

**ANALISIS PROSES *DEPINNING* DINDING DOMAIN PADA MATERIAL
NANOWIRE CoFeB MENGGUNAKAN PENDEKATAN
MIKROMAGNETIK**

(Skripsi)

Oleh

WINDA RULIA SAFITRI

2117041029



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ANALISIS PROSES *DEPINNING* DINDING DOMAIN PADA MATERIAL *NANOWIRE* CoFeB MENGGUNAKAN PENDEKATAN MIKROMAGNETIK

Oleh

Winda Rulia Safitri

Dalam aplikasi divais berbasis dinding domain (DW), kontrol posisi DW di dalam perangkat menjadi faktor yang sangat penting. Dalam penelitian ini dianalisis proses depinning dinding domain pada struktur kawat nano berbentuk tangga melalui metode simulasi mikromagnetik berdasarkan persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG). Untuk menggerakkan DW pada berbagai posisi di dalam kawat nano magnetik, dilakukan injeksi pulsa arus listrik, dengan memvariasikan lebar tangga serta lebar kawat nano itu sendiri. Hasil simulasi menunjukkan semakin besar lebar tangga, semakin kecil arus yang dibutuhkan untuk melepaskan DW dari posisi pinning atau penjepit-nya. Sebaliknya, peningkatan lebar kawat nano (W) justru menyebabkan nilai J_d meningkat. Selain itu, variasi konstanta non-adiabatik (β) umumnya tidak memberikan dampak signifikan terhadap nilai J_d , kecuali pada kawat nano dengan lebar 150 nm, di mana fluktuasi J_d terlihat lebih mencolok dibandingkan pada $W = 50$ nm dan 100 nm. Energi depinning yang dihitung saat pulsa arus masih aktif meningkat seiring bertambahnya nilai s , namun saat pulsa arus dihentikan, energi ini justru menurun pada lebar kawat nano 50 nm dan relatif stabil untuk $W = 100$ dan 150 nm.

Keywords: CoFeB; dinding domain; mikromagnetik; kawat nano; pinning, depinning.

ABSTRACT

Analysis of the Domain Depinning Process on CoFeB Nanowire Materials Using a Micromagnetic Approach

By

Winda Rulia Safitri

In domain wall (DW)-based device applications, DW position control within the device is a very important factor. In this study, the depinning process of domain walls in ladder-shaped nanowire structures was analyzed using a micromagnetic simulation method based on the Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation. To move the DW to various positions within the magnetic nano-wire, an electric current pulse is injected, varying the width of the staircase and the width of the nano-wire itself. Simulation results show that as the staircase width increases, the current required to release the DW from its pinned or clamped position decreases. Conversely, increasing the width of the nanowire (W) causes the J_d value to increase. Additionally, variations in the non-adiabatic constant (β) generally do not significantly affect the J_d value, except for the 150 nm wide nanowire, where J_d fluctuations are more pronounced compared to $W = 50$ nm and $W = 100$ nm. The depinning energy calculated while the current pulse is active increases with increasing s values, but when the current pulse is stopped, this energy decreases for a nanowire width of 50 nm and remains relatively stable for $W = 100$ and 150 nm.

Keywords: CoFeB; domain wall; micromagnetics; *nanowire*; pinning, depinning.

**ANALISIS PROSES DEPINNING DINDING DOMAIN PADA MATERIAL
NANOWIRE CoFeB MENGGUNAKAN PENDEKATAN
MIKROMAGNETIK**

Oleh

WINDA RULIA SAFITRI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

Jurusan Fisika

**Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

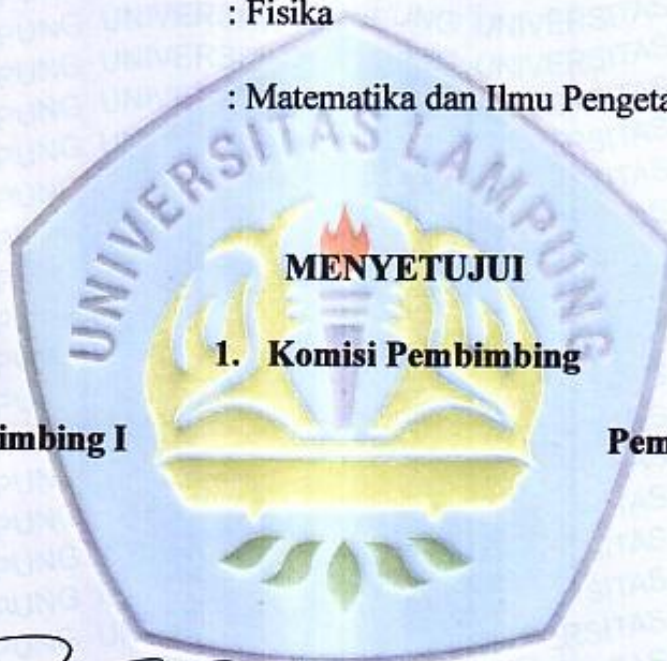
Judul Skripsi : Analisis Proses Depinning Dinding Domain Pada
Material Nanowire CoFeB Menggunakan
Pendekatan Mikromagnetik

Nama Mahasiswa : Winda Rufia Safitri

Nomor Pokok Mahasiswa : 2117041029

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

A black ink signature of Prof. Posman Manurung.

Prof. Posman Manurung, M.Si., Ph.D.
NIP. 195903081991031001

A blue ink signature of Dr. Candra Kurniawan.

Dr. Candra Kurniawan, M.Si.
NIP. 198810032010121003

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

A black ink signature of Arif Surtono.

Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP. 197109092000121001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Prof. Posman Manurung, M.Si., Ph.D.

Sekretaris

: Dr. Candra Kurniawan, M.Si.

Penguji Bukan
Pembimbing

: Suprihatin, S.Si., M.Si.

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 18 Juli 2025



PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Winda Rulia Safitri
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117041029
Jurusan : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya dengan judul **“Analisis Proses Depinning Dinding Domain pada Material Nanowire CoFeB menggunakan Pendekatan Mikromagnetik”** adalah hasil karya saya sendiri, baik ide, hasil maupun analisisnya. Selanjutnya saya tidak keberatan jika Sebagian atau keseluruhan data di dalam skripsi digunaka oleh dosen atau program studi dalam kepentingan publikasi atas persetujuan penulis dan sepanjang nama saya disebutkan sebelum dilakukan publikasi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran untuk dapat digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 18 Juli 2025

Yang Menyatakan,



Winda Rulia Safitri
NPM. 2117041029

RIWAYAT HIDUP



Winda Rulia Safitri lahir di Lampung Tengah pada tanggal 11 Juli 2003. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara, putri dari pasangan Bapak Mohamad Ali dan Ibu Nur Amnah. Pendidikan menengah atas diselesaikannya di SMA Negeri 1 Seputih Surabaya pada tahun 2020. Pada tahun 2021, Penulis melanjutkan pendidikan tinggi dan diterima sebagai mahasiswa pada Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Selama menempuh pendidikan di jenjang sarjana, penulis aktif dalam berbagai kegiatan organisasi, baik di dalam maupun di luar lingkungan kampus. Pada tahun 2021, penulis bergabung dengan Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) FMIPA Universitas Lampung sebagai anggota Bidang Sosial Masyarakat, dengan salah satu peran strategis sebagai Sekretaris I dalam Musyawarah Nasional (MUNAS) Ikatan Himpunan Mahasiswa Fisika Indonesia (IHMAFI) tahun 2023. Pada tahun 2022, penulis juga aktif sebagai anggota Bidang Kaderisasi Unit Kegiatan Mahasiswa Penelitian (UKMP) Universitas Lampung. Selain itu, pada tahun 2021, penulis mengikuti program magang sebagai anggota di bidang Rohani Islam (ROHIS) FMIPA Universitas Lampung.

Di luar lingkungan akademik, penulis turut berkontribusi dalam kegiatan sosial masyarakat sebagai Bendahara Karang Taruna Desa Mataram Ilir sejak tahun 2024 hingga saat ini, dengan tanggung jawab utama dalam pengelolaan anggaran serta pelaksanaan berbagai kegiatan berskala desa.

Selain aktivitas organisasi, penulis memiliki beberapa pengalaman kerja, antara lain: Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Pusat Riset Material Maju (PRMM), Badan

Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kawasan Sains dan Teknologi BJ Habibie, Tangerang Selatan, pada tahun 2024; menjadi pekerja lepas (*freelancer*) dalam pelaksanaan survei opini publik pada beberapa lembaga survei; serta sebagai Koordinator Lapangan dalam penyelenggaraan Pemilihan Kepala Daerah (Pilkada) tahun 2024.

Dalam penyusunan tugas akhir, penulis memilih untuk mendalami bidang fisika material, dengan fokus penelitian pada topik “**Analisis Proses Depinning Dinding Domain pada Material *Nanowire* CoFeB menggunakan Pendekatan Mikromagnetik**”.

MOTTO

*“I’m standing at the edge of a cliff. I’m afraid but if I keep trembling in fear,
I’ll never be able to take that one step forward”- RM 방탄소년단*

“Tidak ada yang bisa diwariskan kecuali Pendidikan”

-ibu-

"Aku Memilih Untuk Menang"

- Winda Rulia Safitri -

PERSEMBAHAN

**Dengan penuh rasa syukur, cinta, dan mengharapkan ridho Allah SWT dan
syafaat Nabi Muhammad SAW**

Karya ini saya persembahkan untuk Ayahanda dan Ibunda tercinta

Mohammad Ali & Nur Amnah

yang slalu memberikan dukungan, Doa, dan Kasih Sayang

Saudara/i tercinta

Amri Madarani & Dea Ika Putri

yang slalu memberikan semangat dan kekuatan

Keluarga besar dan terkhusus teman-teman Angkatan 2021

Jurusan Fisika FMIPA UNILA

atas kebersamaan dan dukungan selama perkuliahan

serta Almamater Tercinta

Universitas Lampung

Tempat saya menimba ilmu dan mengembangkan diri

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang dilakukan di Lab Pusat Riset Material Maju, KST BJ Habibie, BRIN Serpong dengan judul **“Analisis Proses Depinning Dinding Domain pada Material Nanowire CoFeB Menggunakan Pendekatan Mikromagnetik”**. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini masih memiliki keterbatasan dan kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan masukan berupa kritik dan saran yang membangun sebagai upaya perbaikan di masa mendatang. Besar harapan penulis, karya ini dapat memberikan manfaat serta menjadi referensi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang simulasi mikromagnetik, dan menjadi pijakan awal bagi penelitian lebih lanjut.

Bandar Lampung, 18 Juli 2025

Winda Rulia Safitri
NPM. 2117041029

SANWACANA

Puji Syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-nya, sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul **“Analisis Proses Depinning Dinding Domain pada Material Nanowire CoFeB menggunakan Pendekatan Mikromagnetik”**. Skripsi ini dapat diselesaikan berkat dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Dengan penuh rasa hormat dan rendah hati, saya ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., P.hD., sebagai Dosen Pembimbing I, yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan dorongan selama menyusun skripsi ini.
2. Bapak Dr. Candra Kurniawan, M.Si., sebagai Dosen Pembimbing II, yang telah membantu, memberikan arahan, bimbingan, dan saran untuk penulis dalam melakukan penelitian hingga penyusunan skripsi ini.
3. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si., sebagai Dosen Pembahas, yang telah memberikan arahan, kritikan, saran, dan dukungan selama penulis mengerjakan skripsi ini.
4. Orangtua Penulis, Bapak Mohammad Ali, Ibu Nur Amnah, yang telah memberikan kasih sayang, doa, dan dukungan tanpa henti sepanjang perjalanan hidup dan pendidikan penulis. tantangan dan mencapai apa yang penulis capai saat ini. Semoga segala kebaikan dan pengorbanan beliau mendapatkan balasan yang setimpal dari Allah SWT.
5. Saudara Penulis, Kakak Amri Madarani dan Adik Dea Ika Putri, yang telah menjadi sumber inspirasi, dukungan, dan semangat dalam perjalanan hidup dan pendidikan penulis.
6. Kak Maria Ampimpyenan Metantomwate, Kak Muhammad Fauzi, Kak Amdy Fachredzy dan Kak Muhammad Alif Hamzah Nabawi, selaku *Research Assistant* di Pusat Riset Material Maju, BRIN Serpong, atas bimbingan, bantuan teknis, serta arahan yang telah diberikan selama pelaksanaan penelitian.

7. Kak Gabriela Christenvia Wanta, yang telah menjadi teman diskusi yang sangat membantu selama proses penelitian dan penyusunan karya ini. Terima kasih atas waktu, ide, serta pandangan yang turut memperluas wawasan dan memperkuat pemahaman penulis.
8. Ucapan terima kasih yang tulus saya sampaikan kepada sahabat-sahabat terbaik yang senantiasa menjadi tempat berbagi tawa dan cerita, baik di rumah, di lingkungan organisasi, maupun di jurusan. Kehadiran kalian tidak hanya menjadi penyemangat di tengah tekanan, tetapi juga menjadi pengingat bahwa perjalanan ini tidak pernah benar-benar saya lalui seorang diri. Dukungan, canda, hingga diskusi sederhana yang kalian berikan telah menjadi bagian penting dalam proses ini. Semoga kebersamaan yang terjalin tetap erat dan menjadi kenangan indah yang terus hidup dalam ingatan.

Bandar Lampung, 18 Juli 2025

Winda Rulia Safitri

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR	xvi
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Ferromagnetik	6
2.2 Domain dan Dinding Domain Magnetik.....	8
2.3 Bloch Wall dan Neel Wall	9
2.4 Memori Magnetik.....	11
2.5 Walker Breakdown.....	13
2.6 Material CoFeB	15
2.7 Mikromagnetik.....	17
III. METODE PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat.....	21
3.2 Alat dan Bahan.....	21
3.3 Prosedur Penelitian.....	22
3.3.1 Instalasi OOMMF	23
3.3.2 Sistem Mikromagnetik.....	23
3.3.3 Simulasi Mikromagnetik.....	24
3.3.4 Analisis Hasil	26
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	27
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	

4.1. Fenomena pinning dan depinning nanowire dengan variasi lebar ...	29
4.2. Variasi jarak lebar tangga terhadap arus depinning dinding domain dibandingkan dengan variasi lebar nanowire.....	31
4.3. Evolusi dinding domain dibandingkan dengan variasi lebar tangga dan lebar nanowire.....	33
4.4. Analisis energi depinning dinding domain.....	34
V. KESIMPULAN	
5.1. Kesimpulan	37
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Sistematis atom dalam ferrromagnetik	6
2.2 Skema elektron ferromagnetik	7
2.3 Domain wall	8
2.4 Struktur dinding domain 180°	9
2.5 Distribusi bloch wall dan neel wall	10
2.6 Racetracks Memory	12
2.7 Gerak walker breakdown	14
2.8 Sketsa kecepatan dinding domain	15
2.9 Struktur Material CoFeB	16
3.1 Model nanostrip PMA CoFeB dengan variasi jarak lebar tangga (s) dan lebar nanowire (W) yang digunakan dalam simulasi mikromagnetik untuk menyelidiki pinning dan depinning DW	25
3.2 Diagram Alir Penelitian	27
4.1 Profil propagasi DW yang sesuai dengan M_z/M_s seiring bertambahnya waktu pada lebar (W) sebesar 50 - 100 nm dan $\beta =$ 0, (a) $W = 50$ nm, (b) $W = 100$ nm, dan (c) $W = 150$ nm	29
4.2 Profil rapat arus listrik dibandingkan depinning (J_d) dibandingkan dengan perubahan lebar nanowire W dan jarak lebar tangga s, (a) variasi W dan (b) variasi	32

4.3 Evolusi Struktur DW terkait dengan kondisi pinning dan depinning pada pulsa arus listrik dengan variasi lebar tangga (s), (a) $W = 50$ nm, (b) $W = 100$ nm, dan (c) 150 nm	35
4.4 Profil energi DW pada kondisi depinning dibandingkan dengan perubahan jarak lebar tangga s dan waktu simulasi t dengan variasi ukuran nanowire $W = 50 - 150$ nm.....	38
4.5 Profil energi DW pada kondisi depinning dibandingkan dengan perubahan jarak lebar tangga s nanowire dan waktu simulasi t dengan variasi $\beta = 0 - 0.04$	41
4.6 Profil energi DW pada kondisi depinning dibandingkan dengan perubahan lebar nanowire W terkait penambahan jarak lebar tangga s dengan waktu simulasi 2 ns	43

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Akhir-akhir ini, perkembangan teknologi perangkat elektronik semakin mengarah pada kebutuhan akan ukuran yang lebih kecil, lebih efisien, dan lebih cepat. Salah satu tonggak penting dalam evolusi ini adalah penemuan *Giant Magnetoresistance* (GMR) pada tahun 1988 oleh Peter Grünberg dari Jerman (Binasch et al., 1989) dan Albert Fert dari Prancis (Baibich et al., 1988). Atas kontribusi fundamental tersebut, keduanya menerima penghargaan Nobel di bidang Fisika pada tahun 2007 (Thompson, 2008). Penemuan GMR telah memberikan dampak terhadap teknologi penyimpanan data, sekaligus mendorong lahirnya disiplin baru dalam fisika material yang dikenal sebagai spintronika, bidang yang mengeksplorasi manipulasi spin elektron, selain muatan listrik, sebagai basis kerja perangkat elektronik (Zutic et al., 2004; Wolf et al., 2001).

Salah satu aplikasi penting dari efek GMR adalah pada sensor pembaca (*read head*) dalam perangkat *Hard Disk Drive* (HDD), yang memungkinkan peningkatan signifikan dalam kepadatan dan kecepatan pembacaan data (Daughton, 1999). Keterbatasan dalam HDD menjadi pendorong utama untuk penelitian lebih lanjut dalam fenomena berbasis spin, yang mengarah pada pengembangan berbagai perangkat spintronik canggih. Beberapa diantaranya meliputi *Magnetic Random Access Memory* (MRAM), perangkat berbasis *Spin-Transfer Torque* (STT) (Bhatti et al., 2017; Pinarbasi & Kent, 2022), serta *DW logic* (Hrkac et al., 2011). Perangkat-perangkat ini dirancang untuk mengoptimalkan manipulasi spin elektron serta interaksinya dengan arus listrik, sehingga mampu menawarkan efisiensi energi yang lebih tinggi, kecepatan operasi yang lebih cepat, dan kestabilan data

yang lebih baik dibandingkan dengan sistem elektronik konvensional yang hanya bergantung pada transportasi muatan listrik.

Seiring dengan perkembangan teknologi spintronik, memori berbasis pergerakan DW telah muncul sebagai salah satu kandidat utama untuk sistem penyimpanan data yang berpotensi menggantikan teknologi konvensional (Parkin et al., 2008). Konsep ini mendasari pengembangan *racetrack memory (RM)*, yakni perangkat memori non-volatil yang memanfaatkan pergeseran DW di sepanjang kawat nano untuk menyimpan dan mengakses data dengan efisiensi tinggi (Parkin et al., 2008; Retseck, 2009). Inovasi ini memungkinkan penyimpanan informasi berbasis domain magnetik dalam konfigurasi kawat nano dua dimensi (2D) maupun tiga dimensi (3D), sehingga meningkatkan densitas data serta mempercepat akses dan transfer informasi (Thomas et al, 2011; Wang et al., 2008).

Kemampuan untuk mengendalikan posisi dan dinamika DW secara presisi menjadi aspek krusial. Kontrol ini berkaitan erat dengan fenomena *pinning* dan *depinning*, yaitu kondisi di mana DW tertahan atau berhasil melewati area penghambat (Koyama et al., 2011; Yuan & Wang, 2014). Studi yang dilakukan oleh Bogart *et al* (2009), Al-Bahri (2021), Al-Bahri *et al* (2019) dan Al-Bahri dan Sbiaa (2024), menunjukkan bahwa *pinning* DW sangat dipengaruhi oleh dua faktor utama: jenis DW yang terbentuk dan struktur kiralitas spin dalam material magnetik. Kedua karakteristik ini menentukan tingkat stabilitas DW serta memengaruhi kemampuannya untuk merespons stimulus eksternal seperti arus atau medan magnet (Al Bahri, 2021; Al Bahri et al., 2019; Al Bahri & Sbiaa, 2024; Bogart et al., 2009).

Desain geometris dari struktur kawat nano juga memainkan peran signifikan dalam menentukan perilaku DW. Dua konfigurasi yang umum digunakan untuk menghasilkan dan mengendalikan *pinning site* adalah struktur notch dan bertingkat. Struktur notch, yang ditandai dengan adanya takikan tajam, menghasilkan perangkap lokal yang kuat namun cenderung menciptakan medan internal yang tidak stabil, sehingga membutuhkan arus yang lebih besar untuk memindahkan DW (Gao et al., 2016; Yuan & Wang, 2014). Sebaliknya, struktur bertingkat, yang memiliki perubahan lebar secara bertahap, memungkinkan terjadinya penjepitan

DW yang lebih halus dan stabil (Al Bahri et al., 2019). Konfigurasi ini mendukung pergerakan DW yang lebih linier dan dapat diprediksi, menjadikannya lebih sesuai untuk aplikasi presisi tinggi seperti memori magnetik non-volatil dan logika berbasis DW.

Pada struktur kawat nano dengan penampang tipis, terdapat dua orientasi utama magnetisasi domain, yakni *Perpendicular Magnetic Anisotropy* (PMA) dan *In-plane Magnetic Anisotropy* (IMA) (Solovev et al., 2021). Dibandingkan dengan IMA, PMA menawarkan keunggulan dalam stabilitas dan efisiensi, karena momen magnetnya secara alami terarah tegak lurus terhadap permukaan film tipis. PMA sangat penting dalam aplikasi seperti *Spin-Transfer Torque* (STT), di mana switching magnetik yang efisien dan cepat diperlukan (Bhatti et al., 2017). Salah satu material yang menonjol dengan sifat PMA yang kuat adalah gabungan Cobalt, Besi dan Boron (CoFeB), yang dikenal karena memiliki densitas arus kritis (J_c) yang rendah, serta rasio magnetoresistansi tunnel (TMR) yang tinggi, menjadikannya kandidat ideal untuk aplikasi memori magnetik dan perangkat spintronik (Meng et al., 2011; Worledge et al., 2011).

Upaya untuk menghasilkan pergerakan dinding domain yang stabil dan terkontrol terus dikembangkan, salah satunya melalui penerapan arus pulsa berdurasi nanodetik (Al Bahri et al., 2019; Djuhana et al., 2018; Kurniawan et al., 2025; Nugraha et al., 2024). Sejumlah penelitian telah mengkaji dinamika internal dinding domain selama proses depinning yang dipicu oleh pulsa arus pendek, meskipun sebagian besar berfokus pada mekanisme pinning itu sendiri. Namun, hanya sedikit studi yang secara sistematis mengeksplorasi pengaruh variasi geometri, khususnya lebar tangga terhadap perilaku depinning domain wall pada sistem yang digerakkan oleh torsi transfer spin (*spin-transfer torque*).

Pada skripsi ini, studi mendalam dan analisis komprehensif mengenai proses depinning dinding domain pada material nanowire CoFeB dilakukan dengan memanfaatkan pendekatan mikromagnetik. Pendekatan ini memungkinkan dilakukannya pemodelan dan simulasi pergerakan DW di dalam struktur kawat nano CoFeB berbentuk tangga ketika mengalami injeksi arus, dengan fokus utama pada fenomena pinning dan depinning yang terjadi pada kawat nano.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana variasi struktur lebar tangga (s) pada kawat nano Cobalt, Besi dan Boron (CoFeB) mempengaruhi dinamika pergerakan dinding domain dalam simulasi mikromagnetik?
2. Bagaimana variasi lebar kawat nano CoFeB (W) mempengaruhi dinamika pergerakan dinding domain dalam simulasi mikromagnetik?
3. Bagaimana variasi konstanta non-adiabatik (β) pada material kawat nano CoFeB mempengaruhi fenomena depinning dinding domain dalam simulasi mikromagnetik menggunakan *Object Oriented Micromagnetic Framework* (OOMMF)?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Untuk memahami pengaruh variasi jarak lebar tangga (s) pada kawat nano CoFeB terhadap dinamika pergerakan dinding domain.
2. Untuk mengidentifikasi pengaruh variasi lebar kawat nano CoFeB (W) terhadap dinamika pergerakan dinding domain.
3. Untuk mengidentifikasi dan menganalisis pengaruh variasi konstanta non-adiabatik terhadap fenomena depinning dinding domain dalam simulasi mikromagnetik menggunakan OOMMF.

1.4. Batasan Penelitian

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Analisis depinning dinding domain dilakukan menggunakan perangkat lunak OOMMF. Untuk menggunakannya harus memiliki pemahaman dasar tentang mikromagnetik serta fitur dan cara kerja OOMMF.
2. Pemodelan material yang akan disimulasikan dalam penelitian ini melibatkan material ferromagnetik yang berbentuk kawat nano CoFeB berbentuk pipih dengan struktur berundak menyerupai tangga, dengan fokus pada karakteristik magnetik dan dinamika yang dihasilkan dalam skala nano.
3. Analisis akan dibatasi pada pengamatan jangka pendek terhadap dinamika pergerakan dinding domain dan depinning dalam waktu simulasi yang telah ditentukan, yaitu durasi pulsa arus selama 1 ns untuk setiap pengukuran, hingga total waktu simulasi mencapai 20 ns sampai kondisi domain menjadi setimbang (equilibrium).
4. Variasi konstanta non-adiabatik (β), yang dibatasi antara 0 sampai 0,04, terhadap dinamika dinding domain dalam nanowire berbahan ferromagnetik.

1.5 Manfaat Penelitian

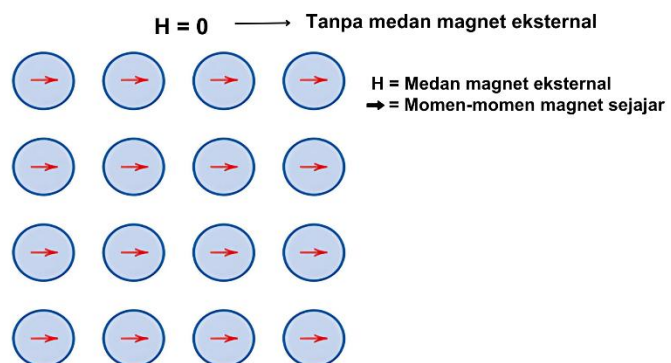
Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menghasilkan informasi mengenai perilaku depinning dinding domain pada material kawat nano CoFeB.
2. Mampu memahami dan menganalisis karakteristik dinding domain menggunakan metode simulasi mikromagnetik.
3. Menghasilkan informasi spesifik mengenai pengaruh geometri nanowire berbentuk tangga (*stagger*) sebagai medium penjaralan dinding domain magnetik.
4. Membantu pengembangan divais memori berbasis DW magnetik.

I. TINJAUAN PUSTAKA

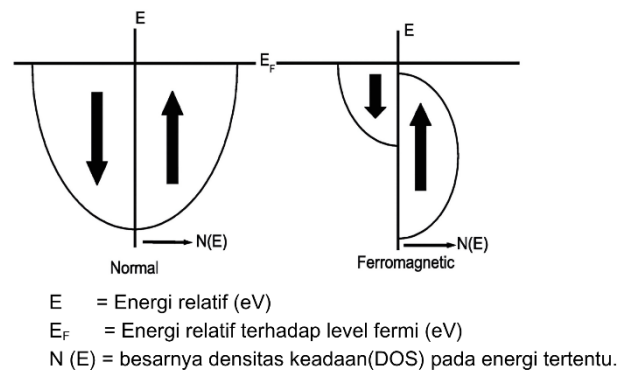
2.1 Ferromagnetik

Ferromagnetisme merupakan fenomena magnetik yang ditunjukkan oleh sejumlah material tertentu, dengan material tersebut tetap memiliki momen magnetik permanen meskipun tidak terdapat medan magnet eksternal. Sifat ini memungkinkan terjadinya magnetisasi yang besar dan stabil. Logam-logam transisi seperti besi, kobalt, boron, dan nikel merupakan contoh material ferromagnetik (Cullity dan Graham, 2009). Momen magnetik permanen pada material ferromagnetik terutama berasal dari interaksi momen magnetik atom yang ditimbulkan oleh spin elektron yang tidak saling meniadakan, sebagai hasil dari konfigurasi elektron dalam atom. Dalam material ferromagnetik, interaksi pertukaran (*exchange interaction*) antar atom-atom yang berdekatan menyebabkan orientasi momen-momen spin menjadi sejajar, menghasilkan momen magnetik total yang besar meskipun tanpa keberadaan medan magnet luar. Ilustrasi fenomena ini dapat diamati secara skematis pada **Gambar 2.1** (Cullity dan Graham (2009)).



Gambar 2.1 Sistematis Atom dalam Ferromagnetik

Pada material feromagnetik, struktur pita energinya terbagi menjadi dua sub-pita, yaitu sub-pita *spin-up* dan *spin-down*. Kedua sub-pita ini memiliki tingkat energi yang berbeda akibat pemisahan spin, sehingga elektron cenderung terlebih dahulu mengisi sub-pita *spin-up*. Ketidakseimbangan jumlah elektron yang mengisi kedua sub-pita tersebut menghasilkan momen magnetik spontan yang menjadi ciri khas material feromagnetik. Namun, ketika suhu melebihi suhu Curie, energi termal yang cukup besar menyebabkan gangguan terhadap keteraturan orientasi momen spin, sehingga material kehilangan sifat magnet permanennya. Proses transisi ini ditunjukkan secara ilustratif pada **Gambar 2.2**, yang menggambarkan pengaruh agitasi termal terhadap perilaku magnetik material (Liu et al., 2005).



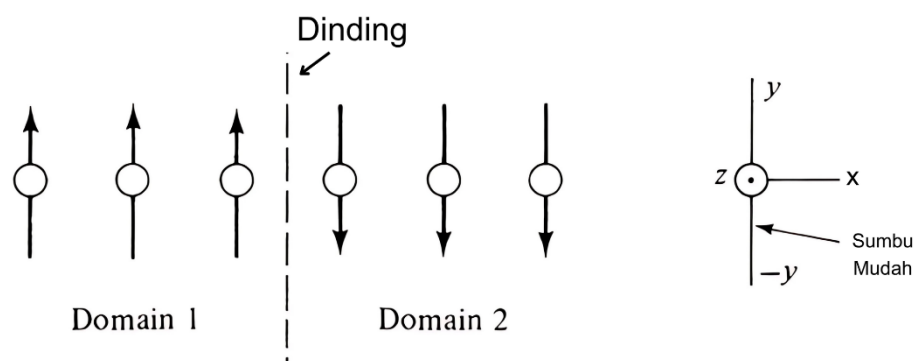
Gambar 2.2 Skema Elektron Feromagnetik

2.2 Domain dan Dinding Domain Magnetik

Domain magnetik merupakan suatu region mikroskopis dalam material feromagnetik dengan momen-momen magnetik atom tersusun sejajar dalam arah yang sama. Konsep ini pertama kali dikemukakan oleh fisikawan Prancis Pierre-Ernest Weiss pada tahun 1907 melalui publikasinya yang berjudul "*L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique*" dalam *Journal de Physique Théorique et Appliquée*. Dalam teorinya, Weiss mengemukakan bahwa magnetisasi dalam material feromagnetik tidak bersifat homogen, melainkan terbagi menjadi sejumlah domain di mana orientasi momen magnetik atom di dalam masing-masing domain bersifat paralel (Weiss, 1907).

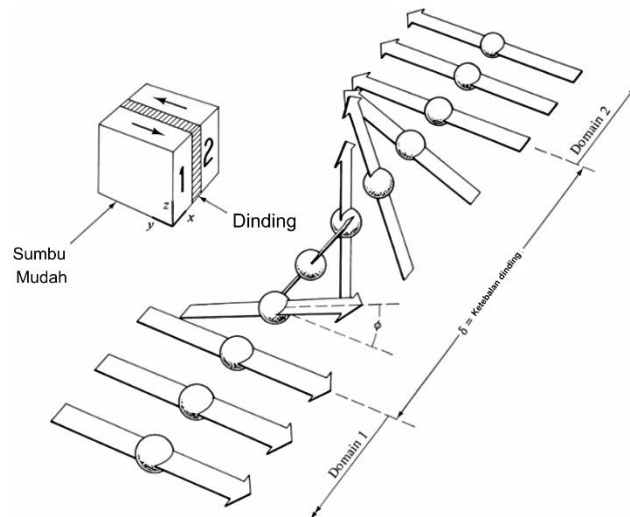
Meskipun hipotesis domain magnetik telah diperkenalkan oleh Weiss pada tahun 1907(Weiss, 1907), penerimaan konsep ini dalam komunitas ilmiah tidak terjadi secara langsung. Pemahaman eksperimental yang konkret mengenai struktur domain dalam material feromagnetik baru diperoleh pada tahun 1949, ketika H.J. Williams, R.M. Bozorth, dan W. Shockley dari Bell Telephone Laboratories mempublikasikan hasil penelitian mereka mengenai domain magnetik dalam kristal tunggal silikon-besi (Williams et al., 1948). Sejak saat itu, teori domain berkembang menjadi fondasi utama dalam analisis dan pemahaman mekanisme magnetisasi pada berbagai jenis material feromagnetik.

Setiap domain magnetik dipisahkan oleh suatu batas yang disebut *domain wall* (DW), yakni zona transisi di mana arah magnetisasi spontan mengalami perubahan orientasi dari satu arah ke arah lainnya. Konsep DW ini pertama kali dijelaskan oleh F. Bloch pada tahun 1930, yang menyatakan bahwa dalam dinding domain, orientasi spin berubah secara bertahap melalui lapisan-lapisan atom(Bloch, 1930). Dinding domain memiliki peranan krusial dalam menentukan sifat statis maupun dinamis dari material feromagnetik. Perubahan arah magnetisasi di dalam DW tidak terjadi secara acak, melainkan mengikuti pola tertentu yang ditentukan oleh anisotropi kristal dan struktur mikro material. Proses perubahan arah magnetisasi berlangsung secara halus dan teratur dari satu atom ke atom berikutnya, bukan secara tiba-tiba. Ilustrasi dinding domain ditunjukkan pada **Gambar 2.3** (Cullity & Graham, 2009).



Gambar 2.3 Domain Wall

Pada **Gambar 2.3** ditampilkan susunan atom yang berjajar sepanjang sumbu-x dan terletak pada bidang yz, dengan orientasi utama magnetisasi menuju arah +y. Dalam material feromagnetik, energi pertukaran (*exchange energy*) akan mencapai nilai minimum saat spin dari atom-atom yang berdekatan berada dalam keadaan sejajar. Akibatnya, energi exchange relative lebih tinggi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4 Struktur Dinding Domain 180°

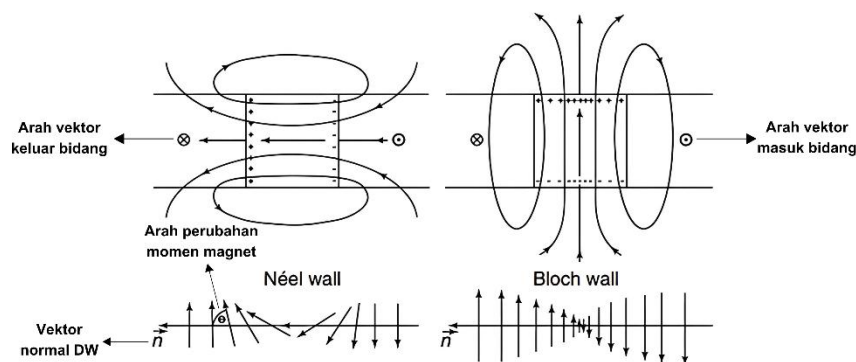
DW yang diperlihatkan pada **Gambar 2.4** diasosiasikan dengan energi *exchange* yang relatif tinggi, karena spin-spinnya di sekitar batas domain tersebut cenderung mengarah berlawanan (antiparalel). Kondisi ini menunjukkan bahwa kehadiran dinding domain menimbulkan ketidakstabilan energi yang signifikan, yang pada gilirannya memengaruhi karakteristik magnetik material dan memainkan peran penting dalam dinamika sistem magnetik (Cullity & Graham, 2009).

2.3 Bloch Wall dan Neel Wall

Klasifikasi DW berdasarkan struktur dan arah perubahan magnetisasi yang gradual dapat dibedakan menjadi dua tipe utama, yaitu Bloch wall dan Néel wall. Bloch wall pertama kali dijelaskan secara teoritis oleh F. Bloch pada tahun 1930. Pada tipe ini, orientasi magnetisasi mengalami rotasi dalam bidang dinding domain itu sendiri

yakni sejajar terhadap permukaan dinding, sementara komponen magnetisasi yang tegak lurus terhadap permukaan domain tetap nol. Konfigurasi Bloch wall umumnya dijumpai dalam material feromagnetik berukuran curah (bulk), di mana kontribusi medan demagnetisasi relatif kecil akibat skala dimensi yang besar (Bloch dan Utrecht 1930).

Sebaliknya, Néel wall, yang diperkenalkan oleh Louis Néel pada tahun 1955, ditandai oleh rotasi momen spin yang terjadi di dalam bidang permukaan material, berbeda dengan orientasi dalam Bloch wall. Dalam hal ini, arah magnetisasi berubah secara bertahap dalam bidang sejajar permukaan, sehingga medan magnet permukaan yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Konfigurasi Néel wall lebih energetik stabil dalam struktur film tipis feromagnetik, di mana efek medan demagnetisasi menjadi lebih dominan (Neel, 1955). Kondisi Bloch wall dan Neel wall ditunjukkan pada **Gambar 2.5** (Kronmüller, 2019).



Gambar 2.5 Distribusi Bloch Wall dan Neel Wall

Sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 2.6**, Néel wall cenderung mengurangi kontribusi dari muatan magnetik volume, yang pada akhirnya menghasilkan energi medan dipolar yang lebih rendah dibandingkan dengan Bloch wall, yang lebih dipengaruhi oleh distribusi muatan permukaan. Perbedaan distribusi muatan dan medan magnet di sekitar dinding domain ini secara signifikan memengaruhi total energi sistem, sekaligus menggarisbawahi karakteristik khas Néel wall yang membedakannya dari Bloch wall (Kronmüller, 2019). Meskipun Néel wall memiliki energi spesifik dinding domain yang secara umum lebih tinggi daripada

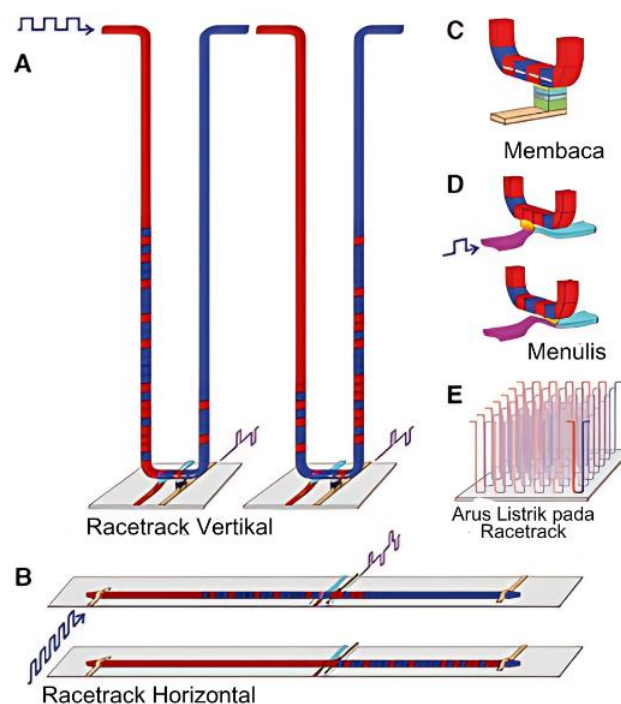
Bloch wall, lebar dinding domainnya cenderung lebih sempit. Hal ini disebabkan oleh efek penyempitan medan dipolar yang secara efektif mengompresi lebar transisi magnetisasi dalam Néel wall (Kronmüller & Parkin, 2007).

2.4 Memori Magnetik

Spintronika (spin electronics) merupakan cabang ilmu yang memanfaatkan tidak hanya muatan listrik, tetapi juga spin elektron dan momen magnetiknya dalam proses transportasi dan penyimpanan informasi. Konsep ini menjadi landasan bagi pengembangan teknologi penyimpanan data modern, termasuk memori magnetic (Zutic et al., 2004; Wolf et al., 2001). Memori magnetik merupakan salah satu bentuk penyimpanan data non-volatile yang memanfaatkan sifat magnetisasi material feromagnetik untuk merepresentasikan informasi biner dalam bentuk domain magnetik. Prinsip dasar dari memori magnetik terletak pada kemampuan untuk mempertahankan dua keadaan magnetisasi stabil (misalnya ke atas dan ke bawah), yang merepresentasikan logika 0 dan 1. Teknologi ini telah mengalami perkembangan signifikan sejak penerapan pertama kali pada hard disk drive (HDD) dan kini berkembang ke arah memori magnetik berbasis *spintronics*, seperti *Magnetic Random Access Memory* (MRAM). Dalam MRAM, informasi disimpan dalam lapisan magnetik tipis yang membentuk struktur *magnetic tunnel junction* (MTJ), di mana perbedaan arah magnetisasi antara dua lapisan menentukan nilai hambatan listrik akibat efek *tunneling magnetoresistance* (TMR) (Chappert et al., 2007).

Salah satu keunggulan utama dari memori magnetik adalah daya tahannya yang tinggi, konsumsi daya yang rendah, serta kecepatan baca/tulis yang kompetitif dibandingkan memori konvensional berbasis charge. Selain itu, riset terkini juga mengarah pada pemanfaatan domain wall (DW) sebagai elemen penyimpan dan pembawa informasi dalam konsep *racetrack memory*, di mana pergerakan domain dikendalikan melalui arus spin-polarized (Parkin et al., 2008). Memori magnetik, seperti *Hard Disk Drive* (HDD), memanfaatkan karakteristik magnetisasi material untuk menyimpan informasi digital. Sistem penyimpanan data konvensional, baik

yang berbasis mikroelektronika silikon maupun HDD, umumnya bersifat dua dimensi (2D), dengan konfigurasi planar yang terdiri atas susunan transistor dan bit magnetik. Optimalisasi kinerja perangkat ini sering dilakukan melalui miniaturisasi elemen memori guna meningkatkan kecepatan serta menekan biaya produksi. Namun, pendekatan alternatif mulai dikembangkan dengan mengadopsi arsitektur tiga dimensi (3D) untuk meningkatkan densitas penyimpanan secara signifikan. Salah satu inovasi dalam kategori ini adalah teknologi *racetrack memory* (RM), di mana domain-domain magnetik digunakan sebagai media penyimpan informasi yang disusun dalam struktur kolom vertikal dari material feromagnetik. Kolom-kolom ini tertanam secara tegak lurus terhadap permukaan *wafer* silikon, sebagaimana divisualisasikan dalam **Gambar 2.6** (Parkin et al., 2008)



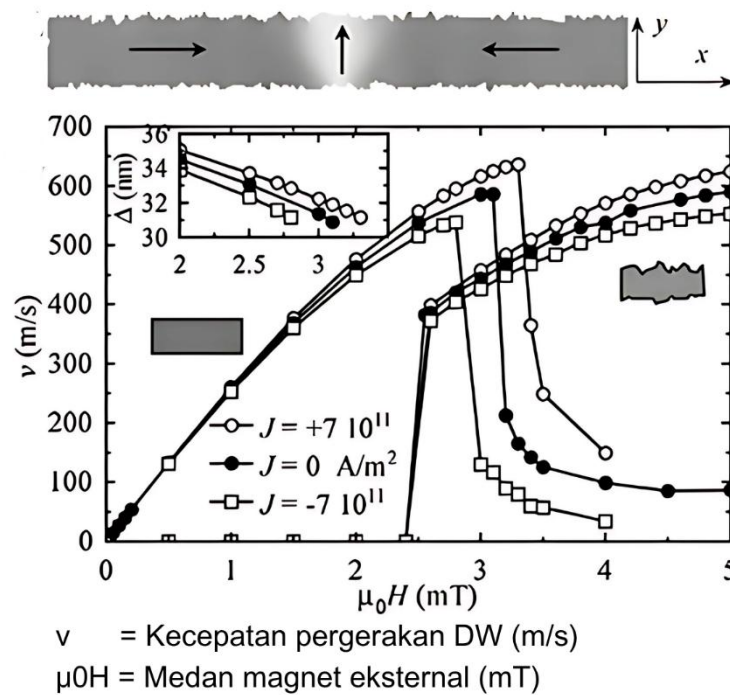
Gambar 2.6 Racetracks memory, a) konfigurasi vertical, b) konfigurasi horizontal, c) proses pembacaan, d) proses penulisan, dan e) integrasi ke dalam chip.

Spesifikasi teknis antara sistem memori dan penyimpanan data menunjukkan perbedaan mendasar. Memori umumnya dirancang untuk menghadirkan kecepatan

akses yang tinggi, sedangkan sistem penyimpanan data lebih menekankan pada karakteristik non-volatile, biaya produksi yang rendah, dan toleransi terhadap kecepatan yang lebih lambat. Dalam konteks ini, *Spin-Transfer Torque Magnetic Random Access Memory* (STT-MRAM) muncul sebagai kandidat unggul karena merupakan satu-satunya jenis memori non-volatile yang diperkirakan memiliki ketahanan tulis-baca yang hampir tak terbatas. Keunggulan ini berasal dari mekanisme operasionalnya yang tidak melibatkan proses switching magnetik yang merusak, sehingga memungkinkan kestabilan momen magnetik dalam jangka waktu panjang. Oleh karena itu, STT-MRAM dinilai sebagai solusi yang efisien dan andal untuk memenuhi tuntutan penyimpanan data jangka panjang (Kent & Worledge, 2015).

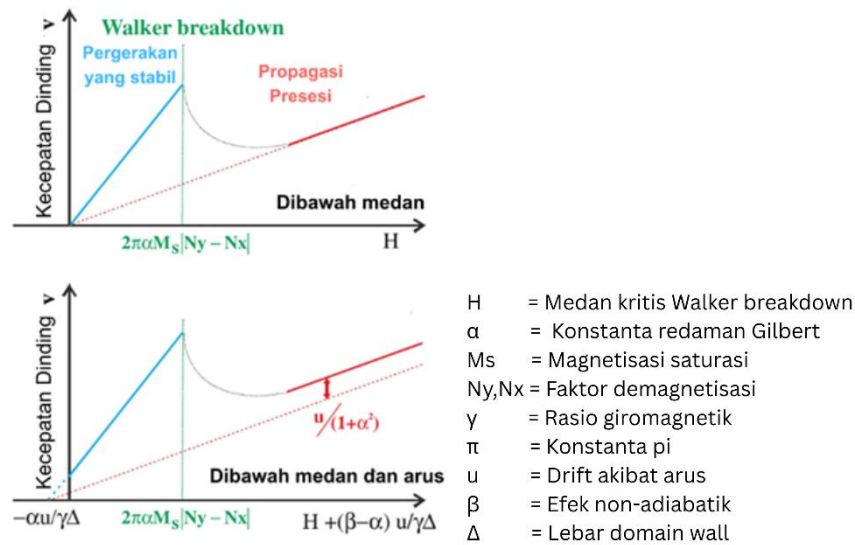
2.5 Walker Breakdown

Pada kondisi medan magnet yang rendah, terdapat hubungan yang jelas dan langsung antara kecepatan perambatan dinding domain dan kekuatan medan magnet yang diterapkan, di mana peningkatan kekuatan medan magnet akan berkontribusi pada peningkatan kecepatan pergerakan tersebut. Dalam hal ini, arus listrik berperan penting dengan mempercepat perambatan dinding domain yang bergerak seiring dengan arah gerakan elektron, sehingga menciptakan dinamika yang lebih efisien dalam material magnetik. Namun, ketika medan penggerak meningkat ke tingkat yang lebih tinggi, kecepatan perambatan dinding domain dapat mengalami penurunan yang mendadak dan signifikan. Penurunan ini disebabkan oleh ketidakstabilan struktur dinding domain yang muncul akibat pengaruh medan magnet yang terlalu kuat, yang sering kali menyebabkan fenomena yang dikenal sebagai *Walker Breakdown* seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.7** menandakan *Walker Breakdown* dinding domain, di mana dinding domain tidak lagi dapat bergerak dengan cara yang stabil, sehingga mengakibatkan penurunan efisiensi dalam perambatan dan potensi untuk mengganggu kinerja keseluruhan sistem magnetik (Thiaville et al., 2004).



Gambar 2.7 Gerak *Walker Breakdown*

Pada medan walker, keseimbangan yang ada pada torsi redaman (damping) dan torsi medan penggerak (*drive field*) yang konstan menjadi rusak dan dinding domain menunjukkan kecepatan maksimum pada daerah linier. Diatas *Walker Breakdown*, sudut azimuth berpresisi di sekitar bidang luar. Gerakannya berosilasi, karena sifat periodik. Jika tidak ada redaman, dinding domain akan bergerak maju mundur terhadap posisi awalnya. Dengan adanya redaman, perpindahan ke depan lebih besar dibandingkan perpindahan ke belakang. Hal ini menghasilkan perpindahan rata-rata positif selama satu periode dan karenanya kecepatan rata-rata bukan nol. Seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.8** (Mougin et al., 2007).



Gambar 2.8 Sketsa Kecepatan Dinding Domain

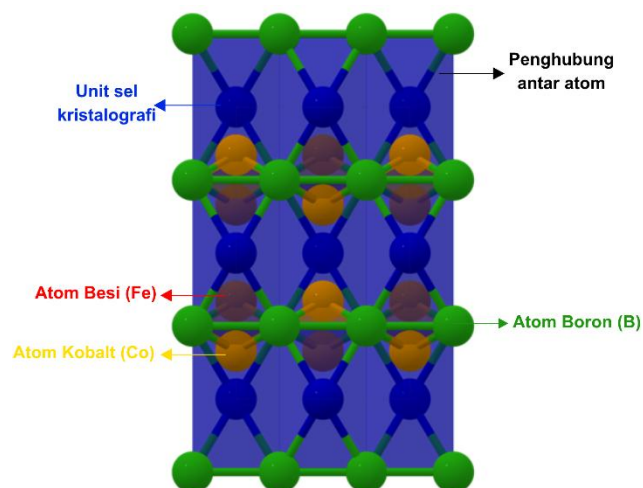
2.6 Material CoFeB

$\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ (Kobalt-Iron-Boron) merupakan bahan feromagnetik yang digunakan secara luas dalam teknologi spintronik dan penyimpanan data magnetik, seperti Magnetic Tunnel Junction (MTJ) dan Spin-Transfer Torque Magnetic Random Access Memory (STT-MRAM) (Polat et al., 2019). Material ini dikenal karena sifat magnetiknya yang sangat baik dan stabilitas termalnya yang tinggi, yang membuatnya ideal untuk aplikasi yang memerlukan kinerja pada suhu tinggi. Komposisi Co dan Fe dalam *alloy* ini dapat mempengaruhi sifat magnetik dan anisotropi magnetik, di mana rasio yang tepat dapat meningkatkan kekuatan magnetik material tersebut. Proses pembuatan CoFeB umumnya melibatkan teknik *sputtering* dan *annealing*, yang berperan penting dalam menentukan struktur mikro dan sifat magnetik akhir dari material (Zhu et al., 2024). Dengan proses *annealing* dapat mengkristalisasi material CoFeB serta dapat mengubah sifat maknetiknya. Kristalisasi dapat digunakan untuk mengoptimalkan PMA dan magnetisasi saturasi (Kim et al., 2022).

Salah satu sifat menonjol dari material CoFeB adalah kemampuannya menunjukkan *Perpendicular Magnetic Anisotropy* (PMA) ketika dipasangkan dengan lapisan

oksida seperti MgO. Anisotropi magnetik tegak lurus ini menjadi fitur yang sangat penting dalam pengembangan perangkat memori generasi terbaru, karena mendukung peningkatan densitas penyimpanan data serta memberikan stabilitas termal yang lebih unggul dibandingkan dengan konfigurasi anisotropi magnetik dalam bidang (*in-plane*)(Cui et al., 2013). Dalam sistem Mo/CoFeB/MgO, PMA mengalami peningkatan sekitar 20% dan tetap stabil hingga proses *annealing* pada suhu sekitar 425 °C, yang menunjukkan kinerja termal yang lebih baik dibandingkan dengan sistem berbasis Ta/CoFeB/MgO (Liu et al., 2014).

CoFeB menunjukkan magnetisasi saturasi yang tinggi, suatu parameter krusial dalam menentukan performa perangkat spintronik. Magnetisasi saturasi ini menggambarkan tingkat kekuatan magnetisasi material ketika mencapai kondisi termagnetisasi penuh (Harms et al., 2019). Untuk memperoleh sifat magnetik yang optimal pada CoFeB, konsentrasi boron menjadi faktor utama yang harus diperhatikan. Perubahan konsentrasi boron secara signifikan memengaruhi karakteristik magnetik material tersebut. Oleh sebab itu, studi terhadap variasi konsentrasi boron memberikan pemahaman mendalam mengenai sifat magnetik yang dimiliki oleh CoFeB (Kim et al., 2022). Struktur material CoFeB dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Struktur material CoFeB.

2.7 Mikromagnetik

Metode mikromagnetik simulasi mikromagnetik dibangun untuk menjembatani kekosongan yang ada antara fenomenologi Maxwell dan teori kuantum yang berbasis pendekatan atomik. Dalam teori Maxwell, karakteristik material dijelaskan melalui nilai permeabilitas dan susceptibilitas yang valid untuk dimensi mikroskopik. Sedangkan teori kuantum menjelaskan dinamika magnetik pada skala atomik. Masing-masing teori tersebut tidak berhasil menjelaskan fenomena koperasi dan interaksi seperti proses magnetisasi secara mikroskopik atau kurva histeresis dari sebuah struktur spin teratur. Konsep dasar dari teori mikromagnetik bermaksud untuk menyelesaikan persoalan untuk mengurangi kehilangan energi (Bruckner et al., 2013).

Teori mikromagnetik dalam magnetisasi dinamis menitikberatkan pada prinsip minimisasi energi sistem magnetik. Dalam kerangka mikromagnetik, keadaan magnetik suatu material ditentukan oleh distribusi magnetisasi spontan yang dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti suhu dan tegangan elastis yang dialami material tersebut (Kronmüller, 2019). Seiring perkembangan, diperlukan teori yang mampu menjelaskan interaksi magnetik pada skala mikroskopis secara komprehensif. Pendekatan mikromagnetik untuk memahami konsep magnetisasi pertama kali diperkenalkan oleh Landau dan Lifshitz pada tahun 1935 dengan mengembangkan formulasi kontinum energi exchange, yang menjelaskan pola pembentukan domain magnetik. Mereka merumuskan persamaan yang kini dikenal sebagai persamaan Landau-Lifshitz (LL), yang menggambarkan dinamika magnetisasi berdasarkan energi exchange kontinum serta memberikan interpretasi terhadap konfigurasi domain magnetik (Landau & Lifshitz, 1935). Beberapa dekade kemudian, Gilbert memodifikasi persamaan tersebut, menghasilkan Persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) (Thiele, 1976), yang menjadi dasar penting dalam memahami dinamika pergerakan dinding domain (DW) dalam material magnetik.

Pendekatan awal dalam formulasi dinamika magnetisasi didasarkan pada analogi dengan mekanika klasik, khususnya gerak rotasi benda pejal yang dijelaskan oleh

persamaan $dL/dt = T$ di mana L menyatakan momentum sudut dan T adalah torsi yang bekerja pada sistem. Dalam konteks magnetik, gerak kutub magnet diformulasikan dengan menggunakan analogi antara momentum sudut dan polarisasi spin, yaitu $J_s = \gamma L$, dengan J_s merepresentasikan polarisasi spin dan γ merupakan rasio giromagnetik. Ketika torsi magnetik yang bekerja didefinisikan sebagai $T = [J_s \times H_{eff}]$, maka diperoleh persamaan gerak magnetisasi tak teredam sebagaimana dituliskan dalam **Persamaan 2.1** (Landau & Lifshits, 1935).

$$\frac{dJ}{dt} = \gamma [J_s \times H_{eff}] \quad (2.1)$$

$\frac{dJ}{dt}$ = laju perubahan momentum sudut spin terhadap waktu (Nm).

γ = Rasio gyromagnetic sebuah elektron $\gamma = 2.21 \times 10^5 \text{ mA}^{-1}\text{s}^{-1}$.

J_s = Vektor momentum sudut (Js).

H_{eff} = Medan efektif total yang bekerja pada spin (A/m).

Selanjutnya, Gilbert memperkenalkan konsep redaman pada gerak presesi magnetisasi melalui formulasi persamaan yang dikenal sebagai Persamaan Gilbert. Ketika komponen redaman ini diintegrasikan ke dalam bentuk asli dari persamaan Landau-Lifshitz (LL), maka diperoleh bentuk lengkap yang dikenal sebagai Persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) (Thiele, 1976). Gerak presesi yang mengalami redaman ini dapat dimodelkan sebagai suatu dinamika disipatif, yang secara matematis direpresentasikan oleh turunan waktu dari vektor magnetisasi, dan dipengaruhi oleh medan magnet efektif, H_{eff} . Dengan demikian, Persamaan 2.1 dapat ditulis ulang untuk mencerminkan efek redaman tersebut (Kronmüller, 2019).

$$\frac{dM_s}{dt} = \gamma M \times [H_{eff} - \eta \frac{dM}{dt}] \quad (2.2)$$

M_s = Vektor magnetisasi (A/m)

$\frac{dM_s}{dt}$ = Laju perubahan magnetisasi (A/ms)

η = Koefisien redaman viskositas.

Dengan memperkenalkan konstanta redaman didapatkan,

$$\frac{dM_s}{dt} = \gamma M \times H_{eff} - \frac{\alpha}{M_s} M_s + \frac{dM_s}{dt} \quad (2.3)$$

α = Konstanta adiabatik.

Persamaan yang dikenal sebagai Persamaan Gilbert menjelaskan dinamika magnetisasi dalam suatu material. Dalam persamaan ini, M merepresentasikan vektor magnetisasi, γ adalah rasio giromagnetik, H_{eff} merupakan medan efektif yang bekerja pada sistem, α adalah konstanta redaman (damping), dan M_s menunjukkan nilai magnetisasi saturasi dari material. Formulasi ini pertama kali diperkenalkan secara rinci oleh Gilbert pada tahun 2004 (Gilbert, 2004).

$$M \times \frac{dM}{dt} = \gamma M \times (M \times H_{eff}) - \alpha M \frac{dM}{dt} \quad (2.4)$$

Jika persamaan 2.4 disubstitusikan pada persamaan 2.3, dapat dihasilkan persamaan LLG:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} M \times H_{eff} + \frac{\gamma\alpha}{(1 + \alpha^2)M} M \times (M \times H_{eff}) \quad (2.5)$$

Untuk memeriksa konsekuensi torsi transfer spin pada Gerakan magnetisasi, ada baiknya menambahkan ke persamaan LLG :

$$\frac{dm}{dt} = -\gamma m \times H_{eff} + \alpha m \times \frac{dm}{dt} - (u \cdot \nabla)m \quad (2.6)$$

u = Vektor kecepatan drift spin (m/s)

∇ = Turunan spasial

Secara analitis, fenomena ini diperkenalkan melalui simulasi mikromagnetik, di mana nilai ambang batas kerapatan arus yang diprediksi untuk menginisiasi pergerakan dinding domain terbukti satu orde magnitudo lebih tinggi dibandingkan

dengan hasil eksperimen(Thiaville et al., 2004). Torsi transfer spin yang termuat dalam Persamaan 2.6 bekerja dalam bidang magnetisasi, sehingga tidak mampu menghasilkan medan demagnetisasi yang relevan. Sejumlah peneliti kemudian mengusulkan perlunya penambahan istilah korektif dalam persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) untuk memperoleh pemahaman yang lebih akurat mengenai pengaruh kerapatan arus terhadap dinamika dinding domain(Thiaville et al., 2005).

$$\frac{dm}{dt} = -\gamma m \times H_{eff} + \alpha m \times \frac{dm}{dt} - (u \cdot \nabla)m + \beta m \times [(u \cdot \nabla)m] \quad (2.7)$$

β = Konstanta non-adiabatik

Torsi tambahan ini memiliki komponen di luar bidang, yang pada akhirnya menghasilkan medan demagnetisasi yang dibutuhkan untuk memungkinkan pergerakan dinding domain secara efisien. Torsi tersebut memperlihatkan simetri yang serupa dengan medan magnet eksternal yang diarahkan menuju salah satu domain magnetik yang membatasi posisi dinding domain (Thiaville et al., 2005).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Penelitian ini dilaksanakan pada Januari 2025 sampai dengan Mei 2025 di Laboratorium Pusat Riset Material Maju, Badan Riset dan Inovasi Nasional yang bertempat di Kawasan KST BJ Habibie, Gedung 440-442, Muncul, Setu, Kota Tangerang Selatan, Banten 15314.

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang akan digunakan selama Penelitian di Pusat Riset Material Maju, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Serpong sebagai berikut.

2.4.1 PC Lenovo 2015 i7

Penelitian ini akan menggunakan komputer Lenovo 2015 dengan spesifikasi yang memadai untuk menjalankan perangkat lunak Object Oriented Micromagnetic Framework (OOMMF). Komputer ini dilengkapi dengan prosesor Intel® Core™ i7-6700 *Central Processing Unit* (CPU) atau unit pemroses sentral @3.4GHz, memori 4GB RAM, hard disk 1TB, drive DVD RW, dan sistem operasi DOS serta memiliki Machine Type 90DA, MTM 90DA000AID, dan kebutuhan daya 100-240V – 3A, 50/60 Hz. Spesifikasi tersebut memastikan kemampuan komputer dalam memproses data simulasi, menganalisis, dan menyimpan hasil simulasi dengan efisien. Pilihan komponen seperti CPU, RAM, dan penyimpanan yang memadai menjadi faktor penting dalam menjalankan perangkat lunak OOMMF secara optimal untuk penelitian ini.

3.2.2 Simulator *OOMMF*

Object Oriented Micromagnetic Framework (OOMMF) adalah perangkat lunak yang dirancang untuk menjalankan simulasi dan pemodelan dalam bidang mikromagnetik yang dikembangkan di *NIST (National Institute of Standards and Technology)* dan dapat diinstalasi dari situs web <https://math.nist.gov/oommf/>. OOMMF pertama kali dikembangkan pada tahun 1999 oleh Michael J. Donahue di NIST, sebagai inisiatif dari Divisi Matematika Terapan dan Komputasi di ITL/NIST. Tujuannya adalah untuk menciptakan program dan alat yang mudah diakses dan digunakan secara luas oleh komunitas ilmiah. Program OOMMF ditulis dalam bahasa pemrograman C++ dan Tcl/Tk. C++ dipilih karena kemampuannya dalam menghasilkan program yang memiliki performa tinggi dan mudah diperluas, sementara Tcl/Tk digunakan untuk antarmuka pengguna yang portabel, sehingga OOMMF dapat berjalan di berbagai platform seperti Unix, Windows, dan Mac OS X.

3.2.3 ImageJ

ImageJ merupakan perangkat lunak pengolah gambar yang dapat digunakan untuk memproses dan menampilkan data hasil simulasi, termasuk visualisasi struktur domain magnetik. Image-J digunakan untuk menampilkan struktur domain magnetik dalam bentuk 3D, menampilkan animasi dari evolusi struktur domain magnetik selama simulasi, serta menghasilkan data output dalam berbagai format, seperti file teks, file gambar, dan file video. Data output ini dapat diproses lebih lanjut menggunakan ImageJ, yang dapat diperoleh melalui <https://imagej.net/ij/>.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur Penelitian ini terdiri dari Instalasi *Object Oriented Mikromagnetic Framework (OOMMF)*, Sistem Mikromagnetik, dan Proses Simulasi Mikromagnetik.

3.3.1 Instalasi OOMMF

Dalam proses instalasi *Object Oriented Micromagnetic Framework (OOMMF)*, langkah pertama yang perlu dilakukan adalah menginstal Tcl/Tk, yang merupakan bahasa pemrograman dan toolkit grafis yang diperlukan untuk menjalankan OOMMF dengan baik. Untuk memulai, mengunduh Tcl/Tk dari situs web resmi, memastikan untuk memilih versi yang sesuai dengan spesifikasi OOMMF, seperti versi 8.6 untuk kompatibilitas yang optimal. Setelah berhasil menginstal Tcl/Tk, langkah selanjutnya adalah mengunduh versi 2.0b0 dari OOMMF. Setelah proses pengunduhan selesai, pengguna harus mengekstrak file unduhan ke dalam direktori atau folder yang telah ditentukan, yang berisi file-file OOMMF. OOMMF telah terinstal dan siap digunakan untuk melakukan simulasi serta pemodelan dalam bidang mikromagnetik.

3.3.2 Sistem Mikromagnetik

Analisis depinning dinding domain pada bahan feromagnetik berupa kawat nano dilakukan dengan menggunakan simulasi mikromagnetik. Simulasi Micromagnetic menggunakan *software Object Oriented Micromagnetic Framework (OOMMF)*. Sistem mikromagnetik ini didasarkan pada persamaan Landau-Lifshitz Gilbert (LLG) yang merupakan persamaan diferensial fungsi waktu dengan pendekatan beda hingga. Persamaan ini digunakan dalam simulasi mikromagnetik untuk memodelkan dan memprediksi perilaku magnetisasi bahan feromagnetik. Secara sistematis persamaan LLG dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\frac{dm}{dt} = -\gamma m \times H_{eff} + \alpha m \times \frac{dm}{dt} - (u \cdot \nabla)m + \beta m \times [(u \cdot \nabla)m] \quad (3.1)$$

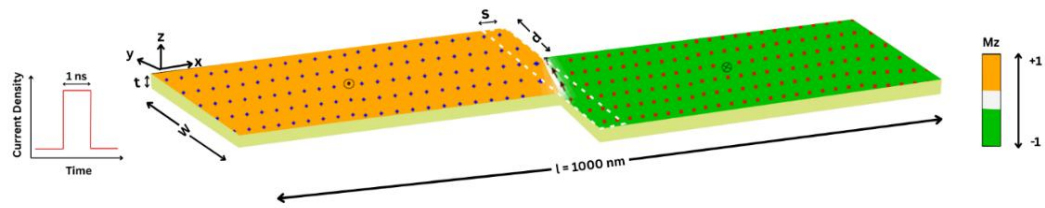
Dalam OOMMF, proses magnetisasi dalam sumbu z yang dilakukan oleh *OOMMF eXtensible Solver (OXS)*. OXS merupakan bagian dari OOMMF yang bertanggung jawab untuk mencari energi minimum dari sistem berdasarkan prinsip energi bebas (*free energy*) dari persamaan Brown. Persamaan Brown adalah persamaan dasar

dalam magnetisme yang menggambarkan perubahan energi magnetik dalam sistem. Dengan menggunakan persamaan ini, OXS dapat menghitung dan menentukan arah magnetisasi yang menghasilkan energi minimum dalam sistem.

Dalam simulasi mikromagnetik, material ferromagnet dipecah menjadi sel-sel kecil yang mewakili volume diskrit dalam system. Setiap sel mewakili sekelompok spin yang mewakili orientasi magnetik tertentu. Dengan membagi material menjadi sel sel kecil, dapat dilakukan pemodelan perubahan magnetisasi pada setiap sel secara terpisah dan menganalisis dari setiap spin. Ukuran sel sangat mempengaruhi dalam simulasi mikromagnetik. Ukuran sel yang terlalu besar dapat menghilangkan detail detail kecil dalam setiap spin, sebaliknya ukuran sel yang terlalu kecil.

3.3.3 Simulasi Mikromagnetik

Simulasi mikromagnetik dilakukan terhadap material ferromagnetik yang memiliki bentuk kawat nano (*nanowire*) persegi panjang, dengan dimensi spesifik yang dirancang untuk mengeksplorasi karakteristik magnetik material tersebut. Kawat nano ini memiliki panjang 1000 nm dan lebar 50 nm, serta ketinggian 30 nm, yang memberikan proporsi ideal untuk analisis mikromagnetik. Selain itu, panjang atau jarak lebar tangga (s) yang diukur dari pusat bervariasi dari 0 hingga 20 nm dengan interval pengukuran sebesar 5 nm setiap langkahnya, sehingga menghasilkan data yang komprehensif mengenai pengaruh dimensi terhadap sifat magnetik. Ukuran sel simulasi yang digunakan adalah $(2,5 \times 2,5 \times 1 \text{ nm}^3)$, yang cukup kecil untuk menangkap fenomena mikroskopis yang terjadi dalam material. Dalam simulasi ini, konstanta redaman (α) diatur pada nilai 0,01 untuk memastikan bahwa efek redaman yang terjadi dapat dianalisis dengan baik. Selain itu, untuk memahami pengaruh non-adiabatik (β), dilakukan variasi pada nilai tersebut menjadi empat variasi berbeda, yaitu 0,00; 0,01; 0,02; dan 0,04, sehingga memberikan wawasan yang lebih dalam mengenai bagaimana parameter ini mempengaruhi perilaku magnetik dari kawat nano ferromagnetik yang sedang diteliti. lustrasi Dinding Domain (DW) kawat nano dapat dilihat pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Model nanostrip PMA CoFeB dengan variasi jarak lebar tangga (s) dan lebar nanowire (W) yang digunakan dalam simulasi mikromagnetik untuk menyelidiki pinning dan depinning DW.

Dalam penelitian ini, material yang digunakan terdiri dari campuran Cobalt (Co_{40}), Besi (Fe_{40}), dan Boron (B_{20}), yang dipilih karena sifat magnetiknya yang baik dan relevansinya dalam aplikasi teknologi modern. Parameter material yang dijadikan masukan untuk simulasi mikromagnetik mencakup magnetisasi saturasi (M_s) sebesar $8,75 \times 10^5$ A/m, yang menunjukkan seberapa kuat material dapat memanifestasikan magnetisasi ketika dalam keadaan jenuh. Selain itu, konstanta exchange (A) diatur pada 1×10^{-11} J/m, yang berperan penting dalam menentukan interaksi magnetik antar momen magnetik dalam material. Terakhir, konstanta anisotropi yang ditetapkan sebesar 7×10^5 J/m³ pada arah (001) memberikan wawasan mengenai preferensi arah magnetisasi dalam material tersebut.

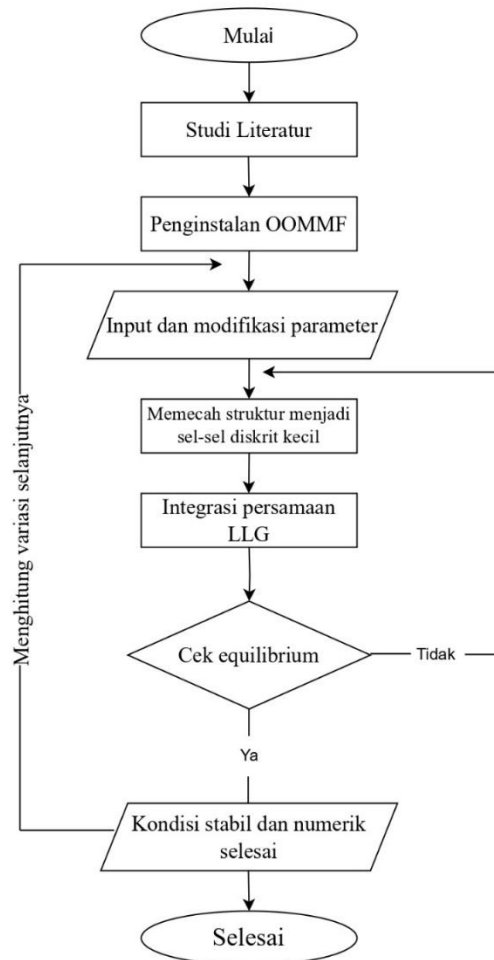
Pada proses simulasi mikromagnetik, dilakukan serangkaian tahapan yang terstruktur untuk mengeksplorasi pengaruh variasi jarak lebar tangga (s) dan konstanta non-adiabatik terhadap fenomena depinning. Dalam simulasi ini, kecepatan torsi putaran (u) diarahkan pada sumbu +z, dengan tujuan untuk menganalisis dampaknya terhadap dinamika magnetik material. Waktu naik yang diterapkan selama simulasi ditetapkan sebesar 1 ns, di mana durasi arus yang diterapkan juga berlangsung selama 1 ns. Setelah periode arus tersebut, pulsa arus dimatikan, dan dinding domain (DW) dibiarkan dalam keadaan stabil hingga pulsa arus benar-benar nol. Pada tahap akhir, setelah arus tidak lagi diterapkan, dilakukan analisis mendalam terhadap setiap kondisi torsi putaran yang berbeda, untuk memahami bagaimana perubahan ini mempengaruhi perilaku magnetik material.

3.4.4 Analisis Hasil

Analisis dilakukan dengan mengkaji perilaku depinning dinding domain (DW) dalam kawat nano CoFeB yang dipicu oleh pulsa arus nanodetik, menggunakan simulasi mikromagnetik dengan perangkat lunak Object Oriented Micromagnetic Framework (OOMMF). Simulasi ini mensimulasikan struktur DW awal dalam konfigurasi transversal dengan spin head-to-head. Pulsa arus dengan durasi 1 ns diaplikasikan sepanjang sumbu +z kawat nano untuk memicu pergerakan DW. Data diperoleh dengan memantau perubahan posisi DW seiring waktu dan menganalisis hubungan antara kecepatan DW dan besarnya arus spin. Analisis dilakukan dengan memvariasikan jarak lebar tangga (s) dan konstanta non-adiabatik (β) untuk memahami pengaruhnya terhadap waktu transisi DW, waktu depinning DW, dan kecepatan DW. Persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) yang dimodifikasi digunakan untuk menggambarkan dinamika DW yang dipengaruhi oleh arus yang terpolarisasi spin. Analisis lebih lanjut dilakukan dengan membuat plot grafik yang menunjukkan hubungan antara waktu depinning dengan magnetisasi saturasi, serta hubungan antara kecepatan DW dan besarnya arus spin.

3.5 Diagram Alir Penelitian

Proses simulasi mikromagnetik dapat dijelaskan melalui diagram alir seperti ditunjukkan pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, dapat diambil beberapa kesimpulan berikut.

1. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan jarak antar lebar tangga (s) berbanding terbalik dengan nilai arus depinning (J_d), meskipun hubungan tersebut tidak bersifat linier. Artinya, semakin besar jarak antar tangga, semakin kecil arus yang dibutuhkan untuk melepaskan DW dari posisi pinning-nya. Sebaliknya, peningkatan lebar nanowire (W) justru menyebabkan nilai J_d meningkat.
2. Selain itu, variasi konstanta non-adiabatik (β) umumnya tidak memberikan dampak signifikan terhadap nilai J_d , kecuali pada nanowire dengan lebar $W = 150$ nm, di mana fluktuasi J_d terlihat lebih mencolok dibandingkan pada $W = 50$ nm dan $W = 100$ nm.
3. Struktur DW yang terbentuk selama proses depinning menunjukkan bahwa geometri tangga dengan lebar besar dan jarak antar tangga yang kecil memperkuat efek pinning, sehingga memperlambat proses pelepasan DW. Energi depinning yang dihitung saat pulsa arus masih aktif meningkat seiring bertambahnya nilai s , namun saat pulsa arus dihentikan, energi ini justru menurun pada lebar nanowire $W = 50$ nm dan relatif stabil untuk $W = 100$ nm serta $W = 150$.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Bahri, M. (2021). Geometrical Confinement of Vortex Domain Wall in Constricted Magnetic Nanowire with In-Plane Magnetic Anisotropy. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(4) (0018-9464). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3053090>.
- Al Bahri, M., Borie, B., Jin, T. L., Sbiaa, R., Kläui, M., and Piramanayagam, S. N. (2019). Staggered Magnetic Nanowire Devices for Effective Domain-Wall Pinning in Racetrack Memory. *Physical Review Applied*, 11(2) 024023 2 7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.024023>.
- Al Bahri, M., and Sbiaa, R. (2024). Chirality-Dependent Dynamics and Pinning of Transverse Domain Wall in Constricted Nanowires. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 221(10) 2300906 1-7. <https://doi.org/10.1002/pssa.202300906>.
- Al Risi, S., Sbiaa, R., and Al Bahri, M. (2020). Domain Wall Dynamics in Stepped Magnetic Nanowire with Perpendicular Magnetic Anisotropy. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 217(16) 032402 1-4. <https://doi.org/10.1002/pssa.202000225>.
- Baibich, M. N., Broto, J. M., Fert, A., Nguyen, F., Dau, V., Petroff, F., Eitenne, P., Creuzet, G., Friederich, A., and Chazelas, J. (1988). Giant Magnetoresistance of (001)Fe(001) Cr Magnetic Snperlattices. *Physical Review Letters*, 61 (21) 2472-2475.
- Bhatti, S., Sbiaa, R., Hirohata, A., Ohno, H., Fukami, S., and Piramanayagam, S. N. (2017). Spintronics-based random access memory: a review. *In Materials Today*, 20 (9) (530–548). <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.007>.
- Binasch, G., Griinberg, P., Saurenbach, F., Zinn, W., and Julichw, D.-5170. (1989). Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *In physical review b* Vol. 39 (7) 4828 - 4830.

- Bloch, V.F., (1930). Zur Theorie des Ferromagnetismus. In Bloeh~ zurzeit in. 619 (49) 206-219.
- Bogart, L. K., Atkinson, D., O'Shea, K., McGrouther, D., and McVitie, S. (2009). Dependence of domain wall pinning potential landscapes on domain wall chirality and pinning site geometry in planar nanowires. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 79(5) 054414 1-8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.054414>.
- Bruckner, F., Vogler, C., Bergmair, B., Huber, T., Fuger, M., Suess, D., Feischl, M., Fuehrer, T., Page, M., and Praetorius, D. (2013). Combining micromagnetism and magnetostatic Maxwell equations for multiscale magnetic simulations. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 343, 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.04.085>.
- Chappert, C., Fert, A., and Nguyen Van Dau, F. (2007). *review articles | insight*. (6) 813 – 823. www.nature.com/naturematerials.
- Cui, B., Song, C., Wang, G. Y., Wang, Y. Y., Zeng, F., and Pan, F. (2013). Perpendicular magnetic anisotropy in CoFeB/X (X = MgO, Ta, W, Ti, and Pt) multilayers. *Journal of Alloys and Compounds*, 559, 112–115. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.01.093>.
- Cullity, B. D., and Graham, C. D. (2009). *ferromagnetism 4.1 introduction and Domain Wall Structure*. 155-116 and 277-278. New Jersey.
- Daughton, J. M. (1999). GMR applications. In *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. (192) 334D342.
- Djuhana, D., Kurniawan, C., and Kim, D. H. (2018). Micromagnetic study of domain wall depinning driven by nanosecond current pulse in notched Permalloy nanowires. *Current Applied Physics*, 18(2), 236–240. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2017.11.005>.
- Gao, Y., You, B., Yang, H. L., Zhan, Q. F., Li, Z., Lei, N., Zhao, W. S., Wu, J., Tu, H. Q., Wang, J., Wei, L. J., Zhang, W., Xu, Y. B., and Du, J. (2016). Stochastic domain wall depinning in permalloy nanowires with various types of notches. *AIP Advances*, 6(12) 125124 1-7. <https://doi.org/10.1063/1.4973647>.
- Gilbert, T. L. (2004). A phenomenological theory of damping in ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(6), 3443–3449. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.836740>.

- Harms, J. M., Jan, G., Serrano-Guisan, S., Thomas, L., Liu, H., Zhu, J., Lee, Y. J., Le, S., Tong, R. Y., Patel, S., Sundar, V., Shen, D., Yang, Y., He, R., Haq, J., Teng, Z., Lam, V., Liu, P., Wang, Y. J., ... Wang, P. K. (2019). Ultrathin perpendicular magnetic anisotropy CoFeB free layers for highly efficient, high speed writing in spin-transfer-torque magnetic random access memory. *Scientific Reports*, 9(1) 19407 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54466-7>.
- Hrkac, G., Dean, J., & Allwood, D. A. (2011). Nanowire spintronics for storage class memories and logic. In Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, *Physical and Engineering Sciences*, Vol. 369, Issue 1948, pp. 3214–3228. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0138>.
- Thomas, L., Yang, S.H., Ryu, K.S., Hughes, B., Rettner, C., Wang, D.S., Tsai, C.H., Shen, K.H., and Parkin, S.S.P (2011). Racetrack Memory: a high-performance, low-cost, non-volatile memory based on magnetic domain walls. *IEEE International Electron Devices Meeting*. (408) 24.2.1 – 24.2.4.
- Kent, A. D., and Worledge, D. C. (2015). A new spin on magnetic memories. In Nature Nanotechnology, Vol. 10, Issue 3, pp. 187–191. *Nature Publishing Group*. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.24>.
- Kim, J. S., Kim, G., Jung, J., Jung, K., Cho, J., Kim, W. Y., and You, C. Y. (2022). Control of crystallization and magnetic properties of CoFeB by boron concentration. *Scientific Reports*, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08407-6>. 12(1) 4549 1-8.
- Koyama, T., Chiba, D., Ueda, K., Kondou, K., Tanigawa, H., Fukami, S., Suzuki, T., Ohshima, N., Ishiwata, N., Nakatani, Y., Kobayashi, K., & Ono, T. (2011). Observation of the intrinsic pinning of a magnetic domain wall in a ferromagnetic nanowire. *Nature Materials*, 10(3), 194–197. <https://doi.org/10.1038/nmat2961>.
- Kronmüller, H. (2019). General Micromagnetic Theory and Applications. In Materials Science and Technology. (16 – 17). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527603978.mst0460>.
- Kronmüller, Helmut., and Parkin, S. S. P. (2007). *Handbook of magnetism and advanced magnetic materials*. Vol. (2) 15-16, Micromagnetism. John Wiley & Sons.

- Kurniawan, C., and Djuhana, D. (2016). Current driven domain wall depinning in notched Permalloy nanowires. *AIP Conference Proceedings*, (1711) 020001 1-6. <https://doi.org/10.1063/1.4941610>.
- Kurniawan, C., Djuhana, D., Soegijono, B., and Kim, D. H. (2021). Micromagnetic investigation of the sub-nanosecond magnetic pulse driven domain wall motion in CoFeB nanowire. *Current Applied Physics*, 27, 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2021.04.017>.
- Kurniawan, C., Nugraha, R., Kim, D. H., and Djuhana, D. (2025). Tunable domain wall pinning behavior by notch geometry in CoFeB nanostrip under nano 48 pulse current injection. *Kuwait Journal of Science*, 52(3) 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2025.100418>.
- Kurniawan, C., Soegijono, B., and Djuhana, D. (2019). Investigation of notch dept effect on domain wall depinning in ferromagnetic nanowires by micromagnetic simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 553(1) 012012 1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/553/1/012012>.
- Landau, L., and Lifshits, E. (1935). on the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies. *In Phys. Zeitsch. der Sow*, Vol. 53 (8) 14 - 22.
- Liu, C., Yun, F., and Morkoç, H. (2005). Ferromagnetism of ZnO and GaN: A Review. *In Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 16 (9) 555–597. <https://doi.org/10.1007/s10854-005-3232-1>.
- Liu, T., Zhang, Y., Cai, J. W., and Pan, H. Y. (2014). Thermally robust Mo/CoFeB/MgO trilayers with strong perpendicular magnetic anisotropy. *Scientific Reports*, (4) 4-5895 1-6. <https://doi.org/10.1038/srep05895>.
- Meng, H., Lum, W. H., Sbiaa, R., Lua, S. Y. H., and Tan, H. K. (2011). Annealing effects on CoFeB-MgO magnetic tunnel junctions with perpendicular anisotropy. *Journal of Applied Physics*, 110 (3) 033904-1-5. <https://doi.org/10.1063/1.3611426>.
- Mougin, A., Cormier, M., Adam, J. P., Metaxas, P. J., & Ferré, J. (2007). Domain wall mobility, stability and Walker breakdown in magnetic nanowires. *EPL*, 78(5) 57007 p1-p6. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/78/57007>.
- Neel, M.L., (1955). Academie Des Sciences. *Journal Physik*. 241 (6) 534-537.

- Nugraha, R., Kurniawan, C., Kim, D. H., and Djuhana, D. (2024). Propagation dynamics of the Bloch-type domain wall on CoFeB nanostripes driven by a nanosecond magnetic pulse. *Current Applied Physics*, 59, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2023.12.011>.
- Parkin, S. S. P., Hayashi, M., and Thomas, L. (2008). Magnetic domain-wall racetrack memory. *In Science*. 320 (5873) 190–194. <https://doi.org/10.1126/science.1145799>.
- Pinarbasi, M., and Kent, A. D. (2022). Perspectives on spintronics technology development: Giant magnetoresistance to spin transfer torque magnetic random access memory. *APL Materials*, 10(2) 020901 1-13. <https://doi.org/10.1063/5.0075945>.
- Pollard, S. D., Huang, L., Buchanan, K. S., Arena, D. A., and Zhu, Y. (2012). Direct dynamic imaging of non-adiabatic spin torque effects. *Nature Communications*, 3 pp 3:1028 1-7. <https://doi.org/10.1038/ncomms2025>.
- Polat, G. E., Deger, C., & Yildiz, F. (2019). Investigation of ferromagnetic resonance and damping properties of CoFeB. *Current Applied Physics*, 19(5), 614–620. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2019.03.002>.
- Retseck, G. (2009). *Racetrack Memory*. 76 Scientific America. (320) 190-194.
- Roldan, F. J. A., De Riz, A., Trapp, B., Thirion, C., Vazquez, M., Toussaint, J. C., Fruchart, O., & Gusakova, D. (2019). Modeling magnetic-field-induced domain wall propagation in modulated-diameter cylindrical nanowires. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40794-1>.
- Ryu, J., Choe, S. B., and Lee, H. W. (2011). Magnetic domain-wall motion in a nanowire: Depinning and creep. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 84(7) . 075469 1-12. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.075469>.
- Solovev, P. N., Izotov, A. V., Belyaev, B. A., and Boev, N. M. (2021). Micromagnetic simulation of domain structure in thin permalloy films with in plane and perpendicular anisotropy. *Physica B: Condensed Matter*, (604) 412699 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412699>.
- Thiaville, A., Nakatani, Y., Miltat, J., & Suzuki, Y. (2005). Micromagnetic understanding of current-driven domain wall motion in patterned nanowires.

- Europhysics Letters*, 69(6), 990–996. <https://doi.org/10.1209/epl/i200410452-6>.
- Thiaville, A., Nakatani, Y., Miltat, J., & Vernier, N. (2004). Domain wall motion by spin-polarized current: A micromagnetic study. *Journal of Applied Physics*, 95(11), 7049–7051. <https://doi.org/10.1063/1.1667804>.
- Thiele, A. A. (1976). On the momentum of ferromagnetic domains. *Journal of Applied Physics*, 47(6), 2759–2760. <https://doi.org/10.1063/1.323005>.
- Thompson, S. M. (2008). The discovery, development and future of GMR: The Nobel Prize 2007. *In Journal of Physics D: Applied Physics* 9 (41) 3001 1-20. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/9/093001>.
- Zutic I. Z., Fabian, J., and Das Sarma, S. (2004). Spintronics: Fundamentals and applications. Pp 325 – 330. Wang, F., Zhang, Y., Tian, C., Girit, C., Zettl, A., Crommie, M., and Shen, Y. R. (2008). Gate-variable optical transitions in graphene. *Science*, 320(5873), 206–209. <https://doi.org/10.1126/science.1152793>.
- Weiss, P. (1907). L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique. *J. Phys. Theor. Appl*, 6(1) 661 - 690. <https://doi.org/10.1051/jphystap:019070060066100i>.
- Williams, H. J., Bozorth, R. M., Shockley Bell Telephone Laboratories, W., Hall, M., and Jersey, R. Magnetic Domain Patterns on Single Crystals of Silicon Iron. *In physical review* 75 (1) 155 - 178.
- Wolf, S. A., Awschalom, D. D., Buhrman, R. A., Daughton, J. M., Von Molnár, S., Roukes, M. L., Chtchelkanova, A. Y., and Treger, D. M. (2001). Spintronics: A spin-based electronics vision for the future. *In Science* (Vol. 294, Issue 5546, pp. 1488–1495). <https://doi.org/10.1126/science.1065389>.
- Worledge, D. C., Hu, G., Abraham, D. W., Sun, J. Z., Trouilloud, P. L., Nowak, J., Brown, S., Gaidis, M. C., O'Sullivan, E. J., and Robertazzi, R. P. (2011). Spin torque switching of perpendicular Ta|CoFeB|MgO-based magnetic tunnel junctions. *Applied Physics Letters*, 98(2) 022502 1-4. <https://doi.org/10.1063/1.3536482>.
- Yuan, H. Y., and Wang, X. R. (2014). Domain wall pinning in notched nanowires. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 89(5) 054423 1 - 5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.054423>.

Zhu, Z., He, J., Li, Y., Luo, J., Xu, G., Yang, W., Liu, D., and Gao, J. (2024). Microstructure Features and Mechanical Properties of Casted CoFeB Alloy Target. *Coatings*, 14(3) 2290 1-12. <https://doi.org/10.3390/coatings14030255>.