

## STUDI EKSPERIMENTAL PEMBENTUKAN STRUKTUR MIKRO SISTEM BINER ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> YANG DISINTER PADA SUHU 1100°C-1400°C

Dani Gustaman Syarif<sup>\*</sup>), Engkir Sukirman<sup>\*\*</sup>), Ari Handayani<sup>\*\*</sup>) dan  
Saeful Hidayat<sup>\*</sup>)

<sup>\*</sup>)Puslitbang Teknik Nuklir - BATAN, Bandung

<sup>\*\*</sup>) Puslitbang Iptek Bahan - BATAN, Puspipetek, Serpong.

### ABSTRAK

**STUDI EKSPERIMENTAL PEMBENTUKAN STRUKTUR MIKRO SISTEM BINER ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> YANG DISINTER PADA SUHU 1100°C-1400°C.** Dalam rangka mendapatkan varistor yang efektif (sederhana), pada makalah ini pengaruh penambahan Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> terhadap pembentukan struktur mikro ZnO dan mekanismenya dipelajari secara eksperimental. Studi dilakukan dengan penyinteran pelet ZnO yang ditambahi Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sebanyak 0 hingga 1 % mol pada suhu 1100°C-1400°C di dalam atmosfer udara selama 1 jam dan menganalisis pelet sinter dengan bantuan mikroskop optik dan elektron (SEM) dan difraksi sinar-x. Hasil analisis difraksi sinar-x memperlihatkan bahwa di dalam pelet ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> yang di sinter pada suhu 1100°C-1400°C terdapat fase kedua Zn<sub>3</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>8</sub>. Sementara itu, hasil analisis metalografi memperlihatkan bahwa di bawah suhu 1100°C-1400°C ukuran butir pelet ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> bertambah dengan penambahan Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tetapi mengecil kembali setelah melewati harga konsentrasi tertentu. Dari data ini juga diketahui bahwa pada diagram fase ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> terdapat daerah larutan padat. Pada suhu  $\geq 1300^\circ\text{C}$  terdapat penyinteran fase cair yang telah mengakibatkan butir cenderung bulat.

**Kata kunci:** varistor, struktur mikro, larutan padat, ZnO, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

### ABSTRACT

**EXPERIMENTAL STUDY ON MICROSTRUCTURE DEVELOPMENT OF BINARY SISTEM ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> SINTERED AT 1100°C-1400°C.** In order to find effective (simple) varistor, in this work effect of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> addition on microstructure development and it's mechanism was studied experimentally. The study was conducted by sintering ZnO added with 0-1% mole Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> at 1100°C-1400°C in air for 1 hour and analyzing the sintered pellets using optical and electron

microscope (SEM) and x-ray diffractometer. The x-ray diffraction analysis showed that in  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  added-ZnO ( $\text{ZnO-Nb}_2\text{O}_5$ ) pellets sintered at  $1100^\circ\text{C}$ - $1400^\circ\text{C}$ , second phase of  $\text{Zn}_3\text{Nb}_2\text{O}_8$  existed. On the other hand, the metallographic analysis showed that at sintering temperature of  $1100^\circ\text{C}$ - $1400^\circ\text{C}$ , grain size of  $\text{ZnO-Nb}_2\text{O}_5$  pellets increased with increasing of  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , however, the grain size decreased again after the concentration of  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  exceeding certain value. From this data it was known also, that there was solid solution area in  $\text{ZnO-Nb}_2\text{O}_5$  phase diagram. At sintering temperature  $\geq 1300^\circ\text{C}$ , there was liquid phase sintering that make grains become rounded.

**Key words** : varistor, microstructure, solid solution, ZnO,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$

## PENDAHULUAN

Asokan dkk.[1] mendapatkan data bahwa ukuran butir pelet sinter ZnO bertambah besar dengan penambahan  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  hingga 0,2% berat dan mengecil kembali setelah melewati konsentrasi tersebut. Keadaan yang sama mereka dapatkan pada setiap suhu sinter antara  $900^\circ\text{C}$  dan  $1300^\circ\text{C}$ . Data yang sama didapatkan pula oleh Dani dkk.[2] ketika melakukan penyinteran pelet ZnO yang didop  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  sebesar 0,0314 hingga 0,157% berat pada suhu  $1100^\circ\text{C}$ . Pada data Dani dkk.[2], butir pelet ZnO yang didoping dengan  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  cenderung lebih besar dari pada butir ZnO murni. Dengan memperhatikan teori kimia cacat (defect chemistry), seharusnya mekanisme percepatan pertumbuhan butir pada  $\text{ZnO-Nb}_2\text{O}_5$  adalah karena ion  $\text{Nb}^{5+}$  masuk ke substitusi Zn pada kristal ZnO dan menghasilkan cacat kekosongan Zn yang kemudian memacu pertumbuhan butir. Hal ini berarti ZnO dan  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  harus membentuk larutan padat substitusi. Tetapi jika dikaitkan dengan diagram fase  $\text{ZnO-Nb}_2\text{O}_5$  yang diusulkan oleh Pollard A.J.[3], pada pelet ZnO yang ditambahi  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  yang disinter pada suhu di bawah  $1300^\circ\text{C}$  tidak terdapat pembentukan larutan padat karena sesuai diagram fase itu, fase yang terbentuk adalah ZnO dan  $3\text{ZnO} \cdot \text{Nb}_2\text{O}_5$  jika konsentrasi  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  lebih kecil dari pada 24 % mol, dan  $3\text{ZnO} \cdot \text{Nb}_2\text{O}_5$  dan  $\text{ZnO} \cdot \text{Nb}_2\text{O}_5$  jika

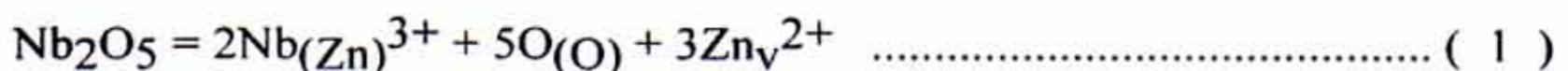
konsentrasi Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> antara 24 dan 50 % mol. Dari sisi pembentukan larutan padat, dua data di atas yaitu data yang berasal dari Asokan dkk.[1] dan Dani dkk.[2] di satu sisi, dan data yang berasal dari Pollard A.J.[3] di sisi lain saling bertentangan.

Berkaitan dengan data-data di atas, terdapat dua kemungkinan yang sangat menarik untuk diteliti yaitu pertama, terdapat suatu mekanisme baru yang berbeda dengan mekanisme kimia cacat artinya meskipun Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tidak larut tetapi pada konsentrasi tertentu dapat memacu pertumbuhan butir. Kedua, diagram fase ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> yang diusulkan oleh Pollard A.J.[3] mungkin mempunyai kekurangan terutama pada konsentrasi Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> rendah. Mungkin saja pada konsentrasi tertentu dan pada selang suhu tertentu secara terbatas Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> larut padat di dalam ZnO dan menghasilkan cacat kekosongan Zn yang dapat memacu pertumbuhan butir. Kedua kemungkinan ini sangat penting untuk diketahui dalam rangka mencari data untuk pembuatan varistor ZnO yang efektif[4-8]. Varistor yang efektif di sini diartikan sebagai varistor dengan oksida tambahan yang minimal[9]. Dengan latar belakang tersebut maka pada makalah ini dibahas pengaruh penambahan Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> terhadap struktur mikro pelet ZnO yang disinter pada suhu 1100°C hingga 1400°C.

## TEORI DAN HIPOTESIS

### Teori

Secara teoritis jika Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> larut padat di dalam ZnO, maka larutan padat yang terbentuk akan berbentuk Nb<sub>y</sub>Zn<sub>1-y</sub>O dan akomodasi ion Nb<sup>5+</sup> di dalam subkisi Zn kristal ZnO akan menghasilkan reaksi sebagai berikut:



dengan,  $Nb(Zn)^{3+} = \text{Ion } Zn_v^{2+}$  yang masuk ke subkisi Zn di dalam kristal ZnO

$O(O) = \text{Ion } O^{2-}$  yang masuk ke subkisi oksigen di dalam kristal ZnO

$Zn_v^{2+} = \text{Cacat kekosongan Zn di dalam kristal ZnO}$

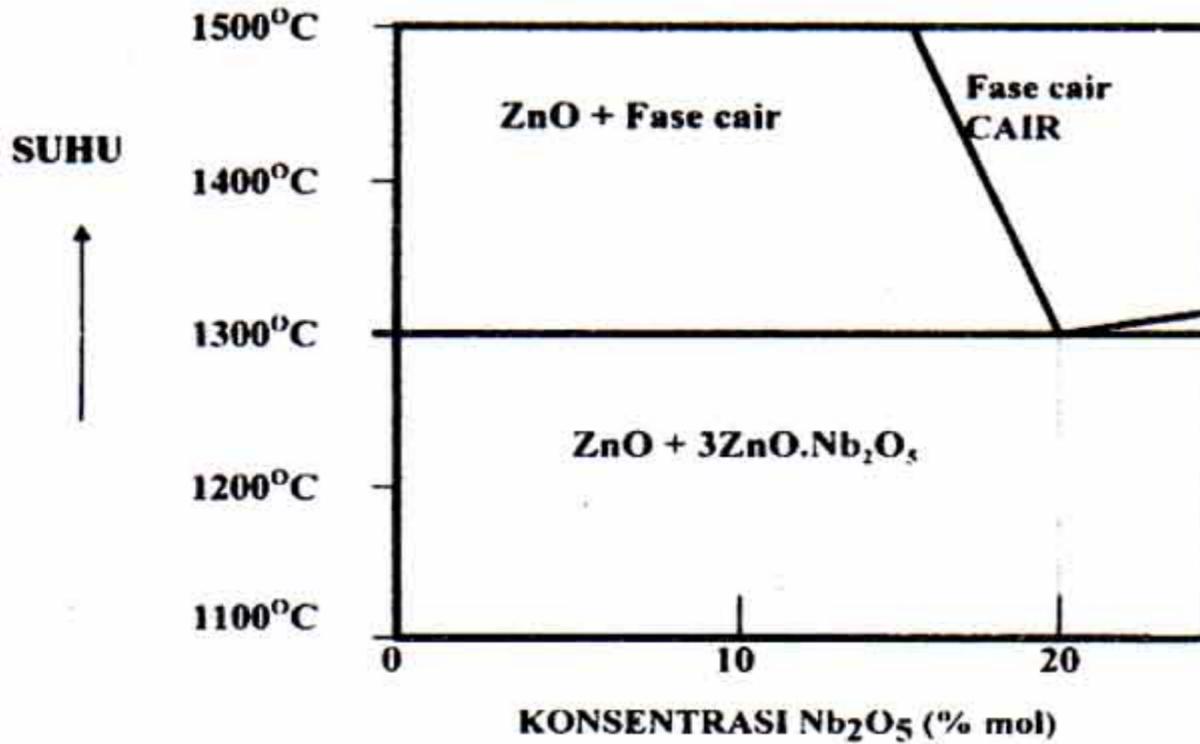
Cacat kekosongan Zn ( $Zn_v$ ) akan mempercepat difusi kation di dalam pelet ZnO yang akhirnya mempercepat pertumbuhan butir. Jika hal ini terjadi, maka ukuran butir pelet sinter ZnO yang ditambah  $Nb_2O_5$  (sering ditulis ZnO- $Nb_2O_5$ ) akan lebih besar dari pada ukuran butir pelet sinter ZnO murni.

### **Hipotesis**

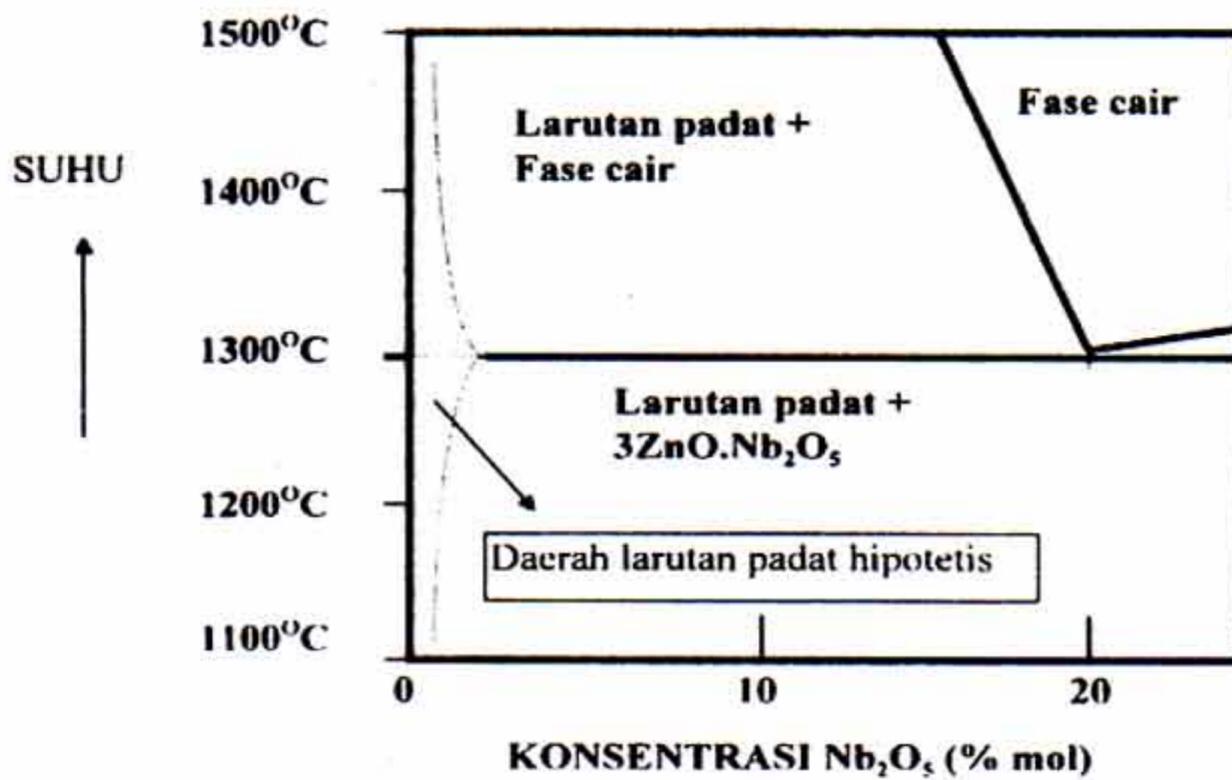
Sebagian dari diagram fase ZnO- $Nb_2O_5$  dari Pollard A.J.[3] pada Gambar 1 memperlihatkan adanya eutektik pada suhu  $1300^\circ\text{C}$ . Konsekuensi dari kondisi ini adalah bahwa penyinteran ZnO- $Nb_2O_5$  baik di bawah  $1300^\circ\text{C}$  maupun di atas  $1300^\circ\text{C}$  tidak akan menghasilkan larutan padat. Pada suhu sinter di bawah suhu  $1300^\circ\text{C}$  hingga konsentrasi  $Nb_2O_5$  sekitar 24 % mol, pada pelet sinter ZnO- $Nb_2O_5$  terdapat dua fase padat yaitu ZnO dan  $3ZnO \cdot Nb_2O_5$  ( $Zn_3Nb_2O_6$ ). Hal yang sama terjadi juga pada pelet yang disinter pada suhu di atas  $1300^\circ\text{C}$  setelah mengalami pendinginan kembali. Jika keadaan-keadaan ini benar, maka seharusnya tidak akan ada pemacuan pertumbuhan butir pada pelet ZnO yang ditambahi  $Nb_2O_5$  yang disinter pada suhu di bawah  $1300^\circ\text{C}$ . Hal ini berarti pemacuan pertumbuhan butir sebagaimana yang ditemukan oleh Asokan dkk.[1] dan Dani dkk.[2] tidak terjadi.

Berdasarkan data yang ditemukan oleh Asokan dkk.[1] dan Dani dkk.[2], diduga terdapat suatu kondisi di mana  $Nb_2O_5$  larut padat yaitu pada konsentrasi  $Nb_2O_5$  yang relatif sangat kecil. Berdasarkan dugaan ini di sini diusulkan suatu diagram fase hipotetis yaitu seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2. Berdasarkan diagram fase ZnO- $Nb_2O_5$  hipotetis Gambar 2 pada penelitian ini dilakukan penyinteran ZnO dan

ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pada empat suhu sinter yaitu 1100°C, 1200°C, 1300°C dan 1400°C dengan dugaan bahwa pada suhu 1100°C hingga 1400°C terdapat daerah larutan padat.



Gambar 1. Diagram fase ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> yang diusulkan A.J. Pollard[3].



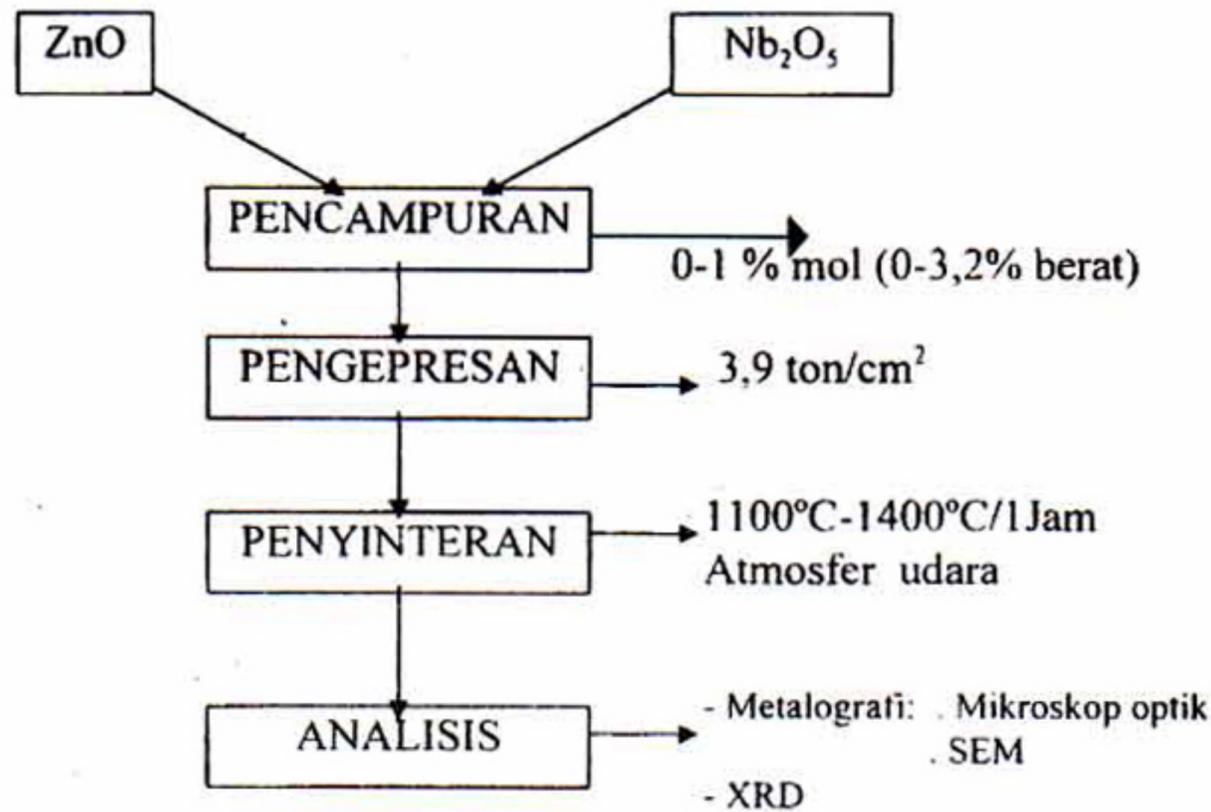
Gambar 2. Diagram fase ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> hipotetis.

## PERCOBAAN

Serbuk ZnO dicampur dengan serbuk Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sesuai komposisi pada Tabel 1. Hasil campuran diaduk hingga homogen dengan stirer magnetik di dalam media aceton selama 1 jam. Setelah homogen, serbuk campuran dikeringkan dengan pemanasan pada suhu 60°C selama 24 jam. Serbuk dari masing-masing campuran dipres dengan tekanan 3,9 ton/cm<sup>2</sup> untuk menghasilkan pelet mentah. Pelet mentah yang dihasilkan kemudian disinter pada suhu 1100°C, 1200°C, 1300°C dan 1400 °C selama 1 jam di dalam atmosfer udara. Kurang lebih setengah dari masing-masing pelet sinter dipotong dan dimetalografi. Metalografi dilakukan melalui pengampelasan secara berjenjang menggunakan kertas ampelas nomor 240, 400, 600, 800, 1000, 1500, 2400 dan 4000 dan pemolesan menggunakan *diamond paste* sebagai zat pembantu. Pemetretan untuk mendapatkan foto struktur mikro setelah permukaan setiap cuplikan dietsa menggunakan larutan campuran CH<sub>3</sub>COOH dan H<sub>2</sub>O dengan perbandingan 1: 500 dilakukan menggunakan mikroskop optik. Untuk mengkonfirmasi kehadiran fase kedua, beberapa sampel dievaluasi menggunakan difraksi sinar-x. Sudut difraksi sinar-x (2θ) diambil dengan metode *continuous counting*.

Tabel 1. Komposisi campuran ZnO dan Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dalam % mol.

No.	ZnO (% mol)	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (% mol)
1.	100	0
2.	99,9835	0,0165
3.	99,9170	0,0830
4.	99,8410	0,1540
5.	99,6900	0,3100
6.	99	1



Gambar 3. Diagram alir langkah percobaan

## HASIL PERCOBAAN

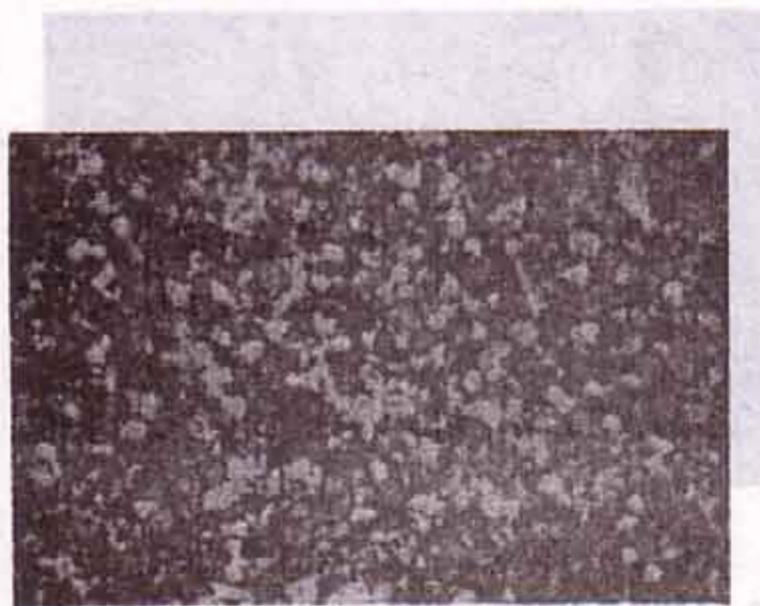
### Struktur Mikro

Struktur mikro pelet paduan ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> yang disinter pada suhu 1100-1400°C selama 1 jam diperlihatkan pada Gambar 4-7. Dari gambar-gambar ini dapat dilihat bahwa ukuran butir berubah mengikuti kecenderungan tertentu. Pada suhu sinter di bawah 1300°C, ukuran butir pelet sinter yang ditambahi Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (pelet ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) cenderung lebih besar dari pada ukuran butir pelet ZnO murni. Ukuran butir membesar seiring dengan pertambahan konsentrasi Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, tetapi mengecil kembali setelah melewati harga konsentrasi Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tertentu. Diduga pembesaran butir seiring dengan proses pembentukan larutan padat antara ZnO dan Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dan di sekitar harga konsentrasi Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> di mana butir mengecil kembali terdapat batas kelarutan Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> di dalam ZnO pada suhu sinter tertentu. Pertumbuhan butir yang teraktivasi oleh masuknya ion Nb<sup>5+</sup> kedalam kisi ZnO sangat dimungkinkan melalui reaksi persamaan

(1). Berdasarkan persamaan (1) masuknya ion  $Nb^{5+}$  ke dalam kisi ZnO telah menghasilkan cacat kekosongan Zn ( $Zn_v$ ) yang secara teoritis dapat mempercepat difusi kation yang kemudian mengaktivasi pertumbuhan butir. Data yang sangat penting lainnya yang dapat diambil dari Gambar 4-7 adalah bahwa pada sampel yang ditambahi  $Nb_2O_5$  dan disinter pada suhu di bawah  $1300^{\circ}C$  tidak terdapat fase cair selama penyinteran. Pada suhu sinter di bawah  $1300^{\circ}C$ , penyinteran yang terjadi merupakan penyinteran fase padat.

Pada suhu  $1300^{\circ}C$  dan  $1400^{\circ}C$ , kecenderungan perubahan ukuran butir terhadap perubahan konsentrasi  $Nb_2O_5$  identik dengan kecenderungan yang sama yang terdapat pada pelet yang disinter pada suhu di bawah  $1300^{\circ}C$ . Namun untuk suhu  $1300^{\circ}C$  dan  $1400^{\circ}C$  ini, di atas konsentrasi tertentu (setelah perbesaran ukuran butir berhenti) pada sampel terdapat fase cair yang berada di batas butir (warna putih) seperti diperlihatkan pada Gambar 6E dan 6F, 7D sampai dengan 7F serta Gambar 8. Pada sampel yang mengandung fase cair, butir-butir pelet sinter cenderung bulat (*rounded*) seperti terlihat pada Gambar 6E dan 6F serta 7D sampai dengan 7F. Konsentrasi  $Nb_2O_5$  di mana fase cair mulai muncul ( $K_b$ ) untuk suhu  $1300^{\circ}C$  dan  $1400^{\circ}C$  berbeda. Meski tidak ditampilkan secara kuantitatif, berdasarkan data struktur mikro  $K_b$  untuk suhu  $1300^{\circ}C$  lebih besar dari pada  $K_b$  untuk suhu  $1400^{\circ}C$ .

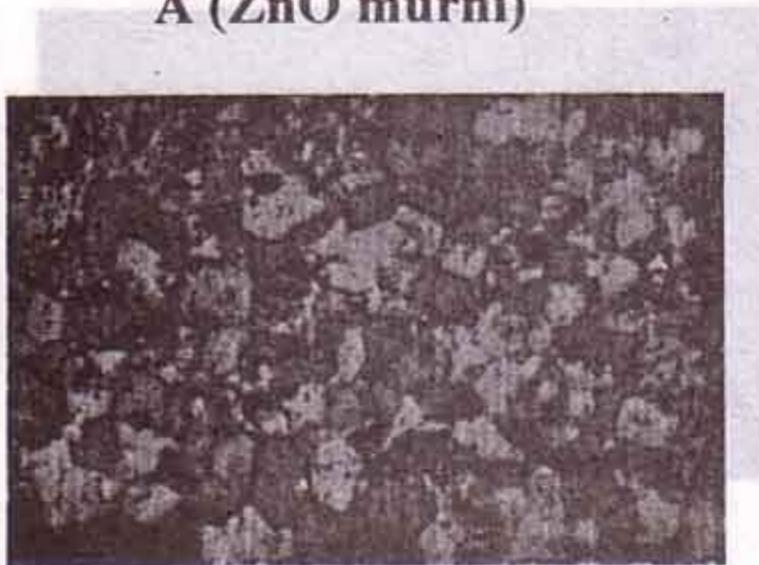
Dari data yang telah dibahas di atas, diduga pada sistem biner ZnO- $Nb_2O_5$  terdapat daerah larutan padat yang mirip dengan daerah tertentu yang dibatasi garis putus-putus pada Gambar 2. Namun dari data struktur mikro batas antara larutan padat dan fase cair untuk suhu lebih besar sama dengan  $1300^{\circ}C$ , dan antara larutan padat dan fase padat  $3ZnO.Nb_2O_5$  ( $Nb_2Zn_3O_8$ ) untuk suhu di bawah  $1300^{\circ}C$  tidak dapat ditentukan secara eksak (teliti).



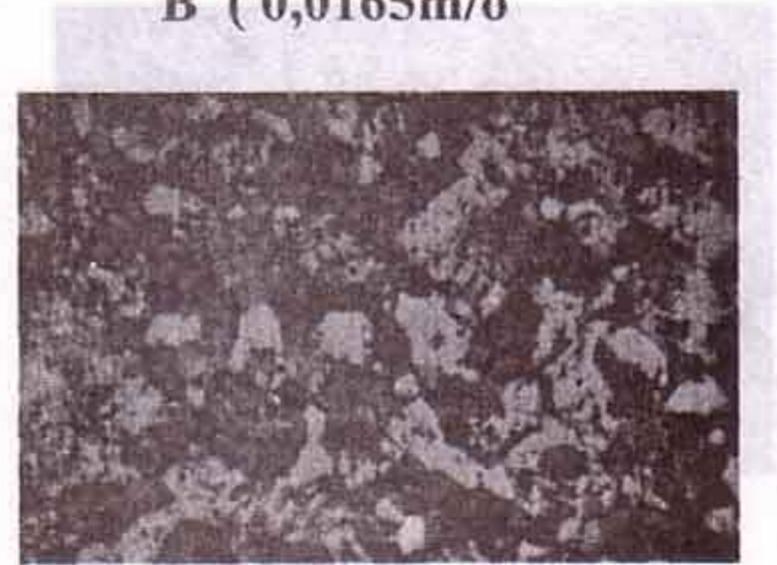
**A (ZnO murni)**



**B ( 0,0165m/o**



**C (0,083 m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**



**D (0,15 m/o**

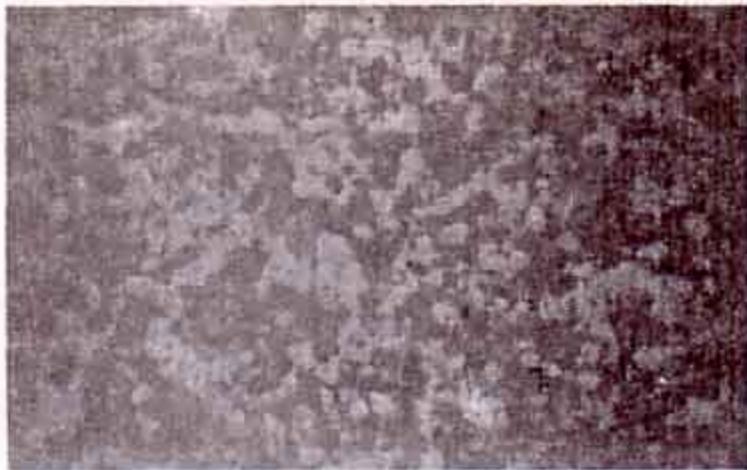


**E (0,31 m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**



**F ( 1 m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**

Gambar 4. Struktur mikro pelet ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> disinter  
1100°C/1jam (425x).



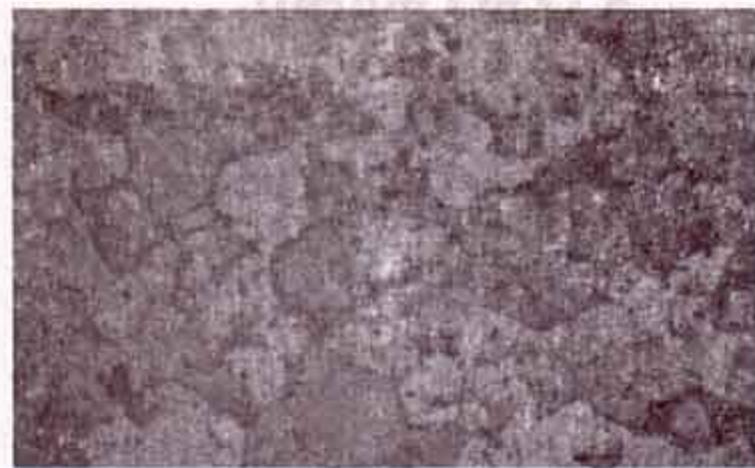
**A (ZnO murni)**



**B ( 0,0165m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**



**C (0,083 m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**



**D (0,15 m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**

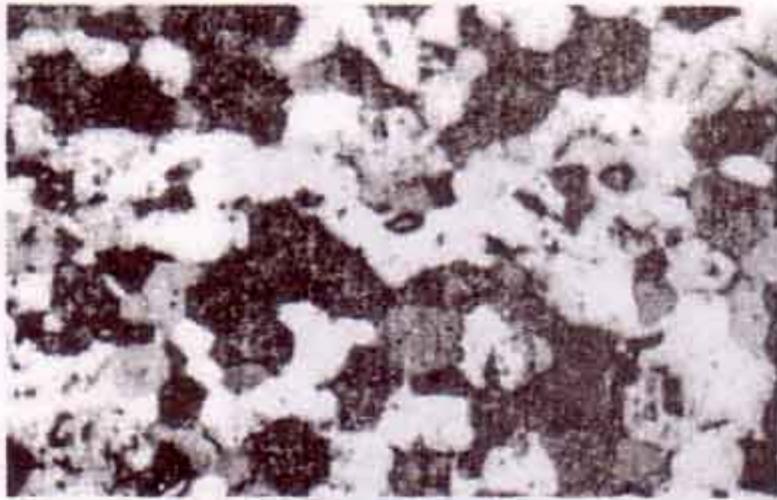


**E (0,31 m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**



**F ( 1 m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**

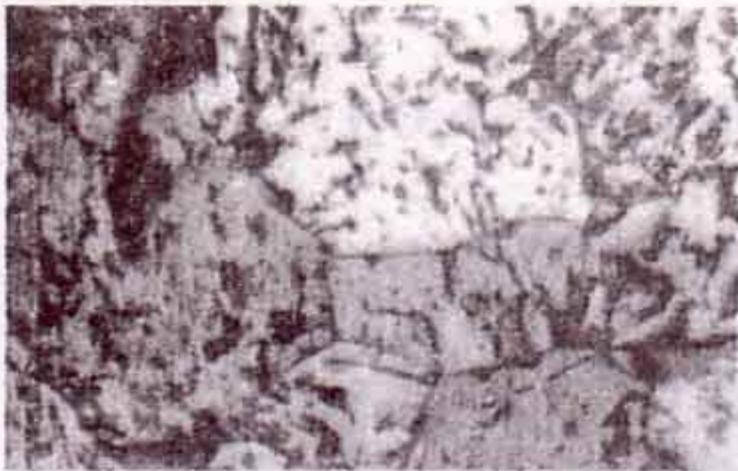
Gambar 5. Struktur mikro pelet ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> disinter  
1200°C/1jam (425x).



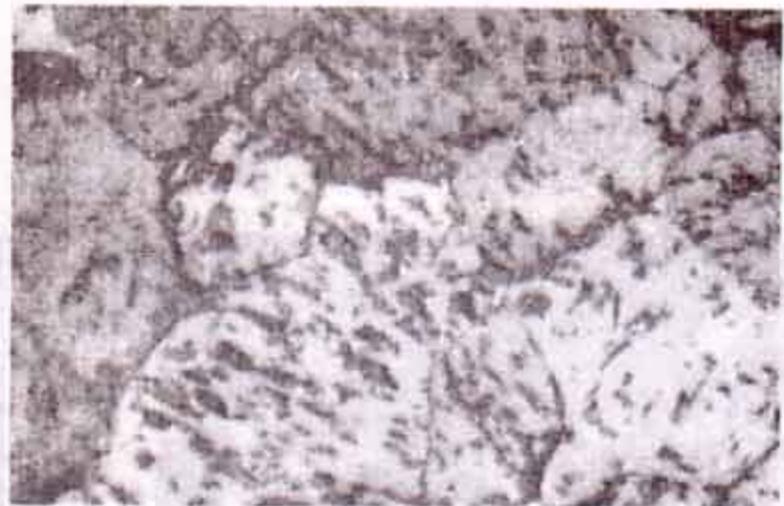
**A (ZnO murni)**



**B ( 0,0165m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**



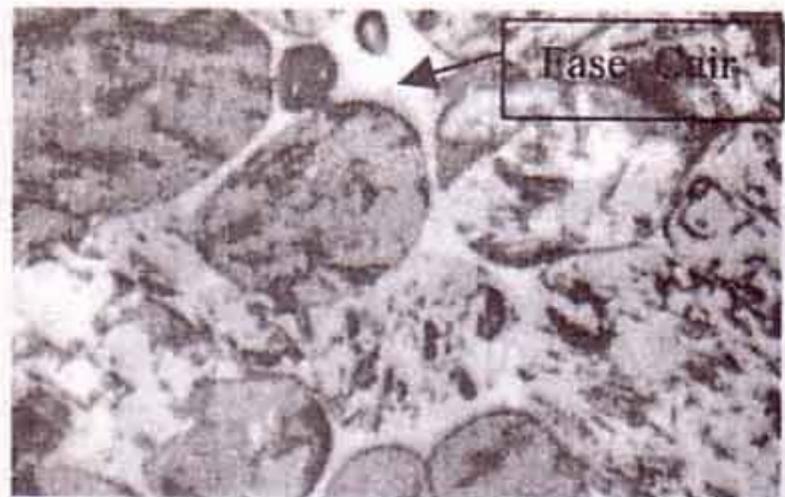
**C (0,083 m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**



**D (0,15 m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**

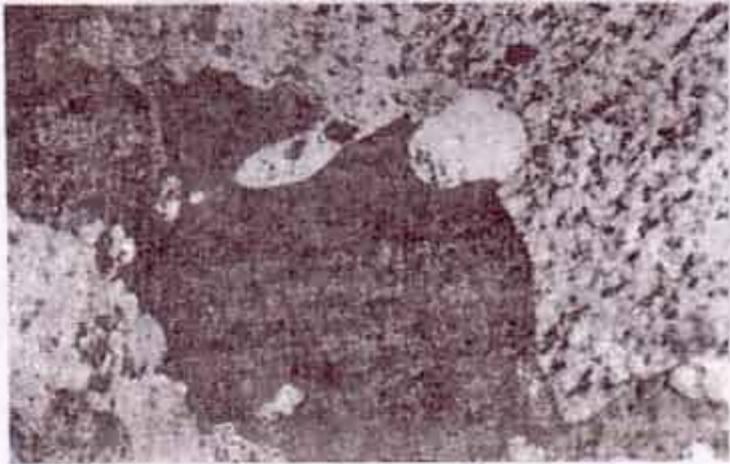


**E (0,31m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**

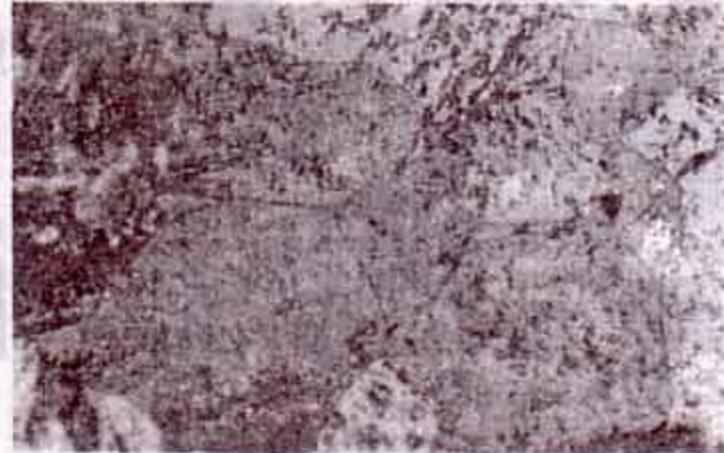


**F ( 1 m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**

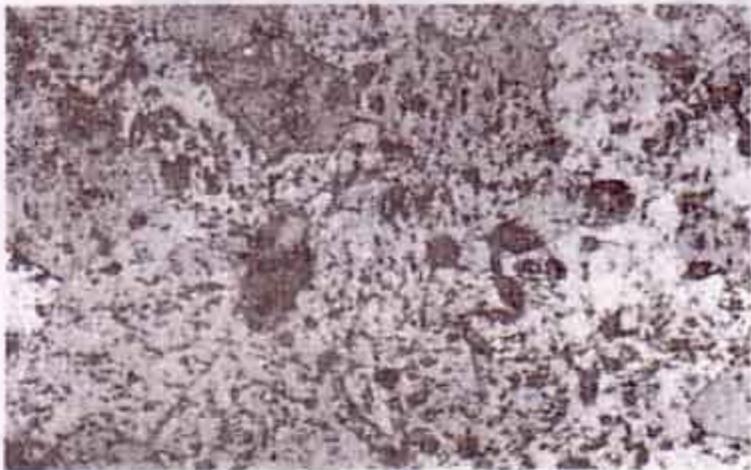
Gambar 6. Struktur mikro pelet ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> disinter 1300°C/1jam (425x).



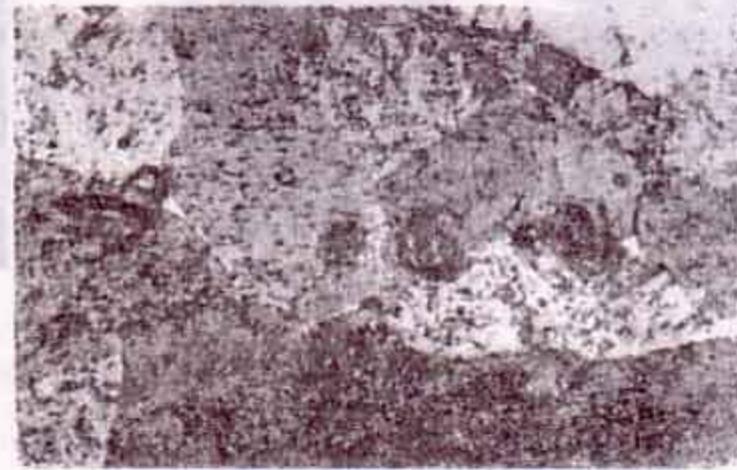
**A (ZnO murni)**



**B ( 0,0165m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**



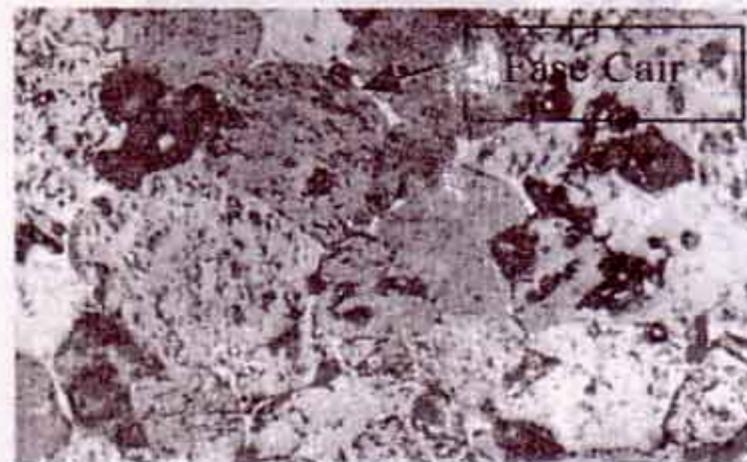
**C (0,083 m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**



**D (0,15 m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**



**E (0,31m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**

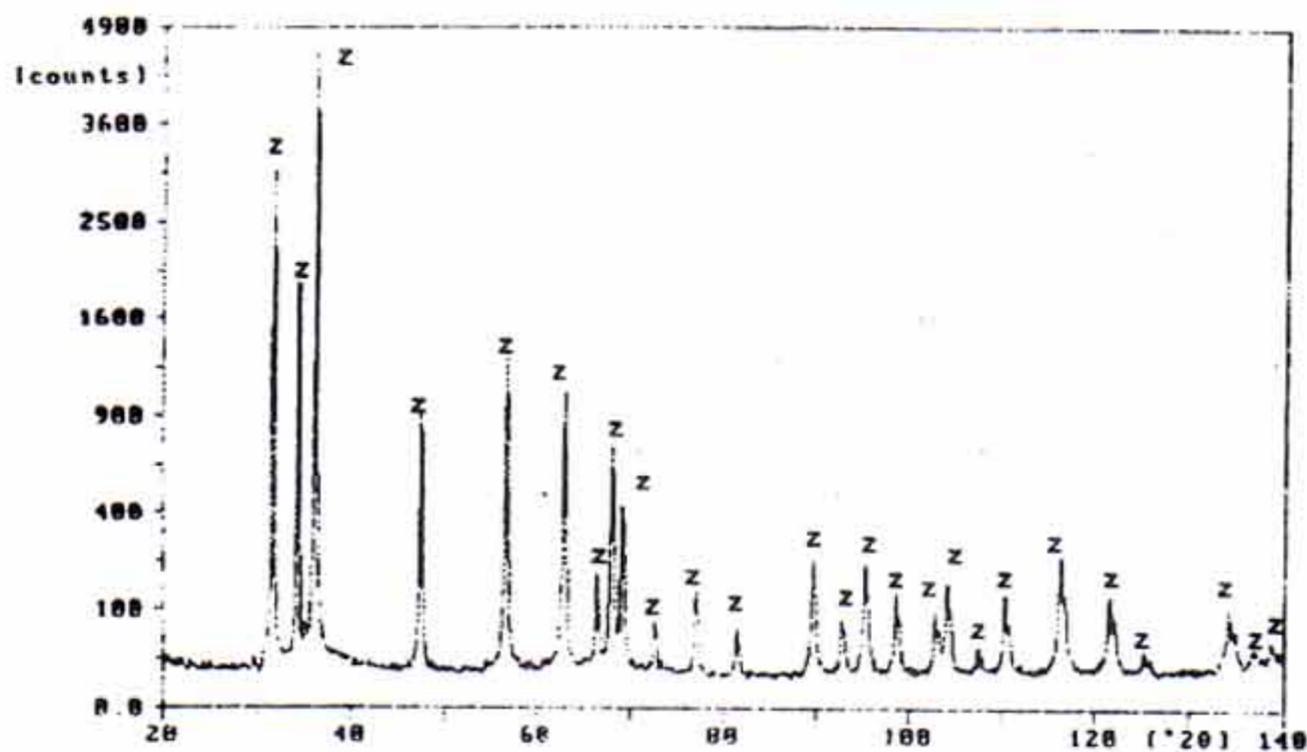


**F ( 1 m/o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**

Gambar 7. Struktur mikro pelet ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> disinter 1400°C/1jam (230x).



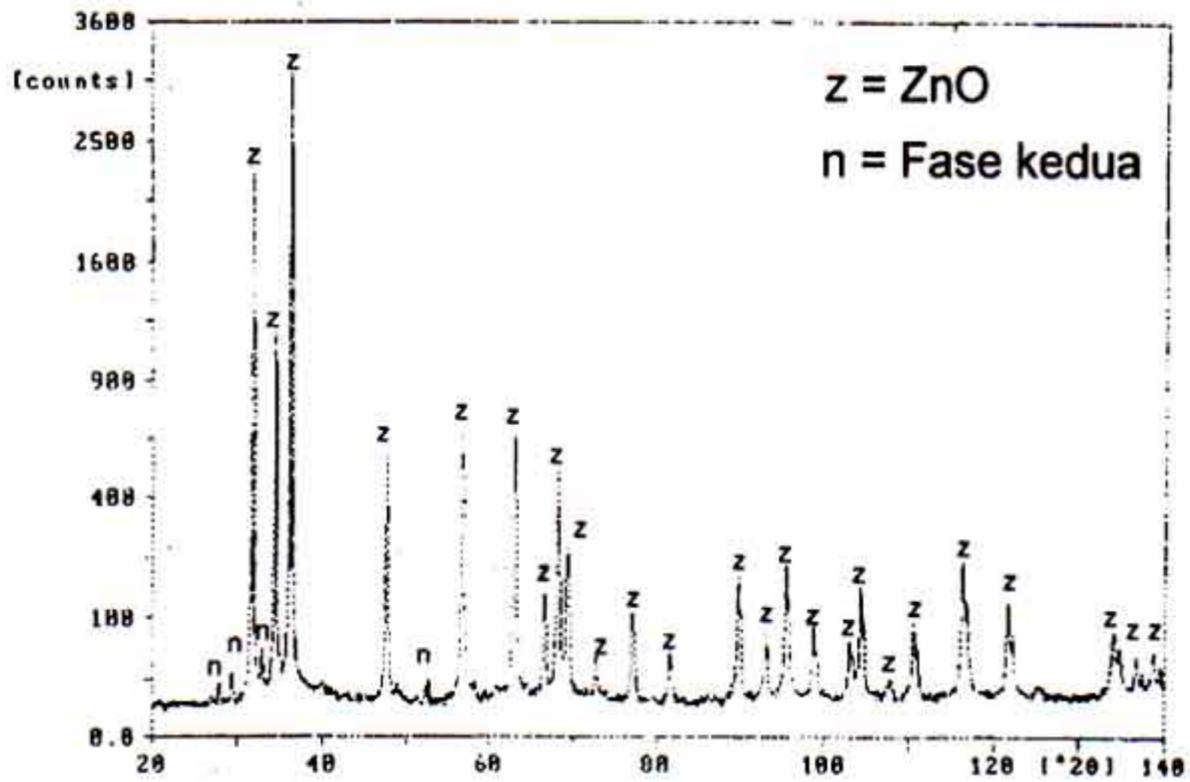
Gambar 8. Struktur mikro sampel ZnO+1%mol Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> disinter 1400°C/1Jam (Difoto menggunakan SEM mode BSE), memperlihatkan kehadiran fase cair berwarna putih (lihat tanda panah).



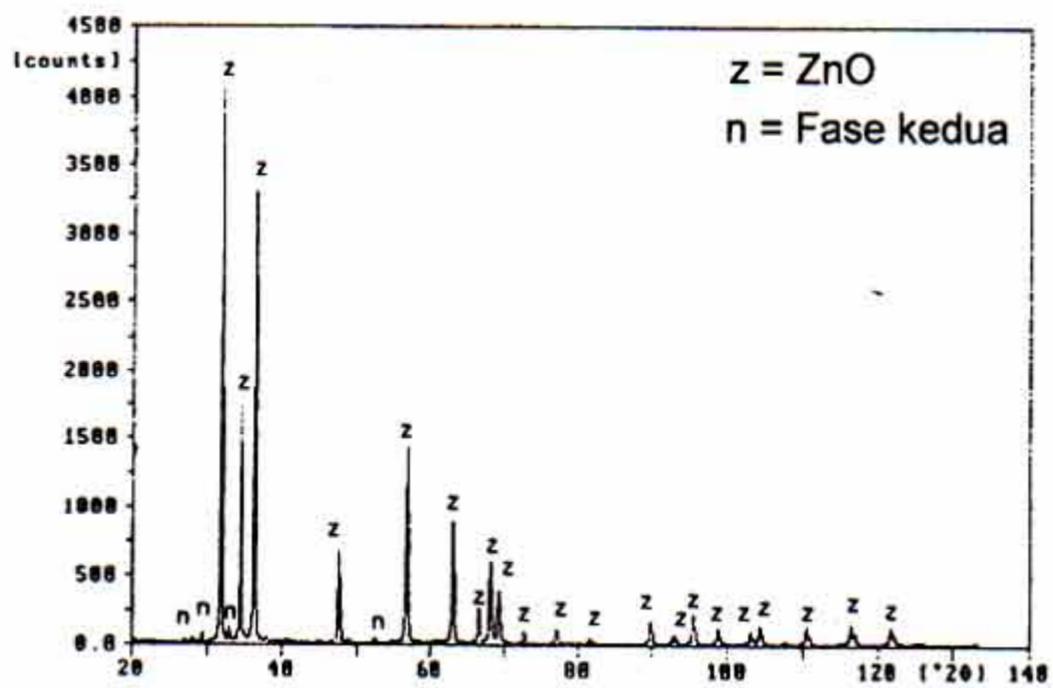
Gambar 9. Pola difraksi sinar-x ZnO murni.

### **Analisis Difraksi Sinar-x**

Hasil analisis difraksi sinar-x untuk sampel dengan kandungan  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  cukup signifikan yang disinter di bawah  $1300^\circ\text{C}$  yang diwakili oleh suhu  $1200^\circ\text{C}$  dan sampel yang disinter di atas suhu  $1300^\circ\text{C}$  yang diwakili oleh suhu  $1400^\circ\text{C}$  (dengan anggapan bahwa  $1300^\circ\text{C}$  adalah suhu eutektik) serta sampel  $\text{ZnO}$  murni sebagai pembanding diperlihatkan masing-masing pada Gambar 10, 11 dan 9. Jika dibandingkan dengan sampel  $\text{ZnO}$  murni (Gambar 9), maka diketahui bahwa pada sampel yang disinter pada suhu  $1200^\circ\text{C}$  (Lihat Gambar 10) dan  $1400^\circ\text{C}$  (Lihat Gambar 11) terdapat fase kedua yaitu  $\text{Nb}_2\text{Zn}_3\text{O}_8$ . Data ini bersesuaian dengan data diagram fase yang diusulkan oleh Pollard A.J. yang memperlihatkan adanya fase padat  $\text{Nb}_2\text{Zn}_3\text{O}_8$ . Jika dibandingkan dengan Gambar 10, Gambar 11 juga memperlihatkan bahwa hanya sebagian fase cair yang terbentuk selama penyinteran yang berkristalisasi menjadi  $\text{Nb}_2\text{Zn}_3\text{O}_8$ . Dengan melihat data struktur mikro Gambar 4-7, dan menghubungkannya dengan kehadiran fase  $\text{Nb}_2\text{Zn}_3\text{O}_8$ , maka dapat diketahui bahwa fase kedua  $\text{Nb}_2\text{Zn}_3\text{O}_8$  inilah yang menyebabkan ukuran butir mengecil kembali setelah batas kelarutan  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  dilewati. Hal ini terjadi karena fase padat  $\text{Nb}_2\text{Zn}_3\text{O}_8$  yang tersegregasi di batas butir menghalangi pergerakan batas butir [10,11].



Gambar 10. ZnO + 0.31 % mol Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> suhu sinter 1200°C.



Gambar 11. ZnO + 0.75 % mol Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> suhu sinter 1400°C.

## **KESIMPULAN**

1. Ditemukan suatu daerah larutan padat pada diagram fase ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> yang menyebabkan diagram fase ZnO- Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> yang diusulkan oleh Pollard A.J. [3] harus dikoreksi.
1. Di daerah larutan padat pada suhu 1100-1400°C, ukuran butir bertambah besar dengan penambahan konsentrasi Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, tetapi mengecil kembali setelah melewati batas kejenuhan.
2. Pada suhu lebih besar atau sama dengan 1300°C terdapat fase cair yang menyebabkan butir cenderung bulat.

## **Ucapan Terima Kasih**

Penelitian ini dibiayai oleh Dewan Riset Nasional melalui LIPI di bawah kontrak perjanjian no. 13/SP/RUT/1999.

## **DAFTAR PUSTAKA**

1. ASOKAN T. et.al., J. Mater. Sci., 22 (1987)1019.
2. DANI GUSTAMAN, S., ENKIR, S., BAMBANG, A., SAEFUL, H., MUHAMAD YAMIN, ARI, H., SUPOMO, Laporan RUT VI tahun 1998/1999, tidak diterbitkan.
3. POLLARD, A.J., ZnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> phase diagram, J. Am. Ceram. Soc. 44[12] (1961) 630.
4. DANI GUSTAMAN, S., SAEFUL, H., ENKIR, S., ARI, H., Pengaruh parameter penyinteran terhadap karakteristik E-J ZnO dan varistor ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Prosiding PISM III, Serpong 1998.