

KAJIAN SIFAT STRUKTUR KRISTAL PADA BAHAN BARIUM HEKSAFERIT YANG DITAMBAH VARIASI Fe_2O_3 MENGGUNAKAN ANALISIS RIETVELD

Kilat Permana Putra dan Priyono

Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang

Email: kilatpermana@st.fisika.undip.ac.id

ABSTRACT

Barium M - heksaferit known as permanent magnet material which has high competition against other classes of permanent magnet due to the manufacturing process is relatively simple, and has a high stability against heat and the external magnetic field besides having a high economic value. Problems encountered in the synthesis using stoichiometric composition was obtained despite the presence of a second phase in the composition of the minor.

In this study the magnetic material synthesized using a non - stoichiometric composition by adding the compound Fe_2O_3 and conducted in-depth analysis on the initial temperature of formation at $950\text{ }^{\circ}C$, while the standard sample stoichiometric performed at a temperature of $1200\text{ }^{\circ}C$ are entirely processed by powder metallurgy method using basic compound $BaCO_3$ and Fe_2O_3 . Characterized using XRD to determine the crystal structure formed by the anode source Co which has a wavelength of 1.7889 \AA on step scan $0,02^{\circ}$. The results of XRD characterization followed by matching with international data ICDD - JCPDS then applied rietveld analysis using GSAS software.

XRD characterization results showed the sample with stoichiometric composition of the Barium M-Hexaferrite ($BaFe_{12}O_{19}$) as main phase and a little Fe_2O_3 as a minor phase. With increasing 10% Fe the initial formation is dominated by $BaFe_2O_4$ intermediate phase at $950\text{ }^{\circ}C$. While the addition of 20% Fe is dominated by Fe_2O_3 phase. Rietveld analysis results for the material stoichiometric phase obtained better match value than both of samples while the best linearity was obtained at 20% Fe addition.

Keywords: Powder Metalurgi, Barium Hexaferrite, XRD, Rietveld.

ABSTRAK

Barium M-heksaferit dikenal sebagai material magnet permanen yang memiliki kompetisi yang tinggi terhadap kelas magnet permanen lain dikarenakan proses pembuatan yang relatif mudah, memiliki kestabilan yang tinggi terhadap panas dan medan magnet luar disamping memiliki nilai ekonomi yang tinggi. Sintesis material magnet barium heksaferit menggunakan komposisi stoikiometri masih didapatkan adanya fasa kedua meskipun dalam komposisi yang minor.

Dalam penelitian ini disintesis bahan magnet menggunakan komposisi non-stoikiometri dengan menambahkan Fe dari senyawa Fe_2O_3 dan dilakukan analisis mendalam mengenai kajian struktur pada temperatur awal pembentukan $950\text{ }^{\circ}C$, sedangkan sampel acuan stoikiometri dilakukan pada temperatur $1200\text{ }^{\circ}C$ yang seluruhnya diproses dengan metode metalurgi serbuk menggunakan senyawa dasar $BaCO_3$ dan Fe_2O_3 . Sampel dikarakterisasi menggunakan XRD untuk mengetahui struktur kristal yang terbentuk dengan sumber anoda Co yang memiliki panjang gelombang $1,7889\text{ \AA}$ pada step scan $0,02^{\circ}$. Hasil karakterisasi XRD dilanjutkan pencocokan dengan data internasional ICDD-JCPDS kemudian dilakukan analisis rietveld menggunakan software GSAS.

Hasil karakterisasi XRD menunjukkan sampel dengan komposisi stoikiometri terbentuk fasa utama Barium M-Heksaferit ($BaFe_{12}O_{19}$) dan sedikit fasa minor Fe_2O_3 . Penambahan Fe sebesar 10% menyebabkan awal pembentukan didominasi oleh fasa intermediet $BaFe_2O_4$ pada temperatur $950\text{ }^{\circ}C$, sedangkan pada penambahan 20% Fe lebih didominasi oleh fasa Fe_2O_3 . Hasil analisis rietveld untuk material stoikiometri didapatkan nilai kecocokan fasa yang lebih baik dibandingkan dengan kedua sampel, sedangkan linearitas terbaik diperoleh pada penambahan 20% Fe

Kata kunci: Metalurgi Serbuk, Barium Heksaferit, XRD, Rietveld.

PENDAHULUAN

Barium Heksaferit dengan stuktur heksagonal telah dikenal sebagai material magnetik permanen yang memiliki keuntungan seperti harga yang ekonomis, secara teoritis

mempunyai anisotropi kristalin magnet yang cukup besar, koersivitas tinggi, temperatur Curie tinggi, magnetisasi saturasi yang relatif besar, kestabilan kimiawi yang baik, dan tahan korosi [1].

Ketersediaan bahan baku Barium Heksaferit relatif murah dan pembuatannya mudah. Kemagnetan dari Barium Heksaferit mudah untuk dilakukan rekayasa melalui mekanisme substitusi ion-ion metal. Bahan magnetik seperti Barium Heksaferit mampu diaplikasikan pada suatu peralatan seperti media perekaman, perangkat surpressi gelombang mikro [2].

Penelitian tentang nanophase barium heksaferit tersubstitusi ion Mn dan Ti dengan metoda mekanik milling dengan menggunakan bahan dasar BaCO_3 , Fe_2O_3 , MnCO_3 dan TiO_2 terbukti dapat merubah berbagai parameter magnetik seperti remanensi dan koersivitas [3]. Dari hasil penelitian diperoleh bahwa pembentukan nanophase dimulai pada temperatur $850\text{ }^\circ\text{C}$ [4]. Berbagai kendala yang dihadapi dalam, pembentukan nanophase adalah selalu ditemukan adanya fasa minor dan fasa intermediet dalam bentuk BaOFe_2O_3 . Pada penelitian ini dilakukan pendalaman struktur awal pembentukan fasa tersebut dengan penambahan berbagai fraksi senyawa Fe_2O_3 .

DASAR TEORI

Magnet permanen diawali dengan penggunaan baja martensit diawal abad 19 dengan cobalt merupakan magnet terbaik pada masa itu [5]. Namun beberapa puluh tahun kemudian terjadi perkembangan pesat dalam penelitian dibidang material magnet seperti magnet Alnico kemudian magnet permanen kelas keramik atau magnet ferit. Bila dibandingkan dengan magnet Alnico, magnet ferit memiliki energi dan remanen yang lebih rendah tetapi memiliki koersivitas yang jauh lebih tinggi. Perkembangan dramatis material magnet permanen terjadi pada 1970-an setelah ditemukan magnet logam tanah jarang [6].

Bahan tipe M-heksaferit, $\text{MO}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (M=Ba, Pb, Sr) telah dikenal mempunyai sifat magnet yang sangat baik sehingga banyak digunakan sebagai magnet permanen [7]. Bahan nanostruktur heksaferit energi tinggi dapat diperoleh apabila dapat dilakukan kontrol terhadap beberapa hal diantaranya: ukuran kristalit dapat diperkecil hingga dalam skala

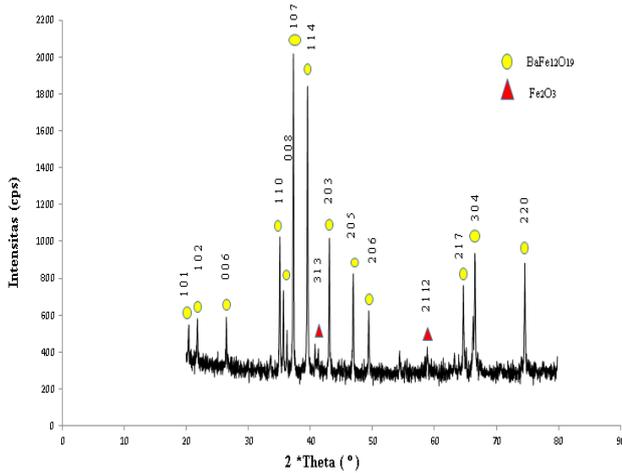
nanometer. Proses interdifusi dalam proses pembentukan fasa heksaferit berjalan dengan cepat pada suhu kalsinasi yang rendah terbentuk sistem kristalit yang mendorong timbulnya efek magnetokristalin sehingga meningkatkan sifat anisotropi magnet bahan mengurangi kemungkinan terjadinya kontaminasi dalam proses fabrikasi, sehingga diperoleh sifat magnet yang maksimal [8].

METODE PENELITIAN

Pembentukan material magnet Barium Heksaferit menggunakan metode metalurgi serbuk diawali dengan sintesa stoikiometri. Sebagian sampel ditambah variasi senyawa Fe_2O_3 untuk mendapatkan campuran non-stoikiometri. Sampel dengan berbagai komposisi dimilling untuk mendapatkan paduan yang homogen. Senyawa paduan selanjutnya dicampur dengan sedikit aquades dan dilanjutkan penghalusan dengan perangkat milling energi tinggi pada kecepatan 400 rpm. Setelah dilakukan pengeringan selanjutnya sampel yang telah kering dicetak pada tekanan 3 ton untuk diperoleh sampel dengan ukuran diameter 2,5 cm dan ketebalan 1,5 cm lalu dibakar dalam furnace $950\text{ }^\circ\text{C}$. Struktur kristal diuji dengan X-ray difraksi dan dianalisis rietveld yang terlebih dahulu dilakukan pencocokan dengan ICDD-JCPDS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 1 menunjukkan pola difraksi hasil karakterisasi menggunakan XRD dengan sumber anoda Co. Hasil struktur yang diidentifikasi pada gambar 1 merupakan proses sintesa stoikiometri antara BaCO_3 dengan Fe_2O_3 pada temperatur pemanasan $1200\text{ }^\circ\text{C}$ selama 4 jam sebagai sampel acuan. Dari hasil identifikasi pencocokan data menggunakan daftar tabel ICDD #271029 dan #150615 menunjukkan bahwa terbentuk dua fasa, Barium Heksaferit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ sebagai fasa mayor dan fasa Fe_2O_3 sebagai fasa minor.

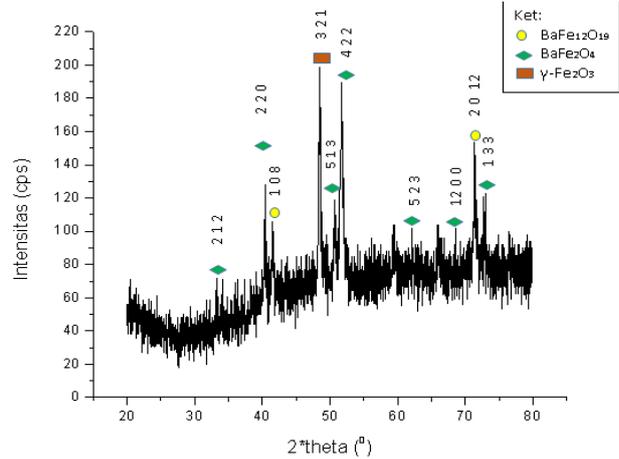


Gambar 1. Grafik difraksi komposisi stoikiometri pembentukan $BaFe_{12}O_{19}$ pada pemanasan $1200^{\circ}C$

Tabel 1. Hasil pencocokan data pembentukan fasa $BaFe_{12}O_{19}$ pada pemanasan $1200^{\circ}C$ dengan ICDD-JCPDS # 271029 dan # 150615 yang disintesis dengan komposisi stoikiometri

No.	$2\theta (^{\circ})$	h k l	Fasa
1	20,695	1 0 1	$BaFe_{12}O_{19}$
2	22,085	1 0 2	$BaFe_{12}O_{19}$
3	26,728	0 0 6	$BaFe_{12}O_{19}$
4	35,302	1 1 0	$BaFe_{12}O_{19}$
5	35,931	0 0 8	$BaFe_{12}O_{19}$
6	37,538	1 0 7	$BaFe_{12}O_{19}$
7	39,767	1 1 4	$BaFe_{12}O_{19}$
8	41,565	3 1 3	Fe_2O_3
9	43,385	2 0 3	$BaFe_{12}O_{19}$
10	47,161	2 0 5	$BaFe_{12}O_{19}$
11	49,662	2 0 6	$BaFe_{12}O_{19}$
12	58,805	2 1 12	Fe_2O_3
13	64,903	2 1 7	$BaFe_{12}O_{19}$
14	66,472	3 0 4	$BaFe_{12}O_{19}$
15	74,782	2 2 0	$BaFe_{12}O_{19}$

Hasil karakterisasi struktur pada pembentukan fasa $BaFe_{12}O_{19}$ dengan kelebihan 10% Fe ditunjukkan pada gambar 2. Pada penambahan 10% Fe teridentifikasi dengan baik puncak-puncak difraksi yang memperlihatkan proses awal pembentukan. Penambahan Fe tersebut dapat mempengaruhi terhadap fasa yang terbentuk. Hasil yang terbentuk dapat dijadikan acuan untuk mengetahui proses-proses yang terjadi dalam pembentukan fasa Barium Heksaferrit tersebut.



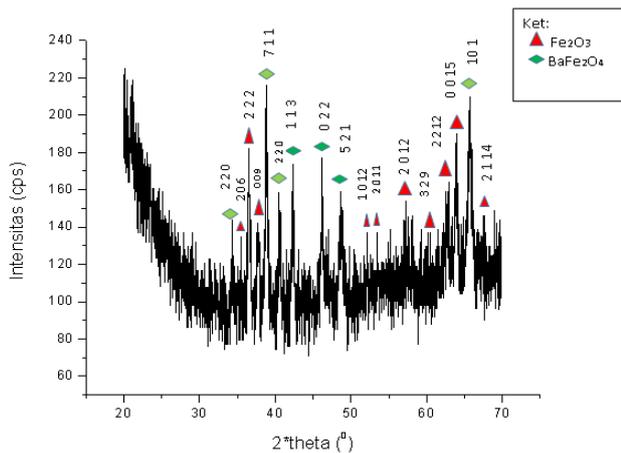
Gambar 2. Grafik difraksi komposisi pembentukan $BaFe_{12}O_{19}$ dengan kelebihan 10% Fe pada pemanasan $950^{\circ}C$

Hasil identifikasi dengan data pada penambahan 10% senyawa Fe_2O_3 terlihat tiga fasa yaitu $BaFe_2O_4$, $BaFe_{12}O_{19}$ dan fasa Fe_2O_3 . Fasa $BaFe_2O_4$ atau $BaOFe_2O_3$ merupakan fasa awal proses pembentukan $BaFe_{12}O_{19}$ dan terlihat mendominasi struktur kristal yang terbentuk. Dengan berlebuhnya fasa Fe_2O_3 , maka pembentukan fasa stabil $BaFe_{12}O_{19}$ akan mudah terbentuk.

Tabel 2. Hasil pencocokan data pembentukan fasa $BaFe_{12}O_{19} + 10\% Fe$ pada pemanasan $950^{\circ}C$ dengan ICDD #460113, #271029 dan #130458 yang disintesis dengan komposisi non-stoikiometri

No	$2\theta (^{\circ})$	h k l	Fasa
1	33,134	2 1 2	$BaFe_2O_4$
2	40,408	2 2 0	$BaFe_2O_4$
3	41,581	1 0 8	$BaFe_{12}O_{19}$
4	48,5	3 2 1	$\gamma-Fe_2O_3$
5	50,757	5 1 3	$BaFe_2O_4$
6	51,768	4 2 2	$BaFe_2O_4$
7	62,184	5 2 3	$BaFe_2O_4$
8	68,605	12 0 0	$BaFe_2O_4$
9	70,965	2 0 12	$BaFe_{12}O_{19}$
10	72,746	1 3 3	$BaFe_2O_4$

Tabel 2 memperkuat hasil Analisis di atas karena puncak kristal $BaFe_{12}O_{19}$ mulai terbentuk pada bidang (1 0 8) dan (2 0 12). Gambar 3 menunjukkan hasil difraksi X-ray pada penambahan 20% senyawa Fe dan telah diverifikasi dengan data standard.



Gambar 3. Grafik difraksi komposisi pembentukan BaFe₁₂O₁₉ dengan kelebihan 20% Fe pada pemanasan 950 °C

Penambahan 20% Fe ternyata mendominasi fasa yang terbentuk disamping fasa intermediet BaFe₂O₄ sedangkan fasa BaFe₁₂O₁₉ menjadi fasa minor. Hal ini menandakan bahwa kelebihan senyawa Fe₂O₃ akan menghambat pembentukan fasa tunggal. Hal ini didukung dari hasil pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil pencocokan data pembentukan fasa BaFe₁₂O₁₉ + 20% Fe pada pemanasan 950 °C dengan ICDD #150615 dan #460113 yang disintesis dengan komposisi non-stoikiometri

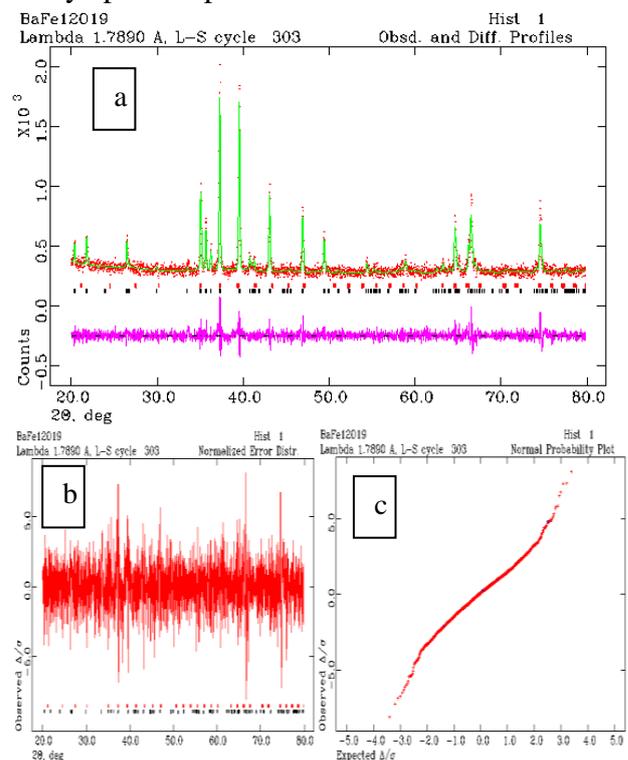
No.	2 θ (°)	h k l	Fasa
1	34,604	2 2 0	BaFe ₂ O ₄
2	35,302	2 0 6	Fe ₂ O ₃
3	36,307	2 2 2	Fe ₂ O ₃
4	37,275	0 0 9	Fe ₂ O ₃
5	38,541	7 1 1	BaFe ₂ O ₄
6	40,408	2 2 0	BaFe ₂ O ₄
7	42,391	1 1 3	BaFe ₂ O ₄
8	46,435	0 2 2	BaFe ₂ O ₄
9	49,737	5 2 1	BaFe ₂ O ₄
10	52,4	1 0 12	Fe ₂ O ₃
11	53,306	2 0 11	Fe ₂ O ₃
12	57,388	2 0 12	Fe ₂ O ₃
13	60,409	3 2 9	Fe ₂ O ₃
14	63,410	2 2 12	Fe ₂ O ₃
15	64,815	0 0 15	Fe ₂ O ₃
16	65,552	1 0 1	BaFe ₂ O ₄
17	67,597	2 1 14	Fe ₂ O ₃

Tabel 3 menyatakan hasil pembentukan pemanasan 950 °C selama 4 jam dengan adanya tambahan fraksi senyawa Fe sebanyak 20%.

Dengan tidak ditemukannya fasa BaFe₁₂O₁₉ maka dapat diketahui bahwa penambahan ini sangat berlebih sehingga dapat menghambat proses pembentukan fasa BaFe₁₂O₁₉

Analisis Rietveld

Gambar 4 merupakan hasil pencocokan yang dilakukan antara kurva teoritis dan kurva eksperimen. Pada kurva terlihat bahwa semua puncak telah teridentifikasi dengan baik yang ditandai dengan berhimpitnya kurva eksperimen dan data teoritis. Data residu ditunjukkan pada kurva dibawahnya. Dalam kurva residu terlihat bahwa masih terdapat fasa lain yang dimunculkan yang ditandai dengan masih adanya puncak-puncak kurva.

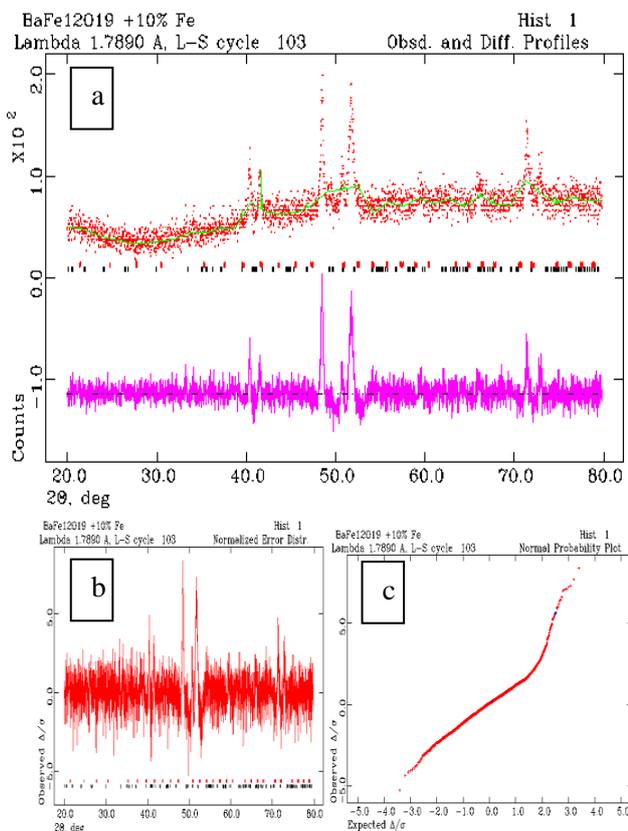


Gambar 4. Hasil analisis rietveld BaFe₁₂O₁₉ (a) kurva perbandingan (b) kurva kesalahan (c) kurva least square

Setelah dilakukan penghalusan diperoleh nilai *goodness of fit* sebesar 2,657. Nilai tersebut masih terlalu besar dimana nilai *goodness of fit* yang baik berada pada rentang <1,9. *Goodness of fit* adalah faktor yang menunjukkan kesesuaian antara data observasi dengan data standar dari *crystallography open database*. Kesesuaian kurva teoritis dan observasi ditunjukkan melalui kurva residu yang terbentuk, semakin lurus kurva residu

menunjukkan kesesuaian yang baik antara kurva teoritis dan observasi. Kurva kesalahan pada gambar 4b menunjukkan pada rentang 5% yang berarti masih terdapat beberapa fasa lain pembentukan fasa Barium Heksaferit.

Kurva *least square* gambar 4c terlihat masih terdapat pembelokan. Hasil yang baik ditunjukkan dengan kurva yang linier [5]. Hasil penghalusan nilai residu dari sampel acuan yaitu wRp sebesar 8,90% dan Rp sebesar 6,97%. Residu profil (Rp) dan residu profil berbobot (wRp) menentukan kualitas penghalusan yang dilakukan, semakin kecil nilai residu yang didapat maka semakin baik proses *refinement* dikarenakan banyaknya kecocokan antara data teoritis dan data observasi. Berdasarkan nilai *goodness of fit*, Rp dan wRp dapat dikatakan bahwa kualitas penghalusan yang diperoleh cukup baik. Perbedaan hasil *refinement* ditunjukkan tiap sampel, seperti yang terlihat gambar 5 dengan penambahan 10% Fe.



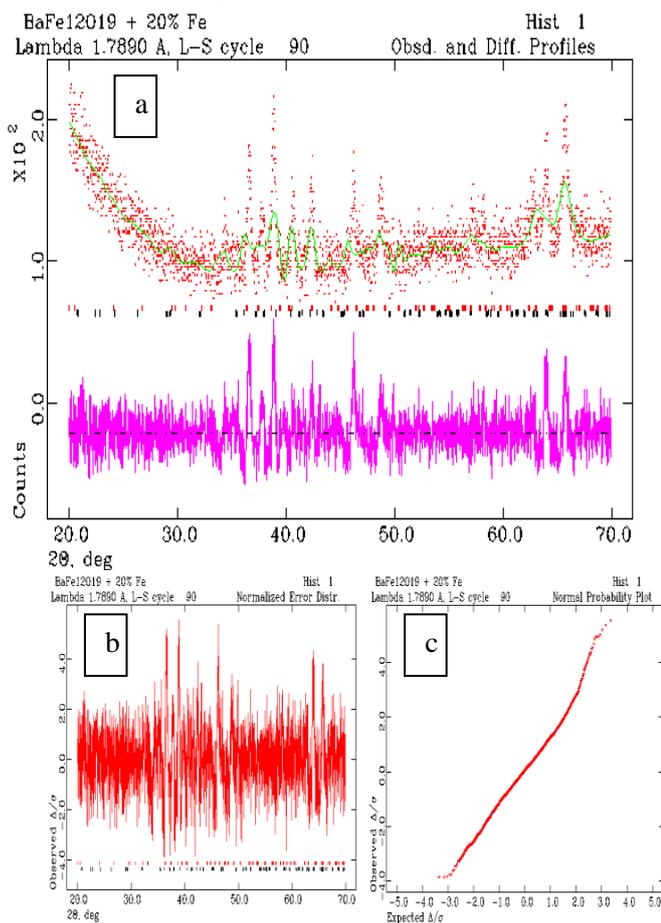
Gambar 5. Hasil analisis *rietveld* penambahan 10% Fe (a) kurva perbandingan (b) kurva kesalahan (c) kurva *least square*

Kurva perbandingan pada gambar 5a menunjukkan hasil pencocokan antara kurva teoritis dan data observasi yang ditandai dengan tidak berhimpitnya garis titik-titik sebagai pola difraksi eksperimen dengan kurva bergaris sebagai pola difraksi teoritis, hal tersebut dapat disebabkan karena pengaruh dari penambahan Fe yang berlebih pada bahan magnet sehingga terbentuk fasa yang lain. Fasa tersebut dapat diketahui melalui kurva perbandingan dimana jika pada pola grafik teoritis tidak terjadi puncak dan tidak dapat dihaluskan menyesuaikan pola difraksi eksperimen yang terjadi puncak. Hal tersebut mengakibatkan selisih antara pola difraksi eksperimen dan pola difraksi teoritis menjadi besar yang ditunjukkan pada kurva residu yang berada dibawah kurva perbandingan.

Kurva kesalahan pada gambar 5b menunjukkan rentang 5 % yang berarti masih terdapat fasa yang belum dapat diolah oleh GSAS dan kurva *least square* pada gambar 5c menunjukkan adanya pembelokan pada kurva. Selain itu dengan penambahan 10% Fe diduga menghasilkan terjadinya pembentukan fasa yang lain sehingga tidak dapat dilakukan proses penghalusan oleh GSAS. Hasil *refinement* diperoleh nilai *goodness of fit* sebesar 1,820 dan nilai residu wRp 16,44 % dan Rp 12,44 %. Nilai residu yang dihasilkan masih sangat besar yang berada diatas rentang 10%, hal tersebut menunjukkan bahwa masih terdapat fasa lain yang belum bisa di *refinement* atau dilakukan penghalusan oleh GSAS.

Faktor *fitting* pada bahan magnet dengan penambahan 10% Fe masih sangat besar sehingga kualitas penghalusan masih belum baik. Besarnya nilai residu wRp dan Rp ini disebabkan adanya pembentukan fasa pada data observasi yang tidak dapat dilakukan penghalusan oleh GSAS dalam jumlah yang cukup besar sehingga menghasilkan nilai residu wRp dan Rp yang besar. namun hal tersebut tidak berpengaruh terhadap proses penghalusan dikarenakan fasa yang terbentuk bukanlah fasa tunggal. Hasil penghalusan

sampel bahan magnet dengan penambahan 20% Fe ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Hasil analisis *rietveld* penambahan 20% Fe (a) kurva perbandingan (b) kurva kesalahan c) kurva least square

Kurva perbandingan pada gambar 6a menunjukkan bahwa hasil pencocokan antara garis titik-titik dengan kurva bergaris masih menunjukkan tidak berhimpitnya kedua pola tersebut. Hal ini ditandai dengan tingginya kurva residu yang terbentuk, selain itu juga kurva residu yang tidak mendekati garis linear yang menandakan bahwa pola belum sama. Dengan adanya penambahan fasa Fe ini kemungkinan terjadi pembentukan fasa yang lain sehingga terdapat pola difraksi yang tidak bisa dihaluskan sepenuhnya oleh GSAS. Pada gambar 6b kurva kesalahan menunjukkan pada rentang 4 % yang berarti masih terdapat fasa yang belum diolah oleh GSAS. Pada kurva *least square* gambar 6c menunjukkan masih terdapat pembelokan pada kurva namun hampir mendekati kurva yang linier. Hasil yang baik ditunjukkan dengan kurva yang lurus atau linier.

Hasil penghalusan didapatkan nilai *goodness of fit* sebesar 1,695. Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai *goodness of fit* menunjukkan nilai yang baik. Selain itu didapatkan pula nilai residu dari hasil penghalusan GSAS pada sampel dengan penambahan 10 % Fe yaitu wRp sebesar 11,90 % dan Rp sebesar 9,22 %. Nilai residu pada gambar 6 yang didapatkan dari proses penghalusan masih menunjukkan nilai diatas 10%. Hal itu menunjukkan bahwa dalam proses penghalusan masih adanya fasa lain yang belum bisa dilakukan penghalusan oleh GSAS, tetapi nilai tersebut tidak berpengaruh terhadap hasil kualitas penghalusan yang diperoleh karena fasa yang terbentuk pada sampel bukanlah fasa tunggal.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil karakterisasi dan analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal yaitu : hasil karakterisasi XRD menunjukkan sampel dengan komposisi stoikiometri didominasi oleh fasa $BaFe_{12}O_{19}$ dan sedikit fasa minor Fe_2O_3 . Penambahan Fe sebesar 10% mengakibatkan awal pembentukan material magnet Barium Heksiferit pada $950\text{ }^{\circ}C$ didominasi oleh fasa $BaFe_2O_4$ sedangkan pada penambahan 20% Fe sudah tidak terbentuk fasa Barium Heksiferit namun lebih didominasi oleh fasa Fe_2O_3 . Berdasarkan *refinement* menggunakan software GSAS menunjukkan material dengan komposisi stoikiometri didapatkan nilai kecocokan fasa yang lebih baik yaitu wRp sebesar 8,90% dan Rp sebesar 6,97% dibandingkan dengan sampel yang lainnya. Sedangkan linearitas terbaik diperoleh pada penambahan 20% yang memiliki nilai *goodness of fit* sebesar 1,695.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada laboratorium Fisika Material Jurusan fisika yang telah memberi fasilitas sehingga penelitian ini dapat berlangsung. Ucapan terimakasih juga ditujukan kepada Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro yang telah memberikan fasilitas X-ray untuk analisa struktur.

DAFTAR PUSTAKA

Presipitasi. *Prosiding Insinas*, Tangerang, 29-30 November 2012.

- [1] Nur, S., Inayati, dan Zainuri, M., 2012, Pengaruh Variasi pH Pelarut HCl Pada Sintesis Barium M-Heksaferrit Dengan Doping Zn ($BaFe_{11,4}Zn_{0,6}O_{19}$) Menggunakan Metode Kopresipitasi, *JURNAL SAINS DAN SENI ITS*, Vol. 1, No. 1, September 2012, Hlm. 41-46.
- [2] Kosasih, A. N., dan M. Zainuri, 2012, Sintesis dan Karakterisasi Sifat Magnetik Serbuk Barium M-Heksaferrit dengan Doping Ion Zn pada Variasi Temperatur Rendah, *JURNAL SAINS DAN SENI ITS*, Vol. 1, No. 1, Hlm 52-54
- [3] Sulisty, Marhaendrajaya, I dan Priyono., 2012, Sintesis Dan Karakterisasi Material Magnetik Barium Hexaferrite Tersubstitusi Menggunakan Teori Sol-Gel Untuk Aplikasi Serapan Gelombang Mikro Pada Frekuensi X-Band, *Berkala Fisika*, Vol. 15, No. 2, April 2012, Hlm. 63 – 68.
- [4] Priyono dan Manaf, A., 2008, Pembentukan Nanophase Barium Hexaferrite Tersubstitusi Ion Mn dan Ti Dengan Metoda Alloy Mekanik, *Proceeding Seminar Nasional Material Dan Metalurgi-2*.
- [5] Cullity, B. D., dan Graham, C. D., 2008, Introduction To Magnetic Materials, Second Edition, United States Of America, IEE Press
- [6] Manaf, A., 2007, Potensi Bahan Lokal dalam Pengembangan Material Magnet Untuk Industri di Indonesia, *Jurnal sains materi indonesia*, Oktober, Hlm17-23.
- [7] Johan, A., 2010, Analisis Bahan Magnet Nanokristalin Barium Heksaferit ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$) dengan Menggunakan High-Energy Milling, *Jurnal Penelitian Sains*. Vol.14, No.1(B), Januari 2010, Hlm. 19-24.
- [8] Winatapura, S. D., Dewi, S. H., Adi, W. A., dan Ridwan, 2012, Pengaruh Kalsium Terhadap Sifat Magnet Barium Heksaferit Hasil Sintesis Dengan Metoda Ko-

