

ABSTRAK DAN EXECUTIVE SUMMARY
PENELITIAN DISERTASI DOKTOR



**Investigasi Sifat-sifat Magnetik Bahan LSMO ($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$)
untuk Aplikasi *Storage Device* dengan Menggunakan Modeling
Mikromagnetik**

Tahun ke 1 (satu) dari rencana 1 (satu) tahun

**LUTFI ROHMAN, S.Si,M.Si.
NIDN: 0020087205**

UNIVERSITAS JEMBER
Desember, 2013

- Judul Penelitian : **Investigasi Sifat-sifat Magnetik Dinamik Bahan LSMO ($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$) untuk Aplikasi Storage Device dengan Menggunakan Modeling Mikromagnetik**
- Peneliti : Lutfi Rohman, S.Si,M.Si
- Mahasiswa yang Terlibat : ---
- Sumber Dana : DIPA UNEJ
- Kontak E-mail : el_rahman.fmipa@unej.ac.id
- Diseminasi : 1. Seminar Nasional: SNF 2013 di UNJ
2. Simposium Ilmiah Internasional: Symposium Nanotechnology & Nanobiotechnology 2013, di BATAN Indonesia (ISESCO-COMSATS-BATAN)

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian simulasi bahan LSMO dengan $x=0.3$, dalam aplikasi thin film dalam berbagai bentuk dan ukuran. Keadaan bentuk nanodisk thin film telah disimulasikan bahwa diameter kritisnya berada pada nilai $D>125\text{nm}$. Artinya bahan LSMO ini akan bersifat single domain untuk ketebalan thin film sampai dengan 15nm. Bila LSMO ini diaplikasikan pada nanopattern, yang dalam teknologi saat ini hardisk dibuat dari thin film dengan pattern berbentuk array yang berukuran nano, maka telah dapat disimulasikan apa yang terjadi dengan sifat-sifat magnetiknya, yaitu: kurva hysteresis, medan koersivitas, magnetisasi remannnya dan system energinya. Kecepatan akses data, yaitu penulisan data dan pembacaan data dapat dilihat dari reversal magnetisasi dan time switchingnya. Dalam simulasi ini telah dapat menginvestigasi nilai time swtchingnya yang masih berorde nanosecond. Untuk Aplikasi yang lebih luas lagi dari bahan LSMO ini telah dilakukan simulasi untuk melihat Resonansi Ferromagnetik dari beberapa bentuk nanopillar, yaitu silinder pillar dan kubus pillar. Hasil simulasi yang dilakukan sejauh ini sama atau mendekati nilai analitiknya dengan perhitungan Kittels.

Kata kunci: LSMO Magnetic Materials, Micromagnetic Modelling, Sifat-sifat resonansi ferromagnetic

- Judul Penelitian : **Investigasi Sifat-sifat Magnetik Dinamik Bahan LSMO ($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$) untuk Aplikasi Storage Device dengan Menggunakan Modeling Mikromagnetik**
- Peneliti : Lutfi Rohman, S.Si,M.Si
- Mahasiswa yang Terlibat : ---
- Sumber Dana : DIPA UNEJ
- Kontak E-mail : el_rahman.fmipa@unej.ac.id
- Diseminasi : 1. Seminar Nasional: SNF 2013 di UNJ
2. Simposium Ilmiah Internasional: Symposium Nanotechnology & Nanobiotechnology 2013, di BATAN Indonesia (ISESCO-COMSATS-BATAN)

PENDAHULUAN

Pengetahuan dan pemahaman terhadap karakteristik magnetik dan sifat bahan CMR berbasis manganit, khususnya oksida mangan, dapat menawarkan harapan besar dalam membangun teknologi baru dan penciptaan beberapa perangkat elektronika. Seperti; “*non-volatile*” memori komputer (memori yang dapat menyimpan informasi meskipun tidak diberikan daya, *resistive random access memory* (RRAM)) dan piranti *hard-drive* (*storage device*) komputer yang kapasitas penyimpanan data semakin besar dengan penggunaan daya rendah.

Perkembangan bahan oksida mangan *Colossal Magnetoresistance* (CMR) dimulai ketika William Thomson pada tahun 1856 menemukan efek yang disebut *Ordinary Magnetoresistance*, karena penurunan rasio magnetoresistan tidak lebih dari 5%. Kemudian Baibich *et al.* dalam tahun 1988 dengan teknologi film tipis dari bahan Fe/Cr, mendapatkan rasio magnetoresistan mencapai 80% (Baibich, *et al.*, 1988). Efek ini dinamakan *Giant Magnetoresistance* (GMR). Setelah beberapa tahun, minat penelitian pada bahan oksida mangan dan sifatnya kembali dengan adanya penemuan *Colossal Magnetoresistance* (CMR) (Jin, *et al.*, 1994).

Penamaan CMR ini bermula dari pengamatan penurunan nilai resistivitas bahan La-Ca-Mn-O dekat dengan temperatur *curie*, $T_c = 77^\circ \text{ K}$ dalam medan magnet (H) 6 T dan diperoleh rasio magnetoresistan $\sim 99\%$ (Popescu, 2007).

Bahan magnetik CMR berbasis manganite khususnya oksida mangan mempunyai rumus umum $A(\text{MnO}_3)$ dengan A adalah unsur bervalensi tiga, biasanya berupa unsur tanah jarang (misal: La, Nd, Pr, Sm). Penambahan doping unsur bervalensi dua seperti unsur alkali tanah (misal: Sr, Ca, Ba, Pb) akan mengubah rumus umumnya menjadi $(A_{1-x}B_x)(\text{MnO}_3)$. Berdasarkan rumus tersebut dikenal beberapa bahan magnetik oksida mangan seperti: LaMnO_3 , PrMnO_3 , atau $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$, $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$.

LaMnO_3 adalah bahan manganit kompleks yang terbentuk dari logam unsur transisi dalam, seperti lanthanum yang dikombinasikan dengan manganit dan oksigen. Bahan ini memiliki efek *Colossal Magnetoresistance* (CMR) dan (Chatterji, et. al., 2000). Bahan LaMnO_3 bersifat insulator tetapi dengan penambahan dopan (ion divalen (seperti; Ca, Sr) atau tetravalen (jenis dopan baru seperti; Ce)) dapat mengubah sifat transport listrik bahan LaMnO_3 . Bahan LaMnO_3 yang didopan oleh ion Sr^{2+} (divalen) akan diikuti transisi ion Mn^{3+} menjadi ion Mn^{4+} . Pada ion Mn bervalensi empat, satu elektron e_{2g} hilang. Elektron yang hilang akan menciptakan lubang dan memungkinkan terjadinya lompatan elektron sehingga bahan bersifat logam. Jika semua ion lanthanum dipenuhi dengan dopan unsur divalen, bahan menjadi insulator kembali. Dengan mengubah konsentrasi dopan (x) akan menghasilkan variasi yang beragam yakni dilihat dari sifat magnet, transport listrik bahan, dan “*charge-ordering*” (Gor’kov & Kresin, 2004). Pengaruh konsentrasi doping akan mengubah fase bahan yaitu bahan dengan doping rendah berada pada fase antiferomagnetik insulating dan ferromagnetik insulating, sekitar 30% jumlah doping berada pada fase ferromagnetik metal dan sekitar 50% jumlah doping berada pada fase charge ordered dan orbital ordered. Sedangkan untuk jumlah doping yang lebih tinggi akan menyebabkan bahan berada pada fase antiferomagnetik.

Daerah dalam diagram fase yang paling menarik adalah daerah ferromagnetik dan metalik. Bahan LSMO (khususnya $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$) adalah bahan yang diprediksi mempunyai sifat half-metalcity (setengah logam) dengan

suhu kritis yang tinggi sehingga punya potensi besar untuk aplikasi teknologi. Bahan setengah-logam adalah bahan yang bersifat penghantar dalam sebuah channel spin dan juga bersifat semi konduktor pada sisi yang lainnya.

Banyak hasil penelitian yang berfokus pada Ca dan Sr sebagai substitusi La pembentuk senyawa CMR ($\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$) dengan beragam konsentrasi ion telah dilaporkan. Terdapat beberapa perbedaan dalam diagram fase dalam dua kasus tersebut, hal ini disebabkan oleh perbedaan ukuran ion Ca dan Sr, Khusus untuk substitusi Sr, Tokura dan collaborator telah mendapatkan perilaku fase sebagai fungsi x dalam *melt-grown* kristal $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (Urushibara, et. al., 1995, Tokura, et. al., 1994, Asamitsu et. al., 1995, Kuwahara, et.al., 1995). Untuk sampel keramik, Mahendiran et. al. (1995), telah melaporkan bahwa fase *boundary* biasanya dibentuk melalui titik infeksi pada data $M(T)$. Terdapat tiga perbedaan dalam keadaan dasar (*ground states*) yaitu: insulator spin-canted, insulator FM, dan metal FM. Pada temperatur tinggi keadaan ini muncul dua fase yang berbeda, yaitu insulator paramagnetik (PI) dan metal paramagnetik (PM). Garis batas vertikal fase ini ditentukan oleh *crossover* pada $\rho(T)$ antara semikonduktif (insulating) dan perilaku metalik. Pada transisi insulator-metal temperatur rendah terjadi transisi orthorombik ke rhombohedral. Satu aspek penting dari substitusi Sr adalah ketidakmampuannya untuk menemukan material fase-tunggal untuk $x > 0.6$. Dalam lingkup stabilitas fase, telah dicatat adanya variasi yang besar dalam transport dari *good metal* untuk $x > 0.3$ ke insulator untuk . Perlu diingat juga bahwa *crossover* dari perilaku metalik ke insulating pada suhu $T=0$ terjadi pada wilayah konsentrasi yang sangat sempit. Untuk $x = 0.17$, transisi orthorombik – rhombohedral dapat dimodifikasi oleh sekitar 50 K dengan menerapkan medan sebesar 7 T (Asamitsu et. al., 1995).

Bahan LSMO ($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$) adalah bahan yang masih menarik dan masih dipelajari dengan ekstensif, hal ini terungkap dalam paragraf sebelumnya. Karena bahan tersebut mempunyai bandwidth energi (W) yang lebar (karena pengaruh doping ion Sr^{2+} dengan jari-jari atom yang besar) dan fase ferromagnetik yang stabil. Temperatur Curie bahan ini mencapai $T_c \sim 370 \text{ }^\circ\text{K}$ ($97 \text{ }^\circ\text{C}$) (Urushibara, et. al., 1995), sehingga mempunyai potensi besar untuk dieksploitasi bagi kepentingan aplikasi teknologi.

Pengembangan bahan magnetik berbasis manganit terus dilakukan, baik penelitian secara eksperimen maupun teori-komputasi. Penelitian secara teori-komputasi dilakukan untuk mempelajari bahan magnetik dengan lebih baik. Untuk aplikasi *storage device (hard drive)* diperlukan pemahaman terhadap sifat-sifat magnetik dinamis bahan dengan lebih baik berdasarkan data dasar sifat magnetik bahan yang diinputkan ke dalam simulasi mikromagnetik. Data dasar sifat magnetik bahan adalah berupa magnetisasi saturasi, koefisien anisotropi, koefisien pertukaran, dll. Hasil simulasi mikromagnetik berupa sifat-sifat magnetik dinamik bahan yang sudah dimodelkan untuk aplikasi *device*, misalkan untuk *storage device (hard drive)*: kurva hysteresis, medan koersivitas, waktu reversal, dll yang dikaitkan dengan dimensi lapisan tipis, bentuk dan aplikasi medan listrik atau medan magnet luar. Hasil penelitian dengan pendekatan teori komputasi diharapkan dapat digunakan untuk prediksi dan optimasi dalam penelitian eksperimen lanjutan.

Penelitian hibah doktor ini adalah bagian dari penelitian disertasi yang dilakukan dengan menitik beratkan pada: Investigasi Sifat-sifat Magnetik Dinamik Bahan LSMO ($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$) untuk Aplikasi *Storage Device* dengan Menggunakan Modeling Mikromagnetik.

METODE PENELITIAN

Penelitian secara teori-komputasi tentang bahan magnetik LSMO ini dilakukan selama satu tahun yang mencakup proses instalasi hingga, *running* simulasi, analisis data numerik dan interpretasi.

Simulasi Mikro Magnetik

Simulasi mikromagnetik memerlukan parameter-parameter input tertentu yang dapat diperoleh dari hasil simulasi sebelumnya dan atau berdasarkan literatur yang sudah ada. Simulasi mikromagnetik ini diharapkan dapat mensimulasikan bahan magnetik berbasis manganit (seperti LSMO) dalam *device* yang berupa sistem thin film, baik single layer maupun multilayer yang akan diaplikasikan menjadi *storage device*. Berikut ini adalah tahapan dalam melaksanakan proses

simulasi Mikromagnetik:

1. Menentukan Parameter Sistem Struktur Magnetik

Parameter struktur bahan magnetik tersebut berbentuk apa? Dua dimensi atau tiga dimensi? Contohnya, ditentukan sistemnya berbentuk rectangular (Cube), disk atau sphere (bola), dengan exchange length dapat dihitung dengan persamaan $l_{ex} = \sqrt{2A/\mu_0 M_s^2}$. Untuk mendapatkan nilai exchange length ini diperlukan parameter magnetisasi saturasi M_s dan konstanta exchange stiffness A . Sedangkan K_1 adalah konstanta anisotropy.

Untuk Bahan LSMO yang akan diteliti telah didapatkan data:

LSMO	M_s (A/m)	A (J/m)	K_1 (J/m ³)	l_{ex}
x = 0.3 (Ziese, 2006)	590×10^3	5×10^{-12}	-0.3×10^3	4.78 nm
x = 0.4 (Kubota, et. al., 2007).	4.6×10^5	5×10^{-11}	2.5×10^3	19.39 nm

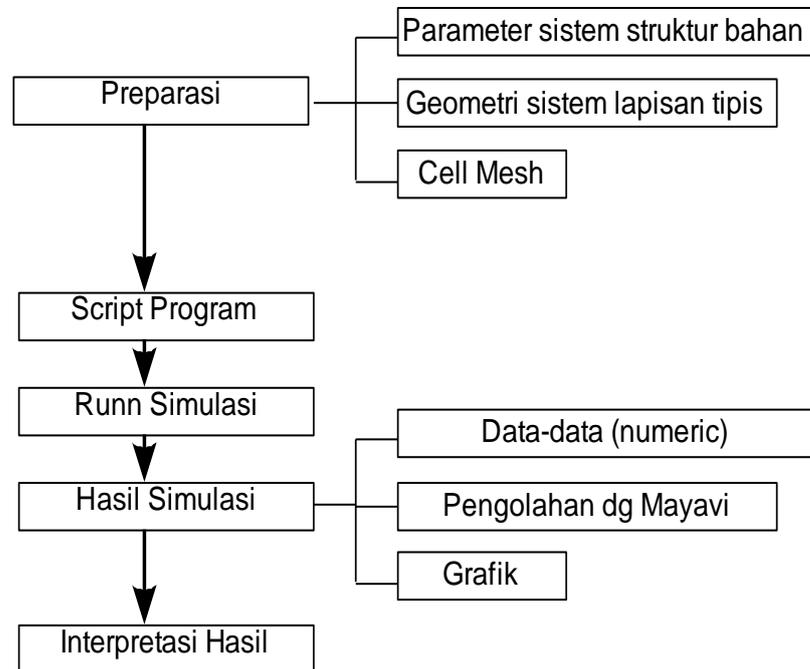
2. Menentukan Geometry Sistem Simulasi dan Cell Mesh

Untuk penelitian yang akan dilakukan dengan bahan LSMO, dimensi ukuran sistem harus melihat nilai exchange lengthnya. Bila menggunakan sistem parameter yang mengacu pada Ziese (2006) maka $l_{ex} = 4.8\text{nm}$, artinya dimensi ukuran sistem harus lebih besar dari ini. Dan ukuran cellnya juga harus lebih kecil atau sama dengan *exchange length*nya.

Tahapan Penelitian Simulasi Mikromagnetik

Penelitian ini akan difokuskan kepada simulasi untuk bahan magnetik manganit LSMO dan aplikasinya untuk lapisan tipis sebagai *storage device* atau MRAM, dengan simulasi **Nmag** dan **OOMMF**. Simulasi mikromagnetik dengan **Nmag** dan **OOMMF** harus disiapkan script programnya untuk running program sistem lapisan tipis dengan bahan LSMO. Simulasi ini akan memodelkan bahan LSMO dengan berbagai konsentrasi Sr (x) yang berbeda yang digunakan sebagai *storage device*, juga dengan dimensi dan struktur lapisan tipis yang berbeda.

Rencana simulasi aplikasi bahan LSMO sebagai storage device dengan menggunakan Nmag dapat dibuat diagram alir sebagai berikut:



Gambar 1. Rencana Simulasi Lapisan Tipis LSMO dengan Nmag dan OOMMF

Tahapan penelitian simulasi mikromagnetik ini, yang dilakukan adalah:

a. Observasi Groundstate

Observasi groundstate dilakukan untuk melihat domain spin magnet asal dari bahan, serta melihat sistem energi asalnya saat tidak ada medan magnet luar. Observasi groundstate yang dilakukan adalah untuk bentuk-bentuk geometri tertentu (*disk*, *cube* dan *sphere*) dengan ukuran yang juga telah ditentukan.

b. Observasi Kurva Hysterisis

Observasi kurva hysteresis dilakukan untuk melihat pengaruh medan magnet luar terhadap magnetisasi pada bahan dengan bentuk geometri dan ukuran seperti yang ada di observasi groundstate. Untuk aplikasi medan luar ini juga diamati pengaruh medan AC (AC field). Untuk analisa data dilakukan

analisa untuk melihat frekuensi dan susceptibilitas magnet.

c. Observasi Thin Film Model Array

Pada tahap penelitian ini akan dilakukan running simulasi dengan memodelkan thin film bentuk array (disk array, sphere array). Aplikasi medan luar (medan statik dan medan AC) juga telah dilakukan. Analisa frekuensi dan susceptibilitas magnetiknya juga telah dilakukan.

d. Observasi Bentuk Pillar LSMO

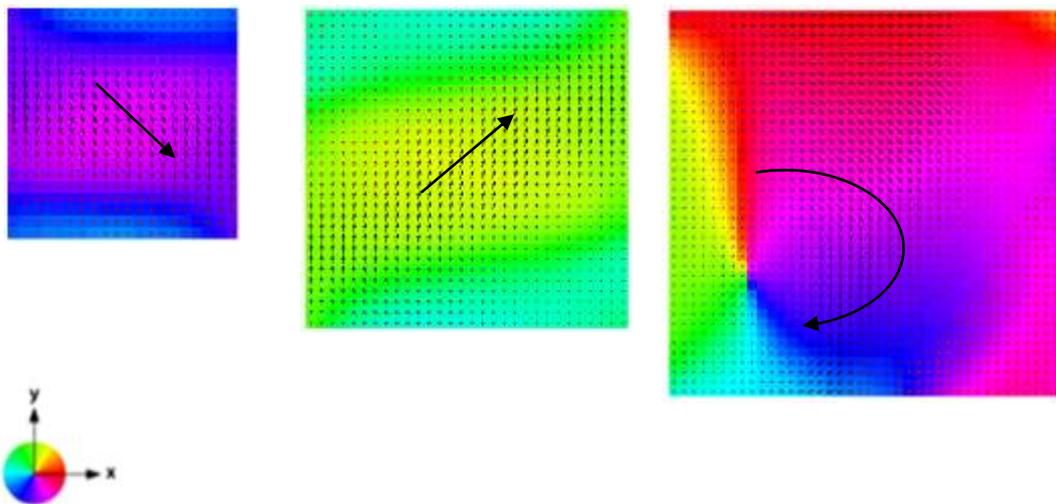
Pada tahap penelitian ini akan dilakukan running simulasi dengan memodelkan berbagai bentuk multilayer. Aplikasi medan luar (medan statik dan medan AC) juga telah dilakukan. Analisa frekuensi dan susceptibilitas magnetiknya juga telah dilakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Groundstate Sistem LSMO ($x=0.3$)

Bentuk NanoCube

Hasil simulasi untuk sistem groundstate telah dilakukan untuk geometri nanocube dengan ukuran yang sudah ditentukan sebagai berikut:

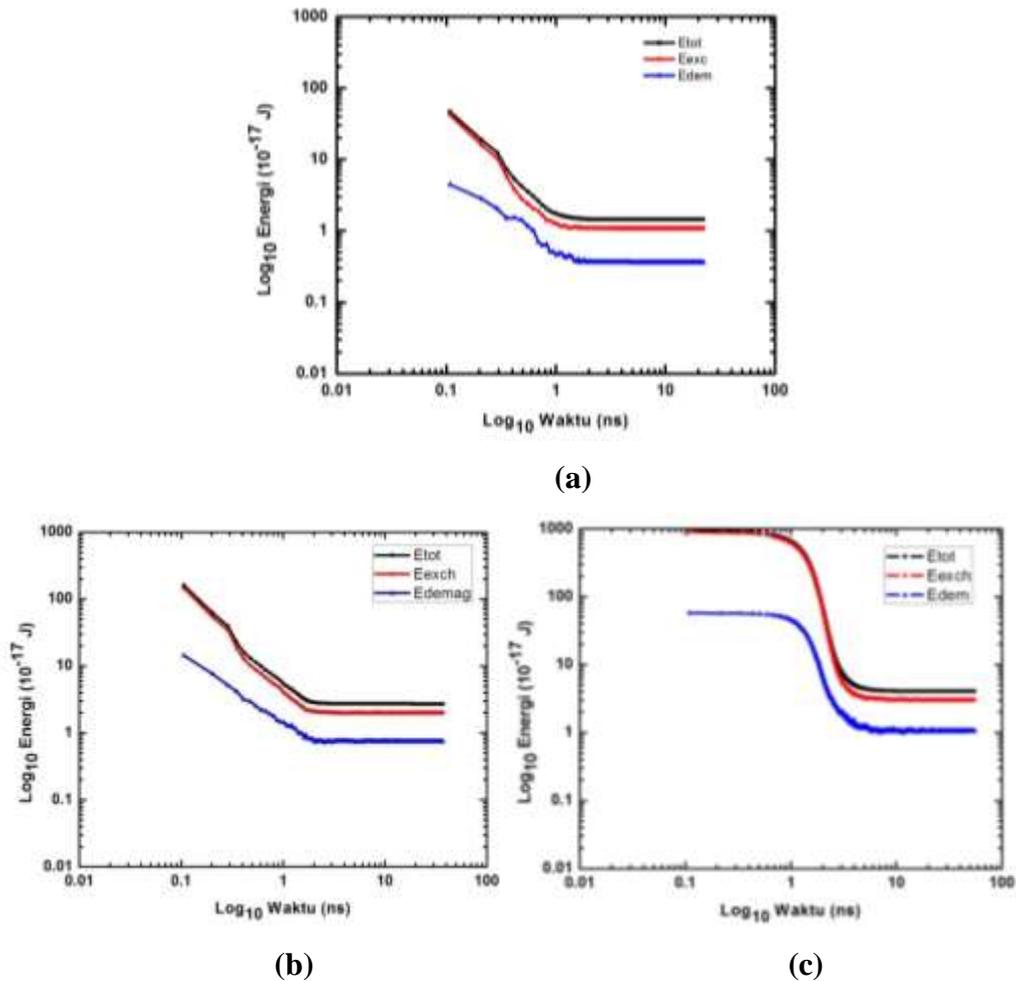


Gambar 2. Nanocube Groundstate dengan ukuran sisi (a) 100nm (b) 150nm (c) 200nm yang dilihat dari sumbu Z+

Berdasarkan gambar 2 terlihat bahwa konfigurasi spin dari nanocube dengan ukuran sisi 100nm dan 150nm bila dilihat dari sumbu Z+ terlihat berbentuk S-

shape, sedangkan untuk ukuran 200nm berbentuk vortex. Bentuk vortex untuk nanocube dengan ukuran sisi 100nm dan 150nm akan terlihat bila dilihat dari sumbu X+.

Sedangkan sistem energinya dari hasil simulasi tersebut adalah sebagai berikut:



Gambar 3. Sistem Energi GS NanoCube_LSMO pada arah sumbu x dengan ukuran (a) 100nm (b) 150nm (c) 200nm

Berdasarkan struktur gambar nanocube pada keadaan groundstate dan plot energinya khususnya untuk arah sumbu x, dapat disimpulkan bahwa terdapat kecenderungan untuk mengambil struktur akhir dalam keadaan vortex hal ini dikuatkan dengan keadaan energi dimana pada arah sumbu x, energi didominasi oleh energi exchange daripada energi demagnetisasi.

Bentuk NanoDisk Tunggal

Keadaan groundstate dari nanodisk tunggal untuk berbagai ukuran

diamater adalah sebagai berikut:

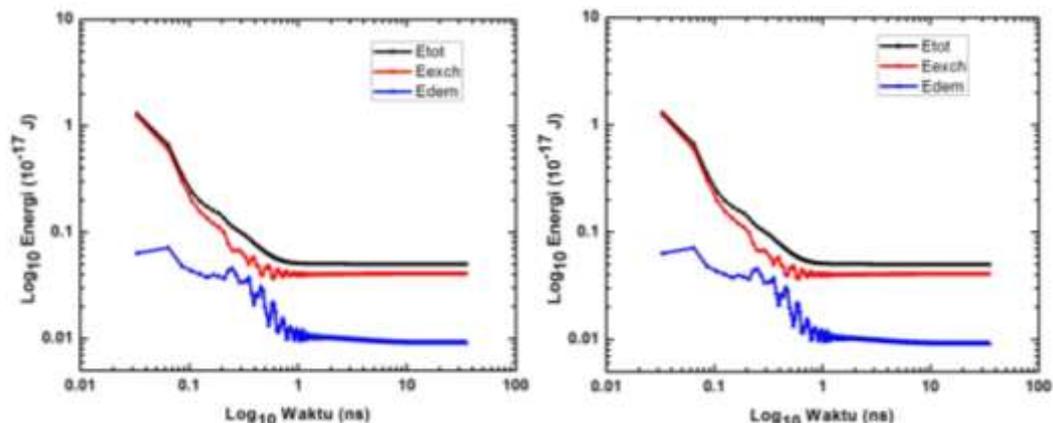
D (nm) \ t (nm)	100	125	150	175	200	225	250	275	300	400	500
5 nm	S	S	V	V	V	V	V	V	V	V	V
10 nm	S	S	V	V	V	V	V	V	V	V	V
15 nm	S	S	V	V	V	V	V	V	V	V	V
Keterangan:			V adalah Vorteks								
			S adalah Single domain								
			M adalah Multidomain								

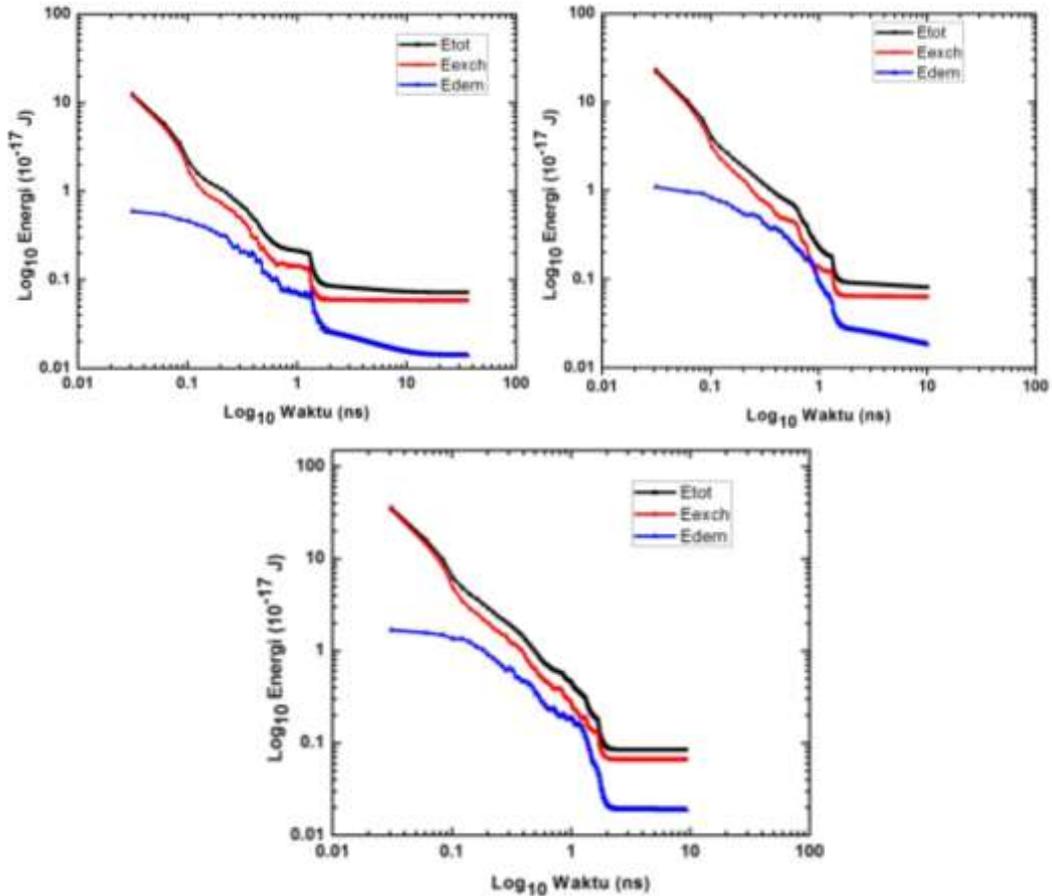
Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa diameter kritis terjadinya vorteks berada pada $D > 125$ nm. Menurut teori tentang diameter kritis untuk elemen berbentuk disk adalah sebagai berikut:

$$D_{cr} = \frac{72\sqrt{AK}}{\mu_0 M_S^2}$$

Berdasarkan perhitungan dengan persamaan tersebut didapatkan diameter kritis elemen disk LSMO ini adalah 6.37nm (dengan catatan K adalah nilai absolut, bukan minus), sangat berbeda dibandingkan hasil simulasi yang menemukan nilai kritisnya adalah 125 nm.

Sedangkan sistem energinya pada keadaan groundstate untuk nanodisk adalah sebagai berikut:

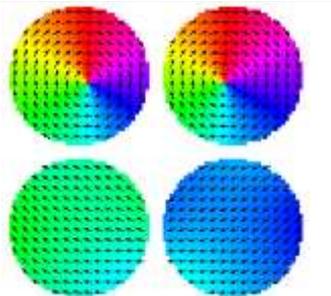
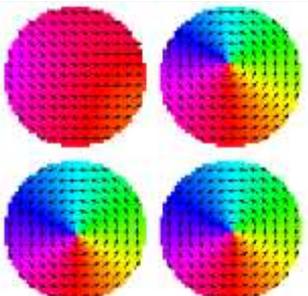


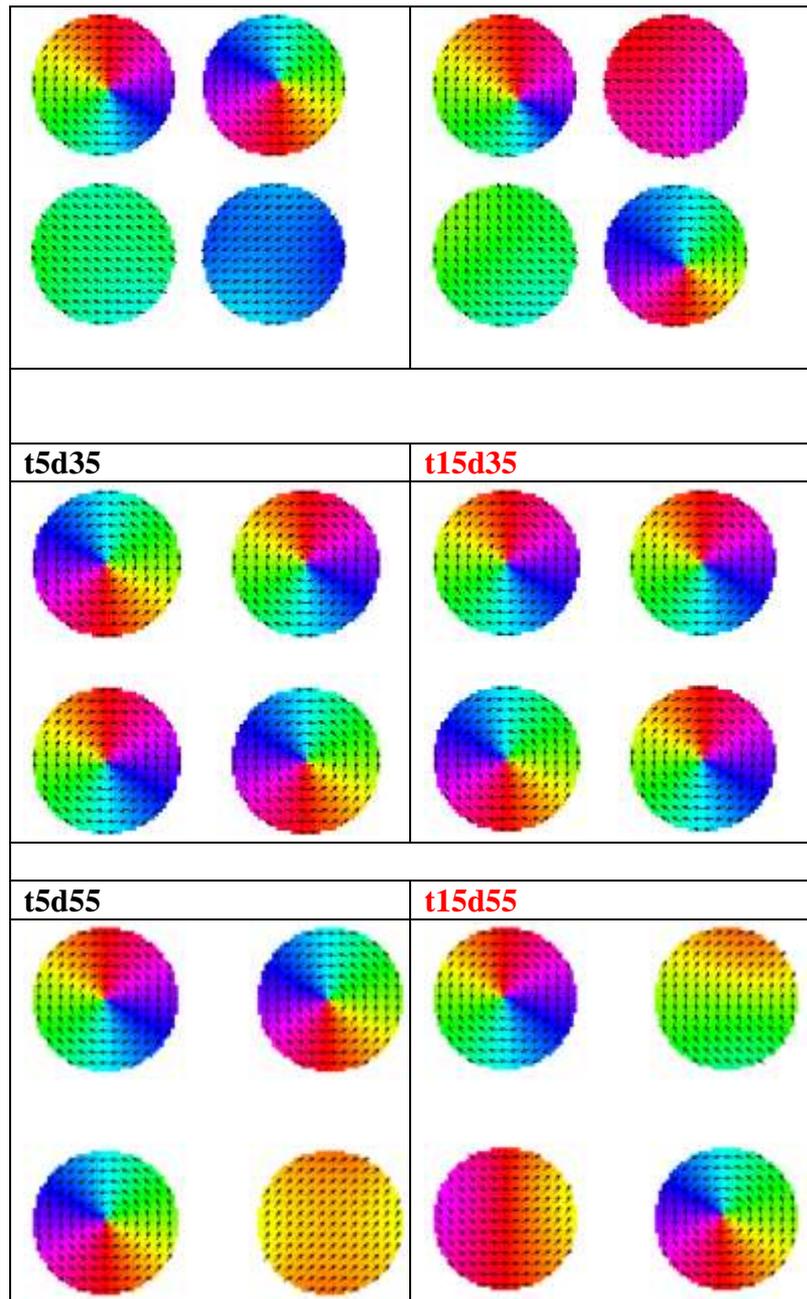


Gambar 4. Sistem Energi GS NanoDisk_LSMO tebal 5 nm dengan diameter (a) 100nm (b) 200nm (c) 300nm (d) 400nm (e) 500nm

Bentuk NanoDisk Array

Struktur domain untuk diskarray 2x2 pada diameter 100 nm pada ketebalan $t=5$ nm dan $t=15$ nm adalah sebagai berikut:

<p>t5d10</p> 	<p>t15d10</p> 
<p>t5d20</p>	<p>t15d20</p>



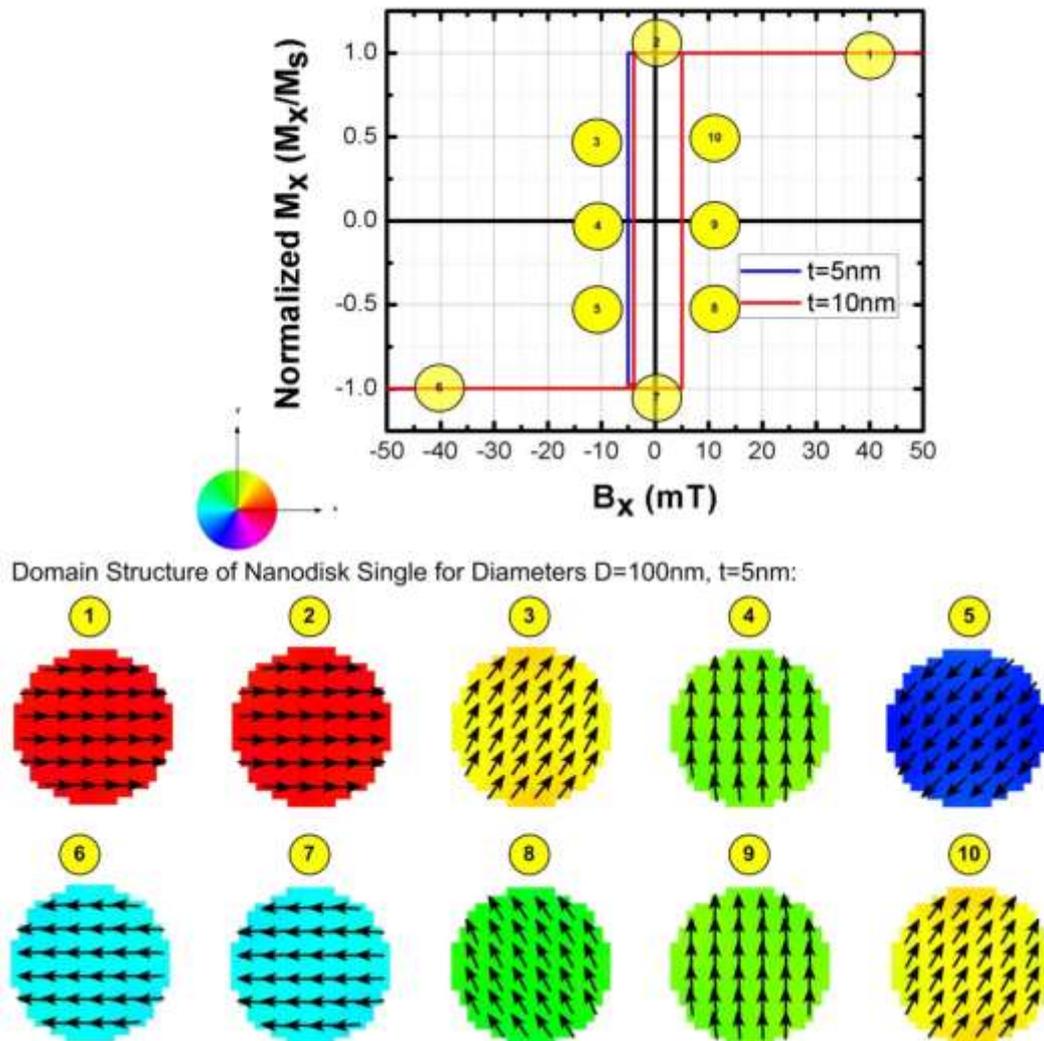
Berdasarkan gambar tersebut terlihat keadaan groundstate diskarray adalah campuran antara single domain dan vorteks dengan jumlah vorteks dalam array disk adalah lebih dari dua disk.

Kurva Hysterisis LSMO ($x = 0.3$)

NanoDisk Tunggal

Hasil running simulasi untuk mencari kurva hysterisis telah dilakukan untuk bentuk nanodisk dengan ketebalan 5 nm dan 10 nm dengan diameter 100 nm. Kurva hysterisis tebal disk 5nm dan 10 nm beserta domain strukturnya adalah seperti terlihat dalam gambar. Berdasarkan gambar tersebut dapat

diperoleh informasi tentang medan koersivitas dan medan switching untuk diameter disk 100nm, yaitu: 5mT untuk tebal disk 5nm dan 4.5mT untuk tebal disk 10nm.

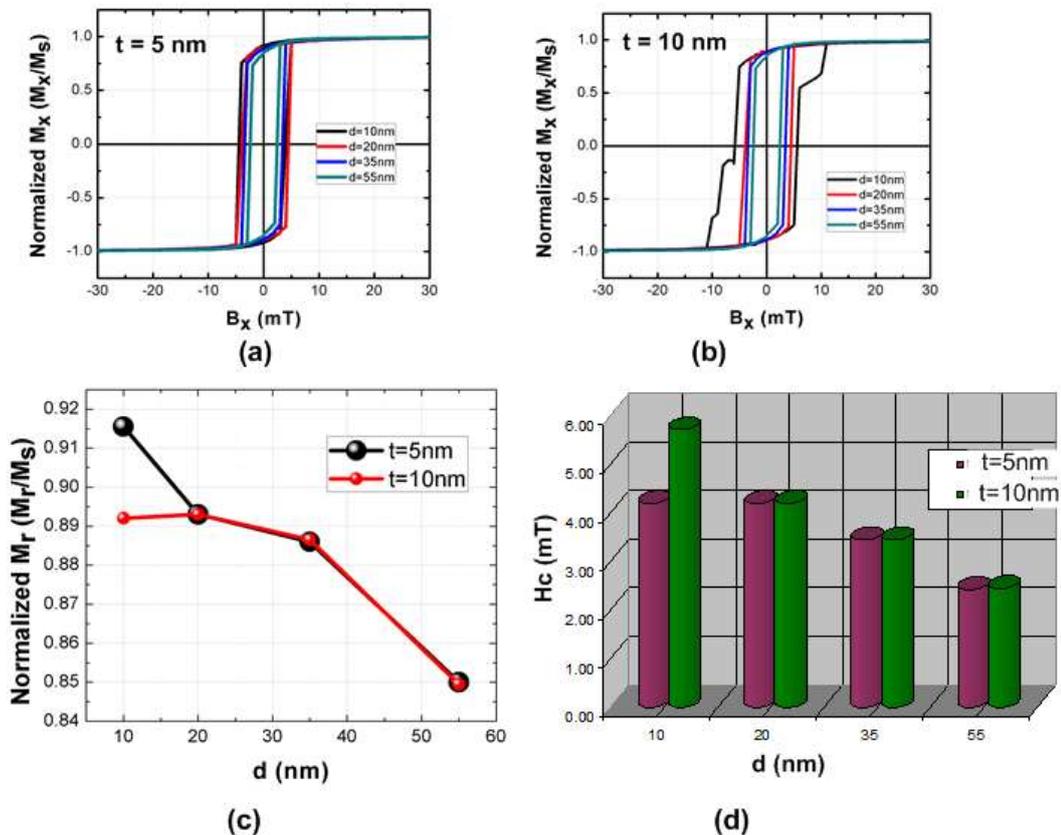


Gambar 6. Kurva hysteresis untuk Nanodisk tunggal tebal 5 dan 10 nm,
 $D=100\text{nm}$

Bentuk kurva hysteresis tersebut juga menunjukkan bahwa bahan LSMO ($x=0.3$) berbentuk nanodisk tersebut terbukti tergolong ferromagnetik kuat dan termasuk golongan bahan softmagnet (kurva kurus). Kurva hysteresis untuk nanodisk berdiameter 100nm untuk ketebalan 5nm dan 10nm adalah identik berbentuk *square*. Keadaan domain struktur thin film nanodisk dengan diameter 100nm ini sangat berkaitan dengan konfigurasi spin groundstatenya yang berbentuk *single domain* (lihat gambar sebelumnya).

Hysteresis NanoDisk Array (2 X 2)

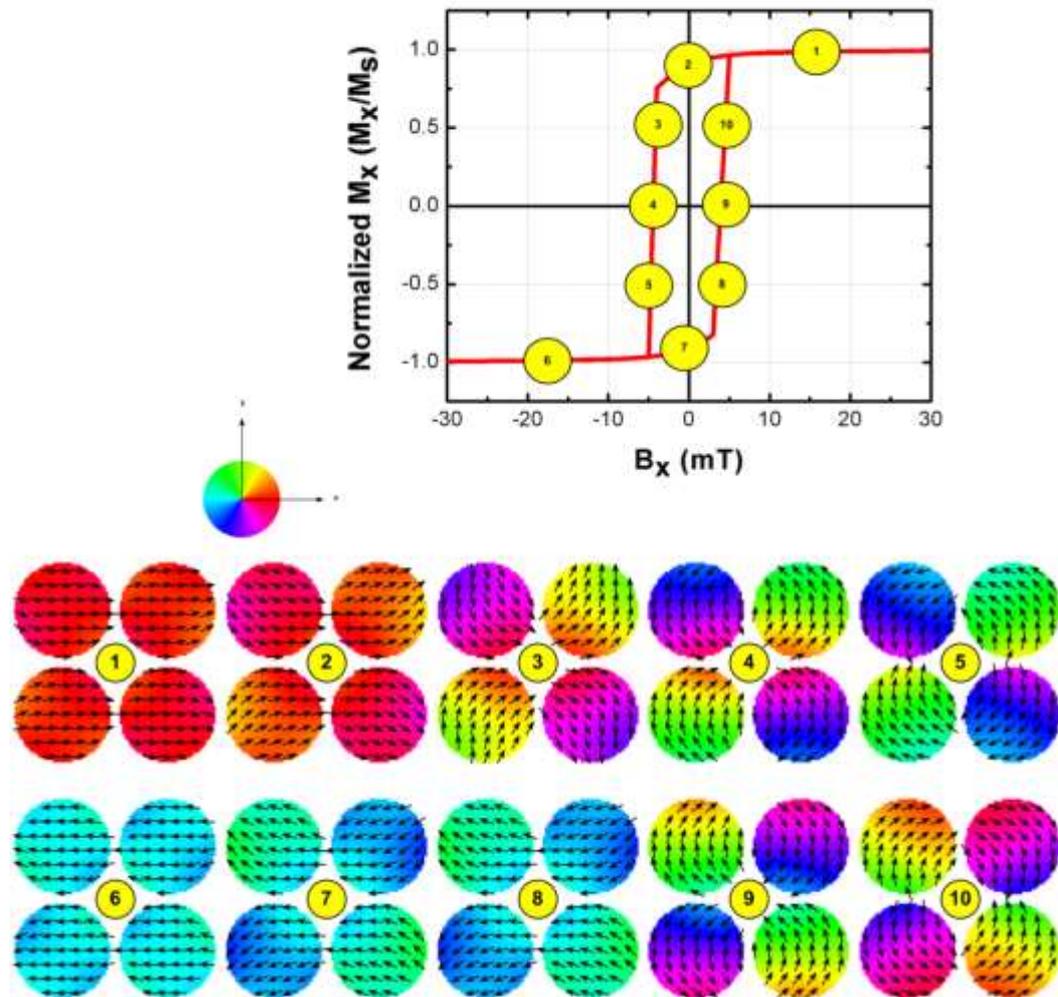
Kurva hysteresis untuk nanodisk array (2x2) untuk ukuran tebal 5nm dan 10 nm dengan variasi jarak antar disk (jarak antar titik pusat disk) telah didapatkan gambar sebagai berikut:



Gambar 7. Kurva hysteresis, magnetisasi remanen dan medan koersivitas dari Nanodisk array 2x2, dengan $t=5,10$ nm dengan jarak interdisk $d=10,20, 35$ dan 55 nm.

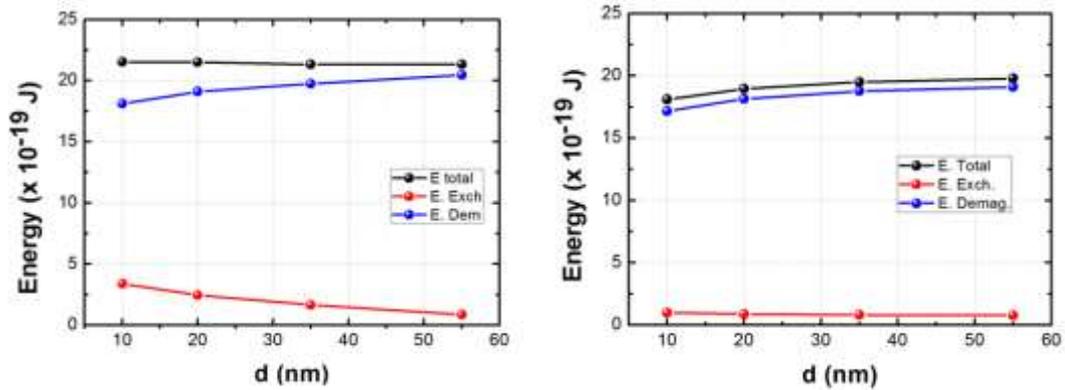
Terlihat bahwa koersivitas dan remanen untuk nanodisk array dengan ketebalan 5 dan 10 nm yang berbeda adalah pada jarak interdisk (d) $d=10$ nm, hal ini diduga disebabkan pada jarak interdisk 10 nm kontribusi interaksi exchange sangat besar dan berpengaruh. Medan koersivitas untuk ketebalan ($t=5$ nm, $t=10$ nm) pada berbagai jarak interdisk $d=10$ nm, 20nm, 35nm dan 55nm adalah (4.2, 5.7)mT, (4.2, 4.2)mT, (3.4, 3.4)mT, dan (2.4, 2.4)mT. Semua hasil tersebut sesuai dengan hasil eksperimen yang sudah dilaporkan sebelumnya oleh Ott et.al (2000) bahwa untuk thin film LSMO yang ditumbuhkan pada substrat STO mempunyai koersivitas rendah ($H_c < 10$ mT), dan magnetisasi saturasinya lebih besar dari 200mT.

Contoh Domain struktur yang terjadi pada beberapa kurva hysteresis dapat digambarkan dalam simulasi mikromagnetik sebagai berikut:



Gambar 8. Kurva hysteresis dan struktur domain untuk nanodisk array $t=5\text{nm}$, $d=10\text{nm}$

Hasil analisa energi pada titik remanence dan titik koersivitas menunjukkan bahwa energy demagnetisasi cenderung lebih besar nilainya daripada energy exchange. Energi exchange nilainya cenderung menurun dengan kenaikan jarak interdisk pada nanodisk array. Ini dapat dipahami bahwa semakin kecil jarak interdisk maka kemungkinan untuk terjadinya interaksi yang lebih kuat dapat lebih mungkin terjadi. Namun untuk masing-masing jarak interdisk, energy demagnetisasi cenderung lebih dominan dibandingkan energy excahngnya. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa struktur domain akan cenderung lebih dominan pada keadaan *single domain*.



Gambar 9. Energi system nanodisk array untuk ketebalan $t=5\text{nm}$, pada (a) titik koersivitas dan (b) titik remanence dalam berbagai jarak interdisk ($d=10,20,35$ dan 55 nm)

Frekuensi Presisi dan Time Switching LSMO ($x = 0.3$)

Bentuk NanoDisk Tunggal

Hasil analisa FFT dari data magnetisasi vs time simulation didapatkan data frekuensi presisi dan time switching untuk disk tunggal dengan ketebalan (t) 5 nm, sebagai berikut:

Tabel 2. Frekuensi presisi dan time switching nano disk tunggal dengan tebal 5nm pada berbagai diameter disk

Diameter Disk (nm)	Frekuensi Presisi (GHz)	Time Switching (ns)
100	6.21	11.90
200	4.28	33.80
300	6.21	13.33
400	6.60	14.54
500	4.77	15.07

Berdasarkan table 2 terlihat adanya kecenderungan peningkatan time switching terhadap diameter disk dengan ketebalan yang sama (5nm). Namun terjadi anomali untuk ukuran diameter disk 200nm, hal ini sudah terlihat dari konfigurasi spin saat kondisi groundstate yang membentuk single domain.

Bentuk NanoDisk Array (2 X 2)

Hasil analisa FFT dari data magnetisasi vs time simulation didapatkan data frekuensi presisi dan time switching untuk disk array (2x2) dengan ketebalan (t) 5 nm, sebagai berikut:

Tabel 3. Frekuensi presisi dan time switching nano disk array (2x2) dengan tebal 5nm dan diameter disk 100nm pada berbagai Jarak antar disk (R)

Jarak antar Disk (R) (nm)	Frekuensi Presisi (GHz)	Time Switching (ns)
25	4.42	20.25
35	4.48	20.82
45	4.53	20.69
55	4.61	20.40
65	4.43	20.55
75	4.44	20.52

Berdasarkan tabel 3 terlihat adanya kecenderungan peningkatan frekuensi presisi terhadap jarak antar disk dengan ketebalan dan diameter disk yang sama (5nm dan 100nm). Namun terjadi penurunan kembali pada jarak antar disk 65nm, dan setelahnya juga mempunyai frekuensi hampir sama yaitu, 4.44 Ghz pada R=75nm.

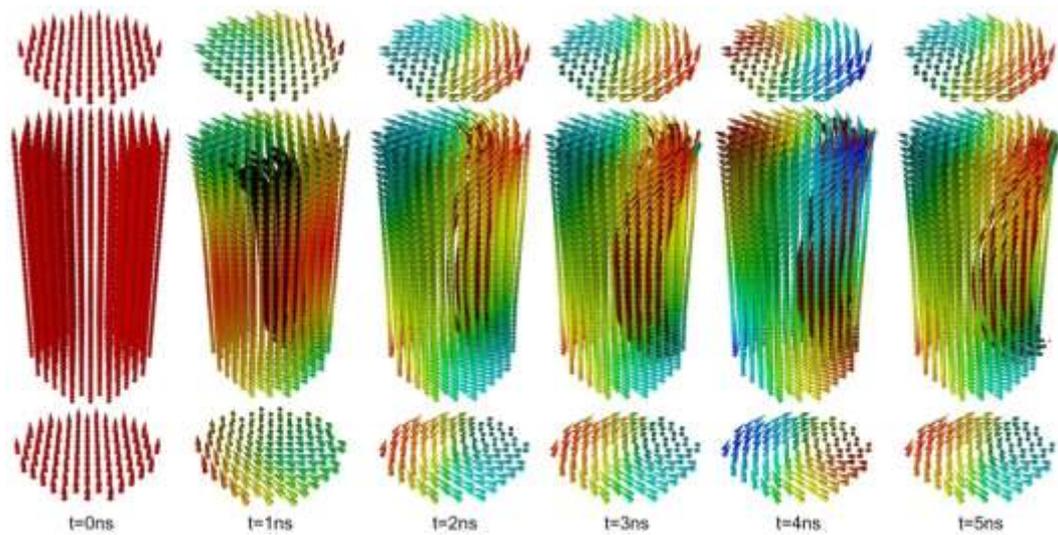
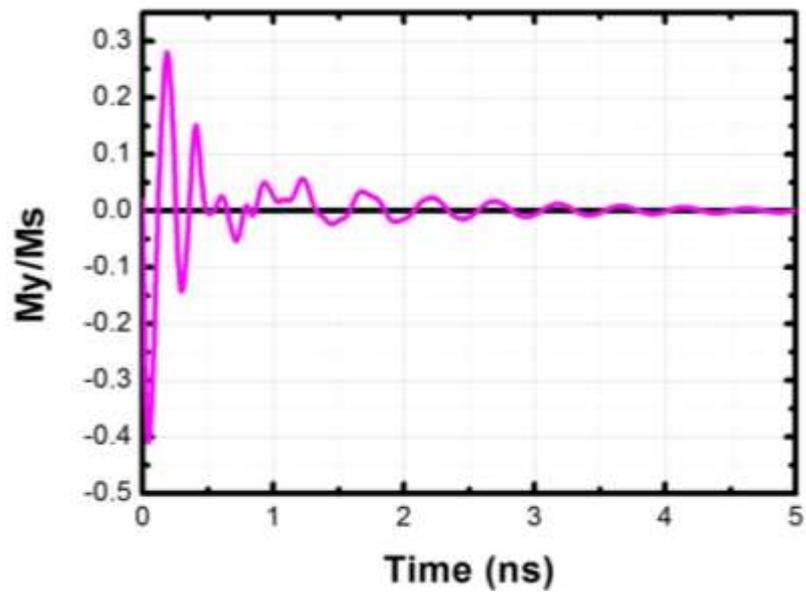
Resonansi Ferromagnetik LSMO Nanopillar (FMR)

Resonansi Ferromagnetik (FMR) bahan LSMO berbentuk nanopillar telah dilakukan mengacu kepada Referensi Dao (2004) dan Fisbacher (2009). Resonansi Ferromagnetik terjadi karena bahan magnetic ikut berosilasi saat diberikan medan yang berosilasi secara periodis. Frekuensi osilasi bahan ferromagnetic adalah khas dan berada pada titik-titik frekuensi tertentu. Prilaku resonansi ferromagnetic ini banyak dimanfaatkan untuk sensor magnetic dan penyerap gelombang elektromagnetik.

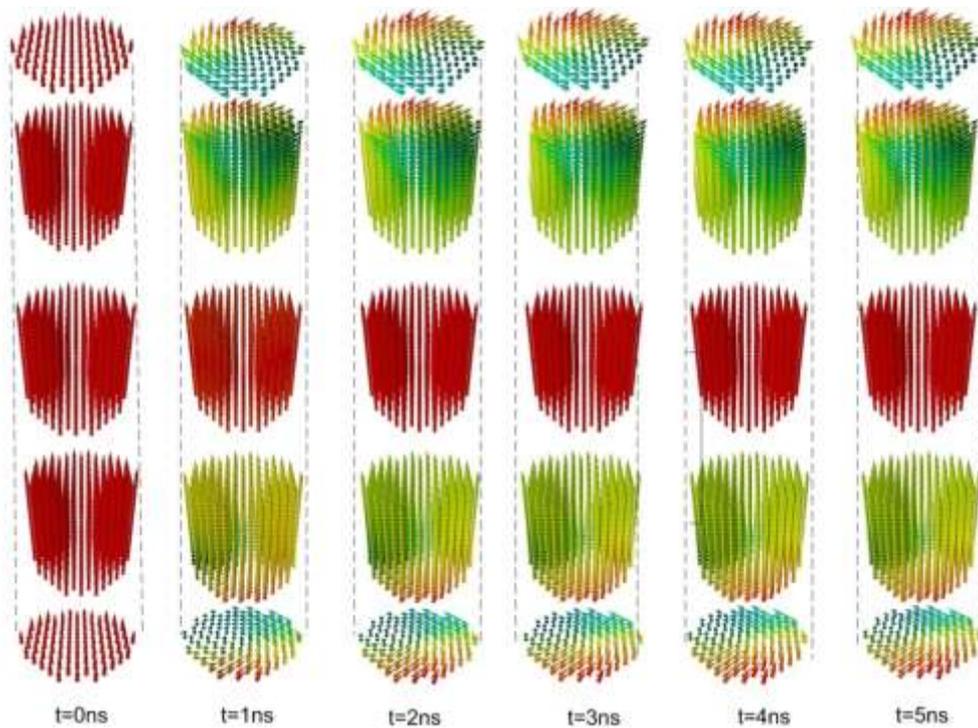
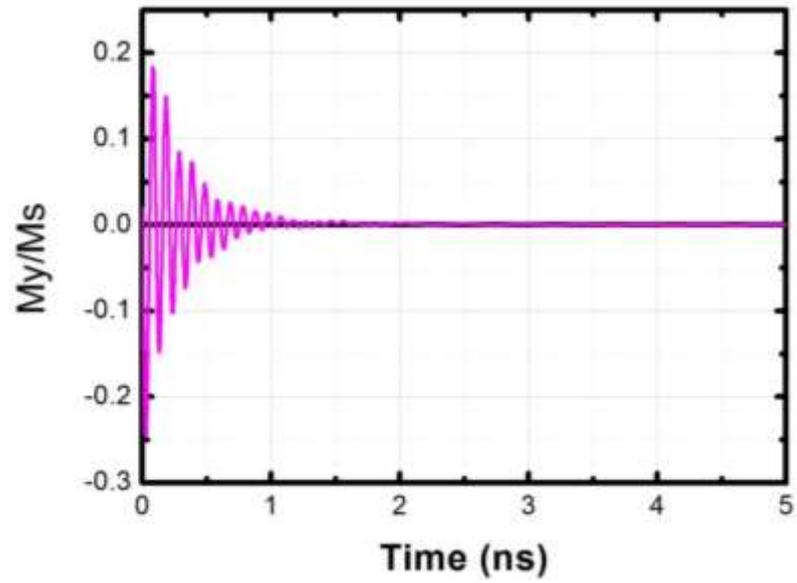
FMR bahan LSMO bentuk nanopillar telah disimulasikan untuk Amplitudo besar 1000 mT. Simulasi mikromagnetik yang dilakukan adalah dengan menggunakan NMAG dan OOMMF. Hasil simulasi tersebut terlihat dalam gambar berikut, dalam ringkasan ini ditampilkan untuk aspek rasio 2 (AR=2) dan aspek rasio 20 (AR=20):

Bentuk Cylinder Pillar

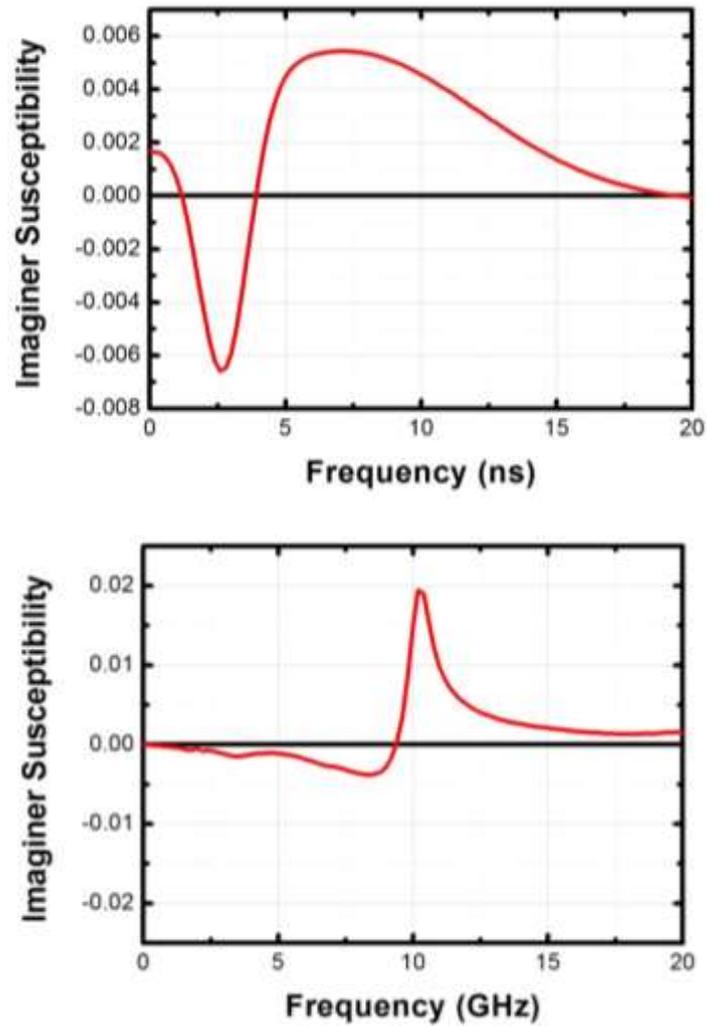
Untuk Aspect Ratio=2 (AR2):



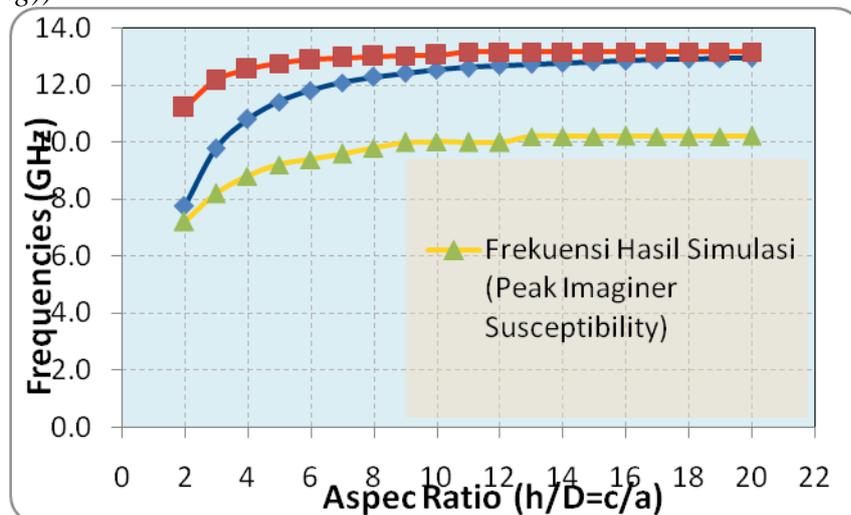
Untuk Aspek Ratio=20 (AR20):



Hasil Imaginer Susceptibilitas untuk AR2 dan AR20:

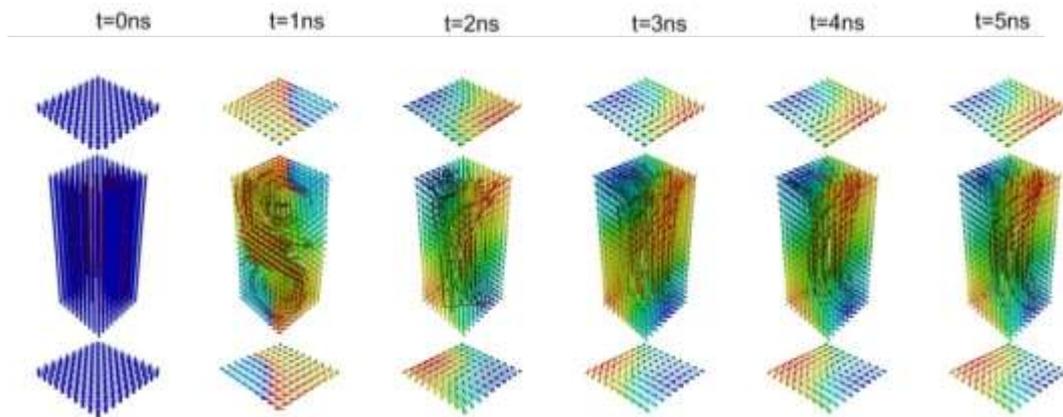


Frekuensi Resonansi Cylinder Pillar Simulasi vs Analitik (Kittel's Teori (by Dao & Duxing))

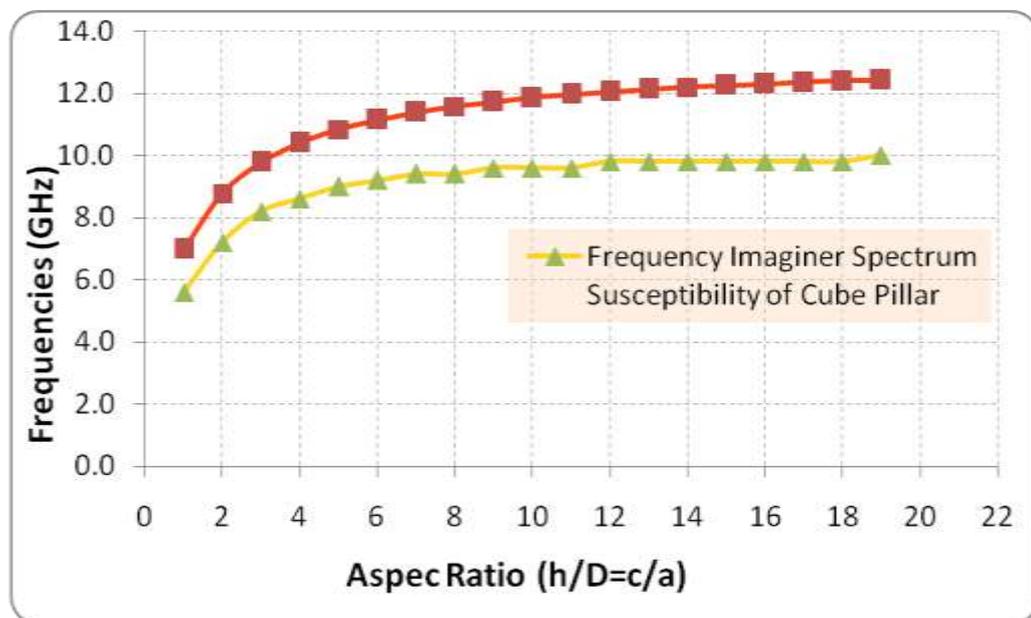


Bentuk Kubus Pillar (Cube Pillar)

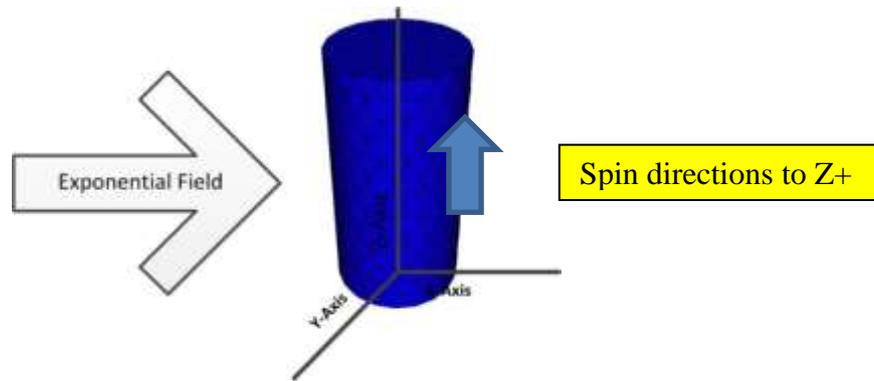
Untuk Aspect Ratio=2 (AR2):



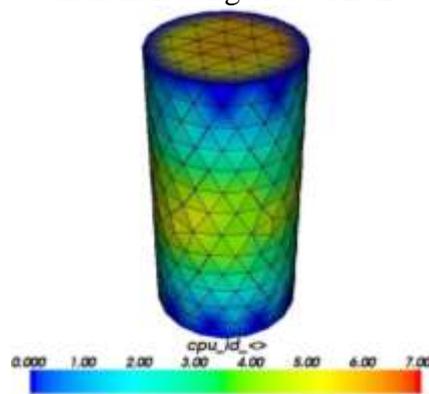
Frekuensi Resonansi Cylinder Pillar Simulasi vs Analitik (Kittel's Teori (by Dao))



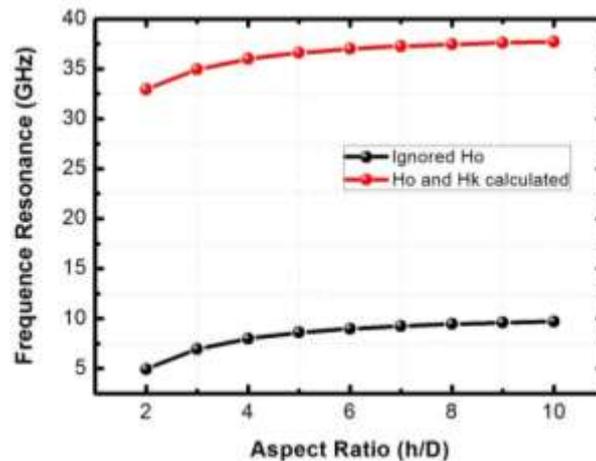
Hasil Analisa Frekuensi Resonansi dengan NMAG untuk Amplitude Besar (1000mT):



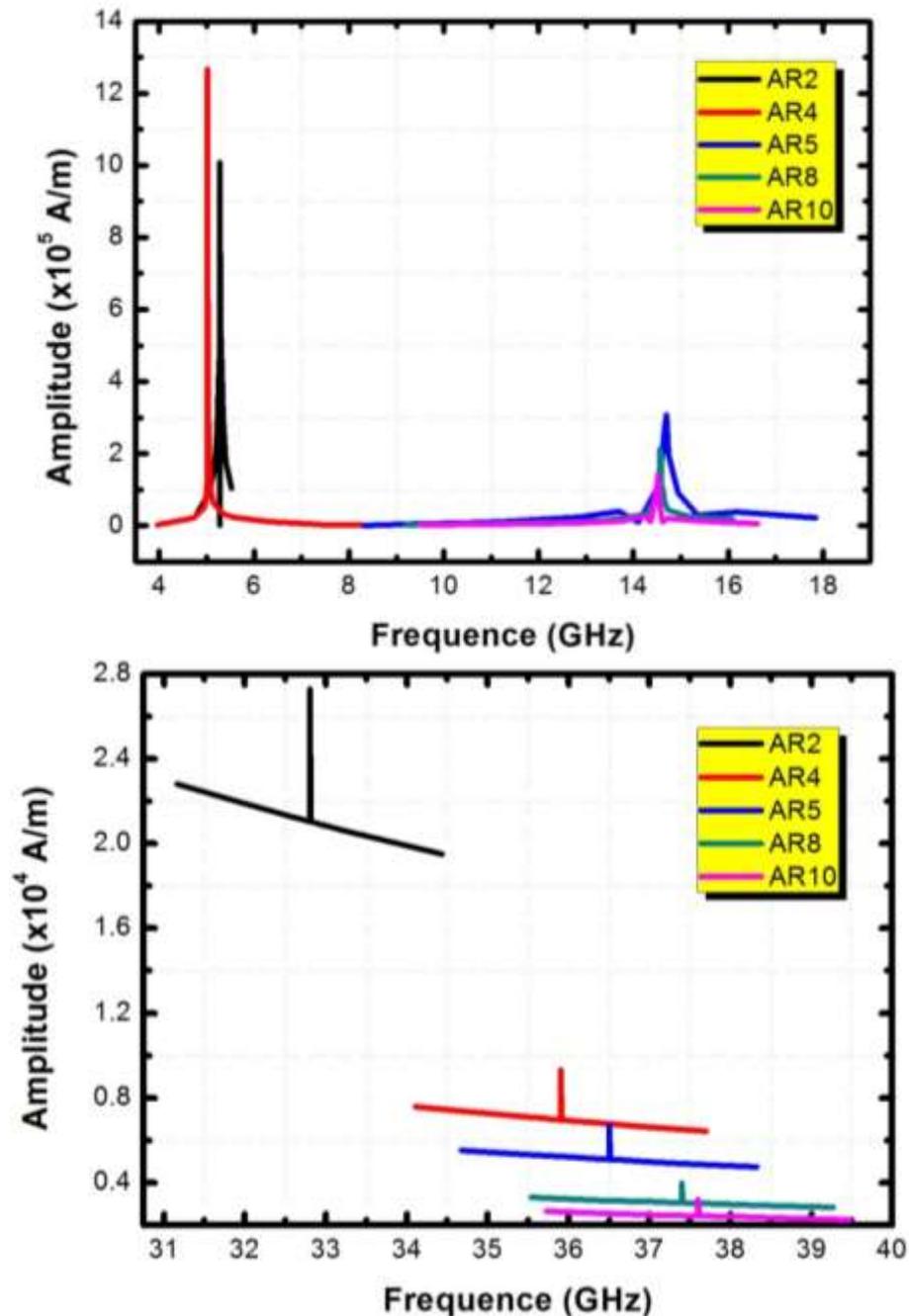
Gambar 4.24. Diagram simulasi yang dilakukan dengan NMAG seperti yang dilakukan dengan OOMMF



Gambar 16. Pembagian cell mesh dalam running dengan Paralelisasi MPICH2

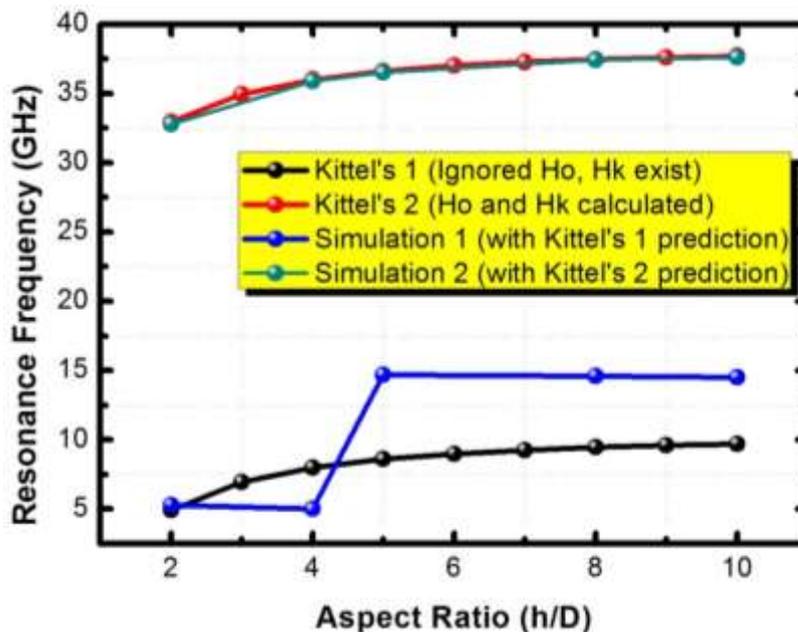


Gambar 17. Hasil perhitungan analitik dengan Teori Kittels, untuk Inisiasi simulasi



Gambar 18. Hasil simulasi frekuensi resonansi dan amplitude yang berhubungan (a) dengan inisiasi hasil prediksi Kittel's 1 (b) dengan inisiasi hasil prediksi Kittel's 2

Hasil dari gambar tersebut di atas kemudian diplot dalam gambar grafik yang menghubungkan antara Aspek Rasio dengan Frekuensi Resonansi yang berhubungan untuk dibandingkan dengan grafik hasil analitik menggunakan teori Kittel's.



Gambar 19. Hasil simulasi frekuensi resonansi pada beberapa aspek rasio vs hasil analitik menggunakan teori Kittel's (Kittels 1 & Kittels 2)

Berdasarkan hasil tersebut di atas terlihat bahwa untuk Amplitudo besar yaitu 1000mT, perhitungan Kittels dengan memasukkan medan H_0 dan Medan Anisotropi secara bersamaan lebih baik dari pada tanpa memasukkan medan H_0 . Terbukti dari hasil simulasi yang menggunakan inisiasi frekuensi hasil prediksi Kittelsnya adalah lebih baik jika memasukkan medan H_0 dan Medan Anisotropi secara bersamaan.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah dapat mensimulasikan bahan LSMO dengan $x=0.3$, dalam aplikasi thin film dalam berbagai bentuk dan ukuran. Keadaan bentuk nanodisk thin film telah disimulasikan bahwa diameter kritisnya berada pada nilai $D>125\text{nm}$. Artinya bahan LSMO ini akan bersifat single domain untuk ketebalan thin film sampai dengan 15nm. Bila LSMO ini diaplikasikan pada nanopattern, yang dalam teknologi saat ini hardisk dibuat dari thin film dengan pattern berbentuk array yang berukuran nano, maka telah dapat disimulasikan apa yang terjadi dengan sifat-sifat magnetiknya, yaitu: kurva hysteresis, medan koersivitas, magnetisasi remannnya dan system energinya. Kecepatan akses data, yaitu penulisan data dan pembacaan data dapat dilihat dari reversal magnetisasi dan

time switchingnya. Dalam simulasi ini telah dapat menginvestigasi nilai time swtchingnya yang masih berorde nanosecond.

Untuk Aplikasi yang lebih luas lagi dari bahan LSMO ini telah dilakukan simulasi untuk melihat Resonansi Ferromagnetik dari beberapa bentuk nanopillar, yaitu silinder pillar dan kubus pillar. Hasil simulasi yang dilakukan sejauh ini sama atau mendekati nilai analitiknya dengan perhitungan Kittels.

SARAN

Berdasarkan hasil penelitian terakhir tersebut di atas, maka penelitian ini sebaiknya dikembangkan ke arah simulasi FMR untuk aplikasi thin film sehingga dapat diterapkan untuk aplikasi RAM atau sensor.

Perlunya pelatihan penulisan jurnal internasional sehingga hasil-hasil penelitian ini dapat dipublikasikan ke Jurnal Internasional yang lebih baik yaitu yang berindex Scopus.

DAFTAR PUSTAKA

- Asamitsu A, Moritomo Y, Tomioka Y, Arima T and Tokura Y 1995 Nature 373 407
- Baibich, M. N., J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas., 1988. *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472
- Chatterji T., McIntyre G. J., and Stunault A. 2000. *Understanding colossal magnetoresistance.*
- Dao N., I. Dumitru, L. Spinu, S. L. Whittenburg, M. J. Donahue, and J. C. Lodder. Dynamic susceptibility of nanopillars. *Nanotechnology*, 15: S634-S638, 2004
- Fischbacher, T., M. Franchin, and H. Fangohr. 2010. *Micromagnetic simulations of magnetoelectric materials.*
- Gor'kov, L. P., & Kresin, V. Z. 2004. *Mixed-valence manganites: fundamentals and main properties.* Physics Reports 400. 149–208.
- Jin S., McCormack M., Tiefel T.H., and Ramesh R. 1994. *J. Appl. Phys.* **76** 6929.
- Kubota, M., T. Taniuchi and R. Yasuhara, H. Kumigashira and M. Oshima, K. Ono, H. Okazaki, T. Wakita, and T. Yokoya, H. Akinaga, M. Lippman, M. Kawasaki, H. Koinuma. 2007. *Magnetic domain structure of a technically patterned ferromagnetic $La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ thin film.* Applied Phys. Letters 91, 182503.

- Kittel C. On a theory of ferromagnetic resonance absorption *Phys. Rev.* 73: 155. 1948
- Kuwahara H, Tomioka Y, Asamitsu A, Moritomo Y and Tokura Y 1995 *Science* 270 961
- Mahendiran R, Raychaudhuri A K, Chainani A, Sarma D D and Roy S B 1995 *Appl. Phys. Lett.* 66 233
- F. Ott, M. Viret, R. Borges, R. Lyonnet, E. Jacquet, C. Fermon and J. -P. Contour, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (2000). 211(1-3); p. 200-205
- Popescu, F. 2007. *Multiband Models For Colossal Magnetoresistance Materials And Diluted Magnetic Semiconductors*. Tidak Dipublikasikan. Disertasi. The Florida State University: The Degree of Doctor of Philosophy.
- Tokura Y, Urushibara A, Moritomo Y, Arima T, Asamitsu A, Kido G and Furukawa N 1994 *J. Phys. Soc. Japan* 63 3931
- Urushibara, A.; Moritomo, Y.; Arima, T.; Asamitsu, A.; Kido, G. and Tokura, Y.: 1995 *Insulator-Metal Transition and Giant Magnetoresistance in $La_{1-x}Sr_xMnO_3$* . *Phys. Rev. B*, 51(20), pp. 14103–14109.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.51.14103>
- Ziese, M. 2006. *Study of micromagnetic structure of a $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ film*. *Phys. Stat. Sol. (b)* 243, No.6, 1383-1389.