MIKROSTRUKTUR DAN SIFAT KEMAGNETAN $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ DENGAN ADITIF $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$

MICROSTRUCTURES AND MAGNETIC PROPERTIES OF $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ WITH $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ ADDITIVES

Eko Arief Setiadi^{1,*}, Fitri Permata Sari², Ayu Yuswita Sari¹, Ramlan², dan Perdamean Sebayang¹

¹Pusat Penelitian Fisika, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Tangerang Selatan,
Banten 15310, Indonesia.

²Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya.

*E-mail: eko.arief.setiadi@lipi.go.id

ARTICLE INFO

Article history

Received date:

3 November 2015

Received in revised form date:

24 March 2016

Accepted date:

5 May 2016

Available online date:

31 May 2016

Abstract

Barium hexaferrit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) is a permanent magnet material known as a hard magnet. Microstructures and magnetic properties of $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ (0.3 0.9; and 1.5 % mole) addition in $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ have been investigated. The mixing powders of Barium Hexaferrite have been prepared by mechanical alloying method. Particle sizes of the mixing powder shows that the particle size increases with higher concentration of $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ additives. The mixing powders are compacted into pellets and sintered with temperatures of 1,100 and 1,200 °C for 2 hours. Herein, X-Ray Diffraction (XRD), and Scanning Electron Microscopy (SEM) results show that the samples have hexagonal structure, and their sizes and shapes are not homogeneous. Hardness values linearly decreases with the increasing of $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ (908.58 to 531.81 HV) comparable with bulk density measurements (4.85 to 4.52 g/cm³). On the other hand, Permagraph and Gaussmeter measurement shows a decreasing trend as the $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ additives content increased. Flux density results decline from 816.00 to 706.20 G, then magnetic remanence decreases from 2.29 to 1.92 kG and saturation magnetization drops from 3.44 to 2.93 kG. In addition, coercivity decreases from 3.83 to 2.52 kOe in proportion to the increasing of sintering temperature.

Keywords: Microstructure, Permanent magnet, $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$

Kata kunci:

Mikrostruktur
Magnet permanen
 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$
 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$

Abstrak

Barium heksaferit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) merupakan bahan magnet permanen yang dikelompokkan sebagai *hard magnet*. Mikrostruktur dan sifat kemagnetan dari penambahan $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ (0,3; 0,9; dan 1,5% mol) pada $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ telah diinvestigasi. Pembuatan campuran serbuk $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dilakukan dengan metode pemaduan mekanik. Ukuran partikel dari serbuk menunjukkan peningkatan sebanding dengan peningkatan konsentrasi $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$. Campuran serbuk tersebut kemudian dikompaksi membentuk *pellet* dan di *sintering* dengan suhu 1.100 °C and 1.200 °C selama dua jam. Di sini, hasil *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa sampel memiliki struktur heksagonal, dan ukuran dan bentuk partikelnya tidak homogen. Nilai kekerasan menurun secara linear dengan meningkatnya $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ (908,58-531,81 HV) sebanding dengan pengukuran *bulk density* (4,85-4,52 g/cm³). Di sisi lain, pengukuran Permagraph dan Gaussmeter menunjukkan tren menurun pada penambahan aditif $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ yang meningkat. Hasil *flux density* menurun dari 816,00 ke 706,20 G, kemudian magnetik remanen menurun dari 2,29 ke 1,92 kG dan magnetisasi saturasi menurun dari 3,44-2,93 kG. Selain itu, koersivitas juga menurun dari 3,83 ke 2,52 kOe sebanding dengan meningkatnya suhu *sintering*.

PENDAHULUAN

Magnet permanen Barium heksaferit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) banyak digunakan dalam berbagai bidang ilmiah dan teknologi. Magnet jenis ini menjadi salah satu pilihan karena dianggap memiliki keunikan sifat antara lain suhu Curie yang relatif tinggi, tahan lama terhadap korosi, stabilitas kimia yang baik, dan preparasi yang relatif mudah dan secara ekonomis juga tidak membutuhkan biaya yang mahal (Nowosielski, Babilas and Wrona 2007). Keunikan sifat $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dimanfaatkan di berbagai aplikasi sebagai magnet permanen, absorpsi gelombang mikro, *ferrofluid*, media penyimpan data, dan berbagai aplikasi lainnya (Tudorache, et al. 2012, Sharma, Kashyap and Gupta 2014). Pembuatan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ juga dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti metode metalurgi serbuk, sol-gel (Wanawong, et al. 2013), hidrotermal, *molten salt*, dan kopresipitasi (Liu, Drew and Liu 2011).

Pada umumnya $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ termasuk dalam klasifikasi *hard magnet* (Simbolon, et al. 2013) dengan saturasi yang besar, koersivitas tinggi dan medan magnetik anisotropi tinggi (Meng, et al. 2014). Pada beberapa aplikasi akan lebih efisien apabila dapat diproduksi dalam bentuk *soft magnet* seperti pada penyerapan gelombang mikro (Jazirehpour, Shams and Khani 2012). Pada aplikasi media perekam dibutuhkan material $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dengan koersivitas antara 2 kOe dan 3 kOe dan magnetisasi tinggi (Topal 2010). Hal ini telah mendorong berbagai penelitian untuk melakukan rekonstruksi pada struktur $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dengan cara doping bahan aditif atau substitusi ion lain pada struktur kristal. Substitusi dapat dilakukan dengan mengganti ion Fe^{3+} dengan kation lain seperti, Co, Mn, Ru, Zn, Sn, Al, Sc, La dan sebagainya (Topal 2010, Sharma, Kashyap and Gupta 2014, Liu, Drew and Liu 2011). Untuk menurunkan koersivitas $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$,

maka bahan yang mengandung kation yang dapat mensubstitusi Fe.

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan magnet permanen $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dengan penambahan aditif $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ dengan variasi konsentrasi masing-masing $x = 0,3; 0,9; 1,5$ % mol. MgO dan Al_2O_3 memiliki sifat kimia yang stabil, banyak di alam dan memiliki titik leleh lebih tinggi, yaitu masing-masing 2.852 dan 2.072 °C (V. Osterman, et al, 2010). Tujuan penambahan aditif $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ pada $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ adalah untuk mengubah sifat kemagnetannya menjadi lebih lunak, khususnya koersivitasnya sebagai syarat sebagai bahan media perekam (2-3 kOe).

METODE

Bahan baku serbuk yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Cina, $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (teknis) ditambahkan dengan bahan aditif MgO (98%) dan Al_2O_3 (98%) dengan komposisi tertentu sebagai dopan (Tabel 1).

Tabel 1. Komposisi $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dengan aditif $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ pada suhu *sintering* 1.100 dan 1.200°C

Sampel	Komposisi	Konsentrasi			Suhu Sintering (°C)
	Aditif x (%mol)	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (%mol)	MgO (%mol)	Al_2O_3 (%mol)	
A03	0,3	99,4	0,3	0,3	1100
A09	0,9	98,2	0,9	0,9	1100
A15	1,5	97,0	1,5	1,5	1100
B03	0,3	99,4	0,3	0,3	1200
B09	0,9	98,2	0,9	0,9	1200
B15	1,5	97,0	1,5	1,5	1200

Kemudian ketiga bahan baku tersebut dimilling dengan *high energy milling* (HEM) secara basah menggunakan media *toulene* selama dua jam, kemudian dikeringkan pada suhu 100 °C selama 24 jam. Serbuk yang telah kering dianalisis ukuran partikelnya menggunakan *particle size analyzer* (PSA – Cilas 1190). Serbuk kemudian dikompaksi dengan tekanan 35 kgf/cm³ menjadi *pellet* dan diukur

densitasnya sebelum perlakuan *sintering* sebagai *green density* dengan menggunakan prinsip Archimedes (ASTM C373-88-2006). Sampel *pellet* tersebut selanjutnya disinter dengan waktu penahanan selama dua jam pada suhu *sintering* tertentu (Tabel 1). Sampel *pellet* yang telah disinter tersebut, kemudian dianalisis *bulk density* dan porositasnya. Sampel tersebut juga dianalisis dengan *X-ray Diffraction* (XRD – Rigaku SmartLab) dengan kecepatan 6°/menit dan panjang gelombang $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$, *scanning electron microscopy* (SEM – Hitachi SU 3500), dan diukur kekerasannya dengan *Microhardness Tester* (MHT – Leco LM 100AT) dengan beban 100 gf ditahan selama 15 detik (metode vicker). Untuk mengetahui sifat magnetnya sampel di magnetisasi dengan *Impuls Magnetizer* (*Magnet physics* Dr. Steingroever GmbH), kemudian diuji dengan Gaussmeter dan *Permagraph* (*Magnet physics* Dr. Steingroever GmbH).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini ditunjukkan hasil mikrostruktur dan sifat kemagnetan $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Mg}_x\text{Al}_x\text{O}_{19}$. Hasil preparasi serbuk dengan penambahan aditif ($\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$) sebesar $x=0,3$; $0,9$; dan $1,5$ % mol yang di-*milling* selama dua jam diperoleh ukuran partikel rata-rata dan pengukuran *green density pellet* setelah dikompaksi, ditunjukkan pada Gambar 1.

Hasil pengukuran menunjukkan semakin besar penambahan aditif ($\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$), ukuran partikel rata-ratanya juga akan semakin besar, sehingga densitas serbuk (*true density*) partikel akan cenderung turun. Serbuk MgO dan Al_2O_3 memiliki densitas yang lebih kecil dari $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Semakin kecil densitas serbuk, semakin besar pori pada partikelnya.

Gambar 1. Korelasi antara konsentrasi $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ pada $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ terhadap ukuran partikel dan *green density* sampel

Hasil pengukuran *green density pellet* menunjukkan semakin besar konsentrasi aditif $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ *green density* cenderung menurun. Hal ini sesuai dengan semakin besar ukuran partikel pada proses densifikasi, susunan butir pada *pellet* juga akan semakin kurang rapat, sehingga nilai *green density* menurun.

Selanjutnya *bulk density* dan porositas sampel yang telah di-*sintering* pada suhu 1.100°C dan 1.200°C selama dua jam, ditunjukkan pada Gambar 2.

Gambar 2. *Bulk Density* dan Porositas dari sampel $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dengan aditif $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$

Hasil analisis *bulk density* menunjukkan pada 1.200 °C, semakin besar konsentrasi aditif, nilai *bulk density* semakin rendah dan porositas meningkat. Pola ini mirip dengan nilai *green density* sampel sebelum proses sinter, artinya proses densifikasi belum optimal. Secara teoritis *bulk density* BaFe₁₂O₁₉ (tanpa aditif) adalah 5,293 g/cm³ (Shepherd, Mallick and Green 2007). Akan tetapi pada suhu 1100 °C, nilai *bulk density* sampel A09 lebih besar dibanding sampel A03, yaitu 4,81 g/cm³. Oleh karena itu pada saat proses densifikasi nilai *bulk density* sangat dipengaruhi oleh suhu *sintering* dan komposisi. Apabila dilihat pengaruh suhu *sintering* pada konsentrasi aditif yang sama, terlihat sangat jelas terjadinya proses densifikasi pada sampel tersebut. Nilai densitas sampel meningkat secara konsisten pada ketiga jenis sampel dengan konsentrasi aditif yang bervariasi, dari saat sebelum sinter ke suhu *sintering* 1.100 °C dan 1.200 °C. Hal ini karena pengaruh *sintering* menyebabkan sampel mengalami penumbuhan butir dan mengurangi rongga pada sampel yang menyebabkan nilai *density* sampel meningkat sebanding dengan meningkatnya suhu *sintering*.

Hasil analisis kekerasan dengan metode *vickers hardness*, ditunjukkan pada Gambar 3.

Gambar 3. Hasil pengukuran kekerasan BaFe₁₂O₁₉ dengan aditif MgO-Al₂O₃

Pada gambar 3 ditunjukkan bahwa pada suhu *sintering* 1.200 °C, pengaruh penambahan aditif MgO-Al₂O₃ cenderung menurunkan nilai kekerasan dari sampel BaFe₁₂O₁₉. Pada suhu tersebut nilai kekerasan maksimum diperoleh pada sampel A03, yaitu sebesar 908,58 HV. Berbeda dengan suhu *sintering* 1.100 °C, nilai maksimal diperoleh pada sampel A09, yaitu sebesar 706,71 HV. Jika dicermati pola nilai *vicker hardness* ini dipengaruhi oleh nilai *bulk density*. Semakin besar nilai *bulk density*, kerapatan antar-partikel semakin besar dan mengurangi pori. Semakin besar nilai densitasnya, kekerasannya juga akan semakin naik (Biruu, Shiva and David 2015).

Hasil analisis XRD dari BaFe₁₂O₁₉ sebelum ditambah aditif dan sesudah ditambah aditif (A03 dan B03) ditunjukkan pada Gambar 4. Pada pengujian XRD dipilih sampel B03 sebagai pembanding karena nilai densitas dan kekerasannya yang relatif tinggi dengan sampel A03 untuk suhu *sintering* yang berbeda. Berdasarkan analisis XRD menunjukkan pola sampel yang telah ditambah aditif memiliki pola yang hampir sama dengan fasa BaFe₁₂O₁₉ tanpa aditif dengan struktur kristal heksagonal. Fasa aditif tidak terdeteksi oleh pengukuran XRD. Hal ini bisa saja terjadi karena komposisi aditif yang ditambahkan tidak terlalu besar atau telah terjadi substitusi antara ion Mg dan Al menggantikan Fe. Akan tetapi, untuk menentukan ada tidaknya substitusi masih memerlukan pembuktian lebih lanjut.

Hasil analisis SEM-EDX BaFe₁₂O₁₉ dengan penambahan aditif MgO-Al₂O₃ ditunjukkan pada Gambar 5 dan Tabel 2. Berdasarkan analisis morfologi dengan uji SEM ditunjukkan bahwa partikel permukaan sampel memiliki ukuran dan bentuk partikel relatif tidak seragam. Selain itu pada permukaan sampel terlihat morfologi yang tidak merata dan porositas sebesar

Gambar 4. Pola difraksi; a) sampel $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (tanpa aditif); b) sampel A03 dan c) sampel B03

Gambar 5. Hasil SEM untuk sampel (a). A03; (b). B03 dan EDX untuk sampel (c). A03; dan (d). B03

21,09 dan 20,50 % berturut-turut untuk sampel A03 dan B03.

Pada pola EDX (*energy dispersive x-ray spectrometry*) diidentifikasi adanya komposisi unsur Ba, Fe, Mg, Al dan O seperti pada Tabel 2. Terdapatnya elemen Mg dan Al pada pengujian EDX, mengingat tidak terlihat adanya fasa MgO dan Al_2O_3 yang terdeteksi pada hasil XRD karena persentase komposisinya yang masih relatif kecil. Jumlah komposisi %wt Al lebih besar dibanding Mg dikarenakan massa relatif Al_2O_3 lebih besar dibanding MgO atau mungkin juga karena distribusinya yang tidak merata. Sedangkan perbedaan persentase komposisi oksigen pada sam-

pel A03 dan B03 yang cukup signifikan diprediksi disebabkan oleh proses *sintering*, di mana semakin tinggi suhu jumlah oksigen yang terlibat akan semakin besar.

Tabel 2. Hasil pengukuran EDX pada sampel A03 dan B03

Elemen	Sampel A03	Sampel B03
	% wt	% wt
Ba	10,90	6,30
Mg	0,12	0,10
Al	1,78	1,14
Fe	66,12	52,03
O	21,08	40,42

Hasil analisis flux magnet dari sampel yang telah dimagnetisasi ditunjukkan pada Gambar 6.

Gambar 6. Fluks densitas magnet BaFe₁₂O₁₉ terhadap penambahan konsentrasi MgO-Al₂O₃

Berdasarkan nilai fluks magnet dari sampel yang sudah dimagnetisasi menunjukkan semakin besar konsentrasi aditif, nilai fluks magnetnya semakin kecil. Hal ini berlaku untuk sampel dengan suhu *sintering* 1.100 maupun 1.200 °C. Unsur Mg dan Al memiliki sifat dasar cenderung paramagnetik, sedang Fe merupakan feromagnetik. Dengan adanya aditif MgO-Al₂O₃ menyebabkan konstanta anisotropi BaFe₁₂O₁₉ berubah (Del Castillo 2005), sehingga fluks magnet totalnya menjadi turun. Kaitannya dengan suhu *sintering* yang semakin tinggi, nilai fluks magnetiknya semakin besar, hal ini karena pada suhu *sintering* 1.200 °C memiliki nilai *bulk density* yang lebih besar dibandingkan pada suhu *sintering* 1.100 °C. Salah satu faktor penting yang memengaruhi ukuran kristal adalah suhu *sintering* dan lama penahanan (*holding time*) selama proses penumbuhan kristal (Doni W., Manaf and Sardjono 2013).

Hasil pengujian kurva histeresis dengan menggunakan *permagraph* ditunjukkan pada Gambar 7 dan Tabel 3. Berdasarkan analisis kurva histeresis menunjukkan bahwa penambahan aditif dan perlakuan suhu sinter menyebabkan perubahan sifat BaFe₁₂O₁₉. Pada BaFe₁₂O₁₉ tanpa aditif memiliki koersivitas besar, sedangkan saturasi dan remanen lebih tinggi.

BaFe₁₂O₁₉ yang telah ditambah aditif nilai koersivitas lebih kecil (sifatnya cenderung mulai mendekati *soft magnet*).

Gambar 7. Kurva histeresis sampel

Tabel 3. Hasil pengujian koersivitas, magnetisasi saturasi dan remanen sampel

Sampel	Aditif x (%mol)	T _s (°C)	H _{ci} (kOe)	M _s (kG)	M _r (kG)
BFO	0	1200	4,01	4,91	3,22
A03	0,3	1100	3,57	3,07	2,06
A09	0,9	1100	3,83	2,93	1,92
B03	0,3	1200	2,57	3,44	2,29
B09	0,9	1200	2,52	3,35	2,25

Ket. BFO: BaFe₁₂O₁₉ ; T_s: Suhu *sintering*;
H_{ci}: koersivitas ; M_s: Magnetisasi saturasi
M_r: Magnetisasi remanen

Pada analisis sampel dengan suhu *sintering* 1.100 °C (A03 dan A09) ditunjukkan bahwa pada konsentrasi aditif lebih tinggi, nilai magnetisasi saturasi dan magnetisasi remanennya semakin turun. Hal ini juga terjadi pada sampel dengan suhu *sintering* 1.200 °C (tanpa aditif, B03 dan B09). Hal

ini terjadi karena adanya penambahan aditif $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ yang menyebabkan momen magnet totalnya berubah. MgO dan Al_2O_3 pada dasarnya merupakan non-magnetik, sehingga ketika adanya aditif tersebut, maka nilai magnetisasi menjadi turun. Nilai magnetisasi suatu bahan dapat dipengaruhi oleh derajat kristalinitas, ukuran partikel, atau adanya fasa lain (non-magnetik) sebagai pengotor (Suharyadi, et al. 2014). Begitupun nilai magnetisasi saturasi dan remanen terhadap suhu *sintering*, semakin tinggi suhu *sintering* nilai magnetisasi remanen dan saturasinya semakin besar.

Pada nilai koersivitas intrinsiknya (H_c) menunjukkan semakin tinggi suhu *sintering*, nilai koersivitasnya semakin kecil. Hal ini diprediksi karena semakin tinggi suhu, konstanta anisotropinya menjadi berkurang. Variasi konsentrasi untuk sampel pada suhu *sintering* 1.200 °C terjadi penurunan medan koersivitas dari sampel B03 ke B09. Akan tetapi pada suhu *sintering* 1.100 °C nilai medan koersivitasnya mengalami kenaikan untuk sampel A03 ke A09. Secara teori dengan penambahan dopan, maka akan terjadi penurunan magneto kristalin anisotropi yang menyebabkan penurunan medan koersivitas (Alange, et al. 2016, Sharma, Kashyap and Gupta 2014). Ketidaksesuaian ini bisa terjadi karena pengaruh dari densitasnya. Pengaruh densitas yang besar menyebabkan energi *Barrier* $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ lebih besar pula, sehingga untuk demagnetisasi membutuhkan medan (H) yang lebih besar dan nilai medan koersivitas yang terukur pun menjadi lebih besar. Berdasar nilai koersivitasnya sampel dengan koersivitas antara dua sampai kOe telah memenuhi syarat untuk aplikasi sebagai media perekam.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah berhasil dilakukan rekonstruksi magnet permanen $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dengan penambahan aditif x ($\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$) sebesar x, yaitu 0,3; 0,9; dan 1,5 % mol. Pengukuran PSA menunjukkan ukuran partikel serbuk $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang ditambah aditif $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ meningkat sebanding dengan meningkatnya konsentrasi yang ditambahkan. Setelah serbuk dikompaksi, nilai kekerasan dari *pellet* $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dengan penambahan aditif tersebut meningkat sebanding dengan peningkatan nilai *bulk density*. $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang ditambah aditif yang telah dimagnetisasi menghasilkan nilai fluks magnet, magnetisasi saturasi, dan magnetisasi remanen turun sebanding dengan bertambahnya konsentrasi $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$. Hasil koersivitas menunjukkan penambahan aditif telah menurunkan nilai koersivitas magnet permanen $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Sampel yang dihasilkan pada suhu *sintering* 1200 °C berpotensi untuk diaplikasikan sebagai media perekam.

DAFTAR ACUAN

- Alange, R.C., P.P. Khirade, S.D. Birajdar, A.V. Humble, and K.M. Jadhav. "Structural, Magnetic and Dielectrical Properties of Al Cr Co-substituted M- Type Barium Hexaferrite Nanoparticles." *Journal of Molecular Structure* 1606 (2016): 460-467.
- Biruu, A.K., K. Shiva, and S.G.S David. "Study on Density and Hardness of Reinforced Zinc Oxide." *Proceedings 2 Materials Today*, 2015: 4402-4406.
- Del Castillo, V.L. *Synthesis and Characterization of Cobalt-Substituted Ferrite Nanoparticles Using Reverse Micelles*. Thesis, Mayaguez: University of Puerto Rico, 2005.

- Doni W., R., A. Manaf, and P. Sardjono. "Characteristics and Magnetic Properties of BAM from Mechanical Alloying." *Int. J. Basic. Appl. Sci. IJBAS-IJENS* 13, No. 04 (2013): 65-68.
- Jazirehpour, M., M.H. Shams, and O. Khani. "Modified Sol-Gel Synthesis of Nanosized Magnesium Titanium Substituted Barium Hexaferrite and Investigation of The Effect of High Substitution Levels on The Magnetic Properties." *J. Alloys Compd.* 545 (2012): 32-40.
- Liu, Y, M.G.B. Drew, and Y. Liu. "Preparation and Magnetic Properties of Barium Ferrites A substituted with Manganese, Cobalt and Tin." *J. Magn. Magn. Mater* 323, No. 7 (2011): 945-953.
- Meng, Y.Y., et al. "Synthesis of Barium Ferrite Ultrafine Powders by Sol-gel Combustion Method Using Glycine Gels." *J. Alloys Compd* 583 (2014): 220-225.
- Nowosielski, R., R. Babilas, and J. Wrona. "Microstructure and Magnetic Properties of Commercial Barium Ferrite Powders." *J. Achiev. Mater. Manuf. eng.* 20, No. 1-2 (2007): 307-310.
- Osterman, V., and H. Antes Jr. *Critical Melting Points an Reference Data for Vacuum Heat Treating*. California: Solar Atmospheres Inc, 2010.
- Sharma, M., S.C. Kashyap, and H.C. Gupta. "Effect of Mg-Zr Substitution and Microwave Processing on Magnetic Properties of Barium Hexaferrite." *Physica B*, 2014: 24-28.
- Shepherd, P., K.K. Mallick, and R.J. Green. "Magnetic and Structural Properties of M-Type Barium Hexaferrite Prepared by Co-precipitation." *J. Magn. Magn. Mater* 331, No. 2 (2007): 683-692.
- Simbolon, S., A.P. Tetuko, P. Sebayang, K. Sebayang, and H Ginting. "Sintesis dan Karakterisasi Barium M-Heksaferit dengan Doping ion Mn dan Temperatur Sintering." *Semin dan Focus Grup Discuss. mater Maju Magn. dan Apl*, 2013: 1-6.
- Suharyadi, E., E.A. Setiadi, N. Shabrina, T. Kato, and S. Iwata. "Magnetic Properties and Microstructures of Polyethylene Glycol (PEG)-Coated Cobalt Ferrite (CoFe₂O₄) Nanoparticles Synthesized by Coprecipitation Method." *Adv. Mater. Res.* 896 (2014): 126-133.
- Topal, U. "Evolution of Structural and Magnetic Properties of BaFe₁₂O₁₉ with B₂O₃ Addition." *Chin. Phys. Lett.* 27, No. 11 (2010): 31-34.
- Tudorache, F., P.D. Popa, F. Brinza, and S. Tascu. "Structural Investigations and Magnetic Properties of BaFe₁₂O₁₉ Crystals." *Proc. Int. Congr. Adv. Appl. Phys. Mater. Sci.* 121, No. 1 (2012): 95-97.
- Wannawong, N., P. Sridet, A. Kaewrawang, K. Tonmitr, and A. Siritariwat. "Preparation and Crystallographic Property of Mg- and Cu-doped Barium Ferrite." *Proceeding -Sci. Eng.*, 2013: 524-529.