

Pengaruh Substitusi Ion Mn dan Ion Co Serta Ion Ti pada Pembentukan Fasa dan Sifat Magnetik Barium Hexaferrite $\text{BaFe}_9(\text{MnCo})_{1,5}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$ Disintesis Melalui Rute Metallurgi Serbuk

Priyono, Eddy Siradj, Azwar Manaf

Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro
priyonocp@gmail.com

Received 14-02-2013, Revised 25-03-2013, Accepted 27-03-2013, Published 25-04-2013

ABSTRACT

Barium hexaferrite dengan struktur molekul $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dikenal dengan baik sebagai magnet permanen yang memiliki sifat mekanik dan banyak menyita perhatian peneliti beberapa tahun lalu hingga sekarang. Pada penelitian ini serbuk hexaferrite dihasilkan melalui mekanisme konvensional menggunakan metoda metallurgi serbuk. Struktur kristal serbuk hexaferrite dianalisis menggunakan Difraksi X dengan sumber $\text{Co}(K\alpha)$ pada panjang gelombang 1.78896 Å sedangkan sifat magnetik material diuji dengan Permeagraph dengan medan magnet luar 1.5 Tesla. Hasil kalkulasi parameter kisi pada magnet konvensional ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) diperoleh hasil $a = b = 5,894 \text{ \AA}$ dan $c = 23,210 \text{ \AA}$, sedangkan pada fasa tersubstitusi memiliki perubahan pada kisaran $a = b = 5,893 \text{ \AA} - 5,899 \text{ \AA}$ dengan nilai c pada kisaran $23,328 \text{ \AA}$ sampai dengan $23,346 \text{ \AA}$. Dengan adanya substitusi parsial ion Fe^{+3} dengan Ion Mn^{+2} , ion Co^{+2} dan ion Ti^{+4} terjadi penurunan sifat magnetik terutama pada koersivitas magnetik pada dari 125 kA/m (konvensional) menjadi dibawah 5 kA/m pada material tersubstitusi.

Kata kunci: magnet ferrite, mikrostruktur, koersivitas, remanen, saturasi magnetik

ABSTRAK

Barium ferrite with hexagonal molecular $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ is well-known for its high performance permanent magnetic and good mechanical properties and attracted attention of researchers for a long time. The hexaferrite powders were produced according to a conventional ceramic process with powder metallurgy method. Moreover, the powders were analyzed by X-ray diffraction, to detect the presence of secondary phases. The magnetic properties of the samples were measured at room temperature using Permeagraph with a maximum applied field of 1.5 T. The calculation of the lattice parameter on conventional magnets ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) results $a = b = 5,894 \text{ \AA}$ and $c = 23,210 \text{ \AA}$, while the substituted phase has a range value of $a = b$ between $5,893 \text{ \AA}$ to $5,899 \text{ \AA}$, and c lattice parameter value is in the range of $23,328 \text{ \AA}$ to $23,346 \text{ \AA}$. With the partial substitution of Fe^{+3} ions by Mn^{+2} ions, ion Co^{+2} and Ti^{+4} ion magnetic properties decrease primarily on the magnetic coercivity from 125 kA / m (conventional) to ~ 5 kA / m in the substituted materials.

Keywords: ferrite magnetic, microstructure, coersivity, remanent, magnetic saturation

PENDAHULUAN

Ferrimagnetik merupakan material magnet oksida yang bersifat magnetik dengan struktur spinnel, struktur garnet maupun struktur hexagonal. Struktur spinnel memiliki rumus kimia $\text{Me}(\text{Fe}_2\text{O}_4)$, sedangkan struktur garnet memiliki struktur $\text{Me}_3(\text{Fe}_5\text{O}_{12})$, Struktur Hexagonal memiliki lima sampai tujuh klasifikasi yang berbeda berdasarkan pada formulanya. Hexagonal ferrite dengan tipe M memiliki senyawa kimia $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, Tipe Y memiliki senyawa $\text{Ba}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ dan tipe W adalah $\text{BaMe}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$. Tipe Z memiliki senyawa $\text{Ba}_3\text{Me}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ sedangkan tipe U memiliki senyawa $\text{Ba}_4\text{Me}_2\text{Fe}_{36}\text{O}_{60}$. Simbul Me dalam struktur di atas merupakan logam transisi dua valensi seperti Mn^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} dan lain lain. Atom Ba dapat digantikan dengan atom lain seperti Sr, Pb dan lain sebagainya. Barium Hexaferrite ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) adalah bahan magnetik tipe M yang memiliki sifat magnetik uniaksial yang pada suhu kamar memiliki medan anisotropi pada kisaran 17,5 kOe^[1]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa medan anisotropi kristal dapat dilakukan dengan berbagai metoda antara melalui mekanisme nanomaterial^[1,2] maupun dengan substitusi parsial berbagai ion penyusunnya^[3,4].

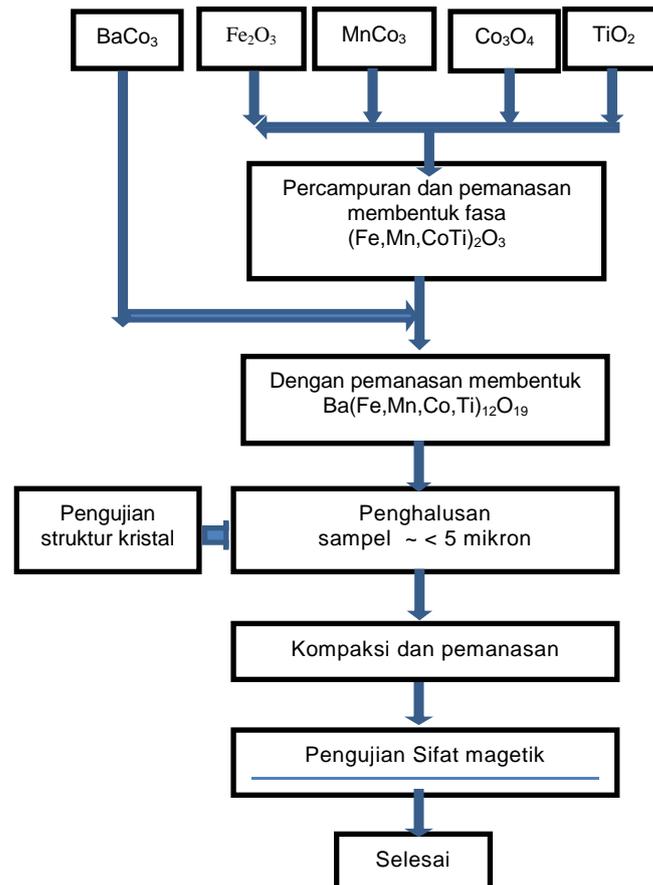
Penggantian dua buah ion Fe^{+3} pada struktur hexaferrite tipe M dengan sebuah ion divalent dan ion tetravalent menjadi $(\text{Me}^{+2}\text{Ti}^{+4})$ sehingga membentuk senyawa $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{Me}^{+2}\text{Ti}^{+4})_x\text{O}_{19}$ banyak diaplikasikan sebagai penyerap gelombang elektromagnetik pada frekuensi 8 GHz hingga 16 GHz^[5,6], sedangkan penggantian ion Ba^{+2} dengan ion La^{+3} dan Na^{+1} dimanfaatkan untuk serapan gelombang elektromagnetik pada frekuensi yang berbeda^[7]. Penelitian ini akan dibahas perubahan struktur dan sifat magnetik barium hexaferrite tipe-M yang mengalami substitusi secara parsial ion Fe^{+3} dengan menggunakan tiga buah ion $\text{Mn}^{+2}\text{Co}^{+2}$ dan ion Ti^{+4} sehingga terbentuk fasa magnetik $\text{BaFe}_9(\text{MnCo})_{1,5}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$ atau dengan menggantikan empat buah ion Fe^{+3} dengan sebuah ion Mn^{+2} dan sebuah Co^{+2} serta dua buah Ti^{+4} setiap unit kristalnya.

METODE

Penelitian ini ditekankan pada proses sintesa material $\text{BaFe}_9(\text{MnCo})_{1,5}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$ melalui metoda mekanika milling menggunakan senyawa serbuk BaCO_3 , Fe_2O_3 , Co_3O_4 dan MnCO_3 serta TiO_2 . Pada penelitian ini dilakukan secara stoikiometri dengan melakukan modifikasi fraksi ion Mn^{2+} dan ion Co^{2+} serta ion Ti^{+4} sehingga terbentuk empat material magnetik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1,05}\text{Co}_{0,45}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$ dan $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{0,45}\text{Co}_{1,05}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$ serta $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{0,75}\text{Co}_{0,75}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$.

Pembentukan keempat material tersebut dilakukan melalui mekanisme dua tahap, yaitu pada tahap pertama dilakukan substitusi parsial ion-ion Mn^{2+} , Co^{2+} dan Ti^{+4} dalam fasa Fe_2O_3 sehingga terbentuk fasa termodifikasi. Selanjutnya pada tahap kedua, fasa yang telah termodifikasi dipadukan dengan BaCO_3 untuk membentuk material magnetik $\text{BaFe}_9(\text{MnCo})_{1,5}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$ pada temperatur 1200⁰ C selama 4 jam.

Material magnetik yang telah terbentuk dikarakterisasi menggunakan difraksi-X pada 2 θ dari 20⁰ hingga 80⁰ dengan *step scan* 0,02⁰. Sifat-sifat magnetik material dikarakterisasi menggunakan permeagraf dengan medan magnet luar 1,5 Tesla. Secara lengkap metoda penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir sintesis dan karakterisasi pembentukan material magnetik $\text{BaFe}_9(\text{MnCo})_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ menggunakan rute metallurgi serbuk

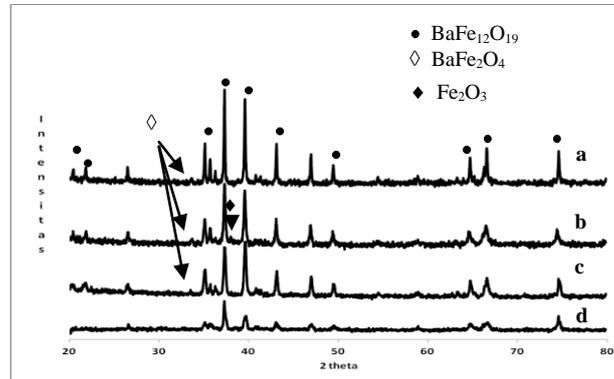
HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur Kristal

$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.05}\text{Co}_{0.45}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ dan $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{0.45}\text{Co}_{1.05}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ serta $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{0.75}\text{Co}_{0.75}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$. Pada Gambar 2 diperlihatkan pola difraksi senyawa (a) $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ sebagai senyawa konvensional hexaferrite dan senyawa hexaferrite telah termodifikasi menjadi material (b) $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.05}\text{Co}_{0.45}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ dan (c) $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{0.45}\text{Co}_{1.05}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ serta (d) $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{0.75}\text{Co}_{0.75}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$. Ketiga senyawa tersebut merupakan senyawa yang telah termodifikasi dari senyawa konvensional dengan mensubstitusi ion Fe^{3+} dengan ion Mn^{2+} , Co^{2+} dan ion Ti^{4+} . Pada gambar 2.b dengan fraksi ion Mn^{2+} lebih besar dari ion Co sedangkan pada 2.c fraksi ion Mn^{2+} lebih rendah dari fraksi ion Co^{2+} serta pada 2.d jumlah fraksi ion Mn^{2+} dan Co^{2+} yang disubstitusikan kedalam fasa konvensional berjumlah sama. Ketiga senyawa tersubstitusi tersebut memiliki jumlah fraksi ion Ti^{4+} sama dan dilakukan sintesa secara stoikiometri.

Secara umum, ke empat senyawa substitusi memiliki pola difraksi yang sama dengan pola difraksi senyawa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Hal ini menunjukkan bahwa pemaduan antara komponen BaCO_3 dan komponen Fe_2O_3 yang termodifikasi dapat berlangsung dengan baik. Terbentuknya Fasa monoferrite BaFe_2O_4 dalam fraksi relatif rendah dapat ditemukan pada bidang (2 1 2) yang merupakan fasa intermediate yang biasa terjadi akibat proses pemanasan yang kurang sempurna. Dari hasil kalkulasi parameter kisi magnet konvensional $a = b = 5,894 \text{ \AA}$ and $c = 23,210 \text{ \AA}$ yang sangat sesuai dengan hasil peneliti in

dengan nilai $a = b = 5,895 \text{ \AA}$ and $c = 23,199 \text{ \AA}$ ^[7] ataupun $a = b = 5,89 \text{ \AA}$ and $c = 23,18 \text{ \AA}$ ^[8] pada material yang sama.



Gambar 2. Hasil difraksi (a) $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ sebagai senyawa konvensional hexaferrite dan senyawa hexaferrite yang telah termodifikasi menjadi (b) $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1,05}\text{Co}_{0,45}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$, dan senyawa (c) $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{0,45}\text{Co}_{1,05}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$ serta (d) $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{0,75}\text{Co}_{0,75}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$.

Tabel 1. Hasil penentuan parameter kisi fasa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1,05}\text{Co}_{0,45}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$ dan $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{0,45}\text{Co}_{1,05}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$ serta $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{0,75}\text{Co}_{0,75}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$

Fasa material	a (Å)	b (Å)	c (Å)
$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	5,893	5,893	23,210
$\text{BaFe}_9\text{Mn}_{0,45}\text{Co}_{1,05}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$	5,894	5,894	23,216
$\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1,05}\text{Co}_{0,45}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$	5,899	5,899	23,328
$\text{BaFe}_9\text{Mn}_{0,75}\text{Co}_{0,75}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$	5,899	5,899	23,346

Hasil hasil kalkulasi lengkap untuk ke empat fasa diperlihatkan dalam tabel 1. Dari tabel 1 terlihat bahwa nilai parameter kisi untuk fasa tersubstitusi memiliki perubahan yang tidak cukup signifikan pada kisaran $5,893 \text{ \AA}$ sampai dengan $5,899 \text{ \AA}$, tetapi terjadi peningkatan nilai c hingga mencapai $\sim 0.586\%$, yaitu pada kisaran $23,328 \text{ \AA}$ sampai dengan $23,346 \text{ \AA}$. Dengan bertambahnya nilai parameter kisi terutama pada sumbu axialnya akan merubah volume unit cell yang semakin besar pada fasa tersubstitusi. Perubahan volume unit cell ini akan berpengaruh pada nilai anisotropi kristalnya.

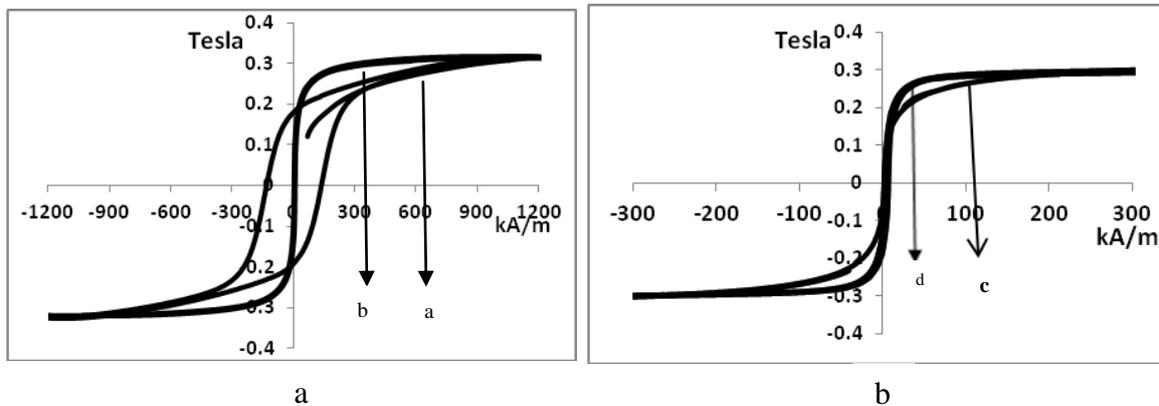
Perubahan unit cell dapat terjadi karena jari jari atomic Mn^{+2} dan Co^{+2} yang lebih besar dari jari jari atom Fe^{+3} . Kenaikan parameter kisis pada senyawa $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Co}_{x/2}\text{Mn}_{x/2}\text{Sn}_x\text{O}_{19}$ yang identik dengan $\text{BaFe}_9(\text{MnCo})_{1,5}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$ disebabkan oleh jari jari ion Mn^{2+} ($0,080 \text{ nm}$) dan ion Co ($0,074 \text{ nm}$) yang relative lebih besar dari ion Fe ($0,064 \text{ nm}$)^[9]. Perubahan volume sel satuan fasa utama material tentu memberi efek lanjut terhadap nilai momen magnet total per satuan volume atau magnetisasi jenuh dari fasa utama.

Sifat Magnetik Material

Meskipun substitusi ion Fe dengan berbagai ion logam transisi dalam jumlah yang kecil tidak berpengaruh terhadap morfologi butir partikel, akan tetapi sangat berpengaruh yang

cukup signifikan terhadap sifat-sifat magnetiknya. Gambar 3 merupakan kurva grafik demagnetisasi histerisis pada sampel $BaFe_{12}O_{19}$, $BaFe_9Mn_{1,05}Co_{0,45}Ti_{1,5}O_{19}$, dan $BaFe_9Mn_{0,45}Co_{1,05}Ti_{1,5}O_{19}$ serta $BaFe_9Mn_{0,75}Co_{0,75}Ti_{1,5}O_{19}$.

Dari Gambar 3.a terlihat perbedaan kurva histerisis antara material magnetik konvensional dengan material magnetik yang telah tersubstitusi dengan ion Mn^{2+} , ion Co^{2+} dan ion Ti^{+4} . Material magnetik konvensional menampilkan kurva histerisis magnet permanen (*hard magnet*) sedangkan pada material tersubstitusi menampilkan pola histerisis yang menuju *soft magnet*. Pada Gambar 3.a juga terlihat saturasi magnetik yang semakin tinggi pada material tersubstitusi dibandingkan dengan material magnetik konvensional.



Gambar 3. Histerisis Kurva material magnetik (a) $BaFe_{12}O_{19}$, (b) $BaFe_9Mn_{1,05}Co_{0,45}Ti_{1,5}O_{19}$ dan (c) $BaFe_9Mn_{0,45}Co_{1,05}Ti_{1,5}O_{19}$ serta (d) $BaFe_9Mn_{0,75}Co_{0,75}Ti_{1,5}O_{19}$ yang diuji secara isotrop pada medan luar 1,5 Tesla

Saturasi magnetik yang tinggi melampaui material magnetik konvensional juga dialami oleh ketiga fasa (b, c dan d) yang menandakan bahwa keberadaan ion substitusi dapat meningkatkan nilai saturasi magnetiknya. Kondisi ini tidak diikuti pada nilai koersivitas dan remanennya, dimana dengan penambahan ion Mn^{2+} ion Co^{2+} dan ion Ti nilai koersivitasnya dan remanen magnetik cenderung lebih rendah dengan tingkat penurunan yang sangat signifikan. Besarnya kuantitas dari sifat-sifat magnetik secara keseluruhan dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil penentuan sifat magnetik $BaFe_{12}O_{19}$, $BaFe_9Mn_{1,05}Co_{0,45}Ti_{1,5}O_{19}$ dan $BaFe_9Mn_{0,45}Co_{1,05}Ti_{1,5}O_{19}$ serta $BaFe_9Mn_{0,75}Co_{0,75}Ti_{1,5}O_{19}$

Fasa sampel	M_s (Tesla)	H_{ci} (kA/m)	B_r (Tesla)	BH_{max} (J/m ³)
$BaFe_{12}O_{19}$	0,315	135	0,185	6,243
$BaFe_9Mn_{0,75}Co_{0,75}Ti_{1,5}O_{19}$	0,318	2,784	0,106	0,073
$BaFe_9Mn_{1,05}Co_{0,45}Ti_{1,5}O_{19}$	0,241	2,583	0,097	0,063
$BaFe_9Mn_{0,45}Co_{1,05}Ti_{1,5}O_{19}$	0,329	2,789	0,088	0,062

Nilai remanen dan koersivitas dan remanen yang mengalami penurunan secara sistematis dengan bertambahnya fraksi atom Mn^{2+} , Co^{2+} dan Ti^{+4} dimungkinkan telah terjadi perubahan medan anisotropi kristal karena pengaruh substitusi ion Fe^{+3} . Hal ini diperjelas dengan hasil kurva histerisis yang diperlihatkan dalam gambar 3b dimana pada kedua kurva tersebut untuk M-3 memiliki nilai saturasi yang lebih besar dibandingkan dengan gambar M-2. Hal ini menandakan bahwa fraksi ion Co^{2+} memberi kontribusi yang lebih besar dalam menyumbang kenaikan nilai saturasi magnetiknya.

Menurut Z.W. Li^[1] keberadaan ion Co^{2+} dalam fasa hexaferrite tipe-M mampu merubah nilai anisotropi magnetik dari arah planar (konvensional) menuju arah axial. Dengan demikian semakin jelas keberadaan ion Co^{2+} dalam menyumbang perubahan sifat-sifat magnetik seperti koersivitas (H_c), saturasi magnetik (M_s), remanen (B_r) maupun kerapatan energy maksimum (BH_{mak}) seperti dapat dilihat dalam tabel 2. Dengan perubahan anisotropi magnetic akibat dari substitusi ion Fe^{+3} dengan ion Mn^{+2} , Co^{+2} dan ion Ti^{+4} yang dapat berdampak pada perubahan sifat-sifat magnetnya. Akibat perubahan sifat-sifat magnet senyawa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ menjadi senyawa $\text{BaFe}_9(\text{MnCo})_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ dapat menjadi peluang untuk berbagai aplikasi lain di luar magnet permanen seperti phase sifter^[10], penyerap gelombang radar^[5,6].

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dijabarkan di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa substitusi secara parsial ion Fe^{+3} dengan menggunakan ion Mn^{+2} , ion Co^{+2} dan ion Ti^{+4} pada material magnetik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dapat menyebabkan perubahan parameter kisi kristal terutama pada nilai axial nya dari $c = 23,210 \text{ \AA}$ pada material magnet konvensional menjadi kisaran $23,328 \text{ \AA}$ sampai dengan $23,346 \text{ \AA}$ pada fasa $\text{BaFe}_9(\text{MnCo})_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$. Dengan substitusi ion dapat menyebabkan terjadinya perubahan sifat magnetik seperti koersivitas, remanen dan saturasi magnetik. Perubahan ini terutama terjadi pada nilai koersivitasnya dari 135 kA/m hingga dibawah 5 kA/m saja.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada kementerian Riset dan Teknologi atas dana yang diberikan melalui program insentip *Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perekayasa (PKPP)*-RISTEK tahun 2012. Terimakasih juga diucapkan kepada laboratorium Fisika UNS dan Laboratorium Fisika material Universitas Indonesia atas penggunaan perangkat uji XRD dan Permeagraff.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Li Z. W., Lin G. A., and Chen, L. 2006. $\text{Co}^{2+}+\text{Ti}^{4+}$ substituted Z-type barium ferrite with enhance imaginary permeability and resonance frequency. *Journal of applied Physics*. Vol. 99, 063905-1.
- 2 Caffarena, V.R., Cabral, A.J.O., Tavares, and Ogasawara., T.L.M.M. 2002. The Contribution of Ultra-Fine Milling for The Microstructure and Density of doped barium hexaferrite Sintered Disc. *Journal of Acta Microscopica*. Vol.11 No. 1.
- 3 Sudakar, C., Subbanna, G.N., and Kutty, T. R. N. 2003. Hexaferrite-FeCo nanocomposite particles and their Electrical and magnetik properties at high frequencies, *Journal of applied Physics*. Vol.94, 6030.
- 4 Limar, C., Pinho, M.S., Grgegory, M.L., Nunes, R.C.R., Ogasawara, T. 2003., Effect of different dopants on the microwave properties of M-doped barium hexaferrites, *8th Conference and Exhibition of the European Ceramic Society*, Istambul, Turkey.
- 5 Meshrama, M.R., Nawal, K.A., Sinhaa, B., Misra, P.S. 2004. Characterization of M-type barium hexagonal ferrite-based wide band microwave absorber. *Journal of Magnetism and Magnetik Materials*. Vol. 271, pp. 207–214.
- 6 Ghasem, Hossienpour, A., Morisako, A., Saatchia, A., Salehi, M. 2006. Electromagnetik properties and microwave absorbing characteristic of doped barium hexaferrite. *Journal of Magnetism and Magnetik Materials*. Vol. 302, pp. 429–435,

- 7 Kajal, K., Mallick, P., Shepherd, Roger J., Green. 2007. Dielectric properties of M-type barium hexaferrite prepared by co-precipitation, *Journal of the European Ceramic Society* Vol. 27, pp 2045–2052.
- 8 Cullity, B.d. 1972. Introduction to magnetik materials, Addison–Wesley publishing Company.
- 9 Y ue Lie , Liu, R., Zhang, Z., Xiong, C. 2000. Preparation and magnetik properties of barium ferrites substituted with manganese, cobalt, and tin, *Journal of Magnetism and Magnetik Materials*, Vol. 64, pp 256,
- 10 Carl, E.P. 1998. Hexagonal Ferrite Materials for Phase shifter application at millimeter Wave guide frequencies, *IEEE transaction on Magnetic*, Vol. 24, pp. 2024-2027,