



**Aplikasi Simulasi Micromagnetic pada Penelitian
Struktur dan Dinamika Domain
Material Feromagnetik**

Dede Djuhana

Pidato pada Upacara Pengukuhan sebagai
Guru Besar Tetap Dalam Bidang Ilmu Material
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Indonesia

Depok, 15 November 2023

Kata Pengantar

Saya panjatkan puji syukur kehadiran Allah SWT, atas karunia dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan pidato orasi sebagai Guru Besar Tetap Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam berjudul **Aplikasi Simulasi Micromagnetic pada Penelitian Struktur dan Dinamika Domain Material Ferromagnetik**. Isi pidato ini menjelaskan tentang manfaat simulasi micromagnetic dalam penelitian bidang kemagnetan khususnya struktur dan dinamika domain magnetik dalam material ferromagnetik. Ada empat hal penting hasil penelitian dari simulasi ini yaitu (1) simulasi keadaan *ground state* atau tanpa medan luar memperlihatkan perubahan struktur domain dari *single-domain* ke *multi-domain* pada kondisi energi minimum, (2) simulasi dengan aplikasi medan luar baik medan magnet atau injeksi arus memperlihatkan kecepatan *domain wall* dan fenomena *Walker breakdown*. Model IMA terdapat perubahan struktur dari *transverse wall* menjadi *vortex/antivortex wall* sedangkan model PMA, struktur tetap mempertahankan struktur DW tipe *Bloch wall*, (3) simulasi medan depinning dan arus depinning menginformasikan tentang besar medan magnet atau arus injeksi untuk melepaskan domain-wall dari sebuah *notch* dan perubahan struktur domain selama proses depinning, dan (4) Simulasi medan osilasi memperlihatkan osilasi domain wall memiliki frekuensi resonansi tertentu dan bergantung pada frekuensi sumber dan ukuran notch.

Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dari Allah SWT dan dukungan dari semua pihak, sangat sulit menyelesaikan pidato ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih banyak kepada semua pihak yang telah membantu saya. Semoga esensi dari pidato ini dapat bermanfaat pada seluruh pembaca.

Depok, 15 November 2023

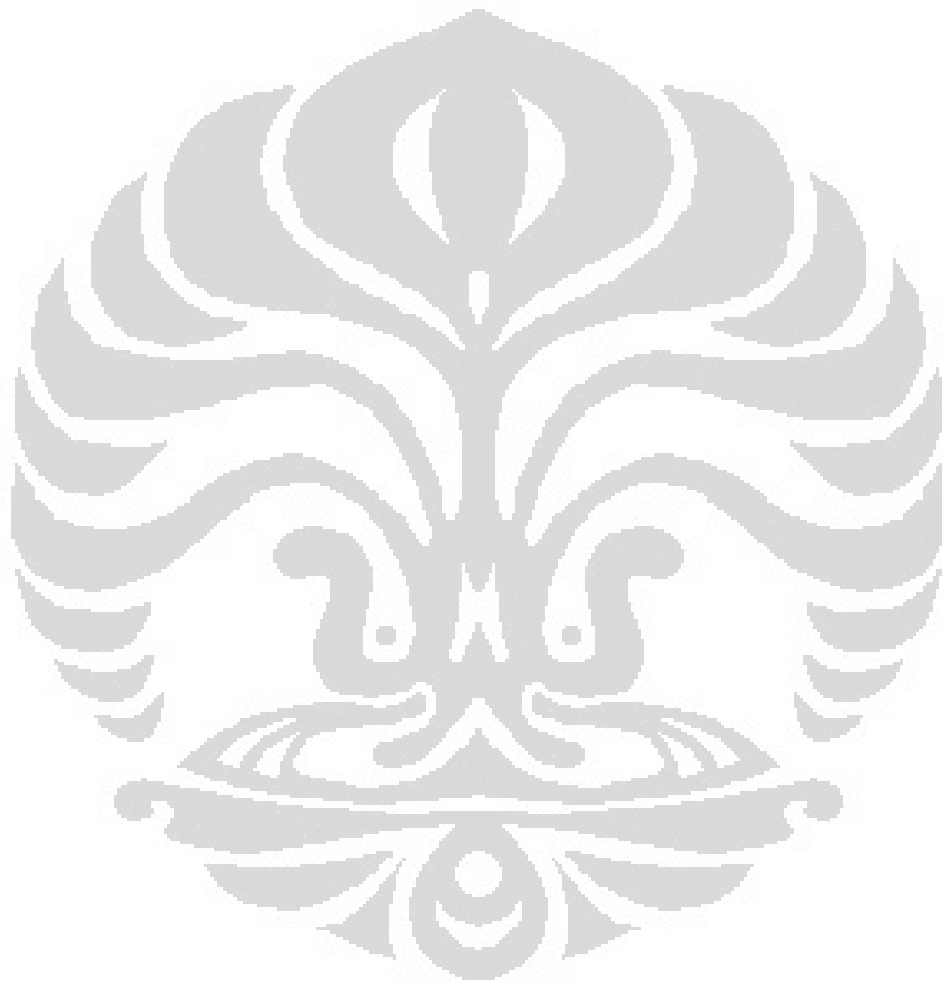
Dede Djuhana

Daftar Isi

| | |
|--|-------------|
| Kata Pengantar | i |
| Daftar Isi | ii |
| Daftar Gambar | iv |
| Daftar Tabel | vii |
| Kata Sambutan | viii |
| 1 Pendahuluan | 1 |
| 2 Dinamika Domain dan Micromagnetic | 7 |
| 2.1 Domain dan Domain wall | 7 |
| 2.2 Konsep Micromagnetic | 8 |
| 2.3 Persamaan LL dan LLG | 11 |
| 2.4 Micromagnetic OOMMF | 13 |
| 2.5 Model Simulasi Micromagnetic | 14 |
| 3 Simulasi Micromagnetic Kondisi Ground State | 15 |
| 3.1 Model Bola | 15 |
| 3.2 Model Nanowire | 19 |
| 3.3 Model Notch | 20 |
| 4 Simulasi Micromagnetic Aplikasi Medan Pulsa | 22 |
| 4.1 Model Inplane Magnetization Anistropy (IMA) | 22 |
| 4.2 Model Perpendicular Magnetization Anisotropy (PMA) | 25 |
| 5 Medan Depinning | 27 |
| 5.1 Medan Depinning | 27 |
| 5.2 Arus Depinning | 28 |
| 6 Medan Osilasi | 29 |
| 7 Penutup | 32 |
| Ucapan Terima Kasih | 33 |

Dede Djuhana

| | |
|-----------------------|-----------|
| Riwayat Hidup | 37 |
| Daftar Pustaka | 45 |
| Daftar Indeks | 52 |



Daftar Gambar

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Penerima Nobel Bidang Fisika Albert Fert dan Peter Grünberg atas penemuan GMR (gambar kiri) (Noble Prize, 2007) dan kurva MR bernilai tinggi saat konfigurasi spin anti-paralel dan bernilai rendah untuk konfigurasi paralel (gambar kanan) (Baibich et al., 1988). | 1 |
| 2 | Devais GMR berupa <i>spin valve</i> yaitu terdiri dari dua lapisan feromagnetik (FM) dan disisipi lapisan non-feromagnetik (NM). Tanda panah menyatakan arah orientasi spin dan hamburan elektron dalam material FM (Wikipedia, 2023). | 1 |
| 3 | (a) Bentuk HDD (3,5 inch) dan SSD (2,5 inch) (Taylor, 2020) dan (b) Grafik laju kapasitas HDD dan SSD dalam Gb/in ² (Grochowski, 2012; Li, 2016). | 2 |
| 4 | Laju kerapatan kapasitas magnetic recording diprediksi akan saturasi dan maksimum sebesar 1 Tb/in ² (Wood, 2009). | 3 |
| 5 | Peta jalan teknologi HDD dari <i>Advance Storage Technolgy Consorsium</i> (ASTC) dari PMR, HAMR, BPMR, dan HDMR (IDEMA, 2014). | 4 |
| 6 | Daerah (a) Daerah superparamagnetik (spm) $0 < D < D_{cr}^{spm}$, (b) Single domain $D_{cr}^{spm} < D < D_0$, (c) Vortex $D_0 < D < D_1$ untuk soft-magnetic dan (d) Multi domain $D > D_1$ (Guimarães, 2009). | 5 |
| 7 | Struktur (a) <i>Flower</i> , (b) <i>Leaf</i> , (c) Tipe S, dan (d) Tipe C (Fruchart and Thivaville, 2005; Guimarães, 2009). | 5 |
| 8 | Ilustrasi devais RM menyimpan data bit dari konfigurasi spin DW (warna merah dan biru). Injeksi arus mampu menggerakkan DW dengan kecepatan 800-1000 m/s (Kumar et al., 2022; Parkin et al., 2008; Parkin and Yang, 2015). | 6 |
| 9 | (a) Struktur DW pada nanowire: tipe Néel wall dan tipe Bloch wall bersifat PMA (Kumar et al., 2022) dan (b) Profil kecepatan DW pada model IMA dan PMA (Fukami et al., 2008) | 6 |
| 10 | Ilustrasi domain magnetik dalam feromagnetik memiliki arah tertentu $H = 0$ (gambar kiri) dan arah spin dalam domain mengikuti arah medan luar (gambar kanan). | 8 |
| 11 | Ilustrasi orientasi momen magnetik pada Bloch wall (gambar atas) dan Néel wall (gambar bawah) (Coey, 2009) | 8 |
| 12 | Skala penelitian micromagnetic: 1-1000 nm dan menjelaskan struktur domain magnet berdasarkan teori Continuum (Hubert and Schäfer, 2009). | 9 |
| 13 | Ilustrasi gerak presesi pada sebuah momen magnetik \mathbf{M} dalam pengaruh medan magnet luar \mathbf{H} . Tanpa faktor redaman (gambar kiri) dan melibatkan faktor redaman (gambar kanan) (Barman and Haldar, 2014). | 11 |
| 14 | Deskripsi proses simulasi OOMMF yang melibatkan <i>OOMMF eXtensible Solver</i> pada sebuah model feromagnetik (Donahue and Porter, 1999). | 13 |
| 15 | Model bola dalam simulasi micromagnetic tanpa medan luar (a) Konfigurasi spin awal adalah acak dan (b) Konfigurasi spin pada kondisi minimum. Batang warna adalah magnetisasi arah M_x (Djuhana et al., 2021). | 15 |

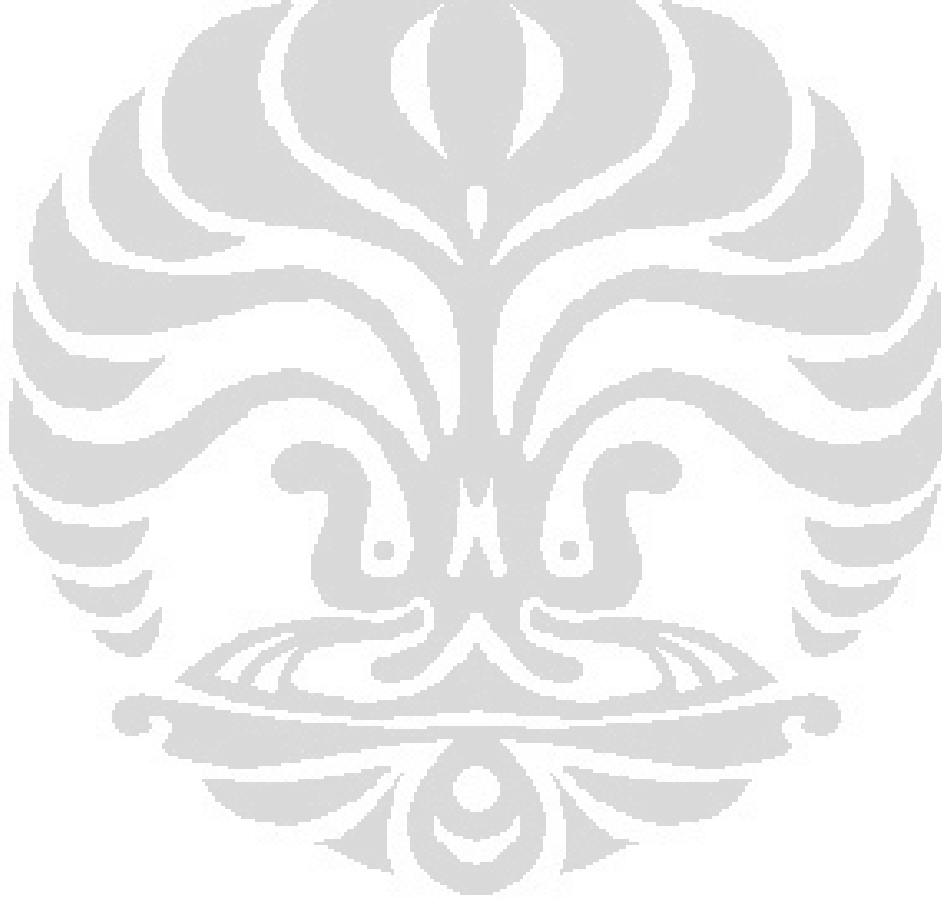
| | | |
|----|--|----|
| 16 | Profil energi exchange dan demagnetisasi terhadap variasi diameter untuk Ni, Py, Fe, dan Co. Perubahan struktur domain dari SD ke MD pada diameter tertentu. Garis putus-putus menyatakan batas antara SD dan MD dan batang warna adalah magnetisasi komponen M_x (Djuhana et al., 2021). | 16 |
| 17 | (a) Arah orientasi inti VW untuk Ni, Py, Fe, dan Co dalam struktur MD. Arah dua tipe orientasi yaitu EAO dan HAO. Orientasi struktur VW dari Ni dan Py: EAO pada arah [111] dan HAO pada arah [100],[010],[001]. Untuk Fe: EAO pada arah [100],[010],[001] dan HAO arah [111]. Untuk Co hanya memiliki HAO karena EAO pada daerah SD dan (b) Jangkauan orientasi EAO dan HAO untuk semua material dari $D = 20-100$ nm (Djuhana et al., 2021). | 17 |
| 18 | Model nanowire dalam simulasi micromagnetic tanpa medan luar dengan bentuk <i>golf-pad</i> sebagai daerah awal terbentuknya struktur domain (Djuhana et al., 2010b). | 19 |
| 19 | Perpindahan DW tipe TW pada rentang waktu 10-60 ns dan lingkaran warna menyatakan arah magnetisasi (Djuhana et al., 2010b). | 19 |
| 20 | (a) Profil posisi dan (b) kecepatan DW pada NW untuk tebal $t = 2,5$ nm, 5 nm, dan 10 nm pada rentang waktu 10-60 ns (Djuhana et al., 2010b). | 19 |
| 21 | Profil energi magnetostatik (gambar kiri) dan exchange (gambar kanan) pada rentang waktu $t = 10-60$ ns untuk tebal 2,5 nm, 5 nm, dan 10 nm (Djuhana et al., 2010b). | 20 |
| 22 | Model NW mengandung notch segitiga ganda dan DW tipe TW terletak pada notch (Djuhana et al., 2010b). | 20 |
| 23 | Struktur domain terbentuk pada notch yaitu struktur TW untuk nilai $s = 30-400$ nm. Lingkaran warna adalah arah magnetisasi (Djuhana et al., 2010a). | 21 |
| 24 | Profil <i>potential well</i> pada $s = 50$ nm dan $s = 150$ nm (Djuhana et al., 2010a). | 21 |
| 25 | Model NW pada simulasi dinamika DW material Py dengan $L = 2000$ nm, $W = 100, 150, \text{ dan } 200$ nm, $t = 2,5$ nm dan 5 nm, dan $\alpha = 0,01$ (Djuhana et al., 2009; Mardona and Djuhana, 2012). | 22 |
| 26 | Profil kecepatan DW untuk variasi $W = 100$ nm, 150 nm, dan 200 nm (a) $t = 2,5$ nm dan (b) $t = 5$ nm (Djuhana et al., 2009; Sumarta et al., 2011). | 22 |
| 27 | Struktur DW pada NW lebar 200 nm dan tebal 5 nm (a) $H = 1$ mT di bawah medan H_{WB} dengan struktur TW dan (b) $H = 3$ mT di atas medan H_{WB} dengan struktur AVW (Djuhana et al., 2009; Sumarta et al., 2011). | 23 |
| 28 | Profil energi demagnetisasi, exchange, dan total terhadap besar medan magnet B mT dengan variasi lebar (a) $t = 2,5$ nm dan (b) $t = 5$ nm. Medan Walker breakdown H_{WB} dinyatakan dengan garis putus-putus (Djuhana et al., 2009; Sumarta et al., 2011). | 24 |
| 29 | Profil medan H_{WB} terhadap durasi waktu pulsa I_p material CoFeB untuk $W = 50, 100, 150$ nm (Kurniawan et al., 2021). | 24 |
| 30 | Profil kecepatan v terhadap besar medan H_x material CoFeB untuk $t = 1, 2, 4$ nm. Medan H_{WB} terjadi pada medan tinggi untuk nilai I_p kecil (Kurniawan et al., 2021). | 25 |

| | | |
|----|---|----|
| 31 | Model NW pada simulasi dinamika <i>Bloch wall</i> material CoFeB dengan medan pulsa durasi 1 ns diberikan pada arah sumbu z (Nugraha and Djuhana, 2023). | 25 |
| 32 | Profil kecepatan DW material CoFeB bentuk NW terhadap variasi besar medan magnet, lebar, dan dan tebal (Nugraha and Djuhana, 2023). | 26 |
| 33 | Struktur DW tipe Bloch-wall untuk medan (a) 10 Oe, (b) 140 Oe, dan (c) 200 Oe (Nugraha and Djuhana, 2023). | 26 |
| 34 | Profil <i>creep velocity</i> dalam hubungan $\ln v = H^{-\frac{1}{4}}$ untuk variasi lebar dan tebal (Nugraha and Djuhana, 2023). | 26 |
| 35 | Model NW memiliki notch pada simulasi medan depinning dengan medan magnet pulsa 1 ns diberikan pada sumbu x dan magnetisasi awal adalah struktur TW berada di dalam notch (Djuhana et al., 2013). | 27 |
| 36 | (a) Profil medan H_d terhadap nilai s dan (b) Profil medan H_d terhadap nilai rasio d/s untuk lebar $W = 150$ nm dan 200 nm (Djuhana et al., 2013). | 27 |
| 37 | Model NW memiliki notch pada simulasi arus depinning dengan arus bentuk pulsa durasi 1 ns diberikan pada sumbu x (Djuhana et al., 2018). | 28 |
| 38 | Struktur DW pada notch NW pada $s = 70$ nm dan $\beta = 0$. DW mengalami pinning pada arus $J = 9,53 \times 10^{12}$ A/m ² (gambar kiri) dan DW mengalami depinning pada arus $J = 9,55 \times 10^{12}$ A/m ² (gambar kanan) (Djuhana et al., 2018). | 28 |
| 39 | Profil arus depinning J_d terhadap ukuran s dan variasi nilai β (Djuhana et al., 2018). | 29 |
| 40 | Model NW pada simulasi osilasi DW menggunakan fungsi sinusoidal yang diberikan pada sumbu x dengan $f_H = 200 - 2000$ MHz (Djuhana et al., 2023). | 29 |
| 41 | (a) Profil amplitudo terhadap frekuensi dan (b) frekuensi maksimum terhadap tebal NW (Djuhana et al., 2023). | 30 |
| 42 | Posisi DW dari profil M_x/M_y (atas) dan osilasi DW (a) $t = 2,5$ nm; $f = 280$ MHz, (b) $t = 2,5$ nm; $f = 470$ MHz, dan (c) $t = 10$ nm; $f = 1500$ MHz (Djuhana et al., 2023). | 30 |
| 43 | Profil harmonik DW dan energi untuk $t = 2,5$ nm (a) $f_H = 270$ MHz, (b) $f_H = 500$ MHz, dan (c) $f_H = 1000$ MHz (Djuhana et al., 2023). | 31 |
| 44 | Profil osilasi inharmonik DW pada frekuensi medan berosilasi $f_H = 1500$ MHz untuk ketebalan kawat t (a) $t = 5$ nm, (b) $t = 7,5$ nm, dan (c) $t = 10$ nm (Djuhana et al., 2023). | 31 |

Dede Djuhana

Daftar Tabel

- 1 Program micromagnetic dalam penelitian struktur dan dinamika domain (Leliaert and Mulkers, 2019). 7
- 2 Parameter material digunakan dalam simulasi micromagnetic (Bischoff and Jubb, 2014; López-Urías et al., 2005; Wang et al., 2014). 14
- 3 Perbandingan diameter kritis hasil teoretis (Brown Jr, 1968; Kittel, 1949) dan simulasi micromagnetic pada model bola untuk material Ni, Py, Fe, dan Co (Djuhana et al., 2021). 18
- 4 Nilai medan H_{WB} dan kecepatan DW v material Py dengan variasi tebal dan lebar (Djuhana et al., 2009; Sumarta et al., 2011). 23



Kata Sambutan



Bismillahirrahmanirrahimm

Assalamuallaikum warahtullahi wabarokatuh

Yang terhormat:

1. Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia.
2. Ketua, Sekretaris dan para anggota Majelis Wali Amanat Universitas Indonesia.
3. Rektor dan para Wakil Rektor Universitas Indonesia.
4. Ketua, Sekretaris, and Anggota Senat Akademik Universitas Indonesia.
5. Ketua, Sekretaris, dan Anggota Dewan Guru Besar Universitas Indonesia.
6. Para Dekan Fakultas di lingkungan Universitas Indonesia.
7. Dekan FMIPA UI.
8. Wakil Dekan Bidang Pendidikan, Penelitian, dan Kemahasiswaan FMIPA UI.
9. Wakil Dekan Bidang Sumber Daya, Ventura, dan Administrasi Umum.
10. Para Manajar dan Koordinator di lingkungan FMIPA UI.
11. Ketua, Sekretaris, dan Anggota Senat Akademik FMIPA UI.
12. Ketua, Sekretaris, dan Anggota Dewan Guru Besar FMIPA UI.
13. Para Ketua Departemen dan Ketua Program Studi di lingkungan FMIPA UI.
14. Para Dosen, Tenaga Pendidikan, Mahasiswa (Doktor, Magister, Sarjana) di lingkungan FMIPA UI.
15. Para Undangan, keluarga, dan hadirin yang saya muliakan.

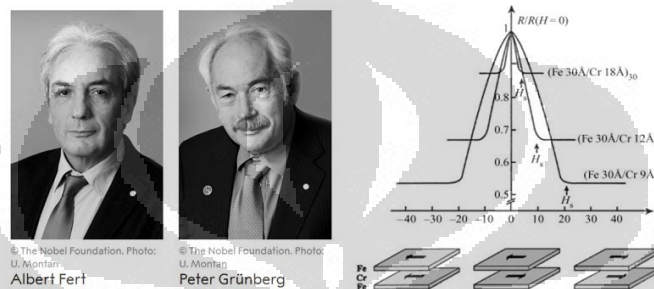
Para hadirin yang saya hormati, ijinkan saya menghaturkan puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada kita semua sehingga upacara pengukuhan ini dapat terlaksana dengan baik dan perkenankan saya untuk menyampaikan pidato ilmiah saya dengan judul:

Aplikasi Simulasi Micromagnetic pada Penelitian Struktur dan Dinamika Domain Material Feromagnetik

Dede Djuhana

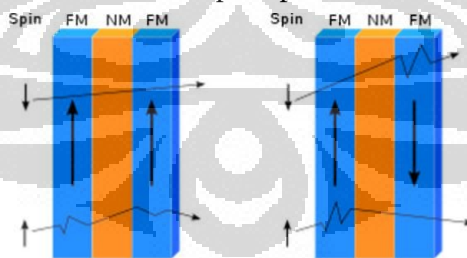
1 Pendahuluan

Penemuan efek *Giant Magnetoresistance* (GMR) pada tahun 1988 oleh Albert Fert (Baibich et al., 1988) dan Peter Grünberg (Binasch et al., 1989) telah menjadi tonggak kelahiran era *spintronic* atau *spin electronic* yaitu sebuah de-
 vais bekerja dengan memanfaatkan konfigurasi spin elektron sebagai sumber informasi (*digital bit*) selain muatan elektron (Wolf et al., 2001).



Gambar 1. Penerima Nobel Bidang Fisika Albert Fert dan Peter Grünberg atas penemuan GMR (gambar kiri) (Noble Prize, 2007) dan kurva MR bernilai tinggi saat konfigurasi spin anti-paralel dan bernilai rendah untuk konfigurasi paralel (gambar kanan) (Baibich et al., 1988).

Kedua ilmuwan tersebut mendapatkan hadiah Nobel Bidang Fisika pada tahun 2007 untuk penemuan efek GMR dan dampaknya pada perkembangan teknologi penyimpanan data (*magnetic recording*) (Noble Prize, 2007). Devais GMR sendiri berupa *spin valve* terdiri dari dua lapisan feromagnetik (FM) yaitu material Besi (Fe) dan disisipi material non-feromagnetik (NM) yaitu Kromium (Cr) dengan ketebalan nanometer, seperti pada Gambar. 2.

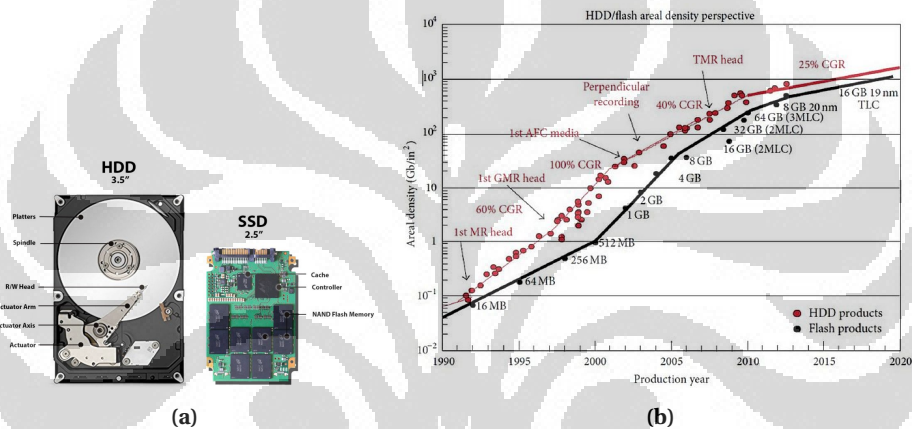


Gambar 2. Devais GMR berupa *spin valve* yaitu terdiri dari dua lapisan feromagnetik (FM) dan disisipi lapisan non-feromagnetik (NM). Tanda panah menyatakan arah orientasi spin dan hamburan elektron dalam material FM (Wikipedia, 2023).

Nilai hambatan GMR dinyatakan dalam kurva *magnetoresistance* (MR), seperti pada Gambar. 1 (gambar kanan), yaitu rasio pengukuran hambatan FM pada besar medan magnet tertentu R_H terhadap nilai hambatan pada kondisi

medan magnet nol $R(H = 0)$. Ketika konfigurasi spin anti-paralel menghasilkan MR lebih tinggi dibandingkan saat konfigurasi spin paralel.

Dalam era digital devais penyimpanan data telah menjadi kebutuhan penting baik untuk tujuan dokumentasi. Devais penyimpan data tipe *hard-disk drive* (HDD) adalah jenis penyimpan data yang populer dalam masyarakat kita karena harga terjangkau, kapasitas besar, dan cukup awet dalam jangka waktu tertentu. Walaupun sekarang ini telah banyak juga penggunaan tipe *solid-state drive* (SSD) sebagai penyimpan data, seperti pada laptop namun secara umum penyimpan data tipe HDD masih tetap digemari, seperti Gambar. 3(a).



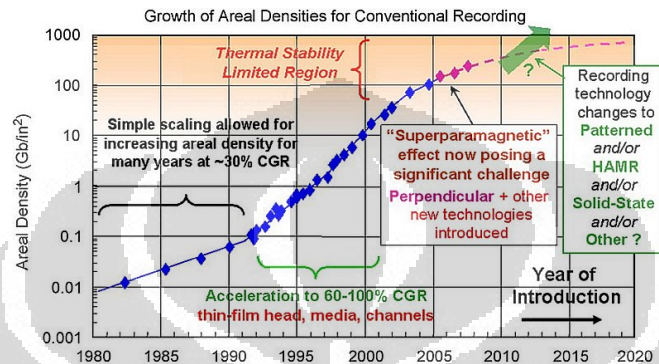
Gambar 3. (a) Bentuk HDD (3,5 inch) dan SSD (2,5 inch) (Taylor, 2020) dan (b) Grafik laju kapasitas HDD dan SSD dalam Gb/in^2 (Grochowski, 2012; Li, 2016).

Pada Gambar. 3(b) memperlihatkan grafik laju kapasitas HDD dan SSD dalam Gb/in^2 pada kurun waktu 1990-2020 (Grochowski, 2012). Laju pertumbuhan kapasitas HDD dan SSD meningkat secara eksponensial dan mengikuti pola hukum Moore seperti produksi transistor (Nature, 2023). Penemuan devais *MR Head*, perubahan proses perekaman dari *Longitudinal Magnetic Recording* (LMR) menjadi *Perpendicular Magnetic Recording* (PMR), dan juga aplikasi efek *Tunneling Magnetoresistance* (TMR) menghasilkan devais *TMR head* sangat signifikan meningkatkan kapasitas HDD (Wood et al., 2007).

Kemudian, Wood (2009) dalam artikelnya berjudul *Future hard disk drive systems* menyatakan tantangan dari proses perekaman media magnetik atau *magnetic recording* di masa mendatang adalah *writability*, *signal-to-noise*, dan *thermal stability*. Beliau juga memprediksi batas kapasitas perekaman media magnetik menggunakan teknologi konvensional adalah rata-rata sebesar

Dede Djuhana

1 Tb/in², seperti ditunjukkan pada Gambar. 4. Laju pertumbuhan kapasitas perekaman magnetik akan saturasi sehingga diperlukan inovasi baru meningkatkan kapasitasnya, seperti menggunakan *patterned-media*, *assisted-thermal* atau *solid state*.

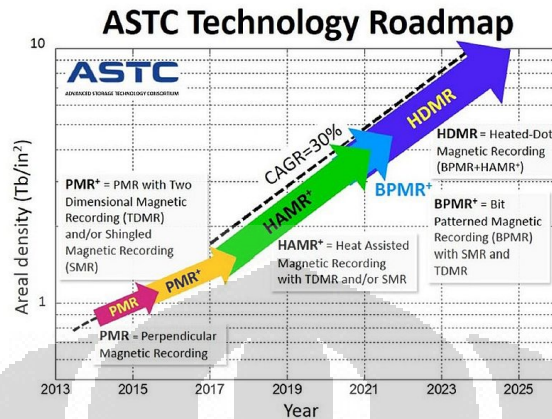


Gambar 4. Laju kerapatan kapasitas magnetic recording diprediksi akan saturasi dan maksimum sebesar 1 Tb/in² (Wood, 2009).

Untuk mendapatkan kerapatan kapasitas besar dari perekaman media magnetik adalah pengurangan ukuran *grain*. Pengurangan ukuran ini akan berdampak pada magnetisasi *grain* menjadi tidak stabil atau dikenal sebagai *superparamagnetic limit* (SPM). Magnetisasi *grain* begitu mudah berubah dari satu keadaan menjadi keadaan lain karena pengaruh temperatur. Transisi waktu magnetisasi *grain* pada daerah SPM dikenal sebagai *Néel relaxation time*. Artinya jika mampu mengontrol kondisi magnetisasi terhadap fluktuasi termal pada *grain* menjadi kunci kestabilan magnetisasi pada daerah SPM.

Terminologi *stability thermal factor* (STF) diperkenalkan untuk mengukur kestabilan *grain* pada daerah SPM, yaitu rasio antara energi anisotropy dan energi termal atau $\Delta = K_u V / k_B T$, dengan K_u , V , k_B dan T adalah masing-masing konstanta anisotropi, volume *grain*, konstanta Boltzmann, dan temperatur. Batas nilai Δ agar stabil dalam waktu 10 tahun sebesar 60 (Kumar et al., 2022; Pirmamanayagam and Srinivasan, 2009).

Beberapa metode telah diaplikasikan untuk mengatasi SPM, antara lain metode *Heat-assisted magnetic recording* (HAMR) (Kryder, 2002; Kryder et al., 2008) dan *Microwave-assisted magnetic recording* (MAMR) (Shiroishi et al., 2009; Zhu et al., 2008). Berdasarkan perkembangan dan tantangan perekaman media magnetik *Advance storage technology consortium* (ASTC) menyatakan tekno-

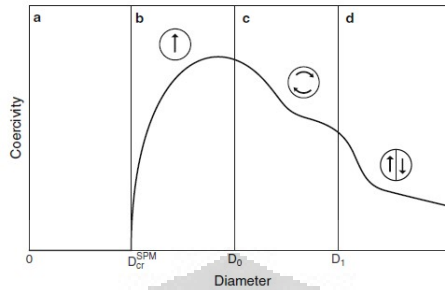


Gambar 5. Peta jalan teknologi HDD dari *Advance Storage Technology Consorsium (ASTC)* dari PMR, HAMR, BPMR, dan HDMR (IDEMA, 2014).

logi perekaman media magnetik di masa mendatang adalah bertumpu pada pengembangan metode HAMR, BPMR, dan HDMR, seperti pada Gambar. 5 (IDEMA, 2014).

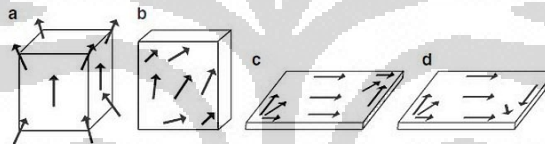
Berdasarkan paparan di atas bahwa pemahaman sifat-sifat material feromagnetik dan paduannya pada skala nanometer, seperti ukuran diameter kritis, struktur domain, dan energi sistem, menjadi hal penting baik sisi fundamental maupun tujuan aplikasi. Penelitian tentang *small particle* telah dilakukan oleh Kittel tahun 1946 berjudul *Theory of the structure of ferromagnetic domains in film and small particles* (Kittel, 1946) dan tahun 1949 berjudul *Physical Theory of Ferromagnetic Domains* (Kittel, 1949) tentang struktur domain, sifat anisotropi, dan diameter kritis dalam model bola Elmore (1938a); Kennard (1939); Landau and Lifshitz (1935). Penelitian tentang struktur domain dan ukuran diameter kritis juga dijelaskan oleh beberapa penelitian, antara lain Brown Jr (1968), Dunlop (1973), Ferré et al. (1997), Skomski (2003) dan Guimarães (2009).

Analisis micromagnetic pada model bola memperlihatkan struktur terjadi yaitu *single domain* (SD) dan *multi domain* (MD), seperti pada Gambar. 6. Perubahan SD menjadi MD berhubungan dengan perubahan energi demagnetisasi dan energi exchange serta ukuran diameter kritis (Boardman et al., 2004; Djuhana et al., 2021; Kákay and Varga, 2005). Selain model bola, struktur domain model kubus juga menjadi perhatian dalam penelitian nanopartikel. Beberapa penelitian struktur domain pada model kubus antara Hubert and Schäfer



Gambar 6. Daerah (a) Daerah superparamagnetik (spm) $0 < D < D_{cr}^{spm}$, (b) Single domain $D_{cr}^{spm} < D < D_0$, (c) Vortex $D_0 < D < D_1$ untuk soft-magnetic dan (d) Multi domain $D > D_1$ (Guimarães, 2009).

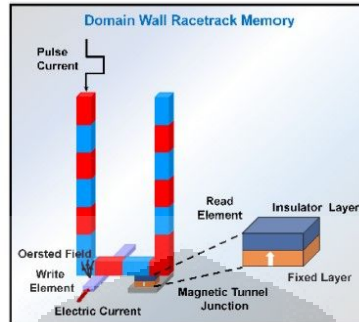
(2009); Kronmüller and Fähne (2003); Piao et al. (2010); Schabes and Bertram (1988) memperlihatkan struktur domain seperti *flower*, *vortex*, dan struktur kompleks yaitu kombinasi vortex dan struktur lainnya.



Gambar 7. Struktur (a) *Flower*, (b) *Leaf*, (c) Tipe S, dan (d) Tipe C (Fruchart and Thiaville, 2005; Guimarães, 2009).

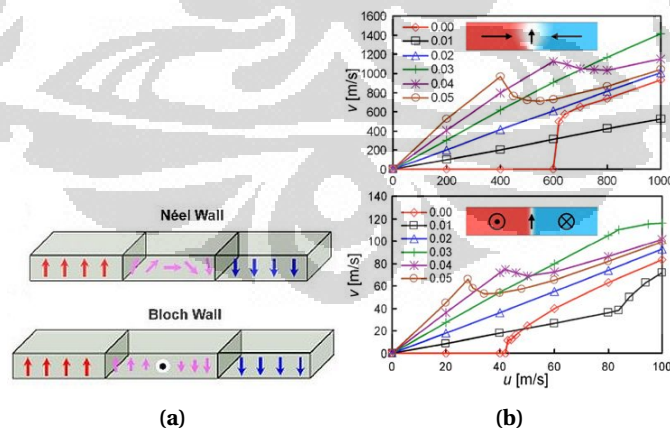
Perubahan model kubus menjadi model lapisan tipis atau *thin film* memperlihatkan beberapa struktur domain, seperti struktur *flower state*, *leaf*, *S-state*, dan *C-state* (Djuhana et al., 2020; Fidler and Schrefl, 2000; Fidler et al., 2002; Fruchart and Thiaville, 2005; Kasperski et al., 2013; Kläui and Fernandes Vaz, 2007; Rave and Hubert, 2000). Pada Gambar. 7 memperlihatkan beberapa struktur domain terbentuk pada bentuk lapisan tipis.

Pada tahun 2008, grup peneliti dari IBM Almaden, USA yang dipimpin oleh Stuart Parkin mempublikasikan sebuah devais perekaman magnetik bernama *Racetrack memory* (RM), seperti diilustrasikan pada Gambar. 8. Pada devais RM informasi *data bit* berasal dari pergerakan konfigurasi spin DW sepanjang nanowire dari injeksi arus terpolarisasi. Material RM terbuat dari Permalloy (Py) ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) bersifat *soft magnetic* dengna ukuran lebar 100 nm, mampu menghasilkan kecepatan DW sebesar 800-1000 m/s dan berpotensi memiliki kapasitas di atas 1 Tb/in² (Parkin et al., 2008; Parkin and Yang, 2015).



Gambar 8. Ilustrasi devais RM menyimpan data bit dari konfigurasi spin DW (warna merah dan biru). Injeksi arus mampu menggerakkan DW dengan kecepatan 800-1000 m/s (Kumar et al., 2022; Parkin et al., 2008; Parkin and Yang, 2015).

Devais RM berupa *solid-state memory, non-volatile*, dan menjadi alternatif pengganti peran SSD di masa mendatang (Kumar et al., 2022; Parkin et al., 2008; Parkin and Yang, 2015). Kemampuan mengontrol efek *Walker breakdown* dan *Joule heating* menjadi tantangan pengembangan devais agar struktur domain stabil (Beach et al., 2008, 2005; Hayashi et al., 2006; Kläui et al., 2003; Thiaville et al., 2005). Di sisi lain dinamika DW pada material *perpendicular magnetic anisotropy* (PMA), seperti CoFeB atau Co/Pt juga menarik, yaitu struktur DW tidak berubah dalam daerah Walker breakdown jika dibandingkan material *in-plane magnetic anisotropy* (IMA) (Albert et al., 2012; Metaxas et al., 2007), seperti Gambar. 9.



Gambar 9. (a) Struktur DW pada nanowire: tipe Néel wall dan tipe Bloch wall bersifat PMA (Kumar et al., 2022) dan (b) Profil kecepatan DW pada model IMA dan PMA (Fukami et al., 2008) .

Dede Djuhana

Salah satu *tool* penting dalam penelitian struktur domain magnet adalah simulasi *micromagnetic* (Aharoni, 2001; Hubert and Schäfer, 2009; Leliaert and Mulkers, 2019). Dalam dua dekade terakhir hasil simulasi *micromagnetic* telah banyak membantu peneliti dalam analisis struktur domain feromagnetik. Perangkat lunak *micromagnetic* pertama diluncurkan adalah program *Object Oriented Micromagnetic Framework* (OOMMF) dari NIST bersifat publik (Donahue and Porter, 1999). Penyelesaian dinamika magnetisasi fungsi waktu dalam *micromagnetic* umumnya menggunakan persamaan LLG (Gilbert, 1955, 2004; Landau and Lifshitz, 1935) dapat berupa *finite difference* (FD) (Miltat and Donahue, 2007) ataupun *finite element* (FE) (Schrefl et al., 2007).

Pada Tabel 1 memperlihatkan beberapa program *Micromagnetic* untuk penelitian domain struktur termasuk metode dan sifatnya. Penulis sendiri telah memakai simulasi *micromagnetic* OOMMF sejak studi doktor sampai sekarang dan ada 28 publikasi telah dipilih dalam *OOMMF citation list*, seperti pada tautan https://math.nist.gov/oommf/oommf_cites.html.

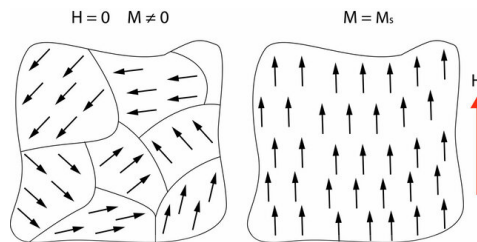
Tabel 1. Program *micromagnetic* dalam penelitian struktur dan dinamika domain (Leliaert and Mulkers, 2019).

| Nama Program | Metode | Sifat | Tahun |
|---------------------------------------|--------|---------|-------|
| OOMMF (Donahue and Porter, 1999) | FD | Publik | 1999 |
| TETRAMAG (Kákay et al., 2010) | FE | Lisensi | 2010 |
| MICROMAGUS (MICROMAGUS, 2003) | FD | Lisensi | 2003 |
| MAGPAR (Scholz et al., 2003) | FE | Publik | 2003 |
| NMAG (Fischbacher et al., 2007) | FE | Publik | 2007 |
| MUMAX (Vansteenkiste and Wiele, 2011) | FD | Publik | 2011 |
| MICROMAGNUM (Abert et al., 2012) | FE | Publik | 2012 |
| MAGNUMFe (Abert et al., 2013) | FE | Publik | 2013 |

2 Dinamika Domain dan *Micromagnetic*

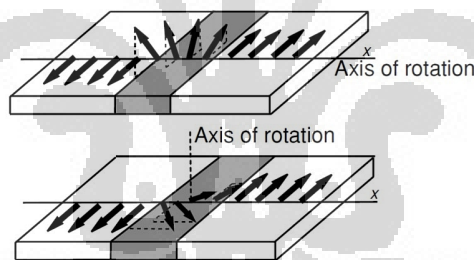
2.1 Domain dan Domain wall

Teori **domain magnet** pertama kali dikemukakan oleh Weiss tahun 1907 dalam karyanya berjudul *Hypothesis of molecular field and ferromagnetic properties* (Weiss, 1907). Weiss menyatakan bahwa domain magnet adalah daerah dalam material feromagnetik memiliki arah magnetisasi tertentu pada keadaan di bawah *temperatur Curie*. Daerah yang memisahkan antar domain magnet disebut dinding domain atau *domain wall* (DW), seperti pada Gambar. 10.



Gambar 10. Ilustrasi domain magnetik dalam feromagnetik memiliki arah tertentu $H = 0$ (gambar kiri) dan arah spin dalam domain mengikuti arah medan luar (gambar kanan).

Konsep DW pertama kali dikemukakan oleh Felix Bloch (Bloch, 1927) menyatakan konfigurasi momen magnetik dalam DW berubah secara perlahan-lahan dari satu domain ke domain yang lain membentuk orientasi sudut 180° dan dikenal sebagai *Bloch wall*. Bloch menyatakan terdapat kompetisi energi antara energi exchange dan energi anisotropi dalam pembentukan DW dalam feromagnetik. Tipe lain DW dengan perubahan konfigurasi momen magnetik sejajar dengan permukaan dikenal sebagai *Néel wall*. Struktur DW bentuk *Bloch wall* dan *Néel wall* (Coey, 2009), seperti pada Gambar. 11.



Gambar 11. Ilustrasi orientasi momen magnetik pada Bloch wall (gambar atas) dan Néel wall (gambar bawah) (Coey, 2009)

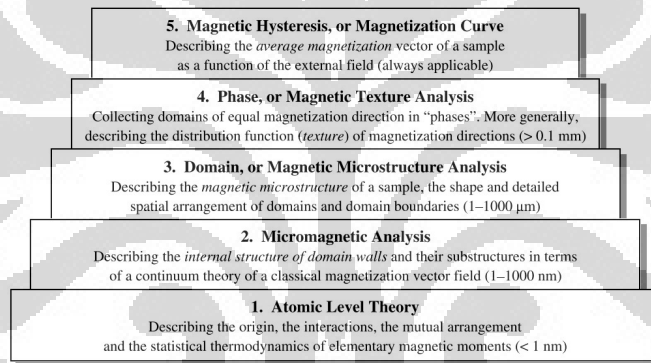
2.2 Konsep Micromagnetic

Micromagnetic adalah bagian dari bidang kemagnetan yang mempelajari tentang struktur dinamika domain magnet dengan pendekatan *Continuum* untuk menjelaskan sifat dan dinamika struktur domain magnet. Pondasi dari teori Continuum adalah fisika klasik dan medan elektromagnetik (Hubert and Schäfer, 2009; Kronmüller, 2007) dan skala penelitian bidang micromagnetic adalah orde 1-1000 nm dan tidak membahas sampai struktur atomik material (Gambar. 12). Beberapa publikasi berkaitan pada pengembangan bidang micromagnetic, seperti Landau and Lifshitz (1935), Kittel (1946), Gilbert (1955,

Dede Djuhana

2004), Brown Jr (1963), Aharoni (1991), Kronmüller (2007); Kronmüller and Fähne (2003), Miltat and Donahue (2007), Fidler and Schrefl (2000), dan sebagainya.

Penelitian Landau dan Lifshitz dalam artikelnya berjudul *On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies* menjadi awal dari teori micromagnetic (Landau and Lifshitz, 1935). Pendekatan Landau dan Lifshitz merupakan persamaan diferensial yang cukup kompleks untuk menjelaskan tentang distribusi momen magnetik pada sistem feromagnetik dan dikenal sebagai persamaan Landau-Lifshitz (LL). Selanjutnya, pendekatan LL banyak dimanfaatkan untuk menjelaskan fenomena material feromagnetik, seperti Elmore (1938a,b), Kennard (1939), Kittel (1946, 1949).



Gambar 12. Skala penelitian micromagnetic: 1-1000 nm dan menjelaskan struktur domain magnet berdasarkan teori Continuum (Hubert and Schäfer, 2009).

Tahun 1955, Gilbert dalam artikelnya berjudul *A Lagrangian formulation of the gyromagnetic equation of the magnetic field* menjelaskan kembali tentang dinamika momen magnetik dalam pengaruh medan magnet dan fenomena *gyromagnetic* dalam persamaan LL (Gilbert, 1955). Kemudian esensi artikel ini dipublikasikan kembali pada tahun 2004 dengan judul *A phenomenological theory of damping in ferromagnetic material* (Gilbert, 2004) dan dikenal sebagai persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG).

Tahun 1963, William Brown Jr. menerbitkan sebuah buku berjudul *Micromagnetic* menjelaskan sistem micromagnetic pada material feromagnetik pada keadaan kesetimbangan. Brown juga memaparkan secara sistematis proses magnetisasi material feromagnetik berdasarkan energi bebas Gibbs dan energi minimum sistem pada kondisi kesetimbangan (Brown Jr, 1963). Ener-

gi pada sistem micromagnetic dijelaskan dalam bentuk energi-bebas Gibbs G yang berkaitan dengan medan luar \mathbf{H} , magnetisasi \mathbf{M} , dan temperatur sistem T (d'Aquino, 2004).

$$G(\mathbf{M}, \mathbf{H}, T) = U(\mathbf{M}) - TS - \mu_0 \mathbf{H} \cdot \mathbf{M} \quad (1)$$

dengan U adalah energi-dalam dan S adalah entropi sistem. Kemudian energi-bebas Gibbs G dituliskan menjadi energi-bebas Landau G_L berkaitan dengan perubahan medan magnet luar dan magnetisasi. Energi-bebas Landau G_L diasumsikan meliputi energi exchange, anisotropi, magnetostatik, dan Zeeman yaitu

$$G_L(\mathbf{M}, \mathbf{H}) = \int_{\Omega} \left(A(\nabla \mathbf{m})^2 + E_{ani}(\mathbf{m}) - \frac{1}{2} \mu_0 \mathbf{H}_m \cdot \mathbf{M} - \mu_0 \mathbf{H}_a \cdot \mathbf{M} \right) dV \quad (2)$$

Kondisi energi minimum sistem diperoleh dengan syarat $\partial G_L / \partial \mathbf{m} = 0$ maka Pers(2) menjadi

$$\begin{aligned} \delta G_L = \int_{\Omega} \mathbf{m} \times \left[2\nabla \cdot (A\nabla \mathbf{m}) - \frac{\partial E_{an}}{\partial \mathbf{m}} + \mu_0 M_s \mathbf{H}_m + \mu_0 M_s \mathbf{H}_a \right] d\theta dV \\ + \int_{\partial\Omega} \left[2A \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial \mathbf{n}} \times \mathbf{m} \right] \cdot \delta\theta dA = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

dengan bentuk $(\partial \mathbf{m} / \partial \mathbf{n} \times \mathbf{m} = 0)$ atau $\partial \mathbf{m} / \partial \mathbf{n} = 0$ menyatakan bahwa vektor \mathbf{m} bersifat ortogonal sehingga medan efektif \mathbf{H}_{eff} menurut Brown adalah

$$\mathbf{H}_{eff} = \frac{2}{\mu_0 M_s} \nabla \cdot (A\nabla \mathbf{m}) - \frac{1}{\mu_0 M_s} \frac{\partial E_{an}}{\partial \mathbf{m}} + \mathbf{H}_m + \mathbf{H}_a \quad (4)$$

Bentuk Pers(3) dan Pers(4)

$$\mu_0 M_s \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{eff} = 0 \quad \text{dan} \quad \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (5)$$

Bentuk hubungan pada Pers(5) di kenal sebagai **persamaan Brown**. Persamaan ini penting dalam sistem micromagnetic untuk menjelaskan keadaan energi sistem feromagnetik pada keadaan energi minimum.

2.3 Persamaan LL dan LLG

Konsep dasar persamaan LL dan LLG adalah sebuah momen magnetik \mathbf{m} dalam medan magnet luar \mathbf{H} menghasilkan sebuah torsi \mathbf{T} dan hubungan antara momen magnetik \mathbf{m} dan momentum angular \mathbf{L} adalah

$$\mathbf{T} = d\mathbf{L}/dt = \mathbf{m} \times \mathbf{H}, \quad \mathbf{m} = -\gamma \mathbf{L} = -g \frac{|e|}{2m_e} \mathbf{L} \quad (6)$$

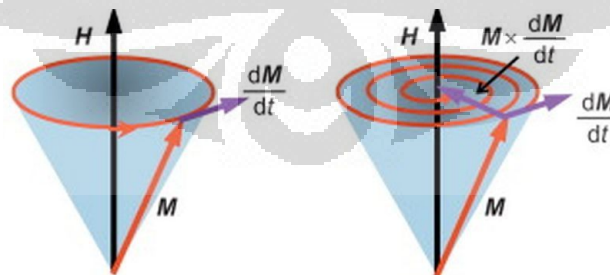
Konstanta γ adalah rasio gyromagnetik $2,21 \times 10^5 \text{ mA}^{-1}\text{s}^{-1}$. Nilai $g \approx 2$ adalah faktor Landé, massa elektron $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ dan muatan elektron $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Perubahan momen angular terhadap waktu pada Pers(6) adalah

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = -\gamma(\mathbf{m} \times \mathbf{H}) \rightarrow \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} \quad (7)$$

Pers(7) ini dikenal sebagai gerak precesi momen magnetik dengan frekuensinya disebut *frekuensi Larmor* $f_L = \gamma \mathbf{H}/2\pi$ (Coey, 2009). Medan \mathbf{H}_{eff} adalah medan efektif yaitu medan-medan yang terlibat dalam proses magnetisasi. Berdasarkan konsep Landau dan Lifshitz maka Pers(7) dapat dituliskan dengan melibatkan faktor redaman yaitu

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} - \frac{\lambda}{M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) \quad (8)$$

konstanta λ adalah faktor redaman ($\lambda > 0$) dan besar magnetisasi \mathbf{M} adalah $|\mathbf{M}| = M_s$ yaitu magnetisasi saturasi material feromagnetik. Bentuk Pers(8) ini dikenal sebagai persamaan LL dan gerak precesi momen magnetik karena medan luar diilustrasikan pada Gambar. 13.



Gambar 13. Ilustrasi gerak precesi pada sebuah momen magnetik \mathbf{M} dalam pengaruh medan magnet luar \mathbf{H} . Tanpa faktor redaman (gambar kiri) dan melibatkan faktor redaman (gambar kanan) (Barman and Haldar, 2014).

Kemudian, Gilbert pada tahun 1955 menyatakan bahwa model persamaan LL kurang akurat pada faktor redaman yang cukup besar. Gilbert melakukan modifikasi pada Pers(8) menjadi persamaan LLG

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (9)$$

$$= -\frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha \gamma}{(1 + \alpha^2) M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) \quad (10)$$

Konstanta α adalah faktor redaman dari konsep Gilbert ($\alpha > 0$) dan hubungan faktor redaman antara persamaan LL dan LLG

$$\gamma_L = \frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} \quad \text{dan} \quad \lambda = \frac{\gamma \alpha}{(1 + \alpha^2)} \quad (11)$$

dengan γ_L adalah gyromagnetic Landau dan γ adalah gyromagnetic Gilbert. Hal lain juga memperlihatkan Pers(11) untuk faktor redaman α bernilai kecil maka suku $(1 + \alpha^2) \approx 1$ sehingga persamaan LLG dapat disederhanakan menjadi persamaan LL. Ketika kondisi untuk $\lambda \rightarrow \infty$ maka nilai $(\partial \mathbf{M} / \partial t) \rightarrow \infty$ pada persamaan LL dan $\alpha \rightarrow \infty$ maka nilai $(\partial \mathbf{M} / \partial t) \rightarrow 0$ pada persamaan LLG. Dengan kata lain bahwa makin besar faktor redaman menyebabkan gerak pre-sesi makin melambat.

Berdasarkan hasil penelitian Berger tahun 1974 (Berger, 1978, 1984) dan Slonczewski tahun 1996 (Slonczewski, 1996) menunjukkan adanya interaksi arus terpolarisasi dengan momen magnetik lokal dapat mempengaruhi dinamika domain magnet. Persamaan LLG pada Pers(9) yang melibatkan arus terpolarisasi dapat dituliskan

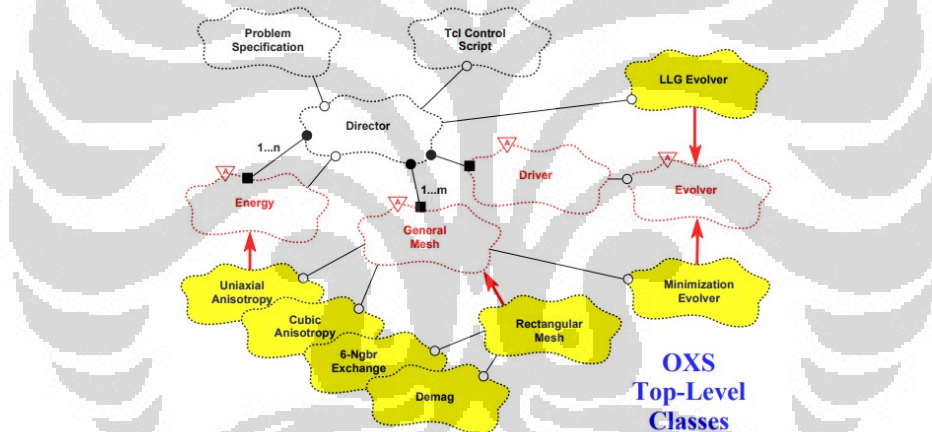
$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \alpha \mathbf{m} \times \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} - (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{m} + \beta \mathbf{m} \times [(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{m}] \quad (12)$$

Pers(12) dikenal sebagai persamaan LLG *spin transfer torque* (STT) dengan $\mathbf{m} = \mathbf{M} / M_s$, arus terpolarisasi $\mathbf{u} = g \mu_B P \mathbf{J} / 2e M_s$ dengan g adalah faktor Landé (≈ 2), \mathbf{J} adalah kerapatan arus, P adalah polarisasi arus, β adalah faktor non-adiabatik, μ_B adalah magneton Bohr, $9,274 \times 10^{-24}$ J/T, dan muatan elektron $e = 1,602 \times 10^{-19}$ J (Thiaville et al., 2005).

Dede Djuhana

2.4 Micromagnetic OOMMF

Program *Object Oriented Micromagnetic Framework* (OOMMF) dari *National Institute of Standards and Technology* (NIST) merupakan program bersifat publik atau *free software*. Program OOMMF dikembangkan oleh Mike Donahue dan Don Porter dan pertama kali diluncurkan pada tahun 1998 dengan versi **OOMMF 1.0** (Donahue and Porter, 1999). Program OOMMF dikembangkan dalam bahasa pemrograman C++ dan Tcl/Tk diharapkan dapat bekerja dengan baik pada semua sistem operasi, seperti Windows, Linux ataupun MacOSX. Penyelesaian magnetisasi fungsi waktu dari material feromagnetik menggunakan suatu *interface* bernama *OOMMF eXtensible Solver* (Oxs) atau **Oxsii** berbasis *graphical user interface* (GUI). Informasi lengkap program OOMMF dapat dilihat pada tautan laman <https://math.nist.gov/oommf>.



Gambar 14. Deskripsi proses simulasi OOMMF yang melibatkan *OOMMF eXtensible Solver* pada sebuah model feromagnetik (Donahue and Porter, 1999).

File MIF dibutuhkan untuk simulasi OOMMF yang mengandung parameter model dan konfigurasi Oxs_Ext seperti penjelasan di atas. Data luaran hasil simulasi OOMMF terdiri dari (1) **File ODT** berisi informasi energi, magnetisasi, waktu, sudut dan jumlah iterasi (ada 23 kolom data) dan (2) **File OMF** berisi informasi *image* atau citra proses magnetisasi dan struktur domain. Untuk visualisasi 3-D data OMF dikonversi menjadi data VTK menggunakan *OV2VTK* (Fischbacher et al., 2007) dan dapat ditampilkan melalui program *Mayavi* (Rama-chandran, 2007) atau *Muview2* (Rowland, 2014).

2.5 Model Simulasi Micromagnetic

Simulasi micromagnetic pada penelitian menggunakan model bola (Djuhana et al., 2021), model nanowire lurus (Djuhana et al., 2009; Kurniawan et al., 2021; Nugraha and Djuhana, 2023), dan nanowire notch (Djuhana et al., 2023, 2010a, 2013) dan pengaturan aplikasi medan luar dibedakan menjadi 4 bagian yaitu

1. Simulasi tanpa aplikasi medan luar atau *ground state* untuk mendapatkan informasi struktur domain pada kondisi energi minimum dan transisi struktur dari SD menjadi MD.
2. Simulasi dengan aplikasi medan luar bentuk pulsa untuk mengamati dinamika ketika ada medan luar, informasi profil kecepatan DW, dan medan Walker breakdown.
3. Simulasi medan depinning untuk mendapatkan informasi besar medan diperlukan untuk melepaskan DW dari sebuah notch.
4. Simulasi medan osilasi untuk mengamati frekuensi respon domain wall dari frekuensi dan bentuk osilasi domain wall, seperti simetris and asimetris.

Parameter material digunakan dalam simulasi diberikan pada Tabel 2 dengan ukuran sel mendekati ukuran *exchange length* $2 \times 2 \times 2 \text{ nm}^3$ dan faktor damping $\alpha = 0,1 - 0,01$ (McMichael and Donahue, 1997).

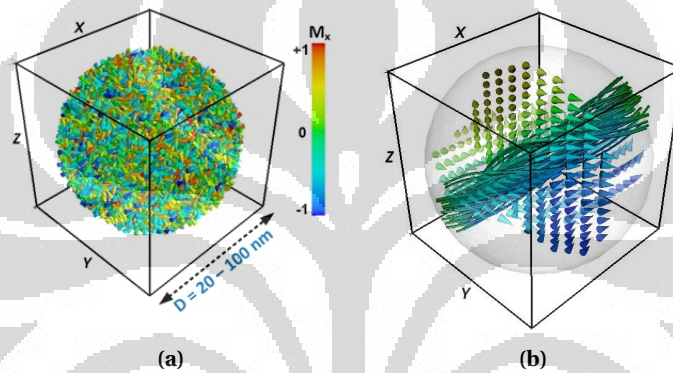
Tabel 2. Parameter material digunakan dalam simulasi micromagnetic (Biskeborn and Jubert, 2014; López-Urías et al., 2005; Wang et al., 2014).

| Material | $M_s \times 10^5 \text{ A/m}$ | $A \times 10^{-12} \text{ J/m}$ | $K \times 10^3 \text{ J/m}^3$ |
|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Ni | 4,9 | 9,0 | -5,7 |
| Py | 8,6 | 13 | 0,1 |
| Fe | 17 | 21 | 48 |
| Co | 14 | 30 | 530 |
| BaFe ₁₂ O ₁₉ | 2,75 | 20 | 96 |
| CoFeB | 8,75 | 10 | 700 |

3 Simulasi Micromagnetic Kondisi Ground State

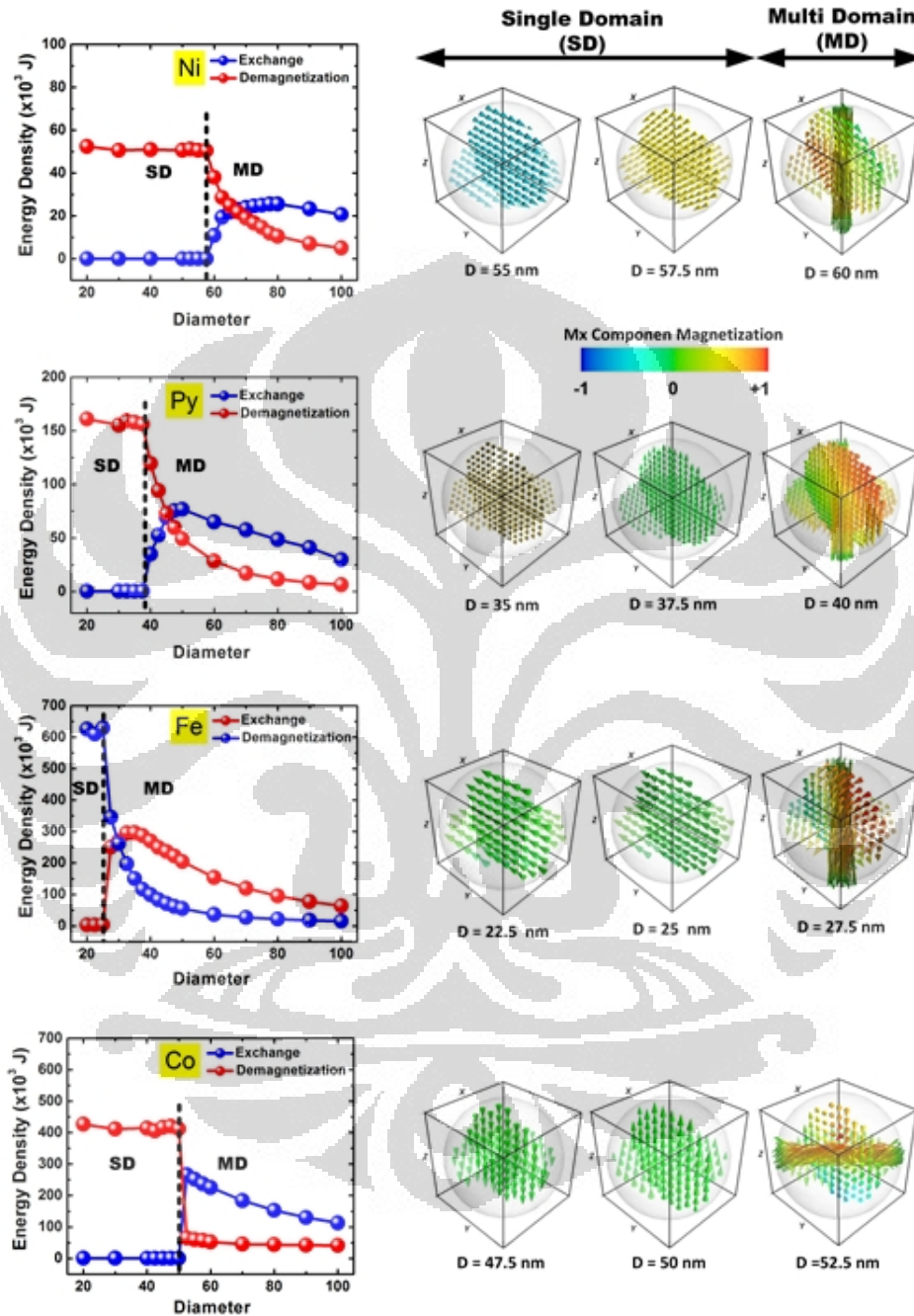
3.1 Model Bola

Simulasi micromagnetic kondisi tanpa aplikasi medan luar dilakukan pada material Ni, Py, Fe, dan Co dengan model bola. Tujuan simulasi ini mengamati perubahan struktur domain pada kondisi energi minimum, profil energi, dan ukuran diameter pada saat transisi SD menjadi MD. Ukuran diameter adalah $D = 20 - 100$ nm dengan parameter material diberikan pada Tabel 2 dan magnetisasi awal adalah bentuk acak, seperti Gambar. 15.



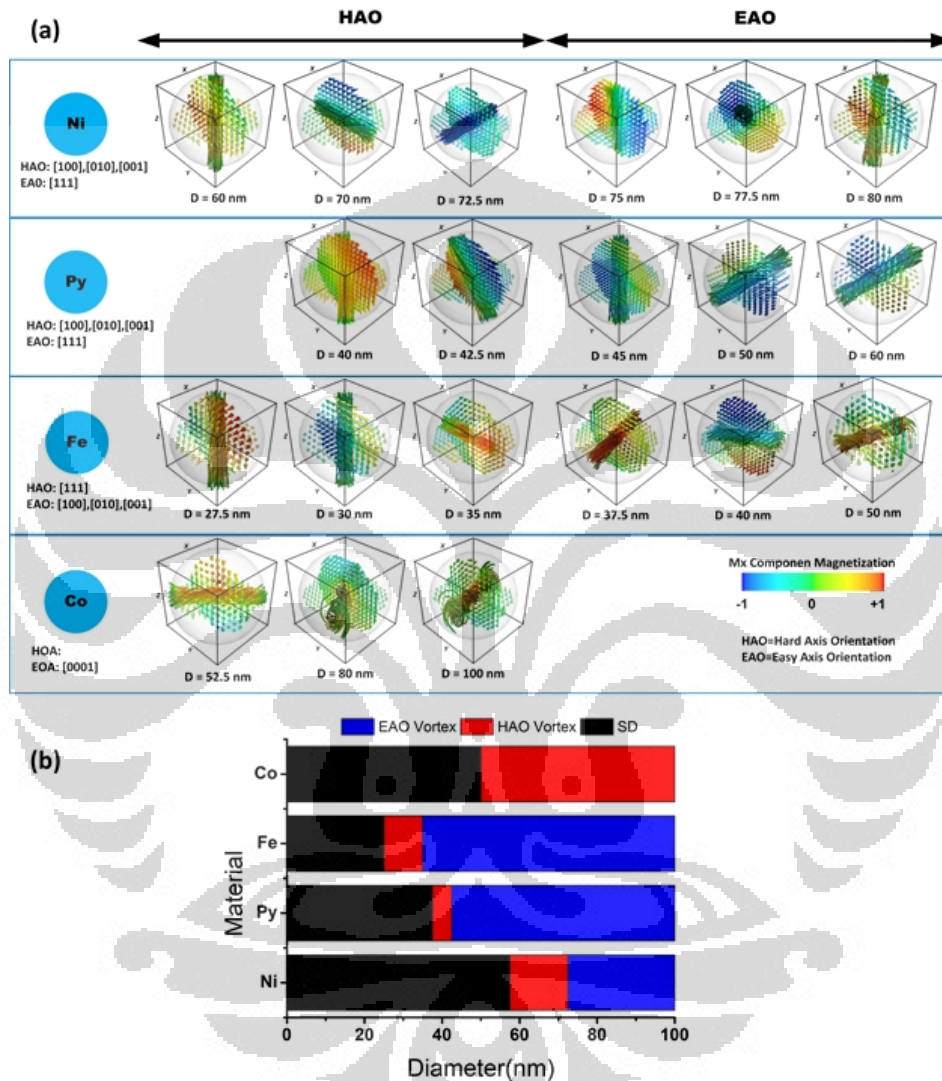
Gambar 15. Model bola dalam simulasi micromagnetic tanpa medan luar (a) Konfigurasi spin awal adalah acak dan (b) Konfigurasi spin pada kondisi minimum. Batang warna adalah magnetisasi arah M_x (Djuhana et al., 2021).

Profil energi model bola untuk setiap material pada kondisi minimum ditunjukkan pada Gambar. 16. Pada diameter kecil, energi demagnetisasi teramat mendominasi terhadap energi exchange. Seiring meningkatnya ukuran diameter bola, energi exchange cenderung lebih besar dari energi demagnetisasi. Perubahan struktur domain pada model bola diidentifikasi oleh penurunan energi demagnetisasi dan meningkatnya energi exchange ditandai dengan garis putus-putus yaitu Ni pada $D = 57,5$ nm, Py pada $D = 37,5$ nm, Fe pada $D = 25$ nm, dan Co pada $D = 50$ nm. Sedangkan diameter kondisi saat pertama struktur MD adalah Ni terjadi pada $D = 60$ nm, Py pada $D = 40,0$ nm Fe pada $D = 27,0$ nm, dan Co pada $D = 52,5$ nm. Profil energi dan struktur vortex (VW) diperoleh dari simulasi ini memiliki kesamaan dengan penelitian Kákay and Varga (2005). Arah orientasi vortex pada daerah MD diberikan pada Gambar. 17 yaitu EOA dan HOA.



Gambar 16. Profil energi exchange dan demagnetisasi terhadap variasi diameter untuk Ni, Py, Fe, dan Co. Perubahan struktur domain dari SD ke MD pada diameter tertentu. Garis putus-putus menyatakan batas antara SD dan MD dan batang warna adalah magnetisasi komponen M_x (Djuhana et al., 2021).

Dede Djuhana



Gambar 17. (a) Arah orientasi inti VW untuk Ni, Py, Fe, dan Co dalam struktur MD. Arah dua tipe orientasi yaitu EAO dan HAO. Orientasi struktur VW dari Ni dan Py: EAO pada arah [111] dan HAO pada arah [100],[010],[001]. Untuk Fe: EAO pada arah [100],[010],[001] dan HAO arah [111]. Untuk Co hanya memiliki HAO karena EOA pada daerah SD dan (b) Jangkauan orientasi EAO dan HAO untuk semua material dari D = 20-100 nm (Djuhana et al., 2021).

Prediksi diameter kritis untuk *small partikel* feromagnetik terdapat 2 pendekatan yaitu, pertama pendekatan Kittel (1949)

$$D_{cr} = \frac{72\sqrt{AK}}{\mu_0 M_s^2} \quad (13)$$

Kedua, pendekatan Brown Jr (1968) yaitu D_0, D_1 dan D_2 . Diameter kritis untuk batas atas struktur SD D_0 adalah

$$D_0 = 7,211 \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}} = 7,211 l_{ex} \quad (14)$$

Diameter kritis untuk transisi dari struktur vortex menjadi MD untuk material *soft magnetic* D_1 adalah

$$D_1 = \frac{9,0584 \sqrt{2A/\mu_0 M_s^2}}{1 - 2,08075(2K/\mu_0 M_s^2)} = \frac{9,0584}{1 - 2,8075\kappa} l_{ex} \quad (15)$$

Ukuran diameter kritis kondisi transisi dari SD menjadi MD untuk material *hard magnetic* D_2 adalah

$$D_2 = \frac{9\pi \sqrt{2A(K + 2\sigma \mu_0 M_s^2)}}{\mu_0 M_s^2 (3\sigma - 2)} \frac{9\pi \sqrt{\kappa + 4\sigma}}{\sqrt{2}(3\sigma - 2)} l_{ex}, \quad \sigma = 0,785398 \quad (16)$$

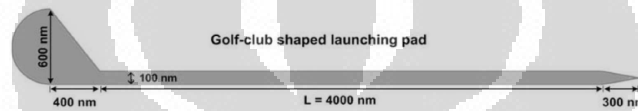
Pada Tabel 3 menunjukkan perbandingan hasil micromagnetic dan pendekatan teoretis, Kittel dan Brown. Diameter kritis hasil micromagnetic bersesuaian dengan perhitungan teoretis (Djuhana et al., 2021).

Tabel 3. Perbandingan diameter kritis hasil teoretis (Brown Jr, 1968; Kittel, 1949) dan simulasi micromagnetic pada model bola untuk material Ni, Py, Fe, dan Co (Djuhana et al., 2021).

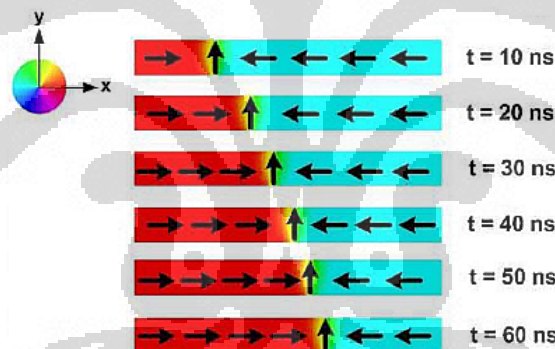
| Material | Teoretis (nm) | | | Micromagnetic (nm) | |
|----------|---------------|-------|-------|--------------------|----------|
| | D_{cr} | D_0 | D_1 | D_{SD} | D_{MD} |
| Ni | 54,05 | 55,70 | 78,27 | 57,5 | 60,0 |
| Py | 2,79 | 38,14 | 47,94 | 37,5 | 40,0 |
| Fe | 19,90 | 24,52 | 33,27 | 25,0 | 27,5 |
| Co | 36,86 | 35,59 | 50,85 | 50,0 | 52,5 |

3.2 Model Nanowire

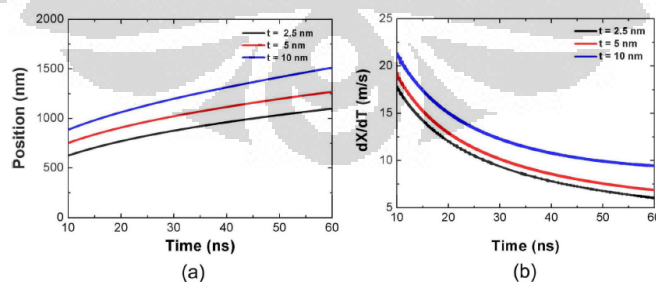
Simulasi micromagnetic tanpa medan luar pada nanowire dilakukan pada material Py dan model nanowire diilustrasikan pada Gambar. 18. Pada bagian kiri NW terdapat sebuah *golf-pad* berfungsi sebagai sumber domain sehingga pada proses energi menuju minimum sebuah struktur DW tipe *transverse wall* (TW) terbentuk dan bergerak sepanjang NW. Ukuran DW adalah $4000 \times 100 \times t \text{ nm}^3$ dan tebal $t = 2,5, 5, \text{ dan } 10 \text{ nm}$. Evolusi pergerakan DW pada waktu $t = 10 - 60 \text{ ns}$ ditunjukkan pada Gambar. 19. Profil posisi dan kecepatan spontan DW untuk variasi tebal diberikan pada Gambar. 20



Gambar 18. Model nanowire dalam simulasi micromagnetic tanpa medan luar dengan bentuk *golf-pad* sebagai daerah awal terbentuknya struktur domain (Djuhana et al., 2010b).

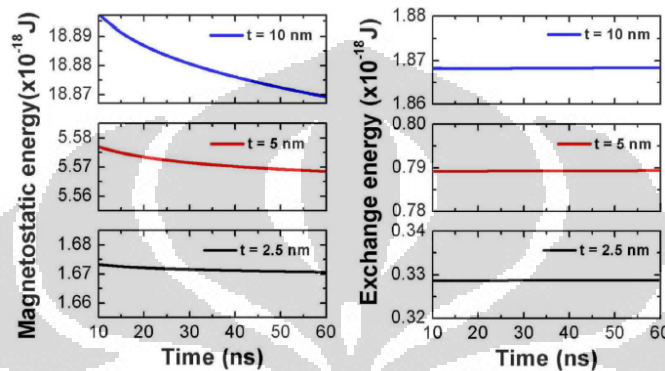


Gambar 19. Perpindahan DW tipe TW pada rentang waktu 10-60 ns dan lingkaran warna menyatakan arah magnetisasi (Djuhana et al., 2010b).



Gambar 20. (a) Profil posisi dan (b) kecepatan DW pada NW untuk tebal $t = 2,5 \text{ nm}, 5 \text{ nm}, \text{ dan } 10 \text{ nm}$ pada rentang waktu 10-60 ns (Djuhana et al., 2010b).

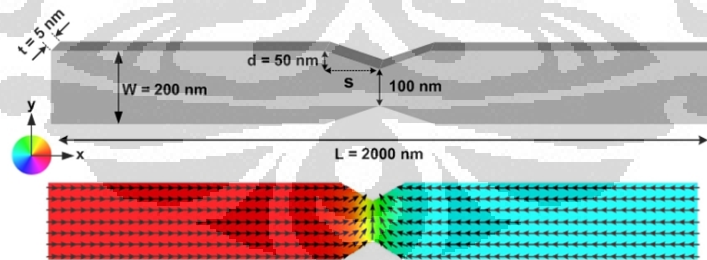
Profil energi dari perpindahan spontan DW dengan variasi tebal terdiri dari energi magnetostatik dan exchange ditunjukkan pada Gambar. 21. Kurva energi memperlihatkan energi magnetostatik berkontribusi pada kecepatan spontan DW dibandingkan energi exchange. Perubahan energi magnetostatik sistem mendorong DW pada nanowires selama proses mencapai energi minimum.



Gambar 21. Profil energi magnetostatik (gambar kiri) dan exchange (gambar kanan) pada rentang waktu $t = 10-60$ ns untuk tebal 2,5 nm, 5 nm, dan 10 nm (Djuhana et al., 2010b).

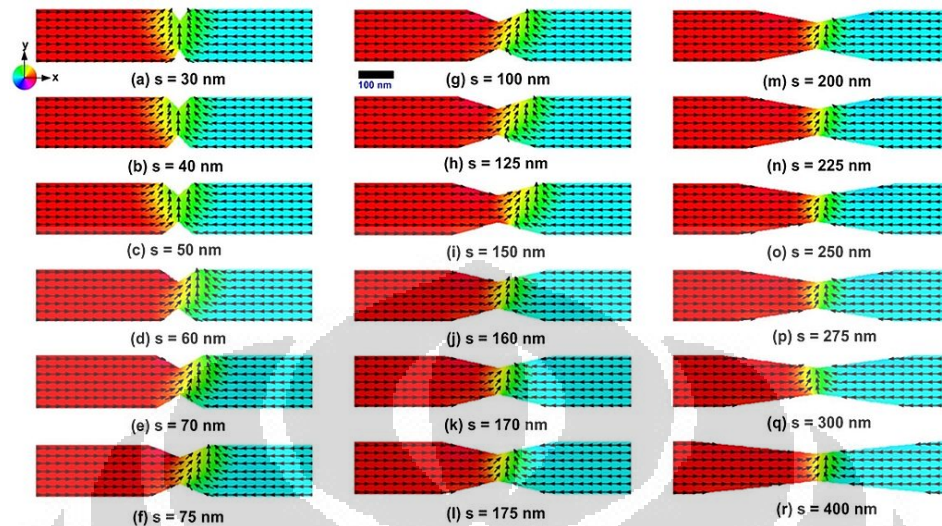
3.3 Model Notch

Simulasi micromagnetic tanpa medan magnet luar pada NW memiliki *notch* bentuk setitiga ganda pada bagian tengah NW. Ukuran NW adalah $2000 \times 200 \times 5$ nm³ dengan magnetisasi awal berupa struktur TW pada notch, seperti Gambar. 22.



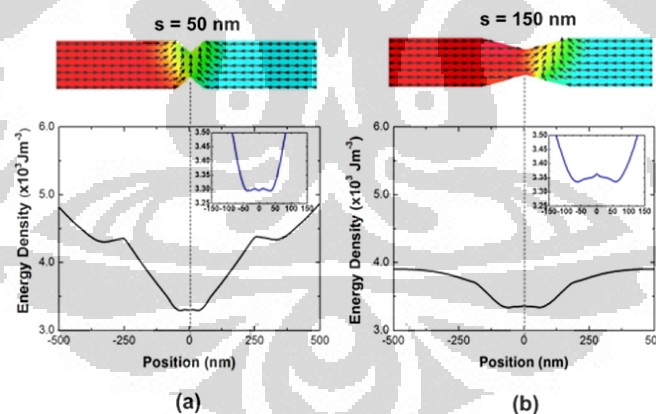
Gambar 22. Model NW mengandung notch segitiga ganda dan DW tipe TW terletak pada notch (Djuhana et al., 2010b).

Material model adalah Py dan parameter material diberikan pada Tabel 2. Tinggi segitiga $d = 50$ nm dan ukuran alas $s=30-400$ nm atau rasio d/s adalah 1,67 sampai 0,125. Konfigurasi struktur TW pada notch kondisi minimum dengan variasi s diberikan pada Gambar. 23.



Gambar 23. Struktur domain terbentuk pada notch yaitu struktur TW untuk nilai $s = 30-400$ nm. Lingkaran warna adalah arah magnetisasi (Djuhana et al., 2010a).

Struktur TW terbentuk stabil pada posisi tengah notch terjadi $s = 30-50$ nm. Kemudian TW bergeser ke posisi kanan notch pada rentang s antara 60 nm dan 150 nm. Pada rentang $s = 160$ nm dan 400 nm, struktur TW kembali ke posisi tengah notch.



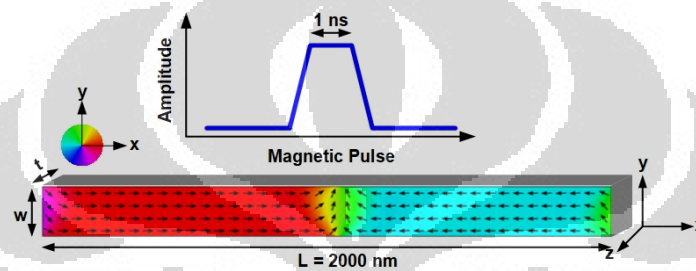
Gambar 24. Profil *potential well* pada $s = 50$ nm dan $s = 150$ nm (Djuhana et al., 2010a).

Gambar. 24 profil sumur potensial untuk $s = 50$ nm terlihat simetris pada sumbu dan $s = 150$ nm kurva bergeser ke sebelah kanan sumbu beberapa nm. Hasil ini memperlihatkan bahwa *notch* adalah sebuah sumur potensial dan konfigurasi TW pada notch bersifat *symmetric DW* dan *asymmetric DW* tergantung pada ukuran notch.

4 Simulasi Micromagnetic Aplikasi Medan Pulsa

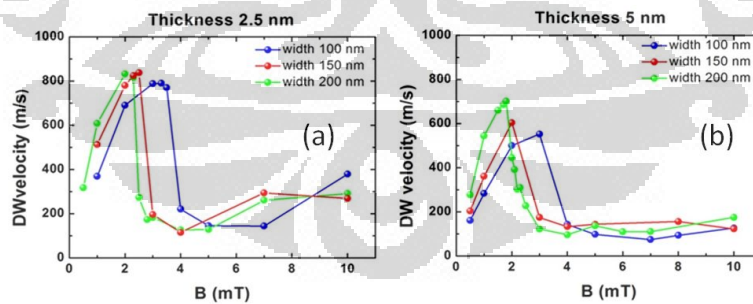
4.1 Model Inplane Magnetization Anistropy (IMA)

Simulasi micromagnetic untuk mengamati dinamika DW pada NW bersifat IMA digunakan medan magnet luar bentuk pulsa 1 ns dengan amplitudo menyatakan besar medan (mT). Medan pulsa diarahkan pada sumbu x dengan magnetisasi awal struktur TW dan saat medan bekerja, DW bergerak ke arah sumbu x positif, seperti Gambar. 25.



Gambar 25. Model NW pada simulasi dinamika DW material Py dengan $L = 2000$ nm, $W = 100, 150,$ dan 200 nm, $t = 2,5$ nm dan 5 nm, dan $\alpha = 0,01$ (Djuhana et al., 2009; Mardona and Djuhana, 2012).

Profil kecepatan DW terhadap besar medan untuk variasi lebar dan tebal NW diberikan pada Gambar. 26. Kecepatan DW pada NW meningkat dengan bertambah besar amplitudo medan pulsa. Kemudian kecepatan DW menurun secara drastis walaupun besar medan luar meningkat. Penurunan kecepatan DW di kenal sebagai medan *Walker breakdown* H_{WB} .



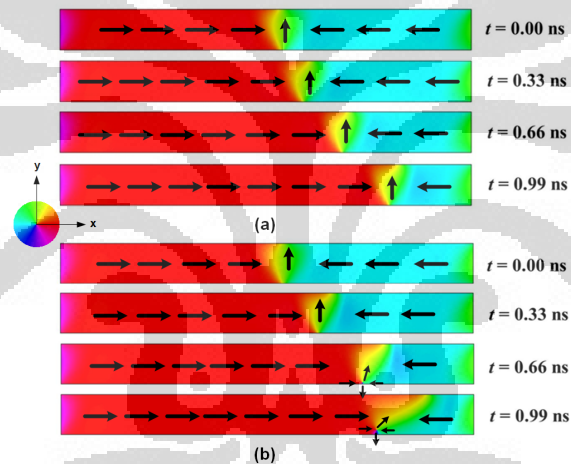
Gambar 26. Profil kecepatan DW untuk variasi $W = 100$ nm, 150 nm, dan 200 nm (a) $t = 2,5$ nm dan (a) $t = 5$ nm (Djuhana et al., 2009; Sumarta et al., 2011).

Di atas medan H_{WB} kecepatan DW menurun secara drastis dan kemudian meningkat secara perlahan disertai dengan gerak osilasi. Nilai medan H_{WB} pada material Py untuk variasi tebal dan lebar diberikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai medan H_{WB} dan kecepatan DW v material Py dengan variasi tebal dan lebar (Djuhana et al., 2009; Sumarta et al., 2011).

| Lebar | Tebal $t = 2,5$ nm | | Tebal $t = 5$ nm | |
|--------|--------------------|-----------|------------------|-----------|
| | H_{WB} (mT) | v (m/s) | H_{WB} (mT) | v (m/s) |
| 100 nm | 3,3 | 789,74 | 3,0 | 552,09 |
| 150 nm | 2,5 | 839,99 | 2,0 | 603,87 |
| 200 nm | 2,0 | 832,16 | 1,8 | 701,19 |

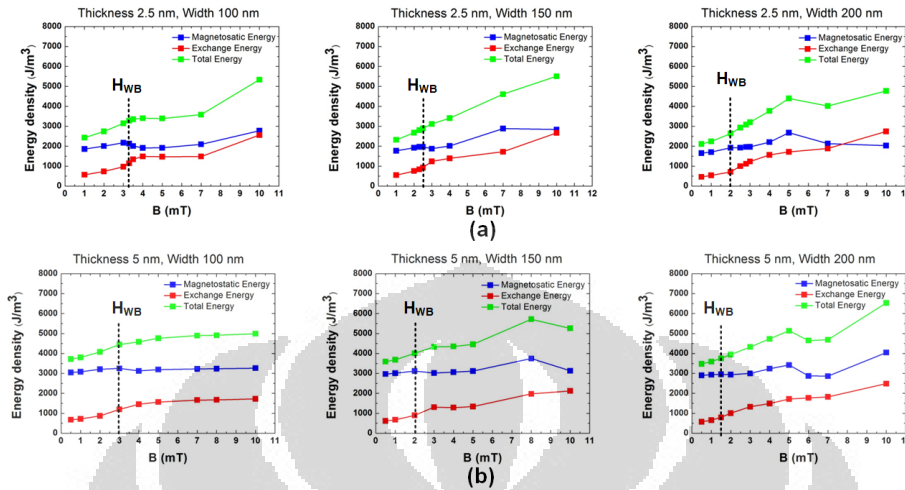
Pada Gambar. 27 memperlihatkan contoh struktur DW sebelum dan sesudah medan H_{WB} pada kasus lebar $W = 200$ nm dan tebal $t = 5$ nm dengan $H_{WB} = 1,8$ mT. Maka pada medan $H = 1$ mT di bawah medan H_{WB} terbentuk struktur TW (Gambar. 27(a)) dan pada medan $H = 3$ mT di atas medan H_{WB} terbentuk struktur AVW (Gambar. 27(b)).



Gambar 27. Struktur DW pada NW lebar 200 nm dan tebal 5 nm (a) $H = 1$ mT di bawah medan H_{WB} dengan struktur TW dan (b) $H = 3$ mT di atas medan H_{WB} dengan struktur AVW (Djuhana et al., 2009; Sumarta et al., 2011).

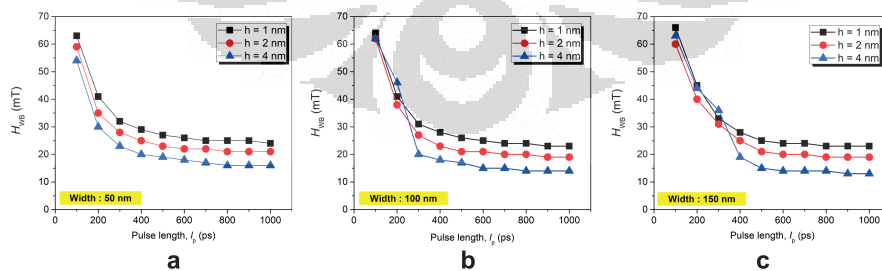
Selanjutnya, analisis energi menunjukkan energi demagnetisasi lebih dominan daripada energi exchange pada sistem NW dan profil energi diberikan pada Gambar. 28. Profil energi demagnetisasi mengikuti pola kecepatan DW terhadap besar medan luar, yaitu di atas medan H_{WB} cenderung menurun sebaliknya energi exchange meningkat walaupun masih lebih kecil dibandingkan energi demagnetisasi. Perubahan energi demagnetisasi dan exchange pada sistem NW berkaitan dengan perubahan struktur, yaitu dari struktur TW menjadi VW atau AVW di atas medan H_{WB} . Hasil ini bersesuaian dengan penelitian Beach et al. (2005); Bryan et al. (2011); Nakatani et al. (2005); Parkin et al. (2008).

Aplikasi Simulasi Micromagnetic pada Penelitian Struktur dan Dinamika Domain Material Feromagnetik



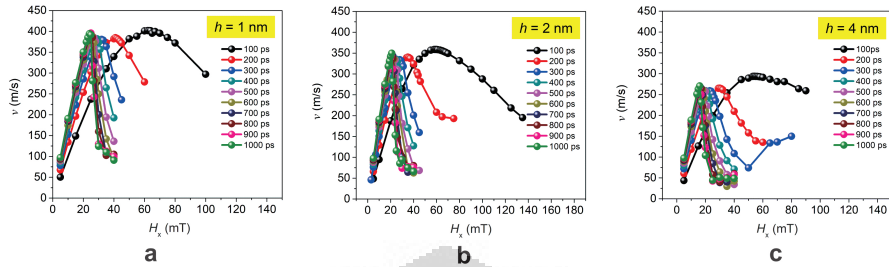
Gambar 28. Profil energi demagnetisasi, exchange, dan total terhadap besar medan magnet B mT dengan variasi lebar (a) $t = 2,5$ nm dan (b) $t = 5$ nm. Medan Walker breakdown H_{WB} dinyatakan dengan garis putus-putus (Djuhana et al., 2009; Sumarta et al., 2011).

Penelitian lanjut memperlihatkan bahwa durasi waktu pulsa pada medan magnet pulsa berpengaruh pada medan H_{WB} . Pada Gambar. 29 menunjukkan pergeseran medan H_{WB} terhadap durasi waktu pulsa. Untuk medan luar dengan durasi pulsa lebih kecil menyebabkan terjadinya medan H_{WB} lebih tinggi dibandingkan dengan durasi pulsa besar. Sebagai contoh untuk durasi waktu pulsa 100 ps nilai medan $H_{WB} = 60$ mT dan durasi waktu 1000 ps atau 1 ns nilai medan $H_{WB} = 20$ mT. Kemudian juga semakin kecil ketebalan NW nilai medan H_{WB} semakin meningkat untuk durasi waktu pulsa yang sama (Kurniawan et al., 2021). Profil kecepatan v terhadap besar medan H_x untuk variasi ketebalan diberikan pada Gambar. 30.



Gambar 29. Profil medan H_{WB} terhadap durasi waktu pulsa I_p material CoFeB untuk $W = 50, 100, 150$ nm (Kurniawan et al., 2021).

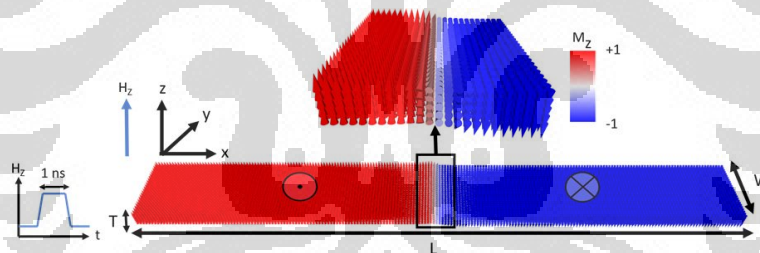
Dede Djuhana



Gambar 30. Profil kecepatan v terhadap besar medan H_x material CoFeB untuk $t = 1, 2, 4$ ns. Medan H_{WB} terjadi pada medan tinggi untuk nilai I_p kecil (Kurniawan et al., 2021).

4.2 Model Perpendicular Magnetization Anisotropy (PMA)

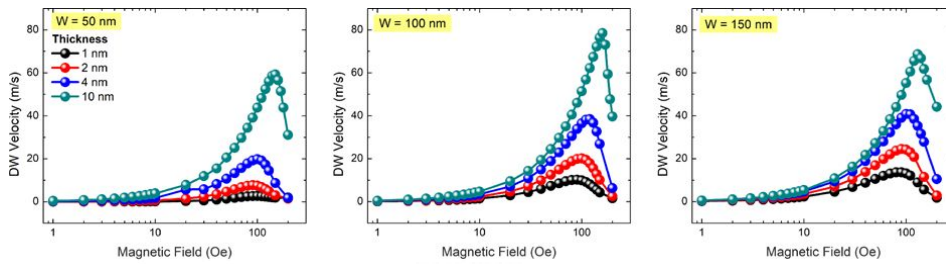
Simulasi micromagnetic untuk mengamati dinamika DW pada NW bersifat PMA (material CoFeB) digunakan medan pulsa 1 ns mirip pada kasus IMA. Medan pulsa diarahkan pada sumbu z dengan magnetisasi awal DW struktur *Bloch wall* dan saat medan bekerja, DW bergerak pada sumbu x positif, seperti Gambar. 31. Ukuran NW adalah $L \times W \times h$ nm³, $W = 50, 100, 150$ nm, tebal $h = 1, 2, 4$ dan 10 nm dan nilai $\alpha = 0,01$ (Kurniawan et al., 2021).



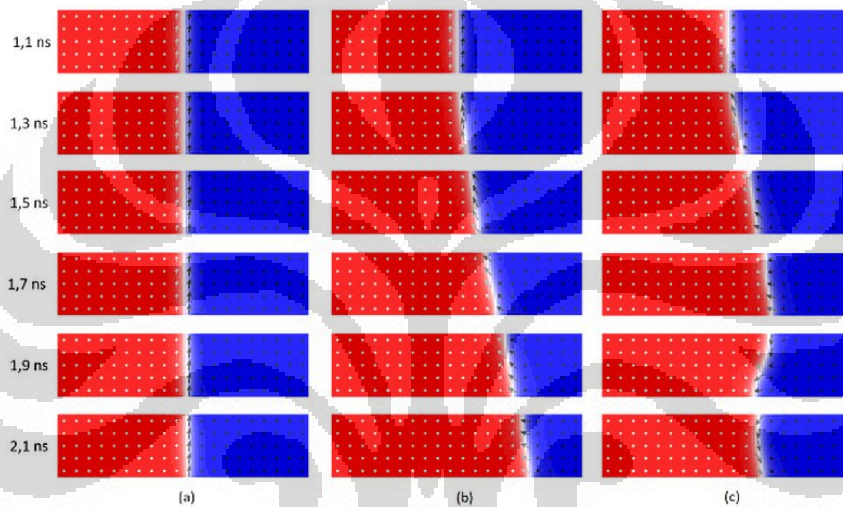
Gambar 31. Model NW pada simulasi dinamika *Bloch wall* material CoFeB dengan medan pulsa durasi 1 ns diberikan pada arah sumbu z (Nugraha and Djuhana, 2023).

Profil kecepatan DW material CoFeB terhadap variasi besar medan magnet, lebar dan tebal NW diberikan pada Gambar. 32. Besar kecepatan DW mencapai 60-80 m/s dan medan H_{WB} cenderung meningkat dengan bertambah tebal NW. Hal ini berbeda pada model IMA (material Py) dimana orde kecepatan dapat mencapai 800 m/s atau sepuluh kali jika dibandingkan PMA (material CoFeB) dan medan H_{WB} cenderung menurun dengan bertambahnya tebal (Beach et al., 2005; Nakatani et al., 2005). Hal yang menarik dari dinamika DW tipe Bloch wall yaitu pada daerah medan Walker breakdown ($H = 140$ Oe) struktur tetap dalam tipe Bloch wall (Gambar. 33).

Aplikasi Simulasi Micromagnetic pada Penelitian Struktur dan Dinamika Domain Material Feromagnetik

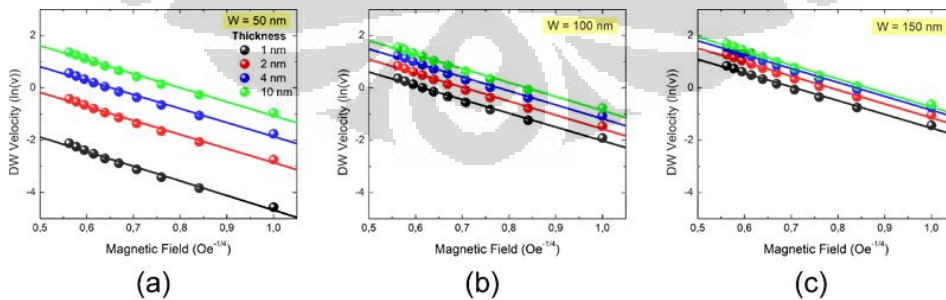


Gambar 32. Profil kecepatan DW material CoFeB bentuk NW terhadap variasi besar medan magnet, lebar, dan dan tebal (Nugraha and Djuhana, 2023).



Gambar 33. Struktur DW tipe Bloch-wall untuk medan (a) 10 Oe, (b) 140 Oe, dan (c) 200 Oe (Nugraha and Djuhana, 2023).

Kecepatan DW tipe Bloch wall pada medan $H = 1 - 10$ Oe atau dikenal sebagai *creep velocity* memenuhi pendekatan $\ln v = H^{-\frac{1}{4}}$ (Metaxas et al., 2007), seperti pada Gambar. 34.

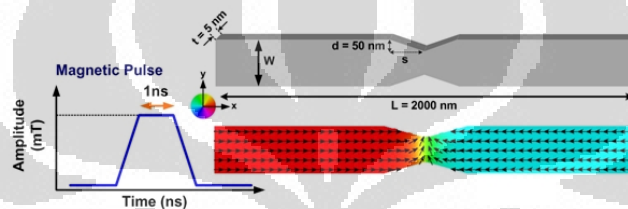


Gambar 34. Profil *creep velocity* dalam hubungan $\ln v = H^{-\frac{1}{4}}$ untuk variasi lebar dan tebal (Nugraha and Djuhana, 2023).

5 Medan Depinning

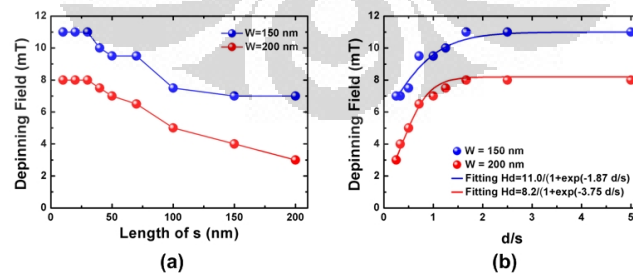
5.1 Medan Depinning

Simulasi micromagnetic untuk mengamati medan depinning H_d pada NW memiliki notch digunakan medan magnet pulsa 1 ns dengan variasi besar medan magnet untuk mendorong DW keluar dari dalam notch. Ukuran NW adalah $L = 2000$ nm, $W = 150, 200$ nm, dan $t = 5$ nm dengan ukuran notch $s = 20-200$ nm dan $\alpha = 0,01$. Magnetisasi awal struktur TW berada dalam notch seperti pada Gambar. 35.



Gambar 35. Model NW memiliki notch pada simulasi medan depinning dengan medan magnet pulsa 1 ns diberikan pada sumbu x dan magnetisasi awal adalah struktur TW berada di dalam notch (Djuhana et al., 2013).

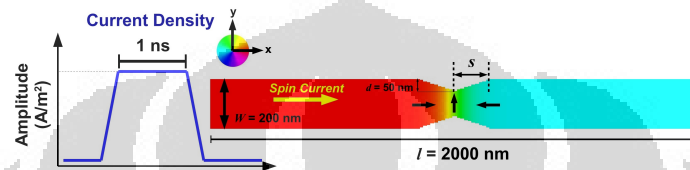
Profil H_d terhadap variasi nilai s untuk lebar $W = 150$ nm dan 200 nm diberikan pada Gambar. 36. Medan depinning H_d cenderung menurun dengan meningkatnya nilai s dan lebar W . Sebagai contoh pada kasus $s = 10$ nm nilai $H_d = 11$ mT untuk lebar $W = 150$ nm dan nilai $H_d = 8$ mT untuk lebar $W = 200$ nm. Sedangkan pada kasus nilai $s = 200$ nm nilai $H_d = 7$ mT untuk lebar $W = 150$ nm dan $H_d = 3$ mT pada lebar $W = 200$ nm. Hasil simulasi menunjukkan semakin kecil ukuran s dibutuhkan medan H_d lebih besar untuk melepaskan DW dari notch (Djuhana et al., 2013).



Gambar 36. (a) Profil medan H_d terhadap nilai s dan (b) Profil medan H_d terhadap nilai rasio d/s untuk lebar $W = 150$ nm dan 200 nm (Djuhana et al., 2013).

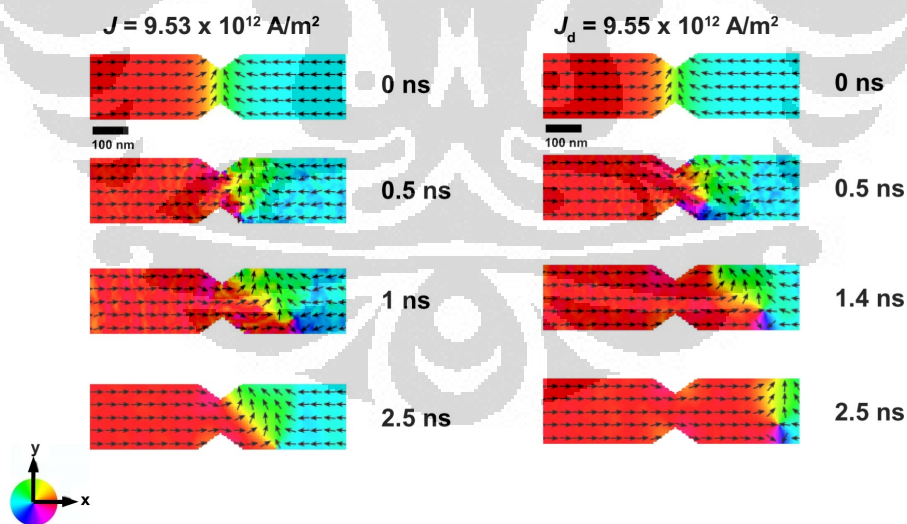
5.2 Arus Depinning

Simulasi micromagnetic untuk mengamati arus depinning J_d pada NW memiliki notch digunakan injeksi arus terpolarisasi bentuk pulsa durasi 1 ns dengan variasi besar arus untuk mendorong DW keluar dari notch. Magnetisasi awal adalah struktur TW berada dalam notch dan arus diberikan pada arah sumbu x, seperti diilustrasikan pada Gambar. 37.



Gambar 37. Model NW memiliki notch pada simulasi arus depinning dengan arus bentuk pulsa durasi 1 ns diberikan pada sumbu x (Djuhana et al., 2018).

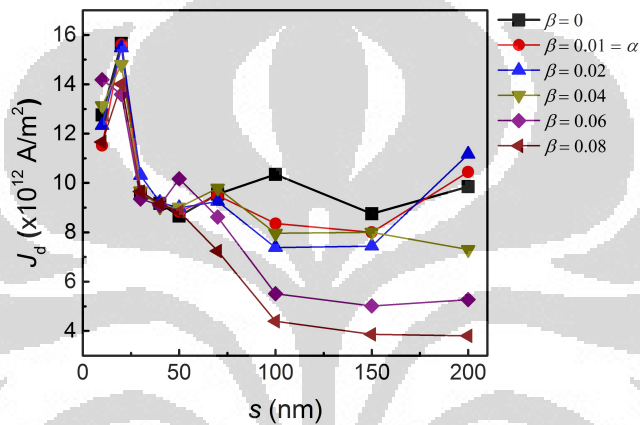
Proses pinning dan depinning pada kasus ukuran notch $s = 70$ nm dan $\beta = 0$. Pada $J = 9,53 \times 10^{12}$ A/m² DW tidak mampu keluar dari notch dan pada $J = 9,55 \times 10^{12}$ A/m² terlihat DW keluar dari notch dan struktur berubah dari TW menjadi AVW. Perubahan struktur DW pada proses depinning bergantung pada bentuk notch (Djuhana et al., 2010a; Hayashi et al., 2006; Petit et al., 2008).



Gambar 38. Struktur DW pada notch NW pada $s = 70$ nm dan $\beta = 0$. DW mengalami pinning pada arus $J = 9,53 \times 10^{12}$ A/m² (gambar kiri) dan DW mengalami depinning pada arus $J = 9,55 \times 10^{12}$ A/m² (gambar kanan) (Djuhana et al., 2018).

Dede Djuhana

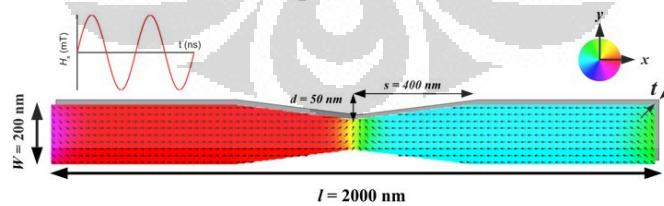
Profil medan depinning J_d terhadap s untuk variasi nilai β diberikan pada Gambar. 39. Untuk $s < 50$ nm arus J_d tidak berubah secara signifikan terhadap β namun arus J_d berfluktuasi pada nilai $s \geq 100$ nm. Peningkatan nilai β juga menyebabkan penurunan arus J_d seperti pada kasus $\beta \leq 0,04$ dibandingkan pada $\beta = 0$ atau adiabatik. Mengacu pada penelitian Jung et al. (2008) bahwa ukuran notch mempengaruhi kekuatan proses pinning atau *pinning strength of the notch*.



Gambar 39. Profil arus depinning J_d terhadap ukuran s dan variasi nilai β (Djuhana et al., 2018).

6 Medan Osilasi

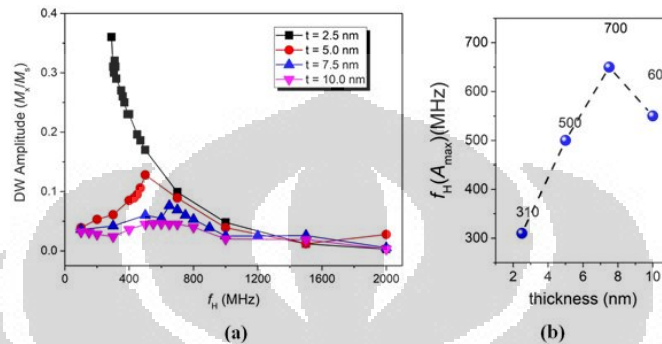
Simulasi micromagnetic untuk mengamati osilasi DW di dalam notch digunakan medan luar bentuk sinusoidal $x(t) = A \sin(2\pi f t + \phi)$, seperti pada Gambar. 40. Ukuran notch $d = 50$ nm dan $s = 200$ nm, $\alpha = 0,01$, material Py, dan frekuensi medan dari 200 MHz sampai 2 GHz.



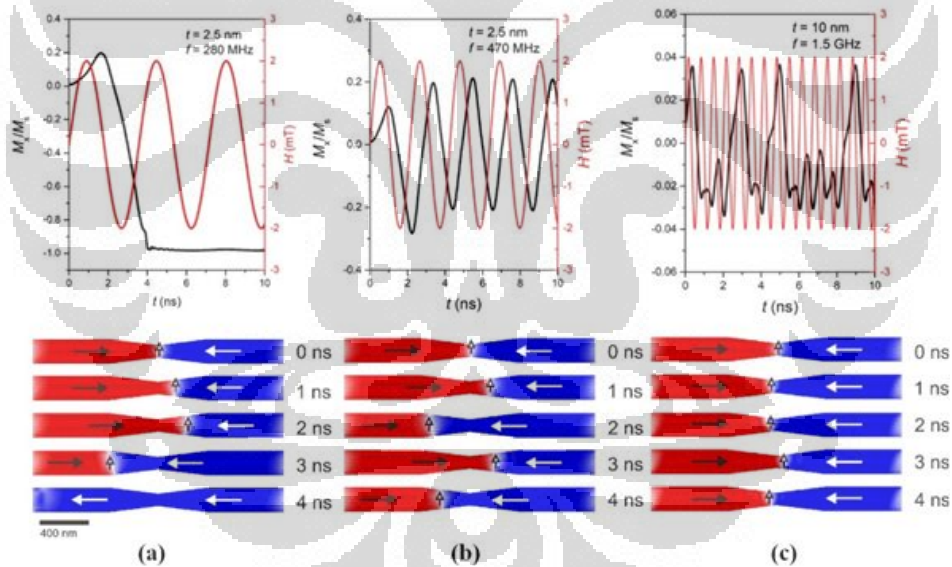
Gambar 40. Model NW pada simulasi osilasi DW menggunakan fungsi sinusoidal yang diberikan pada sumbu x dengan $f_H = 200 - 2000$ MHz (Djuhana et al., 2023).

Pada Gambar. 41 memperlihatkan profil amplitudo medan sinusoidal terhadap frekuensi f_H (MHz) untuk variasi tebal NW. Frekuensi DW diperoleh

menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Amplitudo terlihat meningkat sampai pada frekuensi tertentu dan kemudian turun pada frekuensi yang lebih tinggi. Amplitudo juga cenderung menurun dengan bertambahnya tebal (Gambar. 41(a)) dan osilasi DW diberikan pada Gambar. 42.



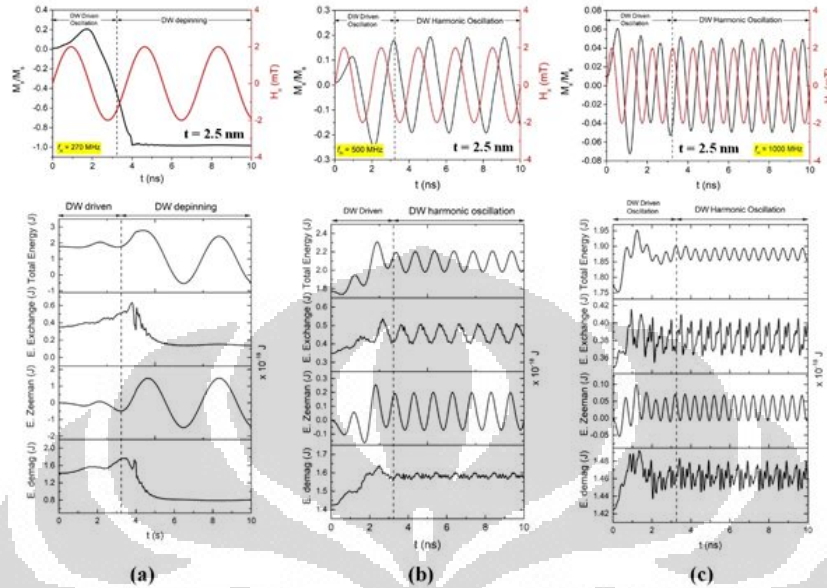
Gambar 41. (a) Profil amplitudo terhadap frekuensi dan (b) frekuensi maksimum terhadap tebal NW (Djuhana et al., 2023).



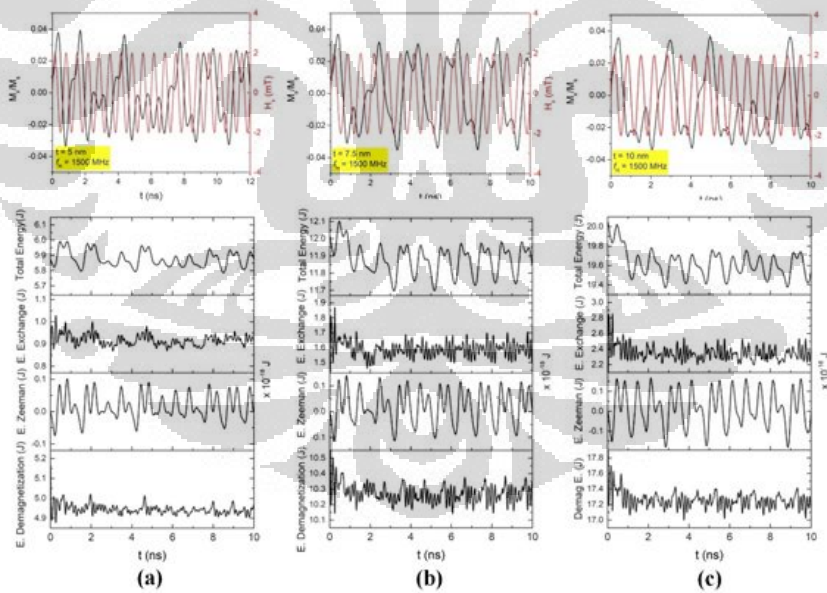
Gambar 42. Posisi DW dari profil M_x/M_y (atas) dan osilasi DW (a) $t = 2,5$ nm; $f = 280$ MHz, (b) $t = 2,5$ nm; $f = 470$ MHz, dan (c) $t = 10$ nm; $f = 1500$ MHz (Djuhana et al., 2023).

Osilasi DW pada notch bersifat harmonik dipresentasikan pada Gambar. 43 untuk $t = 2,5$ nm dan frekuensi $f_H = 270, 500, 1000$ MHz dan inharmonik pada Gambar. 44 pada $f_H = 1500$ MHz untuk $t = 5, 7,5$ dan 10 nm.

Dede Djuhana



Gambar 43. Profil harmonik DW dan energi untuk $t = 2,5 \text{ nm}$ (a) $f_H = 270 \text{ MHz}$, (b) $f_H = 500 \text{ MHz}$, dan (c) $f_H = 1000 \text{ MHz}$ (Djuhana et al., 2023).



Gambar 44. Profil osilasi inharmonik DW pada frekuensi medan berosilasi $f_H = 1500 \text{ MHz}$ untuk ketebalan kawat t (a) $t = 5 \text{ nm}$, (b) $t = 7,5 \text{ nm}$, dan (c) $t = 10 \text{ nm}$ (Djuhana et al., 2023).

7 Penutup

1. Simulasi micromagnetic sebagai salah satu alat atau *tool* penting untuk mengamati struktur dan dinamika domain magnetik material feromagnetik selain eksperimen laboratorium, seperti Magneto Optic Kerr effect (MOKE), Lorentz microscopy, atau X-ray spectroscopy.
2. Simulasi pada kondisi *ground state* memberikan informasi transisi struktur domain dari *single-domain* (SD) menjadi *multi-domain* (MD) dari profil energi sistem, seperti energi demagnetisasi dan exchange.
3. Simulasi pada kondisi aplikasi medan luar baik medan magnet maupun arus terpolarisasi memberikan informasi dinamika DW berupa kecepatan DW terhadap besar medan luar.
4. Pergerakan domain wall pada nanowire terdapat fenomena *Walker breakdown* yaitu kecepatan DW meningkat secara linier seiring besar medan luar dan berkurang secara drastis pada medan tertentu atau medan Walker breakdown.
5. Struktur DW pada material bersifat IMA akan terjadi transformasi dari TW menjadi VW/AVW di atas medan Walker breakdown. Sedangkan pada material PMA struktur DW tetap mempertahankan tipe Bloch wall di atas medan Walker breakdown.
6. Pada simulasi model notch mendapatkan informasi medan depinning H_d atau arus depinning J_d yaitu medan luar dibutuhkan untuk melepaskan DW dari notch. Medan H_d atau arus J_d sangat bergantung pada bentuk dan ukuran notch. Lebih lanjut menunjukkan bahwa *notch* adalah sebuah sumur potensial (*potential well*) secara sederhana dapat dinyatakan $\mathcal{E} = kx^2$ dengan \mathcal{E} adalah energi dan x adalah posisi partikel.
7. Simulasi micromagnetic dengan aplikasi medan sinusoidal memperlihatkan frekuensi resonansi DW f_{DW} berhubungan linier dengan frekuensi injeksi atau sumber f_H . DW mengalami osilasi harmonik di sekitar notch jika frekuensi sumber lebih kecil dari frekuensi ambang f_S dan DW bersifat tidak harmonik jika frekuensi sumber lebih besar dari f_S .

Ucapan Terima Kasih

Bapak, ibu, dan hadirin yang saya hormati dan muliakan, akhirnya sampailah dipenghujung pidato ini. Saya haturkan puji syukur kepada Allah SWT, atas segala karunai-Nya, diberikan kesempatan mendapatkan jenjang gelar pendidikan tertinggi sebagai Guru Besar. Tentunya menjalankan amanah ini tidak mudah, oleh karena itu saya mohon doa dari bapak dan ibu semua yang hadir, semoga saya dapat menjalankan amanah ini dengan sebaik-baiknya.

Saya mengucapkan terima kasih tak terhingga kepada semua pihak atas dukungan diberikan kepada saya selama ini, antara lain kepada:

1. Kepada Pemerintah Republik Indonesia khususnya Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, **Bapak Nadiem Makarim, BA, MBA** yang telah menetapkan dan mengangkat saya sebagai Guru Besar di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.
2. Terima kasih banyak kepada Direktur Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset dan Teknologi **Prof. Ir. Nizam, M.Sc., DIC, Ph.D., IPU, Asean.Eng** yang menyetujui usulan dari Rektor Universitas Indonesia sehingga pengukuhan Guru Besar dapat terlaksana.
3. Terima kasih sebesar-besarnya kepada Rektor Universitas Indonesia **Prof. Ari Kuncoro, SE., MA, Ph.D** dan Ketua Guru Besar Universitas Indonesia **Prof. Harkristuti Harkrisnowo, SH., MA., Ph.D** yang telah mengukuhkan saya pada hari ini.
4. Terima kasih saya ucapkan kepada Wakil Rektor Akademik dan Kemahasiswaan **Prof. Dr. rer. nat. Abdul Haris, M.Si.**, Wakil Rektor Bidang Keuangan dan Logistik **Vita Silvira, SE., Ak., MBA., CA**, Wakil Rektor Bidang Riset dan Inovasi **drg. Nurtami, Ph.D., Sp. OF(K)**, Wakil Rektor Bidang SDM dan Aset **Prof. Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA**, dan Sekretaris Universitas **dr. Agustin Kusumayati, M.Sc., Ph.D.**
5. Terima kasih saya sampaikan kepada Senat Akademik Universitas Indonesia dan jajarannya, Ketua SAUI **Prof. Nachrowi Djalal Nachrowi, M.Sc., MPHil., Ph.D**, Sekretaris SAUI **Prof. Yudho Giri Suchahyo, Ph.D., CISA CISM**. Anggota SAUI Wakil FMIPA **Prof. Dr. Drs. Wibowo Mangunwardoyo, MSC, Prof. Dr. techn. Djoko Triyono, M.Si., Prof Dr. Jarnuzi Gunlazuardi, dan Dra. Wellyzar Sjamsuridzal, M.Sc., Ph.D.**

6. Terima kasih saya ucapkan kepada Ketua Dewan Guru Besar Universitas Indonesia **Prof. Harkristuti Harkrisnowo, SH., MA., Ph.D**, Sekretaris DGBUI **Prof. Dr. drg. Indang Trihandini, MKes**, dan para anggota DGBUI.
7. Terima kasih kepada Ketua Dewan Guru Besar FMIPA UI **Prof. Dr. Sumi Hudoyono, PWS**, Sekretaris DGB FMIPA UI **Prof. Dr. Drs. Wibowo Mangunwardoyo, M.Sc**, dan para anggota DGB FMIPA UI.
8. Terima kasih saya ucapkan kepada Ketua Senat Akademik FMIPA UI **Dr. rer. nat. Eko Kusratmoko**, Sekretaris SA FMIPA UI **Muhammad Aziz Madjidi, Ph.D.**, dan para anggota SA FMIPA UI.
9. Terima kasih saya ucapkan kepada Ketua PAK Universitas Indonesia **Prof. Drs. Heru Suhartanto, M.Sc., Ph.D**, telah membantu proses pengajuan PAK, Direktur Sumber Daya Manusia Universitas Indonesia **Prof. Dr. -Ing. Amalia Suzianti, ST., M.Sc, Agus Anang, S.Kom, CHRS., Arham Akbar, SE, Dra. Elmida S** dan tim SDM UI.
10. Terima kasih saya ucapkan kepada Tim PAK FMIPA UI **Prof. Dr. Sumi Hudoyono, PWS.**, Manajer SDM **Fahrur Rizqi, S.sos, Caya Mikail**, dan para staf tenaga pendidikan SDM FMIPA UI yang telah membantu pemberkasan PAK saya.
11. Terima kasih saya sampaikan kepada Ketua Departemen Fisika **Djati Handoko, Ph.D**, Ketua Prodi Fisika **Dr. Anawati**, Ketua Prodi Magister dan Doktor Ilmu Fisika **Dr. Adhi Harmoko**, dan Ketua Prodi Magister dan Doktor Ilmu Bahan **Dr. Budhy Kurniawan**, serta para dosen dan staf pendidikan Departemen Fisika atas dukungan pengusulan saya menjadi Guru Besar.
12. Terima kasih kepada para Ketua Departemen di lingkungan FMIPA UI: Departemen Matematika **Prof. Alhadi Bustamam, Ph.D**, Departemen Kimia **Asep Saefumillah, Ph.D**, Departemen Biologi **Prof. Anom Bowolaksono, Ph.D**, Departemen Geografi **Dr. Supriatna, M.Si**, dan Kaprodi Geosain **Dr. -Eng. Supriyanto & Dr. Reza Syahputra**, dan para Kaprodi di FMIPA UI.
13. Saya ucapkan terima kasih kepada para Wakil Dekan FMIPA UI **Prof. Dr. rer. nat Budiawan** dan **Dr. Tito Latif Indra**. Para manajer: **Rika Tri Yuniarti, Ph.D, Dr. Dipo Aldila, Dr. Dewi Susiloningtyas, Dr. Denny R. Silaban, Dr. Lukmanda Evan Lubis, Muhammad Hidayat, S.sos, Fahrur Rizqi, S.sos, Erning Setyono, M.Si**, dan para tenaga pendidikan di dekanat FMIPA UI.

14. Terima kasih kepada Direktur Riset dan Pengembangan (Risbang) UI **Dr. Munawar Khalil** atas dukungan hibah penelitian PUTI, Direktur PPM UI **Prof. Agung Waluyo, Ph.D** atas support hibah Pengmas, dan Direktur DS-TP **Ahmad Gamal, Ph.D** atas dukungan hibah inovasi, dan Direktur DAPRI **Suminto, S.sos., M.Si** atas proses administrasi riset, pengmas, dan inovasi, beserta para Kasubdit dan Kasi.
15. Terima kasih tak terhingga kepada pembimbing doktor saya, **Prof. Dong-Hyun Kim, Prof. Suhk-Kun Oh, Prof. Seong-Cho Yu, dan Prof. Seung-Kee Han**. Teman-teman seperjuangan di Cheonju; **Prof. Isnaeni Usman (BRIN), Prof. Dahlang Tahir (Unhas), Dr. Kontan Tarigan (ITI), dan Dr. Karina (USA)**.
16. Terima kasih tak terhingga untuk **Prof. Dr. rer. nat Abdul Haris, M.Si** telah banyak memberikan dukungan saat penugasan di Rektorat UI, menjadi Dekan, dan proses Guru Besar FMIPA UI. Semoga Allah SWT membalas semua kebaikannya.
17. Terima kasih banyak untuk Lab. Cisco-Fisika FMIPA UI; **Dr. Bambang Soegijono, Dr. -Eng. Supriyanto, (alm) Arief Fitrianto** atas dukungannya selama menempuh program doktor di Korea.
18. Terima kasih juga saya ucapkan kepada para kolega Lab. BNT Departemen Fisika FMIPA UI, **Prof. Dr. Vivi Fauzia, Dr. Adhi Harmoko, Dr. Windri Handayani** dan (Alm) **Dr. -ing Cuk Imawan, MSi.**
19. Terima kasih untuk anggota grup riset MANDRAMON: **Dr. Candra Kurniawan (BRIN), Dr. Nurfini Yudasari (BRIN), Dr. Kirana Putri (BRIN), Dr. Lutfi Rohman (Univ. Jember), Raditya Nugraha (PMDSU), Sujak, dan Qoimah (CBNU, Korea), Hamidi Putra (Ulm Univ, Jerman).**
20. Terima kasih kepada teman-teman di Indonesia Magnetic Society (IMS) atas dukungannya, **Prof. Agung Nugroho (ITB), Prof. Budi Purnama (UNS), Prof. Risdiana (UNPAD), Prof. Ahmad Taufiq (UM), Prof. Wisnu Ari Ardi (BRIN), Prof. Dr. Darminto, M.Sc (ITS) dan Prof. Azwar Manaf, M.Met (UI).**
21. Terima kasih kepada teman-teman **Fisika Angkatan 93** dan teman-teman **Corsica (Corp Fisika Dua) SMA Negeri 1 Jakarta (Boedoet)** atas doa dan dukungannya. Semoga Allah SWT selalu memberikan kebaikan kepada kita.

22. Kepada kedua orangtua saya tercinta, **almarhum Bapak Muslim Supardi** dan **almarhumah Emak Nyi Hasanah**, terima kasih Bapak dan Emak atas semua perjuangan, kesabaran, dan doa-doa kalian kepada Allah SWT. Kepada bapak mertua **almarhum Peltu (PM) H. Sunardi**, terima kasih atas semua dukungan dan doa-doanya. Semoga Allah SWT memberikan ampunan, rahmat dan syafa'at-Nya kepada orangtua kami.
23. Terima kasih kepada istri saya tercinta, **Setyo Handayani, S.Si**, yang selalu menemani dalam suka dan duka dengan sabar, menyemangati tugas-tugas suami, dan selalu memberikan yang terbaik untuk membahagiakan suami dan anak-anak. Kepada anak-anakku tersayang **Nurrahma Sabila Wikana Puteri, Muhammad Rafi Wikana Putera, dan Nurul Zharifah Wikana Puteri**, ayah bangga dan bersyukur memiliki kalian. Semoga kita selalu diberikan kebersamaan dalam kesehatan, keberkahan, dan lindungan oleh Allah SWT.
24. Untuk Kakak dan adik-adik tersayang, **Kang Udin, Erik, Laela, (alm) Cepylis, dan Tetin** selalu mendoakan karier saya. Untuk Kakak dan adik ipar **mbak Tari & mas Marso, mbak Titi & mas Hendro, mbak Eva & bang Aldi, mbak Dyah, Mas Uun** terima kasih atas bantuan dan dukungannya.
25. Terima kasih kepada semua orang yang berjasa dalam hidup saya yang tidak mungkin saya sebutkan satu persatu dalam kesempatan ini. Saya yakin Allah SWT pasti akan membalasnya dengan hal yang lebih baik. Semoga saya diberikan kemudahan sebagai Guru Besar dan memberikan manfaat bagi masyarakat banyak. Semoga Bapak, Ibu dan hadirin semua, selalu diberikan sehat dan walafiat dalam lindungan Allah SWT, Aamiin YRA.

Wabillahi taufiq wal hidayah. Wa'alaikum salam wa rahmatullahi wabaraka-tuh.

Dede Djuhana

Riwayat Hidup

Dede Djuhana lahir di Jakarta 17 Desember 1971 dan menyelesaikan pendidikan S1 dan S2 di Departemen Fisika, FMIPA Universitas Indonesia. Tahun 2007 penulis melanjutkan studi Program Doktor di Departemen Fisika, Chungbuk National University, Cheongju, Korea Selatan dengan beasiswa *Brain Korea 21 Physics Program* dari pemerintah Korea Selatan. Tahun 2010 berhasil menyelesaikan program Doktor dengan judul disertasi *Micromagnetic simulation of domain wall dynamics in ferromagnetic nanowires* di bawah bimbingan Profesor Dong-Hyun Kim. Pada tanggal 1 Agustus 2023 memperoleh SK Guru Besar Bidang Ilmu Material dari Kemendikbudristek, Republik Indonesia.



A. Identitas Diri

Nama : Prof. Dede Djuhana, M.Si, Ph.D
NUP : 030603016
Jabatan : Guru Besar
Pangkat : IV/a
Tempat, Tanggal lahir : Jakarta, 17 Desember 1971
Agama : Islam
Status Pernikahan : Menikah
Istri : Setyo Handayani
Anak : 1. Nurrahma Sabila Wikanaputeri
2. Muhammad Rafi Wikanaputera
3. Nurul Zharifah Wikanaputeri
Orangtua : Ayah (alm) Muslim Supardi
Ibu (alm) Nyi Hasanah
Nama Publikasi : Djuhana, Dede
Scopus ID : 26027849100
Orchid ID : 0000-0002-2025-0782
Sinta ID : 5975030
Google Scholar ID : Dede Djuhana
Alamat Rumah : Perumahan Pura Bojonggede Jl. DKI Barat I Blok K2
No.23, RT 02 RW 24, Tajurhalang Bogor 16320
Alamat Kantor : Departemen Fisika FMIPA UI Kampus UI Depok, Jawa Barat, Indonesia 16424, +62-21-78849008
E-mail : dede.djuhana@sci.ui.ac.id

B. Riwayat Pendidikan Formal

| Jenjang | Tahun |
|---|-----------|
| Doktor (S-3) dari Department Fisika , College of Natural Sciences, Chungbuk National University, South Korea, Promotor : Prof. Dong-Hyun Kim Title of dissertation: <i>Micromagnetic simulation of domain wall dynamics in ferromagnetic nanowires.</i> | 2007-2010 |
| Magister (S-2) dari Departemen Fisika , FMIPA UI Pembimbing: Dr. Leonard Lisapaly Judul Tesis <i>Ekstraksi koefisien refleksi dan impedansi akustik dari atribut seismik menggunakan metode least square.</i> | 2000-2003 |
| Sarjana (S-1) dari Departemen Fisika , FMIPA UI Pembimbing Dr. Leonard Lisapaly dan Abdul Haris, M.Si Judul Skripsi <i>Studi inversi variasi amplitudo terhadap offset (AVO) dengan metode kuadrat terkecil.</i> | 1993-1999 |
| SMA Negeri 1 Jakarta | 1988-1991 |
| SMP Negeri 4 Jakarta | 1985-1988 |
| SD Negeri 02 Petang Senen Jakarta | 1979-1985 |

C. Riwayat Kepegawaian/Kepangkatan

| Pangkat/Golongan | TMT |
|-------------------|----------------|
| Penata/III/c | 1 Januari 2012 |
| Penata Tk.I/III/d | 1 Oktober 2020 |
| Pembina/IV/a | 1 Oktober 2022 |

D. Riwayat Kepegawaian/Jabatan Fungsional

| Jabatan | Tahun TMT |
|---------------|----------------|
| Guru Besar | 1 Agustus 2023 |
| Lektor Kepala | 1 April 2020 |
| Lektor | 1 Oktober 2014 |

E. Riwayat Jabatan Struktural

| Jabatan | Tahun |
|--|---------------|
| Dekan FMIPA UI | 2022-sekarang |
| Direktur Riset dan Pengembangan (DRP UI) | 2020-2022 |
| Kasubdit Riset DRPM UI | 2015-2019 |
| Manajer Riset FMIPA UI | 2014-2015 |

Dede Djuhana

F. Riwayat Organisasi

| Organisasi/Jabatan | Tahun |
|---|---------------|
| Indonesian Magnetic Society (IMS) , Jabatan: Wakil Ketua | 2020-sekarang |
| MIPANET , Jabatan: Wakil Ketua Bidang Pendidikan dan Kerjasama | 2023-sekarang |
| BKS PTN FMIPA Bagian Barat , Jabatan: Wakil Ketua | 2023-sekarang |

G. Riwayat Sertifikasi

| Sertifikasi | Tahun |
|--|-------|
| Penilai Muda TKT dari Pusat Sistem Audit Teknologi BPPT | 2019 |
| Middle Management Enhancement Program dari Lembaga Manajemen FEB UI | 2018 |
| ISO 9001:2015 Internal Quality Audit dari DQS Indonesia | 2018 |
| Research Reviewer IEC 17024:2012 dari Quantum HRM Internasional | 2016 |

H. Penghargaan dan Prestasi

| Penghargaan/Prestasi | Tahun |
|---|-------|
| Tanda Kehormatan Makara Dharma Bakti XX Tahun Rektor Universitas Indonesia | 2022 |

I. Riwayat Hibah Penelitian

| Riwayat Hibah | Tahun |
|---|-------|
| Hibah Publikasi Terindeks Internasional (PUTI) Q1 , Universitas Indonesia, <i>Fotokatalis heterostruktur $Z_nFe_2O_4$ dengan kluster partikel logam hasil teknologi biokompatibel untuk remediasi polutan organik persisten (POP)</i> . | 2023 |
| Hibah Publikasi Terindeks Internasional (PUTI) Q2 , Universitas Indonesia, <i>Pengembangan nanostruktur emas anisotropis dengan teknik reduksi fotokimia sebagai material sensor plasmonik untuk mendeteksi cemaran Kromium di lingkungan air</i> | 2023 |

| | |
|--|-----------|
| Hibah Publikasi Terindeks Internasional (PUTI) Q2 , Universitas Indonesia, <i>Studi micromagnetik dinamika dinding domain magnetik pada material kawat nano berorientasi dmagnetik tegak lurus terhadap pulsa arus listrik dan medan magnetik berorde nanodetik untuk aplikasi divais spintronika</i> | 2023 |
| Hibah Program Magister Doktor Sarjana Unggul (PMDSU) Kemendikbudristek, <i>Studi dinamika dinding domain magnetik pada material PMA CoFeB di bawah pengaruh pulsa sub-nanosekon menggunakan pendekatan micromagnetik.</i> | 2022-2023 |
| Hibah Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT) Kemendikbudristek, <i>Analisis dinamika domain pada material feromagnetik berorientasi tegak lurus berbasis paduan Co-Fe menggunakan pendekatan micromagnetik dalam pengembangan divais spintronika.</i> | 2022 |
| Hibah Publikasi Terindeks Internasional (PUTI) Q2 Universitas Indonesia, <i>Pengembangan material nanokomposit berbasis Zinc Oxide dengan teknik reactive laser ablation in liquid sebagai material fotokatalis konservasi lingkungan air.</i> | 2022 |
| Hibah Publikasi Terindeks Internasional (PUTI) Q2 , Universitas Indonesia, <i>Pengembangan lembaran nano $Ti_3C_2T_x$ MXene menggunakan $NiFe_2O_4$ mesopori sebagai material anoda pada baterai ion Litium.</i> | 2022 |
| Program Penelitian Kolaborasi Indonesia (PPKI) 12 PT-NBH , Universitas Indonesia, <i>Kajian karakteristik struktural dan magnetik pada bahan nanopartikel berbasis Cobalt Ferrite.</i> | 2021 |
| Hibah Penelitian Disertasi Doktor , Kemenristek/BRIN, <i>Studi dinamika dinding domain magnetik pada material berbasis paduan Besi menggunakan simulasi mikromagnetik.</i> | 2021 |
| Hibah Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi , Kemenristek/BRIN, <i>Analisis Struktur domain-wall pada material feromagnetik berbasis Co dan Fe menggunakan simulasi micromagnetic berdasarkan persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG).</i> | 2021 |
| Hibah Penelitian Pasca Doktor , Kemenristek/BRIN, <i>Sensor kolorimetrik plasmonik berbasis nanopartikel perak untuk deteksi pencemaran lingkungan: Simulasi dan Fabrikasi.</i> | 2021 |

Dede Djuhana

J. Riwayat Pengabdian kepada Masyarakat

| Riwayat Pengmas | Tahun |
|---|-------|
| Pembentukan Tim Mitra Bestari Jurnal Standarisasi dan Jurnal Instrumentasi Badan Standarisasi Nasional Tahun 2023, Badan Standarisasi Nasional (BSN) | 2023 |
| Narasumber: Peningkatan kualitas lulusan Prodi S-2 Fisika untuk menjawab tantangan Era Society 5.0, Jurusan Fisika FMIPA Universitas Jember | 2023 |
| Narasumber: Pelatihan peningkatan kompetensi pembelajaran fisika di SMA yang menarik berbasis eksperimen dan ketrampilan berfikir orde tinggi, Dinas Pendidikan Wilayah V Sukabumi dan MGMP Fisika SMA Kab. Sukabumi | 2023 |
| Narasumber: Sosialisasi dan Penerapan Pemilihan Sampah untuk Bahan Baku Kompos pada Beberapa Kawasan Kantin di Universitas Indonesia, FMIPA UI | 2022 |
| Narasumber: Workshop Penyusunan Proposal yang baik untuk Meraih Hibah Eksternal dari Kemendikbudristek tahun 2021, FKG UI | 2021 |
| Juri Bidang Fisika: Indonesian Science Project Olympiad (ISPO) 2021, Eduversal | 2021 |
| Narasumber: Webinar IMS #4: Menuju Hilirsasi Riset Magnetik di Indonesia, Indonesian Magnetic Society | 2020 |
| Narasumber: Workshop Penyusunan Rencana Induk Penelitian (RIP), Poltekes Yogyakarta | 2020 |
| Juri Bidang Fisika: Indonesian Science Project Olympiad (ISPO) 2020 | 2020 |
| Narasumber: Induksi bagi Calon Pegawai Tetap Universitas Indonesia, Direktorat Sumber Daya Manusia (DSDM) UI | 2019 |
| Peserta: Lokakarya Kepemimpinan Perguruan Tinggi Era 4.0, S-Knowledge Prof. Satriyo Soemantri Brodjonegoro | 2019 |
| Juri Bidang Fisika: Indonesian Science Project Olympiad (ISPO) 2019 | 2019 |
| Juri: The 2nd Youth Creation (Creativity for health and nutrition) Competition, SEAMEO Kemendikbud | 2018 |
| Juri Bidang Fisika: Indonesian Science Project Olympiad (ISPO) 2018 | 2018 |

K. Publikasi Artikel Ilmiah pada Jurnal Bereputasi 5 Tahun Terakhir

| Artikel Ilmiah | Tahun |
|--|-------|
| Investigation of Harmonic and Inharmonic Domain Wall Oscillation by Sinusoidal Magnetic Field in the Notched Permalloy Nanowire using Micromagnetic Approach, Kuwait Journal of Science , 50, 512-517, 2023. Contribution: First and Corresponding-author | 2023 |
| Single-step laser ablation synthesis of ZnO–Ag nanocomposites for broad-spectrum dye photodegradation and bacterial photoinactivation, Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry 441, 114717, 2023. Contribution: Corresponding-author | 2023 |
| Femtosecond laser-induced photochemical synthesis of gold nanoparticles in nitrate solution, <i>Radiation Physics and Chemistry</i> 199, 110269, 2022. Contribution: Corresponding-author | 2022 |
| Effect of interfacial spin mixing conductance on gyromagnetic ratio of Gd substituted $Y_3Fe_5O_{12}AB$, <i>Physics Letters A</i> 437, 128085, 2022. Contribution: Co-author | 2022 |
| Annealing temperature dependence of crystalline structure and magnetic properties in nano-powder strontium-substituted cobalt ferrite <i>Nano-Structures & Nano-Objects</i> 30, 100862, 2022. Contribution: Co-author | 2022 |
| Influences of Postannealing Treatment Parameters on the Structural and Magnetic Properties of Nickel-Doped Cobalt Ferrite Synthesized by Sol-Gel Route, Journal of Magnetism 27(1), 88-95, 2022. Contribution: Corresponding-author | 2022 |
| Reusability of Photocatalytic $CoFe_2O_4@ZnO$ Core-shell nanoparticles of dye degradation, <i>ECS Journal of Solid State Science and Technology</i> , 11(2), 023004 (2022). Contribution: Co-author | 2022 |
| Structural, optical, and potential broad-spectrum antibacterial properties of CuO-Ag nanoparticles biosynthesis using the extract of <i>Diospyros discolor</i> Wild, <i>Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology</i> , 12(4), 045007 (2021). Contribution: Corresponding-author | 2021 |

Dede Djuhana

- | | |
|--|------|
| Enhanced photocatalytic degradation of rhodamine 6G(R6G) using ZnO–Ag nanoparticles synthesized by pulsed laser ablation in liquid (PLAL), <i>Journal of Alloys and Compounds</i> 886, 161291, 2021. Contribution: Corresponding-author | 2021 |
| Micromagnetic investigation of the sub-nanosecond magnetic pulse driven domain wall motion in CoFeB nanowire, <i>Current Applied Physics</i> 27, 98-102, 2021. Contribution: Corresponding-author | 2021 |
| Micromagnetic Simulation of Domain Structure Transition in Ferromagnetic Nanospheres under Zero External Field, <i>International Journal of Technology</i> 12(3), 539-548, 2021. Contribution: First-author | 2021 |
| Micromagnetic Investigation of Magnetization Reversal in Sphere-Shaped Ferromagnetic Nanoparticle, <i>Key Engineering Materials</i> 855, 237-242, 2020. Contribution: Corresponding-author | 2020 |
| Dependence of the photocatalytic reduction of bicarbonate to formic acid by Au–TiO ₂ on Au morphology and its plasmonic vibrational mode, <i>Materials Chemistry and Physics</i> 249, 123018, 2020. Contribution: Co-author | 2020 |
| Micromagnetic Study on the Magnetization Reversal of Barium Hexaferrite (BaFe ₁₂ O ₁₉) Thin Film, <i>Makara Journal of Science</i> 198-204. Contribution: First and Corresponding-author | 2019 |
| Micromagnetic study of domain wall depinning driven by nanosecond current pulse in notched Permalloy nanowires, <i>Current Applied Physics</i> 18 (2), 236-240 . Contribution: First and Corresponding-author | 2018 |

L. Publikasi Buku

| Publikasi Buku | Tahun |
|---|-------|
| Dede Djuhana , Pengantar Belajar Object Oriented Micromagnetic Framework (OOMMF) Edisi ke-2, ISBN: 978-623-229-099-0, Penerbit : Guepedia Publisher, 166 Halaman | 2021 |
| Dede Djuhana , Pengantar Belajar Object Oriented Micromagnetic Framework (OOMMF), ISBN: 978-623-229-099-0, Penerbit : Guepedia Publisher, 131 Halaman | 2019 |

M. Riwayat Partisipasi Forum Ilmiah

| Seminar/Konferensi | Tahun |
|--|--------------|
| Narasumber <i>The 3rd Sriwijaya International Conference on Basic and Applied Sciences 2023</i> FMIPA Universitas Sriwijaya, Palembang Indonesia | 2023 |
| Narasumber <i>Seminar Nasional Fisika ke-4 2023</i> FMIPA Universitas Jember Indonesia | 2023 |
| Moderator <i>6th International Conference of Asian Union of Magnetic Societies (IcAUMS) 2023</i> , Bali Indonesia | 2023 |
| Peserta <i>3rd Joint Coordination Committee symposium and meeting held at Riken Yokohama on SATREPS project for development of complex technologies for prevention and control of rubber tree leaf fall diseases</i> , Riken Jepang | 2023 |
| Pemakalah <i>6th International conference on functional material science (ICFMS)</i> , Bali Indonesia | 2022 |
| Pemakalah <i>International Symposium on Frontier of Applied Physics 5th (ISFAP) 2019</i> , LIPI Puspittek Serpong, Indonesia | 2019 |
| Pemakalah <i>International Conference on Current Progress in Functional Material 2nd 2017</i> , Bali Indonesia | 2017 |

Daftar Pustaka

- Abert, C., Exl, L., Bruckner, F., Drews, A., and Suess, D. (2013). Magnum.fe: A micro-magnetic finite-element simulation code based on FEniCS. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 345:29–35.
- Abert, C., Selke, G., Krüger, B., and Drews, A. (2012). A fast finite-difference method for micromagnetic using the magnetic scalar potential. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(3):1105–1109.
- Aharoni, A. (1991). Magnetostatic energy calculation. *IEEE Transactions Magnetics*, 27(4):3539–3544,.
- Aharoni, A. (2001). Micromagnetic: past, present and future. *Physics B Condensed Matter*, 306:1–9.
- Albert, M., Franchin, M., Fischbacher, T., Meier, G., and Fangohr, H. (2012). Domain wall motion in perpendicular anisotropy nanowires with edge roughness. *Physics Condensed Matter*, 24(2):024219.
- Baibich, M. N., Broto, J. M., Fert, A., Dau, F. N. V., Petroff, F., Eitenne, P., Creuzet, G., Friederich, A., and Chazelas, J. (1988). Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices. *Physics Review Letter*, 61:2472.
- Barman, A. and Haldar, A. (2014). Time-domain study of magnetization dynamics in magnetic thin films and micro- and nanostructures. In Camley, R. E. and Stamps, R. L., editors, *Solid State Physics*, volume 65 of *Book Series*, chapter 1. Elsevier.
- Beach, G. S. B., Tsoi, M., and Erskine, J. L. (2008). Current-induced domain wall motion. *Current Perspective*, 320:1272–1281.
- Beach, G. S. D., Nistor, C., Knutson, C., Tsoi, M., and Erskine, J. L. (2005). Dynamics of field-driven domain-wall propagation in ferromagnetic nanowires. *Nature Materials*, 4:741–744.
- Berger, L. (1978). Low-field magnetoresistance and domain drag in ferromagnets. *Journal Applied Physics*, 49:2156.
- Berger, L. (1984). Exchange interaction between ferromagnetic domain-wall and electric-current in very thin metallic-films. *Journal Applied Physics*, 55:1954.
- Binasch, G., Grünberg, P., Saurenbach, F., and Zinn, W. (1989). Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Physics Review B*, 39:4828.
- Biskeborn, B. and Jubert, P. O. (2014). Bulletpack: A fast, flexible packing algorithm for particulate media. *IEEE Transactions Magnetics*, 896(3):880–885.
- Bloch, F. (1927). Theory of exchange problem and remanence phenomena of ferromagnetic substances. *Zeitschrift für Physik*, 74:295.

- Boardman, R. P., Fangohr, H., Cox, S. J., Goncharov, A. V., Zhukov, A. A., and de Groot, P. A. J. (2004). Micromagnetic simulation of ferromagnetic part-spherical particles. *Journal of Applied Physics*, 95:7037–7039.
- Brown Jr, W. F. (1963). *Micromagnetics*. Interscience Publishers.
- Brown Jr, W. F. (1968). The fundamental theorem of fine-ferromagnetic-particle theory. *Journal of Applied Physics*, 39:993–993.
- Bryan, M. T., Bance, S., Dean, J., Schrefl, T., and Allwood, D. A. (2011). Transverse and vortex domain wall structure in magnetic nanowires with uniaxial in-plane anisotropy. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 24(2):024205.
- Coey, J. M. D. (2009). *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge University Press, 1st edition.
- d’Aquino, M. (2004). *Nonlinear Magnetization Dynamics in Thin-films and Nanoparticles*. PhD thesis, University of Napoli.
- Djuhana, D., Kurniawan, C., and Jonifan (2020). Micromagnetic study of relaxed domain structure in square shape ferromagnets. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Frontier of Applied Physics (ISFAP 2019)*, volume 2256, page 030009. AIP Conference Proceedings.
- 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*, 18:236–240.
- Djuhana, D., Kurniawan, C., Kim, D. H., and Widodo, A. T. (2021). Micromagnetic simulation of domain structure transition in ferromagnetic nanosphere under zero external field. *International Journal of Technology*, 12(3):539–548.
- Djuhana, D., Kurniawan, C., Purnam, B., and Kim, D. H. (2023). Investigation of harmonic and inharmonic domain wall oscillation by sinusoidal magnetic field in the notched permalloy nanowire using micromagnetic approach (inpress). *Kuwait Journal of Science*.
- Djuhana, D., Piao, H. G., Lee, S. H., Kim, D. H., Ahn, S. M., and Choe, S. B. (2010a). Asymmetric ground state spin configuration of transverse domain wall on symmetrically notched ferromagnetic nanowires. *Applied Physics Letters*, 97:022511.
- Djuhana, D., Piao, H. G., Shim, J. H., Lee, S. H., Jun, S. H., Yu, S. C., Oh, S. K., and Kim, D. H. (2010b). Spontaneous domain wall motion at zero external magnetic field in ferromagnetic nanowire. *IEEE Transactions On Magnetics*, 46:217–219.
- Djuhana, D., Piao, H. G., Yu, S. C., Oh, S. K., and Kim, D. H. (2009). Magnetic domain wall collision around the Walker breakdown in ferromagnetic nanowires. *Journal Applied Physics*, 106:103926.

Dede Djuhana

- Djuhana, D., Soegijono, B., Oh, S. K., Yu, S. C., and Kim, D. H. (2013). Oscillatory transformative domain wall inner structure of the depinning domain wall around a notched ferromagnetic wire. *Journal of the Korean Physical Society*, 63(3):654–658.
- Donahue, M. J. and Porter, D. G. (1999). OOMMF User's Guide, Version 1.0. Technical report, Interagency Report NISTIR 6376, NIST, MD Gaithersburg.
- Dunlop, D. J. (1973). Superparamagnetic and single-domain threshold sizes in magnetite. *Journal of Geophysical Research*, 78:1780–1793.
- Elmore, W. C. (1938a). The magnetic of ferromagnetic colloids. *Physical Review*, 54:1092–1095.
- Elmore, W. C. (1938b). The magnetic structure of Cobalt. *Physical Review*, 53:757–764.
- Ferré, R., Hehn, M., and Ounadjela, K. (1997). Nanoscale magnetic domains in mesoscopic dots: Micromagnetic investigation of magnetisation processes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 165(1):9–12. Symposium E: Magnetic Ultrathin Films, Multilayers and Surfaces.
- Fidler, J. and Schrefl, T. (2000). Micromagnetic modelling - the current state of the art. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 33(15):R135–R156.
- Fidler, J., Schrefl, T., Tsiantos, V. D., Scholz, W., and Sues, D. (2002). Micromagnetic simulation of the magnetic switching behaviour of mesoscopic and nanoscopic structures. *Computational Material Science*, 24:163–174.
- Fischbacher, T., Franchin, M., Bordignon, G., and Fangohr, H. (2007). A systematic approach to multiphysics extensions of finite-element-based micromagnetic simulation: Nmag. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(6):2896–2898.
- Fruchart, O. and Thiaville, A. (2005). Magnetism in reduced dimensions. *Comptes Rendus Physique*, 6:921–933.
- Fukami, S., Suzuki, T., Ohshima, N., Nagahara, K., and Ishiwata, N. (2008). Micromagnetic analysis of current driven domain wall motion in nanostrips with perpendicular magnetic anisotropy. *Journal of Applied Physics*, 103:07E718.
- Gilbert, T. L. (1955). A lagrangian formulation of the gyromagnetic equation of the magnetic field. *Physical Review*, 100:1243.
- Gilbert, T. L. (2004). A phenomenological theory of damping in ferromagnetic material. *IEEE Trans. Mag*, 40(6):3443–3449.
- Grochowski, E. (2012). Future technology challenges for NAND Flash and HDD products. https://www.flashmemorysummit.com/English/Collaterals/Proceedings/2012/20120821_S102A_Grochowski.pdf.
- Guimarães, A. P. (2009). *Principle of Nanomagnetism*. Springer-Verlag, Berlin.

- Hayashi, M., Thomas, L., Rettner, C., Moriya, R., Jiang, X., and Parkin, S. S. P. (2006). Dependence of current and field driven depinning of domain walls on their structure and chirality in permalloy nanowires. *Phys. Rev. Lett.*, 97:207205.
- Hubert, A. and Schäfer, R. (2009). *Magnetic domains The Analysis of Magnetic Microstructures*. Springer.
- IDEMA (2014). Astc technology roadmap. https://idema.org/?page_id=2269.
- Jung, S. W., Kim, W., Lee, T. D., Lee, K. J., and Lee, H. (2008). Current-induced domain wall motion in a nanowire with perpendicular magnetic anisotropy. *Applied Physics Letter*, 92:202508.
- Kákay, A. and Varga, L. K. (2005). Monodomain critical radius for soft-magnetic fine particles. *Journal of Applied Physics*, 97:083901.
- Kákay, A., Westphal, E., and Hertel, R. (2010). Speedup of FEM micromagnetic simulation with graphical processing units. *IEEE Transaction On Magnetics*, 46(6):2303.
- Kasperski, M., Puzkarski, H., Hoang, D. T., and Diep, H. T. (2013). Magnetic properties of two-dimensional nanodots: Ground state and phase transition. *AIP Advances*, 3:12212.
- Kennard, E. H. (1939). Shape of the domains in ferromagnetics. *Physical Review*, 55:312–314.
- Kittel, C. (1946). Theory of the structure of ferromagnetic domains in film and small particles. *Physical Review*, 70(11–12):965–971.
- Kittel, C. (1949). Physical theory of ferromagnetic domains. *Reviews of Modern Physics*, 21(4):541–583.
- Kläui, M. and Fernandes Vaz, C. A. (2007). Magnetization configuration and reversal in small magnetic elements. In Kronmüller, H. and Parkin, S. S. S., editors, *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Material*, volume 2. John Wiley & Sons.
- Kläui, M., Vaz, C. A. F., Bland, J. A. C., Wernsdorfer, W., Faini, G., and Cambril, E. (2003). Domain wall pinning and controlled magnetic switching in narrow ferromagnetic ring structure with notches. *Journal of Applied Physics*, 93(10):7885–7890.
- Kronmüller, H. (2007). General micromagnetic theory. In Kronmüller, H. and Parkin, S. S. S., editors, *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Material*, volume 2. John Wiley & Sons.
- Kronmüller, H. and Fähne, M. (2003). *Micromagnetism and the Microstructure of Ferromagnetic*. Cambridge University Press, 1st edition.
- Kryder, M. H. (2002). Future magnetic recording technologies. <https://www.usenix.org/legacy/publications/library/proceedings/fast02/kryder.pdf>.

Dede Djuhana

- Kryder, M. H., Gage, E. C., McDaniel, T. W., Challener, W. A., Rottmayer, R. E., Ju, G., Hsia, Y.-T., and Erden, M. F. (2008). Heat assisted magnetic recording. *Proceedings of the IEEE*, 96(11):1810–1835.
- Kumar, D., Jin, T., Sbia, R., Kläui, M., Bedanta, S., Fukumi, S., Ravelosona, D., Yang, S. H., Liu, X., and Piramanayagam, S. N. (2022). Domain wall memory: Physics, materials, and devices. *Physics Reports*, 958:1–35.
- 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.
- Landau, L. and Lifshitz, E. (1935). On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies. *Physik. z. Sowjetunion*, 8:153–169.
- Leliaert, J. and Mulkers, J. (2019). Tomorrow’s micromagnetic simulations. *Journal of Applied Physics*, 125(18):180901.
- Li, H. (2016). *Storage physics and noise in heat-assisted magnetic recording*. Phd thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.
- López-Urías, F., Torres-Heredia, J. J., and Muñoz-Sandoval, E. (2005). Magnetization patterns simulation of Fe, Ni, Co, and Permalloy individual nanomagnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 294.
- Mardona, M. and Djuhana, D. (2012). Pengamatan efek anisotropi pada kecepatan domain wall di sekitar Walker breakdown dalam material feromagnet berbentuk nanowire. *Prosiding Seminar Nasional Fisika P2F-LIPI, 4-5 Juli 2012*.
- McMichael, R. D. and Donahue, M. J. (1997). Head to head domain wall structures in thin magnetic strips. *IEEE Transactions on Magnetics*, 33(5):4167–4169.
- Metaxas, P. J., Jamet, J. P., Mougín, A., Cormier, M., Ferfe, J., Baltz, V., Rodmacq, B., Dieny, B., and Stamps, R. L. (2007). Creep and flow regimes of magnetic domain wall motion in ultrathin Pt/Co/Pt films with perpendicular anisotropy. *Physical Review Letters*, 99.
- MICROMAGUS (2003). Software Package for Micromagnetic Simulations. <http://www.micromagus.de/home.html/>.
- Miltat, J. E. and Donahue, M. J. (2007). Numerical micromagnetics: Finite difference method. In Kronmüller, H. and Parkin, S. S. S., editors, *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Material*, volume 2. John Wiley & Sons.
- Nakatani, Y., Thiaville, A., and Miltat, J. (2005). Head-to-head domain walls in soft nano-strips: a refined phase diagram. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 290–291:750–753.

- Nature (2023). Gordon Moore (1929-2023) Microchip entrepreneur and architect of Moore's law. <https://www.nature.com/articles/d41586-023-01978-y>. 16 June 2023.
- Noble Prize (2007). The Nobel Prize in Physics 2007. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2007/press-release>.
- Nugraha, R. and Djuhana, D. (2023). Studi dinamika dinding domain magnetik tipe Bloch-wall material CoFeB bentuk nanowire menggunakan pendekatan micromagnetic. Master's thesis, Program Studi S2 Ilmu Material, FMIPA UI, Kampus UI Depok, Indonesia 16424.
- Parkin, S. S. P., Hayashi, M., and Thomas, L. (2008). Magnetic domain-wall racetrack memory. *Science*, 320:190.
- Parkin, S. S. P. and Yang, S. H. (2015). Memory on the racetrack. *Nature Technology*, 10:195–198.
- Petit, D., Jausovec, A. V., Read, R., and Cowburn, R. P. (2008). Domain wall pinning and potential landscape created by constriction and protrusion in ferromagnetic nanowires. *Journal Applied Physics*, 103:114307.
- Piao, H. G., Djuhana, D., Shim, J. H., Lee, S. H., Jun, S. H., Oh, S. K., Yu, S. C., and Kim, D. H. (2010). Three-dimensional spin configuration ferromagnetic nanocubes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10:7212–7216.
- Piramanayagam, S. and Srinivasan, K. (2009). Recording media research for future hard disk drives. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(6):485–494. Current Perspectives: Perpendicular Recording.
- Ramachandran, P. (2007). The Mayavi Data Visualizer. <https://http://mayavi.sourceforge.net/>.
- Rave, W. and Hubert, A. (2000). Magnetic ground state of a thin-film elements. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(6):3886–3899.
- Rowland, G. (2014). Muview2 3d Visualization of Micromagnetic Data from OOMMF and Mumax. <https://grahamrow.github.io/Muview2/>.
- Schabes, M. E. and Bertram, H. N. (1988). Magnetization processes in ferromagnetic cubes. *Journal of Applied Physics*, 64:1347—1357.
- Scholz, W., Fidler, J., Schrefl, T., Suess, D., Dittrich, R., Forster, H., and Tsiantos, V. (2003). Scalable parallel micromagnetic solvers for magnetic nanostructures. *Computation Materials Science*, 28(2003):366–383.
- Schrefl, T., Hrkac, G., Bance, S., Suess, D., Ertl, O., and Fidler, J. (2007). Numerical micromagnetics (finite elements method). In Kronmuller, H. and Parkin, S. S. S., editors, *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Material*, volume 2. John Wiley & Sons.

- Shiroishi, Y., Fukuda, K., Tagawa, I., Iwasaki, H., Takenoiri, S., Tanaka, H., Mutoh, H., and Yoshikawa, N. (2009). Future options for hdd storage. *IEEE Transactions on Magnetism*, 45(10):3816–3822.
- Skomski, R. (2003). Nanomagnetism. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 15:841–896.
- Slonczewski, J. C. (1996). Current-driven excitation of magnetic multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 159:L1.
- Sumarta, A., Djuhana, D., and Kurniawan, B. (2011). Studi mikromagnetik dinamika domain wall magnetik pada bahan feromagnetik berbentuk strip-nanowire. *Prosiding Seminar Nasional Fisika P2F-LIPI, 12-13 Juni 2011*.
- Taylor, C. (2020). Hard disk drive (HDD). <https://cyberhoot.com/cybrary/hard-disk-drive-hdd/>. [Online accessed 15 October 2023].
- Thiaville, A., Nakatani, Y., Miltat, J., and Suzuki, Y. (2005). Micromagnetic understanding of current-driven domain wall motion in patterned nanowires. *Europhysics Letters*, 69:990–996.
- Vansteenkiste, A. and Wiele, B. V. (2011). Mumax: A new high-performance micromagnetic simulation tool. *Journal of Magnetism and Magnetism*, 323(21):2585–2591.
- Wang, Y., Gao, D., Gao, K. Z., Cao, J., and Wei, F. (2014). The role of inhomogeneity of perpendicular anisotropy in magnetic properties of ultra thin CoFeB film. *Journal Applied Physics*, 115:053901.
- Weiss, P. (1907). Hypothesis of molecular field and ferromagnetic properties. *Journal of Physics*, 4:661.
- Wikipedia (2023). Giant magnetoresistance—Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Giant_magnetoresistance. [Online accessed 18 October 2023].
- Wolf, S. A., Awschalom, D. D., Buhrman, R. A., Daughton, J. M., von Molnár, S., Rourkes, M. L., Chchelkanova, A. Y., and Treger, D. M. (2001). Spintronic: A spin-based electronic vision for the future. *Science*, 294:1488–1494.
- Wood, R. (2009). Future hard disk drive systems. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321:555–561.
- Wood, R., Hsu, Y., and Schultz, M. (2007). Perpendicular magnetic recording technology. https://documents.westerndigital.com/content/dam/doc-library/en_us/assets/public/western-digital/collateral/white-paper/white-paper-pmr.pdf.
- Zhu, J.-G., Zhu, X., and Tang, Y. (2008). Microwave assisted magnetic recording. *IEEE Transactions on Magnetism*, 44(1):125–131.

Daftar Index

| | |
|-------------------------------|-------|
| A | |
| Albert Fert | 1 |
| Anti-paralel | 2 |
| Arus depinning | 28 |
| Arus terpolasisasi | 28 |
| Assisted-thermal | 3 |
| ASTC | 3 |
| Asymmetric | 21 |
| B | |
| Berger | 12 |
| Bloch wall | 6, 8 |
| C | |
| C-state | 5 |
| Co | 14 |
| CoFeB | 14 |
| Continuum | 8 |
| Creep velocity | 26 |
| D | |
| Depinning | 28 |
| Diameter kritis | 18 |
| Digital bit | 1 |
| Domain magnet | 7 |
| Domain wall | 7 |
| Don Porter | 13 |
| E | |
| EAO | 17 |
| Energi anisotropi | 8, 10 |
| Energi exchange | 8, 10 |
| Energi Gibbs | 9 |
| Energi magnetostatik | 10 |
| Energi minimum | 19 |
| Energi Zeeman | 10 |
| Energi-bebas Gibb | 10 |
| Energi-bebas Landau | 10 |
| F | |
| Faktor Landé | 11 |
| Faktor non-adiabatik | 12 |
| Faktor redaman | 11 |
| Fe | 14 |
| Felix Bloch | 8 |
| FFT | 30 |
| File ODT | 13 |
| File OMF | 13 |
| finite difference | 7 |
| finite element | 7 |
| Flower-state | 5 |
| G | |
| Gilbert | 9 |
| GMR | 1 |
| Golf-pad | 19 |
| Grain | 3 |
| Ground state | 14 |
| Gyromagnetic | 9 |
| Gyromagnetic Gilbert | 12 |
| Gyromagnetic Landau | 12 |
| H | |
| HAMR | 3 |
| HAO | 17 |
| Hard magnetic | 18 |
| HDD | 2 |
| Hukum Moore | 2 |
| I | |
| IMA | 6 |
| J | |
| Joule heating | 6 |
| Jung | 29 |
| K | |
| Konstanta alpha | 12 |
| Konstanta Boltzmann | 3 |
| Konstanta lambda | 11 |
| L | |
| Landau-Lifshitz | 9 |
| Landau-Lifshitz-Gilbert | 9 |
| Landé | 12 |
| Larmor | 11 |
| Leaf-state | 5 |
| Linux | 13 |
| LMR | 2 |
| M | |
| Magnetic recording | 1 |

Dede Djuhana

| | | | |
|-------------------------------------|--------|--------------------------|-------|
| Magneton Bohr | 12 | Pinning | 28 |
| Magnetoresistance | 1 | PMA | 6, 25 |
| MAMR | 3 | PMR | 2 |
| Mayavi | 13 | Py | 14 |
| McOSX | 13 | R | |
| Medan depinning | 14, 27 | Racetrack memory | 5 |
| Medan efektif | 10, 11 | Rasio gyromagnetik | 11 |
| Medan osilasi | 14, 29 | S | |
| Medan pulsa | 14 | S-state | 5 |
| Micromagnetic | 8 | Signal-to-noise | 2 |
| Mike Donahue | 13 | Single domain | 4 |
| Model Bola | 15 | Slonczewski | 12 |
| Model IMA | 22 | Small particle | 4 |
| Model nanowire | 19 | Soft magnetic | 18 |
| Model notch | 20 | Solid state | 3 |
| Momen magnetik | 11 | Solid-state memory | 6 |
| Momentum angular | 11 | Spin valve | 1 |
| MR Head | 2 | Spintronic | 1 |
| Multi domain | 4 | SSD | 2 |
| Muview2 | 13 | STF | 3 |
| N | | STT | 12 |
| Ni | 14 | Sumur potensial | 21 |
| NIST | 13 | Superparamagnetic | 3 |
| Non-volatile | 6 | Symmetric | 21 |
| Néel relaxation time | 3 | T | |
| Néel wall | 8 | Temperatur Curie | 7 |
| Néel wall bersifat IMA (atas) | 6 | Thermal stability | 2 |
| O | | Thin film | 5 |
| OOMMF | 13 | TMR | 2 |
| Osilasi harmonik | 31 | TMR Head | 2 |
| Osilasi inharmonik | 31 | W | |
| OVF2VTK | 13 | Walker breakdown | 6, 22 |
| Oxii | 13 | Weiss | 7 |
| P | | William Brown Jr | 9 |
| Paralel | 2 | Windows | 13 |
| Patterned-media | 3 | Wolf | 1 |
| Pendekatan Brown | 18 | Writability | 2 |
| Pendekatan Kittel | 18 | | |
| Peter Grünberg | 1 | | |

