

PEMBELAJARAN MEDAN MAGNET MENGUNAKAN METODE SIMULASI MODEL ISING 2D

Faradiba
faradibaruslan@gmail.com
Universitas Kristen Indonesia

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan sebagai alternatif pembelajaran untuk materi medan magnet dengan menggunakan metode simulasi Model Ising 2D dengan bahasa *macro* dan dijalankan dengan software ImageJ. Penelitian ini dirancang dengan sistem dengan ukuran kisi 32 x 32, Energi dan magnetisasi diukur sebagai fungsi suhu. Simulasi dilakukan dengan melakukan perubahan temperatur untuk melihat perilaku momen magnet pada sistem. Hasil Penelitian menunjukkan magnetisasi mutlak berada di sekitar nilai 1, yang berarti bahwa seluruh spin berada dalam keadaan homogen. Dengan menaikkan suhu di dekat suhu kritis = 2,3, magnetisasi turun secara drastis menuju nol. Pada daerah suhu rendah, energinya juga rendah. Dengan menaikkan suhu, energi meningkat drastis di dekat suhu kritis tersebut dan akhirnya menuju nol untuk daerah suhu tinggi. Dimana pada keadaan tersebut sistem berubah dari ferromagnetik menjadi paramagnetik.

Kata Kunci : Medan Magnet, Magnetisasi, Energi, Model Ising 2D, Pembelajaran.

ABSTRACT

This research was conducted as an alternative learning for the study of the magnetic field using the 2D Ising Model with simulation method. The programs are written in macro language and ran in ImageJ software. The research of designing a system size namely 32 x 32, energy and magnetization are measured as functions of temperature. Simulation conducted to see the magnetic momen when temprature is changed on the system. It is found that for low temperature regime, the absolute magnetization close to 1, which means tha tall spins are in the homogeneous state. By the increase the temperature close to the critical one = 2,3, the magnetization decrease drastically into zero. For the energy, low temperature regime gives the low energy. By the increase the temperature, the energy increase drastically near the critical temperature, and finally close to zero for high temperature regime. The state of the system is changed from ferromagnetic into the paramagnetic.

Keywords: Magnetic Field, Magnetization, Energy, 2D Ising Model, Learning.

PENDAHULUAN

Medan magnetik termasuk jenis materi pembelajaran yang sulit untuk dipelajari karena bersifat abstrak dan pembelajaran yang dilakukan masih sebatas pada penjelasan konsep yang abstrak dengan metode ceramah dan diskusi. Disamping itu, alokasi waktu yang diberikan sering kali dirasa masih kurang dalam penyelesaian soal yang menggunakan persamaan matematika yang rumit. Pemahaman secara konsep membuat anak didik menjadi cepat merasa bosan dan kurang antusias mengikuti materi tersebut. Sumber bacaan yang tersedia pun belum

cukup berhasil untuk bisa menjelaskan materi secara jelas.

Dari permasalahan tersebut diatas, penelitian ini mencoba untuk memberikan salah satu alternatif solusi yaitu dengan menggunakan media pembelajaran dengan metode simulasi Model Ising 2D. Media pembelajaran ini mampu menjelaskan bagaimana momen magnetik di dalam suatu material dapat berubah. Bagaimana momen magnetik di dalam material tersebut berubah diikuti dengan perubahan variabel temperatur yang diberikan. Media pembelajaran ini juga dapat menjelaskan magnetisasi dan energi yang di peroleh sistem dengan perubahan

yang terjadi pada momen magnet dalam sebuah sistem yang dirancang. Melalui metode simulasi dengan model Ising 2D dapat menjadi salah satu solusi permasalahan tersebut. Dengan metode simulasi materi yang bersifat abstrak dapat divisualisasikan sehingga dapat memotivasi anak didik untuk belajar dan membangun pengetahuannya menjadi lebih mudah untuk dipahami.

Sesuai dengan latar belakang tersebut maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana membuat program simulasi sebagai pembelajaran medan magnet yang inovatif. Penelitian ini dibatasi hanya pada pembuatan dan simulasi listing program dengan memperhatikan magnetisasi dan energi terhadap perubahan temperatur dengan model Ising 2D. Penelitian ini diharapkan dapat menawarkan salah satu alternatif pembelajaran yang inovatif dengan simulasi model Ising 2D untuk pembelajaran medan magnet.

Media Pembelajaran

Keberhasilan pembelajaran sangat ditentukan oleh dua komponen yaitu metode mengajar dan media pembelajaran. Fungsi media dalam proses pembelajaran yaitu untuk meningkatkan rangsangan peserta didik dalam kegiatan belajar (Ali. M, 2005).

Dalam proses pembelajaran, anak didik kurang didorong untuk mengembangkan kemampuan berpikir. Proses pembelajaran di dalam kelas diarahkan kepada kemampuan anak didik untuk menghafal informasi. Akibatnya, ketika anak didik lulus dari sekolah, mereka kebanyakan hanya pintar secara teoritis (Wina Sanjaya, 2009). Dengan demikian, pencapaian proses pembelajaran untuk meningkatkan kualitas pendidikan dapat dimulai dengan model pembelajaran yang kreatif dan inovatif. Model pembelajaran yang kreatif dan inovatif selayaknya didukung dengan kemampuan pendidik dalam penggunaan media pembelajaran.

Pesatnya perkembangan teknologi informasi dan komunikasi sekarang ini banyak dimanfaatkan untuk mendapatkan informasi dengan sangat mudah. Hal tersebut menjadi sebuah keharusan bagi seorang pendidik untuk dapat lebih mengembangkan model pembelajaran yang digunakan. Salah satunya dengan mengembangkan media pembelajaran yang dimiliki

(Hoban dan Ferry, 2006). Tenaga pendidik lebih ditekankan untuk menciptakan pembelajaran yang menyenangkan. Cara pendidik menciptakan suasana kelas akan berpengaruh terhadap respon anak didik dalam proses pembelajaran. Keberhasilan pembelajaran juga tidak lepas dari penggunaan model pembelajaran (Mustami.K, 2009).

Pada proses pembelajaran diperlukan media pembelajaran sebagai pencapaian hasil pembelajaran yang maksimal. Pemanfaatan teknologi informasi berbasis komputer sebagai media pembelajaran sangat sesuai dengan hakikat standar proses pembelajaran.

Kemagnetan Bahan

Berdasarkan sifat kemagnetannya, material magnet dapat diklasifikasikan kedalam diamagnetisme, paramagnetisme dan ferromagnetisme. Diamagnetik adalah bahan yang memiliki medan magnet yang berlawanan dengan medan magnet eksternal. Tidak seperti ferromagnetik, diamagnetik bukanlah magnet permanen. Permeabilitas magnetik kurang dari μ_0 (permeabilitas ruang bebas). Diamagnetik merupakan bahan yang memiliki magnet paling lemah, tetapi medan magnetnya bersifat superkonduktor. Superkonduktor dapat dianggap sebagai diamagnetik sempurna ($\chi_v = -1$), karena mereka menolak semua medan. Diamagnetik untuk setiap medan magnet yang diberikan akan melawan perubahan dari medan magnet luar yang diberikan.

Paramagnetik yaitu, atom-atom tidak simetris dan tidak selaras. Ketika diberi medan magnet, momen magnetik disesuaikan sejajar dengan medan magnet luar yang diberikan (Dekker.A.J, 1958). Ferromagnetik bersifat magnetis meskipun tidak ada medan magnet yang diberikan. Ketika medan magnet tidak ada, materi tetap memiliki magnetisasi spontan yang merupakan hasil dari momen magnetik antar momen magnet spin, untuk ferromagnetik, atom yang simetris dan selaras dalam arah yang sama menciptakan medan magnet permanen (Hall dan Hook, 1994). Faktor Boltzmann memiliki kontribusi besar karena partikel berinteraksi ke arah yang sama. Hal ini yang menyebabkan ferromagnetik memiliki medan magnet yang kuat dan tinggi pada suhu Curie (Palmer, 2007). Di bawah suhu Curie atom yang

selaras menyebabkan magnet spontan pada bahan ferromagnetik, di atas suhu Curie, menjadi bahan yang paramagnetik karena kehilangan momen magnetik yang mengalami transisi fase (Cusack, 1958).

Ferrimagnetik bersifat magnetis dalam walaupun tanpa medan magnet diberikan dan terdiri dari dua spin yang berbeda. Ketika medan magnet tidak ada, materi memiliki magnet spontan yang merupakan hasil dari momen magnetik yaitu, untuk momen magnetik ferrimagnetik satu spin yang sejajar menghadap satu arah dengan besar tertentu dan momen magnetik spin lain sejajar berlawanan arah dengan kekuatan yang berbeda. Sebagai momen magnetik dari besar yang berbeda dalam arah yang berlawanan masih ada magnet spontan dan medan magnet yang dihadirkan (Jullien, 1989). Antiferromagnetik di atas titik kritis mengalami transisi fase dan menjadi paramagnetik. Materi yang memiliki momen magnetik yang sama sejajar dalam arah yang berlawanan sehingga momen magnetik nol dan magnet nol pada semua suhu di bawah titik kritis. Bahan antiferromagnetik bersifat magnetis lemah meskipun ada atau tidaknya medan magnet diberikan (Jullien, 1989).

Sifat kemagnetan bahan berubah ditandai dengan adanya transisi fase. Perubahan sifat kemagnetan tersebut terjadi diakibatkan oleh faktor kenaikan suhu. Seperti perubahan sifat magnet bahan dari ferromagnetik menjadi paramagnetik. Ketika suatu materi dipanaskan dan melewati titik kritis pada suhu, fenomena transisi fase tersebut terjadi. Bahan ferromagnetik kehilangan kemagnetasiannya ketika melewati suhu kritis dan berubah menjadi bahan paramagnetik.

Momen magnet spin pada materi dapat berada pada salah satu dari dua keadaan yaitu momen magnet spin up atau momen magnet spin down. Momen magnet spin up dimana arah momen magnet spin magnetik mengarah ke atas yang bernilai +1 dan sebaliknya momen magnet spin down memiliki arah momen magnet spin ke bawah yang bernilai -1. Momen magnet spin yang berada pada kisi memungkinkan setiap momen magnet spin untuk berinteraksi dengan tetangga-tetangganya. Salah satu metode untuk mengkaji bentuk momen magnet spin

magnetik pada transisi fase adalah model Ising. Model ini memungkinkan identifikasi transisi fase sebagai model sederhana.

Sifat bahan magnetik berubah terhadap suhu. Suhu Curie adalah titik kritis dimana momen magnetik intrinsik dari material tersebut berubah arah. Sebagai contoh, momen magnetik ferromagnetik berubah menjadi paramagnetik di suhu Curie. Suhu yang lebih tinggi membuat magnet lemah sebagai magnet spontan. Hal tersebut terjadi di bawah suhu Curie.

Model Ising 2 Dimensi

Simulasi Model Ising secara matematis dapat menganalisis titik kritis transisi fase pada bahan magnetik. Momen magnet spin berinteraksi dengan tetangga momen magnet spin lainnya dalam struktur. Model Ising dapat memprediksi perilaku mereka satu sama lain (Bertoldi.dkk, 2012). Model ini sangat penting untuk memecahkan dan memahami konsep transisi fase dan pemahaman mengenai magnetisasi dari sifat bahan magnet.

Model Ising menganggap masalah dalam 2 dimensi dan momen magnet spin pada titik-titik kisi sumbu koordinat bisa dalam bentuk momen magnet spin up (+1) dan momen magnet spin down (-1). Konfigurasi kisi persegi dengan dimensi L dan jumlah momen magnet spin sama dengan $N = L \times L$. Dalam bentuk yang paling sederhana interaksi kisaran antara dipol dibatasi ke tetangga terdekatnya. Hal ini menghasilkan Hamiltonian untuk bagian spin i dari bentuk

$$\mathcal{H}_i = -J \sum_{i \neq j} s_i s_j$$

Tanpa medan magnet luar, \mathcal{H} ditentukan oleh interaksi antara sel yang diubah spinnya dengan nilai-nilai spin sel tetangganya (atas, bawah, kiri dan kanan). s_i adalah spin yang diubah, sedangkan s_j adalah spin di sel atas, bawah, kiri dan kanan (tetangga terdekat spin s_i). Pasangan spin antara tetangga terdekat direpresentasikan oleh j sementara s_i dan s_j masing-masing adalah tetangga terdekat spin. Sifat interaksi dalam model ini adalah variabel J (tetapan kopling). Jika variabel J positif berarti bahwa material tersebut memiliki sifat ferromagnetik (kesejajaran paralel) sedangkan tanda negatif akan berarti bahwa bahan

tersebut antiferromagnetik (antiparalel). Nilai (+1) untuk spin up dan (-1) untuk spin down. Lebih lanjut penyederhanaan dibuat dalam J/k_B menjadi sebuah kesatuan.

Tanpa medan magnet luar, Hamiltonian sistem ditentukan oleh interaksi antara sel yang diubah momen magnet spinnya dengan nilai-nilai momen magnet spin sel tetangganya (atas, bawah, kiri dan kanan). s_i adalah momen magnet spin yang diubah, sedangkan s_j adalah momen magnet spin di sel atas, bawah, kiri dan kanan (tetangga terdekat momen magnet spin s_i).

Hal yang paling utama dalam memahami teori ini adalah spin dan momen magnetik. Spin yang merupakan sebuah fenomena kuantum dengan penjelasan yang lengkap dan menyeluruh akan memerlukan aturan kuantum spin dan momentum sudut, faktor-faktor tersebut merupakan komplikasi yang tidak perlu dilakukan. Dengan demikian diperkenalkan sebuah model untuk mencapai hasil yang efisien. Sebuah solusi untuk sebuah model dalam menyederhanakan kompleksitas permasalahan matematis yang tepat sesuai dengan esensi fisika dari sistem. Model Ising sangat efektif dan bahkan baik untuk pemahaman konseptual (Kotze, 2008).

Metode Monte Carlo

Metode pencarian acak adalah suatu metode dimana solusi dicari secara acak dan diulang-ulang sampai dihasilkan solusi yang diharapkan. Misalkan dicari suatu angka antara 0 sampai dengan 100, maka akan diacak angka-angka antara 0 dan 100 sampai didapatkan angka yang dimaksud. Metode ini tampak sangat sederhana, karena hanya diperlukan bagaimana suatu solusi dinyatakan dan kemudian mengacak nilainya hingga diperoleh nilai yang diharapkan dari model solusi yang ada.

Metode Monte Carlo merupakan metode pencarian acak, tetapi dengan beberapa perbaikan, yaitu: tidak semua nilai pada solusi diacak ulang, tetapi dipilih satu nilai saja diantara barisan nilai solusi, dan kemungkinan acak dari setiap kejadian solusi. Bila pada solusi hanya mengandung satu nilai saja maka metode Monte Carlo ini sama dengan metode pencarian acak. Metode Monte Carlo dimungkinkan untuk bisa menyelesaikan masalah untuk kasus model

Ising ini. Sebuah proses yang ditandai dengan proses acak. Algoritma yang digunakan adalah prinsip sampling Metropolis.

Secara simulasi, kasus transisi fase pada bahan ferromagnetik yang dikaji dengan model Ising, dapat diselesaikan dengan menggunakan metode Monte Carlo yang melibatkan algoritma Metropolis. Metropolis, dkk. (1953), menjelaskan algoritma untuk melengkapi teori random dari metode Monte Carlo. Metropolis et.al sepakat bahwa kebanyakan dari sistem di alam tidak terisolasi. Pertukaran energi antara sistem dengan lingkungan akan terjadi hingga diperoleh kesetimbangan antara keduanya. Jika terdapat banyak sistem pada volume V dan terdapat jumlah partikel sebanyak N , kondisi tersebut setimbang pada suhu T , sistem berada pada keadaan s dan memiliki energi E_s , maka probabilitasnya dinyatakan sebagai berikut (Metropolis, 1953)

$$P_s = \frac{1}{Z} e^{-\beta E_s}$$

dengan $\beta = (k_B T)^{-1}$, k_B merupakan konstanta Boltzmann, T adalah suhu dan Z adalah konstanta normalisasi yang dinyatakan sebagai

$$Z = \sum e^{-\beta E_s}.$$

Secara sederhana (Gould, 2006) menyatakan algoritma Metropolis sebagai berikut:

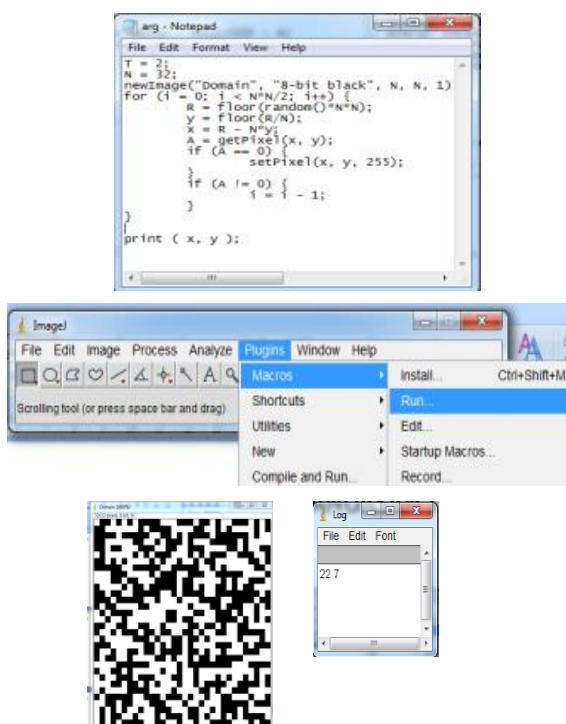
1. Mendefinisikan keadaan awal.
2. Memilih spin yang akan dibalik.
3. Menghitung $\Delta E = E_{Trial} - E_{Old}$, yang merupakan perubahan energi akibat flip yang dilakukan
4. Jika ΔE kurang atau sama dengan nol, maka keadaan baru diterima dengan langsung menuju langkah ke- 8.
5. Jika ΔE bernilai positif, hitung besar faktor Boltzmann $P = e^{-\beta \Delta E}$.
6. Mengeset bilangan random (r) dari interval 0 - 1.
7. Jika $P > r$ maka keadaan diterima, jika tidak maka keadaan sebelumnya yang digunakan.
8. Menentukan besaran fisis yang diinginkan.
9. Mengulangi langkah 2 sampai 8 untuk memperoleh beberapa keadaan.

10. Menentukan rata-rata dari keadaan secara periodik.

Algoritma Metropolis-Hastings adalah yang paling umum digunakan Monte Carlo algoritma untuk menghitung estimasi Model Ising. Untuk model Ising ketika kisi menjadi ferromagnetik, yang berarti semua bagian titik dalam arah yang sama. Dalam kesetimbangan termal energi sistem hanya berfluktuasi dalam rentang kecil. Ini adalah konsep dinamika tunggal spin, yang menyatakan bahwa dalam setiap transisi, hanya akan mengubah salah satu bagian spin pada kisi-kisi atau ukuran sistem.

Pemrograman ImageJ

ImageJ adalah domain program pengolah gambar berbasis Java yang dikembangkan di National Institutes of Health (Collins, 2007). ImageJ dirancang dengan arsitektur terbuka yang menyediakan plugin Java dan macrorecordable (Girish dan Vijayalakshmi, 2004). Makro adalah program sederhana yang mengotomatisasi serangkaian perintah ImageJ. Sebuah makro disimpan sebagai file teks dan dieksekusi dengan memilih perintah menu di toolbar ImageJ.



Gambar 1. Tampilan Log hasil dari program

METODE PENELITIAN

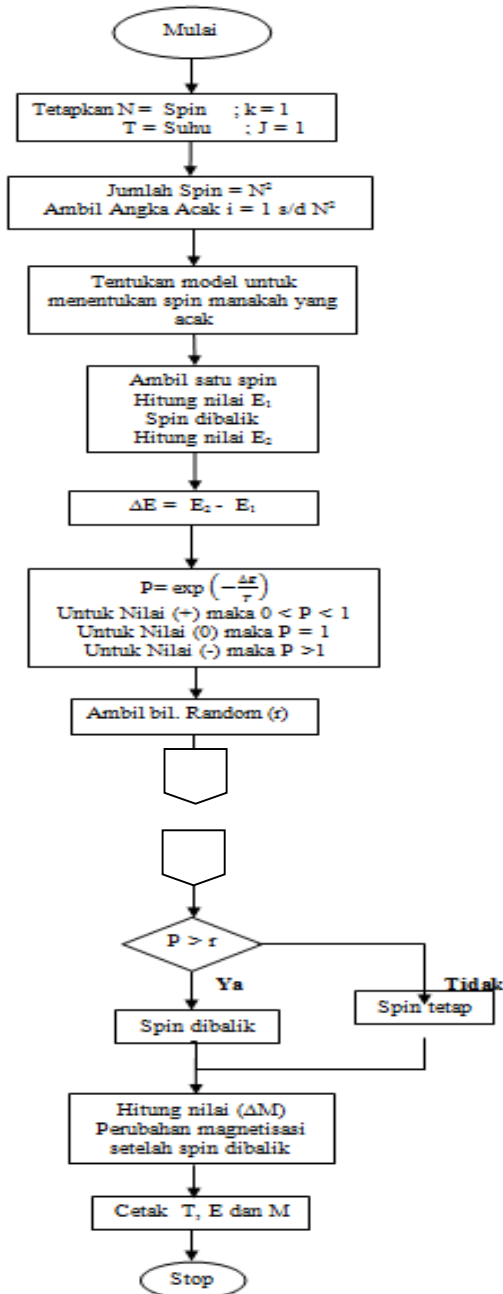
Penelitian ini dilakukan dengan merancang sebuah program sederhana yang dimulai dengan membuat listing program dari sistem. Program ini nantinya akan disimulasikan untuk melihat medan magnet pada sistem. Dimana pada sistem momen magnet spin kita sebar secara acak, Proses perhitungan dilakukan untuk mendapatkan gambaran kecenderungan momen magnet spin yang berubah secara acak terhadap temperatur. Dari keadaan temperatur yang bervariasi dapat terlihat magnetisasi bahan dan energi tiap keadaan yang berbeda secara signifikan.

Pemilihan momen magnet spin secara acak kemudian momen magnet spin dibalik dan dihitung energi baru sesuai dengan model Ising spin. Jika energi baru yang dihasilkan momen magnet spin lebih rendah dibandingkan dengan energi awal maka momen magnet spin dapat dibalik, namun apabila energi lebih yang baru lebih besar dari energi sebelumnya maka dihitung berdasarkan probabilitas spesifik. Apabila bilangan random yang dihasilkan lebih kecil dari maka momen magnet spin dapat dibalik, dan apabila bilangan random lebih besar maka momen magnet spin tetap.

Flowchart Sistem

Tahap simulasi untuk sistem momen magnet spin tanpa medan magnet luar dimulai dengan menetapkan nilai T (temperatur) dan N (jumlah momen magnet spin). Kemudian pilih titik/momen magnet spin secara acak pada kisi dan kemudian dihitung nilai E1 dan E2. Dimana E1 adalah energi interaksi antara 4 tetangga momen magnet spin yaitu kiri, kanan, atas dan bawah. Sedangkan E2 adalah energi interaksi antara 4 tetangga momen magnet spin setelah momen magnet spin tersebut dibalik. Kemudian dihitung ΔE yang merupakan selisih dari E2 dan E1. Untuk nilai positif maka $0 < P < 1$, untuk nilai nol $P = 1$, dan untuk nilai negatif $P > 1$ dimana P adalah nilai probabilitas. Apabila probabilitas lebih besar dari nilai random maka momen magnet spin dibalik, dan sebaliknya apabila P lebih kecil dari nilai random maka momen magnet spin tetap. Kemudian setelah energi diperoleh, maka selanjutnya menghitung nilai

magnetisasi momen magnet spin kemudian diperoleh hasil energi dan magnetisasi untuk setiap temperatur.

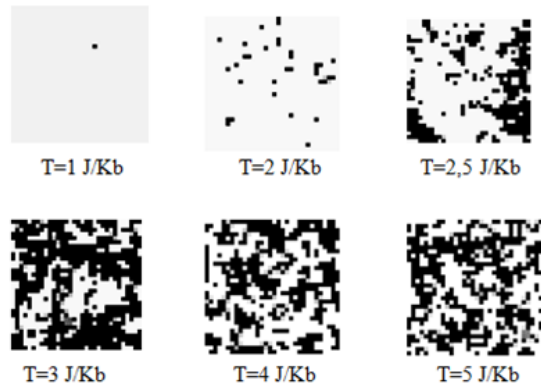


Gambar 2. Flowchart Sistem

HASIL DAN PEMBAHASAN

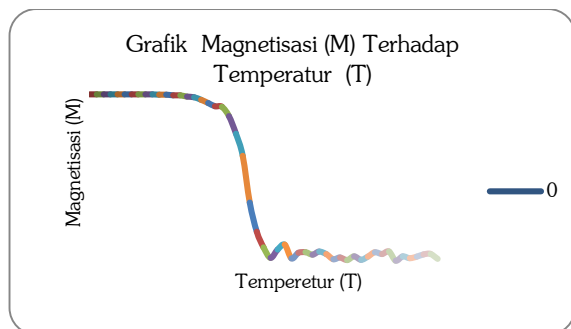
Simulasi dilakukan dengan ukuran kisi 32 x 32. Simulasi dilakukan dimulai dengan temperatur 0 berjalan sampai dengan temperatur 5 dengan skala 0,1 dengan satuan temperatur J/Kb. Tampilan

gambar momen magnet spin pada keadaan awal dipilih sistem yang memiliki arah momen magnet spin searah menyeluruh.



Gambar 3. Keadaan akhir untuk beberapa suhu dari 1000 iterasi dengan ukuran kisi 32x32.

Gambar 3 memperlihatkan bahwa semakin tinggi temperatur pada sistem, ukuran domain semakin kecil dan pada temperatur yang tinggi keadaan momen magnet spin menjadi semakin acak. Secara numerik, dengan semakin meningkatnya temperatur, algoritma metropolis menerima pembalikan momen magnet spin yang antiparalel. Untuk temperatur dibawah suhu kritis terlihat adanya domain-domain membalik seajar dengan spin-spin tetangganya.

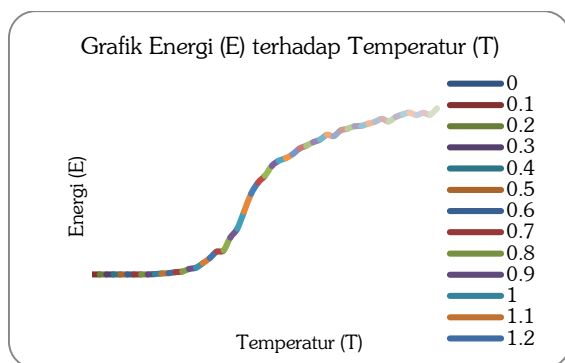


Gambar 4. Grafik Magnetisasi (M) terhadap Temperatur (T) untuk ukuran kisi 32 x 32.

Perubahan magnetisasi untuk setiap ukuran kisi memiliki kesamaan bentuk grafik, hal ini disebabkan oleh pada keadaan awal magnetisasi total maksimal per momen magnet spin bernilai 1, keadaan ini bisa disebut fase ferromagnetik. Dengan kenaikan temperatur yang diberikan, sistem awalnya masih

bertahan pada keadaan awal, namun ketika temperatur bertambah terus menerus, sistem mulai acak dan tidak stabil. Magnetisasi turun drastis pada suhu $2 \text{ J/kB} - 3 \text{ J/kB}$, sistem mengalami ketidakteraturan momen magnet spin dan magnetisasi menurun hingga hampir mencapai nol pada suhu sekitar $2 \text{ J/kB} - 3 \text{ J/kB}$. Grafik nilai mutlak magnetisasi ternormalisasi sebagai fungsi suhu, mulai dari $T = 0,1 \text{ J/kB}$ sampai dengan $T = 5 \text{ J/kB}$ dengan interval $0,1$, cocok dengan yang dihasilkan oleh (Ishita Argawal, 2011), bahwa magnetisasi turun tajam sekitar $T = 2,26 \text{ J/kB}$. Oleh karena magnetisasinya menurun drastis maka sistem keteraturan momen magnet spin menjadi acak. Magnetisasi yang diperoleh sesuai dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya (Ma .J, 2007). Keadaan ini disebut fase paramagnet. dapat dikatakan bahwa pada sistem simulasi yang kita jalankan yang diawali dari fase ferromagnet tersebut telah berubah menjadi fase paramagnet seiring temperatur yang naik secara bertahap.

Hasil energi yang diperoleh berdasarkan temperatur untuk ukuran kisi 32×32 yaitu :



Gambar 5. Grafik Energi (E) terhadap Temperatur (T) untuk Ukuran kisi 32×32 .

Simulasi dilakukan pada suhu $0 - 5$ dengan kenaikan suhu $0,1$ dan nilai $kB = 1$. Berdasarkan grafik energi yang diperoleh, dapat dilihat bahwa energi pada suhu terendahnya (0) diperoleh 2 perubahan fase terjadi mulai suhu sekitar $1 - 2$ kemudian naik secara signifikan sampai suhu $2-3$, selanjutnya naik perlahan hingga pada suhu $3-5$. Hal ini disebabkan oleh penambahan temperatur secara bertahap dilakukan. Awalnya momen magnet spin dalam sistem teratur searah (order), karena pengaruh perubahan

temperatur yang semakin meningkat, momen magnet spin dalam sistem mengalami disorder. Hasil energi tersebut sesuai dengan penelitian sebelumnya (Kotze, 2008). Dari hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa semakin besar temperatur maka energi yang dikenakan pada sistem semakin besar, ketika melewati suhu kritis, energi meningkat secara drastis dan digunakan untuk mengubah fase dari fase ferromagnet menjadi paramagnet.

KESIMPULAN

Pembelajaran dengan menggunakan metode simulasi program dapat menjadi salah satu alternatif media pembelajaran yang kreatif dan inovatif. Materi pembelajaran yang tidak dapat diaplikasikan secara kasat mata atau abstrak sangat sulit untuk bisa dipahami oleh anak didik. Maka dari itu media pembelajaran dengan metode simulasi bisa menjadi salah satu alternatif solusi untuk kasus tersebut.

ACUAN PUSTAKA

- Ali, M, Dkk. (2005). Pengembangan Bahan Pembelajaran untuk Memfasilitasi Belajar Mandiri dalam Mata Diklat Penerapan Konsep Dasar Listrik dan Elektronika di SMK. Laporan Penelitian Research Grant PHK A2. Jurusan Pendidikan Teknik Elektro FT. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Argawal, I. (2011). *Numerical Analysis of 2-D Ising Model, Physics Report*, University of Bonn, Germany.
- Bertoldi, Dkk. (2012), Analytical solution of the mean field Ising model for finite systems. *Journal of Physics: Condensed Matter* .24 (22). 226004.
- Collins, T. J. (2007). ImageJ for microscopy. *BioTechniques*. 43 S1. 25-30.
- Cusack, N. (1958). *The Electrical and Magnetic Properties of Solids*, Green : Longmans.
- Dekker, A, J. (1958). *Solid State Physics*. Macmillan. London.
- Girish,V. & Vijayalakshmi,A. (2004). Affordable image analysis using NIH Image/ImageJ. *Indian Journal Cancer* 41 (1). 47-52.
- Gould, H. Tobochnik, J. & Christian, W. (2006). *An Introduction to Computer Simulation Methods : Application to Physical System*. 3rd, San Fransisco: Pearson Addison Wesley.

- Hall, J.R. & Hook, H.E. (1994). *Solid State Physics* (2nd ed.). Wiley. Chichester.
- Hoban, G dan Ferry, B. (2006). *Inatritional Media and Technologies for Learning*. New Jersey : Prentice Hall.
- Jullien, A. Remi, G. (1989). *The Solid State from Superconductors to Superalloys*. Oxford University Press, Oxford.
- Kotze, J. (2008). *Introduction to Monte Carlo method for an Ising Model of a Ferromagnet*. Diakses Agustus, 2015 dari <http://www.arXiv:0803.0217v1>.
- Ma, J. (2007). *2D Ising Model Simulation*. Department of Physics. Ucdavis.
- Metropolis, N., Arianna, W., Rosenbulth., Marshall N. August H., & Edward, T. (1953). Equation Of State calculation by Fast Computing machines. *Journal of Chemical Physics*. 21 (6), 1087-1092.
- Mustami, K. (2009). Inovasi model-model pembelajaran sains untuk meningkatkan hasil belajar mahasiswa. *Jurnal Lentera Pendidikan* Vol. 12 No. 2:125-137.
- Palmer, J. (2007). *Planar Ising correlations*. Boston: Birkhäuser.
- Sanjaya, W. (2009). *Strategi Pembelajaran Berorientasi Standar Proses Pendidikan*. Jakarta: Kencana.