

Kajian Simulasi Mikromagnetik Ketergantungan Tipe-nukleasi Magnetisasi Reversal terhadap Waktu pada *Nano Dot Permalloy*

Shibghatullah Muhammady, Suharyana, Budi Purnama

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami 36A Kentingan Surakarta 57126
Email : bpurnama@mipa.uns.ac.id

Received 13-09-2012, Revised 09-10-2012, Accepted 15-10-2012, Published 29-10-2012

ABSTRACT

Micromagnetic simulations are used to investigate a process of nucleation type for magnetization reversal in a Permalloy nano particle with uniform polarity of magnetization. An ultra short field pulse is applied in a film plane anti parallel to magnetization direction. Sequence of simulation of reversals mechanism is evaluated for variation of time ranged from 250 ps to 2.5 ns. In case time of 500 ps, magnetization reversal realized through a creation-annihilation of Neel-Bloch wall pair which required high magnetic field. Contrast for the time = 2.25 ns, reversal mechanism dominated by Neel wall. With in result, the field required for switching H_{sw} exponentially decreases with increasing time.

Keywords : micromagnetic, permalloy, magnetization, reversal

ABSTRAK

Simulasi mikromagnetik digunakan untuk menginvestigasi sebuah tipe nukleasi pada proses magnetisasi *reversal* nano partikel *permalloy* dengan polarisasi magnetik seragam. Sebuah medan pulsa sangat pendek digunakan dengan arah berlawanan dengan orientasi magnetisasi. Urutan evaluasi mekanisme reversal dilakukan untuk variasi waktu dari 250 ps sampai dengan 2,5 ns. Pada kasus waktu 500 ps, magnetisasi reversal direalisasi melalui *creation-annihilation* pasangan dinding *Neel-Bloch* yang memerlukan medan magnetik besar. Sebaliknya untuk waktu 2,25 ns, mekanisme reversal didominasi dengan dinding *Neel*. Hasilnya, medan yang diperlukan untuk switching H_{sw} secara ekponensial menurun dengan waktu.

Kata kunci : mikromagnetik, *permalloy*, magnetisasi, *reversal*

PENDAHULUAN

Perkembangan HDD semakin pesat pada kurun waktu 5 tahun terakhir (hingga pada tahun 2007), yaitu HDD dengan densitas 520 Gbit/in² ditemukan. Perkembangan tersebut melibatkan suatu material medium *recording* yang dapat diperkecil hingga orde ukuran nano meter tanpa kehilangan sifat magnet akibat panas. Selain itu juga nano-magnetik sensor yang dapat mengindera atau mendeteksi medan magnet dari sumber magnet berukuran nano meter. Seperti telah diketahui bahwa mekanisme magnetisasi dapat berlangsung dua ragam yaitu magnetisasi spontan melalui koheren rotasi dan multi *domain* konfigurasi yaitu magnetisasi melalui pembentukan *domain wall* dilanjutkan dengan perambatan dinding domain menuju *domain* tunggal. Lebih lanjut, *domain wall* dapat

terjadi dengan formasi *Neel wall* dan *Bloch wall*. Selain itu, pada keadaan tertentu mekanisme reversal melalui pembentukan vortek^[1-6].

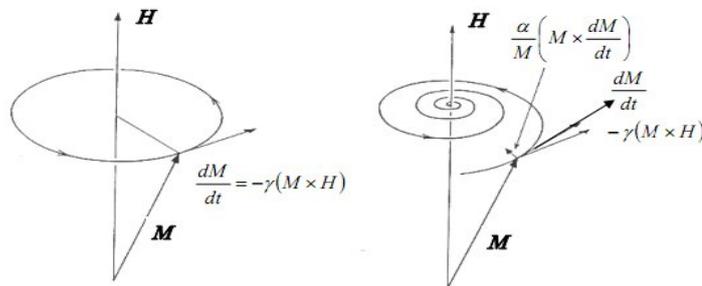
Untuk mempelajari magnetisasi reversal pada nano *pattern permalloy*, mikromagnetik simulasi digunakan untuk menelaah mekanisme *switching* yang terjadi. Mikromagnetik simulasi ini pada prinsipnya menyelesaikan persamaan *Landau-Lifshitz-Gilbert* (LLG) dengan menganggap nano *pattern permalloy* sebagai *head sensor* pada sistem *read-write* (baca-tulis) sebuah HDD dengan kerapatan sangat tinggi. Pada penelitian ini mekanisme *reversal* pada nano *pattern permalloy* yang terungkap dari visual gambar mikromagnetik dan medan yang diperlukan untuk *switching* H_{sw} akan dipelajari kaitannya dengan waktu. Perlu untuk dinyatakan bahwa sistem besaran dan satuan yang digunakan adalah sistem CGS.

METODE

Secara umum, besar nilai magnetisasi dibawah pengaruh medan magnetik efektif total *Heff* dirumuskan dengan persamaan *Landau-Lifshitz-Gilbert* (LLG) sebagai berikut^[7]

$$\frac{dM^i}{dt} = -|\gamma| M^i \times H_{eff}^i + \frac{\alpha}{M_s} M^i \times \frac{dM^i}{dt} \quad (1)$$

dengan M_s adalah magnetisasi jenuh, $|\gamma|$ adalah *gyromagnetic ratio* ($|\gamma| = 1,76 \times 10^7 \text{ Oe}^{-1} \text{ s}^{-1}$ untuk elektron bebas) dan α adalah parameter redaman *Gilbert*. Skema mekanisme magnetisasi mengikuti arah medan magnet H untuk dua parameter redaman *Gilbert* berbeda (α) ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema reversal berupa gerakan vektor magnetisasi M di bawah pengaruh medan H untuk (a) $\alpha = 0$ dan (b) $\alpha \ll 1$ ^[7].

Besar nilai medan magnetik efektif *Heff* merupakan fungsi turunan densitas energi (w) terhadap besar nilai magnetisasi itu sendiri dengan persamaan

$$H_{eff}^i = - \frac{\delta w}{\delta M_i} \quad (2)$$

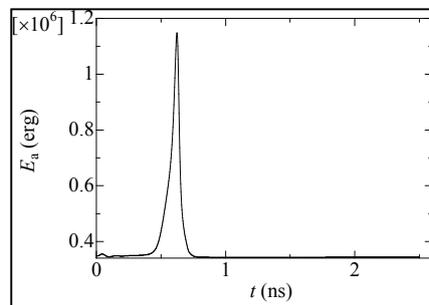
Persamaan (2) mengindikasikan bahwa medan efektif *Heff* merupakan bentuk spesifik dari energi magnetik yang secara umum disumbang oleh komponen-komponen penyusunnya yaitu energi tukar (*exchange*), anisotropi, dan energi demagnetisasi seperti dinyatakan pada persamaan berikut

$$E_{tot} = \int_V \left(A \sum_{i=x,y,z} (\nabla m_i)^2 + \epsilon_{anis} - \frac{\mu_0}{2} \mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_d \right) dV \quad (3)$$

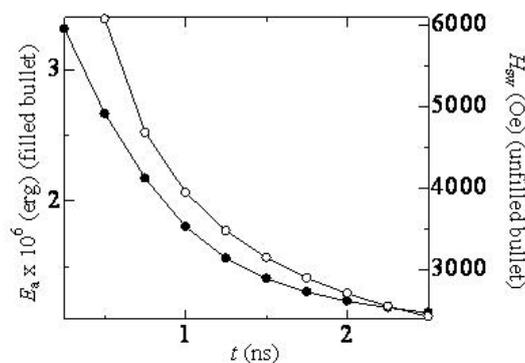
dengan H_d adalah vektor demagnetisasi permalloy, $\epsilon_{anis} = K[1 - m \cdot k]$, $m = M / M_s$ dan k adalah vektor satuan ke arah *in-plane* terhadap *permalloy*. Pada simulasi ini, nano *pattern permalloy* [8] berdimensi $50 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$ dibagi menjadi elemen-elemen balok 15×15 adalah model numerik. Bahan ini beranisotropi uniaksial dengan arah *in-plane* dengan konstanta anisotropi $K = 5000 \text{ erg/cm}^3$, konstanta *exchange* $A = 1,3 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$, magnetisasi jenuh $4\pi M_s = 1,0 \times 10^4 \text{ gauss}$. Pulsa medan magnet pengimbas H meningkat secara linier dan mencapai maksimum ketika durasi maksimum pulsa diberikan. Sedangkan nilai $\alpha = 0,3$ dan step time integrasi (dt) = $2,5 \times 10^{-13} \text{ s}$. Akhirnya, gambar mikromagnetik diperoleh dari perbandingan magnetisasi searah medan pengimbas dengan nilai normalisasinya dengan membagi dalam 20 potongan gambar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

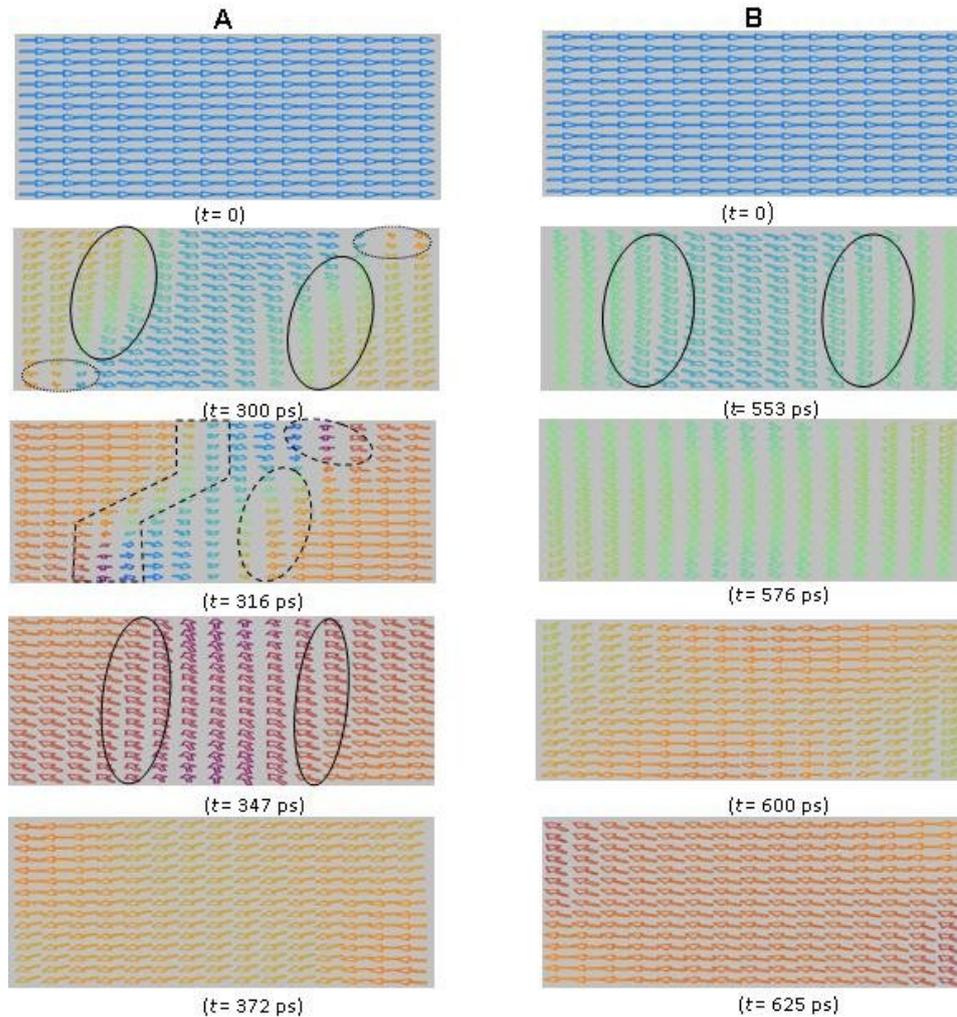
Dalam makalah ini proses magnetisasi reversal yaitu energi minimum yang diperlukan momen magnetik berubah dari satu keadaan minimum ke keadaan minimum lainnya, didefinisikan seperti ilustrasi pada Gambar 2. Energi ini selanjutnya disebut dengan energi aktivasi (E_a). Sisi kiri kurva adalah keadaan minimum mula-mula yang ditempati, sedangkan bagian sisi kanan adalah keadaan minimum lainnya yang dicapai setelah magnetisasi reversal. Pada simulasi ini, keadaan mula-mula (*initial condition*) ($t = 0$), semua orientasi momen magnetnya diatur/set seragam $M = 1$. Pada kondisi ini, medan eksternal (H) bernilai nol. Kemudian medan magnet (H) berlawanan arah dengan magnetisasi M , dinaikkan secara linear dengan kenaikan waktu. Sehingga M secara gradual menurun serta berubah arah mengikuti orientasi medan magnet H . Ketika $M = 0$ maka keadaan *switching/reversal* dicapai. Keadaan ini bersesuaian saat energi aktivasi (E_a) mencapai maksimum. Definisi reversal ini digunakan pada keseluruhan simulasi pada makalah ini.



Gambar 2. Ilustrasi kurva energi aktivasi (E_a)



Gambar 3. Kurva energi aktivasi E_a dan *switching magnetic field* H_{sw} sebagai fungsi waktu (t)

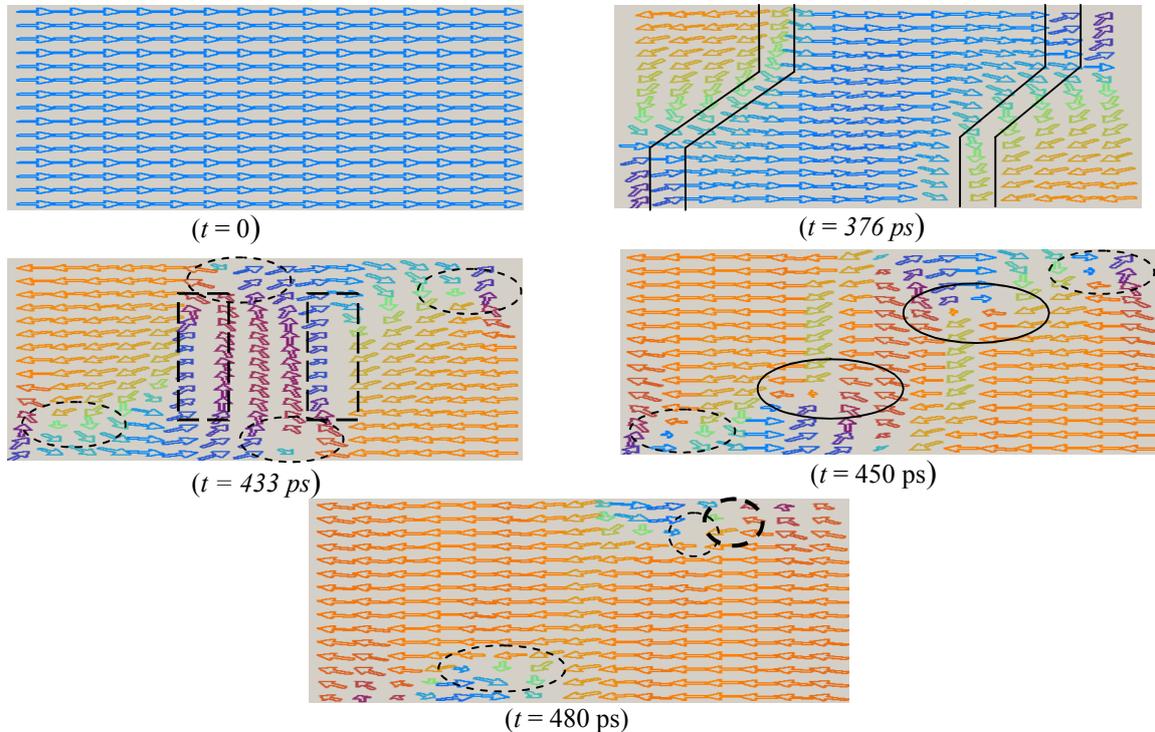


Gambar 4. (*color online*) Tahapan magnetisasi reversal teramati dalam nukleasi-annihilasi domain magnetik yang dilukiskan dengan gambar mikromagnetik untuk durasi pulsa medan magnet ($H = 5000$ Oe) mencapai maksimum untuk $t = 500$ ps (A) dan $t = 2,25$ ns

Gambar 3 memperlihatkan energi aktivasi (E_a) dan medan yang diperlukan untuk *switching* (H_{sw}) sebagai fungsi waktu (t). Teramati dengan jelas dari gambar bahwa ketika sangat pendek yaitu $t = 0,5$ ns (500 ps) E_a dan H_{sw} bernilai besar yaitu $E_a = 2,7 \times 10^6$ erg dan $H_{sw} = 4600$ Oe. Seiring dengan kenaikan waktu, maka E_a dan H_{sw} menurun secara eksponensial sebagai fungsi t . Ketika $t = 2,25$ ns besar nilai E_a dan H_{sw} turun berturut-turut sebagai berikut $E_a = 1,1 \times 10^6$ erg dan $H_{sw} = 2500$ Oe. Kenyataan ini karena perbedaan mode reversal yang dapat dijelaskan dengan Gambar 4 yaitu ilustrasi tahapan reversal melalui gambar mikromagnetik untuk durasi pulsa medan magnet mencapai maksimum $t = 500$ ps (A) dan $t = 2,25$ ns (B).

Untuk proses magnetisasi A, teramati dengan jelas bahwa mekanisme *switching* mengikuti arah medan pengimbas melalui nukleasi domain magnetik yang dipisahkan oleh konfigurasi Néel wall (garis tegas) dan Bloch wall (garis putus-putus). Pada keadaan awal $t = 0$, konfigurasi magnetisasi berada pada keadaan homogen yaitu seluruh orientasi momen magnetik berada pada orientasi seragam. Ketika $t = 300$ ps, pasangan Néel wall dan Bloch wall terealisasi yang secara cepat dilanjutkan dengan annihilasi Néel wall. Kemudian saat $t = 347$ ps, Néel wall kembali terealisasi dan segera merambat menuju keadaan magnetisasi reversal. Proses magnetisasi untuk durasi pulsa yang lebih panjang

2,25 ns (2250 ps) dilukiskan pada urutan proses B. Secara umum, proses magnetisasi berlangsung lebih sederhana dibandingkan A. Proses magnetisasi reversal hanya di ciri dengan pembentukan dilanjutkan dengan perambatan *Néel wall* menuju keadaan *reversal*. Hasil ini juga memperlihatkan bahwa medan yang diperlukan untuk mengkompensasi *Bloch wall* lebih besar daripada *Néel wall*.



Gambar 5. (color online) Detail ekspresi nukleasi-annihilasi domain magnetik *nano dot permalloy* yang diungkapkan dengan gambar mikromagnetik dibawah pengaruh pulsa medan magnet eksternal $H = 2500$ Oe berdurasi 500 ps.

Untuk lebih memahami mekanisme magnetisasi reversal untuk kasus durasi pulsa medan magnet eksternal mencapai maksimum $t = 500$ ps, maka simulasi dilakukan dengan menurunkan nilai medan H menjadi 2500 Oe. Detail ekspresi nukleasi-anihilasi domain magnetik *nano dot permalloy* ditunjukkan pada Gambar 5. Teramati dengan jelas bahwa waktu yang dibutuhkan pertamakali nukleasi hingga magnetisasi reversal tercapai dibawah medan pengimbas $H = 5000$ Oe adalah $t = 72$ ps. Sedangkan untuk $H = 2500$ Oe, waktu yang diperlukan untuk magnetisasi reversal sebesar $t = 116$ ps. Satu hal yang tidak teramati pada hasil sebelumnya, selain *Néel wall* dan *Bloch wall*, proses magnetisasi reversal untuk keadaan ini juga menghasilkan konfigurasi *vortex-antivortex* yaitu ketika $t = 433$ ps. Proses magnetisasi *reversal* diawali saat medan magnet terpasang pertama kali, maka pada arah diagonal momen magnet mulai mengikuti orientasi medan pengimbas. Hal ini ditandai dengan nukleasi *Néel wall*. Kemudian *Bloch wall* terealisasi dengan diikuti konfigurasi *vortex-antivortex*. Dan akhirnya, keadaan magnetisasi akhir searah dengan orientasi medan pengimbas dicapai yang didahului dengan anihilasi/ hilangnya *Bloch wall*. Hasil yang telah diuraikan menandakan bahwa tipe-nukleasi magnetisasi *reversal* merupakan salah satu faktor penentu nilai medan yang diperlukan untuk *switching*. Dan sesuai dengan hasil penelitian yang dipublikasikan oleh Zhang dkk^[9].

KESIMPULAN

Kajian simulasi mikromagnetik telah dilakukan untuk menginvestigasi sebuah tipe nukleasi pada proses magnetisasi *reversal* nano partikel *permalloy* $50 \text{ nm} \times 100 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}$ dengan polarisasi magnetik seragam. Sebuah medan pulsa sangat pendek digunakan dengan arah berlawanan orientasi magnetisasi. Urutan evaluasi mekanisme *reversal* dilakukan untuk variasi waktu dari 250 ps sampai dengan 2,5 ns. Pada kasus waktu 500 ps, magnetisasi reversal direalisasi melalui kreasi-annihilasi pasangan dinding *Neel-Bloch* yang memerlukan medan magnetik besar. Sebaliknya untuk waktu 2,25 ns, mekanisme *reversal* didominasi dengan dinding *Neel*. Hasilnya, medan yang diperlukan untuk *switching* H_{sw} secara ekponensial menurun dengan waktu.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Z. Yaying. *Magnetic Simulation on Advanced Recording Media*. 2003. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore.
- 2 T. Schrefl, G. Hrkac, A. Goncharov, J. Dean, S. Bance, and M. A. Bashir. Finite Element/Boundary Element Simulation of Future Hard Disk Recording. 2008. *Applied Computing Conference*, Istanbul, Turkey.
- 3 Jian-Gang, Z. 2003. *New Weights for Hard Disk Drives*. Materials Today July/August. Department of Electrical and Computer Engineering and Data Storage Systems Center, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.
- 4 R. Gupta, M. Gupta, and T. Gutberlet. 2008. Magnetization in Permalloy Thin Films. *J. Phys.*, Vol. 71, pp. 1123-1127.
- 5 CA. Ross. Patterned Magnetic Recording Media. 2001 *Annu. Rev. Mater. Res.*, Vol. 31, pp. 203-235.
- 6 M. B. W. Bolte, D. P. F. Möller, G. D. Meier, and A. Thieme. 2004. Simulation of Micromagnetic Phenomena. *Proceedings 18th European Simulation Multiconference*, Graham Horton (c) SCS Europe.
- 7 B. Purnama. 2009. *Thermally Assisted Magnetization Reversal in Perpendicularly Magnetized Thin Films*. Thesis. Electronics Department, Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University.
- 8 R. Hertel. 2002. Thickness Dependence of Magnetization Structures in Thin Permalloy Rectangles. *Zeitschrift für Metalkunde* Vol. 93, pp. 957-962.
- 9 H. Zhang and Y. Liu. 2012. Spin-Polarized Current Driven Vortex-Pair Switching in a Magnetic Ellipse. *Journal of Nanoscience and nanotechnology*. Vol. 12, pp. 1063-1066.