

SIMULASI HISTERESIS PADA BAHAN FEROMAGNETIK DENGAN MODEL *JILES-ATHERTON*

Ahmad Yani¹, Ridwan² dan Mujamilah²

¹Program Pasca Sarjana, FMIPA - UI

Jl. Salemba Raya No. 4, Jakarta

²Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) - BATAN

Kawasan Puspipstek, Serpong, 15314, Tangerang

ABSTRAK

SIMULASI HISTERESIS PADA BAHAN FEROMAGNETIK DENGAN MODEL *JILES-ATHERTON*. Telah dibuat suatu program simulasi kurva histeresis bahan feromagnetik berdasarkan teori *Jiles-Atherton* (JA) dengan memanfaatkan *genetic algorithm* yang terintegrasi dalam perangkat lunak MatLAB. Validasi dari sistem perhitungan dilakukan dengan menggunakan data dan parameter dari hasil-hasil penelitian terdahulu. Hasil perhitungan dan kurva histeresis yang diperoleh dalam kegiatan ini sangat sesuai dengan data-data seperti yang terdapat di dalam referensi. Pengaruh masing-masing parameter M_s , k , a , dan c terhadap kurva histeresis telah dibahas dalam makalah ini.

Kata kunci : Kurva histeresis magnet, simulasi, *genetic algorithm*, feromagnetik

ABSTRACT

HYSTERESIS SIMULATION ON FERROMAGNETIC MATERIALS BASED ON *JILES-ATHERTON* MODEL. The simulation program for hysteresis curve of ferromagnetic materials has been made based on Jiles-Atherton (JA) theory making used 'genetic algorithm' that has been integrated in the MatLAB software. The calculation procedure has been validated by using available data and parameter resulted by others researcher before. The calculation and hysteresis curve results in this work agreed very well with the data on available literature. The effects of each parameters M_s , k , a , and c to the hysteresis curve has been discussed in this paper.

Key words : Magnetic hysteresis curve, simulation, genetic algorithm, ferromagnetic

PENDAHULUAN

Simulasi histeresis pada bahan feromagnet memainkan peran penting dalam berbagai penerapan teknologi. Kualitas model histeresis diukur dari kesesuaian hasil eksperimen dengan simulasi. Kesulitan umum dalam pemodelan kurva hysteresis berhubungan dengan banyak kemungkinan seperti sejarah sampel. Sejarah sampel disini adalah kondisi magnetisasi karena pengaruh mekanik dan lingkungan seperti suhu lingkungan.

Berdasarkan tingkat ketelitiannya pemodelan hysteresis magnetik dapat dibagi menjadi tiga kelompok besar. Kelompok pertama mendekati masalah hysteresis dari sudut pandang mekanika kuantum, tingkat ini memiliki ketelitian yang paling tinggi yaitu sampai ke tingkat atom. Kelompok kedua menggunakan analisis mikromagnetik dengan ketelitian hingga tingkat domain (satu domain terdiri dari lebih kurang 10^{12} atom hingga 10^{15} atom) untuk meneliti masalah hysteresis. Kelompok ketiga memiliki tingkat akurasi yang paling rendah menggunakan analisis makromagnetik yang didasarkan pada prinsip-prinsip fisika dan

model-model yang mengikuti hubungan *input-output* yang nonliniar.

Model *Jiles-Atherton* (JA) mulai dikenal sejak tahun 1984, ketika D.C. Jiles dan D.L. Atherton mempublikasikan jurnal mereka dengan judul *Theory of ferromagnetic hysteresis* pada *Journal on Magnetism and Magnetic Materials*. Pada jurnal tersebut mereka membagi magnetisasi menjadi dua komponen yaitu magnetisasi *reversibel* akibat rotasi domain dan magnetisasi *irreversibel* karena adanya pergerakan domain *wall*.

HISTERESIS PADA BAHAN FEROMAGNET

Histeresis adalah suatu sifat yang dimiliki oleh sistem dimana sistem tidak secara cepat mengikuti gaya yang diberikan kepadanya, tetapi memberikan reaksi secara perlahan, atau bahkan sistem tidak kembali lagi ke keadaan awalnya.

Bahan feromagnetik memiliki momen magnetik spontan walaupun berada pada medan magnet eksternal nol. Keberadaan magnetisasi spontan ini menandakan bahwa *spin* elektron dan momen magnetik bahan feromagnetik tersusun secara teratur.

Cara yang paling umum untuk menyatakan magnetisasi *bulk* dari bahan feromagnetik adalah dengan memetakan induksi magnetik, B untuk kuat medan magnet eksternal, H yang berbeda-beda. Cara lain adalah dengan memetakan magnetisasi bahan, M untuk kuat medan magnet eksternal, H yang berbeda-beda. Kedua cara tersebut memberikan informasi yang sama, karena antara B, M dan H memenuhi persamaan (1).

$$B = \mu_0(H + M) \dots\dots\dots (1)$$

Informasi yang diperoleh dari kurva histeresis magnetik berupa magnetisasi jenuh, magnetisasi remanen, koersivitas dan permeabilitas atau suseptibilitas.

MODEL JILES ATHERTON

Model *Jiles-Atherton* didasarkan pada pergerakan domain *wall* dan rotasi domain *wall* pada bahan feromagnet. Komponen magnetisasi dapat dibagi menjadi dua komponen yaitu magnetisasi *reversibel* dan magnetisasi *irreversibel*. Magnetisasi *reversibel* berhubungan dengan domain *wall bending* dan magnetisasi *irreversibel* berhubungan dengan pergerakan domain *wall* akibat efek *pinning*. Magnetisasi total adalah hasil penjumlahan magnetisasi *reversibel* (M_{rev}) dan magnetisasi *irreversibel* (M_{irr}).

$$M = M_{rev} + M_{irr} \dots\dots\dots (2)$$

Sedangkan magnetisasi *reversibel* berbanding lurus dengan selisih magnetisasi *anhysteresis* dengan magnetisasi *irreversibel*.

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \dots\dots\dots (3)$$

Magnetisasi *anhysteresis* adalah fungsi *Langevin* yang telah dimodifikasi dengan memperhatikan adanya *coupling* diantara momen magnet yang berperilaku seperti medan magnet kuat yang berusaha menyearahkan momen magnet di dalam domain. Sehingga persamaan kuat medan magnetik eksternal diperbaharui menjadi kuat medan efektif.

$$H_e = H + \alpha M \dots\dots\dots (4)$$

Persamaan Magnetisasi *anhysteresis* dinyatakan dengan

$$M_{an} = M_s \left[\coth\left(\frac{H_e}{a}\right) - \left(\frac{a}{H_e}\right) \right] \dots\dots\dots (5)$$

Magnetisasi *irreversibel* dinyatakan ke dalam suku magnetisasi *anhysteresis* dan kuat medan efektif dan dinyatakan ke dalam persamaan diferensial orde satu.

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{(M_{an} - M_{irr})}{\delta k - \alpha(M_{an} - M_{irr})} \dots\dots\dots (6)$$

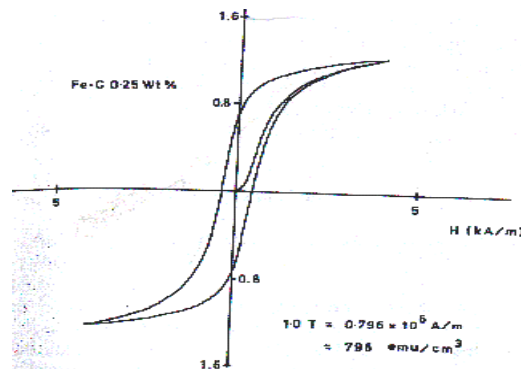
Secara lengkap model *Jiles-Atherton* dapat dituliskan ke dalam bentuk :

$$\frac{dM}{dH} = \delta_M (1 - c) \frac{(M_{an} - M)}{\delta k(1 - c) - \alpha(M_{an} - M)} + c \frac{dM_{an}}{dH_e} \dots\dots (7)$$

dengan

$$\delta_M = \begin{cases} 0, & \text{jika } dH/dt < 0 \text{ dan } M_{an} - M \geq 0 \\ 0, & \text{jika } dH/dt > 0 \text{ dan } M_{an} - M \leq 0 \\ 1, & \text{selain dari itu} \end{cases} \dots\dots (8)$$

Apabila persamaan (7) diimplementasikan ke dalam program komputer maka akan diperoleh model *loop hysteresis* berbentuk *sigmoid* seperti pada Gambar 1. Jika parameter pada model JA diubah maka model tersebut dapat digunakan untuk meramalkan magnetisasi pada bahan *soft* magnetik.



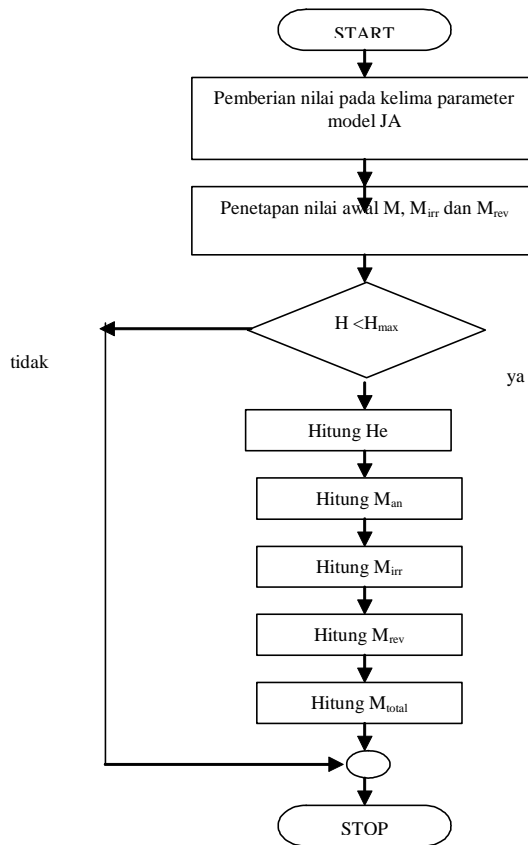
Gambar 1. Kurva *hysteresis* (diambil dari D.C. Jiles and D.L. Atherton [1])

Seperti terlihat dari persamaan (7) terlihat bahwa pada model *Jiles-Atherton* terdapat 5 parameter yaitu α , a, c, k dan M_s .

- α : Kuat interaksi domain
- a : Aspek termal dan diperkenalkan oleh Langevin ketika mendefinisikan perilaku *anhysteresis*
- c : Komponen magnetisasi reversibel
- k : Kerapatan *pinning site*
- M_s : Magnetisasi jenuh

IMPLEMENTASI KE DALAM PROGRAM MATLAB

Sebuah program komputer dibuat dengan *MATLAB* untuk mensimulasikan gejala



Gambar 2. Diagram alir model JA

histeresis pada bahan feromagnetik. Program itu memilah komponen magnetisasi *irreversibel* dan magnetisasi *reversibel*, lalu menjumlahkannya menjadi magnetisasi total. Secara skematis algoritma penyelesaian numeris dari persamaan 7 di atas.

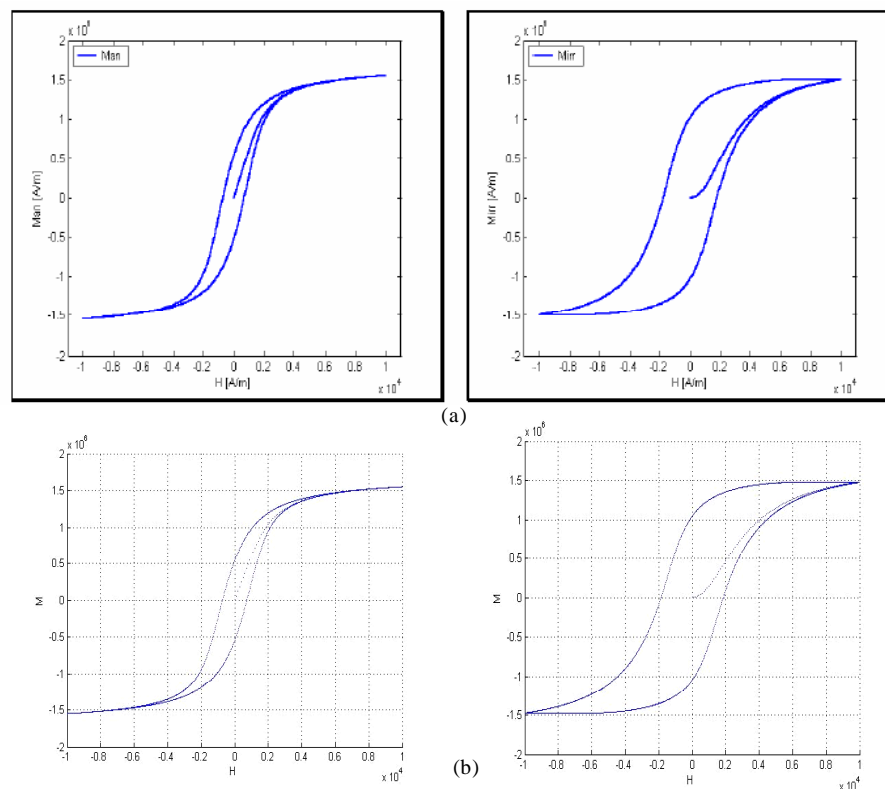
VALIDASI MODEL JA

Direproduksi kurva M-H yang terdapat pada original paper dibuat dengan menggunakan parameter yang terdapat pada makalah tersebut. Gambar 3.a dan Gambar 3.b. menunjukkan kurva M-H pada original paper dan kurva hasil reproduksi dengan menggunakan program *MATLAB*.

Berikut ini adalah kedua gambar tersebut, Gambar 3.a memperlihatkan kurva M-H yang terdapat pada *original paper*, sedang Gambar 3.b memperlihatkan kurva hasil reproduksi dengan menggunakan persamaan 7.

Dengan membandingkan kedua gambar tersebut terlihat bahwa kedua gambar memiliki kecocokan. Setelah itu barulah kita dapat meyakini bahwa program *MATLAB* yang dibuat dapat digunakan untuk mensimulasikan model JA

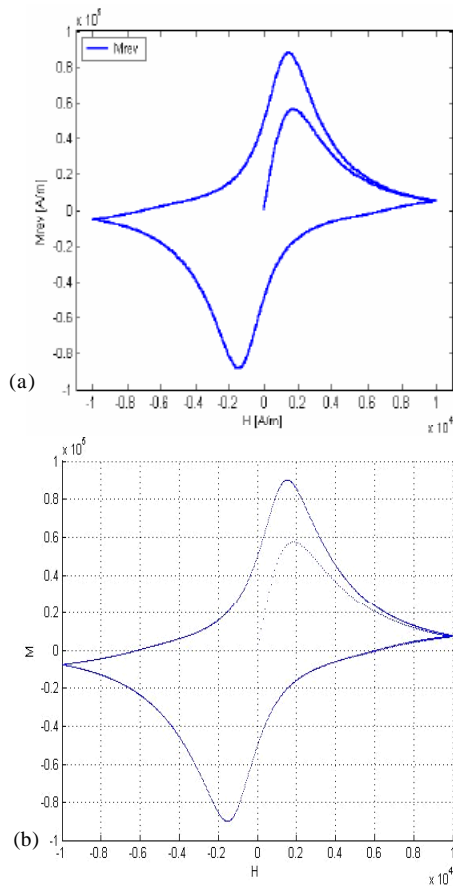
Sebagai pembanding lainnya digunakan penelitian yang dilakukan oleh *Miouat Azzouz* [2]. *Azzouz* memilah magnetisasi *anhysteresis*, *irreversibel* dan *reversibel*, lalu dibuat grafik hasil plot M dengan H. Kurva pada penelitian ini maupun *Azzouz* menggunakan



Gambar 3 . Kurva Magnetisasi anhysteresis dan magnetisasi irreversibel: (a) Azzouz, (b) penulis

parameter yang sama, yaitu $M_s = 1,7 \times 10^6$ A/m, $k = 2000$ A/m, $\alpha = 0,001$, $a = 1000$ A/m dan $c = 0,1$. Hasil perbandingan antara kurva yang dihasilkan oleh Azzous dengan yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 3.

Dari gambar di atas terlihat bahwa kurva magnetisasi *anhysteresis* baik yang diperoleh oleh Miout Azzouz dan yang saya peroleh pada penelitian ini adalah sama, sedangkan untuk kurva magnetisasi *reversibel* dapat dilihat pada Gambar 4. Pada gambar itu juga terlihat bahwa kurva magnetisasi *reversibel* yang diperoleh tidak berbeda dengan yang didapatkan oleh Miout Azzouz.

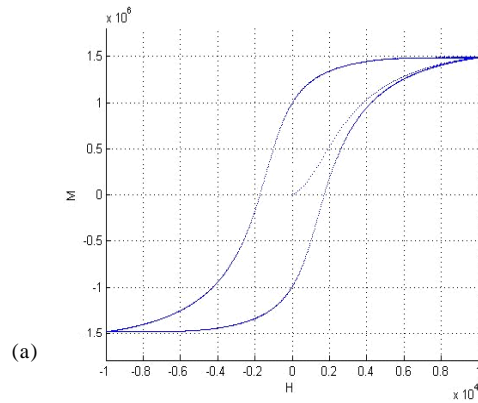


Gambar 4. Magnetisasi Reversibel (a) Azzouz ; (b) Penulis

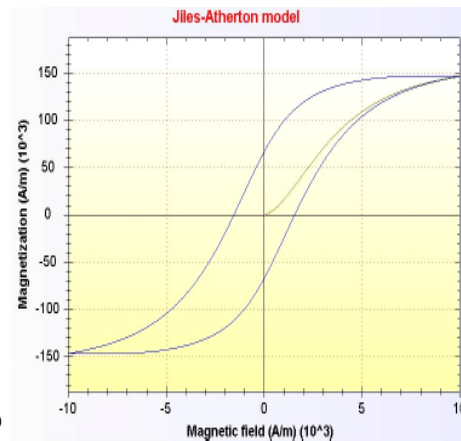
Sebagai pendukung maka program untuk mensimulasikan model JA yang digunakan pada penelitian ini sudah tepat, sehingga dilakukan perbandingan lebih lanjut dengan program *hystersoft* yang dibuat oleh Petru Andrei dan dapat *download* dari situs <http://www.eng.fsu.edu/~pandrei/HysterSoft/index1.html>. Hasil perbandingan disajikan pada Gambar 5 yang menunjukkan kesesuaian yang baik.

Pengaruh Tiap Parameter Pada Kurva Hysteresis

Masing-masing parameter pada model JA memberikan pengaruh pada kurva hysteresis secara



(a)



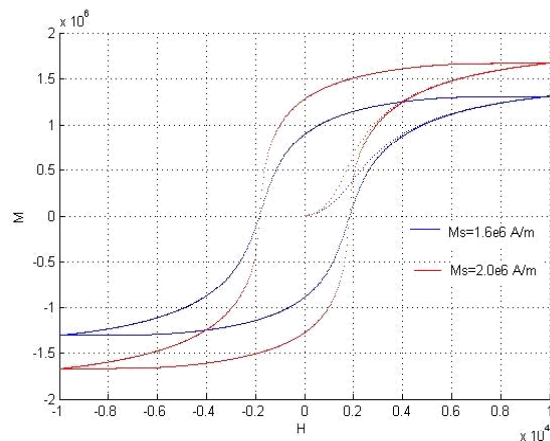
(b)

Gambar 5. Perbandingan kurva *hysteresis* (a) Penulis; (b) *Hystersoft*.

keseluruhan. Pada bahasan berikut akan dianalisis pengaruh tiap-tiap parameter pada bentuk kurva hysteresis yang dapat diidentifikasi sebagai kuat medan koersif (H_c), magnetisasi remanen (M_R) dan magnetisasi maksimal (M_m).

Pengaruh Parameter M_s

Pada Gambar 6 diperlihatkan dua kurva *hysteresis* dengan keempat parameter k , α , a dan c sama, sedangkan M_s berbeda. Dari gambar tersebut terlihat



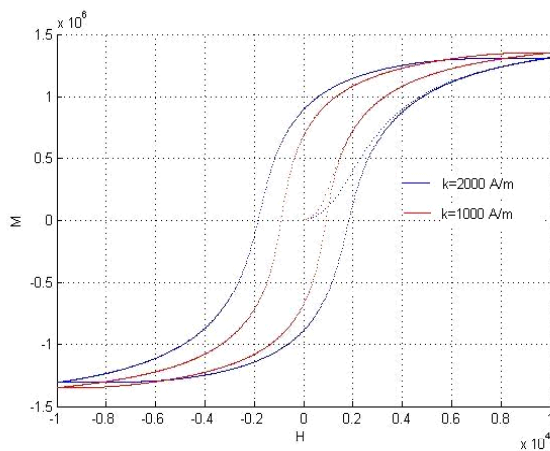
Gambar 6. Pengaruh parameter M_s pada kurva *hysteresis*.

Simulasi Histeresis pada Bahan Feromagnetik dengan Model Jiles-Atherton (Ahmad Yani)

bahwa magnetisasi maksimal dan magnetisasi remanen untuk parameter $M_s = 2,0 \times 10^6$ A/m akan bernilai lebih besar daripada parameter dengan $M_s = 1,6 \times 10^6$ A/m. Sedangkan kuat medan koersif untuk kedua kurva *hysteresis* tersebut adalah sama.

Pengaruh Parameter k

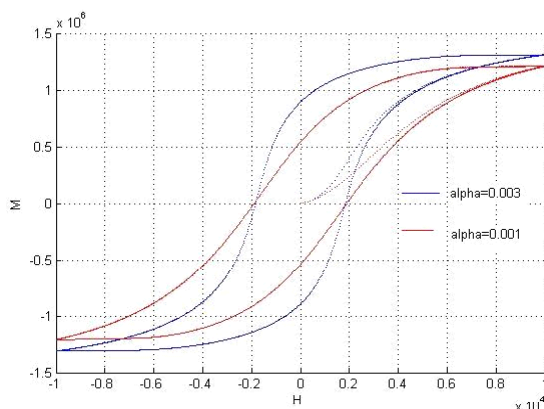
Pengaruh parameter k pada bentuk kurva *hysteresis* adalah pada kuat medan koersif, magnetisasi maksimal dan magnetisasi remanen. Kuat medan koersif dan magnetisasi remanen mengalami kenaikan apabila parameter k bertambah besar, sedang magnetisasi maksimal mengalami penurunan kecil jika parameter k dinaikkan seperti terlihat pada Gambar 7



Gambar 7. Pengaruh parameter k pada kurva *hysteresis*

Pengaruh Parameter α

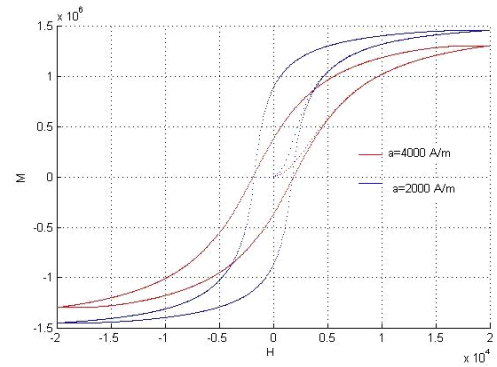
Pengaruh parameter α pada bentuk kurva histeresis ditunjukkan pada Gambar 8. Peningkatan nilai alpha akan mengakibatkan kenaikan magnetisasi maksimum, magnetisasi remanen dan suseptibilitas, sedangkan kuat medan koersif bertambah sedikit.



Gambar 8. Pengaruh parameter α pada kurva *hysteresis*

Pengaruh Parameter a

Parameter a berkaitan dengan aspek termal dan pertama sekali diperkenalkan oleh Langevin untuk

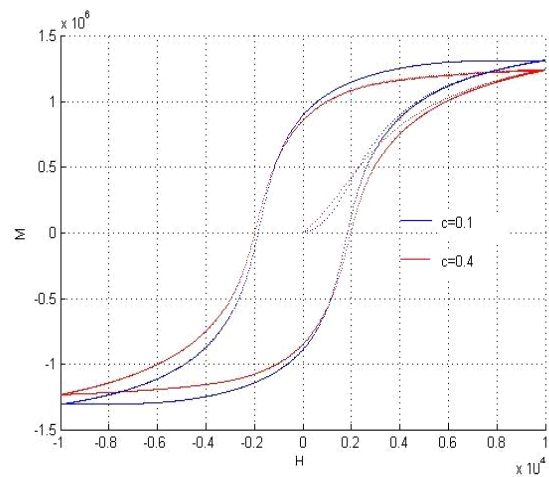


Gambar 9. Pengaruh parameter a pada kurva *hysteresis*

menggambarkan kurva anhisteresis. Apabila nilai a bertambah akan mengakibatkan suseptibilitas, magnetisasi remanen dan magnetisasi maksimum berkurang, sedangkan kuat medan koersif mengalami peningkatan sedikit.

Pengaruh Parameter c

Parameter c merupakan parameter yang menunjukkan kontribusi magnetisasi *reversibel* terhadap magnetisasi total. Pada Gambar 10 terlihat bahwa semakin besar nilai c maka magnetisasi maksimum dan magnetisasi remanen akan menurun, kuat medan koersif akan mengalami sedikit penurunan.



Gambar 10. Pengaruh parameter c pada kurva *hysteresis*

KESIMPULAN

Model JA memuat perubahan magnetisasi irreversible karena perpindahan *domain wall* dan perubahan magnetisasi reversible karena *bending domain wall* dan dinyatakan ke dalam persamaan diferensial orde satu.

Program komputer untuk mensimulasikan *hysteresis* model JA telah berhasil dibuat dengan MATLAB. Parameter model JA yaitu M_s , k, α , a dan c memiliki pengaruh pada bentuk kurva histeresis. Kenaikan nilai M_s akan mengakibatkan peningkatan

magnetisasi maksimum dan magnetisasi remanen, sedang kuat medan koersif tetap. Apabila k bertambah besar, magnetisasi remanen dan kuat medan koersif juga bertambah, sedang magnetisasi maksimum mengalami penurunan sedikit. Jika parameter a bertambah maka magnetisasi remanen, magnetisasi maksimum, suseptibilitas dan kuat medan koersif juga turut bertambah. Pertambahan nilai a akan berakibat pada penurunan nilai magnetisasi remanen, magnetisasi maksimum dan suseptibilitas sedang kuat medan koersif mengalami peningkatan sedikit. Jika parameter c bertambah besar akan memberikan pengaruh pada penurunan nilai magnetisasi remanen, magnetisasi maksimum dan kuat medan koersif, sedang suseptibilitas cenderung tetap.

DAFTARACUAN

- [1]. JILES, D.C; ATHERTON, D.L., *Magnetism Mag. Matter*, **61**, (1986) 48-60
- [2]. A Practical Solution to the Scalar Jiles-Atherton Model, for Ferromagnetism of Soft Magnetic Materials at Low Fields
- [3]. Efficient Mixed-Domain Behavioural Modeling of Ferromagnetic Hysteresis Implemented in VHDL-AMS
- [4]. HDL Models of Ferromagnetic Core Hysteresis Using Timeless Discretisation of the Magnetic Slope