

ANALISA SIFAT FERROMAGNETIK MATERIAL MENGGUNAKAN METODE MONTE CARLO

Dedi Mardiansyah

Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan
Universitas Pasir Pengaraian

ABSTRACT

Experiment conducted by the Curie-Weiss has described the phenomenon of changes in the magnetic susceptibility of a material to temperature changes, but there is no clear simulation. Hence, simulations and graphs to explain that phenomenon is needed. Simulation and graphics created by mathematical equations that have been there from the discussion about the microscopic properties of magnetic materials, particularly of ferromagnetic materials. This aided manufacturing simulation using the Pascal programming language Borland Delphi compiler. Used in the manufacture of this simulation Monte Carlo method, which utilizes the Metropolis algorithm as its phases and Ising models as zoom.

Keywords: *Ferromagnetic, Monte Carlo Methods, Pascal Program*

PENDAHULUAN

Curie-Weiss telah melakukan eksperimen yang menjelaskan tentang fenomena perubahan suseptibilitas suatu material magnetik terhadap perubahan suhu. Di dalam penjelasannya Wiess mengasumsikan adanya medan molekuler yang bekerja pada material ferromagnetik (**Helmut, 2007**). Di dalam bahan ferromagnetik terdapat pembagian daerah-daerah kecil yang di dalamnya memiliki momen magnetik, pembagian daerah-daerah tersebut dinamakan domain.

Di dalam penjelasannya, material ferromagnetik tersusun dari atom-atom yang mempunyai momen magnet atom yang arahnya acak antara satu dengan yang lain. Dengan adanya medan luar maka momen magnetik akan sejajar dengan arah medan luarnya, tetapi jika tidak diberi medan magnet luar, akan menghasilkan momen magnet total yang kecil karena sebagiannya saling menghilangkan (**Tipler, 2001**).

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengetahui penyebaran momen magnet yang tersebar di dalam suatu material adalah metode Monte Carlo. Metode Monte Carlo merupakan suatu metode yang memanfaatkan bilangan acak untuk melakukan simulasi suatu sistem fisika yang dilakukan oleh komputasi yang sulit diselesaikan secara analitik. Metode tersebut terdiri dari algoritma-algoritma yang dapat digunakan untuk memvisualisasikan magnetisasi pada suatu material (**Newman, 1999**). Di dalam penelitian ini menggunakan algoritma Metropolis dengan model Ising, yang digunakan untuk membuat suatu piranti lunak yang dapat berfungsi untuk menganalisa sifat ferromagnetik material yang dipengaruhi oleh medan luar dan suhu.

TINJAUAN PUSTAKA

1. Magnetisasi

Secara makroskopis setiap atom dapat dianggap sebagai dipol magnet

sehingga setiap atom dapat dinyatakan dengan momen dipolnya:

$$m_i = \text{momen dipol ke } - i$$

Maka momen dipol dari suatu elemen volume ΔV ditulis:

$$\sum m_i \text{ yang meliputi } \Delta V$$

Magnetisasi didefinisikan sebagai momen dipol magnet per-satuan volume:

$$M = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} (1/\Delta v) \sum m_i \dots\dots\dots(2.1)$$

Jika material tidak diberikan medan magnet luar, arah dari momen dipol bersifat acak, sehingga:

$$\sum_i m_i = 0 \quad \Rightarrow M = 0$$

Untuk bahan yang diberi magnet luar, maka :

$$\sum_i m_i \neq 0$$

2. Medan Magnet

Medan magnet merupakan daerah disekitar magnet dimana daerah tersebut masih dipengaruhi oleh gaya magnet. Medan magnet dilukiskan dengan garis-garis gaya magnet.

Medan magnet merupakan medan vektor yang ditimbulkan karena adanya arus listrik disekitar kutub-kutub magnet. Kuat atau lemahnya medan tersebut dapat ditunjukkan oleh intensitas magnet (H) dan kuat medan magnet (B). Hubungan antara H dan B adalah:

$$B = \mu_0 H \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana:

B =Kuat medan, satuan dalam SI = Weber/m² atau Tesla

H = Intensitas magnet = *ampere*/*meter*

μ_0 =Permeabilitas= $4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A.m

3. Suseptibilitas

Di alam ini, material dibagi dengan beberapa kelompok, pengelompokan ini berdasarkan nilai suseptibilitasnya. Suseptibilitas didefi-

nisikan adalah perbandingan antara magnetisasi (M) dengan intensitas magnet (H), dimana suseptibilitas merupakan suatu besaran skalar tanpa dimensi yang sangat berperan dalam pengelompokan unsur (**Reitz, 1993**).

Nilai dari suseptibilitas ini bisa berubah tergantung pada suhu. Pembagian pengelompokan ini sebagai berikut:

1. Diamagnetik
2. Paramagnetik
3. Ferromagnetik

4. Ferromagnetik

Material ferromagnetik adalah bahan-bahan yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik besar yang bernilai positif, sifat ferromagnetik muncul dalam bahan yang atom-atomnya memiliki momen magnetik permanen yang berinteraksi satu sama lainnya secara kuat dan mampu mempertahankan sifat-sifat magnetik setelah magnet luarnya dihilangkan (**Frederick, 1993**).

4.1. Teori Weiss Ferromagnetik

Curie-Weiss menyatakan bahwa suseptibilitas dipengaruhi oleh suhu. Dalam menjelaskan ferromagnetik Weiss mengambil dua asumsi sebagai berikut:

1. Adanya medan molekuler yang bekerja pada material ferromagnetik.
2. Pada keadaan demagnetisasi material ferromagnetik terbagi atas daerah-daerah kecil yang disebut domain.

Pada bahan ferromagnetik magnetisasi yang terjadi tidak sama untuk setiap unit volume di dalam bahan. Momen-momen magnet dari elektron yang berdekatan akan saling berinteraksi lebih efektif jika dibandingkan dengan momen magnet elektron yang letaknya berjauhan. Momen tersebut

akan saling berinteraksi membentuk magnetisasi spontan (M_s) dalam domain. Besarnya magnetisasi spontan dapat diturunkan dari fungsi Brillouin tanpa pengaruh medan luar (H).

$$M_s = NgJ\mu_B B_J \left(\frac{\mu_0 \mu_B g J \alpha M_s}{k_B T} \right) \dots (3)$$

Pengaruh kenaikan suhu akan meningkatkan energi termal bahan sehingga magnetisasi spontan dalam domain menurun.

Besarnya magnetisasi dalam domain, yaitu:

$$\left[M = M_0 \left[\coth \left(\frac{\mu_0 \mu_B g J (H + \alpha M)}{k_B T} \right) - \left(\frac{k_B T}{\mu_0 \mu_B g J (H + \alpha M)} \right) \right] \right] (4)$$

4.2. Teori Kuantum Ferromagnetik

Teori kuantum ferromagnetik diturunkan dari teori kuantum paramagnetik, maka magnetisasi untuk *single electron*

$$M = NgJ\mu_B \tanh \left(\frac{\mu_0 \mu_B g J (H + \alpha M)}{k_B T} \right) (5)$$

sedangkan untuk *multi electron*

$$M = NgJ\mu_B B_J \left(\frac{\mu_0 \mu_B g J (H + \alpha M)}{k_B T} \right) (6)$$

dimana :

M = Magnetisasi (Tesla)

N = Jumlah atom persatuan volum (kisi)

m = Momen magnetik per atom (Am^2)

αM = Menyatakan interaksi antar momen elektron.

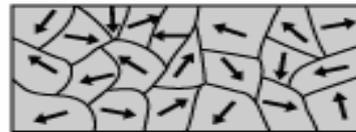
$B_J(x)$ = Fungsi Brillouin yang didefinisikan:

$$B_J(x) = \left(\frac{2J+1}{2J} \right) \coth \left(\frac{(2J+1)x}{2J} \right) - \left(\frac{1}{2J} \right) \coth \left(\frac{x}{2J} \right)$$

5. Domain Magnetik

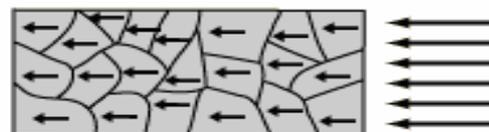
Struktur material ferromagnetik berbeda dengan struktur material magnetik lainnya, karena terdapat domain magnetik. Domain magnetik

merupakan pembagian daerah-daerah yang ada di dalam bahan ferromagnetik yang memiliki momen magnetik sejajar. Setiap bahan magnetik mempunyai momen magnet μ , dimana domain arah dari setiap momen magnetik atom dapat digambarkan dengan sebuah vektor yang tersebar secara acak seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Domain momen magnetik sebelum diberi medan magnet

Apabila material ferromagnetik tersebut diberi medan luar maka moment magnetik setiap atom akan menyejajarkan diri terhadap medan luar tersebut. Vektor momen atomnya secara berangsur-angsur berputar dari arah awal ke arah medan magnet luarnya. Daerah antara kedua kawasan itu disebut *domain wall* (Reitz, 1993). Sesuai dengan gambar 2.2.



Gambar 2.2 Domain momen magnetik setelah diberi medan magnet

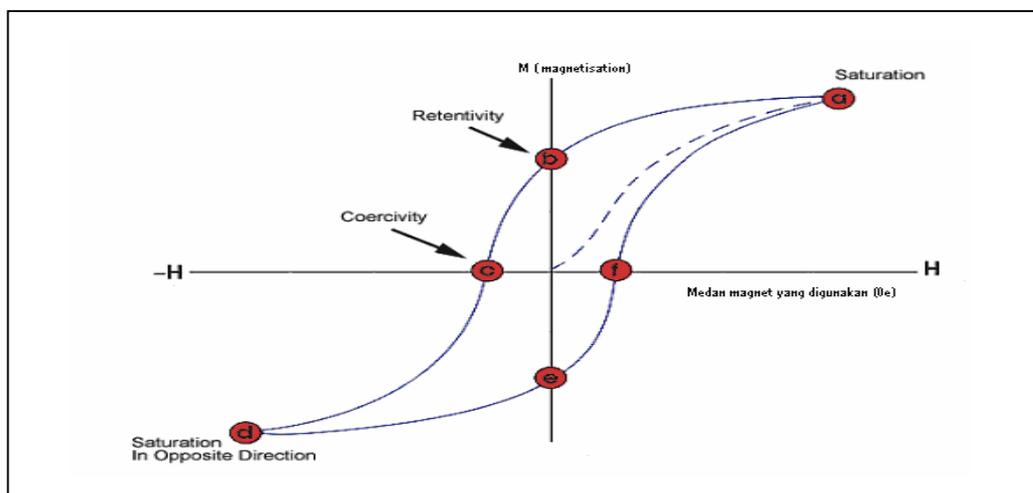
6. Delphi

Delphi mempunyai kemampuan untuk mempermudah pembuatan program aplikasi dengan menyediakan fasilitas pemrograman. Fasilitas tersebut dibagi dalam dua kelompok, yaitu *object* dan bahasa pemrograman. *Object* adalah suatu komponen yang mempunyai bentuk fisik dan biasanya dapat dilihat. *Object* biasanya dipakai untuk melakukan tugas tertentu dan

mempunyai batasan-batasan tertentu. Sedangkan bahasa pemrograman secara singkat dapat disebut sebagai sekumpulan teks yang mempunyai arti tertentu dan disusun dengan aturan tertentu serta untuk menjalankan tugas tertentu. Delphi menggunakan struktur bahasa pemrograman *Object Pascal*. Gabungan dari *object* dan bahasa pemrograman ini sering disebut sebagai bahasa pemrograman yang berorientasi objek atau *Object Oriented Programming* (OOP).

7. Histerisis

Material ferromagnetik mempunyai karakteristik yang cukup berbeda dari material lainnya yaitu ketika material diberi gangguan medan luar (H), kurva yang terbentuk dapat berupa *loop* histerisis. Di bawah temperatur Curie lebar kedua sisi *loop* histerisis sepanjang sumbu H disebut koersitifitas (c), sedangkan tinggi *loop* histerisis sepanjang sumbu M disebut remanensi (r).



Gambar 2.3. Kurva Histerisis dari bahan ferromagnetik (Livingston, 1981)

Intensitas magnet H diperbesar dari nol secara kontinu, maka harga M akan mengikuti lengkungan magnetisasi hingga mencapai H maksimum. Kemudian jika nilai H diperkecil, maka nilai M tidak mengikuti lengkungan magnetisasi semula, sehingga untuk nilai H yang sama, nilai permeabilitas ada dua. Walaupun intensitas magnet $H = 0$, nilai $M \neq 0$ (tetap ada). Untuk menghilangkan M , maka diperlukan intensitas magnet balik ($-H$) ke titik c . Jika intensitas magnet balik diperbesar, maka magnetisasi M akan berubah arah ($-M$) dan kembali ke titik awal (simetris).

8. Methode Monte Carlo

Methode Monte Carlo merupakan suatu metode yang menggunakan langkah-langkah acak dalam menjelaskan proses-proses fisis. Dalam penelitian ini, simulasi Monte Carlo dibuat untuk mensimulasikan proses penyearahan momen magnet oleh medan magnet luar pada suhu – suhu tertentu. Salah satu algoritma yang digunakan pada metode Monte Carlo adalah Algoritma Metropolis, algoritma Metropolis ini berfungsi untuk mengetahui simulasi sebuah system dari partikel-partikel yang ada dalam suatu volume yang dipengaruhi oleh suhu.

$$\langle M \rangle = \frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial H} \ln Z \dots\dots\dots(7)$$

Dimana:

$$Z = 2e^{8\beta J} + 12 + 2e^{-8\beta J} \dots\dots\dots(8)$$

Sehingga:

$$\langle M \rangle = \frac{1}{Z} (0) = 0 \dots\dots\dots(9)$$

$$\langle |M| \rangle = \frac{1}{Z} [(2 \times 4)e^{8\beta J} + 8 \times 2] \dots\dots\dots(10)$$

$$\langle M^2 \rangle = \frac{1}{Z} [(2 \times 16)e^{8\beta J} + 8 \times 4] \dots\dots\dots(11)$$

- yang baru dan lanjut ke tahap 8.
- 5. Jika ΔE positif, hitung $w = e^{-\beta \Delta E}$
- 6. Buktikan bilangan acak r
- 7. Jika $r \leq w$, kemudian kembali ke mikrostate
- 8. Hitung besaran fisika yang diinginkan
- 9. Ulangi tahap 2 sampai tahap 8 untuk mendapatkan bilangan mikrostate yang tepat.

8.1. Model Ising dan Metropolis Algoritma

Metode Monte Carlo mempunyai beberapa model, diantaranya model Ising. Model ising adalah salah satu model yang bisa menampilkan nilai magnetisasi bahan magnetik. Didalam pemodelan ini akan mensimulasikan nilai dari magnetisasi jika diberi suhu dan medan luarnya (Newman, 1999). Didalam bahan magnetik memiliki spin, setiap spin memiliki nilai +1 atau -1). Energi dari partikel tersebut akan di jelaskan dengan Hamiltonian Ising:

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} s_i s_j - B \sum_i s_i \dots\dots\dots(12)$$

J adalah energi interaksi antara spins yang berdekatan $\langle ij \rangle$, dan B adalah energi magnet luar.

Langkah-langkah Algoritma Metropolis dari persamaan Metode Monte Carlo diatas dapat di tulis seperti berikut ini:

1. Tetapkan sebuah mikrostate awal
2. Buat sebuah bilangan acak pada mikrostate
3. Hitung $\Delta E \equiv E_{\text{trial}} - E_{\text{old}}$ pertukaran pada energi suatu sistem
4. Jika ΔE lebih kecil atau sama dengan 0, setuju mikrostate

METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian ini dilakukan dengan simulasi komputer dengan cara membuat software yang dapat menggambarkan kondisi yang mendekati sebenarnya dari material ferromagnetik, tetang bagaimana pengaruh kenaikan suhu terhadap moment magnet total pada material tersebut dengan menggunakan metode Monte Carlo. Adapun alat – alat dan bahan yang digunakan serta metodenya adalah sebagai berikut:

1. Alat-Alat yang Digunakan

Alat yang digunakan laptop dan software Borland Delphi.

2. Prosedur Penelitian

Dalam penelitian ini langkah-langkah yang dilakukan adalah simulasi komputer dan pembuatan program.

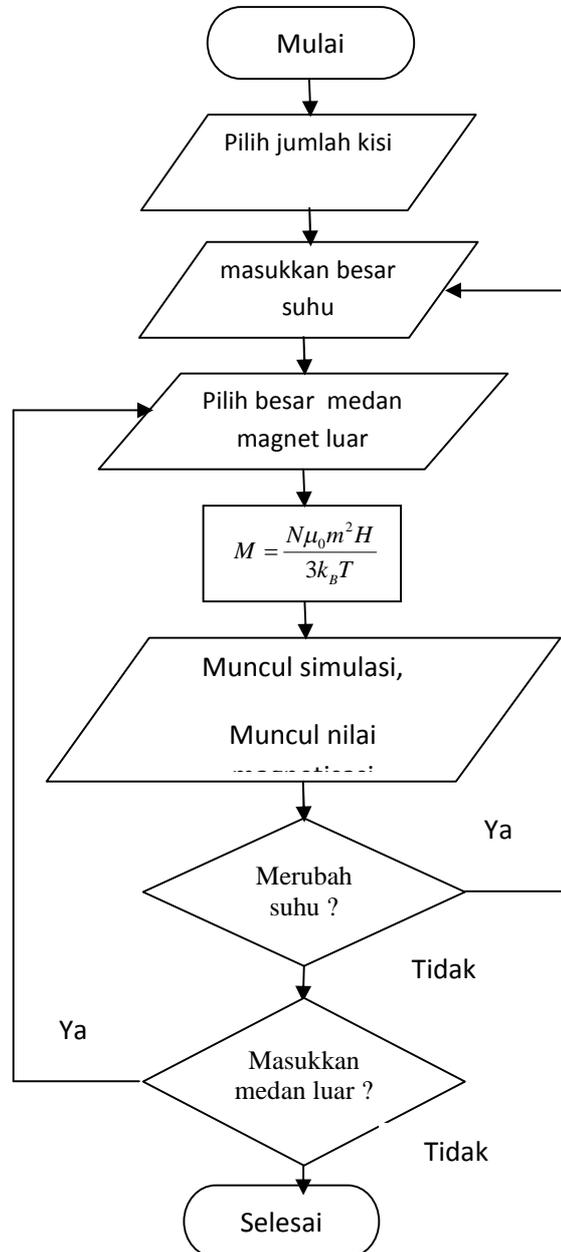
2.1. Simulasi Komputer

Menggunakan bahasa pemograman Pascal dengan kompailer Borland Delphi, maka dibuatlah simulasi komputernya:

1. Pilih jumlah kisi yang diinginkan
2. Inputkan suhu
3. Inputkan medan magnet luar
4. Simulasikan rumus
5. Tampilkan simulasi dan nilai magnetisasi

6. Ulangi langkah 2 untuk menginputkan suhu yang diinginkan
7. Ulangi langkah 3 untuk menginputkan medan magnetik luar yang diinginkan
8. Selesai.

Dalam diagram alir dapat ditulis seperti berikut:



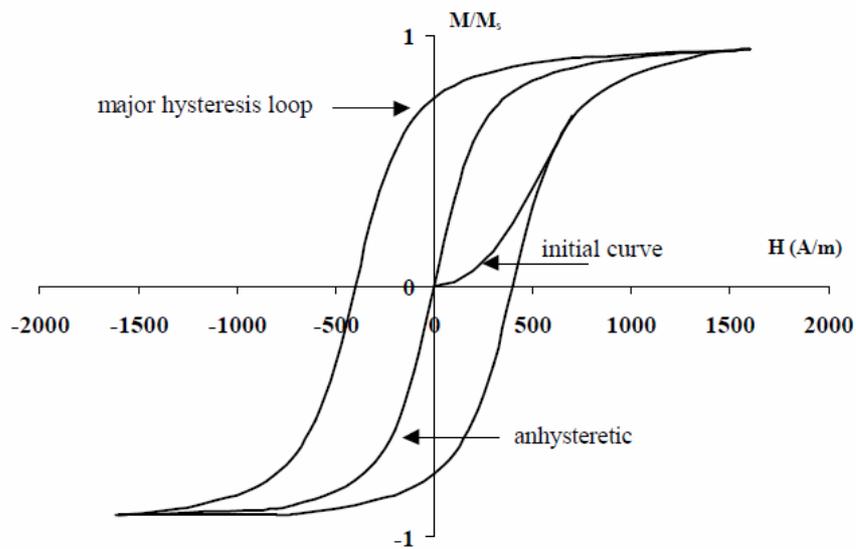
Gambar 3.1. Diagram alir simulasi komputer

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hubungan Magnetisasi Terhadap Medan Luar

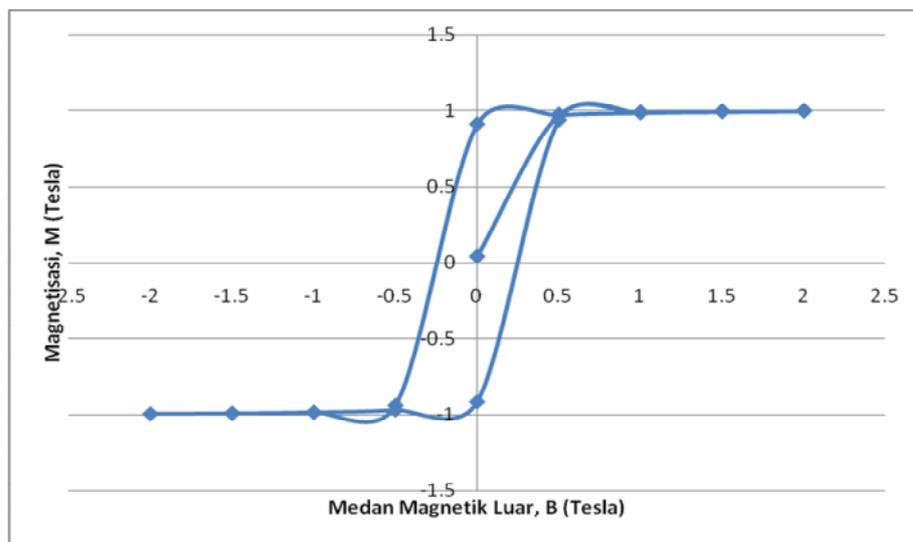
Loop histeresis merupakan karakteristik dari material ferroma-

netik, dimana gambar dibawah ini merupakan kurva perbandingan antara nilai magnetisasi dengan medan luar. Secara literatur sebagai berikut:



Gambar 4. Grafik hubungan antara magnetisasi dengan medan luar. (Jiles, 1998)

Sedangkan Hubungan antara magnetisasi dengan medan luar secara simulasi yang dibuat adalah sebagai berikut:



Gambar 5. Grafik hubungan antara magnetisasi dengan medan luar.

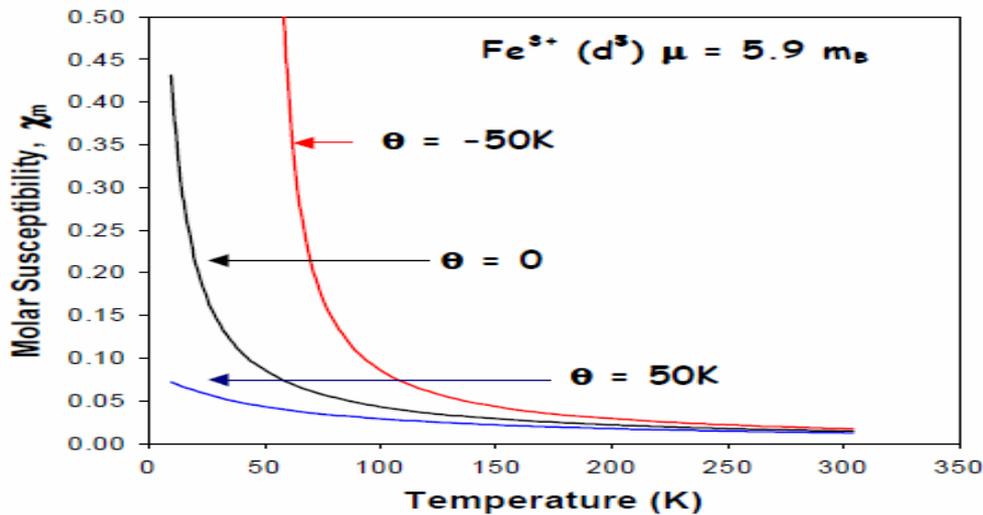
Dari gambar grafik di atas terlihat bahwa pada suhu 2 Kelvin hubungan antara magnetisasi dengan medan magnetik luar membentuk loop histerisis. Bila medan magnetik luar diberikan secara kontinu, maka harga magnetisasi yang dialami material akan membentuk lengkungan magnetisasi hingga mencapai titik saturasi. Kemudian jika nilai

medan magnetik luar diperkecil, maka nilai magnetisasi yang dialami material tidak mengikuti lengkungan magnetisasi semula, melainkan membentuk garis berbeda. Meskipun magnet luarnya nol, tetapi nilai magnetisasinya tetap ada (*Remanance*). Untuk menghilangkan nilai magnetisasi pada material, maka diperlukan medan magnet balik

(*Koersiviti*). Jika medan magnetik balik diperbesar, maka nilai magnetisasi akan berubah arah magnetisasi negatif dan kembali ke titik awal.

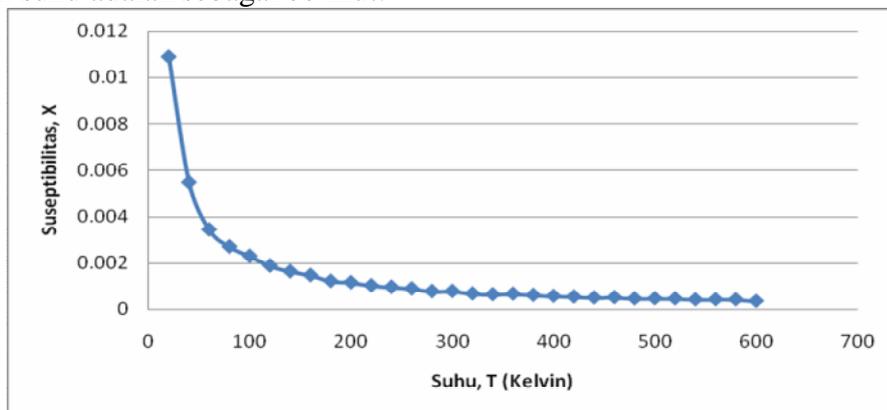
2. Hubungan Antara Suseptibilitas Terhadap Suhu

Hubungan antara suseptibilitas dan suhu menurut grafik Curie-Weiss adalah sebagai berikut:



Gambar 6. Grafik hubungan antara suseptibilitas dengan suhu menurut grafik Curie-Weiss. (Magnetism and Magnetic Materials, 2003)

Secara simulasi program yang telah dibuat, hubungan antara suseptibilitas dengan suhu adalah sebagai berikut:



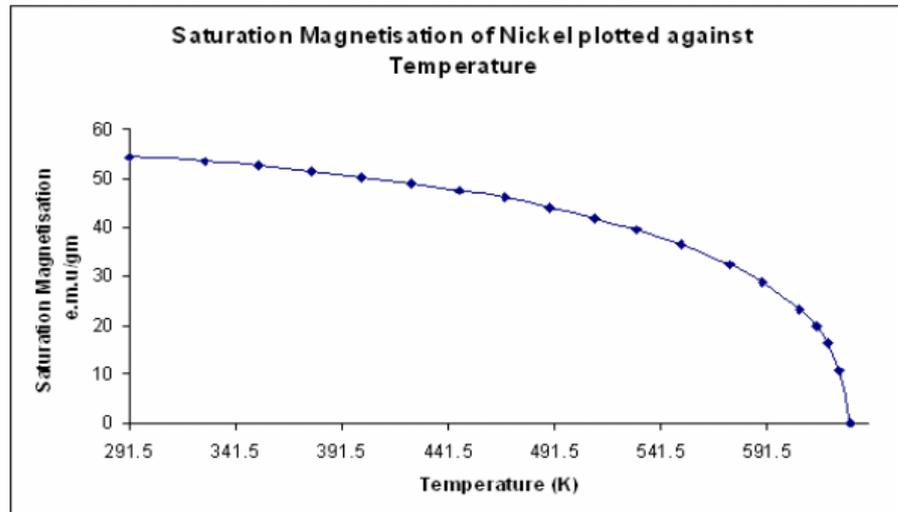
Gambar 7. Grafik hubungan antara suseptibilitas dengan suhu.

Dari grafik di atas terlihat bahwa semakin besar suhu yang diberikan terhadap material akan menyebabkan nilai suseptibilitas material tersebut semakin kecil. Hal ini dikarenakan jika material tersebut mendapatkan suhu yang tinggi maka gerakan random yang dialami oleh partikel-partikel penyusunnya sema-

kin cepat sehingga energi yang dibutuhkan untuk mensejajarkan spin-spin setiap partikel-partikel tersebut akan semakin besar juga. Sehingga ketika suhu yang diberikan melampaui suhu curie nilai suseptibilitas yang dimiliki oleh material tersebut lebih kecil daripada satu.

3. **Hubungan Magnetisasi dengan temperatur adalah sebagai berikut:**

Berdasarkan data dari Weiss dan Fourier, grafik antara magnetisasi



Gambar 8. Grafik hubungan antara magnetisasi dengan suhu.

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa semakin besar suhu yang diberikan ke dalam sistem maka kemampuan momen magnet mensejajarkan diri semakin kecil. Hal ini dikarenakan spin-spin momen magnetik bergerak bebas, sehingga membutuhkan energi yang besar untuk bisa mensejajarkan dirinya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain:

1. Telah dibuat program komputer dengan menggunakan program Delphi untuk menentukan nilai magnetisasi dari material ferromagnetik dengan metode Monte Carlo yang sesuai dengan karakteristik dari material ferromagnetik.
2. Program simulasi komputer ini terdiri dari program menu dan program utama. Program menu digunakan sebagai tampilan

yang memperlihatkan simulasi momen magnet apa bila suhu dan medan luarnya divariasikan, sedangkan program utama digunakan untuk melakukan proses perhitungannya.

3. Hasil yang didapatkan dari program ini sebagai berikut:
 - Keadaan saturasi magnetisasi untuk material ferromagnetik pada suhu 2 Kelvin terjadi pada saat medan luarnya bernilai 1 Tesla.
 - Nilai *remanance* dari material ferromagnetik pada suhu 2 Kelvin adalah 0.9 Tesla.
 - Nilai *koersiviti* dari material ferromagnetik pada suhu 2 Kelvin adalah 0.25 Tesla.
4. Dari hasil program ini diperoleh bahwa semakin besar suhu yang diberikan pada material maka nilai magnetisasi totalnya akan semakin kecil dan semakin besar medan magnetik luar yang diberikan pada material maka

nilai magnetisasinya akan semakin besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Gould, H. (1996), *An Introduction to Computer Simulation Methods*, Addison-Wesley Publishing Company, New York.
- Helmut, F. (2007), *Electronic Materials*, http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/index.html.
- Herdianto, H. (2009), **Pembuatan Piranti Lunak Untuk Menganalisa Sifat Paramagnetik Material Menggunakan Teori Langevin (Skripsi)**, Universitas Riau, Pekanbaru.
- Jiles, D. (1998), *Introduction To Magnetism And Magnetic Materials*, New York.
- Newmman, M.,E.,J, (1999), *Montecarlo Methoden In Statistical Physics*, Oxford University Press, New York.
- Reitz, J.,R. (1993), **Fundations of Electromagnetic Theory**, Addison-wesley publishing company. New York.
- Tause, L. (2005), *Lectures in Paleomagnetism*, <http://earthref.org/MAGIC/books/Tause/2005/>.
- Tipler P., A. (2001), *Fisika Untuk Sains dan Teknik*, Edisi Ketiga, Erlangga, Jakarta.