dihasilkan diagram fase untuk struktur domain-wall untuk Co dan Ni sebagaimana telah dilakukan secara sistematis oleh Nakatani et al pada material Py [5]. Kedua, efek depinning juga perlu dipertimbangkan seperti pemberian halangan (*constriction*) berupa notch atau anti-notch untuk mengontrol kecepatan domain wall pada nanowire [30].

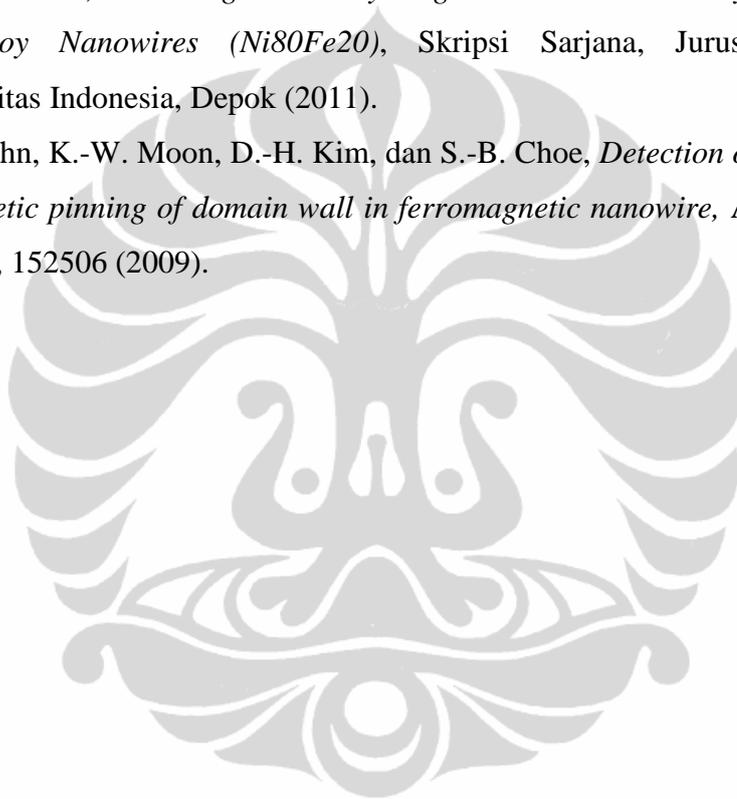


DAFTAR REFERENSI

- [1] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, dan F. Petroff, *Giant magnetoresistance of Fe/Cr magnetic superlattices*, Phys. Rev. Lett. **61**, 2472 (1988).
- [2] G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, dan W. Zinn, *Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange*, Phys. Rev B **39**, 4828 (1989).
- [3] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, *Magnetic domain wall racetrack memory*, Science **320**, 190 (2008).
- [4] S. A. Wolf, et al. *Spintronics: a spin based electronics vision for the future*, Science **294**, 1488 (2001).
- [5] Y. Nakatani, A. Thiaville, dan J. Miltat, *Head to head domain walls in soft nano-strips: a refined phase diagram*, J. Magn. Magn Mater. **290**, 750 (2005).
- [6] D. Djuhana, H.-G. Piao, J.-H. Shim, S.-H. Lee, S.-M. Ahn, dan D.-H. Kim, *Interaction of antiparallel transverse domain walls in ferromagnetic nanowires*, J.Nanosci. Nanotechnol. **11**, 6237-6240 (2011).
- [7] G. S. D. Beach, C. Knutson, M. Tsoi, dan J. L. Erskine, *Field- and current-driven domain wall dynamics: an experimental picture*, J. Magn. Magn. Mater. **310**, 2038 (2006).
- [8] D. Djuhana, H.-G. Piao, S.-C. Yu, S. K. Oh, dan D.-H. Kim, *Magnetic Domain Wall Collision Around Walker Breakdown in Ferromagnetic Nanowires*, J. Appl. Phys. **106**, 103926 (2009).
- [9] A. Thiaville, Y. Nakatani, J. Miltat, dan N. Vernier, *Domain wall motion by spin-polarized current: a micromagnetic study*, J. Appl. Phys. **95**, 7049 (2004).
- [10] J. -Y. Lee, K. -S. Lee, S. Choi, K. Y. Guslienko, dan S. -K. Kim, *Dynamic transformations of the internal structure of a moving domain wall in magnetic nanostripes*, Phys. Rev. B **76**, 184408 (2007).

- [11] R. D. Michael dan M. J. Donahue, *Head to head domain wall structures in thin magnetic strips*, IEEE Trans. Magn. **33**, 4167, (1997).
- [12] P. Weiss, *Hypothesis of molecular field and ferromagnetic properties*, J. Phys. **4**, 661 (1907).
- [13] F. Bloch, *Theory of exchange problem and remanence phenomena of ferromagnetic substances*, Zeitschrift für Physik **74**, 295 (1932).
- [14] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics 8th*, John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [15] Mathias Getzlaff, *Fundamentals of Magnetism*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [16] S. Chikazumi and S. H. Charap, *Physics of Magnetism*, John Wiley & Sons, Inc, 1964.
- [17] A. Hubert dan R. Schäfer, *Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructure*, Springer, Berlin, 2009.
- [18] J. Stöhr and H. C. Siegmann, *Magnetism from Fundamental to Nanoscale Dynamics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [19] L. Landau dan E. Lifshitz, *On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies*, Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion **8**, 153 (1935).
- [20] T. L. Gilbert, *A Lagrangian formulation of the gyromagnetic equation of the magnetic field*, Phys. Rev. **100**, 1243 (1955).
- [21] M. J. Donahue dan D. G. Porter, *OOMMF User's Guide*, <http://math.nist.gov/oommf> (2002).
- [22] T. L. Gilbert, *Phenomenological theory of damping in ferromagnetic materials*, IEEE Trans. Magn. **40**, 3443 (2004).
- [23] G. Bertotti, *Hysteresis in Magnetism*, Academic Press, San Diego, CA, USA, 1998.
- [24] A. Thiaville, J. M. García, dan J. Miltat, *Domain wall dynamics in nanowires*, J. Magn. Magn. Mater. **242**, 1061 (2002).
- [25] N. Han, G. Guo, L. Zhang, G. Zhang, dan W. Zong, *Magnetization reversal for Ni wires studied by micromagnetic simulations*, J. Mater. Sci. Technol. **25**, 2 (2009).

- [26] M. Hayashi, L. Thomas, C. Rettner, R. Moriya, dan S. S. P. Parkin, *Direct observation of the coherent precession of magnetic domain walls propagating along permalloy nanowires*, Nature Phys. **3**, 21 (2007).
- [27] D.A. Allwood, G. Xiong, C. C. Faulker, D. Atkinson, D. Petit, dan R. P. Cowburn, *Magnetic domain-wall logic*, Science **309**, 1688 (2005).
- [28] N. L. Schryer dan L. R. Walker, *The motion of 180° domain walls in uniform dc magnetic fields*, J. Appl. Phys. **45**, 5406 (1974).
- [29] Andy Sumarta, *Micromagnetic Study magnetic Domain Wall Dynamics on Permalloy Nanowires ($Ni_{80}Fe_{20}$)*, Skripsi Sarjana, Jurusan Fisika Universitas Indonesia, Depok (2011).
- [30] S.-M. Ahn, K.-W. Moon, D.-H. Kim, dan S.-B. Choe, *Detection of the static and kinetic pinning of domain wall in ferromagnetic nanowire*, Appl. Phys. Lett. **95**, 152506 (2009).



Lampiran 1

```

#MIF 2.1
# Simulation DW dynamics Pulsed-Field
# Material      : Cobalt Nanowire
# Mahasiswa    : Mardona
# Supervisor   : Dr. Dede Djuhana
# Tanggal      : 10 Januari 2012
#####

set pi [expr 4*atan(1.0)]
set mu0 [expr 4*$pi*1e-7]

## Luas
Specify Oxs_BoxAtlas:atlas {
  xrange {0 2000e-9}
  yrange {0 100e-9}
  zrange {0 2.5e-9}
}

Specify Oxs_RectangularMesh:mesh {
  cellsize {5e-9 5e-9 2.5e-9}
  atlas :atlas
}

Specify Oxs_UniaxialAnisotropy {
  K1 520e3
  axis {0 0 1}
}

Specify Oxs_UniformExchange:Co {
  A 30e-12
}

Specify Oxs_ScriptUZeeman {
  script_args total_time
  script PulseField
}

proc PulseField { total_time } {
  set pi [expr 4*atan(1.0)]
  set mu0 [expr 4*$pi*1e-7]
  set multiplier [expr 0.001/$mu0]
  set Amp [expr 10.0*$multiplier]
  if { $total_time <= 5.0e-9 } {
    set Hx [expr $Amp*0.0 ]
    return [list $Hx 0 0 0 0 0]
  }
}

```

```

} elseif { $total_time > 5.0e-9 && $total_time <= 5.1e-9 } {
    set Hx [expr $Amp ]
    set Hx [expr {($total_time*(1e9) - 5.0) *$Amp + 0}]
    set dHx [expr {(1e9)*$Amp}]
    return [list $Hx 0 0 $dHx 0 0 ]
} elseif { $total_time >= 5.1e-9 && $total_time < 6.1e-9 } {
    set Hx [expr $Amp ]
    set Hx [expr {((5.1e-9)*(1e9) - 5.0) *$Amp + 0}]
    return [list $Hx 0 0 0 0 0]
} elseif { $total_time >= 6.1e-9 && $total_time < 6.2e-9 } {
    set Hx [expr $Amp ]
    set Hx [expr {((5.1e-9)*(1e9) - 5.0) *$Amp +
($total_time*(1e9)-6.1) *$Amp*(-1) + 0}]
    set dHx [expr { (-1e9)*$Amp }]
    return [list $Hx 0 0 $dHx 0 0]
} elseif { $total_time >6.2e-9 } {
    return [list 0 0 0 0 0 0]
} else {
    return "0 0 0 0 0 0"
}
}

```

```

Specify Oxs_Demag {}
Specify Oxs_EulerEvolve {
    alpha 0.01
    start_dm 0.01
}

```

```

Specify Oxs_TimeDriver {
    basename Co-wire
    evolver Oxs_EulerEvolve
    stopping_dm_dt 1.0
    mesh :mesh
    stage_count 0
    stage_iteration_limit 0
    total_iteration_limit 0
}

```

```

Ms { Oxs_UniformScalarField {
    value 1400e3
}
}

```

```

m0 { Oxs_ScriptVectorField {
    atlas :atlas
    script HeadToHead
    norm 1.0
}
}

```

```
}  
  
proc HeadToHead { x y z } {  
  set centerpt 0.50  
  set mx [expr {-1*tanh(6.0*($x-$centerpt)/double(0.5*$centerpt))}]  
  set my [expr {sqrt(1.0-$mx*$mx)}]  
  set mz 0.01 ;  
  return [list $mx $my $mz]  
}
```



Lampiran 2

```

#MIF 2.1
# Simulation DW dynamics Pulsed-Field
# Material      : Nickel Nanowire
# Mahasiswa    : Mardona
# Supervisor   : Dr. Dede Djuhana
# Tanggal      : 10 Januari 2012
#####

set pi [expr 4*atan(1.0)]
set mu0 [expr 4*$pi*1e-7]

## Luas
Specify Oxs_BoxAtlas:atlas {
  xrange {0 2000e-9}
  yrange {0 100e-9}
  zrange {0 5e-9}
}

Specify Oxs_RectangularMesh:mesh {
  cellsize {5e-9 5e-9 5e-9}
  atlas :atlas
}

Specify Oxs_CubicAnisotropy {
  K1 -5.7e3
  axis1 {1 0 0}
  axis2 {0 1 0}
}

Specify Oxs_UniformExchange:Ni {
  A 9.0e-12
}

Specify Oxs_ScriptUZeeman {
  script_args total_time
  script PulseField
}

proc PulseField { total_time } {
  set pi [expr 4*atan(1.0)]
  set mu0 [expr 4*$pi*1e-7]
  set multiplier [expr 0.001/$mu0]
  set Amp [expr 10.0*$multiplier]

```

```

if { $total_time <= 5.0e-9 } {
    set Hx [expr $Amp*0.0 ]
    return [list $Hx 0 0 0 0 0]
} elseif { $total_time > 5.0e-9 && $total_time <= 5.1e-9 } {
    set Hx [expr $Amp ]
    set Hx [expr {($total_time*(1e9) - 5.0) *$Amp + 0}]
    set dHx [expr {(1e9)*$Amp}]
    return [list $Hx 0 0 $dHx 0 0 ]
} elseif { $total_time >= 5.1e-9 && $total_time < 6.1e-9 } {
    set Hx [expr $Amp ]
    set Hx [expr {((5.1e-9)*(1e9) - 5.0) *$Amp + 0}]
    return [list $Hx 0 0 0 0 0]
} elseif { $total_time >= 6.1e-9 && $total_time < 6.2e-9 } {
    set Hx [expr $Amp ]
    set Hx [expr {((5.1e-9)*(1e9) - 5.0) *$Amp +
($total_time*(1e9)-6.1) *$Amp*(-1) + 0}]
    set dHx [expr { (-1e9)*$Amp }]
    return [list $Hx 0 0 $dHx 0 0]
} elseif { $total_time >6.2e-9 } {
    return [list 0 0 0 0 0 0]
} else {
    return "0 0 0 0 0 0"
}
}
}

```

```

Specify Oxs_Demag {}
Specify Oxs_EulerEvolve {
    alpha 0.01
    start_dm 0.01
}

```

```

Specify Oxs_TimeDriver {
    basename Ni-wire
    evolver Oxs_EulerEvolve
    stopping_dm_dt 1.0
    mesh :mesh
    stage_count 0
    stage_iteration_limit 0
    total_iteration_limit 0
}

```

```

Ms { Oxs_UniformScalarField {
    value 490e3
}
}

```

```
m0 { Oxs_ScriptVectorField {  
    atlas :atlas  
    script HeadToHead  
    norm 1.0  
}  
}  
}  
  
proc HeadToHead { x y z } {  
    set centerpt 0.50  
    set mx [expr {-1*tanh(6.0*($x-$centerpt)/double(0.5*$centerpt))}]  
    set my [expr {sqrt(1.0-$mx*$mx)}]  
    set mz 0.01 ;  
    return [list $mx $my $mz]  
}
```