STUDI TEORITIK EFEK INTERAKSI ANTAR BUTIR UKURAN BERVARIASI TERHADAP SIFAT KEMAGNETAN MAGNET PERMANEN

Doansi Tarihoran dan Azwar Manaf
Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Indonesia
Kampus Baru UI, Depok 16424
E-mail: doansi@telkom.net, azwar@makara.cso.ui.ac.id

ABSTRAK

STUDI TEORITIK EFEK INTERAKSI ANTAR BUTIR UKURAN BERVARIASI TERHADAP SIFAT KEMAGNETAN MAGNET PERMANEN. Teori Stoner-Wohlfarth, SW menunjukkan deviasi yang sekitar 30-40% dibandingkan dengan hasil pengukuran bahan magnet permanen dengan butir berukuran nanometer. Hal ini disebabkan karena teori ini mengabaikan faktor interaksi antar butir. Dalam penelitian ini dilakukan modifikasi teori SW dengan memperhitungkan efek interaksi antar butir. Modifikasi dilakukan dengan mengasumsikan bahwa energi interaksi yang dimiliki sebuah butir berdomain tunggal berbentuk ellipsoidal terfokus di tepi butir. Sedangkan butir SW dalam model perhitungan ini hanyalah sebuah balok didalam butir dengan semua titik sudut balok berada di kulit butir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efek interaksi menyebabkan polarisasi remanen meningkat drastis diiringi dengan penurunan medan koersif mulai saat butir berukuran kurang dari 0,2 kali ukuran awal butir sudah berdomain tunggal. Untuk material dengan fasa $Nd_2Fe_{14}B$ nilai optimal medan koersif dan polarisasi remanen yang memberikan produk energi maksimum,$(BH)_{max}$ tertinggi terjadi pada material dengan ukuran butir sekitar 5nm. Secara kualitatif terdapat kesesuaian antar hasil perhitungan dan pengukuran.

Kata kunci : Teori Stoner-Wohlfarth, fasa $Nd_2Fe_{14}B$, ukuran butir

ABSTRACT

STUDI TEORITIK EFEK INTERAKSI ANTAR BUTIR UKURAN BERVARIASI TERHADAP SIFAT KEMAGNETAN MAGNET PERMANEN. Stoner-Wohlfarth theory, SW shows a deviation around 30-40% to the measurement result of a permanent magnetic material with nanometer-sized grains. This is caused by this theory neglecting the interacting grain factor. This research modifies SW theory by calculating the grain interacting effect. The modification is made by assuming the interacting energy of a mono-domain grain has ellipsoidal shaped focused at the edge of the grain. SW grain in this calculation model is a box-shaped in a grain with edges of the box placed in the skin's grain. The result shows that interacting effect make remanen polarization increasing drastically and coercive field value decreasing when grain's size reaches 20% of size of the first mono-domain grain. For material with $Nd_2Fe_{14}B$ phase, the optimum coercive field value and remanen polarization that producing maximum product energy, $(BH)_{max}$ obtained in a material with 5 nanometer-size grains. Qualitatively there is an appropriate result between the calculation and measurement.

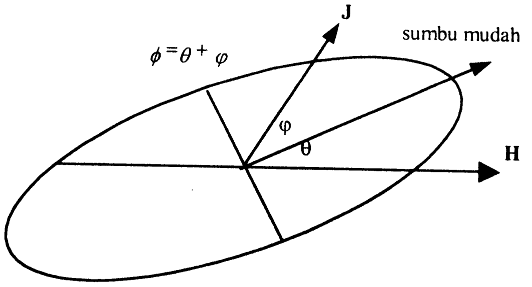
Key words : Stoner-Wohlfarth theory, $Nd_2Fe_{14}B$ phase, grains size

PENDAHULUAN

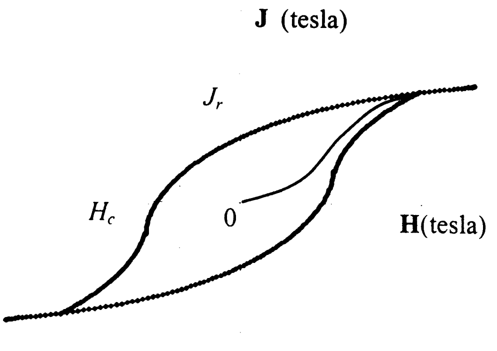
Teori Stoner-Wohlfarth, SW dengan asumsinya mampu menjelaskan proses magnetisasi dari sudut pandang teoritis [1]. Teori SW menjadi acuan dalam eksperimen bahan magnet permanen sampai sekitar tahun 80-an karena hasil pengukuran untuk berbagai material ferromagnet menunjukkan konsistensi terhadap teori SW. Dalam teori SW diasumsikan bahwa-bahan magnet permanen terdiri dari butir-butir berdomain tunggal dan memiliki sumbu mudah tunggal, Gambar 1. Antar butir tidak ada interaksi (*non-interacting particle*). Kesimpulan dari teori SW adalah besar polarisasi remanen, J_r dan medan coercive, H_c bahan yang dimagnetkan tidak akan lebih dari setengah nilai idealnya. Teori SW menghasilkan loop histerisis polarisasi, **J** terhadap medan luar, **H** untuk material magnet permanen, Gambar 2. Namun akhir-akhir ini proses pembuatan magnet permanen semakin canggih sehingga dapat dihasilkan fasa magnet dengan ukuran butir yang luar biasa kecil, skala nanometer (*nanocrystalline*). Dalam kasus semacam ini teori SW menunjukkan deviasi yang cukup besar dikarenakan interaksi antar butir yang diabaikan. Ternyata hampir seluruh hasil eksperimen menunjukkan nilai H_c

Volume 3 No. 2, Pebruari 2002, hal : 99 - 101
ISSN : 1411-1098

menyimpang sebesar 30% sampai 40% dari nilai teori SW dan juga nilai J_r melampaui nilai polarisasi remanen maksimum teori SW[2-4]. Hal ini menunjukkan bahwa sifat kemagnetan sangat dipengaruhi oleh ukuran butir. Untuk memahami hasil pengukuran material nanokristal tersebut maka dirasa perlu untuk memodifikasi asumsi-asumsi yang terdapat pada teori SW. Pada penelitian ini dikenalkan suatu model analitik sederhana yang melibatkan faktor interaksi butir karena efek struktur berskala



Gambar 1. Model vektor polarisasi J dan H pada saat magnetisasi[1]



Gambar 2. Kurva loop hysterisis J *versus* H[1, 5]

nanometer.Penelitian ini menghitung secara teoritik pengaruh interaksi antar butir bahan magnet permanen terhadap sifat kemagnetan.

METODA PENELITIAN

Dalam penelitian ini penulis mengasumsikan bahwa ada perubahan bentuk butir karena perubahan ukuran. Perubahan ini memberikan implikasi terhadap perubahan energi anisotropi bentuk butir. Dengan perkataan lain energi anisotropi bentuk menjadi bergantung kepada perubahan ukuran butir. Fraksi butir ditepi memiliki energi untuk berinteraksi dengan fraksi butir tetangganya agar keadaannya tetap stabil. Energi interaksi ini akan semakin besar jika jumlah fraksi yang berinteraksi semakin besar. Penulis mengusulkan bahwa jika balok didalam ellipsoidal dimana titik-titik sudut balok menyinggung sisi dalam ellipsoidal maka ruang yang kosong (volume inteaksi) merupakan fraksi yang berinteraksi dengan tetangganya. Energi total sistem diberikan oleh persamaan:[1, 6]

$$E_T = E_A + E_D + E_i + E_H$$
$$= K_1 sin^2(j) + K_2 sin^4(j) + 0,5 J_s^2 [N_a sin^2(j) + N_c cos^2(j)] + k_i F(D) J_s^2 cos^2(j_i) - H J_s cos(f) \quad \text{..........(1)}$$

dengan :
E_A merupakan energi anisotropik kristal, K_1 dan K_2 adalah konstanta anisotropi kristal, E_D adalah energi faktor bentuk (energi demagnetisasi), N_a dan N_c adalah konstanta faktor bentuk butir pada sumbu a dan sumbu c ellipsoid, E_i adalah energi interaksi antar butir, E_H adalah energi medan luar K_i dan $F(D)$ adalah konstanta interaksi dan fungsi faktor interaksi serta J_s adalah polarisasi total.

Secara umum, besarnya energi interaksi antar butir dinyatakan dengan:

$$E_i = F(D) \Sigma J_i J_k \quad \text{..........(2)}$$

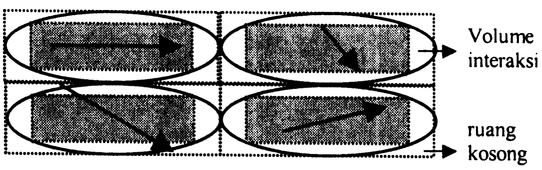
Dimana *F(D)* merupakan fungsi fraksi unit sel total yang saling berinteraksi sebagai fungsi perubahan ukuran rata-rata butir. Sedangkan $\Sigma J_i . J_k$ merupakan kerapatan energi interaksi butir ke-i dengan butir ke-k, nilai dot produk tersebut menjadi $\Sigma J_i . J_k = \Sigma k_i J_s^2 \cos^2(\varphi_i)$. Dalam persamaan tersebut k_i merupakan konstanta interaksi yang diperoleh dari syarat batas awal dan akhir. Jadi energi interaksi yang dimiliki sebuah butir menjadi:

$$E_i = k_i F(D) J_s^2 \cos^2(\varphi_i) \quad \text{..........(3)}$$

Fungsi fraksi interaksi untuk jumlah butir yang berubah dari N_0 menjadi N :

$$F(D) = \frac{1}{6}(f_V - f_K)\int_{N_0}^{N}\frac{dN}{N} = \frac{1}{6}(f_V - f_K)\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) \quad \text{..........(4)}$$

Dalam persamaan tersebut $f_V = 0{,}632447$ dan $f_k = 0{,}476401$ berturut-turut merupakan fraksi volume jumlah unit sel yang berinteraksi (fraksi volume interaksi) dan fraksi ruang kosong seperti tampak pada Gambar 3. Nilai f_V merupakan perbandingan volume ruang interaksi dalam satu butir terhadap volume butir atau sama dengan selisih antara volume ellipsoidal dengan volume balok dalam ellipsoidal terhadap volume ellipsoidal.

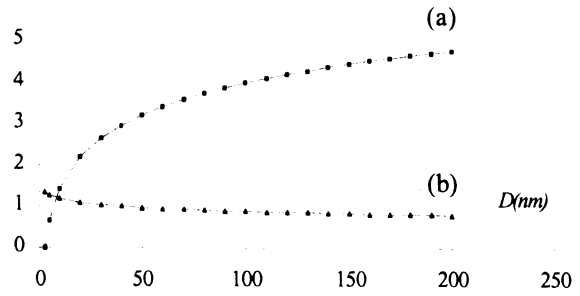


Gambar 3. Model butir modifikasi, ruang persegi merupakan ruang yang diperhitungkan dalan teori SW

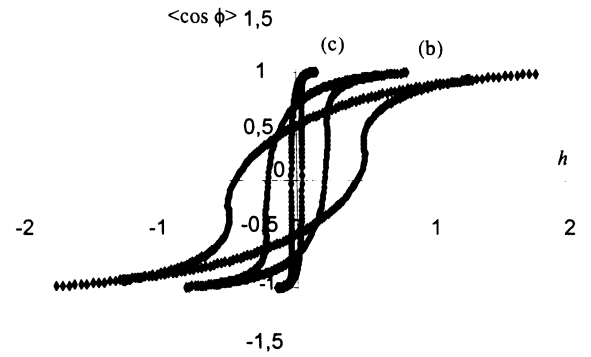
Untuk butir acak yang mempertimbangkan faktor bentuk dan interaksi antar butir maka nilai rata-rata perbandingan polarisasi terhadap polarisasi totalnya merupakan jumlah nilai yang diperhitungkan Stoner dan Wohlfarth dengan nilai rata-rata total di tepi butir, sehingga diperoleh persamaan:

$$\langle\cos\phi\rangle = \langle\cos\phi\rangle_{SW}\,[1 + \langle\alpha\rangle\, k_B F(D)] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(5)$$

Dengan $k_B = 1/F(D)$ merupakan konstanta faktor bentuk yang mengacu pada asumsi bahwa bentuk butir mengalami perubahan seiring dengan perubahan ukuran butir. Sedangkan $\langle\cos\phi\rangle_{SW}$ merupakan nilai rata-rata rasio polarisasi terhadap polarisasi total teori SW dan $\langle\alpha\rangle$ merupakan faktor rata-rata kemagnetan di tepi butir dan nilainya bergantung pada $\langle\cos\phi\rangle_{SW}$. Dari syarat keadaan stabil, $\partial E_T/\partial\varphi = 0$ dan $\partial^2 E_T/\partial\varphi^2 = 0$ serta perhitungan $\langle\cos\phi\rangle = J/J_s$ rata-rata mengikuti perhitungan SW yang telah dimodifikasi dapat dibuat grafik hubungan antara polarisasi remanen, J_r dan medan koersifitas, H_c terhadap perubahan ukuran butir, Gambar 4. Dapat pula dibuat perubahan bentuk loop hysterisis seiring dengan perubahan ukuran butir, Gambar 5.



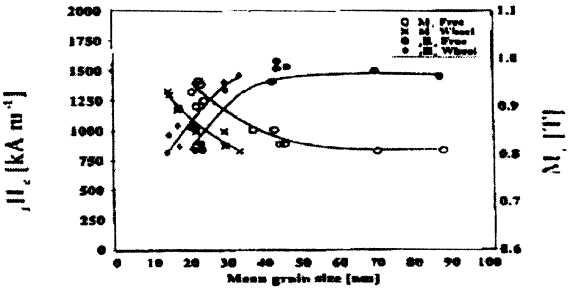
Gambar 4. Grafik antara (a) H_c terhadap ukuran butir, D dan (b) J_r terhadap D untuk fasa magnetik $Nd_2Fe_{14}B$ [6, 7]



Gambar 5. Grafik <cos f> terhadap $h=H/H_A$ untuk variasi D, (a). $D=D_o$, (b). D=0,1D_o dan (c). D=0,02D_o[7]

HASIL DAN DISKUSI

Pada Gambar 4, diperlihatkan nilai H_c dan J_r untuk butir acak sebagai fungsi ukuran butir magnet permanen berbasis fasa $Nd_2Fe_{14}B$. Kedua sifat kemagnetan tersebut masing-masing dirasionalkan terhadap nilai teori SW dan polarisasi total, Js. Hasil ini menunjukkan bahwa efek interaksi meningkatkan secara gradual nilai J_r dan menurunkan H_c di atas dengan mengecilnya ukuran butir dari 270nm sampai dengan 20nm. Peningkatan dramatis terjadi pada ukuran butir <20nm. Hasil ini sangat dekat dengan hasil pengukuran yang dilakukan oleh Manaf [5], Gambar 6. Konsekuensi dari fenomena ini adalah terbatasnya nilai produk energi maksimum, $(BH)_{max}$ yang mungkin dicapai secara maksimal dari suatu magnet permanen [7]. Sedangkan pada Gambar 5 terlihat bahwa loop histerisis J/J_s terhadap H/H_A mengalami perubahan yang bergantung pada ukuran butir. Perubahan drastis ini merupakan efek dari besarnya pengaruh interaksi antar butir untuk butir yang berukuran semakin kecil.



Gambar 6. Remanen dan koersivitas sebagai fungsi ukuran butir rata-rata dari pita alloy Nd-Fe-B [5]

KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa interaksi antar butir efektif untuk ukuran butir <380nm dan memberikan implikasi terhadap ketiga sifat kemagnetan dasar (J_r, H_c, dan $(BH)_{max}$)

DAFTAR ACUAN

[1]. E. C. STONER and E. P. WOHLFARTH, *Mechanism of Magnetic Hysterisis in Heterogenous Alloy*, Phil. Trans. Roy. Soc. London, **A. 240** (1948) 599.

[2]. A. MANAF, M. LEONOWICZ, H.A. DAVIES and R.A. BUCKLEY, *"Nanocrystalline Fe-Nd-B Type Permanent Magnet Materials with Enhanced Remanence"*, Materials Letters, **13** (1992) 194-198.

[3]. J. DING, P.G. MCCORMICK and R. STREET, *J. Magn.* Magn. Matter., **124** (1993)

[4]. R. SKOMSKI and J.M.D. COEY, *IEEE Trans. Magn.*, **29** (1993), 2860

[5]. A.MANAF, *PhD thesis*, University of Sheffield, 1992

[6]. D. TARIHORAN, A. MANAF, *Studi efek bentuk butiran ukuran bervariasi terhadap sifat kemagnetan*, paper presentasi pada seminar tahunan KFI, (2001)

[7]. D. TARIHORAN, A. MANAF, akan dipublikasikan.