



Simulasi Mikromagnetik untuk Menganalisis Dampak Bentuk Geometri terhadap Sifat Magnetik Material *Permalloy*

Fenni Vavionita, Anisa Indriawati*, Herman Aldila

Program Studi Fisika, Universitas Bangka Belitung, Kampus Terpadu Balunijuk, Bangka, Kepulauan Bangka Belitung, Indonesia 33172

*E-mail korespondensi: anisaind.ind@gmail.com

Info Artikel:

Dikirim:
16 Juli 2024
Revisi:
23 Mei 2025
Diterima:
27 Juni 2025

Kata Kunci:

Permalloy; soft magnetic thin film; micromagnetic simulation; OOMMF; coercivity

Abstract

The rapid advancement of ferromagnetic material technology has driven extensive use of soft magnetic thin films in various applications, including sensors, recording heads, and magnetic memory devices. Soft magnetic materials are defined by high permeability and low coercivity, making them highly responsive to external magnetic fields. Permalloy, a widely used soft magnetic material, offers high permeability, low coercivity, strong oxidation resistance, and exhibits significant anisotropic magnetoresistance (AMR) effects. This study performs micromagnetic simulations on Permalloy thin films using the Object Oriented Micromagnetic Framework (OOMMF) to examine how different geometric shapes affect magnetic properties. An external magnetic field is applied along the x-axis, and key responses analyzed include magnetization, coercivity, anisotropy energy, and domain wall displacement. Simulation results at an applied field of 5000 Oe indicate that geometry has a significant impact on magnetic performance. Shape 1 demonstrates the highest magnetization of 0.99997, coercivity of 680 Oe, and anisotropy energy of 5.72×10^{-28} J. Shape 2 shows magnetization of 0.9807, coercivity of 1240 Oe, and anisotropy energy of 3.55×10^{-25} J, while Shape 3 has magnetization of 0.9421, coercivity of 960 Oe, and anisotropy energy of 1.00×10^{-25} J. These findings highlight the importance of geometric design in optimizing the magnetic characteristics of Permalloy thin films for advanced device applications.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi berupa penerapan spintronik menarik perhatian peneliti akhir-akhir ini [1]. Salah satu perkembangan teknologi dalam bidang pengembangan material ferromagnetik berbasis lapisan tipis yang bersifat magnetik lunak (soft magnetic) digunakan dalam pembuatan head perekam, Magnetic Tunnel Junction (MTJ) yang terdapat dalam Magnetoresistive Random Access Memory (MRAM), dan berbagai sensor [2]. Hal ini dikarenakan material tersebut dapat dikembangkan dengan memanfaatkan perubahan konfigurasi momen magnet [3]

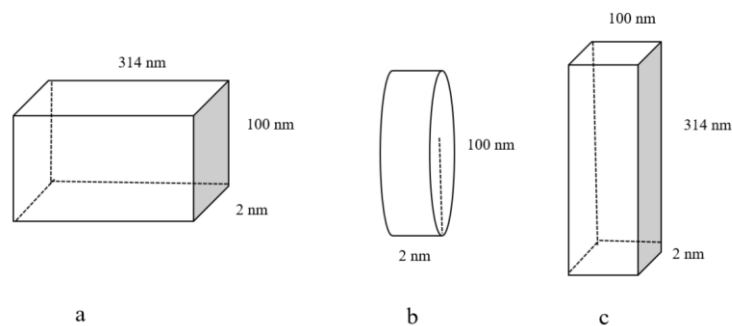
Salah satu contoh material ferromagnetik dengan sifat softmagnetic adalah permalloy. Permalloy memiliki permeabilitas yang tinggi dan konfigurasi momen magnet yang mudah dikontrol dengan perubahan medan magnet yang kecil. Struktur domain magnetik pada permalloy memiliki ukuran mikron yang diketahui melalui pengukuran menggunakan mikroskop

gaya magnet (MFM) dan dibandingkan dengan hasil simulasi. Perbedaan keadaan domain stabil terjadi sebagai akibat dari perbedaan kecil dalam lingkungan magnet lokal yang terjadi selama proses demagnetisasi [4]

Permalloy dalam pengaplikasiannya ada yang berbentuk nanowire (kawat nano), dan thin film (lapisan tipis). Kawat nano merupakan suatu struktur nano yang melapisi substrat dengan diameter berskala nanometer (10-9 meter) kawat nano dapat disebut sebagai struktur yang memiliki ketebalan atau diameter yang dibatasi pada puluhan nanometer atau kurang [5]. Perbedaan bentuk material mengakibatkan perbedaan respon momen magnetik ketika beda dalam suatu medan magnet. Akibatnya, pola pergeseran domain wall juga mengalami perbedaan. Perbedaan pola pergeseran domain wall diindikasikan dengan berubahnya area domain magnetik. Pada penelitian ini akan dilakukan kajian tentang pengaruh bentuk material terhadap pergeseran domain wall magnetik pada volume tetap. Studi penelitian teoritis dan eksperimental tentang perilaku magnetisasi kawat nano ferromagnetik dengan penampang melintang melingkar (silindris) atau persegi panjang (planar) telah menjadi semakin penting selama beberapa dekade terakhir [6]

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan mensimulasikan material *Permalloy* yang divariasikan dalam bentuk balok dan lingkaran dengan ukuran berbeda, namun memiliki volume yang sama. Pemodelan material ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pemodelan material dengan tiga variasi bentuk, yaitu: a. bentuk 1, b. bentuk 2, dan c. bentuk 3 pada volume tetap.

Masing-masing diberikan medan magnet sebesar 0-5000 Oe dengan arah x. Selanjutnya yaitu memberikan input beberapa parameter kedalam perangkat lunak. Adapun nilai dari masing-masing parameter yang diinput kedalam software, diberikan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Parameter- parameter material *permalloy* yang diinput [7]

No	Parameter Input	<i>Permalloy</i>
1	Magnetisasi Saturasi (Ms)	$8,4 \times 10^5 \text{ A/m}$
2	Konstanta <i>Exchange</i> (A)	$10 \times 10^{-12} \text{ erg/cm}$
3	Konstanta Anisotropi (K)	0,15
4	Konstanta Damping (α)	0,01

Persamaan Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) digunakan untuk mendeskripsikan dinamika momen magnetik dalam material ferromagnetik ketika dipengaruhi oleh medan magnet luar.

Persamaan ini menggambarkan bagaimana vektor magnetisasi berubah terhadap waktu akibat efek precesi dan peredaman. LLG sangat penting dalam simulasi mikromagnetik, seperti dengan OOMMF, untuk memodelkan pergerakan domain magnetik dan fenomena switching magnetisasi. Persamaan LLG dinyatakan dalam persamaan 1 [8].

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma_0 \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (1)$$

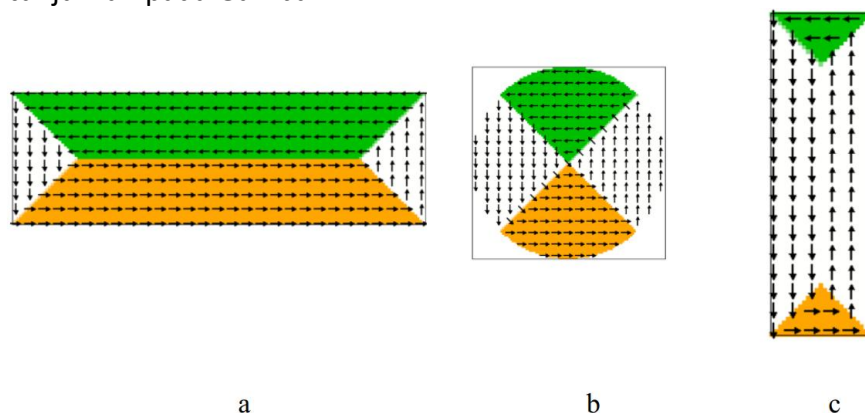
Dalam penelitian ini, parameter utama yang dianalisis adalah nilai magnetisasi dan energi anisotropi dari material *Permalloy*. Analisis dilakukan untuk mengetahui bagaimana bentuk material memengaruhi respon magnetik material terhadap medan luar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam simulasi ini, medan magnet eksternal diberikan ke arah sumbu-x untuk mengamati respons material terhadap medan tersebut. Fokus analisis diarahkan pada pergeseran domain magnetik dan *domain wall* yang terjadi akibat medan luar, serta bagaimana perubahan ini memengaruhi nilai magnetisasi dan energi anisotropi pada masing-masing bentuk geometri *Permalloy*. Domain magnetik merupakan daerah pada suatu material yang terorientasi pada arah tertentu dan total magnetisasi mendekati nol. Satu domain dengan domain lainnya dipisahkan oleh *domain wall* magnetik [9]

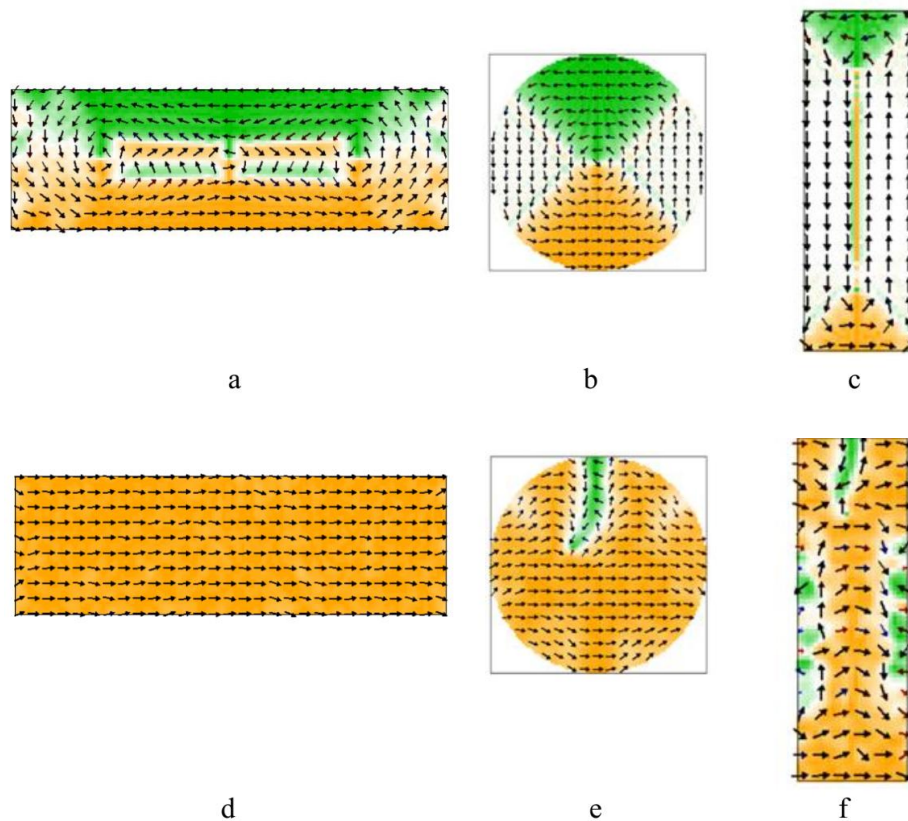
Pergeseran *Domain Wall* Magnetik

Dari hasil penelitian dapat diamati bahwa domain di setiap tidak sama. Bentuk 1 mayoritas memiliki arah momen magnetik +x dan -x, bentuk 2 memiliki arah yang sama banyak, bentuk 3 memiliki mayoritas arah momen magnetik +y dan -y [2]. Kondisi awal tanpa pengaruh medan magnet luar ditunjukkan pada Gambar 2.



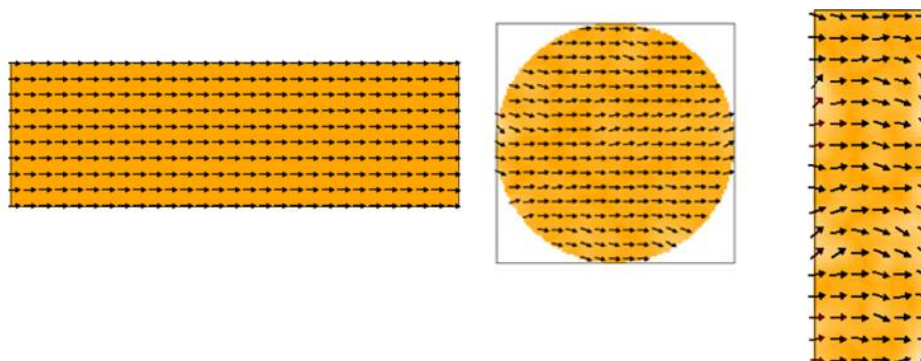
Gambar 2. Perbedaan momen magnetik akibat pengaruh medan magnet luar 0 Oe pada a. bentuk 1, b. bentuk 2, dan c. bentuk 3.

Gambar 3 merupakan kondisi momen magnetik dan domain magnetik pada pengaruh medan magnet luar sebesar 120 Oe. Berdasarkan gambar 3 tersebut dapat dilihat bahwa ketika material permalloy diberikan medan magnet luar sebesar 120 Oe, baik bentuk 1, bentuk 2, dan bentuk 3 terlihat adanya pergeseran domain-domain pada domain wall. Pengaruh medan magnetik luar yang diberikan mengakibatkan adanya perputaran arah momen magnetik secara berlawanan arah jarum jam. Saat medan magnet luar dinaikkan menjadi 1000 Oe, momen magnetik yang terdapat pada bentuk 1 hampir secara menyeluruh menyesuaikan diri sesuai arah medan magnet luar yang diberikan, namun untuk bentuk 2 dan bentuk 3 momen magnetiknya belum tersaturasi atau menyesuaikan diri secara menyeluruh. Hal ini dikarenakan pada keadaan awal, bentuk 1 memiliki magnetisasi spontan arah x yang lebih dominan dibandingkan dengan bentuk 2 dan bentuk 3.



Gambar 3. Kondisi domain magnetik dan momen magnetik di bawah pengaruh medan magnet luar sebesar 120 Oe pada a. bentuk 1, b. bentuk 2, dan c. bentuk 3, serta medan magnet luar sebesar 1000 Oe pada d. bentuk 1, e. bentuk 2, dan f. bentuk 3.

Medan magnet dinaikkan dengan nilai maksimal yaitu 5000 Oe, momen magnetik pada material permalloy secara sempurna menyesuaikan diri sesuai dengan arah medan magnet luar yang diberikan, walaupun pada bentuk 3 masih terlihat ada bagian momen magnetik yang masih sedikit belum menyesuaikan diri secara sempurna. Kondisi momen magnetik pada permalloy di bawah pengaruh medan magnet luar 5000 Oe ditunjukkan pada Gambar 4. Bentuk 3 paling sulit termagnetisasi.



Gambar 4. Keadaan momen magnetik *permalloy* pada medan magnet luar 5000 Oe pada bentuk 1, bentuk 2, dan bentuk 3.

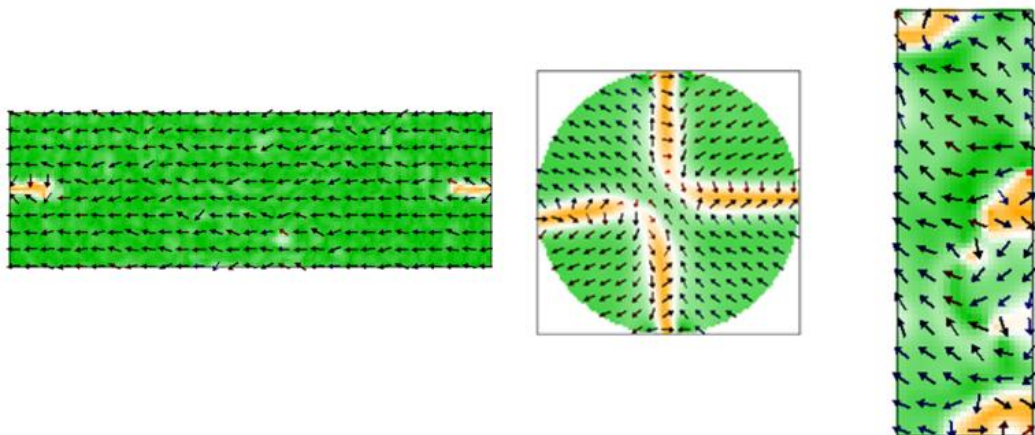
Nilai magnetisasi di setiap perubahan keadaan akibat pengaruh medan magnet luar ditunjukkan pada tabel 2. Berdasarkan tabel 2 dan gambar 3, 4, dan 5 menunjukkan gejala yang selaras yaitu semakin seragam arah momen magnetik mengindikasikan tingginya nilai

magnetisasinya. Berdasarkan data yang diperoleh, bentuk 3 menunjukkan hasil nilai magnetisasi yang paling kecil diantara bentuk lainnya pada setiap variasi medan magnet.

Tabel 2. Nilai magnetisasi yang dihasilkan akibat pengaruh medan magnet luar

Medan magnet luar (Oe)	Nilai magnetisasi Bentuk 1	Nilai magnetisasi Bentuk 2	Nilai magnetisasi Bentuk 3
120	0,08078	0,001295	0,003856
1000	0,986688	0,788468	0,538649
5000	0,99997	0,980628	0,942093

Proses pembalikan dilakukan dengan memberikan medan magnet 0 sampai -5000 Oe dengan arah -x, momen magnet mengikuti arah sesuai dengan arah medan magnet luar yang diberikan. Fenomena ini dapat dilihat pada Gambar 5. Gambar 5 adalah keadaan momen magnet di bawah pengaruh medan magnet yang diberikan sebesar -2000 Oe. Keadaan ini merupakan keadaan kebalikan dari momen magnetik yang terjadi saat pengaruh medan magnet +x. Berdasarkan hasil penelitian tersebut terlihat bahwa adanya pengaruh bentuk pada fenomena pergeseran domain wall magnetik, terlihat bahwa permalloy akan mudah termagnetisasi dan momen magnetik akan mudah tersaturasi jika area +x materialnya memiliki ukuran x yang lebih dominan. Adanya perbedaan arah pada titik yang acak itu disebabkan karena interaksi yang ditimbulkan antara momen magnetik satu dengan momen magnetik lainnya.



Gambar 3 Permalloy dengan bentuk 1, 2, dan 3 pada medan magnetik luar – 2000 Oe.

Medan Koersifitas

Nilai medan Koersivitas dapat dihitung ketika nilai medan magnet diturunkan hingga magnetisasi ke nol [10]. Ketika intensitas medan saturasi diperbesar dari nol secara kontinu, maka nilai magnetisasi akan mengikuti lengkungan hingga mencapai nilai medan saturasi (H_s) maksimum. Walaupun intensitas magnet $H = 0$, nilai $M \neq 0$ (tetap ada). Jika ingin menghilangkan M , maka diperlukan intensitas balik atau medan magnet luar yang bernilai negatif. Jika medan Magnet luar negatif diperbesar, maka magnetisasi akan berubah arah menjadi negatif ($-M_s$) dan kembali ke titik awal. Demikian, nilai medan koersivitas dapat ditentukan. Nilai koersivitas untuk masing-masing bentuk ditunjukkan pada Tabel 3. Berdasarkan data yang diperoleh, nilai medan koersivitas yang dibutuhkan untuk material permalloy dengan bentuk berbeda akan memiliki besar nilai yang tidak sama. Hal ini menunjukkan bahwa setiap bentuk memengaruhi nilai

koersivitas. Nilai medan koersivitas yang semakin kecil akan memudahkan dilakukan proses pembalikan magnetisasi.

Tabel 3. Besarnya medan koersivitas dari material *Permalloy*

Material <i>Permalloy</i>	Nilai Medan Koersivitas (Oe)
Bentuk 1	680
Bentuk 2	1240
Bentuk 3	960

Nilai Energi Anisotropi

Nilai energi anisotropi yang dihasilkan pada bentuk 1, bentuk 2, dan bentuk 3 menunjukkan bahwa material permalloy dengan variasi bentuk yang berbeda memiliki karakteristik anisotropi yang tidak sama. Perubahan energi anisotropi terhadap variasi medan magnet luar ditampilkan pada Tabel 4. Meskipun medan magnet luar yang diberikan pada setiap bentuk memiliki besar yang sama, nilai energi anisotropi yang dihasilkan berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa respons energi anisotropi terhadap medan magnet luar sangat dipengaruhi oleh bentuk material. Selain itu, nilai magnetisasi pada masing-masing bentuk juga menunjukkan variasi, yang mengindikasikan bahwa distribusi dan arah momen magnetik berbeda pada setiap bentuk. Berdasarkan Tabel 4, energi anisotropi tertinggi tercatat pada bentuk 3 saat medan magnet luar sebesar 2000 Oe diberikan. Fenomena serupa juga terjadi pada medan magnet 5000 Oe, di mana bentuk 3 kembali menunjukkan energi anisotropi paling tinggi. Namun, jika merujuk ke Tabel 3, magnetisasi bentuk 3 justru merupakan yang paling rendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa ketika magnetisasi bernilai rendah, ketidakaturan arah momen magnetik menjadi lebih tinggi. Akibatnya, energi anisotropi meningkat. Anisotropi akan mencapai nilai maksimum ketika arah momen magnetik tidak sejajar dengan *easy axis* [11].

Tabel 4. Tabel pengaruh nilai energi anisotropi terhadap medan magnet luar pada bentuk 1, 2, dan 3.

Medan magnetisasi luar (Oe)	Nilai energi anisotropi bentuk 1 (J)	Nilai energi anisotropi bentuk 2 (J)	Nilai energi anisotropi bentuk 3 (J)
0	$1,5 \times 10^{-24}$	$4,7 \times 10^{-24}$	$7,9 \times 10^{-24}$
240	$4,16 \times 10^{-24}$	$4,87 \times 10^{-24}$	$7,06 \times 10^{-24}$
2000	$7,63 \times 10^{-27}$	$1,38 \times 10^{-24}$	$2,83 \times 10^{-24}$
5000	$5,72 \times 10^{-28}$	$3,55 \times 10^{-25}$	$1,00 \times 10^{-24}$
1320	$1,65 \times 10^{-26}$	$2,07 \times 10^{-25}$	$6,56 \times 10^{-25}$
800	$7,14 \times 10^{-26}$	$2,37 \times 10^{-25}$	$7,15 \times 10^{-25}$
-2000	$8,78 \times 10^{-25}$	$4,42 \times 10^{-24}$	$4,41 \times 10^{-24}$
-5000	$1,08 \times 10^{-27}$	$2,17 \times 10^{-24}$	$2,47 \times 10^{-24}$

Hal ini menunjukkan bahwa bentuk geometris material sangat memengaruhi orientasi dan keteraturan momen magnetik di dalamnya. Oleh karena itu, pemilihan bentuk material menjadi

faktor penting dalam pengendalian sifat magnetiknya, khususnya dalam aplikasi yang memerlukan kestabilan anisotropi energi pada medan magnet tertentu. Temuan ini dapat menjadi landasan bagi pengembangan desain material magnetik berbasis permalloy yang lebih optimal di masa depan.

KESIMPULAN

Terdapat pengaruh bentuk material *Permalloy* terhadap nilai magnetisasi yang dihasilkan. Ketika diberikan medan magnet luar yang sama sebesar 5000 Oe, nilai magnetisasi yang diperoleh yaitu 0,99997 pada bentuk 1, 0,980628 pada bentuk 2, dan 0,942093 pada bentuk 3. Dapat disimpulkan bahwa material *Permalloy* dengan bentuk 1 memiliki nilai magnetisasi paling tinggi, yang menunjukkan bahwa bentuk ini lebih mudah tersaturasi dibanding bentuk lainnya. Selain itu, bentuk geometri juga memengaruhi besar kecilnya nilai medan koersivitas. Nilai medan koersivitas tertinggi diperoleh pada bentuk 2 yaitu sebesar 1240 Oe, sedangkan nilai terendah terdapat pada bentuk 1 dengan besar medan koersivitas 680 Oe. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk 1 tidak hanya mudah tersaturasi, tetapi juga memerlukan medan balik yang lebih kecil untuk mengubah arah magnetisasinya. Di samping itu, terdapat pula pengaruh bentuk terhadap nilai energi anisotropi. Ketika diberikan medan magnet luar yang sama, nilai energi anisotropi yang dihasilkan berbeda-beda pada setiap bentuk, yang menunjukkan bahwa kestabilan arah magnetisasi juga bergantung pada bentuk geometri material *Permalloy* tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Kurniawan and D. Djuhana, "Current driven domain wall depinning in notched Permalloy nanowires," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1711, no. August 2012, 2016, doi: 10.1063/1.4941610.
- [2] A. Indriawati, "Jurnal Fisika FLUX," vol. 14, pp. 90–95, 2017.
- [3] K. Ni'mah, *Kajian Fenomena Stt (Spin Transfer Torque) pada Bahan Permalloy Nife Berbentuk Nanowire Melalui Simulasi Mikromagnetik*. 2018.
- [4] S. Felton, K. Gunnarsson, P. E. Roy, P. Svedlindh, and A. Quist, "MFM imaging of micron-sized permalloy ellipses," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 280, no. 2–3, pp. 202–207, 2004.
- [5] R. Boston, Z. Schnepp, Y. Nemoto, Y. Sakka, and S. R. Hall, "In situ TEM observation of a microcrucible mechanism of nanowire growth," *Science (80-.)*, vol. 344, no. 6184, pp. 623–626, 2014.
- [6] M. S. Sultan, "Angular Dependence of Magnetization Behavior in Ni₈₁Fe₁₉ Nanowires by Micromagnetic Simulations," *J. Nanotechnol.*, vol. 2023, 2023.
- [7] Coey, "This page intentionally left blank," United Kingdom.
- [8] S. Sundara Mahalingam, B. V. Manikandan, and S. Arockiaraj, "Review - Micromagnetic Simulation Using OOMMF and Experimental Investigations on Nano Composite Magnets," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1172, no. 1, 2019.
- [9] S. Ghosh *et al.*, "Current-Driven Domain Wall Dynamics in Ferrimagnetic Nickel-Doped Mn₄N Films: Very Large Domain Wall Velocities and Reversal of Motion Direction across the Magnetic Compensation Point," *Nano Lett.*, vol. 21, no. 6, pp. 2580–2587, 2021.
- [10] M. Rianna *et al.*, "Study and characterization of Fe₃O₄ synthesized from natural iron sand in Sumatera Utara," *J. Aceh Phys. Soc.*, vol. 11, no. 2, pp. 45–48, 2022.
- [11] A. Indriawati, G. Setyawan, and E. Suharyadi, "Kajian Sifat Kemagnetan Pada Free Layer NiFe dan CoFeB Berdasarkan Simulasi Mikromagnetik," *J. Fis. Flux J. Ilm. Fis. FMIPA Univ. Lambung Mangkurat*, vol. 18, no. 2, p. 159, 2021.