

KARAKTERISASI VARISTOR ZnO-Bi₂O₃-CuO

Dani Gustaman Syarif^{*}, Bambang Ariwahjoedi^{**}, Saeful Hidayat^{*}, M. Yamin^{*}

^{*}Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknik Nuklir-BATAN

^{**}Jurusan Kimia, ITB

ABSTRAK

KARAKTERISASI VARISTOR ZnO-Bi₂O₃-CuO. Untuk mengetahui peran CuO dalam pembentukan varistor, pembuatan dan karakterisasi varistor ZnO-Bi₂O₃-CuO telah dilakukan. Dalam studi ini dilakukan penyinteran pelet ZnO-0,8% mol Bi₂O₃ yang ditambahi 0,5; 1 dan 2 % mol CuO pada suhu 1100°C selama 1 jam. Pelet sinter dianalisis memakai metode metalografi dan difraksi sinar-x. Karakteristik listrik dari pelet tersebut juga dievaluasi. Penambahan CuO menaikkan tegangan patah dan memperbesar arus bocor varistor ZnO-Bi₂O₃, tetapi tidak meningkatkan faktor kenon-linearannya. Dengan konsentrasi CuO 0,5-2 % mol, harga faktor kenon-linearitas yang didapat masih lebih kecil dari pada harga faktor kenon-linearitas untuk varistor ZnO-Bi₂O₃ dan masih lebih kecil dari pada faktor kenon-linearitas untuk kebutuhan pasar (lebih besar 20), karena penambahan CuO tidak dapat membentuk jebakan elektron dalam. Hasil analisis metalografi dan difraksi sinar-x memperlihatkan bahwa pada struktur mikro varistor ZnO-Bi₂O₃-CuO, lapisan batas butir dibentuk oleh ZnO.24Bi₂O₃ dan butirnya dibentuk oleh larutan padat ZnO-CuO.

Kata kunci: varistor, struktur mikro, karakteristik listrik, ZnO, Bi₂O₃, CuO

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF ZnO-Bi₂O₃-CuO VARISTOR. In order to study the role of CuO in varistors formation, fabrication and characterization of ZnO-Bi₂O₃-CuO varistors had been carried out. In this study, sintering pellets of ZnO-0.8 mole % Bi₂O₃ added with 0.5, 1 and 2 mole % CuO had been done at 1100°C for 1 hour. The pellets were analyzed by using metallographics and x-ray diffraction methods. The electrical characteristic of the pellets was also evaluated. It was known that the addition of CuO increased the breakdown voltage, and the leakage current of the ZnO-Bi₂O₃ varistor, however, did not increase the non-linearity factor of the varistor. With concentration of CuO of 0.5-2 mole %, the non-linearity factors were smaller than that of the ZnO-Bi₂O₃ varistor, much lower than the non-linearity factor of the market requirement (larger than 20), because the addition of CuO could not form electron deep traps. The metallographic and x-ray diffraction results showed that the microstructure of ZnO-Bi₂O₃-CuO varistor consisted of grain boundary layer formed from ZnO.24Bi₂O₃ and grains formed from ZnO-CuO solid solution.

Key words: varistor, microstructure, electrical characteristic, ZnO, Bi₂O₃, CuO

PENDAHULUAN

Dalam rangka meraih kemampuan dalam pembuatan varistor (variable resistor) yaitu komponen pelindung rangkaian listrik atau elektronik dari tegangan transien, secara mandiri, beberapa penelitian mengenai varistor dengan bahan dasar ZnO telah dilakukan [1-9]. Salah satu varistor yang telah dibuat pada penelitian terdahulu adalah ZnO-Bi₂O₃[1,2]. Berbagai usaha untuk meningkatkan faktor kenon-linearitas varistor ZnO-Bi₂O₃ telah dilakukan dengan menambahkan aditif Al₂O₃[10], Nb₂O₅[10], Sb₂O₃[11], CoO [12] serta MnO[13]. Tiga aditif pertama tidak menghasilkan faktor kenon-linearitas sesuai kebutuhan pasar (lebih besar dari pada 20), sementara itu aditif ke empat dan ke lima yaitu CoO dan MnO terbukti dapat meningkatkan faktor kenon-linearitas varistor ZnO-Bi₂O₃ hingga mencapai kebutuhan pasar, karena kedua aditif ini menghasilkan distribusi cacat kristal yang sedemikian sehingga membentuk penghalang tegangan yang tipis dan menghasilkan jebakan elektron dalam (deep electron trap). Namun untuk memperoleh alternatif selain CoO dan MnO perlu dicoba aditif lainnya. Aditif alternatif yang akan dikaji adalah CuO.

Pemilihan CuO didasarkan atas dua pertimbangan. Pertama, secara teoritis CuO yang mempunyai valensi seperti CoO dan MnO dan sama-sama logam transisi, mempunyai kemungkinan yang besar untuk menjadi aditif alternatif dalam pembuatan varistor dan, kedua, tembaga (Cu) yang melimpah dalam bentuk mineral di Indonesia (khususnya Papua) dan keberadaan limbah tembaga baik dari konsumsi rumah tangga maupun industri sangat perlu dimanfaatkan dalam rangka memberi nilai tambah. Di samping itu, sejauh ini belum terdapat laporan atau studi mengenai varistor ZnO-Bi₂O₃-CuO. Berdasarkan latar belakang itulah penelitian ini dilakukan. Cara pelaksanaan percobaan dan konsentrasi aditif disamakan dengan cara pelaksanaan percobaan dan konsentrasi aditif penelitian sebelumnya [12,13]. Hal ini dimaksudkan

agar peran CuO diketahui secara jelas dengan menggunakan penelitian tersebut sebagai pembanding.

TEORI

Karakteristik medan listrik-rapat arus listrik varistor yang non-linear terbentuk karena terjadi pembentukan penghalang schottky pada lapisan deplesi oleh cacat-cacat kristal bermuatan positif dan negatif. Model penghalang schottky [14] secara ilustratif diperlihatkan pada Gambar 1. Berdasarkan model penghalang schottky, menurut Levinson dkk. [15], transpor listrik (electrical transport) pada varistor mengikuti dua pola yaitu pola persamaan (1) untuk medan listrik rendah (pre-breakdown region) dan pola persamaan (2) untuk medan listrik tinggi (breakdown region). Persamaan (1) memperlihatkan bahwa transpor listrik didominasi oleh efek schottky sedangkan persamaan (2) memperlihatkan bahwa transpor listrik didominasi oleh efek Fowler-Nordheim Tunneling [15]. Secara empiris persamaan (2) sering disederhanakan menjadi persamaan (3) dan (4).

$$J \propto \exp.[-(E_B - \beta E^{1/2})/kT] \quad (1)$$

dengan

J = Rapat arus listrik (mA/cm²)

E_B = Tinggi penghalang Schottky (eV),

E = Medan listrik (V/cm),

K = Konstanta Boltzmann (eV/°K),

T = Suhu dalam derajat Kelvin dan

β = konstanta yang berkaitan dengan lebar penghalang schottky (eV.cm^{1/2}.V^{-1/2})

$$J \propto \exp (- \gamma/E) \quad (2)$$

dengan,

J = Rapat arus listrik (mA/cm^2),

γ = Konstanta (cm/V),

E = Medan listrik (V/cm).

$$J = k E^\alpha \quad (3)$$

dengan,

k = Konstanta yang dipengaruhi struktur mikro ($\text{mA}/\text{V}\cdot\text{cm}$),

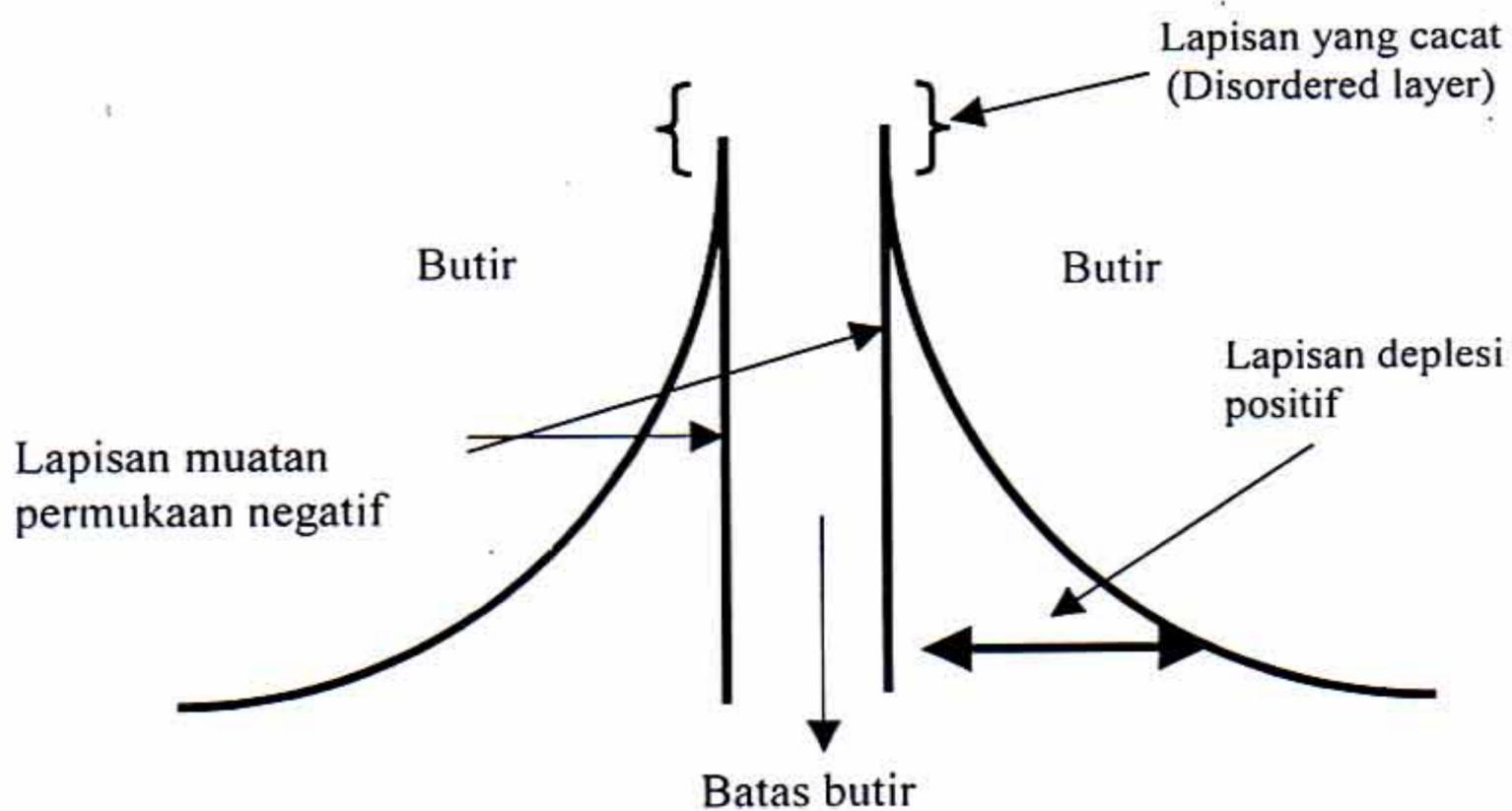
α = Faktor kenon-linearitas (Tanpa satuan).

$$\alpha = \frac{dJ/J}{dE/E} = \frac{d \log J}{d \log E} \approx \frac{\log J_2 - \log J_1}{\log E_2 - \log E_1} \quad (4)$$

dengan,

E_1 dan E_2 = medan listrik (V/cm) pada rapat arus J_1 dan J_2 (mA/cm^2).

α = Faktor kenon-linearitas (Tanpa satuan).



Gambar 1. Model penghalang schottky[14].

TATA KERJA

Sebanyak $(100-0,8-x)$ % mol serbuk ZnO, 0,8 % mol serbuk Bi₂O₃ dan x % mol serbuk CuO, dengan $x = 0,5 ; 1$ dan 2 , dicampur secara homogen di dalam media aseton. Pilihan harga x mengacu kepada penelitian sebelumnya [12,13] yang digunakan sebagai pembanding. Setelah kering (melalui pemanasan pada suhu 60°C selama 24 jam), serbuk campuran kemudian digerus dan diaduk di dalam mortar untuk menjamin homogenitas. Serbuk ini dipres dengan tekanan 3,9 ton/cm² untuk mendapatkan pelet mentah. Pelet mentah yang dihasilkan disinter pada suhu 1100°C selama 1 jam di dalam atmosfer udara. Pemilihan suhu dan waktu sinter yang digunakan mengacu kepada penelitian sebelumnya [1,2,12,13]. Pelet hasil sinter dianalisis menggunakan difraksi sinar-x dengan target Cu. Pelet sinter juga dianalisis secara metalografi menggunakan mikroskop elektron (SEM/EDAX). Penyiapan sampel untuk metalografi dilakukan dengan mengampelas pelet sinter secara berjenjang dengan ampelas kasar (no.400) hingga halus (no. 2000), memoles dengan bantuan pasta intan dan mengetsa menggunakan larutan campuran CH₃COOH dan H₂O dengan perbandingan 1 : 500. Karakteristik E-J (Medan listrik-Rapat arus listrik) pelet ditentukan dengan melakukan pengukuran tegangan (V) pada berbagai arus (I). Harga E diperoleh dengan membagi V dengan tebal pelet dan harga J diperoleh dengan membagi I dengan luas penampang pelet. Harga faktor kenon-linearitas (α) diperoleh dari kurva karakteristik E-J dengan menggunakan persamaan (4) pada J antara 0,1 dan 1 mA/cm².

HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur Mikro dan Analisis Difraksi Sinar-x

Struktur mikro dari beberapa pelet sinter varistor ZnO-Bi₂O₃-CuO diperlihatkan pada Gambar 2. Dua bagian utama dari struktur mikro ini yang terlihat dengan jelas adalah lapisan batas butir yang berwarna putih dan butir yang berwarna

abu-abu. Meskipun kandungan CuO pada masing-masing sampel berbeda, tetapi ukuran butir sampel-sampel tersebut relatif sama, sekitar 9 μm . Dari data ini peran CuO terhadap kecepatan pertumbuhan butir tidak terlihat, dan hanya Bi_2O_3 yang berperan dalam percepatan pertumbuhan butir. Hal itu disebabkan oleh konsentrasi Bi_2O_3 yang sama untuk setiap sampel. Oleh karena itu, maka ukuran butir untuk masing-masing sampel relatif sama.

Analisis difraksi sinar-x berikut ini dilakukan untuk mengetahui jenis material yang terdapat pada butir dan batas butir. Pola difraksi sinar-x pelet $\text{ZnO} + 2\%$ mol CuO sebelum dan sesudah penyinteran pada suhu 1100°C selama 1 Jam dan serbuk CuO awal diperlihatkan masing-masing pada Gambar 3, 4 dan 5. Sementara itu pola difraksi pelet sinter varistor $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-CuO}$ diperlihatkan pada Gambar 6. Pada penelitian ini ZnO , Bi_2O_3 dan CuO masing-masing mempunyai struktur hexagonal (wurtzite), tetragonal (β) dan monoklinik. Pada pola difraksi Gambar 4 dan 6, dapat dilihat bahwa puncak difraksi tambahan dari CuO tidak muncul dan struktur kristal ZnO yang mengandung CuO setelah penyinteran tidak berubah (hexagonal (wurtzite)). Sementara terlihat dengan jelas kehadiran puncak difraksi dari $\text{ZnO}\cdot 24\text{Bi}_2\text{O}_3$ ($\text{ZnBi}_{48}\text{O}_{73}$) pada Gambar 6 yang berstruktur kubik[12]. Hal ini mengindikasikan bahwa CuO larut padat hingga konsentrasi 2 % mol sebagaimana dikonfirmasi oleh Gambar 4. Jika CuO tidak larut padat, maka akan muncul puncak tambahan pada sudut $2\theta=35,6^\circ$ dan/atau $38,8^\circ$ yang merupakan puncak terkuat CuO sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3 dan 5. Larut padatnya CuO dengan konsentrasi hingga 2 % mol di dalam ZnO sangatlah dimungkinkan karena jari-jari ion Cu^{2+} dari CuO ($0,87\text{\AA}$)[16] hampir sama dengan jari-jari ion Zn^{2+} dari ZnO ($0,88\text{\AA}$)[16]. Pembentukan larutan padat ZnO-CuO terjadi melalui pensubstitusian ion Zn^{2+} oleh ion Cu^{2+} (Larutan padat substitusi). Sementara itu karena jari-jari ion Bi^{3+} dari Bi_2O_3 ($1,17\text{\AA}$) [16] terlalu besar dibandingkan dengan jari-jari ion Zn^{2+} dari ZnO , maka Bi_2O_3 tidak larut padat di

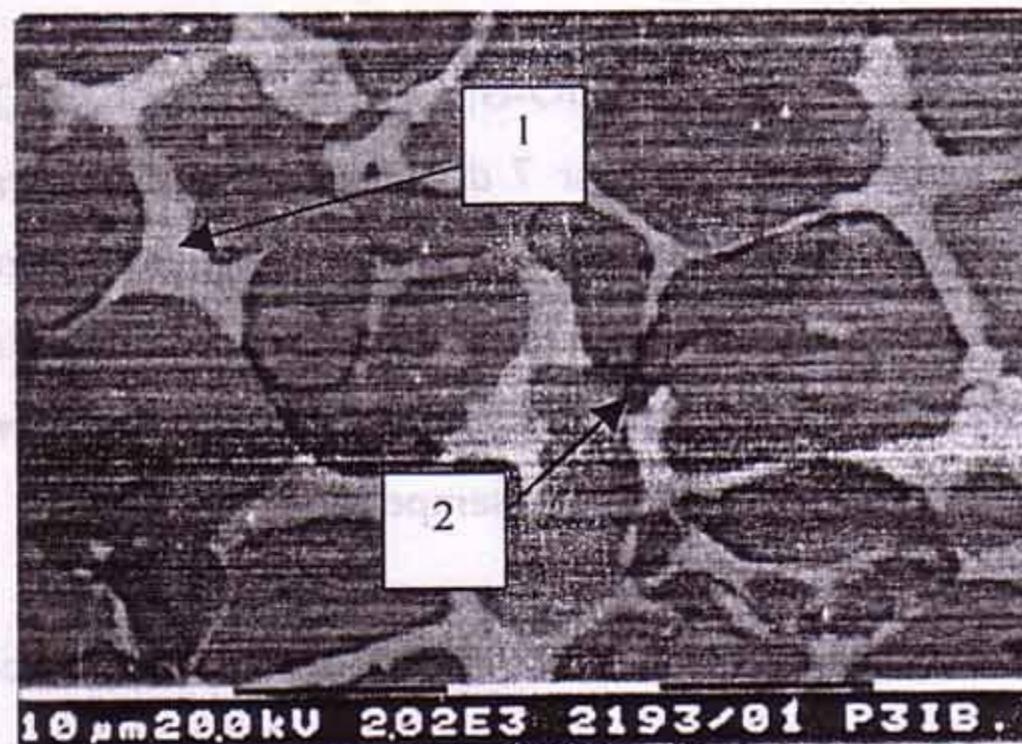
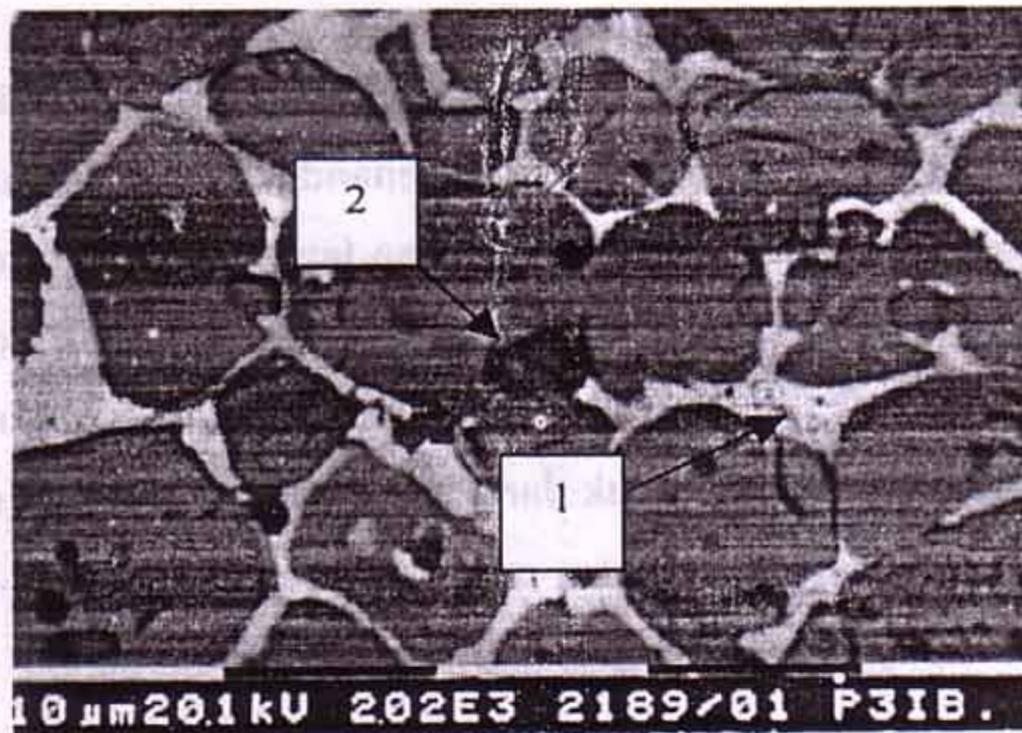
dalam ZnO dan tersegregasi di batas butir membentuk senyawa ZnO.24Bi₂O₃ (ZnBi₄₈O₇₃).

Pola difraksi ZnO-Bi₂O₃-CuO pada Gambar 6 sangat identik dengan pola difraksi sampel ZnO-Bi₂O₃ [12,13]. Hal ini menandakan bahwa CuO tidak membentuk senyawa baru baik dengan ZnO maupun dengan lapisan batas butir ZnO.24Bi₂O₃. Dari hasil analisis difraksi sinar-x ini jelas terlihat bahwa struktur mikro yang diperlihatkan pada Gambar 2 terdiri atas butir (matriks) yang terbentuk dari larutan padat ZnO-CuO dan lapisan batas butir yang terbentuk dari ZnO.24Bi₂O₃. Struktur mikro varistor ZnO-Bi₂O₃-CuO ini identik dengan struktur mikro varistor ZnO-Bi₂O₃-CoO[12] dan ZnO-Bi₂O₃-MnO[13] meskipun karakteristik listriknya sangat berbeda.

Karakteristik Listrik

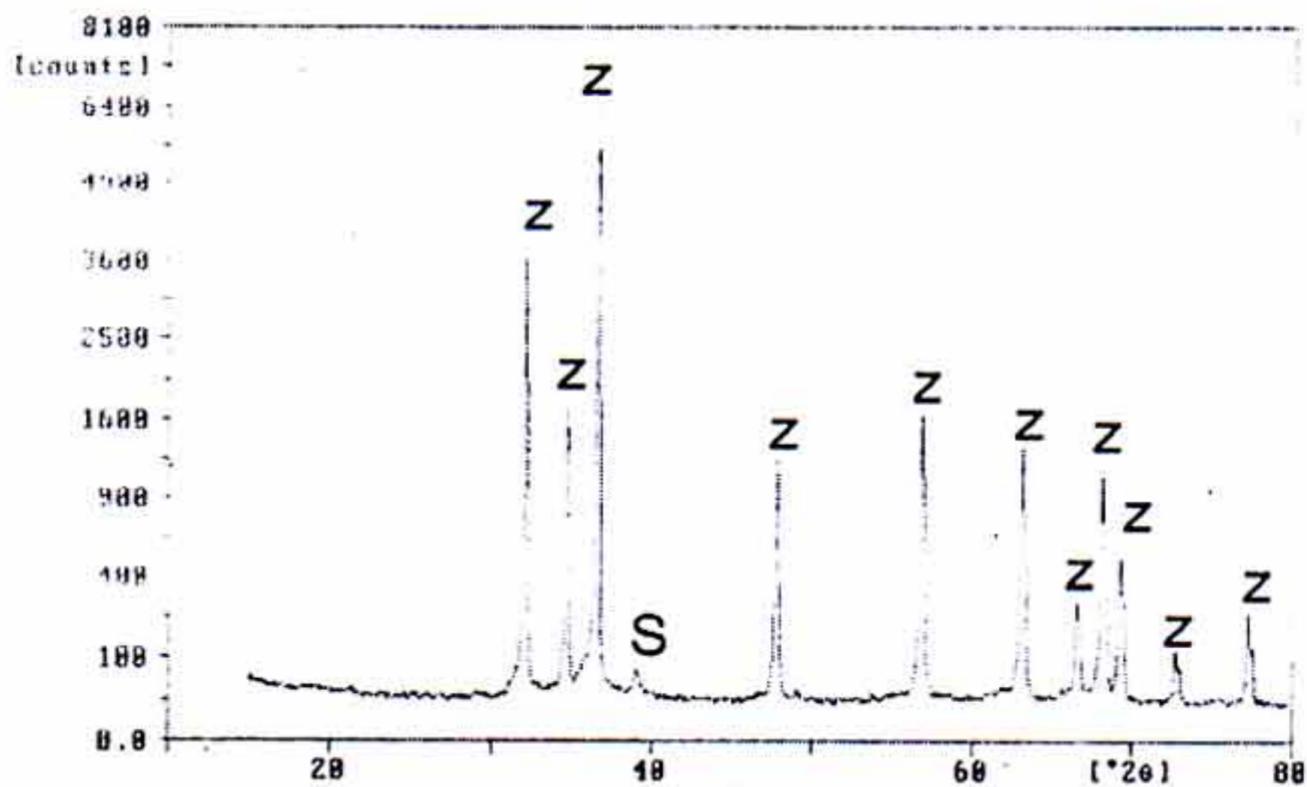
Karakteristik E-J varistor ZnO-Bi₂O₃ yang ditambah CuO pada berbagai konsentrasi dapat dilihat pada Gambar 7 dan faktor kenon-linearannya diperlihatkan pada Tabel 1. Faktor kenon-linearitas sampel dengan kandungan CuO 2 % mol ditentukan dengan cara ekstrapolasi karena pengukuran yang dilakukan tidak dapat mencapai harga $J = 1 \text{ mA/cm}^2$, tetapi dengan melihat kecenderungan kurva pada Gambar 7, harga faktor kenon-linearitas sampel ini diperkirakan masih mempunyai ketelitian yang cukup.

Dengan penambahan CuO, pada $J < 0,001 \text{ mA/cm}^2$ kurva cenderung berimpit, dimana pengaruh Cu tidak signifikan. Sementara itu pada daerah $J > 0,001 \text{ mA/cm}^2$ tampak bahwa kurva cenderung bergeser ke atas. Kurva varistor ZnO-Bi₂O₃ dengan kandungan CuO lebih kecil berada di bawah kurva varistor ZnO-Bi₂O₃ dengan kandungan CuO lebih besar. Hal ini berarti CuO menaikkan tahanan listrik varistor ZnO-Bi₂O₃.

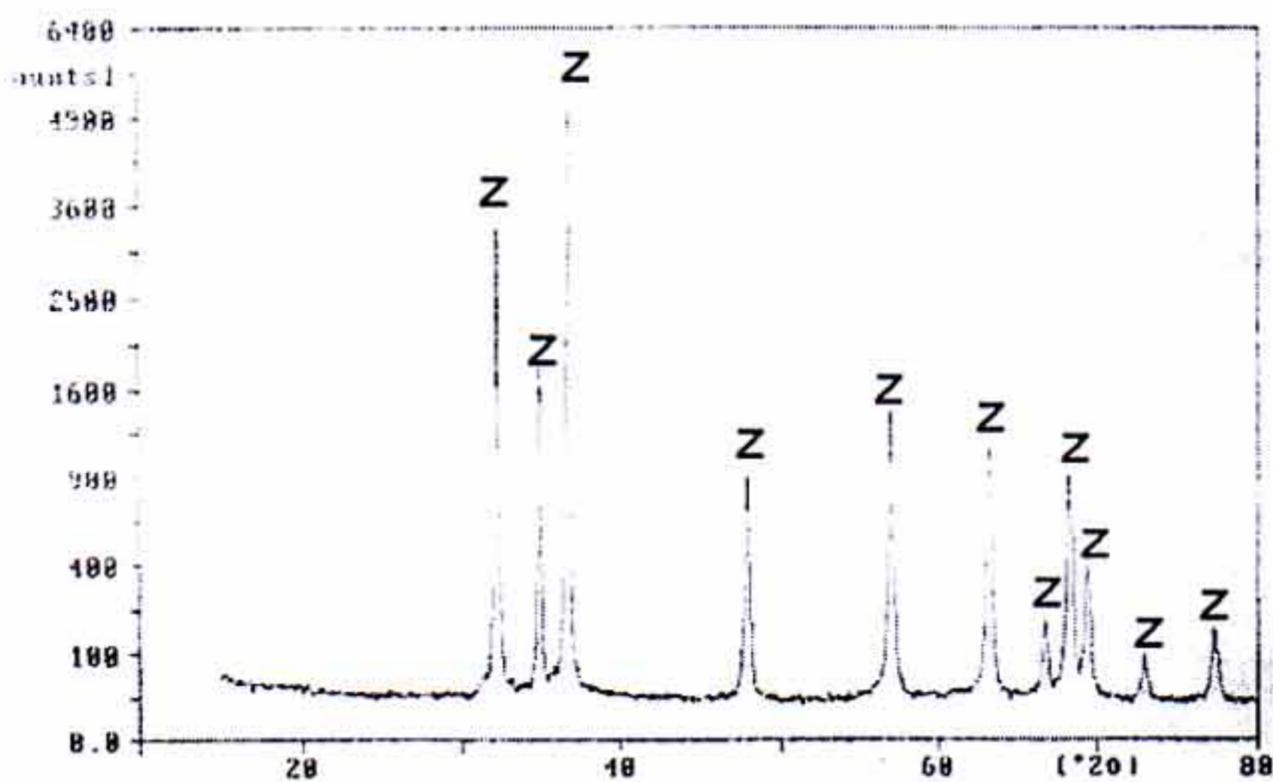


Keterangan: Warna abu-abu adalah butiran matriks dari larutan padat ZnO-CuO, warna putih mengelilingi butiran (panah no.1) adalah lapisan batas butir dan warna hitam (panah no.2, bercak-bercak) adalah pori-pori.

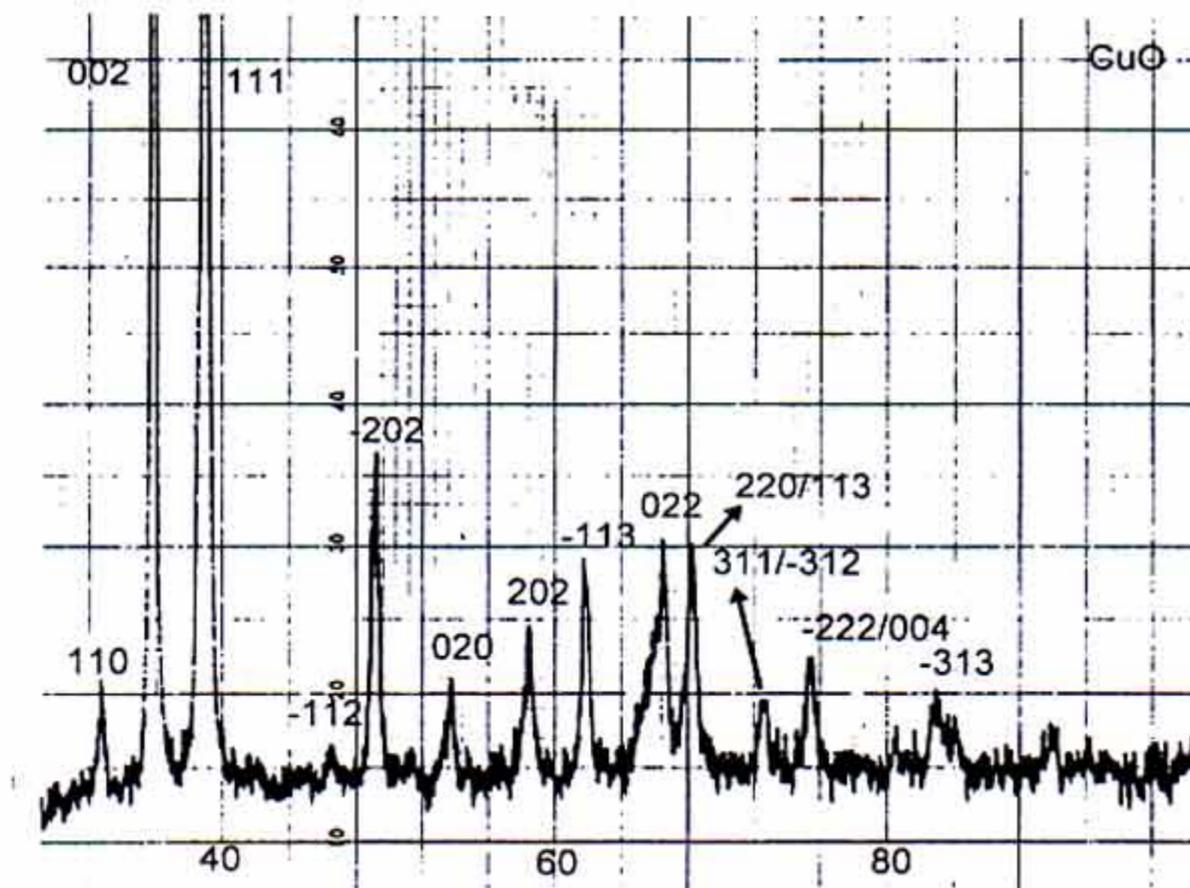
Gambar 2. Struktur mikro varistor ZnO-0,8%mol Bi₂O₃-CuO disinter 1100°C/1jam dipotret memakai SEM mode BSE. A. 0,5 %mol CuO dan B. 2 % mol CuO.



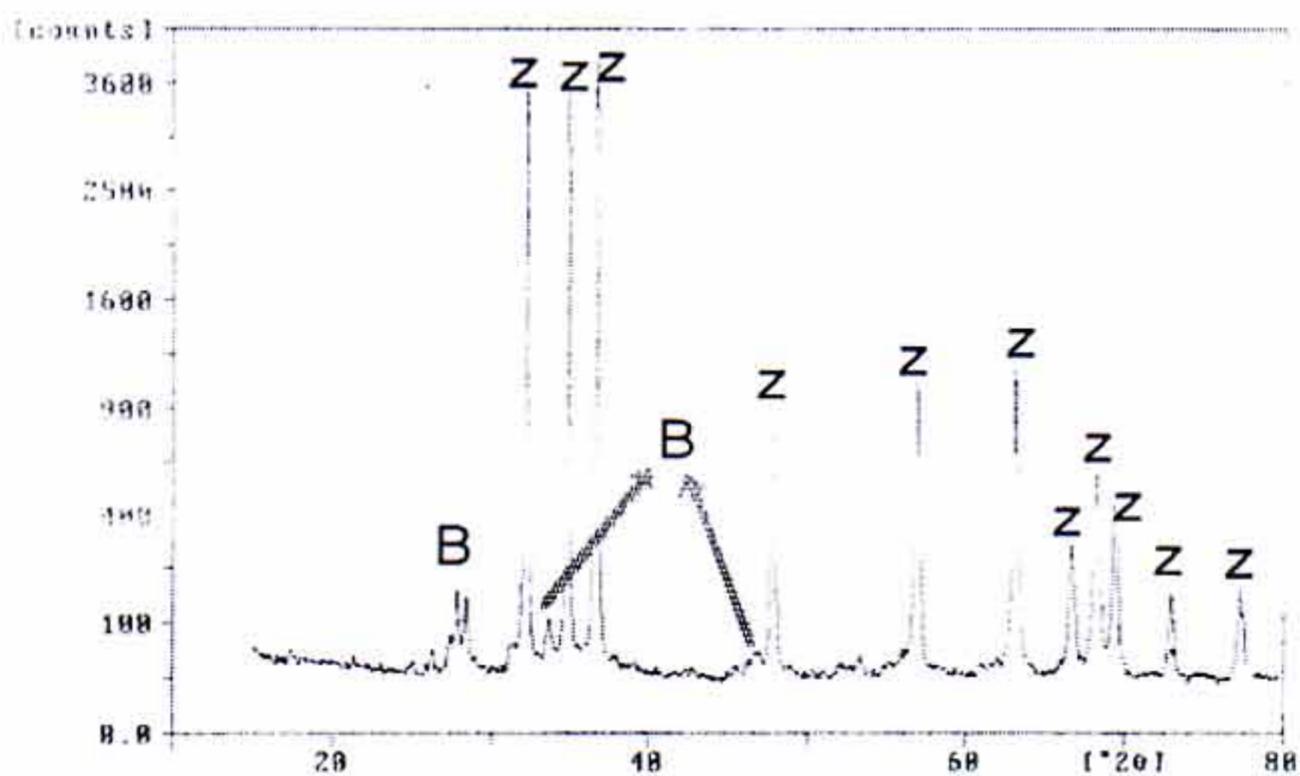
Gambar 3. Pola difraksi ZnO-2 % mol CuO sebelum penyinteran. Tampak kehadiran puncak tambahan dari CuO (Kode S) dan puncak utama dari matriks (z).



Gambar 4. Pola difraksi ZnO-2 % mol CuO setelah penyinteran 1100°C selama 1 jam. Tampak pola difraksi bersih dari puncak yang berasal dari CuO.



Gambar 5. Pola difraksi CuO (material awal). Puncak terkuat (002/111) dan (111) terdapat pada sudut $2\theta = 35,6^\circ$ dan $38,8^\circ$.



Gambar 6. Pola difraksi varistor ZnO-0,8%mol Bi₂O₃-2%mol CuO disinter pada suhu 1100°C/1 jam. Tampak kehadiran puncak tambahan dari fase kedua ZnO.24Bi₂O₃ (B) selain dari matriks larutan padat ZnO-CuO (Z).

Sampel dengan kandungan CuO, membutuhkan medan listrik yang lebih besar dari pada sampel yang tidak mengandung CuO untuk menghasilkan arus yang sama. Sampel dengan konsentrasi CuO 0,5 % mol mempunyai faktor kenon-linearitas terbesar tetapi masih lebih kecil dari pada faktor kenon-linearitas varistor ZnO-Bi₂O₃ dan konsentrasi ini merupakan konsentrasi optimum karena pada konsentrasi lebih besar faktor kenon-linearitas turun. Secara keseluruhan faktor kenon-linearitas yang diperoleh relatif rendah jika dibandingkan dengan nilai faktor kenon-linearitas kebutuhan pasar (20 ke atas) seperti dapat dilihat pada Tabel 1. Dari fakta ini dapat dilihat bahwa CuO tidak dapat berperan besar dalam pembentukan varistor yang memiliki faktor kenon-linearitas besar. Pengaruhnya pada pembentukan varistor tidak sebaik pengaruh CoO[12] dan MnO[13].

Dengan mendefinisikan arus bocor sebagai arus pada E sebesar 0,85 kali $E_{(1 \text{ mA/cm}^2)}$ ($E_{(1 \text{ mA/cm}^2)}$ adalah E pada $J = 1 \text{ mA/cm}^2$ [17]), arus bocor varistor ZnO-Bi₂O₃-CuO ditentukan dari Gambar 7 dan hasilnya diperlihatkan pada Tabel 1. Tampak dari Tabel 1 bahwa arus bocor hampir tidak berubah dengan peningkatan konsentrasi CuO, tetapi nilai arus bocor varistor ZnO-Bi₂O₃-CuO sedikit lebih besar dari pada arus bocor varistor ZnO-Bi₂O₃ (Tanpa CuO), khususnya sampel dengan konsentrasi CuO 1 dan 2 % mol. Varistor yang baik mempunyai arus bocor yang kecil pada tegangan di bawah tegangan patah (breakdown voltage). Dengan mendefinisikan tegangan patah per cm sebagai medan listrik pada $J = 1 \text{ mA/cm}$, hasil pengukuran tegangan patah per cm (E_{bd}) diperlihatkan pada Tabel 1. Tampak bahwa penambahan konsentrasi CuO meningkatkan nilai tegangan patah per cm, tetapi nilai arus bocor tetap besar. Nilai arus bocor yang besar, menandakan bahwa penambahan CuO relatif tidak mengurangi tetapi menambah jumlah cacat penghasil elektron berenergi aktivasi rendah (di daerah tegangan kecil).

Persamaan (1) dan (2) didasarkan atas terbentuknya penghalang schottky di batas butir seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Penghalang schottky ini terbentuk

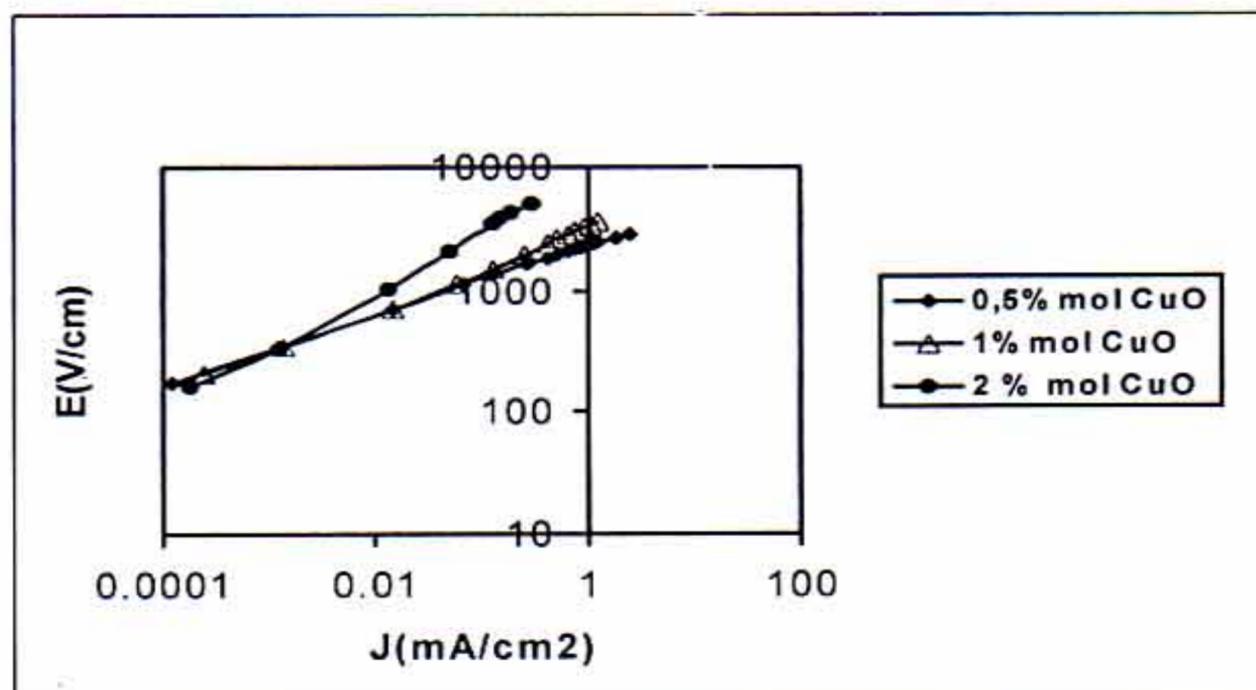
pada lapisan deplesi (depletion layer) oleh cacat-cacat bermuatan positif seperti Zn_i^{**} , Zn_i^* , Vo^{**} , Vo^* , M_{Zn}^{**} dan M_{Zn}^* , di mana M adalah logam yang menggantikan seng (Zn), dan cacat bermuatan negatif seperti V_{Zn}'' , V_{Zn}' dan O_{ad}'' selama penyinteran. Cacat Zn_i^{**} , Zn_i^* , Vo^{**} , Vo^* berturut-turut adalah interstisi seng bermuatan positif dua, interstisi seng bermuatan positif satu, kekosongan oksigen bermuatan positif satu, dan kekosongan oksigen bermuatan positif dua, dan cacat V_{Zn}' , V_{Zn}'' dan O_{ad}'' berturut-turut adalah kekosongan seng bermuatan negatif satu, kekosongan seng bermuatan negatif dua dan oksigen adsorpsi bermuatan negatif dua. Berdasarkan persamaan (1) dan (2), serta Gambar 7, 8 dan 9, tampak bahwa sampel dengan kandungan CuO cenderung menjadi varistor dengan arus bocor yang tinggi dengan faktor kenon-linearitas yang rendah. Varistor dengan penambahan CuO cenderung hanya memenuhi teori transpor listrik persamaan (1) yang dikemukakan oleh Levinson dan Philipp[15]. Fenomena ini berlainan dengan fenomena yang terjadi pada varistor ZnO-Bi₂O₃ yang ditambah CoO[12] dan MnO[13]. Garis lurus pada Gambar 8 memperlihatkan titik-titik yang bersesuaian dengan efek Schottky (persamaan (1)) dan tidak terdapat titik-titik pada Gambar 9 yang bersesuaian dengan efek Fowler-Nordheim tunneling (persamaan (2)). Fenomena ini mengindikasikan bahwa pembentukan varistor yang baik tidak terjadi ketika CuO ditambahkan ke dalam sampel ZnO-Bi₂O₃. Untuk daerah medan listrik rendah, penambahan konsentrasi CuO mengurangi jumlah atau konsentrasi pembawa muatan, ini dapat dilihat dari perbedaan letak garis linear pada Gambar 8. Makin ke kanan, artinya pembawa muatan makin berkurang.

Terjadinya pengurangan konsentrasi pembawa muatan disebabkan oleh berkurangnya jumlah cacat yang menjadi sumber elektron berenergi aktivasi rendah. Jenis cacat yang telah berkurang dengan masuknya CuO ke dalam kristal ZnO kemungkinan adalah interstisi seng yang mempunyai lokasi 0,05 eV dari pita konduksi[17] di dalam celah energi ZnO. Namun pengurangan jumlah cacat penghasil elektron berenergi aktivasi rendah (efeknya sangat terlihat di daerah medan rendah),

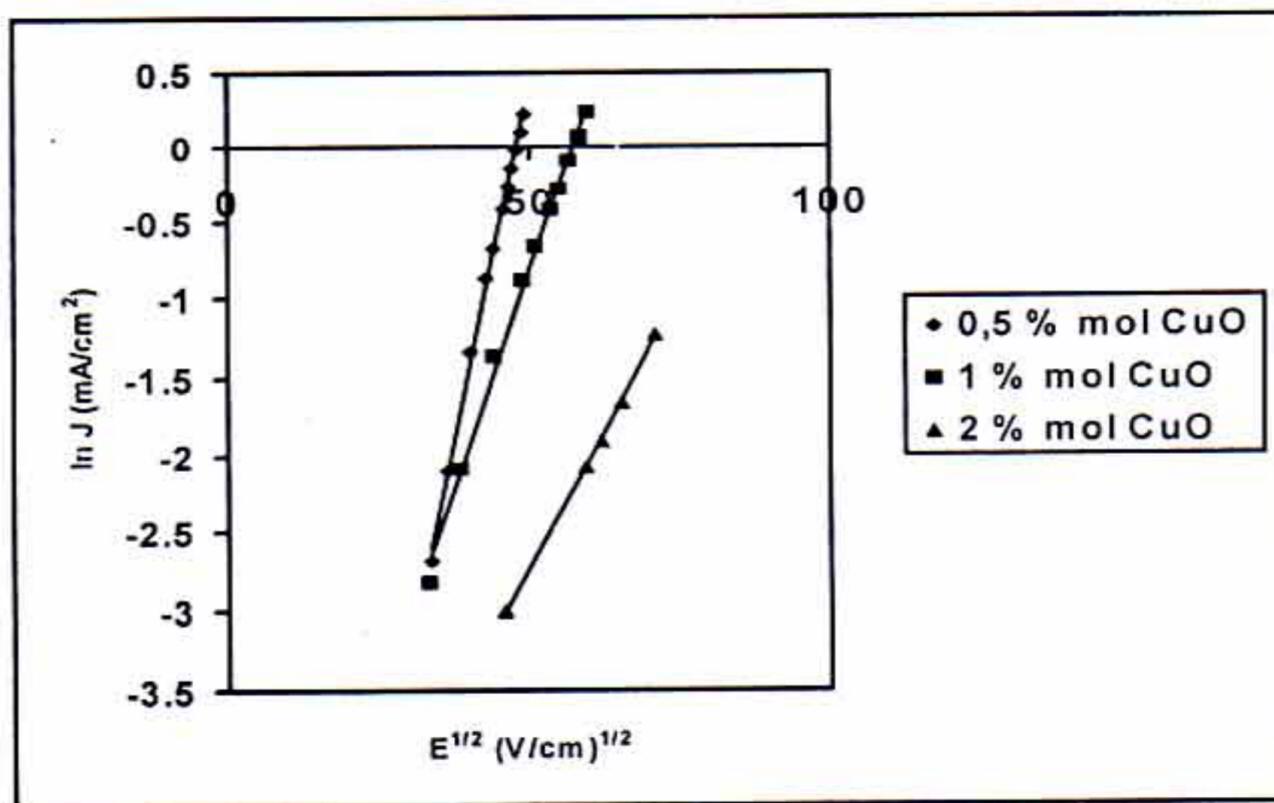
tidak dibarengi dengan pembentukan sumber elektron baru yang menghasilkan elektron berenergi aktivasi tinggi (efeknya terlihat jelas di daerah medan listrik tinggi). Tidak seperti pada varistor ZnO-Bi₂O₃-CoO[12], yang memiliki jebakan elektron yang dalam (deep electron trap) yang merupakan donor elektron di dalam celah pita (band gap) nya (harga energi aktivasinya relatif besar tetapi sedikit lebih kecil dari pada celah energi untuk ZnO (3,2 eV)), varistor ZnO-Bi₂O₃-CuO tidak memiliki jebakan elektron dalam sehingga pada medan listrik relatif besar pun, arus listrik tidak menjadi besar sebagai akibatnya tidak terbentuk varistor (berfaktor kenon-linearitas besar). Di sini peristiwa efek penerobosan (tunneling effect) tidak terjadi. Oleh karena itu, pada daerah medan listrik tinggi, besar arus listrik tetap mengikuti pola persamaan schottky (persamaan (1)), dan tidak mengikuti pola persamaan (2) (Fowler-Nordheim). Lebih kecilnya α varistor ZnO-Bi₂O₃ yang mengandung CuO dengan α varistor ZnO-Bi₂O₃ (Tanpa CuO) menandakan bahwa CuO tidak berpengaruh positif terhadap batas butir. Padahal varistor adalah komponen yang sangat dipengaruhi oleh batas butir (grain boundary dependent). Jadi akibat dari penambahan CuO, penghalang schottky menjadi rendah, dan arus bocor menjadi besar. Cacat-cacat yang terbentuk pada varistor ZnO-Bi₂O₃-CuO cenderung membentuk penghalang schottky (schottky barrier) yang lebar, dan jebakan elektron yang dalam tidak terbentuk, sehingga pada tegangan relatif tinggi tidak terjadi peningkatan aliran elektron yang besar seperti terjadi pada varistor ZnO-Bi₂O₃-CoO[12] dan ZnO Bi₂O₃-MnO[13].

Tabel 1. Faktor kenon-linearitas, arus bocor dan tegangan patah varistor ZnO-Bi₂O₃-CuO.

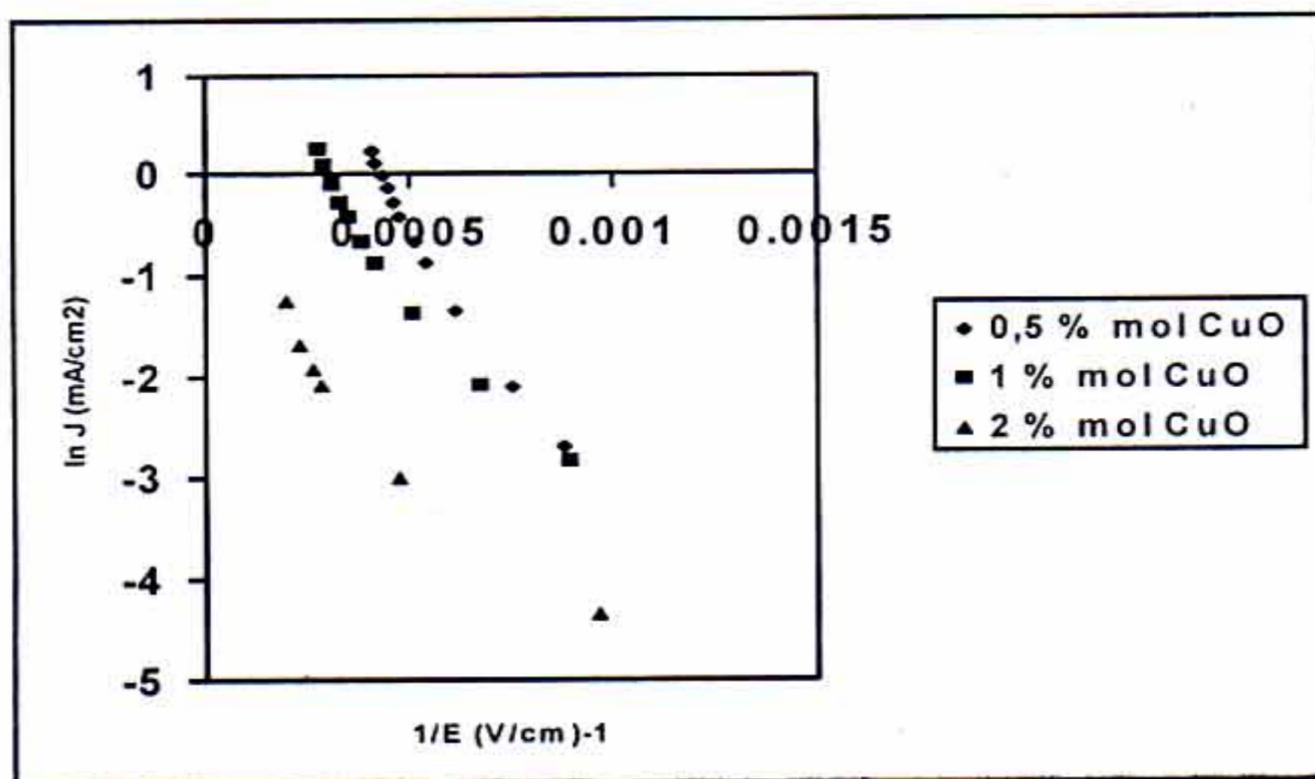
No.	Bi ₂ O ₃ (%mol)	CuO (%mol)	α	Arus Bocor persatuan luas (I ₁) (mA/cm ²)	Tegangan patah per satuan panjang (Volt/cm)
1.	0,8	0	6 [Ref. 12]	0,40 [Ref. 12]	800[Ref.12]
2.	0,8	0,5	4	0,40	2300
3.	0,8	1	2,6	0,52	3200
4.	0,8	2	2,5	0,52	8200



Gambar 7. Karakteristik E-J varistor ZnO-0,8 % mol Bi₂O₃ yang ditambah CuO dengan konsentrasi berbeda.



Gambar 8. $\ln J$ vs $E^{1/2}$ dari varistor ZnO-0,8%mol Bi₂O₃ yang ditambah CuO dengan konsentrasi berbeda.



Gambar 9. $\ln J$ vs $1/E$ dari varistor ZnO-0,8%mol Bi₂O₃ yang ditambah CuO dengan konsentrasi berbeda.

KESIMPULAN

Penambahan CuO meningkatkan tegangan patah (breakdown voltage), tapi tidak dapat meningkatkan faktor kenon-linearitas varistor ZnO-Bi₂O₃. Selain itu kehadiran CuO tidak efektif dalam mengurangi arus bocor varistor ZnO-Bi₂O₃. Faktor kenon-linearitas varistor ZnO-Bi₂O₃-CuO yang diperoleh lebih kecil dari pada faktor kenon-linearitas untuk varistor ZnO-Bi₂O₃ dan masih jauh dari kebutuhan pasar (20 ke atas). Karena penambahan CuO tidak membentuk jebakan elektron dalam (deep electron trap) dan tidak mengurangi cacat penghasil elektron berenergi aktivasi rendah. Dengan demikian CuO tidak dapat digunakan sebagai pengganti CoO atau MnO yang berfungsi sebagai peningkat faktor kenon-linearitas, tetapi lebih sesuai sebagai aditif peningkat tegangan patah. Struktur mikro varistor ZnO-Bi₂O₃-CuO, terdiri dari matriks yang terbentuk dari larutan ZnO-CuO dan lapisan batas butir ZnO.24Bi₂O₃ (ZnBi₄₈O₇₃)

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Dewan Riset Nasional yang telah membiayai penelitian ini melalui LIPI dengan perjanjian kontrak nomor 13/SP/RUT/1999.

DAFTAR PUSTAKA

1. DANI GUSTAMAN, S., BAMBANG, A., ENKIR, S., Studi pengaruh parameter penyinteran terhadap struktur mikro varistor ZnO-Bi₂O₃ menggunakan SEM. Prosiding Seminar Nasional Mikroskopi Dan Mikroanalisis-II, Serpong, Agustus 3-4, 1998.
2. DANI GUSTAMAN, S., SAEFUL, H., ENKIR, S., ARI, H., Pengaruh parameter penyinteran terhadap karakteristik E-J ZnO dan varistor ZnO- Bi₂O₃. Prosiding Presentasi Ilmiah Sains Materi, Serpong 20-21 Oktober, 1998.