



**SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN FePt DI BAWAH PENGARUH  
*HEAT ASSISTED* MENGGUNAKAN SIMULASI MIKROMAGNETIK**

**SKRIPSI**

Oleh

**Intan Romadhony  
NIM 151810201036**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2019**



**SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN FePt DI BAWAH PENGARUH  
*HEAT ASSISTED* MENGGUNAKAN SIMULASI MIKROMAGNETIK**

**SKRIPSI**

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Fisika (S1) dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh

**Intan Romadhony  
NIM 151810201036**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2019**

## PERSEMBAHAN

Dengan memanjatkan puji syukur kehadiran Allah SWT, skripsi ini penulis persembahkan untuk:

1. Ibunda Siti Rodiyah dan Ayahanda Drs. M. Saifuddin Yassin yang tercinta;
2. Kakakku Akbar Maulana, S.IP., M.Si yang penulis sayangi;
3. Guru-guru mulai dari TK hingga SMA dan dosen-dosen yang telah membimbing dan memberikan ilmunya kepada penulis;
4. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Jember.

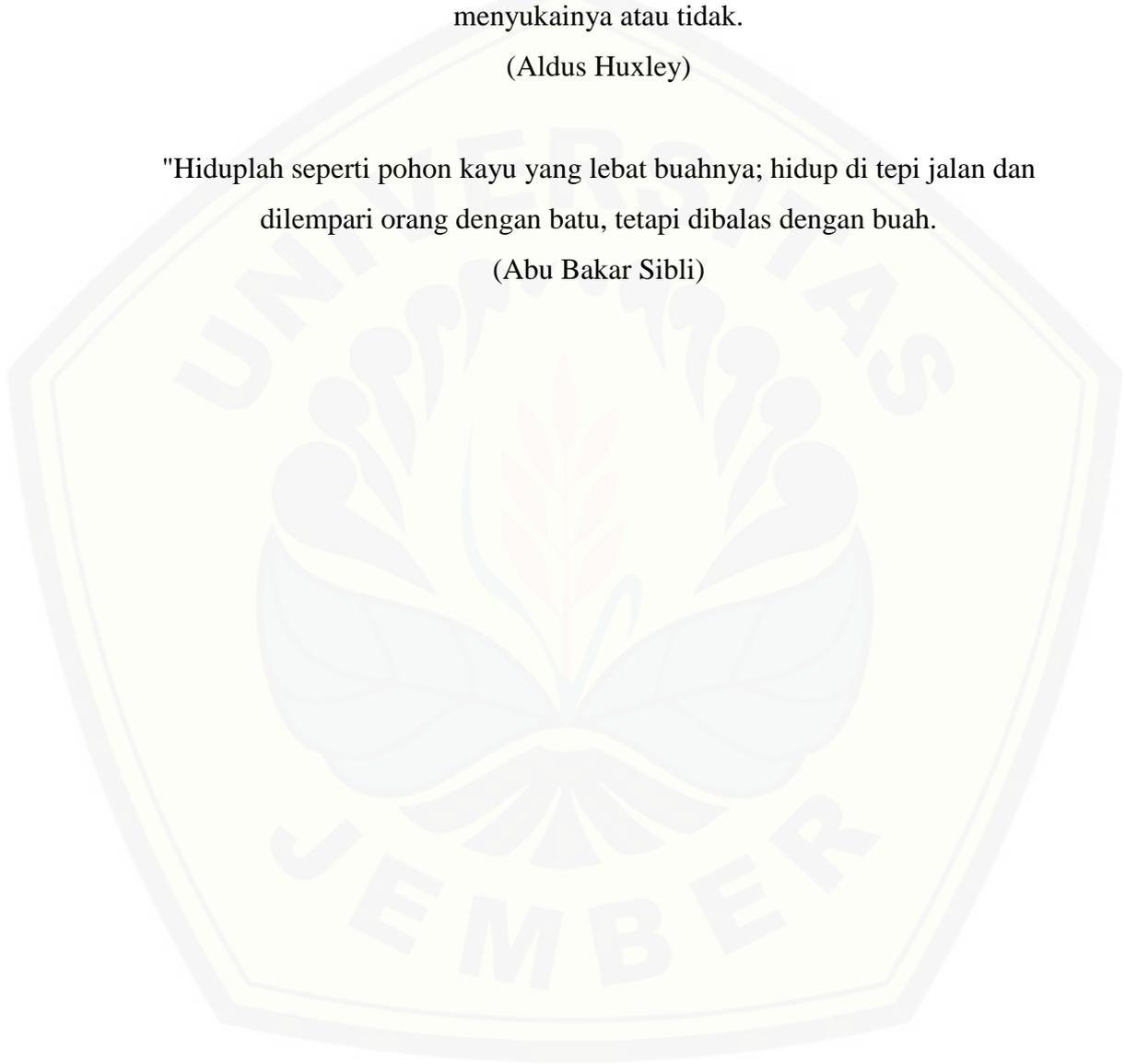
## MOTO

Orang-orang yang sukses telah belajar membuat diri mereka melakukan hal yang harus dikerjakan ketika hal itu memang harus dikerjakan, entah mereka menyukainya atau tidak.

(Aldus Huxley)

"Hiduplah seperti pohon kayu yang lebat buahnya; hidup di tepi jalan dan dilempari orang dengan batu, tetapi dibalas dengan buah.

(Abu Bakar Sibli)



**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : Intan Romadhony

NIM : 151810201036

menyatakan dengan sesungguhnya karya ilmiah yang berjudul “Sifat-sifat Magnetik Bahan FePt di bawah Pengaruh *Heat Assisted* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Juli 2019

Yang menyatakan,

Intan Romadhony

NIM 151810201036

**SKRIPSI**

**SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN FePt DI BAWAH PENGARUH *HEAT ASSISTED* MENGGUNAKAN SIMULASI MIKROMAGNETIK**

Oleh

Intan Romadhony

NIM 151810201036

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Lutfi Rohman, S.Si, M.Si

Dosen Pembimbing Anggota : Endhah Purwandari, S.Si., M.Si

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Sifat-sifat Magnetik Bahan FePt di bawah Pengaruh *Heat Assisted* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” karya Intan Romadhony telah diuji dan disahkan pada:

hari :

tanggal :

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

**Tim Penguji:**

Dosen Pembimbing Utama

Dosen Pembimbing Anggota

Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si  
NIP 197208201998021001

Endhah Purwandari, S.Si., M.Si  
NIP 198111112005012001

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II

Ir. Misto, M.Si  
NIP 19591121991031002

Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D  
NIP 196812191994021001

Mengesahkan

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Drs. Sujito, Ph.D.  
NIP 196102041987111001

## RINGKASAN

**Sifat-sifat Magnetik Bahan FePt di Bawah Pengaruh *Heat Assisted* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik;** Intan Romadhony, 151810201036; 54 halaman; Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember.

Perkembangan teknologi saat ini tidak lepas dari perkembangan fisika material khususnya dalam bidang magnetik. Salah satu hasil teknologi yang sangat penting yaitu komputer. Komputer pertama kali memiliki media penyimpanan dengan kapasitas 5 MB dan hingga saat ini meningkat seiring perkembangan ilmu pengetahuan. Salah satu aplikasi bahan magnetik adalah untuk media perekam magnetik contohnya *hard disk drive* (HDD). Bahan yang digunakan untuk membuat *hard disk drive* (HDD) adalah bahan feromagnetik karena memiliki anisotropi magnetik tinggi, temperatur Curie tinggi dan lebih stabil dari suhu yang tinggi. *Iron-platinum* (FePt) adalah salah satu bahan feromagnetik yang dapat diaplikasikan pada HDD. Bahan FePt memiliki stabilitas yang sangat baik sehingga berpotensi diaplikasikan dalam bahan media perekaman magnetik. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat magnetik temperatur curie dan medan koersivitas bahan FePt di bawah pengaruh *heat assisted* dengan variasi nilai daya laser.

Penelitian ini dilakukan secara teori komputasi melalui simulasi mikromagnetik dengan menggunakan sebuah program yang diproses pada komputer. Program simulasi mikromagnetik yang digunakan dalam penelitian adalah *Vampire*. Sifat-sifat magnetik bahan FePt yang diteliti antara lain temperatur Curie, medan koersivitas dan medan saturasi di bawah pengaruh daya laser berdasarkan kurva histerisisnya. Penelitian dilakukan dengan menggunakan komposisi bahan  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  dengan ukuran geometri sebesar 5 nm berbentuk *nanosphere*. Sedangkan untuk penelitian kurva histerisis dilakukan dengan variasi temperatur untuk mengetahui pengaruhnya terhadap medan koersivitas dan medan saturasi. Variasi temperatur didasarkan pada kondisi *heat sink CPU* dari perangkat komputer saat operasi. Variasi temperatur yang diberikan yaitu 0 K, 298 K, 318 K dan 339 K. Temperatur 298 K merupakan temperatur awal/ lingkungan, temperatur 318 K merupakan temperatur *set point* dan pada temperatur 339 K merupakan temperatur maksimal yang dapat diterima prosesor (*overheat*). Penelitian kurva histerisis untuk melihat pengaruh daya laser terhadap medan koersivitas dan medan saturasi dilakukan dengan variasi daya laser. Adapun variasi daya laser yang diberikan pada bahan yaitu 0 W, 0,008 W, 0,012 W, 0,016 W, 0,022 W dan 0,026 W.

Hasil simulasi penentuan temperatur Curie yang diperoleh menunjukkan nilai suseptibilitas magnetik tertinggi dan nilai magnetisasi mendekati nol dapat menentukan nilai temperatur Curie dari bahan  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ . Berdasarkan hasil simulasi, temperatur Curie bahan  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  sebesar 650 K. Berdasarkan kurva histerisis yang didapatkan dari hasil simulasi, diperoleh bahwa variasi temperatur

dan variasi daya laser mempengaruhi medan koersivitas dan medan saturasi bahan  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ . Besar medan koersivitas akan semakin kecil seiring dengan penambahan temperatur. Sama halnya dengan medan saturasi, seiring penambahan temperatur akan semakin kecil medan saturasi yang dihasilkan. Untuk pengaruh daya laser sebagai aplikasi dari *heat assisted* mengakibatkan semakin kecil medan koersivitas dan medan saturasi seiring penambahan daya laser.

Daya laser digunakan untuk membalikkan arah magnetisasi dari bahan  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  dengan cepat sehingga medan koersivitas dari kurva histerisis mengecil. Dengan medan koersivitas yang kecil, media perekam magnetik dapat melakukan proses penulisan dan perekaman dalam kapasitas yang besar. Berdasarkan hasil simulasi, daya laser yang berpotensi diaplikasikan pada bahan  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  saat komputer bekerja antara lain pada temperatur 0 K dengan daya laser 0 W hingga 0,0026 W. Untuk temperatur 298 K dan 318 K, daya laser yang baik digunakan sebesar 0 W hingga 0,016 W. Sedangkan untuk temperatur 339 K tidak dapat diaplikasikan dengan daya laser karena merupakan temperatur *overheat*.

## PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT. Atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul ‘Sifat-sifat Magnetik Bahan FePt di bawah Pengaruh *Heat Assisted* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik’. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Endhah Purwandari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
2. Ir. Misto, M.Si., selaku Dosen Penguji I dan Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D., selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Drs. Yuda C. Hariadi, MSc. PhD., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa;
4. Segenap Dosen dan Karyawan Fakultas MIPA Universitas Jember yang selalu membantu dan mendukung;
5. Orang tuaku Ayahanda Drs. M. Saifuddin Yassin dan Ibunda Siti Rodiyah tercinta yang telah memberikan semangat, kasih sayang, materi, dan doanya;
6. Kakakku Akbar Maulana, S.IP., M.Si yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama penulis menempuh pendidikan;
7. Sahabat-sahabat tercinta Dyanti Arumdari, Irmawati Hasanah, Ilma Eka Rokhmawati, Aisyah Qhusnul, Siti Rohimah, Erni Emawati, Dinda Hartina Mega Sartika, dan teman-teman tim komputasi magnetik yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama perjalanan studi hingga penulis menyelesaikan jenjang studi ini;

8. Teman-teman seperjuangan angkatan 15 (Ganesha Phi) yang telah memberikan bantuan dan dukungannya;
9. Edi Sutrisno selaku teknisi Laboratorium Fisika Komputasi yang telah memberikan bantuan selama penelitian;
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Dengan segala kerendahan hati penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang Fisika.

Jember, Juli 2019

Penulis

**DAFTAR ISI**

	halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	ii
<b>HALAMAN MOTO</b> .....	iii
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>HALAMAN PEMBIMBINGAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>RINGKASAN</b> .....	vii
<b>PRAKATA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xvi
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	5
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	5
<b>1.4 Tujuan</b> .....	6
<b>1.5 Manfaat</b> .....	6
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
<b>2.1 Kemagnetan Bahan</b> .....	7
<b>2.2 Sifat-sifat Bahan Feromagnetik</b> .....	9
2.2.1 Kurva Histerisis .....	9
2.2.2 Anisotropi Magnetik .....	12
2.2.3 Interaksi Pertukaran .....	12
2.2.4 Kebergantungan Magnetisasi terhadap Suhu .....	13
<b>2.3 Domain dan Dinding Domain</b> .....	14
<b>2.4 Dinamika Magnetisasi</b> .....	15

2.5	Kestabilan Termal .....	18
2.6	Metode Monte Carlo .....	19
2.7	Metode Heun .....	19
2.8	Bahan FePt .....	20
2.9	<i>Heat Assisted Magnetic Recording (HAMR)</i> .....	21
<b>BAB 3</b>	<b>METODE PENELITIAN</b> .....	<b>23</b>
3.1	Rancangan Penelitian .....	23
3.2	Jenis dan Sumber Data .....	24
3.3	Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukuran .....	25
3.4	Kerangka Pemecahan Masalah .....	25
3.4.1	Langkah Kerja .....	26
3.4.2	Metode Analisis Data .....	29
<b>BAB 4</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>33</b>
4.1	Analisis Temperatur Curie dari Bahan Fe <sub>0.85</sub> Pt <sub>0.15</sub> .....	33
4.2	Analisis Sifat Magnetik Bahan Fe <sub>0.85</sub> Pt <sub>0.15</sub> Berdasarkan Kurva Histerisis .....	36
4.3	Analisis Pengaruh <i>Heat Assisted</i> dengan Daya Laser terhadap Sifat Magnetik Bahan Fe <sub>0.85</sub> Pt <sub>0.15</sub> Berdasarkan Kurva Histerisis .....	41
<b>BAB 5</b>	<b>PENUTUP</b> .....	<b>49</b>
5.1	Kesimpulan .....	49
5.2	Saran .....	49
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	.....	<b>50</b>
<b>LAMPIRAN</b>	.....	<b>55</b>

**DAFTAR TABEL**

	halaman
3.1 Parameter bahan FePt yang digunakan dalam simulasi mikromagnetik..	24
3.2 Komposisi bahan, ukuran geometri, variasi suhu dan variasi daya laser..	24
4.1 Nilai medan koersivitas dan medan saturasi bahan $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ saat temperatur 0 K, 298 K, 318 K dan 339 K.....	38
4.2 Nilai medan koersivitas ( $H_c$ ) dan medan saturasi ( $H_s$ ) bahan $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ saat temperatur 0 K, 298 K, 318 K dan 339 K dengan variasi daya laser .....	45

DAFTAR GAMBAR

	halaman
2.1 Kurva magnetisasi (a) induksi awal B terhadap medan magnet H, (b) loop histerisis (magnet lunak), (c) loop histerisis (magnet keras). Baik induksi remanen (rapat fluks) dan medan koersif, B dan-Hc, masing-masing, besar untuk magnet keras. Hasil perkalian B dan H merupakan acuan ukuran energy demagnetisasi.....	10
2.2 Dinding domain membatasi dua domain yang berbeda.....	14
2.3 Proses magnetisasi suatu bahan selama dikenai medan luar H .....	15
2.4 Gerak presisi dari magnetisasi M dibawah pengaruh medan magnet $H_{eff}$ (a) $\alpha = 0$ , (b) $\alpha \ll 1$ .....	17
2.5 Struktur atom FCC besi-platinum FePt dengan $a=c= 0,376$ nm .....	20
2.6 Konsep HAMR .....	22
3.1 Diagram alir penelitian .....	26
3.2 Ilustrasi tampilan program <i>Vampire 4.0</i> .....	27
3.3 Ilustrasi tampilan program <i>Origin</i> .....	28
3.4 Ilustrasi tampilan program <i>Povray</i> .....	28
3.5 Ilustrasi tampilan program <i>Cygwin</i> .....	29
3.6 Ilustrasi penentuan temperatur Curie dengan susptibilitas .....	30
3.7 Ilustrasi kurva histerisis .....	31
3.8 Ilustrasi konfigurasi spin bahan magnetik .....	31
3.9 Ilustrasi penentuan medan koersivitas dari kurva histerisis .....	32
4.1 Grafik penentuan temperatur Curie bahan $Fe_{0.85}Pt_{0.15}$ berdasarkan perubahan magnetisasi dan tingkat suseptibilitas magnetik .....	34
4.2 Visualisasi struktur domain $Fe_{0.85}Pt_{0.15}$ berdasarkan perubahan temperatur; (1) struktur domain pada temperatur 0 K; (2) struktur	

	domain pada temperatur 650 K (temperatur Curie); (3) struktur domain pada temperatur 1500 K .....	35
4.3	Kurva histerisis bahan $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ terhadap variasi temperatur .....	37
4.4	(a) Kurva histerisis dari bahan $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ pada temperatur 0 K; (b) Perubahan orientasi arah spin pada berbagai nilai medan eksternal ....	39
4.5	Grafik perubahan magnetisasi terhadap waktu radiasi laser bahan $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ .....	41
4.6	Kurva histerisis dari bahan $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ dengan variasi daya laser pada temperatur 0 K.....	43
4.7	Kurva histerisis dari bahan $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ dengan variasi daya laser pada temperatur 298 K.....	43
4.8	Kurva histerisis dari bahan $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ dengan variasi daya laser pada temperatur 318 K.....	44
4.9	Kurva histerisis dari bahan $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ dengan variasi daya laser pada temperatur 339 K.....	44
4.10	(a) Kurva histerisis dari bahan $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ dengan variasi daya laser 0,008 W pada temperatur 0 K; (b) Perubahan orientasi arah spin pada berbagai nilai medan eksternal .....	47

**DAFTAR LAMPIRAN**

	halaman
4.1 Visualisasi Struktur Domain $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ Berdasarkan Perubahan Temperatur pada Analisis Temperatur Curie .....	55
4.2 Grafik Pengaruh Daya Lser Berdasarkan Waktu Magnetisasi .....	56
4.3 Perhitungan Temperatur dan Daya Laser Menggunakan Persamaan Stefan-Boltzman .....	58
4.4 Visualisasi Struktur Domain Kurva Histerisis $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ Berdasarkan Variasi Temperatur .....	60

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi saat ini tidak lepas dari perkembangan fisika material khususnya dalam bidang magnetik. Sesuai dengan perkembangan jaman, manusia dituntut untuk menciptakan teknologi-teknologi terbaru lainnya dengan mengembangkan ilmu pengetahuan yang ada. Rutinitas manusia sehari-hari juga tidak lepas dari peranan teknologi, salah satunya komputer yang hingga saat ini menjadi perangkat paling penting bagi manusia untuk bekerja. Komputer mulai dikenalkan pada dunia tahun 1950an oleh perusahaan IBM yang berusaha membuat media penyimpanan dengan kapasitas yang sangat besar untuk mendukung kinerja komputer. Pada tahun 1956 IBM telah berhasil menciptakan media penyimpanan sekunder yang pertama dengan kapasitas 5 MB (Mega Byte) (Wahyudi, 2005). Konsep utama peningkatan kapasitas media penyimpanan ini menggunakan konsep magnetisasi magnetik. Bahan-bahan magnetik sekarang ini sangat menarik perhatian karena pengaplikasian dalam penyimpanan informasi digital, seperti pada *hard disk* (Skomski, 2008).

*Hard Disk Drive* (HDD) adalah sebuah media penyimpanan sekunder pada komputer, walaupun sebagai penyimpanan sekunder HDD sangat penting bahkan komputer tidak dapat dijalankan tanpa adanya media penyimpanan ini. Hal ini ditunjukkan dengan kebutuhan software berupa program aplikasi dan data yang diolah membutuhkan media penyimpanan yang sangat besar dan tidak cukup ditampung oleh media penyimpanan utama berupa ROM (*Read only Memory*) dan RAM (*Random Access Memory*) (Wahyudi, 2005).

Sumber magnetisasi pada magnetisasi atomik terdiri atas dua hal, yaitu gerak rotasi orbit elektron mengelilingi inti (momen orbital), dan gerak rotasi elektron (momen spin). Magnetisasi merupakan jumlah dari momen orbital dan momen spin. Interaksi antar momen spin pada bahan dipengaruhi oleh pasangan antar spin atomik. Hal ini didasarkan pada prinsip aturan Hund, bahan dengan pasangan spin elektron yang tidak berpasangan mengakibatkan momen magnet

spin saling meniadakan. Oleh karena itu, jika jumlah spin yang sejajar pada setiap atom bahan besar, maka memiliki momen magnet resultan yang besar.

Sifat-sifat magnetik bahan dibedakan menjadi beberapa jenis (Cullity dan Graham, 2009): diamagnetik, paramagnetik, feromagnetik, antiferomagnetik, ferimagnetik. Diamagnetik merupakan sifat magnetik bahan yang dimiliki oleh bahan cenderung berlawanan arah dengan medan magnet. Bahan feromagnetik, antiferomagnetik, atau ferimagnetik memiliki interaksi atom yang sangat kuat dipengaruhi pada koefisien interaksinya. Jika parameter interaksi positif, semua momen spin memiliki arah yang paralel dengan energi lebih kecil. Bahan feromagnetik pada umumnya memiliki magnetisasi dalam medan yang kecil. Sedangkan, bila konstanta interaksi negatif, momen spin akan mengarah anti-paralel pada energi lebih kecil yang disebut antiferomagnetik. Bahan antiferomagnetik tidak memiliki magnetisasi pada medan yang besar (Kronmuller dan Parkin, 2007).

Feromagnetik pada umumnya terdapat pada bahan Besi (Fe), Kobalt (Co), Nikel (Ni), *Fe alloys*, *Co alloys*, *Ni alloys*, serta beberapa logam bumi. Bahan feromagnetik memiliki beberapa sifat diantaranya: saturasi magnetisasi tinggi, memiliki temperatur Curie, kurva histerisis dan anisotropi magnetik (Kronmuller, *et al.*, 2007). Untuk lebih memahami secara detail sifat-sifat bahan magnetik dan penerapannya pada industri penyimpanan data, model atom magnetik telah dikembangkan metodologi dan komputasionalnya. Sebuah *Hard Disk Drive* (HDD) memasukkan bagian magnetik untuk menyimpan data pada sebuah disk dengan memagnetisasi *disk* menggunakan fluks magnetik yang bocor pada arah celah *disk* untuk menerapkan medan magnet ke *disk* (Yong, *et al.*, 2011).

Bahan nano partikel Besi-Platinum (FePt) memiliki temperatur Curie yang tinggi, magnetik saturasi tinggi dan lebih stabil dari korosi (Sun, *et al.*, 2000). Penelitian sifat-sifat magnetik bahan FePt sebelumnya telah diteliti oleh Bublat dan Goll (2010), You *et al* (2005), Nam *et al* (2012), Irayanti (2016). Penelitian sifat magnetik antara lain temperatur Curie dan nilai koersivitas pada kurva histerisis. You *et al* (2005) telah meneliti koersivitas bahan FePt pada komposisi  $\text{Fe}_{100-x}\text{Pt}_x$  film tipis ( $x= 44, 50, 56, 60, \text{ dan } 65$ ) secara eksperimen dan membuat

kesimpulan adanya pengaruh variasi komposisi bahan terhadap nilai koersivitas yang dihasilkan berdasarkan kurva histerisis. Bublat dan Goll (2010) dan Nam *et al* (2012) juga telah meneliti nilai koersivitas bahan FePt dengan memvariasikan temperatur yang diberikan. Pada hasil penelitian dinyatakan bahwa dengan bertambahnya temperatur maka dihasilkan nilai koersivitas yang lebih kecil. Irayanti (2016) juga telah meneliti secara simulasi bahan FePt untuk dengan memvariasikan komposisi bahan (x) dan ukuran bahan 5 nm dan 25 nm berbentuk *nanocubic*. Pada hasil penelitian dapat disimpulkan komposisi bahan  $Fe_{0,85}Pt_{0,15}$  memiliki nilai temperatur Curie terbesar dengan nilai 700 K, variasi ukuran bahan tidak berpengaruh terhadap temperatur Curie bahan. Bahan dengan temperatur Curie yang tinggi menunjukkan nilai anisotropi yang tinggi.

Temperatur Curie bahan feromagnetik sebelumnya telah diteliti oleh Nazah (2017) dengan menggunakan bahan alloy  $Co_{1-x}Pt_x$ , penelitian dilakukan dengan mengamati perubahan magnetisasi terhadap temperatur melalui metode suseptibilitas magnetik tertinggi. Penelitian menyimpulkan adanya pengaruh bentuk geometri bahan terhadap nilai temperature Curie. Temperatur Curie yang dihasilkan dari bentuk *nanosphere* lebih tinggi daripada bentuk *nanocube*. Hasil tersebut diperoleh berdasarkan fakta bahwa bentuk *cube* memiliki jumlah permukaan atom-atom yang lebih besar dan karenanya menyebabkan bilangan koordinasi menurun.

Berdasarkan penelitian-penelitian diatas, maka dipilih bentuk geometri bahan *nanosphere* dengan ukuran 5 nm. Besarnya temperatur Curie dan anisotropi magnetik mengakibatkan bahan lebih stabil dari temperatur tinggi yang diberikan. Proses pembacaan dan penulisan dalam media perekam magnetik dapat menjadi lebih cepat dan stabil dengan komponen tambahan. Komponen yang dapat diaplikasikan salah satunya bantuan panas atau *heat assisted* dengan menerapkan daya laser. Pengaruh daya laser yang diberikan pada bahan Fe/FePt telah diteliti oleh Evans *et al* (2014), penelitian ini menyimpulkan semakin besar daya laser yang diberikan maka bahan akan mengalami proses demagnetisasi lebih cepat. Sistem yang dapat meningkatkan daya serap bahan feromagnetik adalah *Heat Assisted Magnetic Recording* (HAMR). Besarnya daya serap panas oleh bahan

magnetik sehingga arah pembalikan magnetisasi semakin kecil adalah prinsip dari kapasitas penyimpanan pada sebuah media penyimpanan *Hard Disk Drive* (HDD). Hal inilah yang menjadi tujuan utama penggunaan sistem *Heat Assisted Magnetic Recording* (HAMR). Namun, penelitian-penelitian sebelumnya masih belum mengamati tentang pengaruh daya laser yang diberikan pada bahan FePt terhadap besarnya medan koersivitas pada kurva histerisis.

*Heat Assisted Magnetic Recording* (HAMR) merupakan sistem yang dapat meningkatkan kapasitas penyimpanan *Hard Disk Drive* (HDD). Daya laser digunakan untuk memberikan energi panas pada daerah penyimpanan untuk mengurangi medan koersivitas sebagai faktor utama *heat assisted*. Bahan *recording* memiliki magnetik *anisotropy* yang tinggi, sehingga lebih stabil (Mark, *et al.*, 2008). *Heat Assisted Magnetic Recording* (HAMR) merupakan kata kunci untuk merealisasikan perekam magnetis berkapasitas ultra tinggi. Untuk merealisasikan hal tersebut, bahan magnet dengan nilai anisotropi tinggi diperlukan karena dapat diperkecil hingga orde nanometer tanpa kehilangan sifat magnet akibat suhu. Sehingga harddisk dengan densitas sangat tinggi sampai dengan kapasitas *terabyte* berpeluang untuk diproduksi (Killic, *et al.*, 2012). Mekanisme pengaplikasian sistem HAMR secara umum berupa laser pulsa berdaya tinggi yang diberikan pada *storage cell memory* bahan magnetik sehingga suhu mendekati temperatur Curie (Sadnawanto, 2014).

Metode HAMR dapat diaplikasikan dengan menggunakan simulasi mikromagnetik. Hasil yang diperoleh dari simulasi magnetik diantaranya berupa kurva histerisis dan temperatur Curie dari bahan FePt. Perangkat lunak yang digunakan dalam simulasi mikromagnetik antara lain *Vampire*, *Origin* dan *Pov-Ray*. Program *Vampire* merupakan salah satu program untuk simulasi mikromagnetik dengan model atomistik. *Origin* merupakan salah satu program untuk membuat grafik hasil simulasi data *Vampire*. *Pov-Ray* merupakan salah satu program memvisualisasikan konfigurasi spin magnetik bahan FePt hasil simulasi *Vampire*. Input data yang diperlukan dalam simulasi *Vampire* dijalankan. Input divariasi sehingga didapatkan hasil dari masing-masing variasi yang diberikan.

Pemahaman konsep magnetik bahan yang digunakan dengan pengaruh *Heat Assisted* dibutuhkan dalam simulasi mikromagnetik.

Karakteristik bahan feromagnetik seperti magnetisasi saturasi, konstanta anisotropi konstanta *exchange* menjadi parameter input simulasi mikromagnetik. Hasil running input data dengan program *Vampire* diolah dengan program *Origin* dan *Pov-Ray*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *heat assisted* terhadap medan magnet dan magnetisasi pada kurva hysteresis bahan FePt berbentuk nanosphere dengan variasi *laser pulse power*. Hasil penelitian komputasi dengan pendekatan teori yang ada diharapkan dapat meningkatkan penelitian eksperimen selanjutnya.

### 1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan dalam rangka menganalisis sifat-sifat magnetik bahan FePt di bawah pengaruh *heat assisted*. Adapun permasalahan utama yang akan diselesaikan adalah sebagai berikut :

1. Berapakah temperatur Curie bahan FePt yang ditentukan dengan menggunakan simulasi mikromagnetik?
2. Bagaimanakah sifat magnetik bahan FePt yang dianalisis berdasarkan kurva histerisis menggunakan simulasi mikromagnetik?
3. Bagaimana pengaruh *heat assisted* dengan daya laser terhadap medan koersivitas pada kurva histerisis?

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian sifat-sifat magnetik bahan FePt di bawah pengaruh *heat assisted* menggunakan simulasi mikromagnetik adalah sebagai berikut:

1. Program perangkat lunak simulasi mikromagnetik yang digunakan adalah Vampire (atomistik model).
2. Komposisi bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Fe<sub>0,85</sub>Pt<sub>0,15</sub> berbentuk *nanosphere*.
3. Ukuran geometri bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 5 nm.

4. *Heat Assisted* yang berupa daya laser diaplikasikan untuk melihat pengaruhnya terhadap medan koersivitas.

#### 1.4 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui temperatur Curie bahan FePt yang dianalisis melalui simulasi mikromagnetik.
2. Memperoleh sifat magnetik bahan FePt berdasarkan analisis kurva histeresis yang dihasilkan melalui simulasi mikromagnetik.
3. Mengetahui pengaruh *heat assisted* berupa daya laser yang diberikan pada bahan FePt, terhadap medan koersivitas, yang dianalisis berdasarkan kurva histeresis.

#### 1.5 Manfaat

Manfaat yang dapat diambil dalam penelitian sifat-sifat magnetik bahan FePt dibawah pengaruh *heat assisted* menggunakan simulasi mikromagnetik antara lain dapat mengetahui penerapan bahan FePt untuk media penyimpanan HDD (*Hard Disk Drive*) sebagai aplikasi HAMR (*Heat Assisted Magnetic Material*), menjadi penunjang perkembangan ilmu fisika komputasi serta menjadi acuan tambahan dalam meningkatkan kapasitas penyimpanan HDD (*Hard Disk Drive*) berbasis magnetik.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Kemagnetan Bahan

Momen magnet ( $m$ ) merupakan salah satu besaran vektor dasar kemagnetan yang timbul karena arus loop ( $i$ ), arahnya sejajar dengan medan magnet dan tegak lurus terhadap bidang loop (Buche, 1995). Terdapat 2 sumber munculnya momen magnet yaitu arus dari gerak elektron yang mengorbit inti (momen orbital) dan rotasi elektron (momen spin) (Skomski *et al.*, 2006). Besarnya momen magnet orbital ( $\mathbf{m}_o$ ) dan spin ( $\mathbf{m}_s$ ) dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\mathbf{m}_o = -\frac{e}{2m} \mathbf{L} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{m}_s = -\frac{e}{m} \mathbf{S} \quad (2.2)$$

dimana  $\mathbf{L}$  adalah momentum sudut orbital,  $\mathbf{S}$  adalah momentum sudut spin,  $e$  adalah muatan elektron dan  $m$  adalah massa elektron. Sehingga setiap elektron dalam sebuah atom akan memiliki momentum sudut total  $\mathbf{J}$  yang merupakan resultan vektor dari  $\mathbf{L}$  dan  $\mathbf{S}$  sesuai dengan persamaan berikut (Beiser, 1992).

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S} \quad (2.3)$$

Elektron dalam atom tetap pada umumnya tak berpasangan (spin sejajar) bila memungkinkan. Prinsip ini disebut aturan Hund yang merupakan akibat terpenuhinya sifat magnetik dari Fe, Ni dan Co. Sub-kulit  $3d$  dari bahan tersebut berisi hanya sebagian elektron yang tidak berpasangan sehingga momen magnet spinnya tidak saling meniadakan. Sebagai contoh adalah Fe, lima dari enam elektron kulit  $3d$  dari Fe memiliki spin yang sejajar sehingga setiap atom Fe memiliki momen magnet resultan yang besar (Beiser, 1995).

Magnetisasi (**M**) didefinisikan sebagai jumlah momen magnetik yang terkandung dalam suatu bahan tiap satuan volume atau dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{m}}{V} \quad (2.4)$$

Magnetisasi (**M**) dapat juga disebut sebagai tingkat respon suatu bahan ketika dikenai medan magnet luar (**H**). Adapun hubungan antara magnetisasi (**M**), medan magnetik (**H**) dan induksi magnetik (**B**) dinyatakan sebagai berikut:

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M} \quad (2.5)$$

Ketika suatu bahan feromagnetik dikenai medan magnet, magnetisasi akan selalu meningkat hingga tercapai pada nilai **H** tertentu akan meningkat secara perlahan. Pada keadaan inilah magnetisasi bahan dikatakan tersaturisasi sehingga momen magnet dalam bahan memiliki arah yang sejajar terhadap medan magnet luar **H**. Nilai magnetisasi pada keadaan ini disebut dengan saturasi magnetisasi (**M<sub>s</sub>**) (Aji, 2011).

Menurut Tipler (2001), bahan magnetik memiliki beberapa klasifikasi untuk membedakan sifat-sifat magnetiknya, salah satunya adalah nilai suseptibilitas. Jenis-jenis bahan magnetik menurut nilai suseptibilitas yang dimiliki adalah sebagai berikut:

1. Diamagnetik

Bahan diamagnetik merupakan bahan yang memiliki nilai suseptibilitas negatif dan sangat kecil. Sifat diamagnetik ditemukan oleh Faraday dan pada tahun 1846 ketika sekeping bismuth ditolak oleh kedua kutub magnet, hal ini memperlihatkan bahwa medan induksi dari magnet tersebut menginduksi momen magnetik bismuth pada arah yang berlawanan dengan medan induksi pada magnet.

2. Paramagnetik

Bahan paramagnetik adalah bahan-bahan yang memiliki susptibilitas magnetik  $\chi_m$  positif dan sangat kecil. Paramagnetik muncul dalam bahan yang

atom-atomnya memiliki momen magnetik permanen yang berinteraksi sangat lemah satu sama lain. Apabila tidak terdapat medan magnet luar, momen magnetik ini akan berorientasi acak. Dengan daya medan magnetik luar, momen magnetik ini arahnya cenderung sejajar dengan medannya, tetapi ini dilawan oleh kecenderungan momen untuk berorientasi acak akibat gerakan termalnya.

### 3. Feromagnetik

Feromagnetik merupakan bahan yang memiliki suseptibilitas magnetik  $\chi_m$  positif dan sangat tinggi. Dalam bahan ini sejumlah kecil medan magneti luar dapat menyebabkan derajat penyearahan yang tinggi pada momen dipol magnetik atomnya. Dalam beberapa kasus, penyearahan ini dapat bertahan sekalipun medan pemagnetannya telah hilang. Ini terjadi karena momen dipol magnetik atom dari bahan-bahan feromagnetik mengarahkan gaya-gaya yang kuat pada atom tetangganya sehingga dalam daerah ruang yang sempit momen ini disearahkan satu sama lain sekalipun medan luarnya tidak ada lagi. Feromagnetik muncul dibawah suatu temperatur pasti yang dikenal sebagai temperatur transisi atau temperatur Curie. Temperatur Curie adalah suatu temperatur dimana suatu bahan feromagnetik akan mengalami perubahan menjadi bahan paramagnetik. Apabila suhunya berada diatas suhu curienya, maka bahan tersebut bersifat paramagnetik. Pada daerah ini, suseptibilitas diberikan oleh persamaan :

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad (2.6)$$

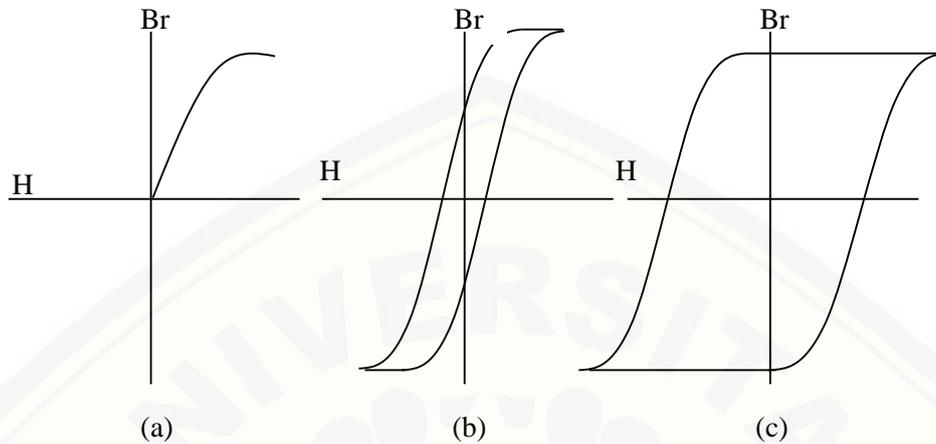
Dimana  $\chi$  adalah suseptibilitas, C adalah konstanta Curie dan  $T_c$  adalah temperatur Curie (Safari, 2008).

## 2.2 Sifat-sifat Bahan Feromagnetik

### 2.2.1 Kurva Histerisis

Magnet biasanya dibagi atas dua kelompok: magnet *lunak* dan magnet *keras*. Magnet keras dapat menarik bahan lain yang bersifat magnet. Selain itu sifat kemagnetannya dapat dianggap cukup kekal. Magnet lunak dapat bersifat magnetik dan dapat menarik magnet lainnya, namun hanya berada dalam medan magnet. Sifat kemagnetannya tidak kekal. Perbedaan antara magnet permanen

atau magnet keras dan magnet lunak dapat dilakukan dengan menggunakan loop histerisis yang telah dikenal seperti pada Gambar 2.1 (Van dan Lawrence, 2001).



Gambar 2.1 Kurva magnetisasi (a) induksi awal  $B$  terhadap medan magnet  $H$ , (b) loop histerisis (magnet lunak), (c) loop histerisis (magnet keras). Baik induksi remanen (rapat fluks) dan medan koersivitas,  $B$  dan  $-H_c$ , masing-masing, besar untuk magnet keras. Hasil perkalian  $B$  dan  $H$  merupakan acuan ukuran energi demagnetisasi (Van dan Lawrence, 2001)

Penurunan kembali yang hampir sempurna terjadi pada magnet lunak jika medan magnet ditiadakan. Medan magnet bolak-balik akan menghasilkan kurva simetris di kuadran tiga. Kurva histerisis magnet permanen sangat berbeda, bila medan magnet ditiadakan, induksi tersisa akan menghasilkan induksi remanen,  $B_r$ . Medan yang berlawanan yang disebut medan koersivitas,  $-H_c$ , diperlukan sebelum induksi turun menjadi nol, sama dengan magnet lunak loop tertutup, akan tetapi magnet permanen memiliki simetri  $180^\circ$ .

Karena hasil kali medan magnet ( $A/m$ ) dan induksi ( $V \cdot \text{det}/m^2$ ) merupakan energi persatuan volume, luas daerah hasil integrasi di dalam loop histerisis adalah sama dengan energi yang diperlukan untuk satu siklus magnetisasi mulai dari nol sampai  $+H$  hingga  $-H$  sampai nol. Energi yang dibutuhkan magnet lunak dapat diabaikan, akan tetapi magnet permanen memerlukan energi lebih banyak sehingga pada kondisi ruang demagnetisasi dapat diabaikan. Dikatakan magnetisasi permanen.

Magnet permanen dapat diberi indeks berdasarkan medan koersivitas yang diperlukan untuk menghilangkan induksi. Acuan ukuran yang lebih baik adalah hasil kali B dan H. Hasil kali sesaat B dan H maksimum lebih sering digunakan karena merupakan barrier energi kritis yang harus dilampaui. Magnet lunak merupakan pilihan tepat untuk penggunaan pada arus bolak-balik atau frekuensi tinggi, karena harus mengalami magnetisasi dan demagnetisasi berulang kali selama selang satu detik. Spesifikasi yang agak kritis untuk magnet lunak adalah induksi jenuh (tinggi), medan koersivitas (rendah) dan permeabilitas maksimum (tinggi) (Van dan Lawrence, 2001).

Koersivitas digunakan untuk membedakan *hard magnet* atau *soft magnet*. Semakin besar gaya koersivitasnya maka akan semakin keras sifat magnetnya. Bahan dengan koersivitas tinggi berarti tidak mudah hilang kemagnetannya. Untuk menghilangkan kemagnetan bahan diperlukan intensitas magnet H yang besar. Tidak seperti bahan *soft magnet* yang mempunyai medan magnet B sebesar  $\mu_0 M$ , dalam magnet permanen, magnetisasi bukan merupakan fungsi linier yang sederhana dari rapat fluks karena nilai dari medan magnet H yang digunakan dalam magnet permanen secara umum jauh lebih besar daripada dalam bahan *soft magnet*.

Remanen atau ketertambatan adalah sisa medan magnet B dalam proses magnetisasi pada saat medan magnet H dihilangkan, atau remenensi terjadi pada saat intensitas medan magnetik H berharga nol dan medan magnet B menunjukkan harga tertentu. Bagaimanapun juga koersivitas pada magnet permanen akan menjadi kecil jika remenensi dalam magnetisasi juga kecil. Oleh karena itu, besar nilai remenensi yang dikombinasikan dengan besar koersivitas menjadi sangat penting. Saturasi magnetisasi adalah keadaan dimana terjadi kejenuhan, nilai medan magnet B akan selalu konstan walaupun medan luar H dinaikkan terus-menerus. Remenensi bergantung pada saturasi magnetisasi. Untuk magnet permanen saturasi magnetisasi seharusnya lebih besar daripada *soft magnet* (Anwar, 2011).

### 2.2.2 Anisotropi Magnetik

Anisotropi magnetik merupakan parameter kunci dari suatu bahan magnetik. Ini adalah manifestasi relativistik kopling antara spin elektron dan momen orbital (spin-orbit kopling). Oleh karena itu, modifikasi dalam struktur elektronik dipermukaan dan antarmuka diharapkan akan mengakibatkan perubahan anisotropi magnetik. Efek antar muka lokal ini dapat menimbulkan perilaku magnetik yang mencolok dalam lapisan tipis magnetik, seperti antarmuka induksi anisotropi magnetik tegak lurus, yang pertama ditampilkan secara eksperimental oleh Gradmann dan Mu'ller pada lapisan tipis Ni<sub>48</sub>Fe<sub>52</sub> (1 1 1).

Ketergantungan suhu dari anisotropi magnetik merupakan aspek penting dari perilaku sistem magnetik dan telah dipelajari secara luas dalam sistem lapisan tipis. Dalam konteks model tunggal interaksi pasangan ion, hubungan antara anisotropi magnetik terhadap temperatur dan magnetisasi pada suhu rendah didapatkan sebagai berikut :

$$K_l(T)/K_l(0) = [M_s(T)/M_s(0)]^{l(l+1)/2} \quad (2.7)$$

dengan  $K_l(T)$  adalah koefisien anisotropi yang mempengaruhi ekspansi energy magnetik. Begitu pula ketergantungan suhu dengan anisotropi magnetik dihubungkan melalui persamaan sebagai berikut :

$$A_l(T)/A_l(0) = [M_s(T)/M_s(0)]^{l(l+1)/2} \quad (2.8)$$

suhu mendekati suhu kritis, eksponen dalam persamaan tersebut diharapkan akan sama dengan  $l$  (Mansuripur dan Connel, 1984).

### 2.2.3 Interaksi Pertukaran (*Exchange Interaction*)

Momen magnet dan magnetisasi muncul oleh karena interaksi tukar antar elektron atau *exchange interaction*. Bentuk interaksi tukar ini muncul dari peristiwa berikut, pada dua atom yang berdekatan, elektron 1 mengorbit proton 1, dan elektron 2 mengorbit proton 2. Dalam hal ini electron merupakan partikel takterbedakan dan memungkinkan kedua elektron tersebut bertukar tempat sehingga elektron 1 mengorbit proton 2 dan begitu sebaliknya. Pengandaian ini

memunculkan keberadaan bentuk *exchange energy* yang merupakan bagian penting dari energi total dari banyak molekul didalam benda padat. Heisenberg menunjukkan bahwa *exchange energy* juga berperan dalam bahan ferromagnetik. Jika terdapat dua atom  $i$  dan  $j$  memiliki momentum sudut spin  $S_i h/2\pi$  dan  $S_j h/2\pi$ , maka *exchage energy* antara kedua atom tersebut dinyatakan sebagai berikut (Cullity dan Graham, 2008) :

$$E_{ex} = -2J_{ex} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j = -2J_{ex} S_i S_j \cos\theta \quad (2.9)$$

dengan  $J_{ex}$  merupakan *exchange integral* dan  $\theta$  adalah sudut antara kedua spin tersebut. Jika  $J_{ex}$  positif, maka  $E_{ex}$  bernilai minimum ketika kedua spin sejajar dan maksimum ketika kedua spin tersebut berlawanan arah. Jika  $J_{ex}$  negatif, keadaan energi terendah jika kedua spin berlawanan arah (Cullity dan Graham, 2008). Dengan mengasumsikan sudut antar momen yang berdekatan sangat kecil, maka bentuk ekspansi deret Taylor untuk persamaan diatas menjadi persamaan berikut (Purnama, 2009) :

$$E_{ex} = -2J S_i \cdot S_j \left( 1 - \frac{1}{2} \theta^2 \right) \quad (2.10)$$

#### 2.2.4 Kebergantungan Magnetisasi terhadap Suhu

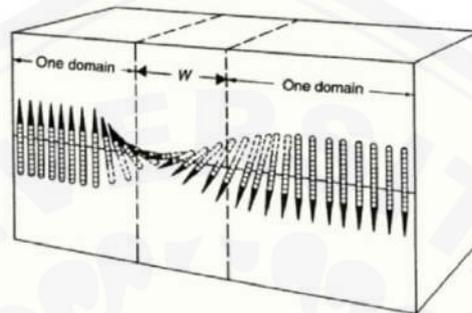
Besarnya saturasi magnetik ( $M_s$ ) sangat bergantung terhadap suhu. Seiring dengan peningkatan suhu, maka nilai  $M_s$  akan berkurang. Kebergantungan saturasi  $M_s$  terhadap suhu ( $T$ ) dinyatakan melalui persamaan:

$$M_s(T) = M_s^{(0)} \left( 1 - \frac{T}{T_c} \right)^\nu \quad (2.11)$$

Dengan  $M_s(T)$  adalah nilai magnetisasi saat bersuhu  $T$ ,  $M_s^{(0)}$  adalah nilai magnetisasi saat suhu 0 K,  $\nu$  merupakan parameter bloch dan  $T_c$  adalah suhu *curie*, yaitu suhu pada saat nilai magnetisasi suatu bahan bernilai 0 (orientasi magnetisasi acak dan saling meniadakan) (Maaz, *et al.*, 2002).

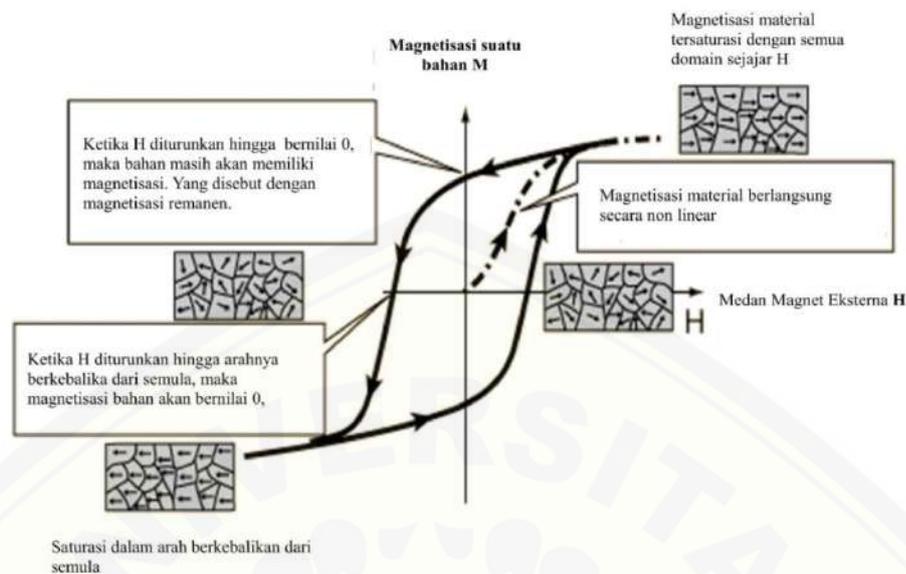
### 2.3 Domain dan Dinding Domain

Suatu wilayah di dalam bahan magnetik yang memiliki orientasi magnetisasi seragam disebut dengan Domain. Domain juga dapat diartikan sebagai wilayah yang tersusun atas banyak momen magnet yang memiliki arah yang sama. Ilustrasi dinding domain dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut:



Gambar 2.2 Dinding domain membatasi dua domain yang berbeda arah (Buschow dan De Boer, 2003)

Proses magnetisasi suatu bahan saat dikenai medan magnet eksternal dapat diilustrasikan pada Gambar 2.3. Bahan mula-mula dalam kondisi acak (arah domain-domain penyusun acak). Setelah bahan dikenakan medan magnet eksternal  $H$  ke arah positif, maka bahan akan termagnetisasi secara non-linear hingga seluruh domain searah  $H$ . Pada kondisi ini bahan dikatakan dalam keadaan tersaturasi. Setelah  $H$  diturunkan hingga bernilai 0, maka bahan masih akan memiliki nilai magnetisasi tertentu yang disebut dengan magnetisasi remanen. Ketika  $H$  diturunkan hingga arahnya berkebalikan, maka magnetisasi akan bernilai 0, yang ditandai dengan keacakan domain-domain penyusun. Ketika  $H$  terus-menerus diturunkan dalam arah kebalikan, maka bahan akan termagnetisasi hingga searah  $H$ . Pada kondisi ini bahan dikatakan dalam keadaan tersaturasi arah kebalikan (Young, 1992).



Gambar 2.3 Proses magnetisasi suatu bahan selama dikenai medan luar  $H$  (Young, 1992)

Bahan magnetik yang besar dapat pecah menjadi domain yang kecil akibat energi magnetostatik atau disebut dengan energi demagnetisasi. Medan demagnetisasi selalu berlawanan dengan magnetisasi pada partikel magnetik. Pada masing-masing domain, semua arah momen magnetik sama saat magnetisasi masing-masing domain memiliki sumbu yang berbeda yang terdapat pada dinding domain antara domain-domain. Energi dari dinding domain terdiri dari energi *exchange* dan energi anisotropi di dinding. Ketika ukuran bahan magnetik kecil, struktur domain tidak dapat didukung karena energi pada dinding domain. Begitu pula partikel yang disebut partikel single domain yang memiliki anisotropi dan magnetisasi saturasi yang tinggi. Ukuran kritis dari partikel single domain menentukan kompetisi antara energi magnetostatik yang dipengaruhi oleh magnetisasi saturasi dan energi dinding domain. Partikel single domain ideal untuk media penyimpanan magnetik karena kestabilan termal mereka (Fan, 2013).

#### 2.4 Dinamika Magnetisasi

Saat medan magnetik efektif  $H_{eff}$  dikenakan pada suatu momen magnetik  $\mathbf{m}$ , maka momen magnetik ini akan mengalami momen gaya  $\boldsymbol{\tau}$  sedemikian hingga orientasi  $\mathbf{m}$  menjadi searah dengan  $H_{eff}$ . Momen gaya ini dinyatakan dengan:

$$\tau = m \times H_{eff} \quad (2.12)$$

Sedangkan momen gaya juga dapat dinyatakan sebagai perubahan momentum sudut terhadap waktu:

$$\tau = \frac{dL}{dt} \quad (2.13)$$

Menurut teori kuantum, hubungan antara momen magnetik dengan somentum sudut dinyatakan :

$$m = -\gamma L \quad (2.14)$$

dengan  $\gamma$  adalah rasio gyromagnetik. Sehingga persamaan momen gaya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$-\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{m}{\gamma} \right) = m \times H_{eff} \quad (2.15)$$

Persamaan ini menyatakan presisi gyromagnetik dari suatu momen magnetik. Untuk mendeskripsikan gerak momen magnetik menuju kesetimbangan maka keberadaan efek redaman perlu diperhitungkan dalam penghitungan medan  $H_{eff}$ . Efek redaman ini sebanding dengan kecepatan,  $\eta \frac{\partial m}{\partial t}$ , dengan  $\eta$  adalah konstanta positif. Dengan melibatkan efek redaman, persamaan (2.15) dinyatakan sebagai berikut

$$-\frac{1}{\gamma} \frac{\partial m}{\partial t} = m \times \left( H_{eff} - \eta \frac{\partial m}{\partial t} \right) \quad (2.16)$$

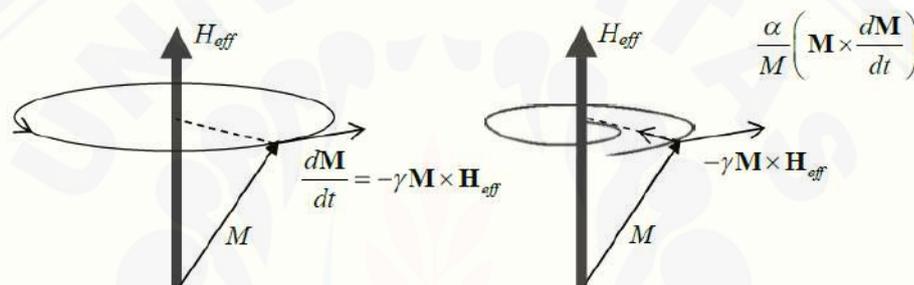
Dengan menyatakan  $-\gamma\eta m$  sebagai konstanta redaman Gilbert  $\alpha$ , bentuk lain dari persamaan gerak diatas adalah (Schrefl, *et al.*, 2006):

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -\gamma M \times H_{eff} + \frac{\alpha}{m} M \times \frac{\partial m}{\partial t} \quad (2.17)$$

Persamaan (2.15) juga dapat dinyatakan dalam bentuk magnetisasi :

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (2.18)$$

Persamaan (2.16) ini dikenal sebagai persamaan Landau-Lifshitz Gilbert (LLG). Suku pertama pada persamaan (2.16) menyatakan bentuk gerak gyromagnetik dan suku kedua menyatakan bentuk redaman yang menyebabkan momen magnet bergerak ke arah medan H. Ilustrasi gerak presisi dari magnetisasi dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut:



Gambar 2.4 Gerak presisi dari magnetisasi  $\mathbf{M}$  dibawah pengaruh medan magnet  $H_{eff}$   
(a)  $\alpha = 0$ , (b)  $\alpha \ll 1$  (Purnama, 2009)

Untuk medan magnetostatik ( $H_D$ ), energi demagnetisasi diberikan oleh persamaan berikut :

$$w_H = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_D \quad (2.19)$$

$H_{eff}$  didefinisikan sebagai turunan dari rapat energi ( $w$ ) terhadap  $\mathbf{M}$  :

$$H_{eff} = -\frac{\delta w}{\delta \mathbf{M}} \quad (2.20)$$

Interaksi di dalam proses ini dinyatakan bukan sebagai interaksi antar partikel dalam skala atomik, namun ditinjau secara makroskopik dalam bentuk rapat energi ( $w$ ). Energi total ( $E$ ) didefinisikan sebagai berikut :

$$E = \int w dv \quad (2.21)$$

Dalam kondisi kesetimbangan,  $w$  bernilai minimum. Interaksi antara energi

pertukaran  $w_{ex}$  dengan energi magnetostatis  $w_H$  memunculkan suatu besaran yang disebut dengan *exchange length* ( $L_{ex}$ ) (Stanescu, 2003 dan Zhu, 2005). Besaran ini merepresentasikan daerah batas ( $A$ ) dengan magnetisasi ( $M_s$ ) tidak mengalami perubahan secara signifikan.

$$L_{ex} = \sqrt{\frac{A}{M_s^2}} \quad (2.22)$$

## 2.5 Kestabilan Termal

Ketika suatu bahan magnetik dipatren hingga ukuran nanometer, maka ketika berada pada suhu ruang, orientasi magnetisasi  $M$  menjadi tidak stabil (Skomski, 2007 dan Matsumoto, *et al.*, 2006). Oleh karena itu diperlukan energi barrier ( $\Delta E$ ) yang besar guna menjaga kestabilan termal.  $\Delta E$  ini dipengaruhi oleh besarnya medan  $H$ . Kebergantungan  $\Delta E$  terhadap  $H$  dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\Delta E = K_0 V_0 \left( 1 - \frac{H}{H_0} \right)^2 \quad (2.23)$$

dengan  $K_0$ ,  $V_0$  dan  $H_0$  mendeskripsikan struktur dari bahan magnetik. Secara umum, kestabilan termal dari bahan magnetik dinyatakan oleh hukum Neel-Brown :

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (2.24)$$

Dengan nilai  $\tau_0 \approx 10^{-10} s$ . Persamaan tersebut juga dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\Delta E = k_B T \ln\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) \quad (2.25)$$

Jika sebuah HDD diasumsikan mampu menyimpan data selama 10 tahun,  $\tau \approx 10 \text{ years}$  ( $10^8 s$ ), maka besarnya  $\Delta E$  pada suhu ruang yang diperlukan untuk menjaga kestabilan termal harus lebih besar dari  $40k_B T$  (Schrefl, *et al.*, 2006).

## 2.6 Metode Monte Carlo

Metode Monte Carlo adalah metode yang memanfaatkan bilangan acak untuk melakukan simulasi suatu sistem fisika komputasi yang sulit diselesaikan secara analitik. Metode ini terdiri dari logaritma-logaritma yang dapat digunakan untuk visualisasi magnetisasi pada suatu bahan magnetik (Newmann, 1999).

Algoritma Metropolis Monte Carlo digunakan untuk mengetahui energi sistem fisik dalam kondisi equilibrium. Sifat-sifat equilibrium pada bahan magnetik salah satunya seperti magnetisasi yang dipengaruhi oleh temperatur. Metode ini dapat digunakan untuk simulasi efek temperatur dimana dinamika tidak dibutuhkan pada equilibrium dan implementasi relatif mudah. Suatu spin  $i$  yang memiliki arah  $S_i$  mengganti arahnya secara acak pada arah baru  $S_i'$  yang disebut dengan trial move. Perubahan energi dari arah awal ke arah *trial move* dinyatakan dalam persamaan:

$$\Delta E = E(S_i') - E(S_i) \quad (2.26)$$

Sehingga probabilitas dari *trial move*:

$$P = \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (2.27)$$

dalam interval 0 hingga 1 (Evans, *et al.*, 2014).

## 2.7 Metode Heun

Metode Heun merupakan modifikasi dari metode Euler untuk penentuan arah spin  $S'_i$  dan medan efektif  $H'_{eff}$  dengan persamaan *predictor*:

$$S'_i = S_i + \Delta S \Delta t \quad (2.28)$$

dengan  $\Delta S$  :

$$\Delta S = \frac{\gamma}{(1 + \lambda^2)} [S'_i \times H'_{eff} + \lambda S_i (S_i \times H'_{eff})] \quad (2.29)$$

Untuk menentukan posisi spin yang diprediksi pada persamaan (2.28) dengan

perubahan medan efektif  $H'_{eff}$  yang difungsikan sebagai *corrector*, maka digunakan persamaan :

$$S_i^{t+\Delta t} = S_i + \frac{1}{2}(\Delta S + \Delta S')\Delta t \quad (2.30)$$

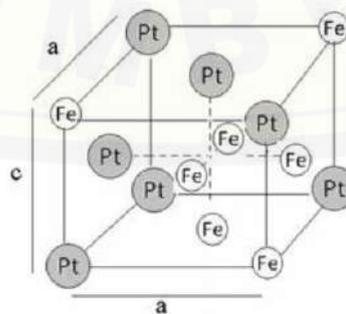
dimana  $\Delta S'$  :

$$\Delta S' = -\frac{\gamma}{(1 + \lambda^2)} [S'_i \times H'_{eff} + \lambda S'_i (S_i \times H'_{eff})] \quad (2.31)$$

dimana  $\gamma$  adalah *gyromagnetic ratio*,  $\lambda$  adalah *microscopic damping* dan  $H'_{eff}$  adalah total medan magnet. *Predictor* dari integrasi ini ditunjukkan pada setiap spin sebelum proses evaluasi dari *corrector* untuk setiap spin dengan pengulangan beberapa kali sehingga perubahan waktu dapat disimulasikan (Evans, *et al.*, 2013).

## 2.8 Bahan FePt

Bahan *alloy* FePt merupakan bahan yang menerima banyak perhatian komunitas riset magnetik baik dalam bulk dan bentuk film tipis karena memiliki *magnetocrystalline* anisotropi yang sangat tinggi sekitar  $10^7$  joule/m<sup>3</sup>. Karena anisotropi yang tinggi maka koersivitas yang dihasilkan akan tinggi dan memiliki stabilitas yang baik dalam ketahanan korosi dan berpotensi diaplikasikan dalam media penyimpanan magnetik (Evans, 2008 dan Xing, *et al.*, 2006). Bahan FePt memiliki struktur kristal *Face Centered Cubic* (FCC) pada temperatur tinggi (Xing *et al.*, 2006).



Gambar 2.5 Struktur atom FCC besi-platinum FePt dengan  $a=c= 0,376$  nm (Sumber: Bakhshayeshi, *et al.*, 2013)

Penelitian bahan FePt sebelumnya telah diteliti oleh beberapa peneliti diantaranya Bublat dan Goll (2010) meneliti medan koersivitas berdasarkan kurva histerisis bahan FePt dengan variasi komposisi dan temperatur yang diberikan. Hong *et al* (1998) dan You *et al* (2005) meneliti variasi komposisi yang diberikan pada bahan FePt yang menghasilkan medan koersivitas meningkat dan menurun seiring dengan variasi komposisi bahan, dan Nam *et al* (2012) meneliti pengaruh variasi temperatur terhadap nilai koersivitas dari kurva histerisis yang dihasilkan. Nam menggunakan komposisi bahan Fe<sub>45</sub>Pt<sub>55</sub> dengan variasi temperatur 2 K, 200 K dan 300 K. Penelitian Nam menghasilkan nilai koersivitas sebesar 1,35 T pada temperatur 2 K dan 0,9 T pada temperatur 300 K. Berdasarkan penelitian tersebut, nilai koersivitas akan semakin kecil seiring dengan penambahan temperatur yang diberikan.

## 2.9 Heat Assisted Magnetic Recording (HAMR)

HAMR merupakan suatu teknologi dalam merekam data secara magnetik pada media dengan stabilitas yang tinggi seperti campuran Fe/Pt dengan bantuan panas laser. Skema HAMR ditunjukkan pada Gambar 2.6. Teknologi ini secara umum tersusun atas media penyimpanan yang dinamis dan dilewatkan pada suatu *head* yang berfungsi untuk menulis dan membaca informasi. Panas laser dikenakan pada media tersebut guna menurunkan medan penulisan. Pada tahun 2005, HDD yang ada di pasaran memiliki kerapatan sekitar 130 Gbit/in<sup>2</sup>. Sejak tahun 1990, kerapatan dari aplikasi ini meningkat dari tahun ke tahun hingga 100%, namun mengalami penurunan sejak tahun 2002 (Matsumoto, *et al.*, 2006). Hal ini disebabkan karena permasalahan tingginya medan yang diperlukan dalam penulisan informasi sehubungan dengan penggunaan bahan dengan anisotropi kuat dalam rangka menjaga kestabilan termal. Pengaruh daya laser yang diberikan terhadap suatu bahan sebelumnya telah diteliti oleh Evans *et al* (2014) yang menyatakan semakin besar daya laser maka akan semakin cepat proses demagnetisasi oleh bahan tersebut. Adapun persamaan dinamika demagnetisasi ( $m$ ) yang digunakan adalah:

$$m(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.32)$$

dimana  $\tau$  adalah konstanta demagnetisasi,  $t$  adalah waktu dan  $A$  adalah konstanta parameter (Evans, *et al.*, 2014).

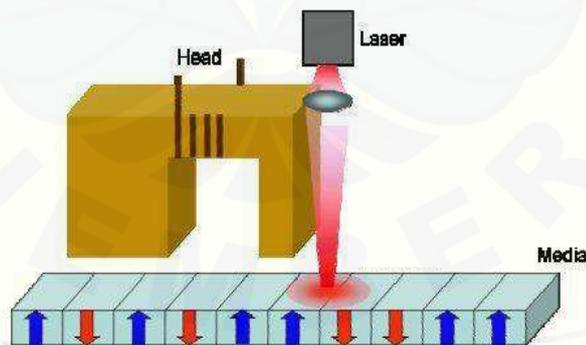
Tahun 1879, Joseph Stefan melakukan eksperimen untuk mengetahui karakter universal dari radiasi benda hitam. Ia menemukan bahwa daya total per satuan luas yang dipancarkan pada semua frekuensi oleh suatu benda hitam panas (intensitas total) adalah sebanding dengan pangkat empat dari suhu mutlaknya. Sehingga dirumuskan:

$$I = \sigma T^4 \quad (2.33)$$

dengan  $I$  adalah intensitas radiasi,  $T$  adalah suhu mutlak, dan  $\sigma$  merupakan tetapan Stefan-Boltzman bernilai  $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ . Intensitas merupakan daya per satuan luas, maka persamaan di atas dapat ditulis :

$$P = e\sigma AT^4 \quad (2.34)$$

dengan  $P$  merupakan daya radiasi (W) dan  $e$  adalah emisivitas bahan ( $e=1$ ) (Hafid, 2014).



Gambar 2.6 Konsep HAMR (Sumber: William *et al.*, 2003)

Keberadaan HAMR menjadi salah satu solusi untuk terus dapat meningkatkan kerapatan dari HDD tanpa mengorbankan permasalahan kestabilan termal. Bahkan salah satu perusahaan pengembang HDD, Seagate, meyakini bahwa teknologi ini mampu memproduksi HDD berkapasitas 37,5 terabit.

## BAB 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Fisika Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember. Penelitian dilaksanakan mulai Bulan November 2018 sampai Bulan Mei 2019. Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Komputer

Prosesor	:Intel (R) Core (TM) i5-3470 CPU @ 3.20GHz 3.60GHz
Installed memory (RAM)	:4.00 GB
System type	:64-bit
OS	: <i>Windows</i>

2. Program aplikasi yang digunakan dalam simulasi antara lain:

- a. *Vampire-4.0* untuk me-running input data simulasi mikromagnetik berbasis model atomik.
- b. *OriginPro 2017* untuk membuat grafik hasil pengolahan data simulasi.
- c. *Pov-Ray* untuk memvisualisasikan konfigurasi spin magnetik hasil simulasi bahan FePt
- d. *Cygwin* untuk konversi format file cfg menjadi file povray yang selanjutnya dapat divisualisasikan.
- e. *Notepad++* untuk menulis atau mengedit data input simulasi.

Penelitian dirancang secara garis besar diawali dengan identifikasi permasalahan kemudian dilakukan kajian pustaka guna mendapatkan parameter-parameter simulasi sesuai permasalahan. Setelah itu ditentukan variabel penelitian. Parameter yang telah ditemukan kemudian disusun menjadi script dan disimulasikan dengan program *Vampire 4.0*. data hasil simulasi kemudian diolah menjadi data akhir dengan program *Origin* sehingga data dapat dianalisis dan disimpulkan.

### 3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis data dalam penelitian ini dilakukan dengan pengolahan data secara kuantitatif. Data yang akan diambil berupa suatu angka kuantitatif yang dapat diukur dan memiliki besaran atau nilai dengan satuan tertentu. Sumber data dalam penelitian ini berupa data sekunder yang diperoleh dari kajian pustaka. Penelitian dilakukan dengan pengolahan data sekunder menjadi data akhir. Sumber data parameter yang digunakan dalam simulasi antara lain magnetisasi saturasi ( $M_s$ ), konstanta *exchange*  $A$ , momen spin atomik dan konstanta anisotropi  $K$  sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 3.1:

Tabel 3.1 Parameter bahan Fe, Pt dan FePt yang digunakan dalam simulasi mikromagnetik

Parameter bahan	Nilai
Energi <i>Exchange</i> $J_{ij}$	
Material Besi (Fe) <sup>1</sup>	$3,028 \times 10^{-21}$ J/m
Material Platinum (Pt) <sup>1</sup>	$1,602 \times 10^{-23}$ J/m
Material FePt <sup>2</sup>	$3,0 \times 10^{-21}$ J/m
Momen atom spin	
Material Besi (Fe) <sup>2</sup>	$2,22 \mu\text{B/atom}$
Material Platinum (Pt) <sup>3</sup>	$0,35 \mu\text{B/atom}$
Energi Anisotropi $K$	
Material FePt <sup>2</sup>	$1,0 \times 10^{-23}$ J/atom
Unit Sel	
Material FePt <sup>3</sup>	$3,76 \text{ \AA}$

Sumber: <sup>1</sup>Bazerra-Neto *et al* (2013),  
<sup>2</sup>Evan *et al* (2013),  
<sup>3</sup>Bakhshayeshi *et al* (2013).

Tabel 3.2 Komposisi bahan, ukuran geometri, variasi suhu dan variasi daya laser

Atribut Simulasi	Komposisi, Ukuran dan Variasi	Satuan
Komposisi bahan <sup>1</sup>	$\text{Fe}_{0,85}\text{Pt}_{0,15}$	-
Ukuran geometri	5	nm
Suhu <sup>2</sup>	0, 298, 318, 339	Kelvin
Daya Laser	0; 0,008; 0,012; 0,016; 0,022; 0,026	Watt

Sumber: <sup>1</sup>Irayanti (2016)  
<sup>2</sup>Dewi *et al* (2013).

### 3.3 Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukuran

Variabel-variabel dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Variabel Bebas

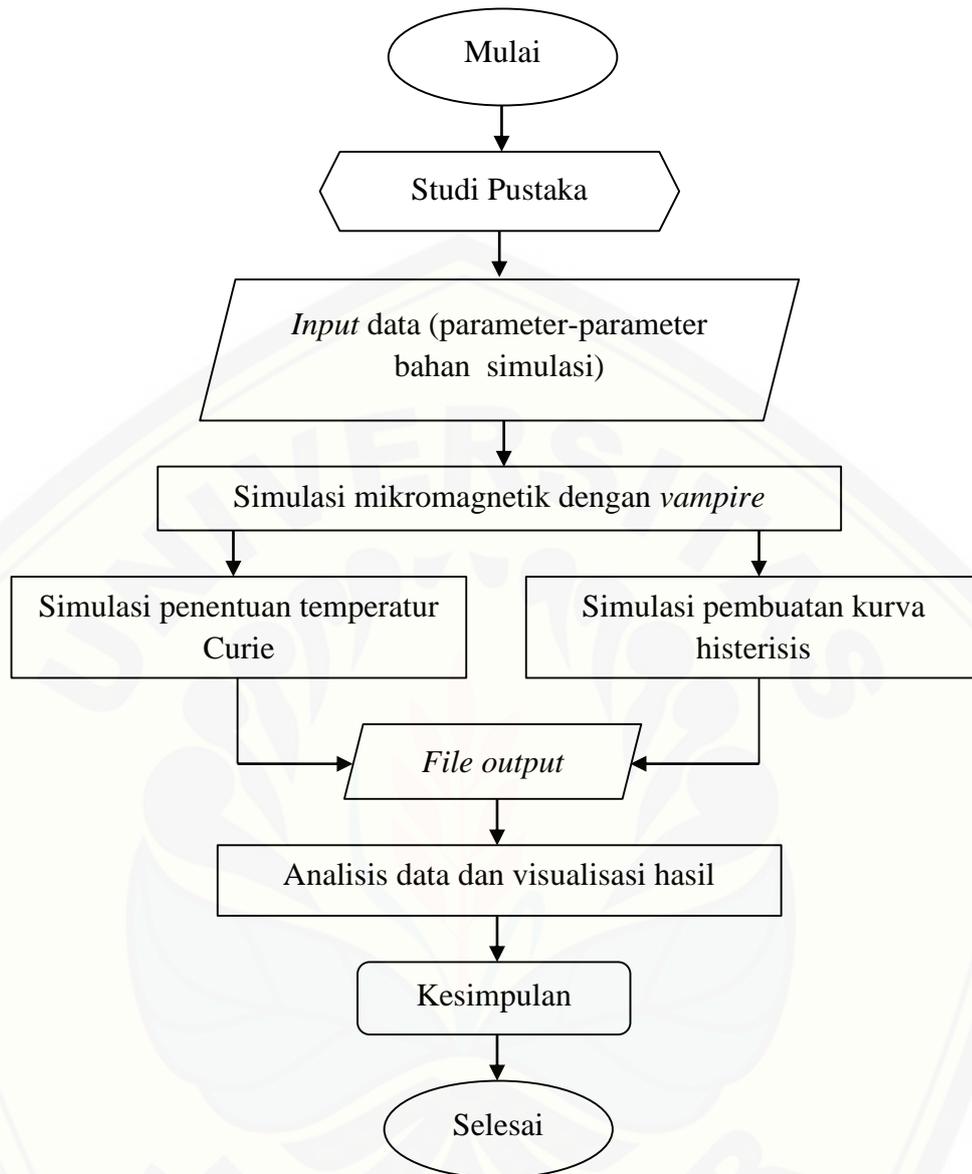
Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi suhu 0 K, 298 K, 318 K, 339 K dan variasi daya laser 0 W, 0,008 W, 0,012 W, 0,016 W, 0,022 W, 0,026 W. Variasi pada variabel bebas akan menghasilkan perbandingan hasil data variabel terikat.

2. Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah medan koersivitas ( $H_c$ ) dan medan saturasi ( $H_s$ ) pada kurva histerisis diperoleh dengan program *Origin*.

### 3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah menganalisis sifat magnetik dari bahan FePt di bawah pengaruh *heat assisted*. Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut, beberapa tahapan simulasi dilakukan. Prosedur simulasi diawali dengan mengidentifikasi parameter bahan yang menjadi data *input* dari simulasi. Berdasarkan data tersebut, kegiatan simulasi dilakukan dalam rangka mendapatkan data-data guna keperluan analisis sifat magnetik bahan. Analisis dilakukan terhadap data hasil *running program* yang divisualisasikan dalam bentuk grafik. Grafik yang dihasilkan nantinya digunakan sebagai bahan diskusi untuk mendapatkan solusi dari permasalahan yang ditentukan. Secara garis besar, tahapan penyelesaian masalah penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

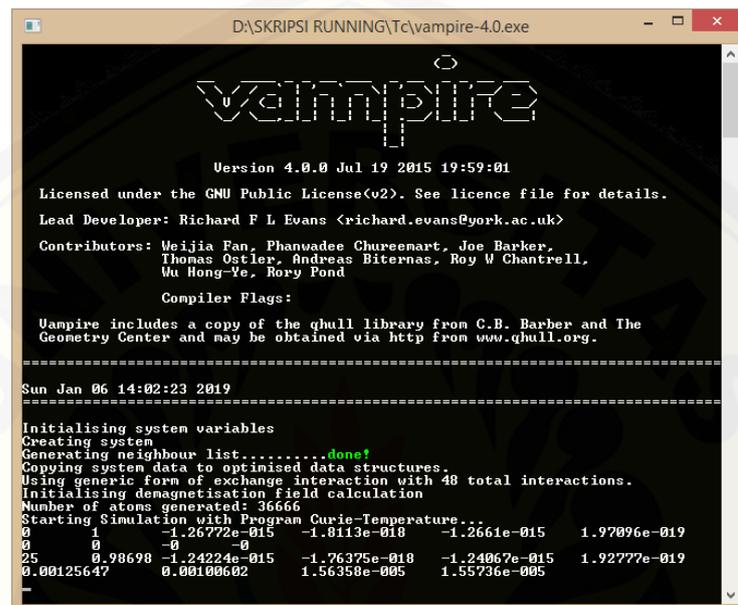
#### 3.4.1 Langkah Kerja

Langkah kerja dalam penelitian ini terdiri dari:

##### 1. Simulasi dengan program *Vampire 4.0*

Simulasi program *vampire 4.0* dilakukan dengan membuat file *.dat* dari parameter-parameter bahan FePt dan sebelumnya telah menyusun *script* dalam program Notepad ++ baik untuk mencari temperatur Curie dan kurva histerisis. Variasi suhu dan daya laser digunakan untuk kurva histerisis untuk melihat

pengaruh heat assisted terhadap medan koersivitas bahan FePt. File *FePt.dat*, file *input* yang berisi script dan aplikasi program *vampire 4.0* diletakkan dalam satu folder kemudian dijalankan. Ilustrasi simulasi menggunakan program *vampire 4.0* dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.



```
D:\SKRIPSI RUNNING\Tc\vampire-4.0.exe

Vampire

Version 4.0.0 Jul 19 2015 19:59:01

Licensed under the GNU Public License(v2). See licence file for details.
Lead Developer: Richard F L Evans <richard.evans@york.ac.uk>
Contributors: Meijia Fan, Phanuadee Chureemart, Joe Barker,
              Thomas Ostler, Andreas Biternas, Roy W Chantrell,
              Wu Hong-Ye, Rory Pond
Compiler Flags:

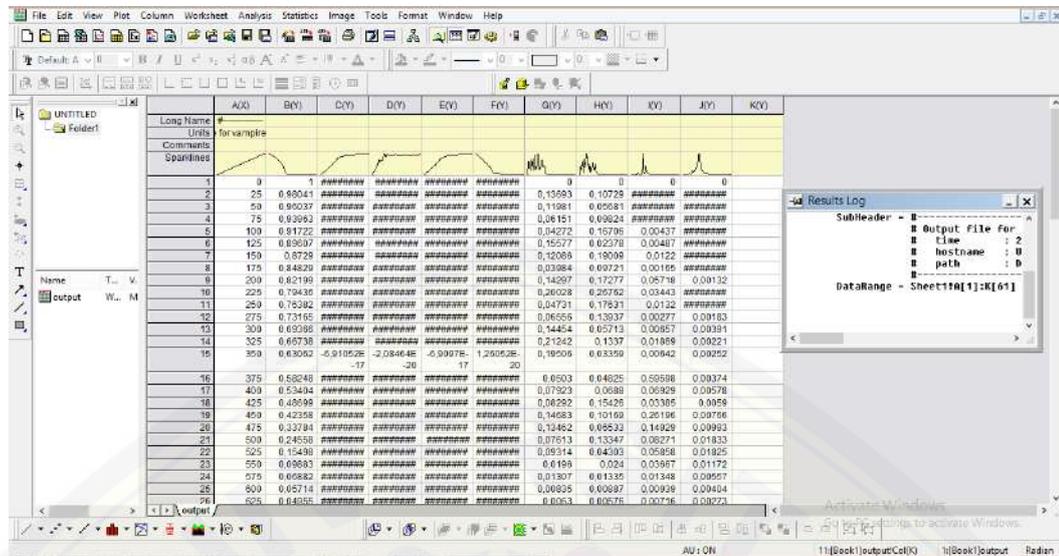
Vampire includes a copy of the qhull library from C.B. Barber and The
Geometry Center and may be obtained via http from www.qhull.org.

=====
Sun Jan 06 14:02:23 2019
=====
Initialising system variables
Creating system
Generating neighbour list.....done!
Copying system data to optimised data structures.
Using generic form of exchange interaction with 48 total interactions.
Initialising demagnetisation field calculation
Number of atoms generated: 36666
Starting Simulation with Program Curie-Temperature...
0      1      -1.26772e-015      -1.8113e-018      -1.2661e-015      1.97096e-019
0      0      -0      -0      -0      -0
25     0.98698      -1.24224e-015      -1.76375e-018      -1.24067e-015      1.92777e-019
0.00125647      0.00100602      1.56350e-005      1.55736e-005
-
```

Gambar 3.2 Ilustrasi simulasi *vampire 4.0*

## 2. Simulasi dengan program Origin

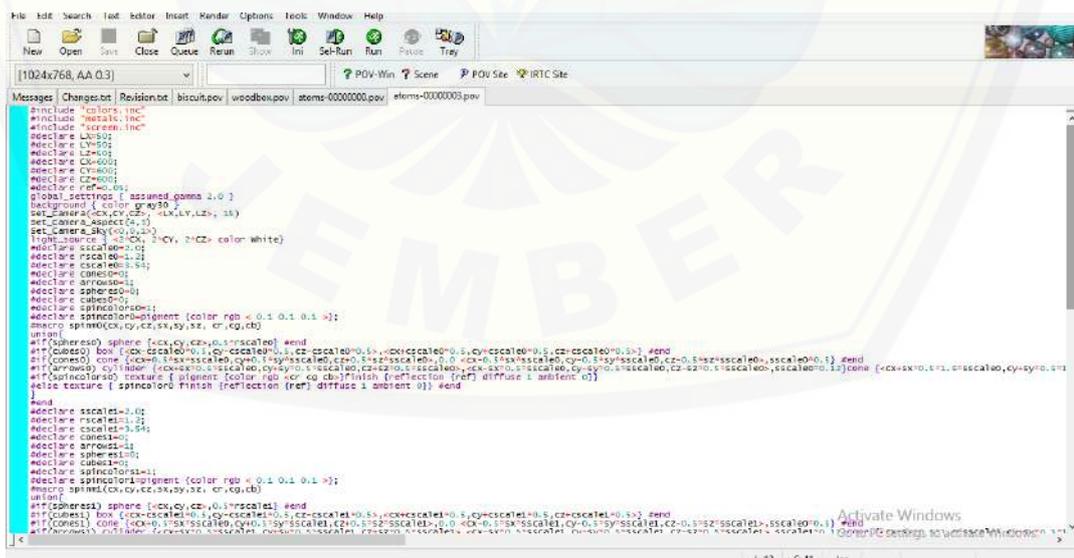
Simulasi dengan program Origin dilakukan jika simulasi *vampire 4.0* telah selesai. Simulasi dengan *vampire 4.0* menghasilkan file *cfg* dan file *output*. File *output* inilah yang dapat membentuk kurva histerisis dan grafik temperatur Curie. Hasil dari simulasi Origin merupakan data akhir yang dapat dianalisis dan disimpulkan. Ilustrasi tampilan dari program Origin dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Ilustrasi tampilan program Origin

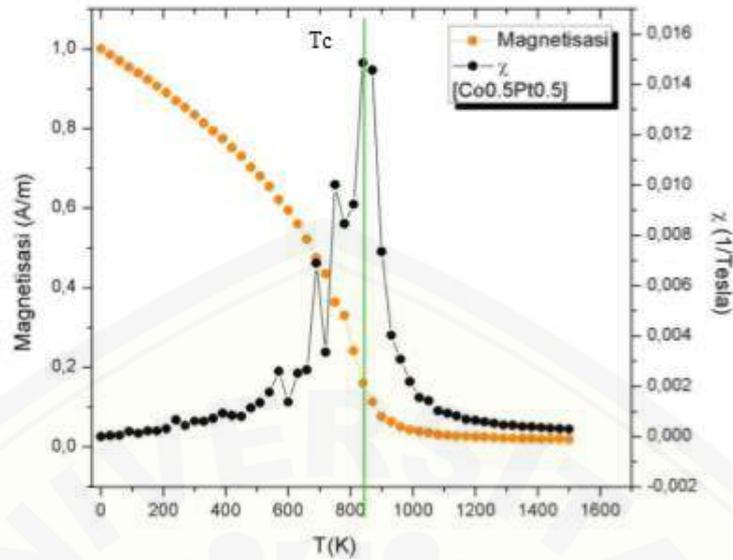
### 3. Simulasi dengan *Cywin* dan *Povray*

Simulasi dengan *cygwin* dilakukan untuk mengkonversi file hasil simulasi *vampire 4.0* berupa file *cfg* menjadi file *povray*. Setelah menghasilkan konversi file *povray*, selanjutnya dapat divisualisasikan untuk menganalisis konfigurasi spin magnetik bahan FePt menggunakan program *Povray*. Ilustrasi tampilan program *Cywin* dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan program *Povray* pada Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.4 Ilustrasi tampilan program Povray

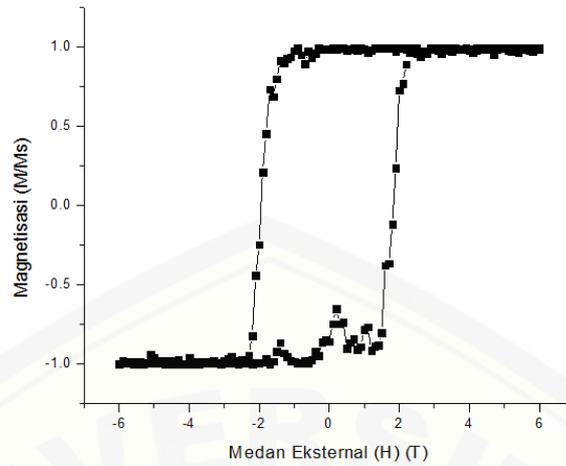




Gambar 3.6 Ilustrasi penentuan temperature Curie dengan suseptibilitas  
(Sumber: Nazah, 2017)

## 2. Analisis data kuva histerisis bahan FePt

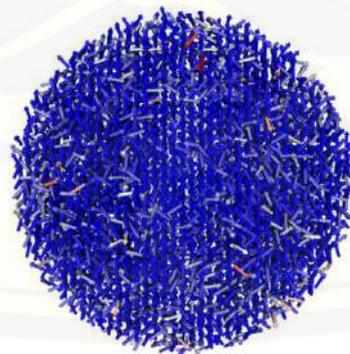
Hasil simulasi program *vampire 4.0* berupa file *output* untuk pembuatan kurva histerisis dan dilakukan dengan menggunakan program *Origin*. Analisis dilakukan dengan membuat kurva sumbu-y untuk magnetisasi ( $M$ ) dan sumbu-x untuk medan magnet luar ( $H$ ). Selanjutnya, kurva histerisis di bawah pengaruh daya laser yang diperoleh akan dianalisis untuk setiap variasi suhu dan akan dibandingkan dengan bagian kurva histerisis yang disimulasikan tanpa pengaruh daya laser. Analisis kurva histerisis diharapkan dapat menentukan sifat-sifat magnetik bahan FePt yaitu medan koersivitas dan medan saturasi. Ilustrasi kurva histerisis dapat dilihat pada Gambar 3.7 sebagai berikut.



Gambar 3.7 Ilustrasi kurva histerisis

### 3. Analisis konfigurasi arah spin bahan FePt

Hasil simulasi dengan menggunakan *vampire 4.0* berupa file *.cfg* dikonversi menjadi file *.povray* dengan menggunakan program *cygwin*. File *.povray* kemudian divisualisasikan menggunakan program *Povray* sehingga dihasilkan visualisasi arah spin magnetisasi bahan FePt berbentuk nanosphere dengan ukuran 5 nm. Analisis dilakukan pada setiap variasi suhu dan daya laser untuk mengetahui pengaruh suhu dan daya laser terhadap arah spin. Analisis konfigurasi arah spin diharapkan dapat menentukan arah spin domain beberapa titik pada kurva histerisis. Ilustrasi konfigurasi spin dapat dilihat pada Gambar 3.8 berikut.



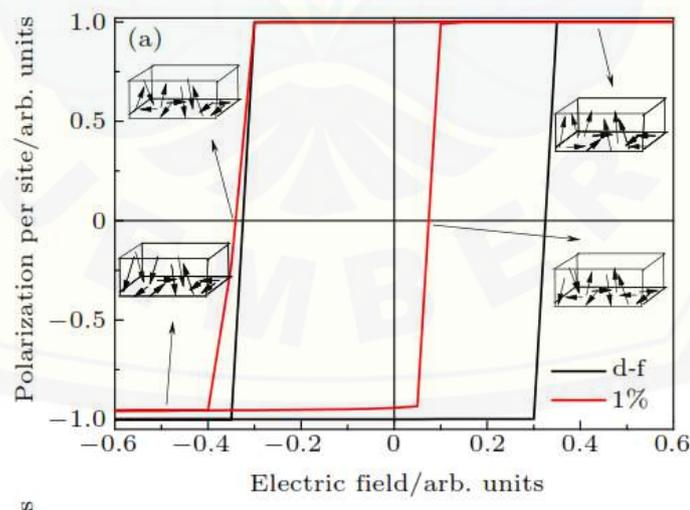
Gambar 3.8 Ilustrasi konfigurasi spin bahan magnetik

### 4. Analisis pengaruh *heat assisted* terhadap medan koersivitas bahan FePt

Analisis hasil simulasi untuk melihat pengaruh *heat assisted* terhadap medan koersivitas secara umum dilakukan sesuai dengan poin nomor 2. Setelah

memperoleh kurva histerisis antara magnetisasi dan medan magnet luar, medan koersivitas dianalisis dengan menghitung jarak antara medan magnet bagian kiri dan medan magnet bagian kanan kurva yang berpotongan dengan sumbu-x seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9. Kurva histerisis dapat digunakan untuk menentukan sifat magnet yaitu medan koersivitas dan medan saturasi yang terbentuk. Besar medan koersivitas yang diperoleh dapat menentukan bahan FePt tergolong *soft* magnet atau *hard* magnet. Jika nilai koersivitas diatas 12,54 mT, maka bahan feromagnetik tergolong bahan *hard* magnet. Sedangkan bahan feromagnetik tergolong *soft* magnet jika nilai koersivitas di bawah 12,54 mT (Hasan, 2008). Analisis dilakukan untuk setiap variasi suhu dan daya laser. Perubahan daya laser yang diberikan akan mempengaruhi nilai medan koersivitas yang dihasilkan. Analisis ini diharapkan dapat menentukan perubahan nilai medan koersivitas dan medan saturasi dengan tambahan daya laser dan menentukan sifat magnetik tergolong *soft* magnet atau *hard* magnet. Ilustrasi penentuan medan koersivitas berdasarkan kurva histerisis dapat dilihat pada Gambar 3.9 dan nilai medan koersivitas kurva histerisis dapat ditentukan menurut persamaan:

$$\Delta Hc = \frac{1}{2} (Hc_{.+} + Hc_{.-})$$



Gambar 3.9 Ilustrasi penentuan medan koersivitas dari kurva histerisis (Sumber: Bedoya *et al.*, 2015).

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil untuk menjawab permasalahan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil simulasi, temperatur Curie bahan  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  sebesar 650 K, dimana penentuan temperatur Curie dilakukan dengan menggunakan data magnetisasi dan suseptibilitas magnetik tertinggi sebagai acuan.
2. Hasil analisis terhadap kurva histerisis menunjukkan bahwa medan koersivitas dan medan saturasi mengalami penurunan saat temperatur bahan  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  meningkat.
3. Semakin besar daya laser yang diberikan pada bahan  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ , maka akan semakin kecil medan koersivitas bahan. Daya laser yang berpotensi diaplikasikan pada bahan  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  saat komputer bekerja antara lain pada temperatur 0 K dengan daya laser 0 W hingga 0,0026 W. Untuk temperatur 298 K dan 318 K, daya laser yang baik digunakan sebesar 0 W hingga 0,016 W. Sedangkan untuk temperatur 339 K tidak dapat diaplikasikan dengan daya laser karena merupakan temperatur *overheat*.

### 5.2 Saran

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk menentukan besar energi yang berkurang akibat daya laser sehingga dapat dengan akurat diaplikasikan sebagai media perekam magnetik. Penelitian juga masih perlu dilakukan dengan bahan, komposisi serta bentuk lainnya. Hal ini guna mengetahui pengaruh bentuk bahan dan komposisi bahan terhadap sifat-sifat magnetik diantaranya temperatur Curie bahan, medan koersivitas dan medan saturasi berdasarkan analisis kurva histerisisnya, apakah lebih baik dalam menyerap energi atau tidak.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Aji, N. W. 2011. Simulasi Mikromagnetik Mode Magnetisasi Reversal Berbantuan Panas pada Nanodot Magnetik Beranisotropi Tegak Lurus dengan Menyelesaikan Persamaan Landau-Lifshitz Gilbert. *Skripsi* Surakarta: Universitas Sebelas Maret Press.
- Antoniak, C. 2009. Correlation of magnetic moments and local structure of FePt nanoparticles. *Journal of Applied Physics*: 190:012118.
- Anwar, N. 2011. Pembuatan Magnet Permanen Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B Melalui Metode Mechanical Alloying. *Sripsi*. Jakarta: Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Bakhshayeshi, A., S. A. Sebt, dan M. R. Abolhassani, M. 2013. Temperature dependence of magnetic parameters in FePt nanoparticles. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. New York: Springer Science+Business Media.
- Bazerra-Neto, M. M., M. S. Ribeiro, B. Sanyal, A. Bregman, R. B. Muniz, O. Eriksson, dan A. B. Klatau. 2013. Complex Magnetic Structure of Clusters and Chains of Ni and Fe on Pt (111). *Scientific Report*. Brazil: Universidade Federal do Para.
- Bedoya-Hincapie, C.M., Ortiz-Alvarez, H.H., Restrepo-Parra, E., Olaya-Florez, J. J., dan Alfonso, J. E. 2015. Hysteresis loop behaviors of ferroelectric thin films: a monte carlo simulation study. *Journal of Applied Physics* 11, 117701.
- Beiser, A. 1992. *Konsep Fisika Modern Edisi Keempat*. Penerjemah: Dr. The Houw Liong. Jakarta: Erlangga.
- Beiser, A. 1995. *Applied Physics*. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Bublat, T., dan D. Goll. 2010. Temperature dependence of magnetic Properties of L<sub>10</sub>-FePt nanostructure and films. *Journal of Applied Physics* 108, 113910.

- Buche, F. J. 1995. *Principle of Physics*. New York: Mc Graw Hill, Inc.
- Buschow, K. H. J., dan De Boer, F. R., 2003. *Physics of Magnetism and Magnetic Materials*. New York: United State of America.
- Cullity, B. D dan C.D. Graham. 2008. *Introduction to Magnetic Material 2nd Edition*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Cullity, B. D dan C.D. Graham. 2009. *Introduction to Magnetic Material*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Dewi, T. S, Puri, I. H, Reza, F. I. 2013. *Analisis dan Simulasi Distribusi Panas pada Heat Sink Processor CPU dengan Comsol Multiphysics*. Bandung: Universitas Telkom.
- Evans, R. F. L. dan A. Biternas. 2014. *Vampire User Manual : Software Version 4.0*. The University of York, York, YO10 5DD : Departement of Physics.
- Evans, R. F. L, Fan, W. J. Chureemart, P., Ostler, T. A., Ellis, M. O. A., dan Chantrell, R. W.. 2013. *Atomistic Spin Model Simulation of Magnetic Nanomaterials*. York: The University of York.
- Evans, R. F. L, Fan, W. J. Chureemart, P., Ostler, T. A., Ellis, M. O. A., dan Chantrell, R. W.. 2014. Atomistic spin model simulation of magnetic nanomaterials. *Journal of Physics: Condensed Matter* 26: 103202 (23pp).
- Evans, R. F. L, Ostler, Thomas, Chantrell, Roy, W., Radu, Ilie R. dan Theo. 2014. Ultrafast thermally induced magnetic switching in synthetic ferrimagnets. *Jurnal Fisika*, 104 (8): 082410.
- Evans, R. F. L. 2008. Atomistic Modeling of Nanogranular Magnetic Materials. *Tesis*. England: University of York.
- Fan, J. W, Y. Hancock, R. F. L. Evans dan R. W. Chantrell. 2011. Control of the exchange coupling in granular CoPt/Co recording media. *Journal of Physics*, 109:07B752.

- Fan, W. 2013. Atomistic Modelling of Magnetisation Reversal Processes in Recording Media. *Tesis*. Inggris: Universitas York.
- Hafid, R. 2014. *Pengukuran Intensitas Radiasi Benda Hitam sebagai Fungsi Suhu (Hukum Stefan-Boltzmann)*. Makassar: Universitas Negeri Makassar.
- Hasan. 2008. Studi Sifat Magnetik Alloy Fe<sub>97-x</sub>Si<sub>3</sub>Al<sub>x</sub> (x=4.5 dan 6% at). *Tesis*. Depok: FMIPA Universitas Indonesia.
- Hong, M. H., K. Hono, dan M. Watabene. 1998. Microstruktural of FePt/Pt magnetic thin films with high perpendicular coercivity. *Journal of Applied Physics* 48 (8).
- Irayanti, E. 2016. Investigasi Sifat-Sifat Magnetik Material Alloy Feromagnetik Fe<sub>1-x</sub>Pt<sub>x</sub> Menggunakan Simulasi Mikromagnetik dengan Model Atomistik. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Kilic U, Finocchio G, Hauet T, Florey S H, Aktas G, & Oyataz O. 2012. Magnetic switching driven by nanosecond scale heat and magnetic field pulse: An application of macrospin Landau-Lifshitz-Bloch model. *Journal of Applied Physics* 101: 252407
- Kronmuller, H. dan S. Parkin. 2007. *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials*. New Jersey: Wiley.
- Maaz, K., Karim, S., Mumtaz, A. Hasanain, S. K., Liu, J. Duan, J. L. 2009. Synthesis and magnetic characterization of nickel ferrite nanoparticles prepared by Co-precipitation route. *Journal of Applied Physics* 321:1838.
- Mark H. Kryder, Edward C. Cage, Terry W. McDaniel, William A. Challener, Robert E. Rottmayer, Ganding Ju, Yio-tee Hsia, and M. Fatih Erden. 2008. Heat Assisted Magnetic Recording. *Proceeding of the IEEE*, 0018-9219. 96: 1810-1835.
- Matsumoto K, Inomata A, and Hasigawa S. 2006. Thermally assisted magnetic recording. *Jurnal Fisika*: Vol. 42, pp 158.

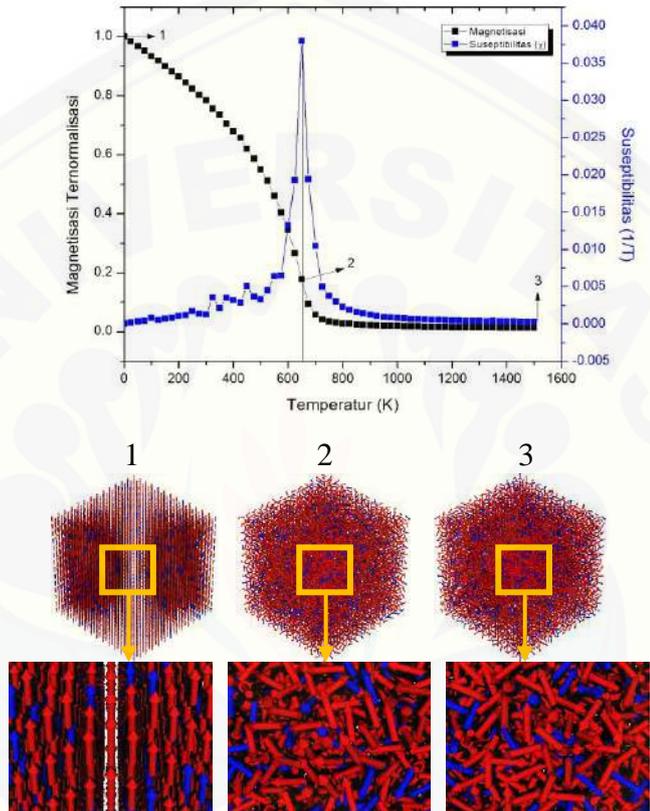
- Mansuripur, M dan Connel, G. 1984. Energetics of domain formation in thermomagnetic recording. *Journal of Applied Physics* 55:3049.
- Nam, N. H., N. T. T. Van, N. D. Phu, T. T. Hong, N. H. Hai, dan N. H. Luong. 2012. Magnetic properties of FePt nanoparticles prepared by sonoelectrodeposition. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials* 2012, Article ID 801240.
- Nazah, S.F. 2017. Investigasi Sifat-Sifat Magnetik Alloy  $Co_{1-x}Pt_x$  dan Penentuan Temperatur Curie Berdasarkan Simulasi Mikromagnetik. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Newmann, M. 1999. *Monte Carlo Method in Statistical Physics*. New York: Oxford University Press.
- Purnama, B. 2009. *Thermally Assisted Magnetization reversal in perpendicularly magnetized thin film*. Jepang: Universitas Kyushu.
- Purnama, B., Ismail dan Suryana. 2013. Kajian simulasi mikromagnetik: ketergantungan medan koersif dengan besaran intrinsik nano-dot magnetik dengan anisotropi tegak lurus. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 9 (1): 30-33.
- Sadnawanto, W. dan B. Purnama. 2014. Modifikasi model thermally pada heat assisted magnetisasi reversal nano partikel magnetik. *Jurnal MIPA*, ISSN: 0215-9945.
- Schrefl T, Fidler. J, Suess. D, Scholz. W, Tsiantos. V. 2006. *Handbook of Magnetic Materials: Micro Magnetic Simulation of Dynamic and Thermal Effect*. Beijing: Universitas Tsinghua Press.
- Skomski, R., Zhou, J., Zhang, J., and Sellmyer, D.J. 2006. Indirect exchange in dilute magnetic semiconductors. *Journal of Applied Physics*: 99
- Skomski, R. 2007. Role of thermodynamic fluctuation in magnetic recording. *Journal of Applied Physics* 99.

- Skomski, R. 2008. *Simple Models of Magnetism*. Oxford: Universitas Oxford Press.
- Sun, S. C. Murray, D. Weller, L. Folks, A. Moser. 2000. Monodisperse FePt nanoparticles and ferromagnetic FePt nanocrystal superlattices. . *Journal of Applied Physics* 287.
- Tipler. 2001. *Fisika untuk Sains dan Teknik*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Van, V dan Lawrence, H. 2001. *Elemen-Elemen Ilmu dan Rekayasa Material*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Wahyudi, E. 2005. Mengenal Harddisk Lebih Dekat. *Jurnal Teknologi Informasi Dinamik*. 10(3): 168-177.
- William, A. C, Terry, W., Daniel, Mihalcea, C. D., Keith, R. M, Kalman, P., Ibrahim, K. S. 2003. Light delivery techniques for heat-assisted magnetic recording. *Journal of Applied Physics*: Vol. 42 Number 2B.
- Xing, Y. T., I. Barb, R. Gerristma, R. J. C. Spreeuw, H. Luigjes, Q. F. Xiao, C. Retif, dan J. B. Goedkoop. 2006. Fabrication of magnetic atom chips based on FePt. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 313: 192-197.
- Yong, B. C., M. H. Lee dan K. Youngjoo. design and evaluation of laser module for light delivery in heat assisted magnetic recording. *Journal of Applied Physics* 36.
- You, C. Y., Y. K. Takashi, dan K. Hono. 2005. Magnetic properties and microstructure of fe-pt thin films sputter deposited under partial nitrogen gas flow. *Journal of Applied Physics* 98.
- Young, H.D. 1992. *University Physics*. New York: Addison Wesley Longman.
- Zhu J. G. 2007. 3D Measurement and modelling of magnetic properties of soft magnetic composite. *Journal of Applied Physics* 85.

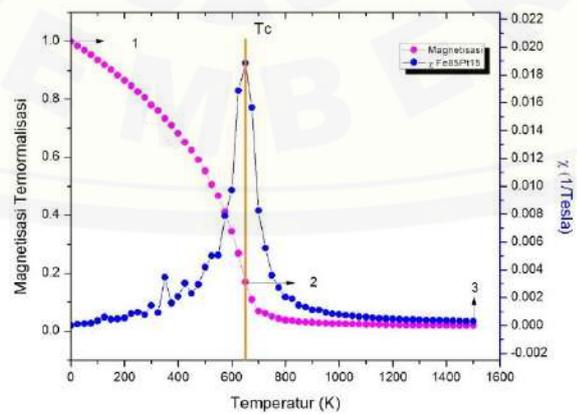
LAMPIRAN

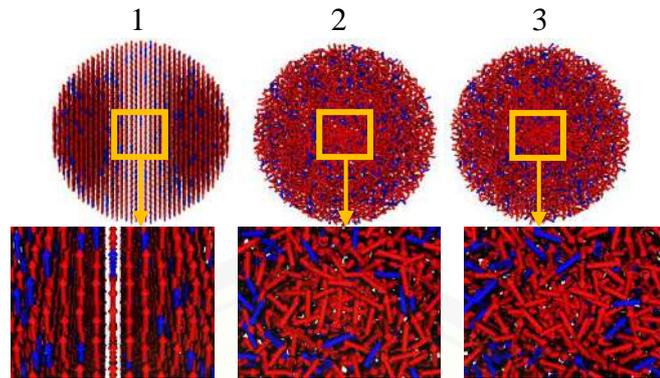
4.1 Visualisasi Struktur Domain  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  Berdasarkan Perubahan Temperature pada Analisis Temperature Curie

1. Temperatur Curie Bahan  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  Berbentuk *Nanocube* Ukuran 5 nm.



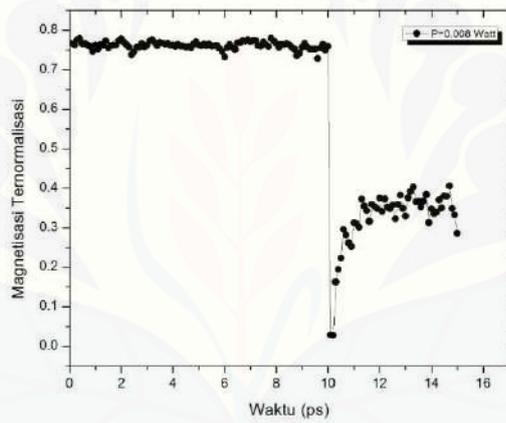
2. Temperatur Curie Bahan  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  Berbentuk *Nanosphere* Ukuran 5 nm.



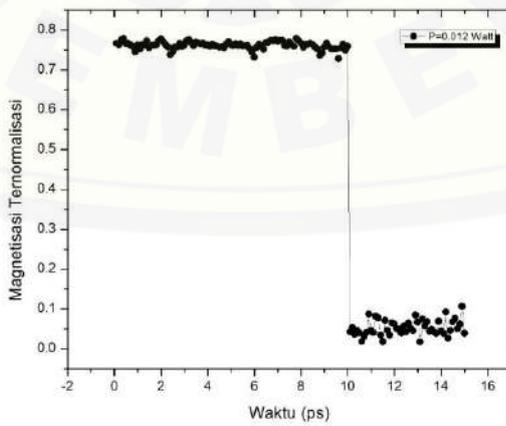


#### 4.2 Grafik Pengaruh Daya Laser Berdasarkan Waktu Magnetisasi

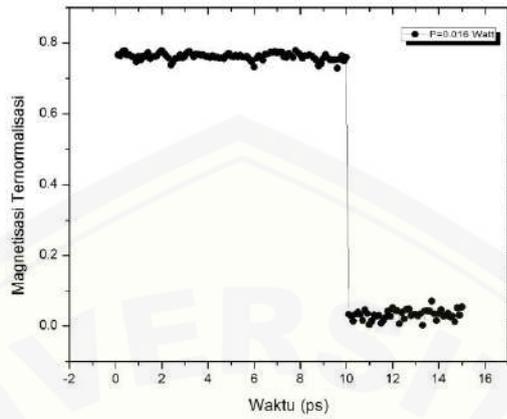
1. Grafik Hubungan Magnetisasi Ternormalisasi  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  terhadap Waktu di bawah Pengaruh Daya Laser 0.008 W.



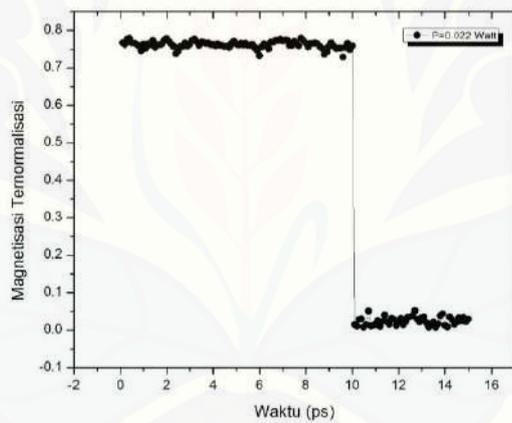
2. Grafik Hubungan Magnetisasi Ternormalisasi  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  terhadap Waktu di bawah Pengaruh Daya Laser 0.012 W.



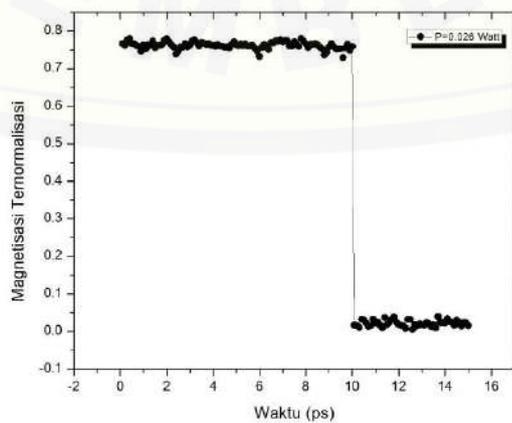
3. Grafik Hubungan Magnetisasi Ternormalisasi  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  terhadap Waktu di bawah Pengaruh Daya Laser 0.016 W.



4. Grafik Hubungan Magnetisasi Ternormalisasi  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  terhadap Waktu di bawah Pengaruh Daya Laser 0.022 W.



5. Grafik Hubungan Magnetisasi Ternormalisasi  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  terhadap Waktu di bawah Pengaruh Daya Laser 0.026 W.



### 4.3 Perhitungan Temperatur dan Daya Laser Menggunakan Persamaan Stefan-Boltzmanns.

$$P = e\sigma AT^4$$

$$T^4 = \frac{P}{e\sigma A}$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{P}{e\sigma A}}$$

dengan,  $T$  = Temperatur (K)

$P$  = Daya (Watt) (J/s)

$e$  = koefisien emisivitas = 1

$\sigma$  =  $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

$A$  = Luas permukaan benda ( $\text{m}^2$ )

$$= 4\pi r^2 = 4 (3,14)(2,5 \times 10^{-9})^2 = 7,85 \times 10^{-17} \text{ m}^2$$

$t = 1 \text{ s} = 1 \times 10^{12} \text{ ps}$

$$1. \quad P = 8 \times 10^{-15} \text{ J/ps} = 8 \times 10^{-15} \left( \frac{\text{J}}{10^{-12}\text{s}} \right) = 0.008 \text{ J/s}$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{8 \times 10^{-15}}{(1)(5,67 \times 10^{-8})(7,85 \times 10^{-17})}}$$

$$T = 205.90 \text{ K}$$

$$2. \quad P = 1,2 \times 10^{-14} \text{ J/ps} = 1,2 \times 10^{-14} \left( \frac{\text{J}}{10^{-12}\text{s}} \right) = 0.012 \text{ J/s}$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{1,2 \times 10^{-14}}{(1)(5,67 \times 10^{-8})(7,85 \times 10^{-17})}}$$

$$T = 227.87 \text{ K}$$

$$3. \quad P = 1,6 \times 10^{-14} \text{ J/ps} = 1,6 \times 10^{-14} \left( \frac{\text{J}}{10^{-12}\text{s}} \right) = 0.016 \text{ J/s}$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{1,6 \times 10^{-14}}{(1)(5,67 \times 10^{-8})(7,85 \times 10^{-17})}}$$

$$T = 244,86 \text{ K}$$

$$4. P = 2,2 \times 10^{-14} \text{ J/ps} = 2,2 \times 10^{-14} \left( \frac{\text{J}}{10^{-12}\text{s}} \right) = 0.022 \text{ J/s}$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{2,2 \times 10^{-14}}{(1)(5,67 \times 10^{-8})(7,85 \times 10^{-17})}}$$

$$T = 265,15 \text{ K}$$

$$5. P = 2,6 \times 10^{-14} \text{ J/ps} = 2,6 \times 10^{-14} \left( \frac{\text{J}}{10^{-12}\text{s}} \right) = 0.026 \text{ J/s}$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{2,6 \times 10^{-14}}{(1)(5,67 \times 10^{-8})(7,85 \times 10^{-17})}}$$

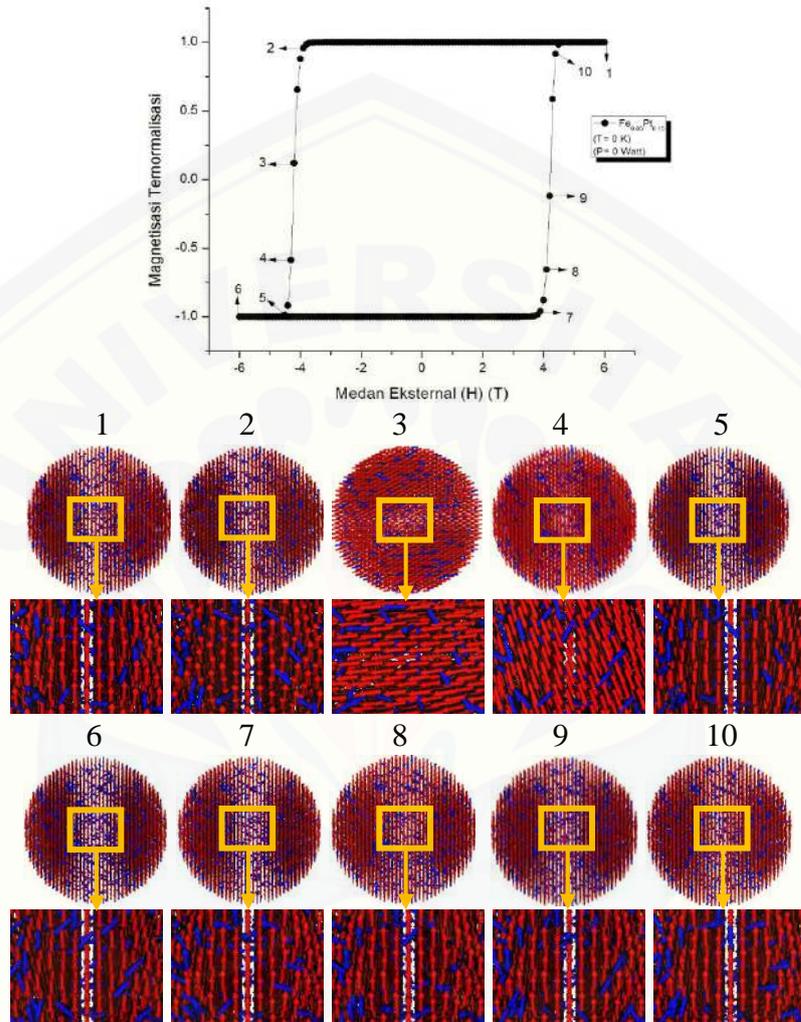
$$T = 276,46 \text{ K}$$

Tabel perhitungan besar daya laser dan temperatur sebagai input temperatur kurva histerisis.

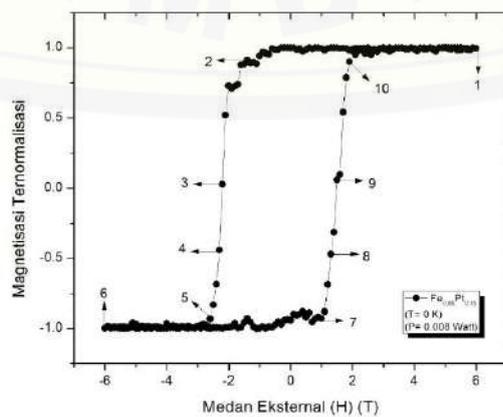
Daya Laser (P) (J/s)	Temperatur (K)			
	0 + $\Delta T$	298 + $\Delta T$	318 + $\Delta T$	339 + $\Delta T$
0.008	205.90	503.90	523.90	544.90
0.012	227.87	525.87	545.87	566.87
0.016	244.86	542.86	562.86	583.86
0.022	265.15	563.15	583.15	604.15
0.026	276.46	574.46	594.46	615.46

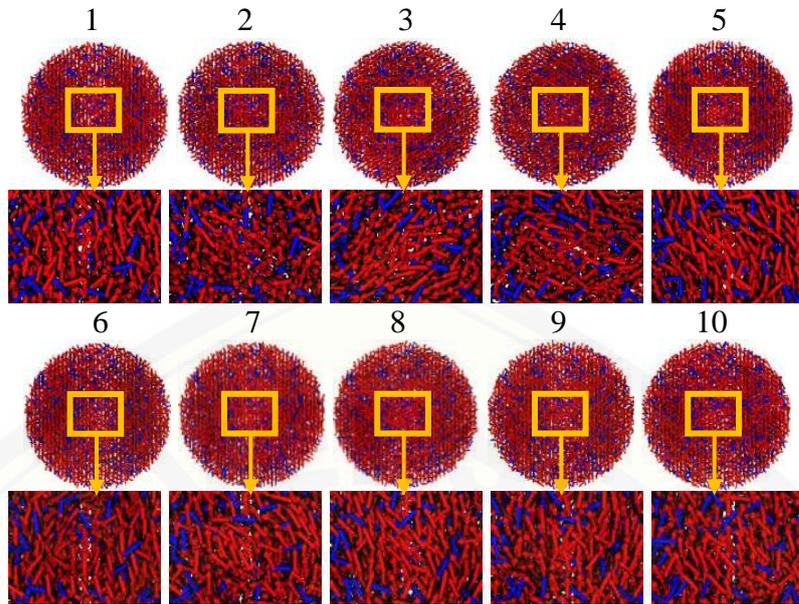
#### 4.4 Visualisasi Struktur Domain Kurva Histeresis $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ Berdasarkan Variasi Temperatur.

##### 1. Kurva Histeresis $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ pada Temperatur 0 K

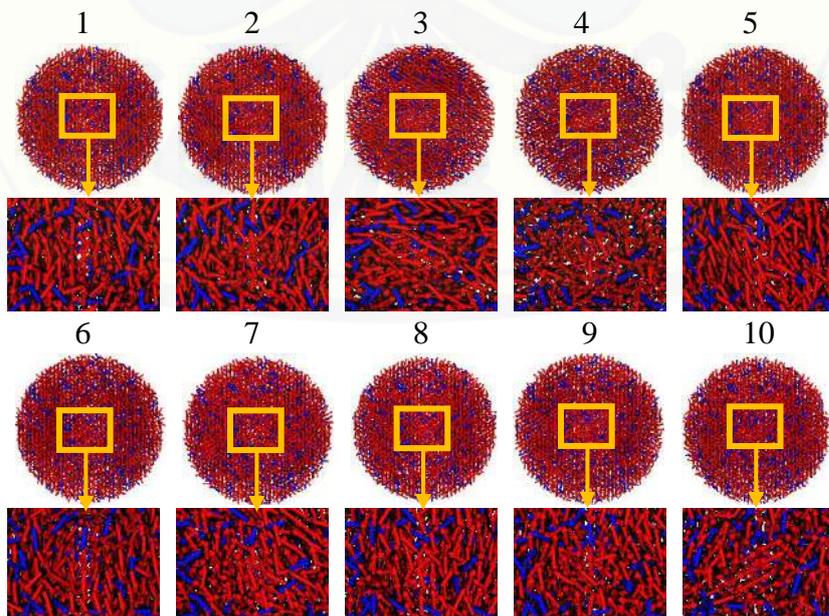
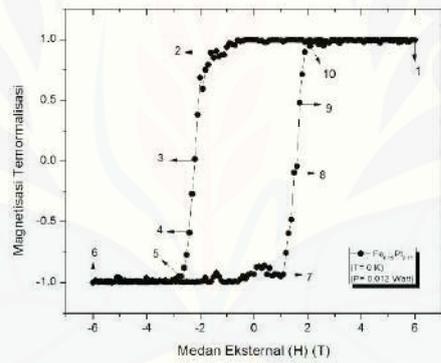


##### 2. Kurva histeresis $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$ pada Temperatur 0 K dan Daya Laser 0.008 W

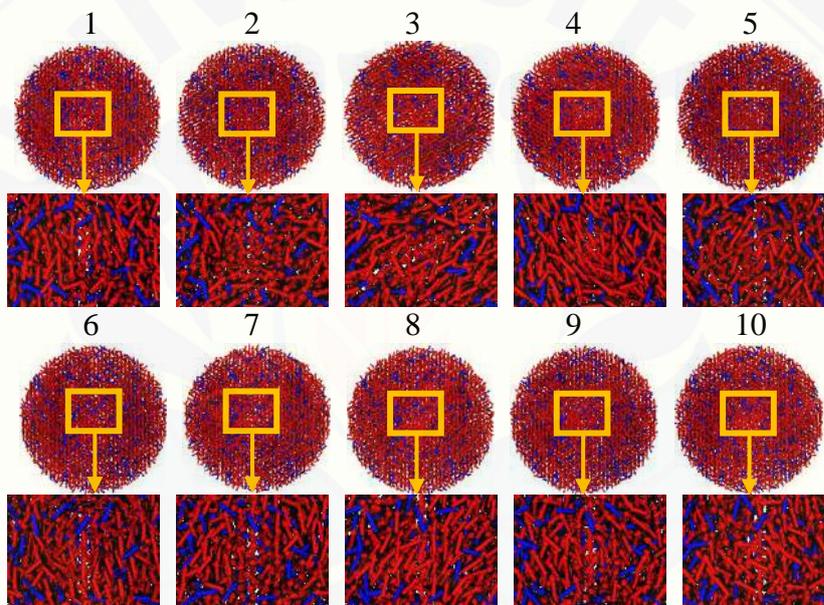
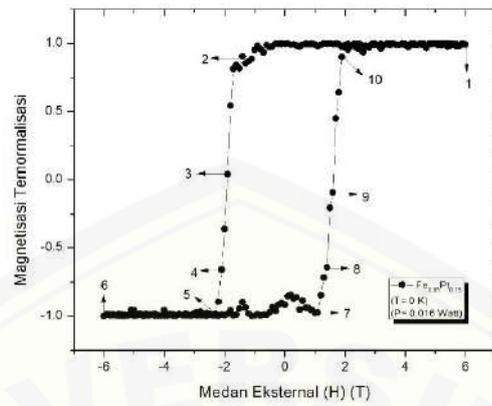




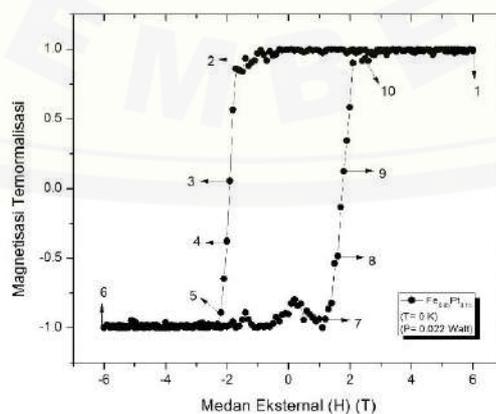
3. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 0 K dan Daya Laser 0.012 W

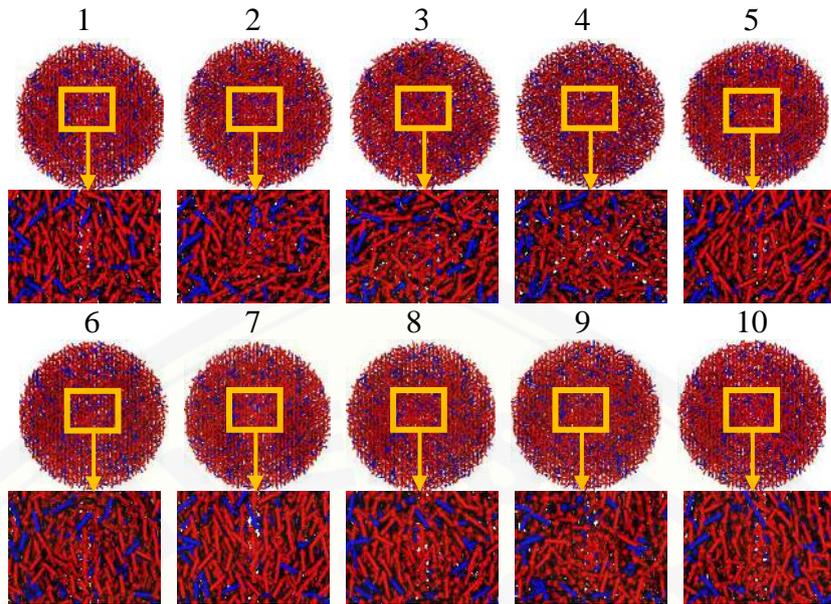


4. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 0 K dan Daya Laser 0.016 W

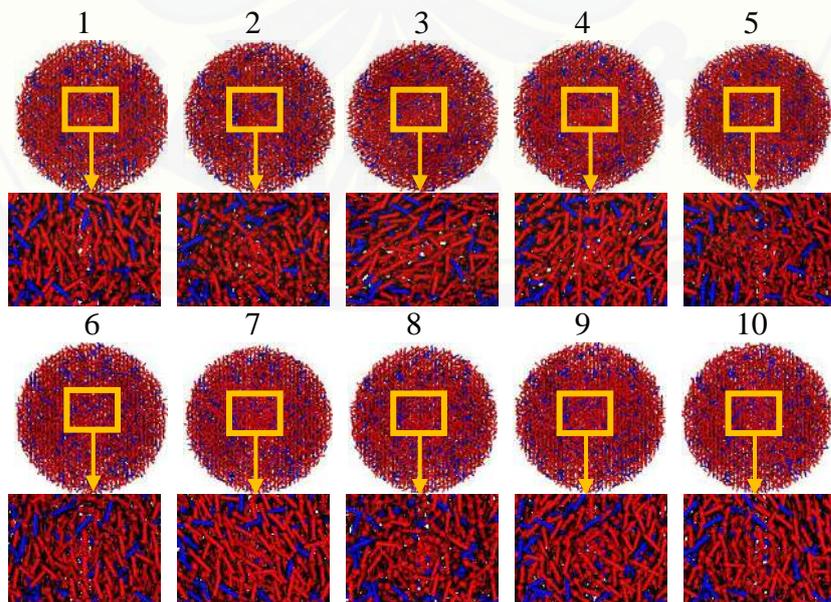
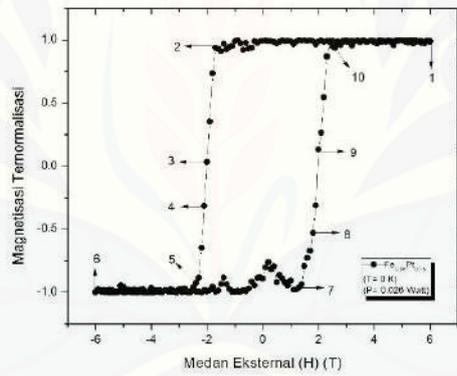


5. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 0 K dan Daya Laser 0.022 W

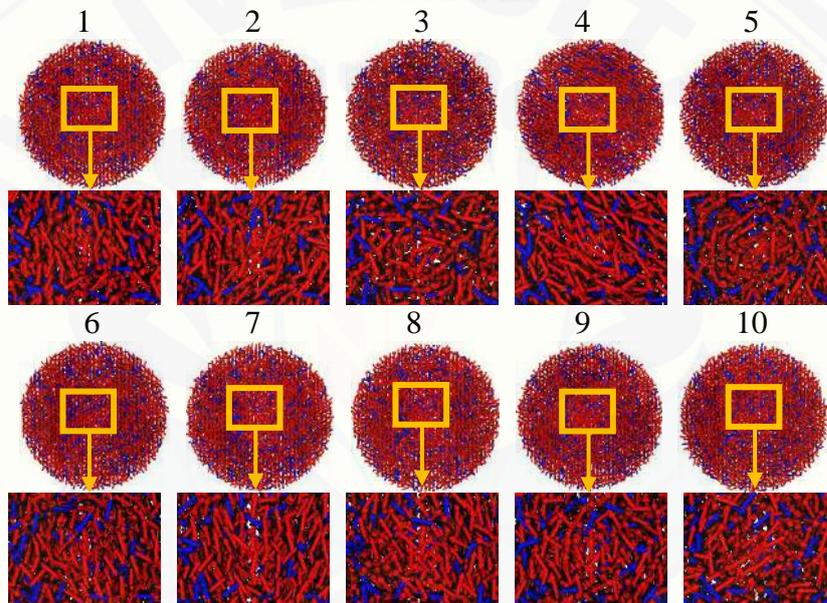
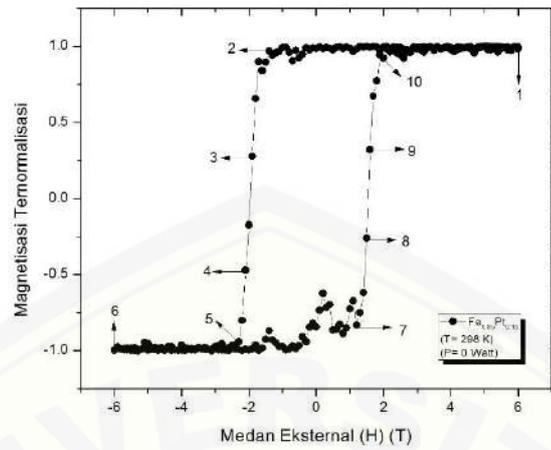




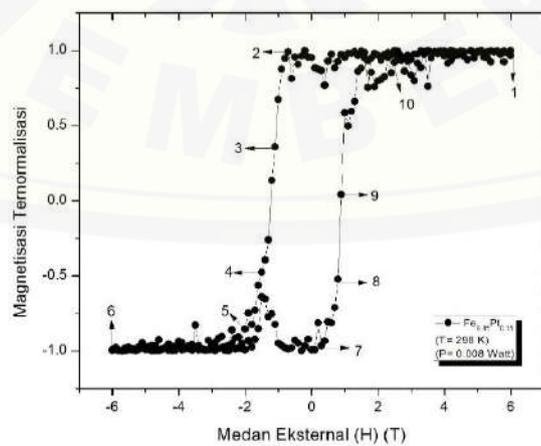
6. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 0 K dan Daya Laser 0.026 W

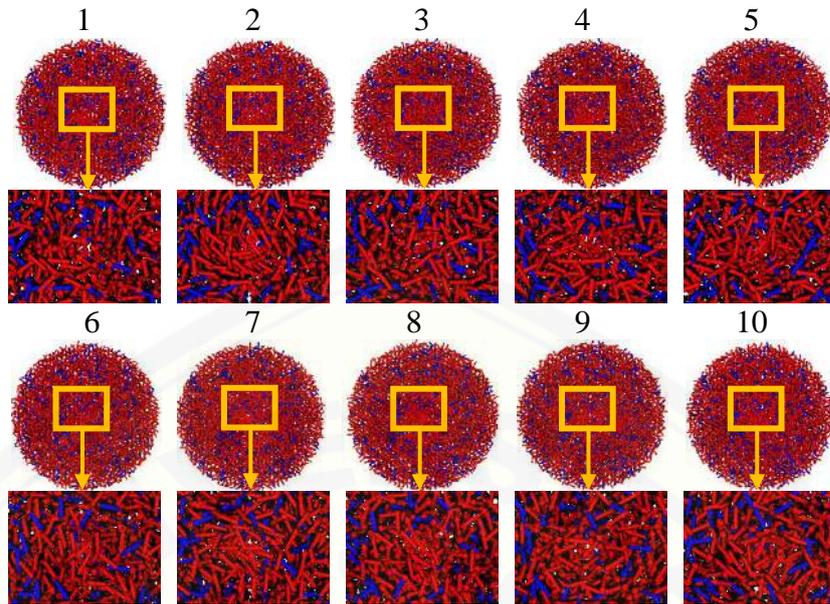


7. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 298 K dan Daya Laser 0 W

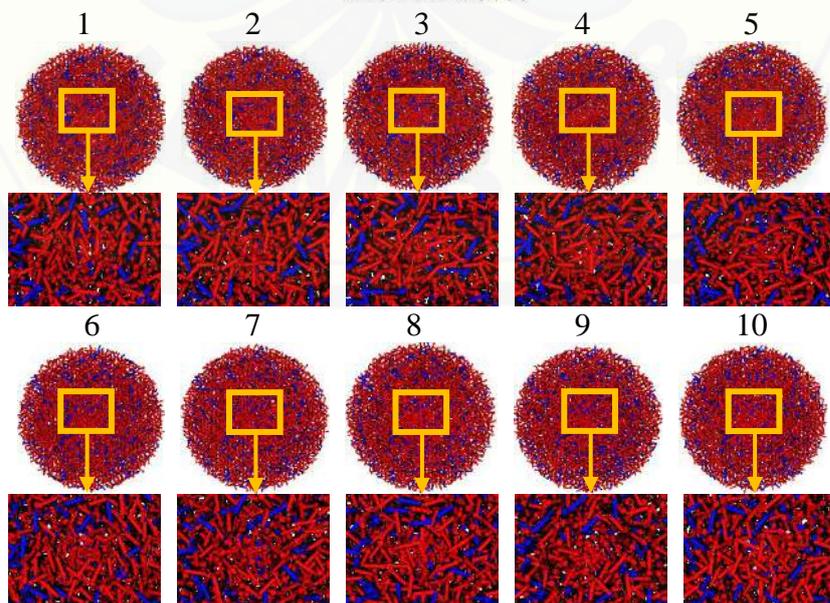
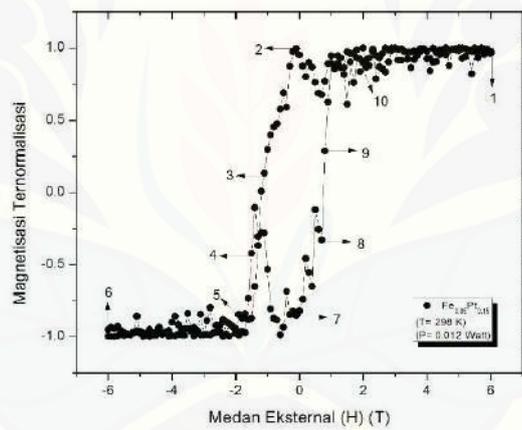


8. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 298 K dan Daya Laser 0.008 W

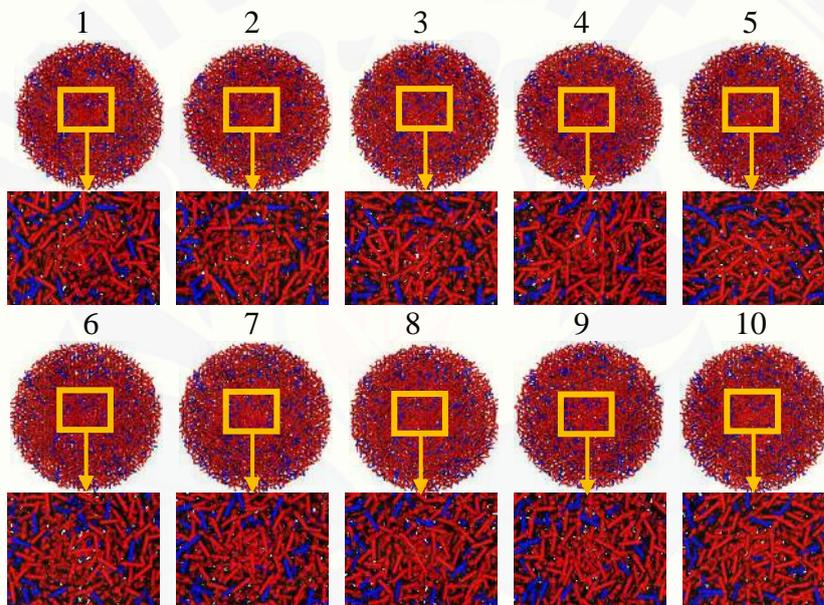
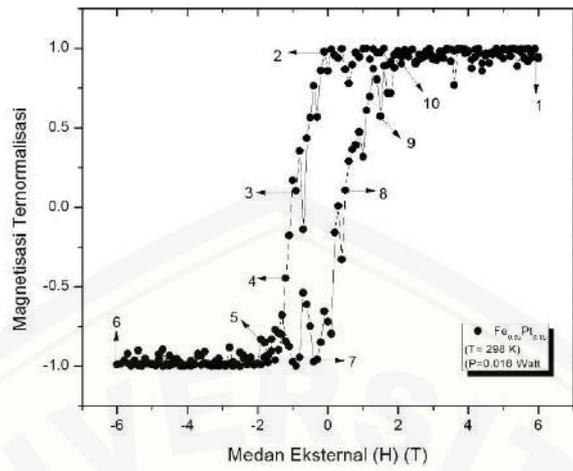




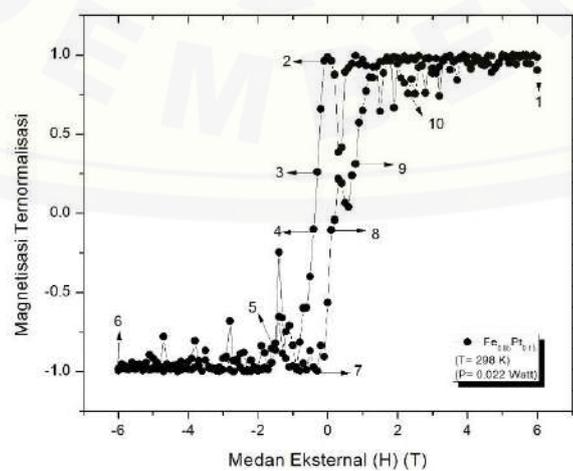
9. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 298 K dan Daya Laser 0.012 W

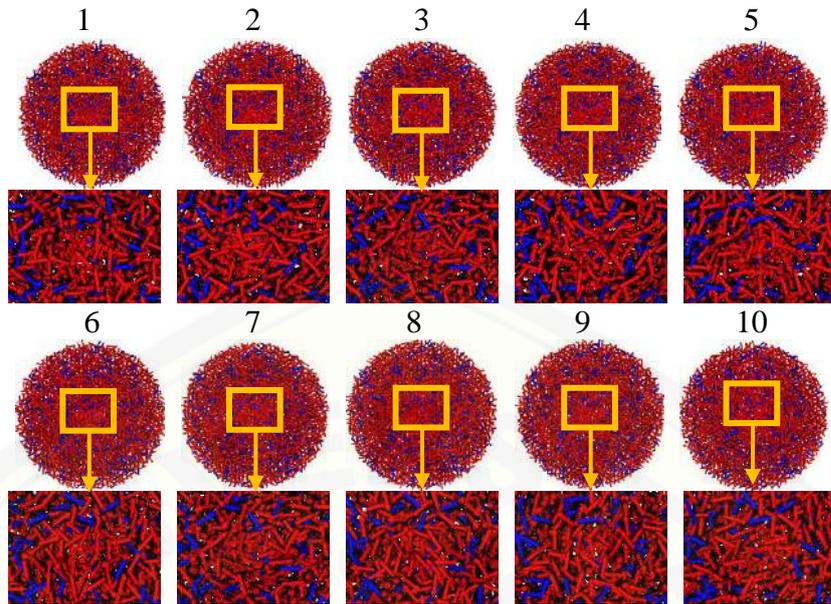


10. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 298 K dan Daya Laser 0.016 W

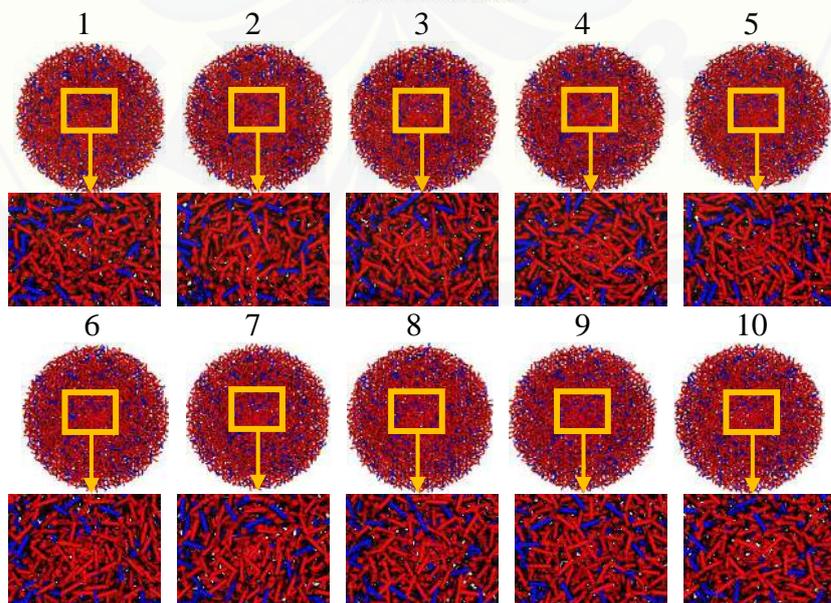
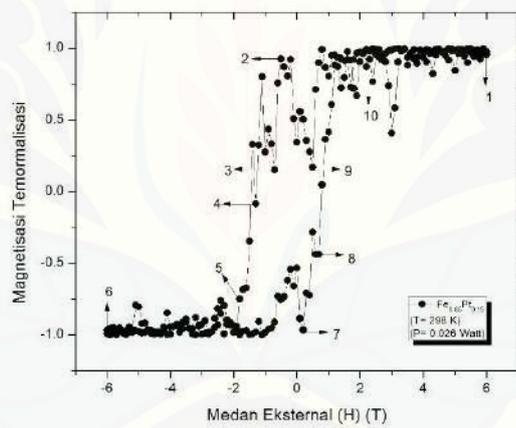


11. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 298 K dan Daya Laser 0.022 W

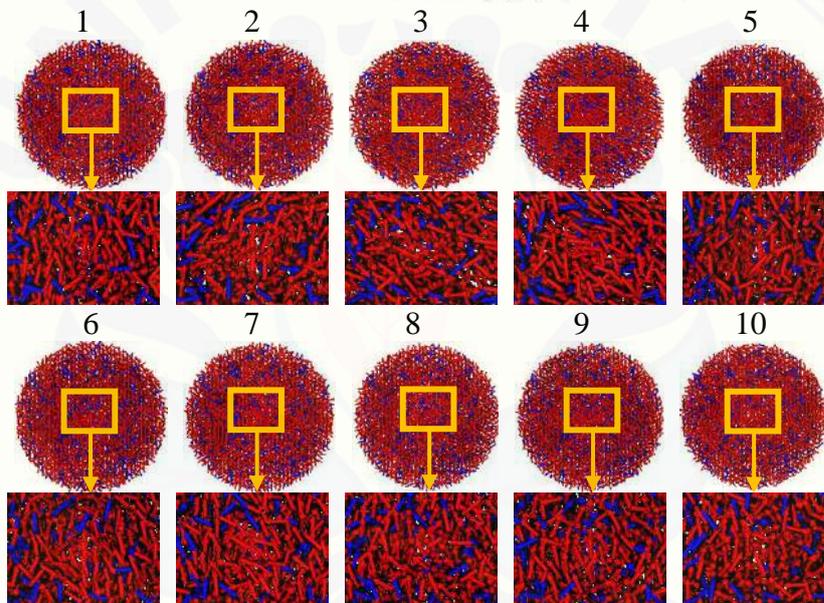
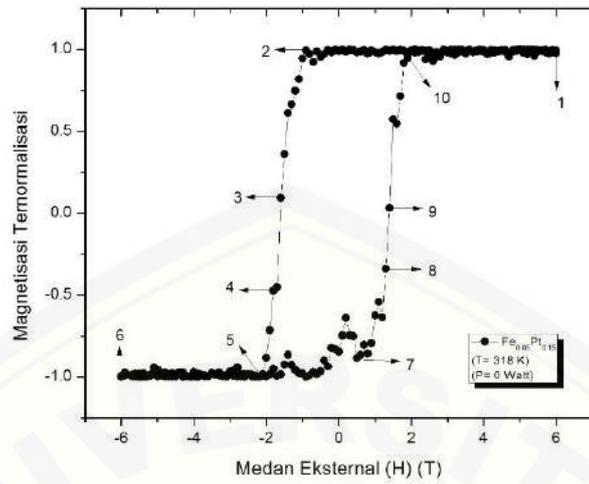




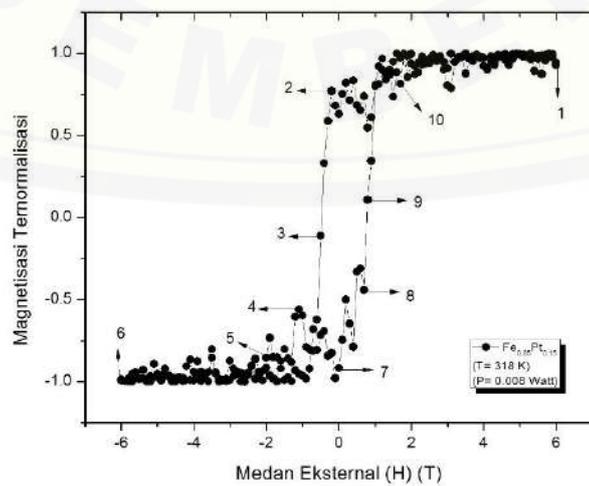
12. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 298 K dan Daya Laser 0.026 W

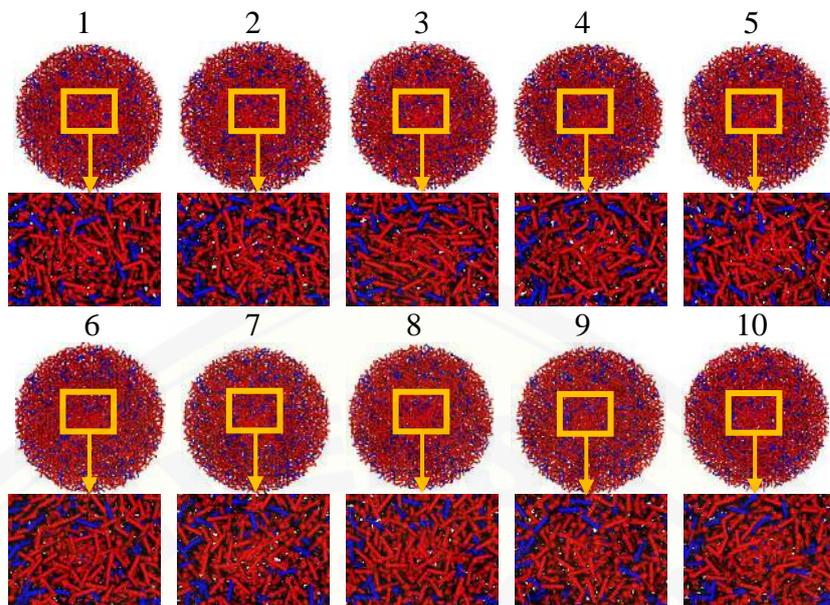


13. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 318 K dan Daya Laser 0 W

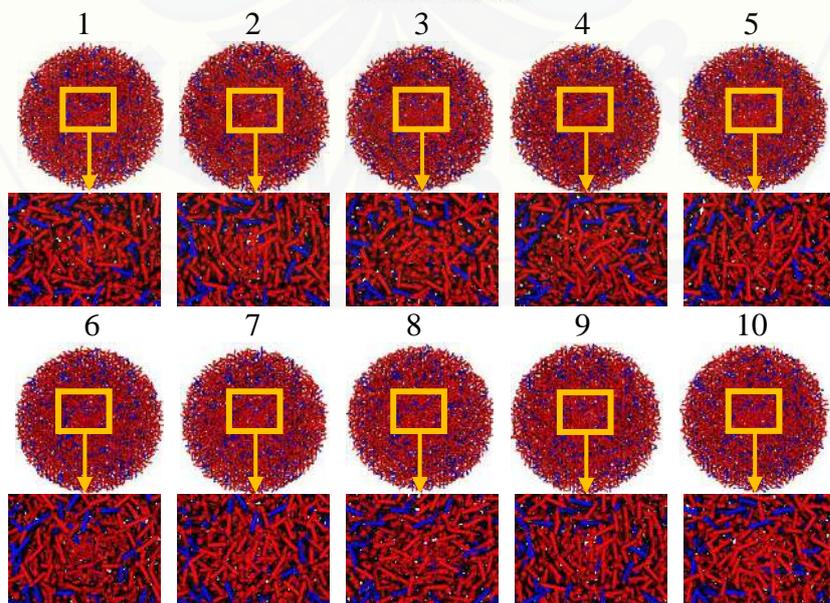
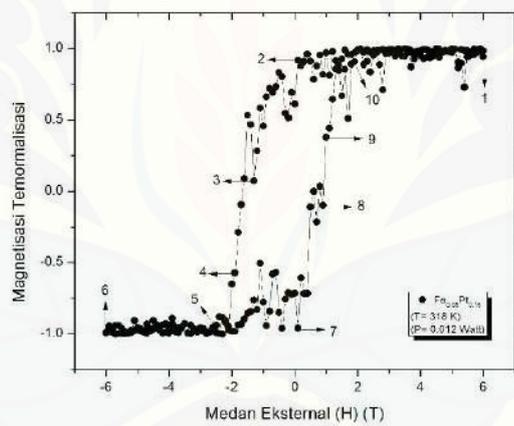


14. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 318 K dan Daya Laser 0.008 W

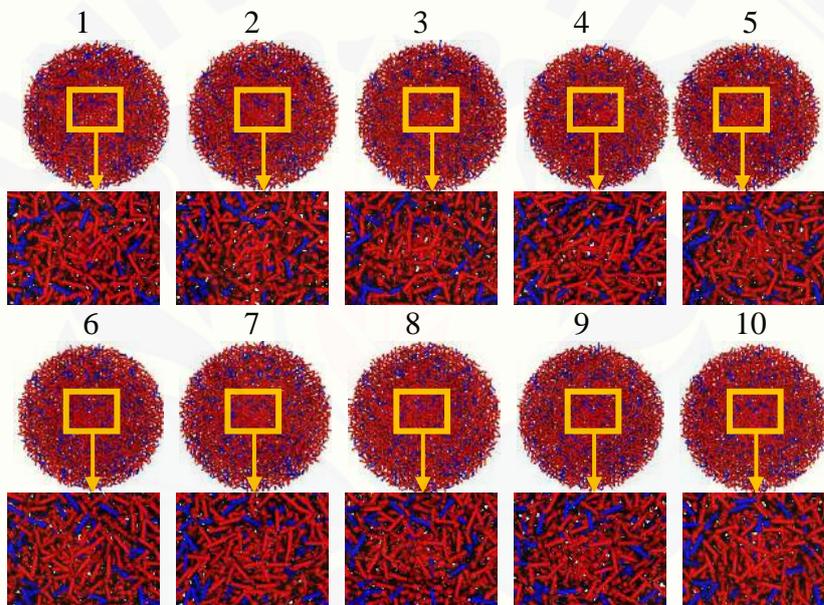
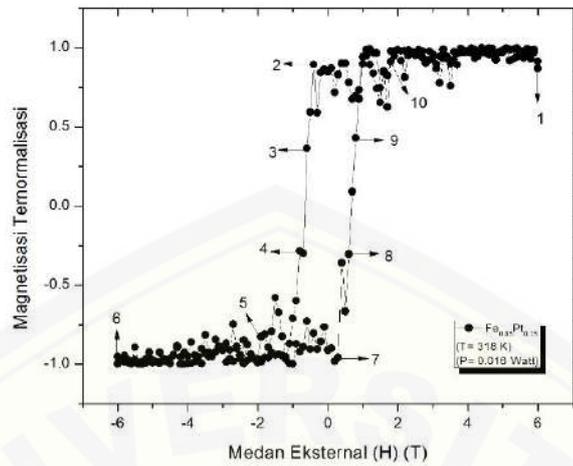




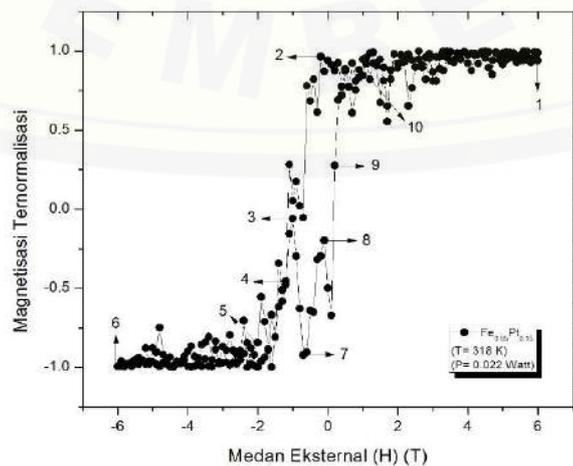
15. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 318 K dan Daya Laser 0.012 W

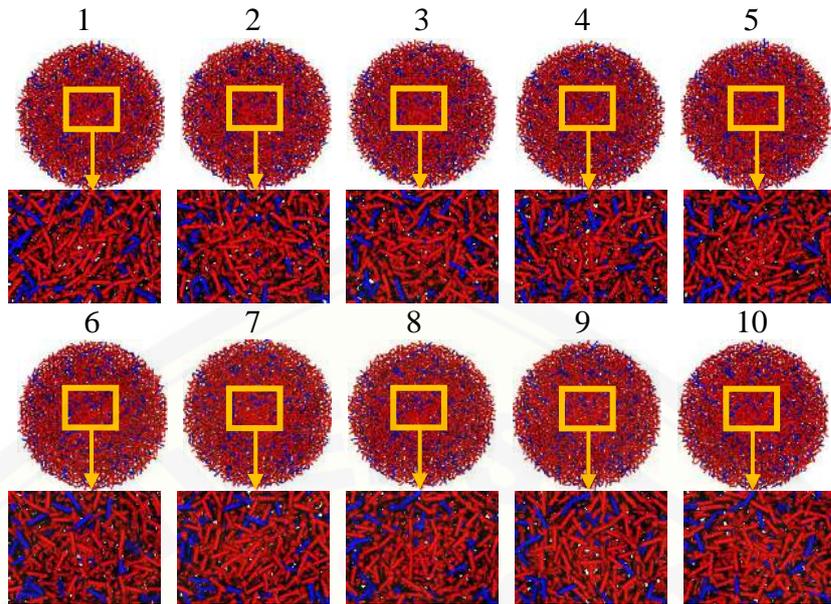


16. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 318 K dan Daya Laser 0.016 W

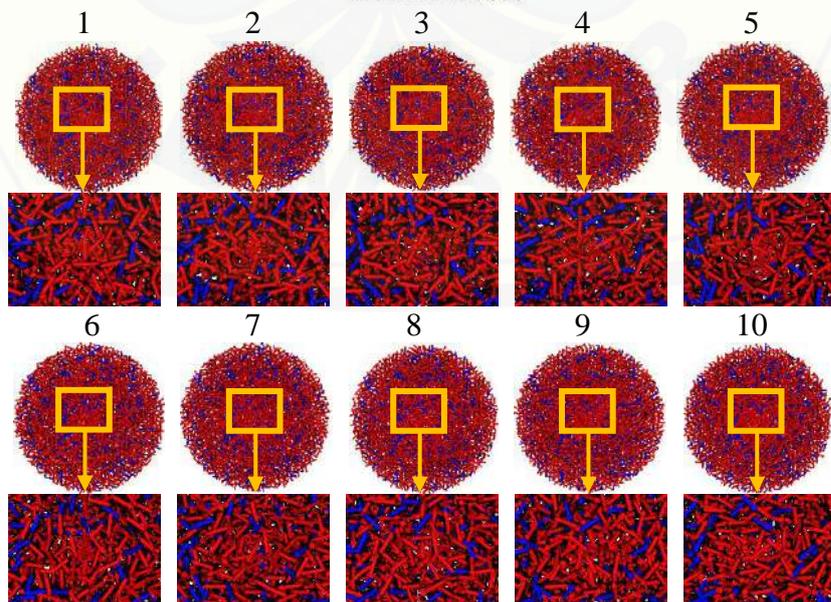
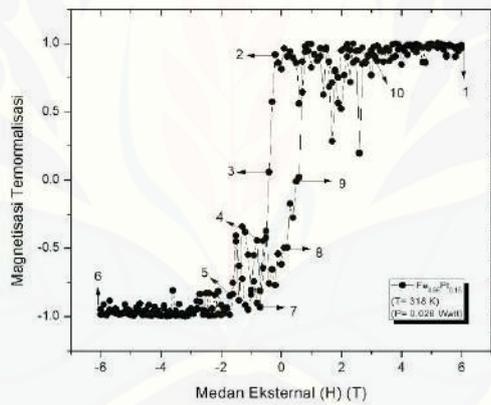


17. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 318 K dan Daya Laser 0.022 W

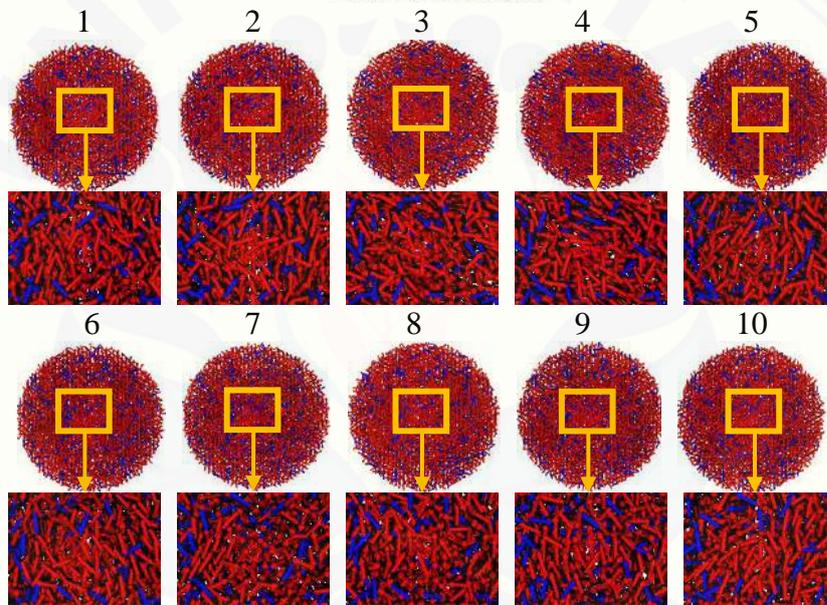
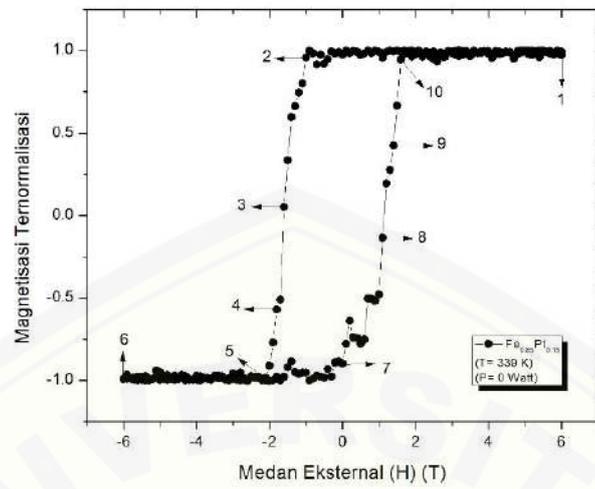




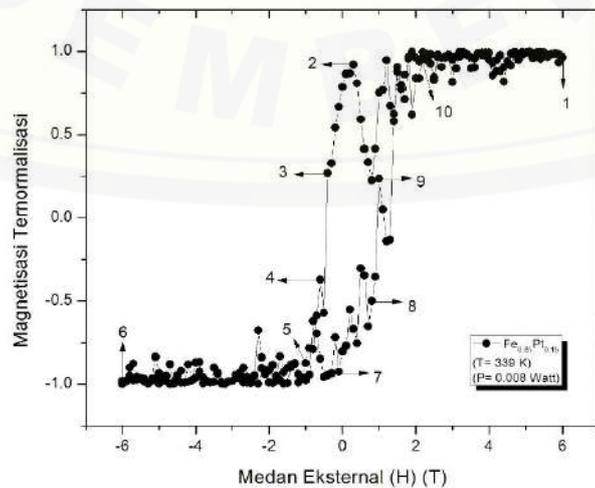
18. Kurva histeresis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 318 K dan Daya Laser 0.026 W

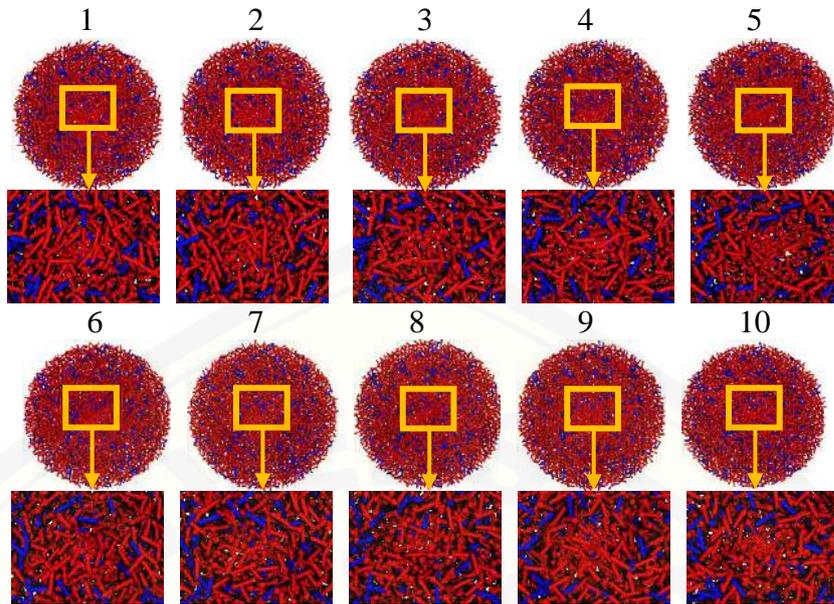


19. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 339 K dan Daya Laser 0 W

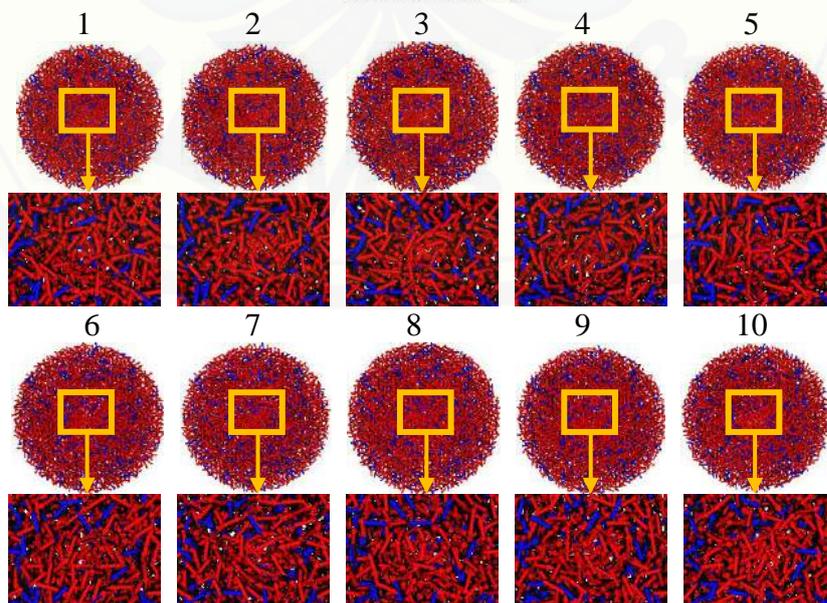
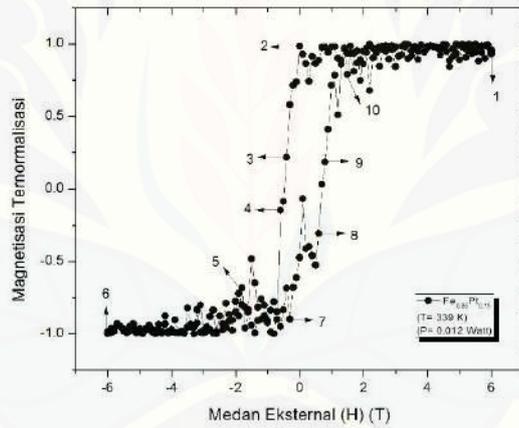


20. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 339 K dan Daya Laser 0.008 W

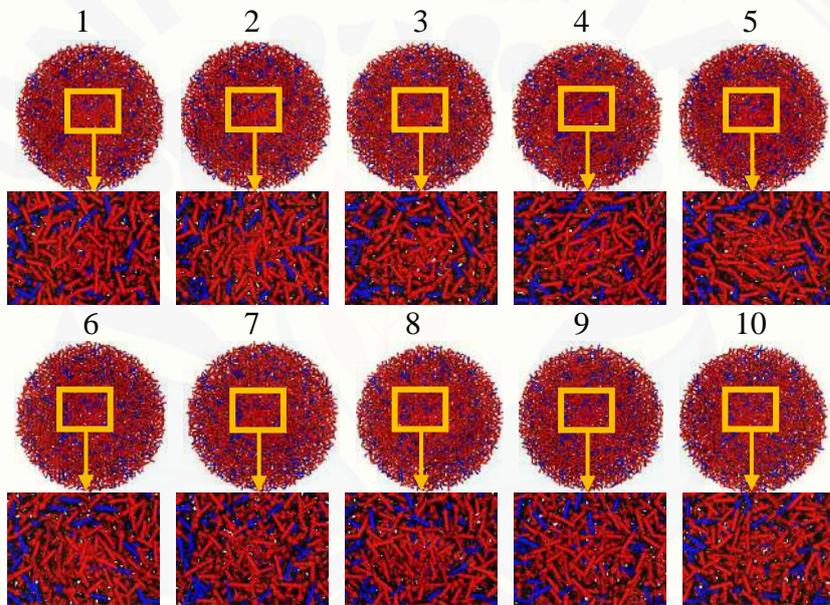
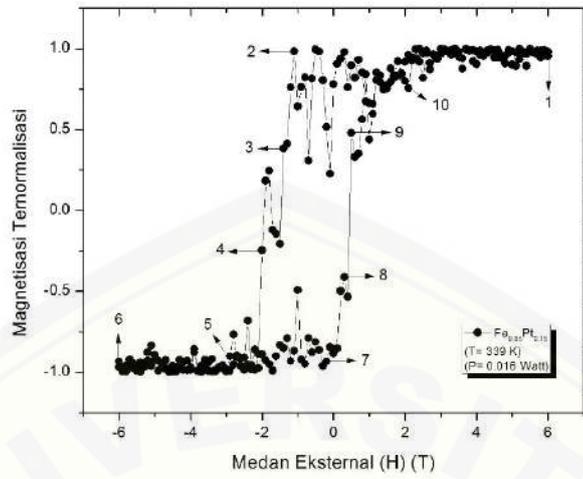




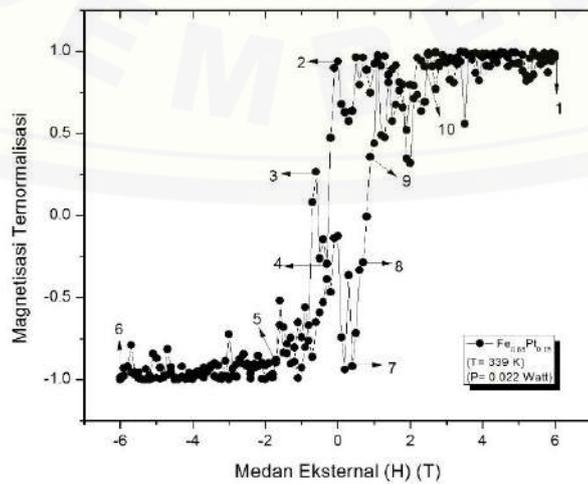
21. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 339 K dan Daya Laser 0.012 W

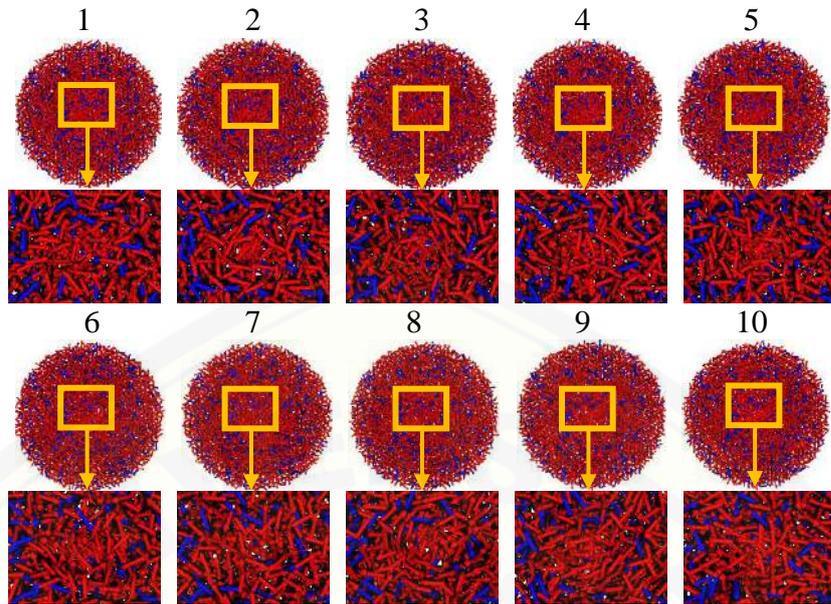


22. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 339 K dan Daya Laser 0.016 W



23. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 339 K dan Daya Laser 0.022 W





24. Kurva histerisis  $\text{Fe}_{0.85}\text{Pt}_{0.15}$  pada Temperatur 339 K dan Daya Laser 0.026 W

