

KARAKTERISASI KERAMIK CuFe_2O_4 UNTUK TERMISTOR NTC

Wiendartun¹⁾, Dani Gustaman Syarif²⁾, Endi Suhendi¹⁾,
Andhy Setiawan¹⁾, Guntur D.S.²⁾

¹⁾ Jurusan Fisika FMIPA UPI, Jl. Dr. Setiabudhi 229 Bandung, email: wien@upi.edu

²⁾ PTNBR BATAN, Jl. Tamansari 71 Bandung, email: danigustas@batan-bdg.go.id

Abstrak

Karakterisasi Keramik CuFe_2O_4 Untuk Termistor NTC. Telah dilakukan pembuatan keramik CuFe_2O_4 untuk termistor negative thermal coefficient (NTC) dengan menggunakan Fe_2O_3 dari impor (aldrich). Keramik ini dibuat dengan cara mengepres serbuk bahan campuran homogen dari CuO dan Fe_2O_3 dengan komposisi yang sesuai untuk menghasilkan keramik berbasis CuFe_2O_4 , lalu mengpres serbuk campuran dengan tekanan 4 ton/cm^2 dan menyinter pelet hasil press pada suhu $900\text{-}1100 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 1-5 jam di dalam atmosfer udara tungku dan di dalam atmosfer gas nitrogen (N_2). Pelet hasil sinter dipotret untuk mengetahui penampilan visualnya. Karakterisasi listrik dilakukan dengan cara mengukur resistivitas listrik keramik tersebut pada suhu bervariasi ($25^\circ\text{C}\text{-}100^\circ\text{C}$). Analisis struktur mikro dan struktur kristal dilakukan masing-masing dengan menggunakan mikroskop elektron (SEM) dan difraktometer sinar-x (XRD). Dari penampilan *visualnya*, pelet sinter CuFe_2O_4 dapat dibuat dengan baik pada suhu sinter $900\text{-}1100^\circ\text{C}$. Data *struktur mikro* memperlihatkan bahwa pada keramik CuFe_2O_4 yang disinter di udara, pengaruh suhu sinter terhadap ukuran butir tidak terlihat dengan jelas sementara pada keramik yang disinter di dalam gas N_2 terlihat lebih jelas. Analisis XRD memperlihatkan bahwa keramik CuFe_2O_4 yang disinter baik di atmosfer udara maupun atmosfer N_2 mempunyai struktur kristal spinel tetragonal. Pada keramik CuFe_2O_4 yang disinter pada suhu $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ di dalam gas N_2 dijumpai fase kedua. Berdasarkan data karakteristik listriknya terlihat bahwa keramik berbasis CuFe_2O_4 yang dibuat mempunyai karakteristik listrik yang baik. Harga konstanta termistor ($B = 2703\text{-}3725 \text{ K}$) dan resistivitas listrik suhu ruang ($\rho_{RT} = 351\Omega\text{cm}\text{-}1.263.758 \Omega\text{cm}$) keramik CuFe_2O_4 yang dibuat pada penelitian ini memenuhi kebutuhan pasar.

Kata Kunci : *Termistor, NTC, CuFe_2O_4*

Abstract

Characterization of CuFe_2O_4 Ceramics for NTC Thermistor. Fabrication of CuFe_2O_4 ceramics for negative thermal coefficient (NTC) thermistor by using imported Fe_2O_3 (Aldrich) has been carried out. Synthesis was done by pressing a homogeneous mixture of CuO and Fe_2O_3 with composition appropriate for producing CuFe_2O_4 -based ceramics with pressure of 4 ton/cm^2 , and sintering the pressed powder at temperature of $900\text{-}1100^\circ\text{C}$ for 1-5 hours in furnace air and N_2 gas. Pictures of sintered pellets were taken to know their visual appearance. Electrical characteristics were analyzed by measuring electrical resistivity of the ceramics at various temperatures ($25\text{-}100^\circ\text{C}$). Microstructure and crystal structure analyses were carried out using an electron microscope (SEM) and x-ray diffraction (XRD). From the visual

appearance, it was known that the CuFe_2O_4 ceramics could be well fabricated at 900-1100°C. Microstructure data showed that for ceramics sintered in air, the effect of sintering temperature was not seen clearly while for that sintered in N_2 gas, it was clearly seen. The XRD analyses showed that CuFe_2O_4 ceramics sintered either in air atmosphere or in N_2 atmosphere had tetragonal crystal structure. Second phase was found in the CuFe_2O_4 ceramic sintered at 1000 °C in N_2 gas. Based on the electrical data, the ceramics fabricated in this research had good electrical characteristics. The value of thermistor constant ($B = 2703\text{-}3725$ K) and room temperature resistivity ($\rho_{\text{RT}} = 351\Omega\text{cm} \text{-} 1.263.758 \Omega\text{cm}$) of the CuFe_2O_4 ceramics made in this work fit the market requirement.

Key words : *Thermistor, NTC, CuFe_2O_4 .*

I. PENDAHULUAN

Termistor NTC sudah sangat luas digunakan di dunia, karena kemampuannya untuk digunakan di berbagai bidang elektronik seperti pengukur suhu, pembatas arus listrik, sensor aliran air dan sensor tekanan[1]. Telah dikenal bahwa sebagian besar termistor NTC dibuat dari keramik berstruktur spinel yang dibentuk oleh ksidat logam transisi dengan rumus umum AB_2O_4 dengan A adalah ion logam pada posisi tetrahedral dan B adalah ion logam pada posisi octahedral [2-10]. Banyak penelitian dilakukan untuk memperbaiki karakteristik termistor NTC berstruktur spinel [6,7,11]. Pada penelitian ini dipelajari pengaruh penambahan Al_2O_3 terhadap karakteristik spinel keramik CuFe_2O_4 yang bahan Fe_2O_3 nya berasal dari mineral yarosit. Sejauh ini studi seperti ini belum dipublikasikan sebelumnya. Penggunaan Fe_2O_3 dari yarosit dimaksudkan untuk mempelajari apakah mineral yang berlimpah di Indonesia seperti yarosit dapat dimanfaatkan sebagai bahan utama termistor.

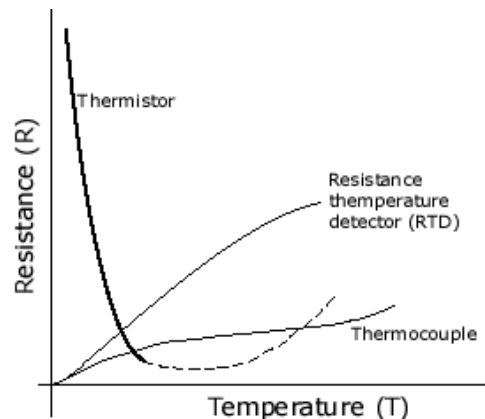
Pada umumnya, keramik CuFe_2O_4 digunakan sebagai magnet lunak[12-15], juga sebagai katalis [16-18], tetapi sebenarnya keramik CuFe_2O_4 mempunyai kemampuan untuk menjadi thermistor NTC karena bersifat semi konduktif. Berdasarkan diagram fase $\text{CuO-Fe}_2\text{O}_3$ [19], ada suatu daerah dimana komposisi keramik CuO dan Fe_2O_3 bila dipanaskan pada suhu 1100°C akan mempunyai sebuah struktur mikro yang berisi fase cair. Pada suhu ruang, material yang meleleh ini mungkin akan berada di batas butir. Secara teori material batas butir akan berpengaruh pada karakteristik keramik, khususnya pada karakteristik listrik. Pada saat zat aditif seperti Al_2O_3 ditambahkan, karakteristik dari CuFe_2O_4 akan berubah

sebab kemungkinan ada dua kondisi. Kondisi itu adalah, pertama, Al_2O_3 larut padat di dalam CuFe_2O_4 dengan cara mensubstitusikan ion-ion Cu ataupun ion-ion Fe, kedua, Al_2O_3 tidak larut tetapi meleleh pada batas butir dan pada keadaan tertentu bereaksi dengan fase cair.

Pada saat kondisi pertama terbentuk, ketika substitusi dari Fe^{3+} dan / atau Cu^{2+} menghasilkan elektron bebas pada pita konduksi, keramik CuFe_2O_4 akan mempunyai resistivitas listrik yang rendah. Sebaliknya pada saat kondisi kedua terjadi, resistivitas listriknya mungkin semakin tinggi sebab segregasi Al_2O_3 akan mengubah struktur mikronya. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik keramik CuFe_2O_4 yang ditambah Al_2O_3 dengan Fe_2O_3 berasal dari yarosit sebagai termistor NTC, khususnya karakteristik listrik berdasarkan pada hipotesis yang disebutkan di atas.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Termistor NTC mempunyai karakteristik yang khas seperti dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini :



Gambar 1. Grafik hubungan antara suhu (T) dan resistivitas listrik (R) untuk termistor NTC dan sensor lainnya.

Tahanan termistor NTC akan berkurang secara eksponensial, jika suhunya bertambah. Hubungan antara tahanan dan suhu termistor diekspresikan pada persamaan (1) [2-11].

$$R = R_0 \cdot \text{Eksp.}\left(\frac{B}{T}\right) \dots \dots \dots (1)$$

dengan, R = Tahanan termistor (Ohm), R_0 = Tahanan termistor pada suhu awal (Ohm), B = Konstanta termistor (K) dan T = Suhu termistor (K).

Konstanta termistor (B) dari persamaan (1) dapat ditulis menjadi persamaan (2)[6],

$$B = \frac{\Delta E}{k} \dots\dots\dots(2)$$

dengan, B = Konstanta termistor (K), ΔE = Energi aktivasi (eV) dan K = Konstanta Boltzmann ($\frac{eV}{^{\circ}K}$)

Secara empiris konstanta B sering pula dihitung menggunakan persamaan (3)[1,2]

$$B = \frac{\ln \frac{R_2}{R_1}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \dots\dots\dots(3)$$

dengan, R_1 = Tahanan pada suhu T_1 , R_2 = Tahanan pada suhu T_2 , $T_2 = 85^{\circ}C = 358,16^K$ dan $T_1 = 25^{\circ}C = 298,16^K$

Sensitivitas termistor dapat diketahui dengan memakai persamaan (4)[1,11],

$$\alpha = \frac{-B}{T^2} \dots\dots\dots(4)$$

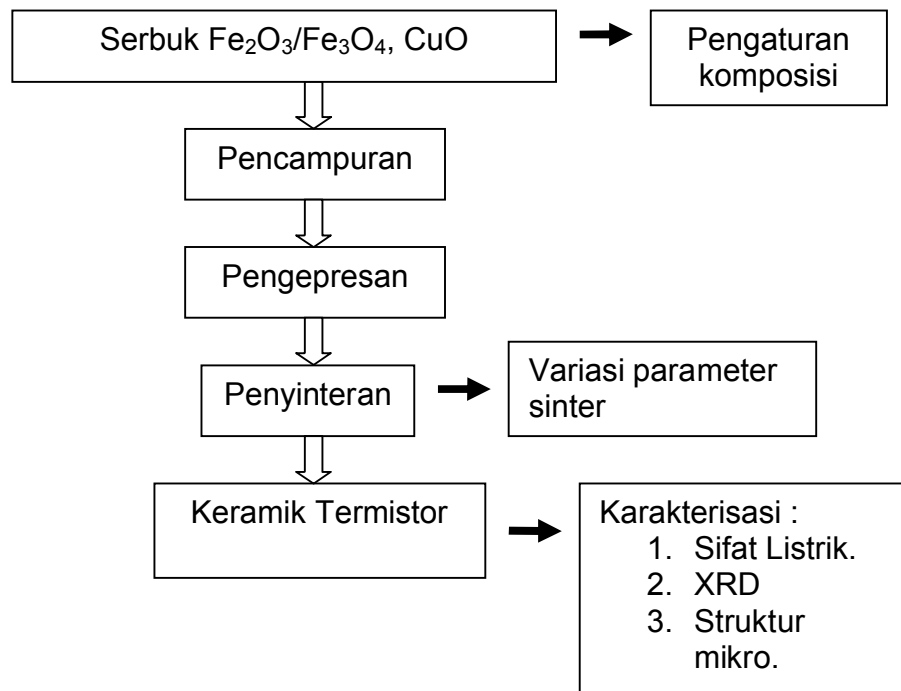
dengan, α = Sensitifitas termistor, B = Koefisien termistor dalam K , T = suhu dalam K . Semakin besar harga α dan B , kualitas termistor semakin baik.

3. METODE PENELITIAN

Keramik termistor $CuFe_2O_4$ dibuat dari bahan utama Fe_2O_3 hasil impor (Aldrich). Serbuk Fe_2O_3 dan CuO ditimbang dengan komposisi 50:50 dalam % mol. Campuran serbuk tersebut dikalsinasi pada suhu $700^{\circ}C$ selama 2 jam. Setelah dikalsinasi, serbuk campuran digerus dan diayak dengan ayakan yang berukuran <

38 μm . Serbuk hasil ayakan dipres dengan tekanan 4 ton/cm^2 sehingga membentuk pelet mentah. Pelet mentah kemudian disinter pada suhu 900-1100 $^{\circ}\text{C}$ selama 2 jam di dalam atmosfer udara dan gas N_2 . Pelet hasil sinter dipotret untuk mengetahui penampilan visualnya.

Untuk mengetahui struktur kristal dan fase-fase yang terjadi, pelet hasil sinter dianalisis dengan difraksi sinar-x (XRD) dengan menggunakan radiasi $\text{K}\alpha$ pada tegangan 40 kV dan arus 25 mA dan untuk mengetahui struktur mikronya pelet sinter dipotret menggunakan mikroskop electron (SEM). Karakterisasi listrik dilakukan setelah kedua sisi pelet hasil sinter dilapisi dengan pasta konduktif perak atau larutan perak koloid dan dipanaskan pada suhu 600 $^{\circ}\text{C}$ selama 10 menit. Karakterisasi listrik dilakukan melalui pengukuran resistivitas listrik pada berbagai suhu dari suhu ruang hingga 100 $^{\circ}\text{C}$ dengan interval 5 $^{\circ}\text{C}$. Secara keseluruhan proses pembuatan keramik berbasis CuFe_2O_4 diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir proses penelitian (Dengan Fe_2O_3 hasil impor).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

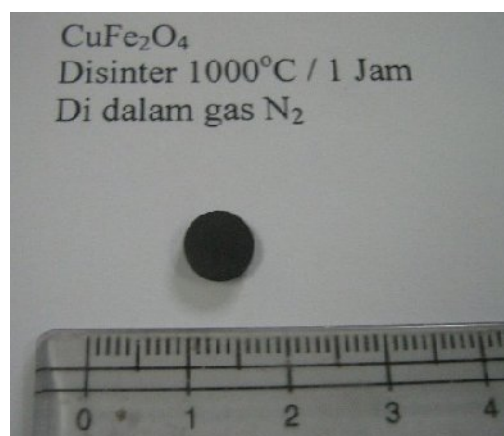
4.1 HASIL

Penampilan visual keramik CuFe_2O_4 berbentuk pelet hasil sinter diperlihatkan pada Gambar 3 dan 4. Hasil analisis XRD diperlihatkan pada Gambar 5, 6, 7 dan 8. Contoh struktur mikro diperlihatkan pada Gambar 9, 10, 11 dan 12. Sementara hasil karakterisasi listrik diperlihatkan pada Tabel 1.

4.1.1. Penampilan Visual

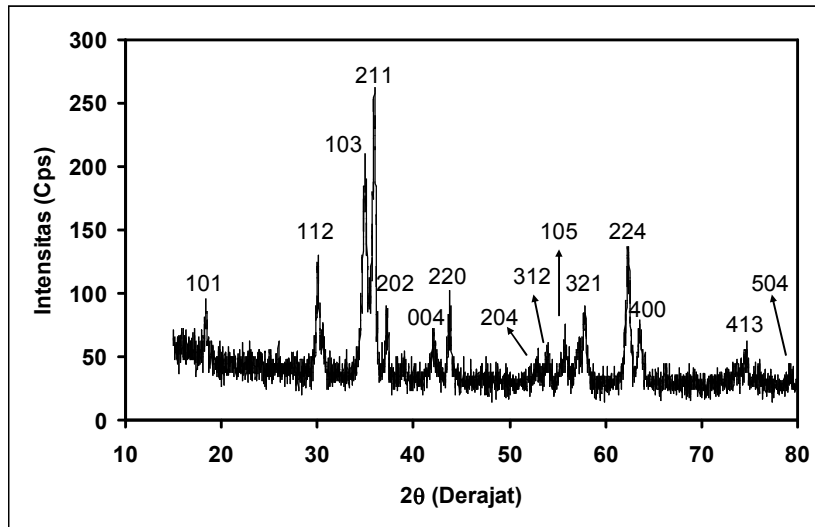


Gambar 3. Bentuk visual contoh pelet CuFe_2O_4 disinter pada suhu 1100°C di udara.

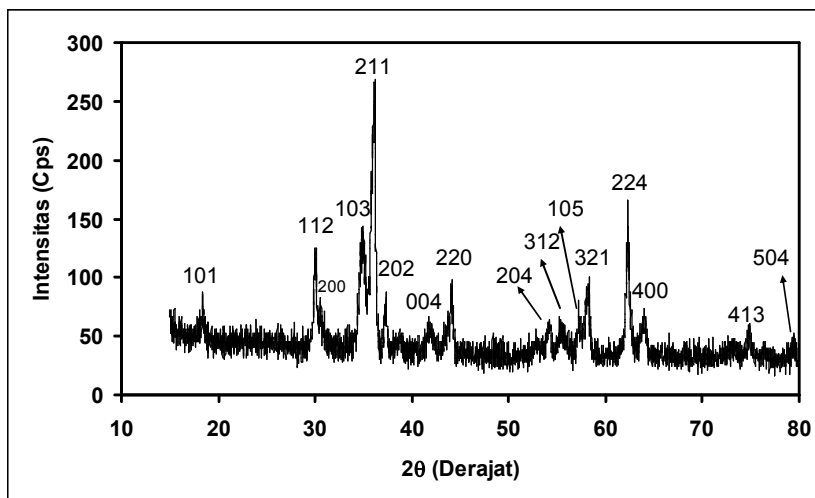


Gambar 4. Bentuk visual contoh pelet CuFe_2O_4 disinter pada suhu 1000°C di dalam gas N_2 .

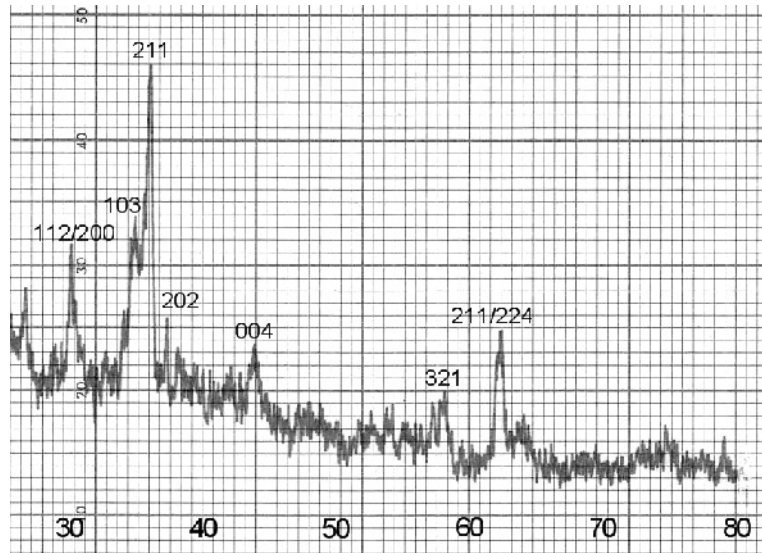
4.1.2 Data XRD keramik CuFe_2O_4



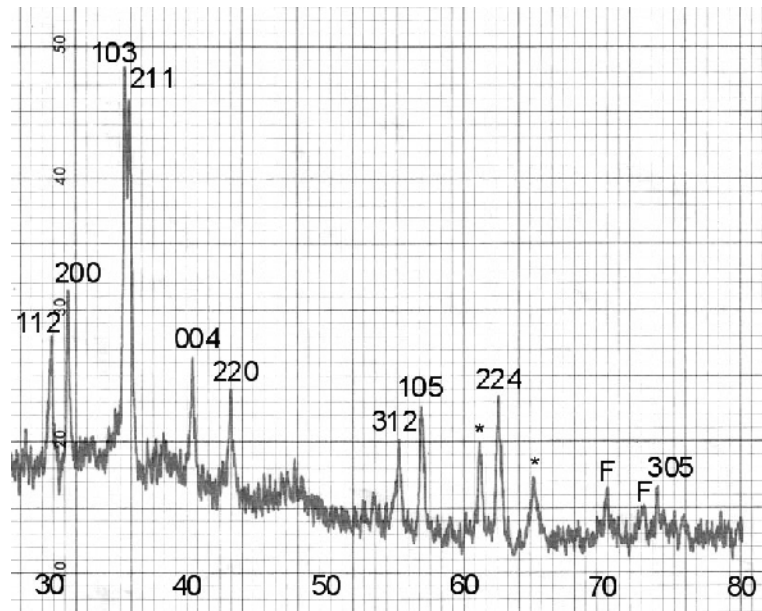
Gambar 5. Pola difraksi sinar-x keramik CuFe_2O_4 disinter pada suhu 1000°C di udara.



Gambar 6. Pola difraksi sinar-x keramik CuFe_2O_4 disinter pada suhu 1100°C di udara.

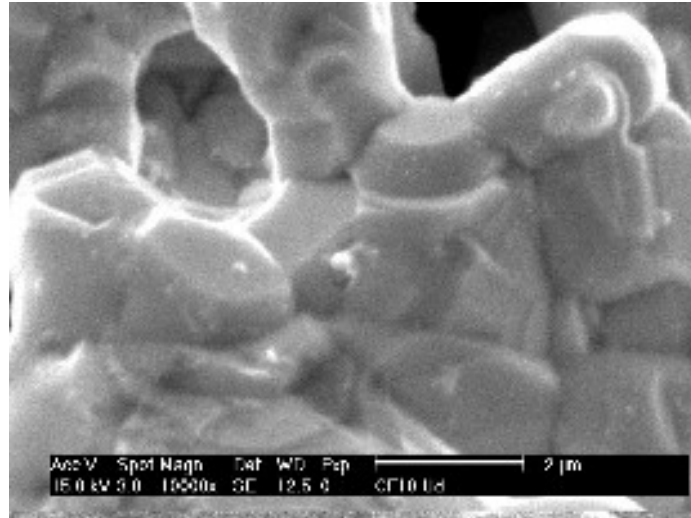


Gambar 7. Pola difraksi sinar-x keramik CuFe₂O₄ disinter pada suhu 900°C di dalam gas N₂.

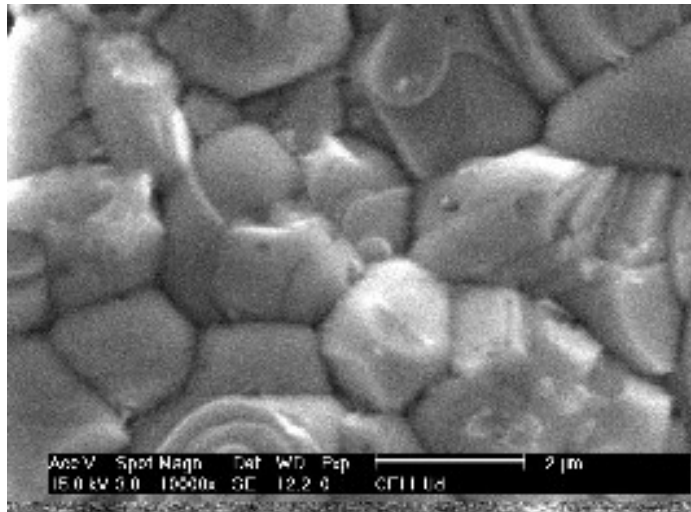


Gambar 8. Pola difraksi sinar-x keramik CuFe₂O₄ disinter pada suhu 1000°C di dalam gas N₂.

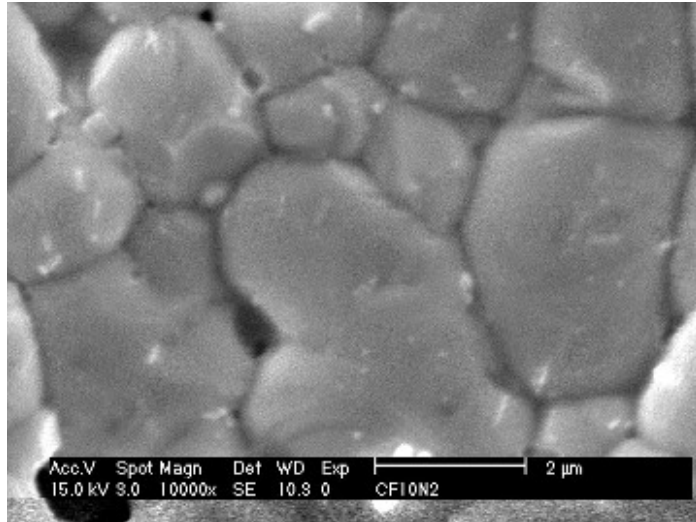
4.1.3 Data Struktur Mikro keramik CuFe_2O_4



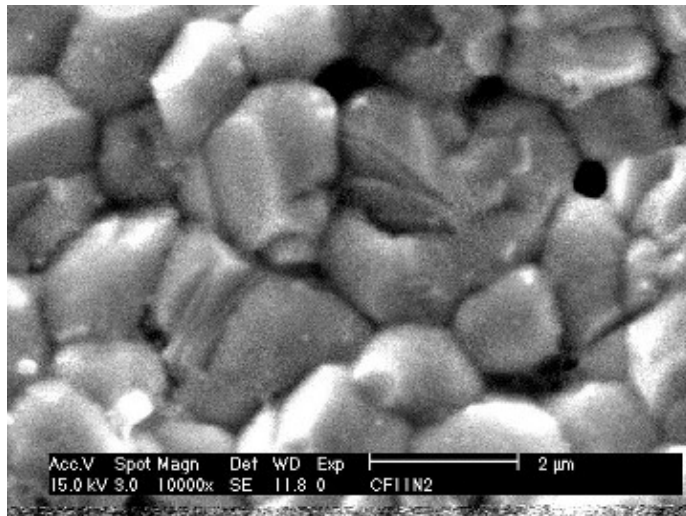
Gambar 9. Struktur mikro keramik CuFe_2O_4 disinter pada suhu 1000°C selama 1 Jam di udara.



Gambar 10. Struktur mikro keramik CuFe_2O_4 disinter pada suhu 1100°C selama 1 Jam di udara.



Gambar 11. Struktur mikro keramik CuFe₂O₄ disinter pada suhu 1000°C selama 1 Jam di dalam gas N₂.



Gambar 12. Struktur mikro keramik CuFe₂O₄ disinter pada suhu 1100°C selama 1 Jam di dalam gas N₂.

4.1.4 Data Karakteristik Listrik Keramik CuFe_2O_4

Tabel 1. Data karakteristik listrik keramik CuFe_2O_4 .

No.	Suhu/Waktu oC/Jam	Atmosfir	B (K)	α (%/K)	Ro (Ohm-cm)
1.	900/1	Udara	3725	4,14	812632
2.	1000/1	Udara	2703	3,00	11573
3.	1100/1	Udara	2749	3,05	351
4.	1100/3	Udara	2926	3,25	679
5.	1000/1	N_2	3231	3,59	1263758

Catatan :SR = Suhu ruang (300K).

4.2. PEMBAHASAN

Gambar 5 dan 6 memperlihatkan bahwa pelet keramik CuFe_2O_4 telah berhasil dibuat dengan baik dengan penyinteran baik di dalam atmosfir udara tungku maupun di dalam atmosfir gas N_2 . Data XRD Gambar 7 dan 8 memperlihatkan bahwa CuFe_2O_4 yang disinter di udara mempunyai struktur kristal spinel tetragonal. Data yang berbeda diperlihatkan oleh keramik yang disinter di dalam gas N_2 . Pada suhu 900°C, pelet CuFe_2O_4 masih berstruktur tetragonal tetapi pada suhu lebih tinggi yaitu 1000°C, penyinteran di dalam gas N_2 menyebabkan perubahan fase-fase di dalam keramik CuFe_2O_4 . Meski fase utama masih CuFe_2O_4 tetragonal tetapi terdapat pula fase lain yaitu Fe_2O_3 dan fase yang belum diketahui (*). Hal ini terjadi karena penyinteran di dalam gas N_2 mengalami kekurangan oksigen yang menyebabkan sintesis CuFe_2O_4 berlangsung kurang sempurna.

Pada keramik CuFe_2O_4 yang disinter di udara, pengaruh suhu sinter terhadap ukuran butir tidak terlihat dengan jelas sementara pada keramik yang disinter di dalam gas N_2 terlihat lebih jelas seperti dapat dilihat pada data struktur mikro. Pengecilan ukuran butir disebabkan oleh kehadiran fase kedua.

Pengaruh suhu sinter terhadap resistivitas listrik keramik yang disinter di udara tampak sangat jelas. Resistivitas listrik menurun dengan pertambahan suhu sinter. Ini disebabkan oleh meningkatnya mobilitas ion pada suhu lebih tinggi selama penyinteran yang menghasilkan keramik dengan jumlah batas butir yang lebih

sedikit. Batas butir yang sedikit memiliki *scattering center* untuk pembawa muatan yang sedikit pula.

Gas nitrogen telah menyebabkan peningkatan resistivitas listrik keramik CuFe_2O_4 . Hal ini disebabkan oleh adanya fase kedua yang menyebabkan banyaknya sumber *scattering center* pembawa muatan. Harga konstanta termistor (B) keramik CuFe_2O_4 sangat baik yaitu berharga antara 2703-3725K, jauh lebih besar dari pada harga B kebutuhan pasar (2000K). Umumnya resistivitas listrik keramik yang dibuat pada penelitian ini juga berada di dalam selang harga kebutuhan pasar.

5. KESIMPULAN

Keramik berbasis CuFe_2O_4 untuk termistor NTC dengan menggunakan bahan dasar Fe_2O_3 yang berasal dari impor dapat dibuat dengan baik pada suhu 900-1100°C. Peningkatan suhu penyinteran dan bertambahnya waktu penyinteran menyebabkan penurunan resistivitas listrik dan konstanta termistor (B). Data XRD memperlihatkan bahwa CuFe_2O_4 yang disinter di dalam atmosfer udara dan gas N_2 mempunyai struktur kristal spinel tetragonal. Pada keramik yang disinter di dalam gas N_2 pada suhu 1000°C dijumpai adanya fase kedua sebagai tanda bahwa penyinteran pada suhu ini mengalami kekurangan oksigen. Pada keramik CuFe_2O_4 yang disinter di udara, pengaruh suhu sinter terhadap ukuran butir tidak terlihat dengan jelas, sementara pada keramik yang disinter di dalam gas N_2 terlihat lebih jelas. Penyinteran keramik CuFe_2O_4 di dalam gas nitrogen (N_2) menyebabkan perubahan fase-fase yang ada di dalam keramik CuFe_2O_4 dan peningkatan resistivitas listrik keramik tersebut. Berdasarkan data listriknya terlihat bahwa keramik berbasis CuFe_2O_4 yang dibuat mempunyai karakteristik listrik yang baik dengan harga konstanta termistor ($B = 2703-3725 \text{ K}$) dan resistivitas listrik suhu ruang ($\rho_{RT} = 351 \Omega\text{cm} - 1.263.758 \Omega\text{cm}$). Harga-harga B dan ρ_{RT} ini memenuhi kebutuhan pasar ($B \geq 2000 \text{ K}$ dan $\rho_{RT} = 10\Omega\text{cm} - 10^6 \Omega\text{cm}$). Suhu sinter yang dikombinasi dengan waktu sinter dan atmosfer sinter dapat digunakan untuk mengatur karakteristik listrik keramik CuFe_2O_4 sesuai kebutuhan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah memberi bantuan dalam kegiatan penelitian dan penulisan artikel ini. Penelitian ini

didanai oleh Hibah Penelitian Kerjasama Antar Perguruan Tinggi (Pekerti) dengan Kontrak Nomor: 032/SP2H/PP/DP2M/III/2007, tanggal 31 Desember 2006.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Dani Gustaman Syarif, Engkir S., Guntur D.S., M. Yamin, *Studi awal pemanfaatan mineral magnetit sebagai bahan dasar termistor NTC*, Jurnal Mesin, Vol.6(3), 2004.
2. Dani Gustaman Syarif, Engkir S., Guntur D.S., Saeful H., *Karakterisasi termistor NTC yang dibuat dari serbuk hasil proses presipitasi magnetit asal Garut*, Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia, V(2), 2004.
3. Dani Gustaman Syarif, Guntur D.S., M. Yamin, *Studi awal pembuatan keramik termistor berbahan dasar mineral yarosit dan evaluasi karakteristiknya*, PROSIDING SEMINAR NASIONAL SAINS DAN TEKNIK NUKLIR, P3TKn – BATAN Bandung , 14 – 15 Juni 2005
4. Dani Gustaman Syarif dkk., *Aplikasi termistor ZnBiCo sebagai termistor NTC*, Jurnal Mesin , 2005.
5. Wiendartun, Dani Gustaman Syarif, Fitri Anisa, *Effect of Heat Treatment on the Characteristics of SiO₂ Added- ZnFe₂O₄ Ceramics for NTC thermistors*, Proceeding of the The 10th International Conference on Quality in Research (QiR), 2007, ISSN:1411-1284, Faculty of Engineering Center University of Indonesia UI DEPOK, 4-6 December 2007.
6. Wiendartun, Endi Suhandi, Andhy Setiawan, Dani Gustaman Syarif, Guntur Daru Sambodo, *Pengaruh penambahan Al₂O₃ terhadap Karakteristik Keramik CuFe₂O₄ Untuk Thermistor NTC*. Prosiding dengan nomor ISSN:1693-7163 pada Seminar Nasional Keramik VI (2007), Balai Besar Keramik – Bandung 11 Juli 2007.
7. Wiendartun, Endi Suhandi, Andhy Setiawan, Dani Gustaman Syarif, Guntur Daru Sambodo, *Karakteristik Keramik CuFe₂O₄ dengan Fe₂O₃ dari Yarosit Olahan yang ditambah Al₂O₃ Untuk Thermistor NTC*. Prosiding dengan ISSN: 1658-3601, pada Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir 2007, Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri BATAN BANDUNG 17-18 Juli 2007.
8. Wiendartun, Dani Gustaman Syarif, *The Effect of TiO₂ Addition on the Characteristics of CuFe₂O₄ Ceramics for NTC Thermistors*, Proceeding of The

- International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS 2006), ISBN : 979-3507-91-8, ITB Bandung , 29-30 November 2006.
9. Wiendartun, Dani Gustaman Syarif, *The effect of SiO₂ addition on the characteristics of CuFe₂O₄ Ceramics for NTC Thermistor*, The International Conference on Neutron and X-Ray Scattering (ICNX 2007), ITB Bandung, 29-31 July 2007.
 10. BetaTHERM Sensors [on line]. Available: <http://www.betatherm.com>.
 11. Eun Sang Na, Un Gyu paik, Sung Churl Choi, "The effect of a sintered microstructure on the electrical properties of a Mn-Co-Ni-O thermistor", *Journal of Ceramic Processing Research*, Vol.2, No. 1, pp 31-34, 2001.
 12. Yoshihiro Matsuo, Takuoki Hata, Takayuki Kuroda, "Oxide thermistor composition", US Patent 4,324,702, April 13, 1982
 13. Hyung J. Jung, Sang O. Yoon, Ki Y. Hong, Jeon K. Lee, "Metal oxide group thermistor material", US Patent 5,246,628, September 21, 1993.
 14. Kazuyuki Hamada, Hiroshi Oda, "Thermistor composition", US Patent 6,270,693, August 7, 2001.
 15. Eun Sang Na, Un Gyu paik, Sung Churl Choi, "The effect of a sintered microstructure on the electrical properties of a Mn-Co-Ni-O thermistor", *Journal of Ceramic Processing Research*, Vol.2, No. 1, pp 31-34, 2001.
 16. K. Park, "Microstructure and electrical properties of Ni_{1.0}Mn_{2-x}Zr_xO₄ (0 ≤ x ≤ 1.0) negative temperature coefficient thermistors", *Materials Science and Engineering*, B104, pp. 9-14, 2003.
 17. K. Park, D.Y. Bang, "Electrical properties of Ni-Mn-Co-(Fe) oxide thick film NTC thermistors", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol.14, pp. 81-87, 2003.
 18. Shopie Gulemet Fritsch, Jaouad Salmi, Joseph Sarrias, Abel Rousset, Shopie Schuurman, Andre Lannoo, "Mechanical properties of nickel manganites-based ceramics used as negative temperature coefficient thermistors", *Materials Research Bulletin*, Vol. 39, pp. 1957-1965, 2004.
 19. R. Schmidt, A. Basu, A.W. Brinkman, , "Production of NTCR thermistor devices based on NiMn₂O_{4+δ}", *Journal of The European Ceramic Society*, Vol. 24, pp. 1233-1236, 2004.

20. K. Park, I.H. Han, "Effect of Al_2O_3 addition on the microstructure and electrical properties of $(\text{Mn}_{0.37}\text{Ni}_{0.3}\text{Co}_{0.33-x}\text{Al}_x)\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 0.03$) NTC thermistors", *Materials Science and Engineering*, B119, pp. 55-60, 2005.
21. J.Z. Jiang, G.F. Goya, H.R. Rechenberg, "Magnetic properties of nanostructured CuFe_2O_4 ", *J. Phys.: Condens. Mater*, Vol.11, pp. 4063-4078, 1999.
22. G.F. Goya, H.R. Rechenberg, J.Z. Jiang, "Magnetic irreversibility and relaxation in CuFe_2O_4 " nanoparticles, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 218, pp. 221-228, 2000.
23. C.R. Alves, R. Aquino, M.H. Sousa, H.R. Rechenberg, G.F. Goya, F.A. Tourinho, J. Depeyrot, "Low temperature experimental investigation of finite-size and surface effects in CuFe_2O_4 nanoparticles of ferrofluids", *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials Vols. 20-21*, pp. 694-699, 2004.
24. Kameoka Satoshi, Tanabe Toyokazu, Tsai An, Spinel CuFe_2O_4 : a precursor for copper catalyst with high thermal stability and activity, *catalyst Letters*, Vol. 100, No. 1-2, pp. 89-93, 2005.
25. W.F. Shangguan, Y. Ternaoka, S. Kagawa, "Promotion effect of potassium on the catalytic property of CuFe_2O_4 for the simultaneous removal of NO_x and diesel soot particulate", *Applied catalysis Part B*, Vol. 16, No.2, pp. 149-154, 1998.
26. R.C. Wu, H.H. Qu, H. He. Y.B. Yu, "Removal of azo-dye acid red B (ARB) by adsorption and catalytic combustion using magnetic CuFe_2O_4 " powder, *Applied catalysis Part B*, Vol. 48, No.1, pp. 49-56, 2004.
27. Anonymous, "CuO- Fe_2O_3 Phase Diagram", *Phase Diagram for Ceramicst*, ASTM. pp. 551-554, 2004.