

# Pengaruh Ukuran Partikel dan Kristalit Terhadap Konduktivitas Listrik Bahan Bulk $Ba(2-x)La(x)Fe_2O_5$ ( $x = 0, 0.1, 0.3, \text{ dan } 0.5$ ) Pada Suhu kamar

Sumaryo<sup>1</sup>, Yosef Sarwanto<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM) -BATAN

## Keywords:

bulk  
 $Ba(2-x)La(x)Fe_2O_5$   
microscope optic  
X-ray diffraction  
particle size  
crystalite size  
electric conductivit

## ABSTRACT

Bulk synthesis of  $Ba(2-x)La(x)Fe_2O_5$  has been carried out through the powder metallurgy method. Bulk  $Ba(2-x)La(x)Fe_2O_5$  is made with the composition of  $BaCO_3$ ,  $La_2O_3$  and  $Fe_2O_3$  with a certain weight composition ratio. The three substances are mixed using a high energy milling device then printed in the form of pellets (bulk), and then carried out for the heating process at a temperature of 950 oC for 5 hours. Macroscopic characterization of the samples was observed with an optical microscope to see changes in particle size to changes in composition. Phase analysis is carried out using XRD (X-ray Diffraction) to determine the phase formed, grain size and microstrain. Whereas the electrical conductivity is carried out using an LCR meter. The results of macroscopic observations show a change in particle size with changes in the composition of the material. The XRD analysis results show that the dominant phase of  $Ba_2Fe_2O_5$  formed with the minor phases of  $La(OH)_3$ . The size of the crystallite and microstrain bulk also changes with changes in composition. The results of measurements of electrical properties change following changes in particle and crystallite size of the bulk material  $Ba(2-x)La(x)Fe_2O_5$ .

Copyright © 2020 Universitas Indraprasta PGRI.  
All rights reserved.

## Corresponding Author:

Sumaryo,  
Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM) -BATAN,  
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang-15413.  
Email: [maryobatan@gmail.com](mailto:maryobatan@gmail.com)

## 1. PENDAHULUAN

Bahan magnetik berbasis oksida besi atau ferit memiliki banyak komposisi dan struktur baik yang tergolong sebagai magnet keras (hard magnet) maupun magnet lunak (soft magnet). Magnet keras berbasis ferit satu satunya adalah sistem hexaferrite ( $MF_{12}O_{19}$  atau  $MO_6Fe_2O_3$ ). Magnet jenis  $MO_6Fe_2O_3$  ini memiliki nilai koersivitas ( $H_c$ ) dan saturasi magnetik ( $M_s$ ) tinggi dan memiliki sifat kimia yang stabil dan ketahanan terhadap korosi sehingga cocok digunakan sebagai bahan magnet permanen[1][2][3]. Adapun tingkat kemurnian dari fasa magnet yang terbentuk bergantung pada teknologi dan proses pembuatannya. Pada umumnya terkait dengan tingkat kehomogenan dan proses perlakuan panas [4]. Sementara untuk magnet lunak memiliki banyak variasi komposisi dan struktur [5][6][7][8][9].

Penelitian magnet lunak banyak dilakukan terutama berbasis spinel-ferit dan garnet untuk aplikasi sensor. Pembuatan magnet lunak ini disamping mudah, bahan baku melimpah terutama dari pasir besi berupa besi oksida hematit ( $Fe_2O_3$ ) atau magnetit ( $Fe_3O_4$ ), juga aplikasinya cukup banyak. Namun ada jenis magnet lunak lain yang jarang dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya, yaitu magnet lunak system barium ferit  $Ba_2Fe_2O_5$  [10]. Pada umumnya mereka menggunakan system barium monofrit [11]. Dengan memodifikasi bahan  $Ba_2Fe_2O_5$  ini dengan mensubstitusi dengan unsur lanthanum, bahan ini mampu menjadi kandidat bahan magnetik elektrik.

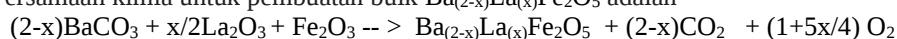
Pembuatan bahan magnet barium ferit ini digunakan bahan baku  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  yang dicampur dengan  $\text{BaCO}_3$  dan  $\text{La}_2\text{O}_3$  yang akan menghasilkan  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_x\text{Fe}_2\text{O}_5$ . Melalui reaksi stoikiometri akan diperoleh campuran rasio massa  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$  dan  $\text{La}_2\text{O}_3$  untuk membentuk senyawa  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_x\text{Fe}_2\text{O}_5$ . Rasio massa ditentukan dari variasi komposisi  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$  dan  $\text{La}_2\text{O}_3$  berdasarkan perubahan persen berat. Proses pembuatan bisa melalui metode metalurgi serbuk. Proses metalurgi serbuk meliputi persiapan proses pencampuran serbuk, peletisasi dan sintering dengan pendinginan yang lambat. Jadi tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui sifat konduktivitas listrik pada bahan magnet barium ferit yang disubstitusi dengan  $\text{La}_2\text{O}_3$  dengan variasi penambahan  $x = 0; 0,1; 0,3; \text{ dan } 0,5$ .

## 2. METODE

Bulk  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_x\text{Fe}_2\text{O}_5$  dengan metoda metalurgi serbuk dengan perbandingan berat spesifik. Bahan yang dibutuhkan sebagai berikut :  $\text{BaCO}_3$  (Aldrich, kemurnian 99,9%),  $\text{La}_2\text{O}_3$  (Aldrich, 99,9% kemurnian) dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Aldrich, 99,9% kemurnian). Rasio komposisi ditunjukkan pada Tabel 1.

| Tabel 1. Bulk $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_x\text{Fe}_2\text{O}_5$ |                      |                               |                               |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| x                                                                 | $\text{BaCO}_3$ (gr) | $\text{La}_2\text{O}_3$ ( gr) | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ( gr) |
| 0,0                                                               | 7,1194               | 0                             | 2,8806                        |
| 0,1                                                               | 6,7991               | 0,3051                        | 2,8958                        |
| 0,3                                                               | 6,1483               | 0,9251                        | 2,9267                        |
| 0,5                                                               | 5,4834               | 6,7811                        | 3,2189                        |

Persamaan kimia untuk pembuatan bulk  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_x\text{Fe}_2\text{O}_5$  adalah

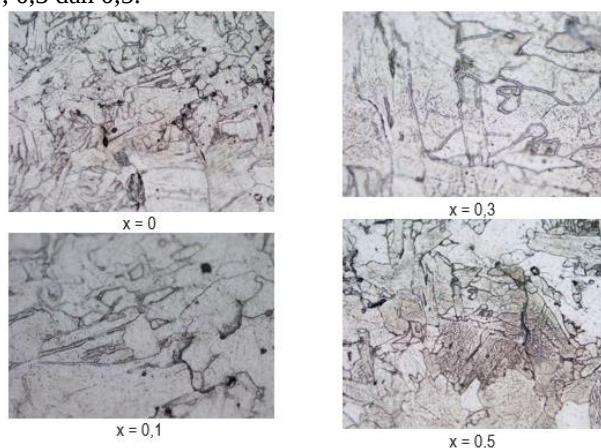


Ketiga bahan tersebut dicampur ke dalam wadah *Vial* 10 g dan dilakukan penggilingan selama 2 jam. Setelah penggilingan dipanaskan selama 1 jam pada suhu  $950^\circ\text{C}$  didinginkan secara perlahan. Dilanjutkan dengan pengamatan makroskopik menggunakan mikroskop optik, pengujian fasa dan ukuran kristalit menggunakan difraksi sinar-X, dan uji konduktivitas listrik menggunakan LCR meter.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Makroskopik sampel $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_x\text{Fe}_2\text{O}_5$ .

Gambar 1 (a-d) merupakan hasil pengamatan mikroskop optik sampel  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_x\text{Fe}_2\text{O}_5$  dengan variasi komposisi  $x = 0; 0,1; 0,3 \text{ dan } 0,5$ .



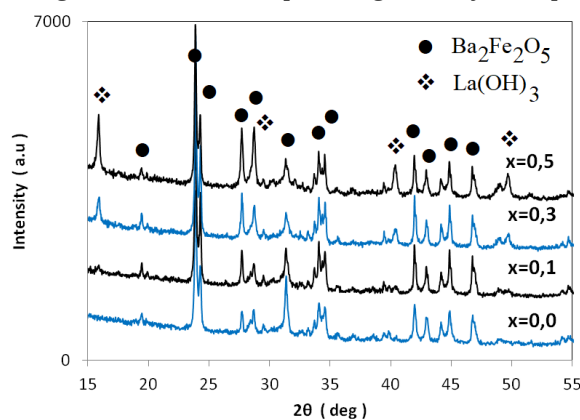
Gambar 1. Morfologi partikel sampel  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_x\text{Fe}_2\text{O}_5$ .

Pada Gambar 1 terlihat bahwa pengaruh substitusi La ke dalam  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_x\text{Fe}_2\text{O}_5$  dapat meningkatkan pertumbuhan partikel namun sampai pada komposisi  $x = 0,3$ , sedangkan penambahan selanjutnya ukuran partikel tampak kembali mengecil. Hal ini memang diduga bahwa terjadi ekspansi volume unit sel akibat penambahan atom La ke sebagian atom Ba sehingga mengakibatkan ukuran kristalit meningkat yang pada akhirnya dapat meningkatkan ukuran partikel dari bahan sistem ini.

### 3.2. Difraksi sinar-X sampel $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_x\text{Fe}_2\text{O}_5$ .

Gambar 2 (a-d) masing-masing difraksi sinar-X memuncak dengan komposisi yang berbeda. Dari hasil identifikasi Gambar 1 terlihat bulk  $Ba_{(2-x)}La_{(x)}Fe_2O_5$  masih memiliki fase BaO, LaO dan  $Ba_2LaFe_2O_5$ .

Difraksi sinar-X pada bulk  $Ba_{(2-x)}La_{(x)}Fe_2O_5$  yang menghitung sudut  $2\theta$  dan setengah lebar puncak  $\beta$  pada bulk  $Ba_{(2-x)}La_{(x)}Fe_2O_5$  menggunakan perangkat lunak Igor Lorentzian, hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 2. Pola difraksi sinar-X  $Ba_{(2-x)}La_{(x)}Fe_2O_5$  ( $x = 0; 0,1; 0,3$  dan  $0,5$ ).

Tabel 2. Hasil perhitungan  $2\theta$  dan lebar maksimal setengah puncak  $\beta$  pada bulk  $Ba_{(2-x)}La_{(x)}Fe_2O_5$

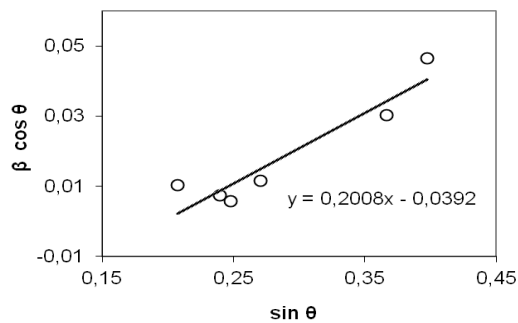
| X   | $2\theta$ | $\beta$ | $\sin \theta$ | $\beta \cos \theta$ |
|-----|-----------|---------|---------------|---------------------|
| 0,0 | 23,9007   | 0,0106  | 0,2071        | 0,0104              |
|     | 27,7220   | 0,0076  | 0,2396        | 0,0074              |
|     | 28,6792   | 0,0059  | 0,2477        | 0,0057              |
|     | 31,3717   | 0,0120  | 0,2704        | 0,0115              |
|     | 42,9921   | 0,0325  | 0,3664        | 0,0302              |
|     | 46,8469   | 0,0507  | 0,3975        | 0,0465              |
| 0,1 | 23,8917   | 0,0049  | 0,2070        | 0,0048              |
|     | 27,7170   | 0,0060  | 0,2395        | 0,0058              |
|     | 28,6930   | 0,0058  | 0,2478        | 0,0056              |
|     | 31,3683   | 0,0201  | 0,2703        | 0,0194              |
|     | 42,9679   | 0,0123  | 0,3662        | 0,0115              |
|     | 46,8525   | 0,0576  | 0,3976        | 0,0529              |
| 0,3 | 23,906    | 0,0059  | 0,2071        | 0,0057              |
|     | 27,725    | 0,0086  | 0,2396        | 0,0083              |
|     | 28,723    | 0,0137  | 0,2480        | 0,0133              |
|     | 31,392    | 0,0258  | 0,2705        | 0,0248              |
|     | 42,010    | 0,0126  | 0,3584        | 0,0118              |
|     | 46,857    | 0,0557  | 0,3976        | 0,0511              |
| 0,5 | 23,883    | 0,0061  | 0,2069        | 0,0060              |
|     | 27,710    | 0,0118  | 0,2395        | 0,0114              |
|     | 28,712    | 0,0126  | 0,2479        | 0,0122              |
|     | 31,360    | 0,0315  | 0,2703        | 0,0303              |
|     | 42,953    | 0,0210  | 0,3661        | 0,0195              |
|     | 46,855    | 0,0664  | 0,3976        | 0,0609              |

Pada Gambar 2 tampak bahwa fasa dominan dari sampel ini adalah  $Ba_2Fe_2O_5$  [12] dan fasa minor adalah  $La(OH)_3$ .

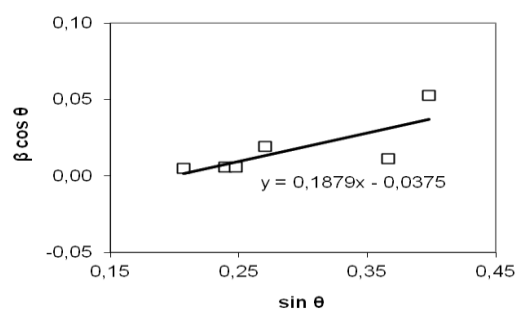
Tabel 2 merupakan data untuk menghitung ukuran kristalit dan microstrain menurut persamaan [13]:

$$\beta \cos \theta = 0,9\lambda / D + 4\eta \sin \theta \quad (1)$$

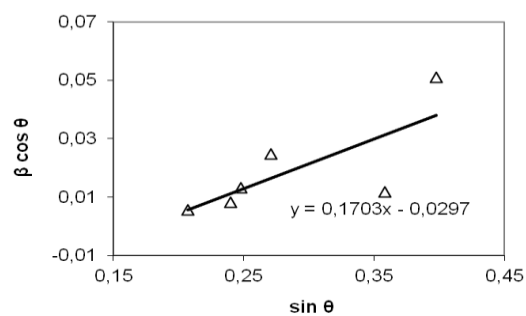
Dimana  $\beta$  adalah lebar setengah puncak maksimum (FWHM),  $D$  adalah ukuran kristalit,  $\lambda$  adalah panjang gelombang sinar-X,  $\eta$  adalah microstrain dan  $\theta$  adalah sudut difraksi. Kurva dibuat antara  $\beta \cos \theta$  terhadap  $\sin \theta$ , sehingga diperoleh garis regresi linier untuk semua komposisi. Dari garis regresi linier, ukuran kristalit dan microstrain dapat dihitung, hasilnya ditunjukkan pada Tabel 3.



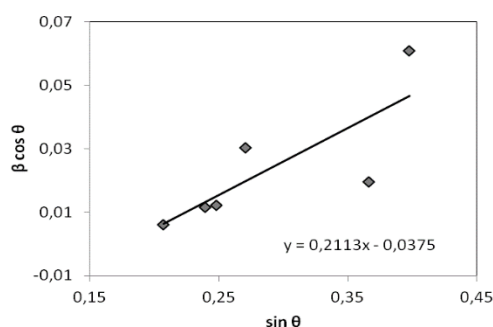
Gambar 3. Kurva hubungan ( $\beta \cos \theta$ ) terhadap  $\sin \theta$  untuk perhitungan ukuran butiran dan strain  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_{(x)}\text{Fe}_2\text{O}_5$  dengan  $x = 0,0$



Gambar 4. Kurva hubungan ( $\beta \cos \theta$ ) terhadap  $\sin \theta$  untuk perhitungan ukuran butiran dan strain  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_{(x)}\text{Fe}_2\text{O}_5$  dengan  $x = 0,1$



Gambar 5. Kurva hubungan ( $\beta \cos \theta$ ) terhadap  $\sin \theta$  untuk perhitungan ukuran butiran dan strain  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_{(x)}\text{Fe}_2\text{O}_5$  dengan  $x = 0,3$

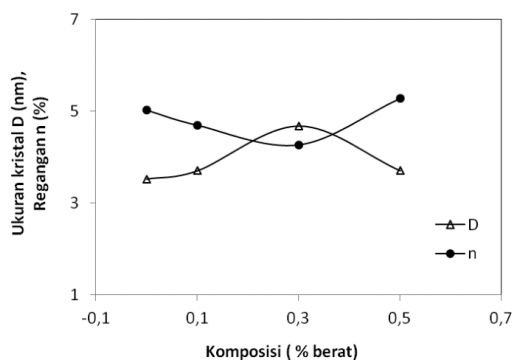


Gambar 6. Kurva hubungan ( $\beta \cos \theta$ ) terhadap  $\sin \theta$  untuk perhitungan ukuran butiran dan strain  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_{(x)}\text{Fe}_2\text{O}_5$  dengan  $x = 0,5$

Tabel 3. Ukuran kristalit (D) dan microstrain  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_{(x)}\text{Fe}_2\text{O}_5$

| x   | D ( nm ) | $\eta$ |
|-----|----------|--------|
| 0   | 3,54     | 5,02   |
| 0,1 | 3,70     | 4,69   |
| 0,3 | 4,67     | 4,26   |
| 0,5 | 3,70     | 5,28   |

Tampak bahwa ukuran kristalit  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_{(x)}\text{Fe}_2\text{O}_5$  meningkat dengan meningkatnya konsentrasi  $\text{La}_2\text{O}_3$ , sedangkan microstrain semakin menurun hingga komposisi  $x = 0,3$ , namun komposisi  $x$  selanjutnya tampak bahwa ukuran kristalit menurun lagi dan microstrainnya meningkat seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

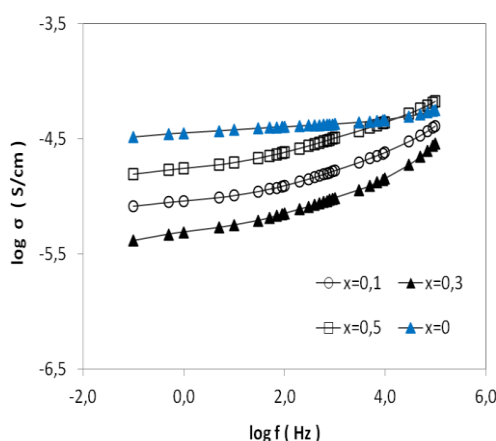


Gambar 7. Hubungan antara ukuran kristalit dan microstrain sebagai fungsi komposisi  $\text{La}_2\text{O}_3$ .

Pada Gambar 7 diperoleh sebuah garis lurus, dimana kemiringan garis (slope) merupakan nilai yang digunakan untuk menghitung ukuran kristalit bahan sedangkan konstantanya merupakan microstrain dari bahan tersebut.

### 3.3. Konduktivitas $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_{(x)}\text{Fe}_2\text{O}_5$ .

Hasil pengukuran konduktivitas listrik bulk  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_{(x)}\text{Fe}_2\text{O}_5$  yang dilakukan pada frekuensi 0,1 Hz sampai 100 kHz, ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 8. Konduktivitas listrik sebagai fungsi frekuensi pada  $Ba_{(2-x)}La_{(x)}Fe_2O_5$ .

Perhitungan konduktivitas listrik pada bulk  $Ba_{(2-x)}La_{(x)}Fe_2O_5$  mengikuti persamaan [14]:

$$\sigma = \sigma_o f.s \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:  $\sigma$  adalah konduktivitas ( S/cm ),  $\sigma_o$  konduktivitas tidak bergantung pada faktor eksponensial frekuensi dan s adalah ketebalan sampel bulk, persamaan (2) dapat diubah menjadi logaritma yaitu:

$$\log \sigma = \log \sigma_o + s \log f. \dots\dots\dots (3)$$

Dengan menggunakan persamaan (3) dapat ditentukan besarnya konduktivitas listrik bulk  $Ba_{(2-x)}La_{(x)}Fe_2O_5$  yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Konduktivitas listrik bulk  $Ba_{(2-x)}La_{(x)}Fe_2O_5$ .

| x   | $\sigma_o$ ( S/cm )    |
|-----|------------------------|
| 0   | $15,74 \times 10^{-6}$ |
| 0.1 | $7,92 \times 10^{-6}$  |
| 0.3 | $4,10 \times 10^{-6}$  |
| 0.5 | $34,31 \times 10^{-6}$ |

Keterangan:

$\sigma_o$  = konduktivitas pada frekuensi 0.01 Hz

Pada Tabel 4, nilai konduktivitas listrik bulk  $Ba_{(2-x)}La_{(x)}Fe_2O_5$  tampak menurun dengan meningkatnya konsentrasi  $La_2O_3$ . Sedangkan meningkat seiring dengan peningkatan nilai frekuensinya.

Berdasarkan hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada komposisi  $x = 0$  konduktivitas listrik sebesar  $15,74 \times 10^{-6}$  S/cm kemudian menurun hingga komposisi  $x = 0,3$  hingga  $34,31 \times 10^{-6}$  S/cm dan meningkat kembali menjadi  $4,10 \times 10^{-6}$  S/cm. Hal ini dapat dijelaskan baik secara makroskopik dan besar ukuran kristalit dari bahan bulk  $Ba_{(2-x)}La_{(x)}Fe_2O_5$ . Ditinjau dari keduanya sampel bulk ini memiliki ukuran partikel dan kristalitnya semakin membesar hingga komposisi  $x = 0,3$  akibat hadirnya substitusi La, dan tampak menurun kembali pada komposisi  $x = 0,5$ . Hal ini sangat relevan karena semakin besar baik ukuran partikel maupun kristalitnya menyebabkan luas kontak permukaannya semakin kecil sehingga mengakibatkan nilai dari konduktivitasnya semakin menurun. Disamping itu juga bahwa konduktivitas listrik dipengaruhi oleh hadirnya microstrain yang tampak terlihat perbedaan pada komposisi  $x = 0$  dan  $x = 0,5$ . Tampak bahwa komposisi  $x = 0,5$  memiliki nilai konduktivitas lebih tinggi dibandingkan dengan  $x = 0$ . Artinya diduga struktur elektronik bahan  $Ba_2Fe_2O_5$  semakin menurun hingga batas  $x = 0,3$  dan mulai digantikan dengan struktur elektronik baru dari system  $Ba_{(2-x)}La_{(x)}Fe_2O_5$  yang mulai meningkat.

#### 4. PENUTUP

Telah berhasil dibuat bahan bulk melalui metode metalurgi serbuk. Karakterisasi sample secara makroskopik menunjukkan terjadi perubahan ukuran partikel terhadap perubahan komposisi. Analisa fasa

dilakukan menggunakan XRD (Difraksi Sinar-X) menunjukkan bahwa fasa dominan yang terbentuk adalah  $\text{Ba}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ . Hasil perhitungan ukuran grain dan microstrain berubah terhadap perubahan komposisi. Sedangkan konduktivitas listrik berubah mengikuti perubahan ukuran partikel, ukuran kristalit dan microstrain dari bahan bulk  $\text{Ba}_{(2-x)}\text{La}_x\text{Fe}_2\text{O}_5$ .

#### UCAPAN TERIMAKASIH

1. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala PSTBM dan Kepala BSBM yang telah memfasilitasi penelitian ini. Peneliti mengucapkan terimakasih atas kepada penyelia dan operator instrumen XRD dan LCR.
2. LPPM UNINDRA yang telah menerima *paper* hasil penulis, agar dapat dipublikasikan dalam jurnal Faktor Exacta.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Sebayang dan Muljadi, "Kajian Struktur Mikro Terhadap Sifat Magnetik pada Magnet Permanen  $\text{BaO}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ," *Telaah J. Ilmu Pengetah. dan Teknol.*, vol. 29, no. 2, pp. 55–62, 2011.
- [2] A. Katoch, T. Singh, and B. S. Sandhu, "Influence of doping of rare earth ion ( RE = La ) on structural, electrical and dielectric properties of SrM-Hexaferrite," *Int. J. Res. Advent Technol.*, vol. 1, no. 5, pp. 456–465, 2013.
- [3] M. Jean, V. Nachbaur, J. Bran, and J. M. Le Breton, "Synthesis and characterization of  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  powder obtained by hydrothermal process," *J. Alloys Compd.*, vol. 496, no. 1–2, pp. 306–312, 2010.
- [4] M. Ganjali, M. Ganjali, A. Eskandari, and M. Aminzare, "Effect of Heat Treatment on Structural and Magnetic Properties of Nanocrystalline  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  Hexaferrite synthesized by Co-Precipitation Method," *Curr. Nanosci.*, vol. 999, no. 999, pp. 1–6, 2013.
- [5] Novizal, a Manaf, and M. Hikam, "Effect of Temperature On Ba ( 1-x ) Crystallite Size Characterization and Properties of Soft Magnetic," *Int. J. Sci. Res.*, vol. 14, no. 01, pp. 88–92, 2014.
- [6] M. M. Seyed Hossein Hosseini, A. Moghimi, "Magnetic, conductive and microwave absorption properties of polythiophene nanofibers layered on  $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Fe}_3\text{O}_4$  core-shell structures," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 24, pp. 272–277, 2014.
- [7] A. Arunkumar, D. Vanidha, K. Oudayakumar, S. Rajagopan, and R. Kannan, "Metallic magnetism and change of conductivity in the nano to bulk transition of cobalt ferrite," *J. Appl. Phys.*, vol. 114, no. 18, 2013.
- [8] N. K. Singh, P. Kumar, and R. Rai, "Comparative study of structure, dielectric and electrical behavior of  $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$  ceramics and their solid solutions with  $\text{BaTiO}_3$ ," *Adv. Mater. Lett.*, vol. 2, no. 3, pp. 200–205, 2011.
- [9] M. Kanagaraj, P. Sathishkumar, G. K. Selvan, I. P. Kokila, and S. Arumugam, "Structural and magnetic properties of  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  as-prepared and thermally treated spinel nanoferrites," *Indian J. Pure Appl. Phys.*, vol. 52, no. 2, pp. 124–130, 2014.
- [10] Y. Mulyawan, A., Adi, W. A., "Raman spectroscopy study, magnetic and microwave absorbing properties of modified barium strontium monoferrite  $\text{Ba}_{(1-x)}\text{Sr}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ," vol. 14, no. 1, pp. 73–77, 2018.
- [11] F. Fujishiro, K. Fukasawa, and T. Hashimoto, "CO<sub>2</sub> absorption and desorption properties of single phase  $\text{Ba}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$  and analysis of their mechanism using thermodynamic calculation," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 94, no. 11, pp. 3675–3678, 2011.
- [12] Z. X.D., H. S., P. M., G.-C. J.M., V.-R. M., and G. J.C, "", *Acta Crystallogr. Sect. A*, vol. A49, no. JAN93, pp. 27–35.
- [13] A. Khorsand Zak, W. H. A. Majid, M. E. Abrishami, and R. Yousefi, "X-ray analysis of  $\text{ZnO}$  nanoparticle by Williamson-Hall and size-strain plot method," *Solid State Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 251–258.
- [14] P. Padma and Y. Yashonat, "Ionic conduction in the solid state," *J. Chem. Sci.*, vol. 118, no. 1, pp. 134–154.