

PENGARUH PENAMBAHAN CAMPURAN $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ TERHADAP KARAKTERISTIK KERAMIK CuFe_2O_4 UNTUK TERMISTOR NTC

Wiendartun¹⁾, Endi Suhendi¹⁾, Andhy Setiawan¹⁾,
Dani Gustaman Syarif²⁾, 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,
danigusta@yahoo.com

ABSTRAK

Pengaruh penambahan campuran $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ terhadap karakteristik keramik CuFe_2O_4 untuk termistor NTC telah dilakukan. Keramik ini dibuat dengan cara mengepres serbuk bahan campuran homogen dari komposisi 1: CuO , Fe_3O_4 dan $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (masing-masing 0,5; 0,5 dan 0,5 w/o), komposisi 2: CuO , Fe_3O_4 dan $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (masing-masing 0,5; 0,5 dan 1,0 w/o) serta komposisi 3 : CuO , Fe_3O_4 dan $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (masing-masing 0,5; 0,5 dan 2,0 w/o) dengan proporsi yang sesuai untuk menghasilkan keramik berbasis CuFe_2O_4 . Pelet hasil pengepresan disinter pada suhu $1100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam di dalam atmosfer udara. Karakterisasi listrik dilakukan dengan cara mengukur resistivitas listrik keramik tersebut pada suhu yang bervariasi ($25\text{ }^\circ\text{C}$ - $100\text{ }^\circ\text{C}$). Analisis struktur mikro dan struktur kristal juga dilakukan dengan menggunakan masing-masing mikroskop optik dan difraksi sinar-x (XRD). Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa CuFe_2O_4 dan CuFe_2O_4 dengan penambahan campuran $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (dengan Al_2O_3 yang bervariasi) mempunyai struktur kristal spinel tetragonal. Dari hasil analisis XRD, diketahui bahwa puncak tambahan tidak teridentifikasi. Berdasarkan data listriknya diketahui bahwa penambahan campuran $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ mengubah konstanta termistor (B) dan resistivitas listrik suhu ruang (ρ_{RT}). Harga B sebesar $2807\text{-}3293\text{ }^\circ\text{K}$ dan ρ_{RT} sebesar $3,4\text{-}5,3\text{ k}\Omega\text{cm}$ dari keramik berbasis CuFe_2O_4 yang dibuat memenuhi kebutuhan pasar.

Kata Kunci : *Termistor, NTC, CuFe_2O_4 , SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3*

ABSTRACT

The effect of $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ mixture addition on the characteristics of CuFe_2O_4 ceramics for NTC thermistors has been studied. The ceramics were produced by pressing a homogenous mixture of composition 1: CuO , Fe_3O_4 and $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0,5; 0,5 dan 0,5 w/o), composition 2: CuO , Fe_3O_4 dan $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0,5; 0,5 and 1,0 w/o) and composition 3 : CuO , Fe_3O_4 and $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0,5; 0,5 dan 2,0 w/o) in appropriate proportions to produce CuFe_2O_4 based ceramics. The pressed powder was then sintered at $1100\text{ }^\circ\text{C}$ for 2 hours in air. Electrical characterization was done by measuring electrical resistivity of the ceramics at various temperatures ($25\text{ }^\circ\text{C}$ - $100\text{ }^\circ\text{C}$). Microstructure and structure analysis were also carried out by using optical microscope and x-ray diffractometer (XRD), respectively. The XRD analyses showed that the CuFe_2O_4 and $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ mixture added - CuFe_2O_4 ceramics have crystal structure of tetragonal spinel. The presence of second phase could not be identified from the XRD analyses. According to the electrical data, it was known that addition of the $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ mixture changed the thermistor constant (B) and the temperature electrical resistivity (ρ_{RT}). The value of B of $2807\text{-}3293\text{ }^\circ\text{K}$ and (ρ_{RT}) of $3,4\text{-}5,3\text{ k}\Omega\text{cm}$ of the produced CuFe_2O_4 -based ceramics fitted market requirement.

Key words : *Thermistor, NTC, CuFe_2O_4 , SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3*

1. PENDAHULUAN

Termistor NTC telah lama dikenal dan penerapannya sudah sangat luas karena kemampuannya untuk digunakan di berbagai bidang aplikasi seperti pengukur suhu, kompensator suhu, pembatas arus listrik, sensor aliran air dan sensor tekanan [1]. Umumnya termistor NTC dibuat dari keramik berstruktur spinel yang dibentuk oleh oksida logam transisi dengan rumus umum AB_2O_4 dengan A adalah ion logam dalam posisi tetrahedral dan B adalah ion logam dalam posisi oktahedral [2-10]. Sudah banyak penelitian untuk mengembangkan karakteristik dari termistor NTC berstruktur spinel [6, 7, 11]. Salah satu keramik spinel yang berpotensi untuk termistor NTC adalah $CuFe_2O_4$. Keramik ini dapat diproyeksikan untuk digunakan sebagai penarik devisa atau setidaknya pengurang devisa yang lari ke luar negeri karena bahan dasarnya secara potensial berlimpah di Indonesia yaitu mineral yang mengandung oksida besi dan tembaga. Dalam rangka memperluas kemungkinan aplikasi keramik berbasis $CuFe_2O_4$, usaha untuk memperbaiki kualitas keramik tersebut sebagai termistor NTC perlu dilakukan. Salah satu usaha tersebut adalah dengan mempelajari pengaruh penambahan campuran $SiO_2-TiO_2-Al_2O_3$ terhadap karakteristik spinel keramik $CuFe_2O_4$ untuk termistor NTC.

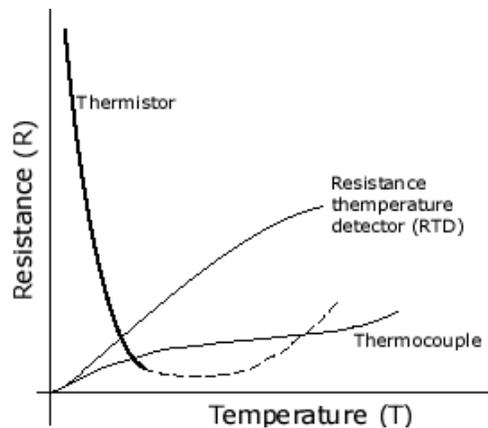
Keramik $CuFe_2O_4$ umum digunakan sebagai magnet lunak [12-15] selain juga dapat digunakan sebagai katalis [16-18]. Secara teoritis keramik $CuFe_2O_4$ juga mempunyai kemampuan untuk menjadi termistor NTC karena semi konduktif. Berdasarkan diagram fase $CuO-Fe_2O_3$ [19], ada suatu daerah di mana komposisi keramik CuO dan Fe_2O_3 bila dipanaskan pada suhu $1100^\circ C$ akan mempunyai fase cair. Pada suhu ruang, material yang meleleh ini mungkin berada di batas butir. Secara teori material batas butir akan berpengaruh pada karakteristik keramik, khususnya pada karakteristik listrik. Untuk mengubah karakteristik listriknya penambahan aditif dapat dilakukan. Pada saat zat aditif ditambahkan, karakteristik dari $CuFe_2O_4$ akan berubah sebab kemungkinan ada dua kondisi. Kondisi itu adalah, pertama, aditif larut padat di dalam $CuFe_2O_4$ dengan cara mensubstitusikan ion-ion Cu ataupun ion-ion Fe , kedua, aditif tidak dapat larut tetapi meleleh pada batas butir dan pada keadaan tertentu akan bereaksi dengan berbagai komponen di dalam keramik.

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

listriknnya mungkin semakin tinggi sebab keberadaan aditif di batas butir akan mengubah struktur mikronya. Di dalam penelitian kami sebelumnya [11], telah dilakukan studi pengaruh penambahan TiO_2 terhadap karakteristik listrik keramik CuFe_2O_4 . Diketahui bahwa akibat penambahan TiO_2 , resistivitas listrik pada suhu ruang (ρ_{RT}) dan konstanta termistor (B) cenderung mengalami kenaikan. Pada penelitian dipelajari bagaimana pengaruh penambahan campuran SiO_2 - TiO_2 - Al_2O_3 terhadap karakteristik keramik CuFe_2O_4 untuk termistor NTC, khususnya karakteristik listrik berdasarkan hipotesis yang disebutkan di atas. Oksida SiO_2 , TiO_2 dan Al_2O_3 umumnya terkandung di dalam mineral yang banyak mengandung oksida besi seperti hematit dan magnetit. Oleh karena itu penelitian ini merupakan simulasi jika suatu saat bahan dasar berbasis mineral seperti hematit dan magnetit digunakan sebagai bahan dasar termistor berbasis CuFe_2O_4 .

2. TINJAUAN PUSTAKA

Termistor NTC mempunyai karakteristik yang khas seperti gambar berikut ini :



Gambar 1. Grafik hubungan antara Temperatur (T) dan Resistivitas listrik (R) untuk thermistor NTC.

Tahanannya akan berkurang secara eksponensial, jika suhu termistor bertambah. Hubungan antara tahanan dan suhu termistor diekspresikan pada persamaan (1) [1,2,7,10,11].

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

dengan R = Tahanan termistor (Ohm)
 R_0 = Tahanan termistor pada suhu awal (Ohm)
 B = Konstanta termistor ($^{\circ}\text{K}$)
 T = Suhu termistor ($^{\circ}\text{K}$)

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 ($^{\circ}\text{K}$)
 ΔE = Energi aktivasi (eV),
 k = Konstanta Boltzmann ($\frac{eV}{^{\circ}\text{K}}$)

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
 $T_2 = 85^{\circ}\text{C} = 358,16^{\circ}\text{K}$
 $T_1 = 25^{\circ}\text{C} = 298,16^{\circ}\text{K}$

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

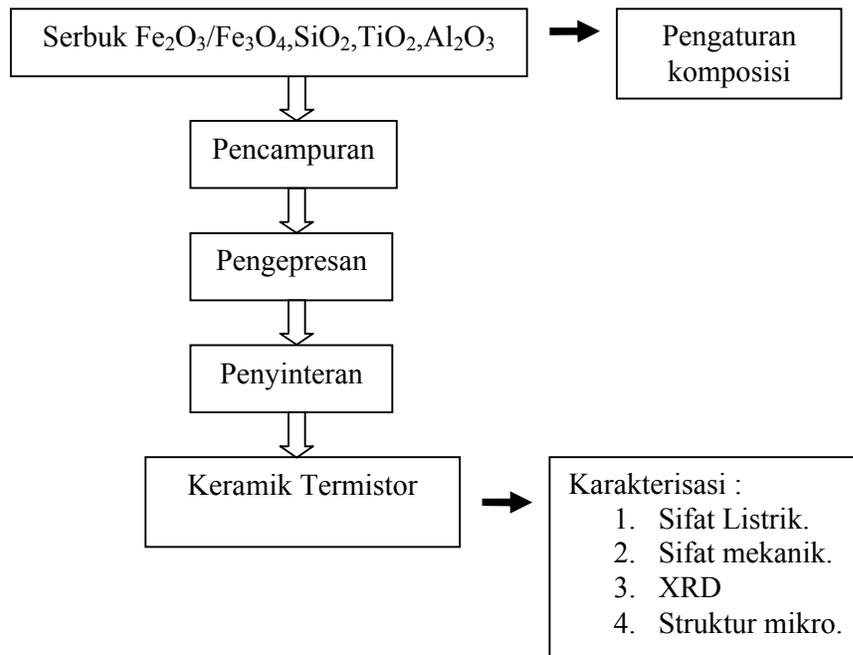
$$\alpha = \frac{-B}{T^2} \dots\dots\dots(4)$$

dengan α = Sensitifitas termistor,
B = Koefisien termistor dalam $^{\circ}\text{K}$
T = suhu dalam $^{\circ}\text{K}$

Semakin besar harga α dan B, kualitas termistor semakin baik. Konstanta B dapat ditentukan pula dari grafik $\ln R$ versus $1/T$, di mana gradien kurva merupakan konstanta B.

3. METODE PERCOBAAN

Metode penelitian ini tergambar pada diagram alir dibawah ini:



Gambar 2. Diagram alir proses pembuatan keramik termistor berbasis CuFe_2O_4 .

Serbuk CuO , Fe_2O_3 dan campuran $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ditimbang dengan komposisi seperti Tabel 1. Kemudian serbuk campuran Fe_2O_3 , CuO dan aditif tersebut dicampur di dalam media etanol dengan pengadukan selama 2 jam. Selanjutnya hasil campuran serbuk tersebut dikalsinasi pada suhu 800°C selama 2 jam setelah dikeringkan. Setelah dikalsinasi serbuk campuran kemudian digerus dan diayak dengan ayakan yang berukuran $38\ \mu\text{m}$ (diameter lubang $< 38\ \mu\text{m}$). Serbuk hasil ayakan

kemudian dipres dengan tekanan 4 ton/cm² sehingga menjadi pelet mentah. Pelet mentah kemudian disinter pada suhu 1100°C selama 2 jam di dalam atmosfer udara tungku. Pelet hasil sinter dipotret untuk mengetahui penampilan visualnya.

Struktur kristal dari pelet yang sudah disinter kemudian dianalisis dengan difraksi sinar-x (XRD) dengan menggunakan radiasi K α pada tegangan 40 kV dan arus 25 mA. Setelah melalui proses pengampelasan secara berjenjang dengan kertas ampelas yang berbeda ukuran (nomor), pelet dipoles dan dietsa secara termal. Struktur mikro dari pelet ini diuji dengan mikroskop optik. Karakterisasi listrik dilakukan setelah kedua sisi pelet hasil sinter dilapisi dengan pasta konduktif perak. Setelah perekatnya kering di suhu ruang, dipanaskan pada suhu 750°C selama 10 menit. Karakterisasi dilakukan melalui pengukuran resistivitas listrik pada berbagai suhu dari suhu 25°C hingga 100°C dengan interval 5°C.

Tabel.1. Komposisi campuran CuO, Fe₂O₃ dan aditif SiO₂, Al₂O₃ dan TiO₂ dalam % berat.

No.	CuO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂
1.	33,49	65,01	0,50	0,50	0,50
2.	33,32	64,68	0,50	1	0,50
3.	32,98	64,02	0,50	2	0,50

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

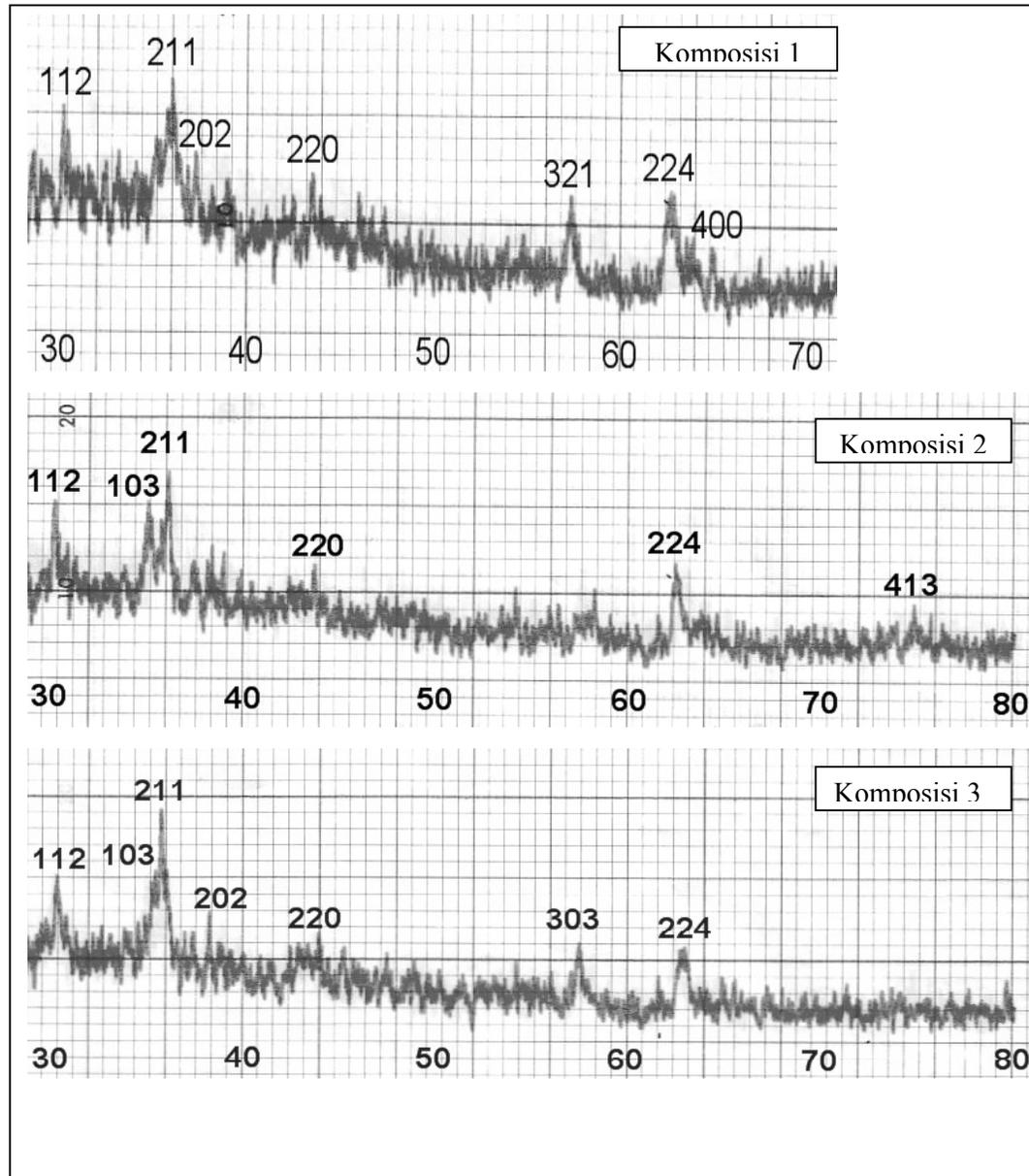
4.1 HASIL

Gambar 3 menunjukkan penampilan visual pelet keramik CuFe₂O₄ yang ditambah campuran SiO₂-TiO₂-Al₂O₃. Pelet cukup mulus tanpa retak.



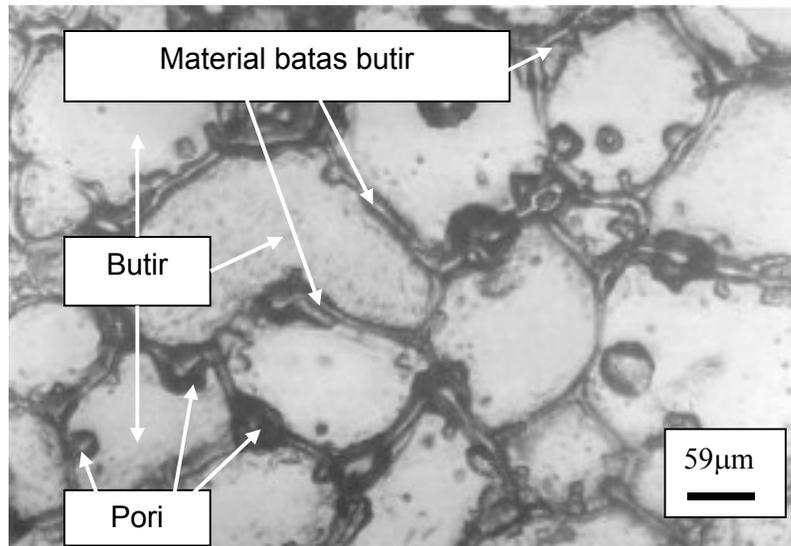
Gambar 3. Penampilan visual pelet keramik CuFe₂O₄ ditambah campuran SiO₂-TiO₂-Al₂O₃.

Hasil analisis XRD diperlihatkan pada Gambar 4 yang menunjukkan pola difraksi keramik CuFe_2O_4 yang diberi penambahan aditif masing-masing sesuai komposisi-1, komposisi-2 dan komposisi-3.

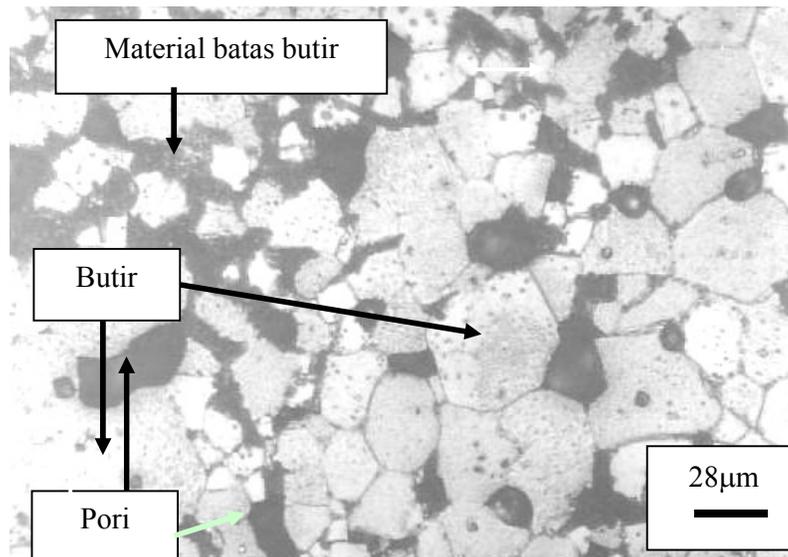


Gambar 4. Pola difraksi sinar-x keramik CuFe_2O_4 untuk komposisi-1, komposisi-2 dan komposisi-3, memperlihatkan struktur kristal spinel tetragonal.

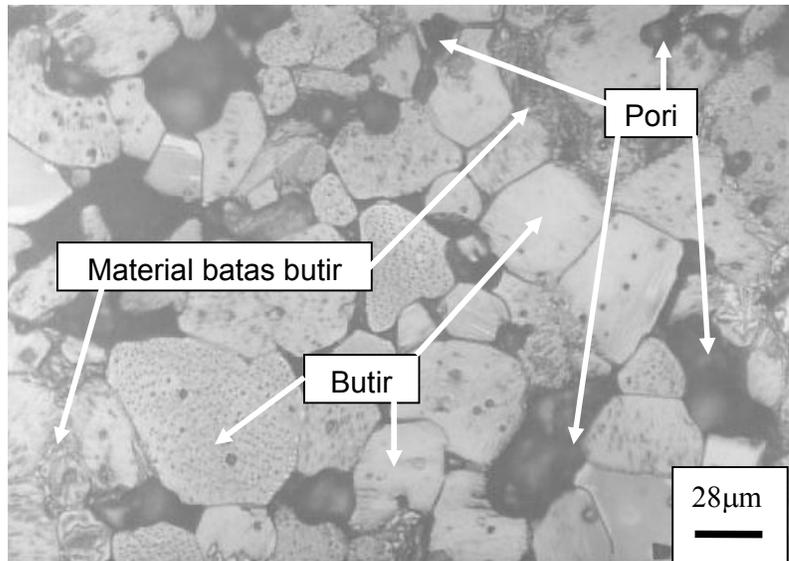
Struktur mikro keramik CuFe_2O_4 tanpa penambahan dan yang masing-masing ditambah $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0,5 % berat) (komposisi-1), $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (1 % berat) (komposisi 2) dan $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (2% berat) (komposisi 3) ditunjukkan pada Gambar 5, 6, 7 dan 8.



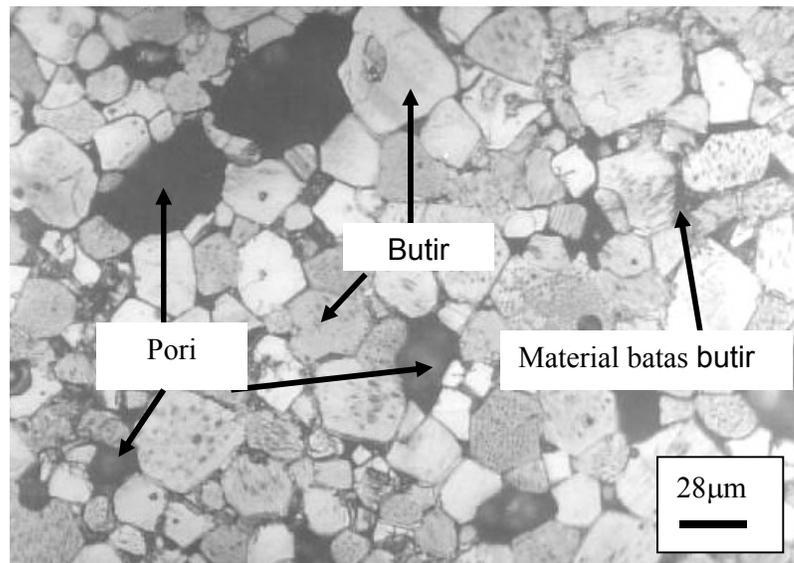
Gambar 5. Struktur mikro keramik CuFe_2O_4 tanpa penambahan aditif [11].



Gambar 6. Struktur mikro keramik CuFe_2O_4 yang ditambah 0,5 w/o SiO_2 , 0,5 w/o TiO_2 dan 0,5 w/o Al_2O_3 .(komposisi-1)

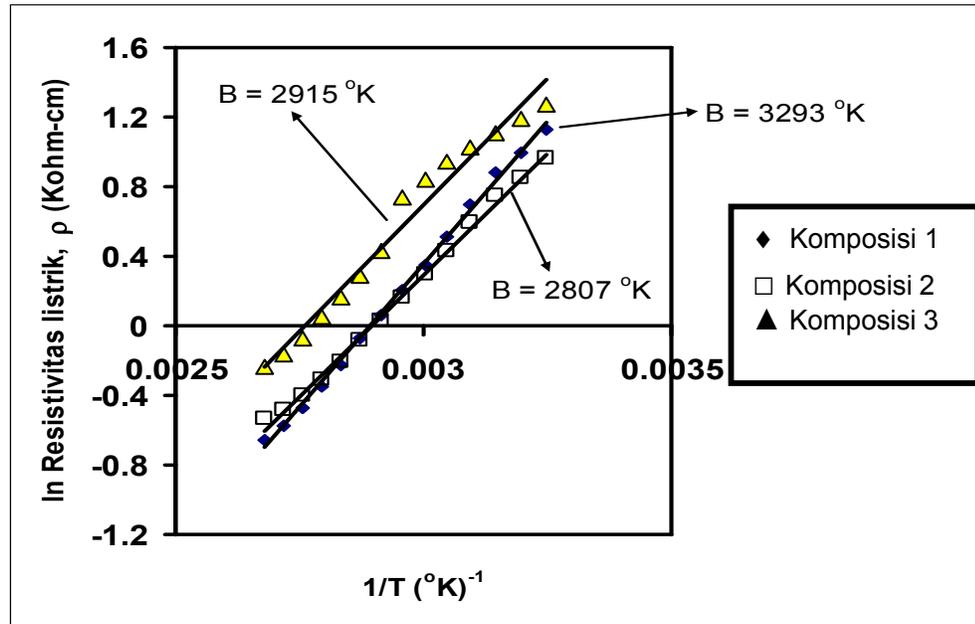


Gambar 7. Struktur mikro keramik CuFe_2O_4 yang ditambah 0.5 w/o SiO_2 , 0,5 w/o TiO_2 dan 1 w/o Al_2O_3 .(komposisi-2)



Gambar 8. Struktur mikro keramik CuFe_2O_4 yang ditambah 0.5 w/o SiO_2 , 0,5 w/o TiO_2 dan 2 w/o Al_2O_3 .(komposisi-3).

Hasil karakterisasi listrik diperlihatkan pada Gambar 9 dan Tabel 2.



Gambar 9. Hubungan antara ln Resistivitas listrik dan $1/T$ keramik CuFe_2O_4 yang ditambah SiO_2 , TiO_2 dan Al_2O_3 dengan komposisi 1, 2 dan 3.

Tabel 2. Karakteristik listrik keramik CuFe_2O_4 yang ditambah SiO_2 , TiO_2 dan Al_2O_3 komposisi 1, 2 dan 3 serta komposisi 4 sebagai pembandingan [11].

No.	TiO_2 (w/o)	SiO_2 (w/o)	Al_2O_3 (w/o)	B (°K)	α (%/°K)	ρ_{SR} (Kohm-cm)
1.	0,5	0,5	0,5	3293	3,66	4,3
2.	0,5	0,5	1	2807	3.12	3,4
3.	0,5	0,5	2	2915	3.24	5,3
4.	0	0	0	2548	2,83	0,3

Kebutuhan pasar untuk resistivitas listrik suhu ruang (ρ_{RT}) = 10 ohm.cm-1Mohm.cm dan untuk $B \geq 2000\text{K}$.

4.2 PEMBAHASAN

Penampilan visual pelet keramik CuFe_2O_4 ditambah campuran $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ditunjukkan pada Gambar 3. Penampilan visual cukup baik, memperlihatkan bahwa parameter penyinteran yang digunakan sudah sesuai untuk membuat keramik yang baik.

Hasil analisis XRD pada Gambar 4 memperlihatkan bahwa seluruh sampel dengan penambahan SiO_2 , TiO_2 dan Al_2O_3 yang bervariasi mempunyai struktur spinel tetragonal. Hal ini memperlihatkan bahwa pendinginan selama penyinteran berlangsung relatif lambat. Struktur kubik membutuhkan pendinginan yang cepat. Pola difraksi pada Gambar 4 didominasi puncak matriks tetragonal spinel. Puncak tambahan tidak teridentifikasi kemungkinan karena konsentrasi aditif lebih kecil dari pada batas minimum ketelitian difraktometer sinar-x yang digunakan. Puncak-puncak difraksi relatif tidak tajam dan relatif pendek sehingga puncak latar belakang mengganggu identifikasi. Terbentuknya CuFe_2O_4 juga memperlihatkan bahwa sintesis dari CuO dan Fe_2O_3 pada suhu 1100°C selama 2 jam telah berjalan dengan baik.

Data struktur mikro yang diperlihatkan pada Gambar 5-8 menunjukkan bahwa keramik CuFe_2O_4 yang ditambah SiO_2 , TiO_2 dan Al_2O_3 sangat porous dan memiliki pori atau rongga yang relatif besar. Butir-butir keramik tanpa penambahan aditif cukup besar. Menurut diagram fase $\text{CuO-Fe}_2\text{O}_3$ [19, Anonymous, Phase diagram for Ceramists, ASTM.], terdapat material yang meleleh selama penyinteran pada suhu 1100°C . Konsentrasi material yang meleleh relatif besar sehingga butir-butir relatif sangat besar dan cenderung bundar. Di dalam sampel yang mengandung Al_2O_3 , aditif dapat larut atau tersegregasi. Jika tidak ada interaksi antara material meleleh awal dan Al_2O_3 , serta Al_2O_3 terlarut di dalam CuFe_2O_4 dengan mensubstitusi Fe^{3+} atau Cu^{2+} , maka resistivitas akan turun atau tetap. Akan turun ketika ion Al mensubstitusi ion Cu dan tidak berubah ketika mensubstitusi ion Fe^{3+} . Material yang meleleh di batas butir menjadi promotor pertumbuhan butir. Tendensi perubahan struktur mikro dengan pertambahan konsentrasi Al_2O_3 tidak linear. Pada penelitian kami sebelumnya tentang pengaruh SiO_2 and TiO_2 , diketahui bahwa SiO_2 and TiO_2 cenderung tersegregasi di batas butir. Ada kemungkinan bahwa material yang tersegregasi ini saling bereaksi dan menguap selama penyinteran dan meninggalkan rongga yang relatif besar.

Data listrik pada Gambar 9 menunjukkan bahwa karakteristik listrik keramik mengikuti sifat dari termistor NTC (Gambar 1 dan persamaan 1). Perubahan karakteristik listrik dipengaruhi oleh perubahan struktur mikro, yang berubah dengan

adanya penambahan Al_2O_3 . Secara teoritis Al_2O_3 tidak mempengaruhi jumlah pembawa muatan jika larut padat di dalam keramik CuFe_2O_4 . Jika Al_2O_3 yang ditambahkan larut di dalam keramik CuFe_2O_4 dengan mensubstitusi Fe secara teoritis tidak akan menghasilkan tambahan elektron dan jika mensubstitusi Cu secara teoritis akan menghasilkan elektron tambahan. Dengan kata lain resistivitas listrik akan turun. Meski kemungkinan Al mensubstitusi Cu sangat kecil, ada kemungkinan sebagian kecil dari Al menggantikan ion Cu. Data karakteristik listrik yang diperoleh tidak memperlihatkan tendensi perubahan resistivitas yang jelas terhadap pertambahan konsentrasi Al_2O_3 . Sehingga sukar untuk mengatakan adanya efek Al. Terdapat kemungkinan bahwa ketiga aditif saling bereaksi dan walaupun ada, hanya sebagian kecil saja aditif yang membentuk larutan padat di dalam CuFe_2O_4 sehingga jika resistivitas listrik cenderung meningkat, maka perubahan itu lebih disebabkan oleh perubahan struktur mikro akibat aditif yang tersegregasi di batas butir.

Data Tabel 1 memperlihatkan bahwa harga-harga resistivitas suhu ruang dan konstanta termistor keramik CuFe_2O_4 tanpa aditif maupun yang diberi aditif memenuhi harga kebutuhan pasar. Dibandingkan dengan keramik CuFe_2O_4 murni (tanpa aditif), keramik CuFe_2O_4 yang diberi aditif memiliki konstanta termistor yang lebih besar. Hal ini berarti keramik CuFe_2O_4 dengan aditif lebih sensitif. Resistivitas listrik suhu ruang keramik CuFe_2O_4 murni relatif sangat kecil. Keramik ini lebih sesuai untuk penggunaan daya kecil sementara keramik CuFe_2O_4 dengan aditif lebih sesuai untuk penggunaan daya yang lebih besar. Hal ini berkaitan dengan pemanasan diri (self heating) yang mempengaruhi keakuratan termistor.

5. KESIMPULAN

Penambahan campuran SiO_2 , TiO_2 dan Al_2O_3 , menyebabkan keramik CuFe_2O_4 sangat poros dan memiliki pori atau rongga yang relatif besar. Tendensi perubahan struktur mikro dengan pertambahan konsentrasi Al_2O_3 untuk keramik CuFe_2O_4 tidak terlihat dengan jelas (cenderung tidak linear). Kemungkinan campuran SiO_2 , TiO_2 dan Al_2O_3 saling bereaksi selama sintering, meninggalkan rongga (pori) dan cenderung tersegregasi di batas butir. Penambahan campuran SiO_2 , TiO_2 dan Al_2O_3 , mengubah harga resistivitas listrik suhu ruang (ρ_{RT}) dan konstanta termistor (B). Nilai resistivitas listrik suhu ruang ($\rho_{\text{RT}} = 3,4-5,3 \text{ k}\Omega\text{cm}$), dan konstanta termistor ($B = 2807-3293\text{K}$) dari keramik CuFe_2O_4 yang diberi aditif yang dibuat pada penelitian ini memenuhi

kebutuhan pasar. Dibandingkan dengan keramik CuFe_2O_4 murni (tanpa aditif), keramik CuFe_2O_4 dengan aditif lebih sensitif.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Kami 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: 014/SPPP/PP/DP2M/II/2006 tanggal 24 April 2006.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. BetaTHERM Sensors [on line]. Available: <http://www.betatherm.com>.
- [2]. NA, E. S., PAIK, U.G., CHOI, S.C., "The effect of a sintered microstructure on the electrical properties of a Mn-Co-Ni-O thermistor", J. Ceram. Process. Res., 2 (2001) 31-34.
- [3]. MATSUO YOSHIHIRO, HATA TAKUKI, KURODA TAKAYUKI, US Patent 4,324,702, 1982.
- [4]. JUNG HYUNG J., YOON SANG O., HONG KI Y., LEE JEON K., US Patent 5,246,628, 1993.
- [5]. HAMADA KAZUYUKI, ODA HIROSHI, US Patent 6,270,693, 2001.
- [6]. PARK K., "Microstructure and electrical properties of $\text{Ni}_{1.0}\text{Mn}_{2-x}\text{Zr}_x\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 1.0$) negative temperature coefficient thermistors", Mater. Sci. Eng., B104 (2003)9-14.
- [7]. PARK K., BANG D.Y., "Electrical properties of Ni-Mn-Co-(Fe) oxide thick film NTC thermistors", J. Mater. Sci.: Mater. in Elec., 14 (2003)81-87.
- [8]. FRITSCH SHOPIE GULEMET, SALMI JAOUAD, SARRIAS JOSEPH, ROUSSET ABEL, SCHURMAN SHOPIE, LANNOO ANDRE, "Mechanical properties of nickel manganites-based cermics used as negative temperature coefficient thermistors", Mater. Res. Bull., 39 (2004)1957-1965.
- [9]. R. SCHMIDT, A. BASU, A.W. BRINKMAN, "Production of NTCR thermistor devices based on $\text{NiMn}_2\text{O}_{4+\delta}$ ", J. Europ. Ceram. Soc., 24(2004) 1233-1236.
- [10]. 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", Mater. Sci. Eng., B119(2005)55-60.

- [11]. WIENDARTUN , DANI GUSTAMAN SYARIF, The Effect of TiO₂ Addition on the Characteristics of CuFe₂O₄ Ceramics for NTC Thermistors, Prosiding International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS) 2006, ITB, Bandung, (2006).
- [12]. J.Z. JIANG, G.F. GOYA, H.R. RECHENBERG, J. Phys.: Condens. Mater 11(1999) 4063.
- [13]. G.F. GOYA, H.R. RECHENBERG, J.Z. JIANG, J. Magnet. Magneti.c Mater. 218(2000)221.
- [14]. G.F. GOYA, H.R. RECHENBERG, J. Appl. Phys., 84 (2)(1998)1101.
- [15]. C.R. ALVES, R. AQUINO, M.H. SOUSA, H.R. RECHENBERG, G.F. GOYA, F.A. TOURINHO, J. DEPEYROT, J. Metas. Nanocrys. Mater. 20-21(2004)694.
- [16]. KAMEKA SATOSHI, TANABE TOYKAZU, TSAI AN, Catal. Lett., 100 (2005)89-93.
- [17]. W.F. SHANGGUAN, Y. TERNAKA, S. KAGAWA, Appl. Catal., Part B, 16(1998)149-154.
- [18]. R.C. WU, H.H. QU, H. HE. Y.B. YU, Appl. Catal., Part B 48 (1)(2004)49.
- [19]. ANONYMOUS, Phase diagram for Ceramics, ASTM.
- [20]. BARSOUM M., Fundamental of Ceramics, McGraw-Hill, NY (1997).

