

## PENGARUH TEMPERATUR SINTERING TERHADAP SIFAT FERROELEKTRIK DAN DIELEKTRIK PbTiO<sub>3</sub> DOPING ZnO DENGAN METODE MECHANICAL ALLOYING

Rindang Fajarin<sup>1</sup>, Widyastuti<sup>1</sup>, Hariyati Purwaningsih<sup>1</sup>, Malik Anjelh Baqiya<sup>2</sup>, Reny Hayu Warit<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Staf Pengajar – Jurusan Teknik Material Dan Metalurgi – Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

<sup>2</sup>Staf Pengajar – Jurusan Fisika – Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

<sup>3</sup>Mahasiswa – Jurusan Teknik Material Dan Metalurgi – Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

### **Keywords :**

PbTiO<sub>3</sub>  
Mechanical Alloying  
Dielectric  
Ferroelectric

### **Abstract :**

PbTiO<sub>3</sub> is one of the electroceramic materials having a good dielectric properties for electronic applications. One of the applications is for capacitors. ZnO-doped PbTiO<sub>3</sub> were synthesized using mechanical alloying method, namely planetary ball mill, with sintering temperatures of 900°C, 1000°C, and 1100°C. Scanning Electron Microscopy (SEM) observations shows that the grain size increases with increasing sintering temperature. Dielectric constant and the electrical conductivity show maximum values at sintering temperature of 1000°C, which are 28,31 and  $1.58 \times 10^{-6} \Omega/m$  respectively, and then they decrease at sintering temperature of 1100°C. The remanent polarization increases with increasing sintering temperature, while the coercivity field does not change significantly with increasing sintering temperature. The increase of remanent polarization value with sintering temperature indicates the ferroelectric property becomes better. The maximum values of the remanent polarization and its coercivity field at the sintering temperature of 1000°C are  $59 \times 10^{-12} C/m^2$  dan 366.7 V/m respectively.

## 1. PENDAHULUAN

Elektrokераmik memiliki kemampuan fungsional yang unik di bidang listrik, optik dan magnetik. Aplikasi elektrokераmik telah berkembang menjadi material yang penting dan berhasil digunakan di banyak bidang. Salah satu aplikasi dari material elektrokераmik adalah kapasitor.

Keramik berbahan dasar PbTiO<sub>3</sub> memiliki struktur perovskite. Timbal titanat biasanya diaplikasikan sebagai material yang dikembangkan pada industri elektrik dan keramik elektrik karena PbTiO<sub>3</sub> termasuk material ferroelektrik (Rahmayeni, 2007). Salah satu metode pembuatan keramik PbTiO<sub>3</sub> yaitu dengan metode *mechanical alloying*.

*Mechanical alloying* adalah bentuk umum untuk suatu proses yang digunakan untuk memperkecil ukuran serbuk, dan di gunakan untuk pencampuran (*alloying*) dari dua serbuk material yang berbeda. Ada beberapa variabel yang harus di pertimbangkan, yaitu tipe milling, kecepatan milling, waktu milling, tipe dan ukuran bola giling, rasio bola-serbuk, temperatur milling, dan pelumas (*process control agent*) (Suryanarana, 2011). Salah satu jenis milling yang digunakan adalah *planetary ball mill*

Pembuatan pellet dilakukan dengan menggunakan mesin kompaksi. Kompaksi adalah salah satu cara untuk memadatkan serbuk menjadi bentuk yang diinginkan. sebelum ditingkatkan ikatannya dengan proses *sintering*. *Sintering* merupakan proses dimana partikel-partikel berikatan di batas permukaan pada temperatur dibawah titik lelehnya (R M German, 1984). Temperatur *sintering* berada di bawah temperatur leleh serbuk yaitu 0,6 – 0,85 dari temperatur leleh serbuk atau biasanya 2/3 temperatur leleh serbuk. Titik leleh PbTiO<sub>3</sub> adalah 1281°C.

Dielektrik adalah bahan isolator yang dapat dikutubkan apabila diberi medan listrik menjadi dipol-dipol sesuai dengan arah medanya. Kemampuan suatu bahan untuk menahan arus listrik disebut resistivitas ( $\rho$ ). Sebaliknya kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan arus listrik disebut konduktivitas ( $\sigma$ ) (R. Effendi, 2007).

Perhitungan konduktivitas bahan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$\rho = R \frac{L}{A} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

dimana  $\rho$  adalah resistivitas ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ),  $R$  adalah hambatan ( $\Omega$ ),  $L$  adalah jarak antar probe (cm),  $\sigma$  adalah konduktivitas, dan  $A$  adalah luas area ( $\text{cm}^2$ ).

Kemampuan material untuk terpolarisasi dinyatakan sebagai permitivitas  $\epsilon$  dan konstanta dielektrik  $\kappa$  adalah rasio antara permitivitas material dan permitivitas vakum  $\epsilon_0$ . Konstanta dielektrik dapat dipakai untuk menyatakan kekuatan bahan dielektrik dalam menyimpan muatan listrik. Rumus konstanta dielektrik dapat dihitung melalui persamaan

$$C = \kappa \epsilon_0 A / d \quad (3)$$

dengan  $C$  adalah kapasitansi dalam Farad,  $\kappa$  adalah konstanta dielektrik,  $\epsilon_0$  adalah permitivitas vakum atau konstanta listrik dimana  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m,  $A$  adalah luas penampang bahan dielektrik dan  $d$  adalah tebal dalam meter.

Sedangkan ferroelektrik adalah kemampuan suatu material untuk mempertahankan polarisasi meskipun medan listrik ditiadakan (R. E Smallman, 2000). Material ferroelektrik dicirikan memiliki kemampuan untuk membentuk kurva histeresis. Kurva histeresis adalah kurva yang menghubungkan antara medan listrik ( $E$ ) dan polarisasi ( $P$ ) (Xu Y, 1991).

Polarisasi remanen adalah nilai polarisasi yang tetap ada pada bahan ferroelektrik walaupun sudah tidak lagi dipengaruhi oleh medan listrik. Sedangkan medan koersif adalah medan koersif pada bahan ferroelektrik adalah medan yang diperlukan untuk merubah polarisasinya dari nilai polarisasi remanen menjadi nol ( $P = 0$ ). Nilai medan koersif dari suatu bahan bergantung dari banyak parameter diantaranya perlakuan suhu dan perlakuan listrik pada bahan.

## 2. METODE PENELITIAN

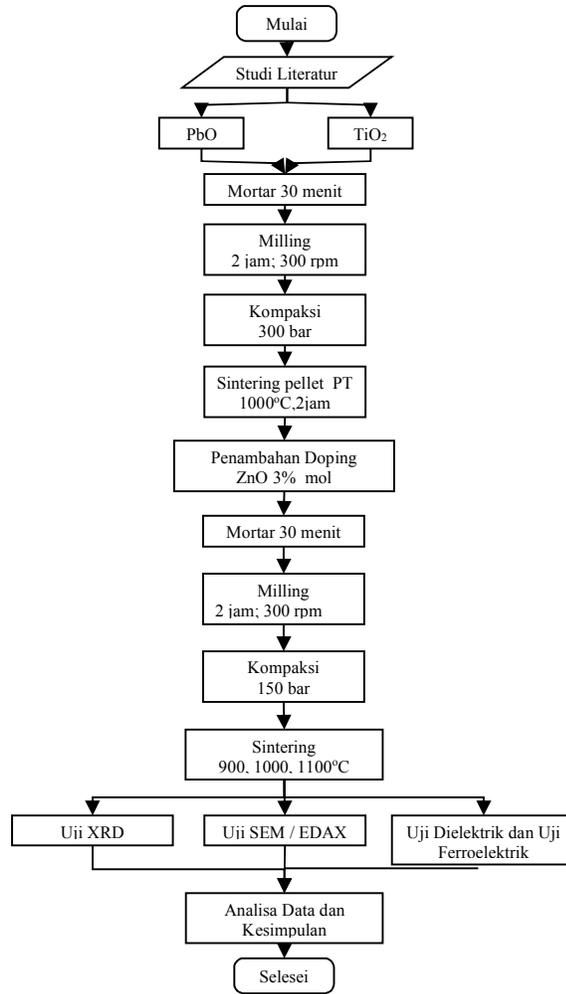
### 2.1 Alat dan bahan:

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mortar dan Pestle :  
Alat ini digunakan untuk membantu mereduksi ukuran serbuk sebelum proses *milling*
2. Timbangan Digital  
Timbangan digital digunakan untuk mengukur massa serbuk.
3. *Spatula*  
*Spatula* digunakan untuk mengambil serbuk yang akan digunakan.
4. *Crusible*  
*Crusible* digunakan sebagai wadah specimen saat sintering.
5. *Ball Mill*  
*Ball Mill* digunakan untuk mereduksi ukuran serbuk dalam *vial* saat *milling*. Jenis *ball mill* yang digunakan adalah *stainless steel*.
6. *Planetary ball mill*  
*Planetary ball mill* yang digunakan adalah Fritsch Pulverisette P-5 ball mill digunakan untuk proses *mechanical alloying*.
7. *Dies*  
*Dies* digunakan untuk cetakan kompaksi
8. Mesin Kompaksi  
Mesin kompaksi digunakan untuk mencetak sampel menjadi bentuk pellet.

### 2.2 Prosedur Penelitian

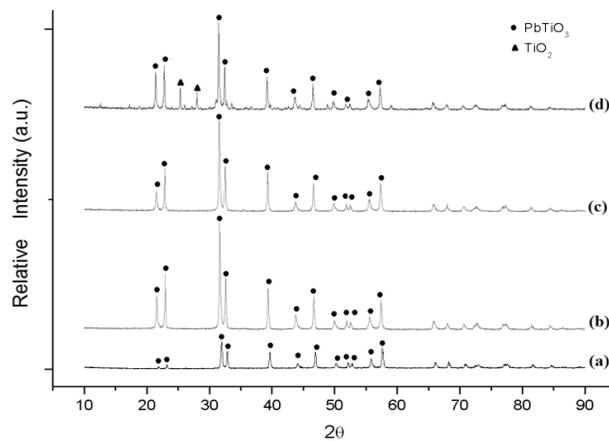
Material keramik  $\text{PbTiO}_3$  disintesis dengan mencampur serbuk  $\text{PbO}$ , dan  $\text{TiO}_2$  sebagai *raw material*. Perbandingan massa  $\text{PbO} : \text{TiO}_2$  adalah 74:26. Setelah serbuk  $\text{PbO}$  dan  $\text{TiO}_2$  dihaluskan menggunakan mortar dan pestle selama  $\pm 30$  menit, sebelum dimilling. Serbuk hasil mortar kemudian dimilling dengan menggunakan *planetary ball milling*. Perbandingan berat serbuk dan ball milling 1:6 yang dilakukan dengan kecepatan milling 300 rpm selama 2 jam. Serbuk dijadikan pellet dengan menggunakan kompaksi dengan tekanan 300 bar dengan tebal 3 mm dan radius 7,15 cm. Sampel dalam bentuk pellet kemudian disintering dengan temperatur 1000°C dengan waktu holding 2 jam dengan kenaikan temperatur 10°C/ menit.  $\text{PbTiO}_3$  didoping dengan ZnO dengan cara menghancurkan dan menambahkan 3% mol kemudian dimortar dan dimilling dengan cara yang sama seperti sebelumnya hingga terbentuk pellet yang disintering dengan tiga variasi 900°C, 1000°C, 1100°C. Identifikasi fasa menggunakan XRD PAN *Analytical*, mikrostruktur dengan menggunakan FEI INSPECT S50. Dielektrik diuji dengan LCR-meter. Sifat ferroelektrik diuji dengan rangkaian Sawyer-Tower dan TEXIO Oscilloscop CS4125A 20.



Gambar 2.1. Diagram Alir Penelitian

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian XRD  $\text{PbTiO}_3$  dengan variasi temperatur sintering pada doping 3% mol ZnO ditunjukkan pada Gambar 3.1.



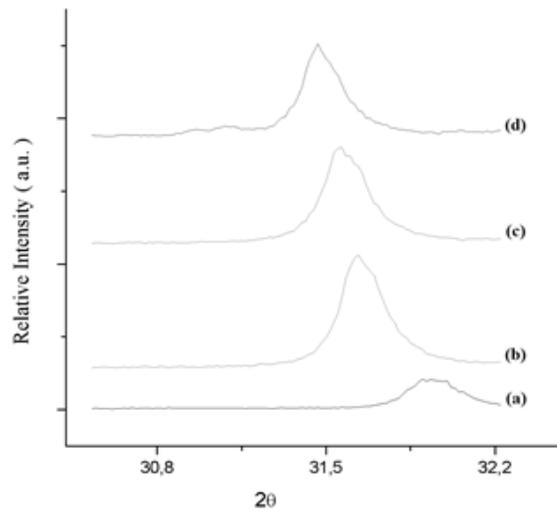
Gambar 3.1 Pola XRD  $\text{PbTiO}_3$  Variasi Temperatur Sintering pada Doping 3% mol ZnO; (a)  $\text{PbTiO}_3$  tanpa doping; (b) 900°C; (c) 1000°C; (d) 1100°C

Hasil uji XRD menunjukkan *peak* PbTiO<sub>3</sub> yang muncul mengalami pergeseran yang ditunjukkan pada Tabel 3.1 sebagai berikut :

Tabel 3.1. Perbandingan Posisi 2θ dan FWHM PbTiO<sub>3</sub> dengan Variasi Temperatur Sintering pada Doping 3% mol ZnO

PbTiO <sub>3</sub> doping ZnO	Temperatur Sintering (°C)	Posisi 2θ	FWHM
-	-	31.9015	0,1224
3%	900	31.6102	0,1171
3%	1000	31.5438	0,1224
3%	1100	31.4489	0,1004

Dari Tabel 3.1. terlihat dengan bertambahnya temperatur sintering, posisi 2θ PbTiO<sub>3</sub> semakin bergeser ke kiri, sedangkan nilai FWHM semakin besar. Pergeseran puncak PbTiO<sub>3</sub> dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Pergeseran Puncak Variasi Temperatur Sintering pada Doping 3% (a) PbTiO<sub>3</sub>; (b) 900°C; (c) 1000°C; (d) 1100°C

Pergeseran menyatakan adanya doping ZnO. Berdasarkan hasil XRD yang sudah didapatkan, maka ukuran kristal dapat dihitung. Perhitungan ukuran kristal yang terbentuk pada sampel sesuai dengan rumus Debye Scharrer pada persamaan 4 dan perhitungan *microstrain* pada persamaan 5

$$D = \frac{0,9\lambda}{B \cos \theta} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{B}{4 \tan \theta} \quad (5)$$

dimana D adalah ukuran kristal dalam Å, λ adalah panjang gelombang radiasi yang digunakan dalam uji XRD yaitu 1.54056 Å, θ adalah posisi sudut terbentuknya puncak, B adalah *Full Width at Half Maximum* (FWHM) atau lebar setengah puncak pada difraktogram (radian) dan 1° adalah 0.01745 rad. Dan θ adalah Sudut Bragg (°) . Sehingga ukuran kristal dari PbTiO<sub>3</sub> hasil doping dan sintering dapat dilihat pada Tabel 3.2.

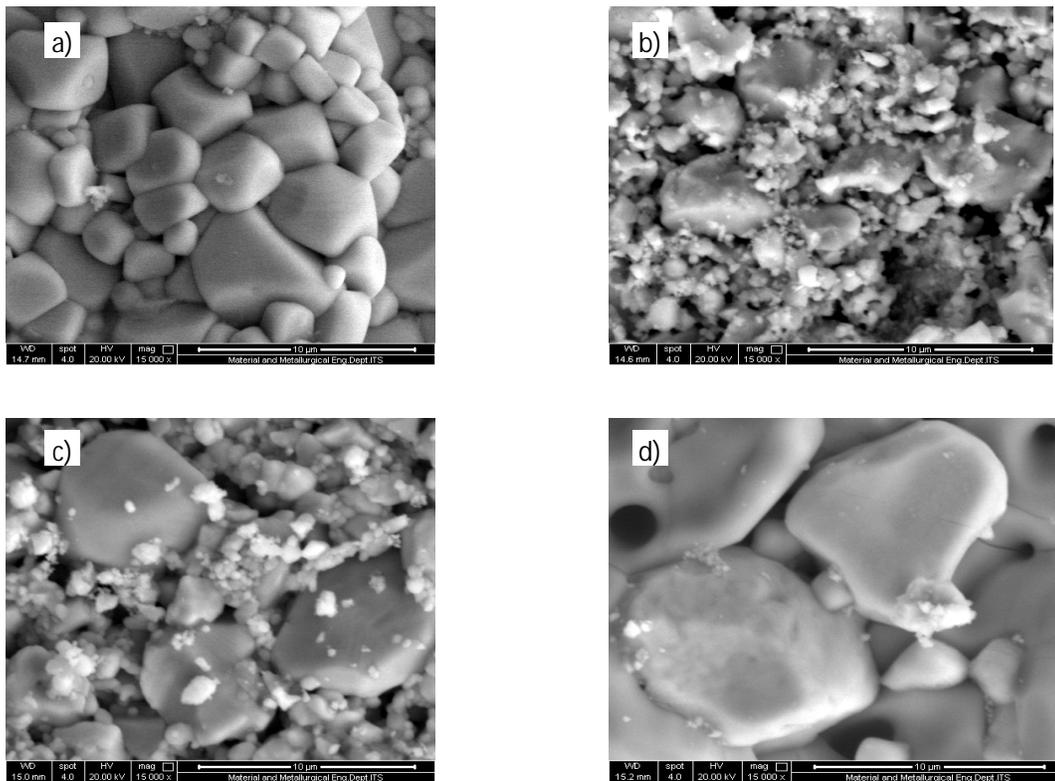
Tabel 3.2. Ukuran Kristal dan *Microstrain* PbTiO<sub>3</sub>dengan Variasi Sintering dan Variasi Doping ZnO

Doping (mol)	Temperatur Sintering °C	B (rad)	D (µm)	ε
-	-	0,00267	0,053896	0,0023402
3%	900	0,00245	0,056576	0,0022494
3%	1000	0,00257	0,053848	0,0023682
3%	1100	0,00205	0,067412	0,0018972

Dari Tabel 3.2 terlihat bahwa ukuran kristal yang tertera pada nilai D menunjukkan bahwa ukuran kristal semakin besar dengan bertambahnya temperatur sintering.

Gambar 3.1. menunjukkan terbentuknya  $\text{PbTiO}_3$  100% dengan struktur tetragonal, namun pada temperatur sintering  $1100^\circ\text{C}$  muncul puncak lain yaitu  $\text{TiO}_2$ . Hal tersebut diduga karena pada temperatur  $1100^\circ\text{C}$  sudah tidak lagi optimum sebagai temperatur sintering. Penelitian sebelumnya R. Wongmaneerunga (2011) mengatakan bahwa fungsi doping ZnO adalah sebagai *sintering aid*, yaitu ZnO dapat membantu menurunkan temperatur sintering pada  $\text{PbTiO}_3$ . Sedangkan menurut Vallant M (2006) vakansi oksigen yang terbentuk saat proses sintering memberikan keuntungan untuk mempermudah proses difusi transfer massa selama proses sintering. Dalam diagram fasa, titik lebur  $\text{PbTiO}_3$  berkisar  $1250\text{-}1300^\circ\text{C}$ , sedangkan temperatur sintering adalah  $2/3$  dari titik leburnya. Munculnya puncak  $\text{TiO}_2$  pada temperatur  $1100^\circ\text{C}$  di semua variasi doping mengindikasikan temperatur sintering tersebut telah melewati  $2/3$  titik lebur  $\text{PbTiO}_3$ . Munculnya  $\text{TiO}_2$  bisa jadi disebabkan oleh reaksi yang tidak sempurna, sehingga membentuk  $\text{TiO}_2$  dan  $\text{PbTiO}_3$ .  $\text{TiO}_2$  muncul pada sampel dengan temperatur sintering  $1100^\circ\text{C}$  karena titik leburnya relatif lebih tinggi daripada  $\text{PbO}$  yaitu  $1800^\circ\text{C}$ .

Pengujian SEM digunakan untuk mengetahui morfologi dan ukuran butir dari pellet  $\text{PbTiO}_3$  setelah mengalami proses sintering.. Hasil SEM dapat dilihat pada Gambar 3.3

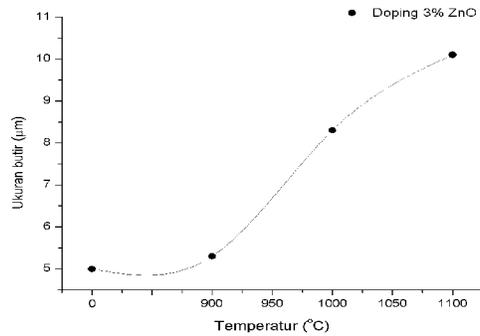


Gambar 3.3 Hasil SEM pada Sampel dengan Variasi Temperatur Sintering pada  $\text{PbTiO}_3$  dengan Doping 3% mol ZnO dengan perbesaran 15000x; (a)  $\text{PbTiO}_3$ ; (b)  $900^\circ\text{C}$ ; (c)  $1000^\circ\text{C}$ ; (d)  $1100^\circ\text{C}$

Gambar 3.3 (a) menunjukkan morfologi dari sampel berbentuk agregat tidak beraturan dengan distribusi yang relatif merata. Ukuran butir berkisar  $4\mu\text{m}\text{-}6\mu\text{m}$  yang dikelilingi oleh partikel yang ukurannya jauh lebih kecil dengan ukuran yang acak. Partikel yang ukurannya jauh lebih kecil tersebut tampak terjadi aglomerasi dan cenderung menutupi butir yang ukurannya lebih besar tersebut.

Sedangkan pada Gambar 3.3 (b) morfologi dari sampel uji hampir serupa dengan sampel sebelumnya. Partikel berbentuk agregat yang butiran partikelnya berbentuk tidak beraturan. Namun bila diamati, ukuran partikelnya mengalami perubahan lebih besar daripada sampel sebelumnya. Ukuran butir pada sampel ini berkisar  $7\mu\text{m}\text{-}10\mu\text{m}$  dan terjadi aglomerasi.

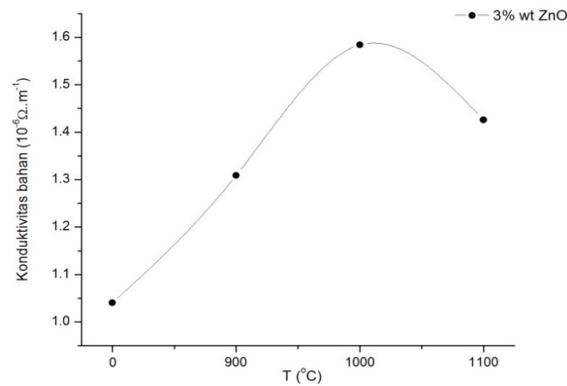
Pada Gambar 3.3 (c) morfologi pada sampel terlihat berbeda dari gambar sebelumnya. Dari segi ukuran, butiran-butiran partikelnya bertambah lebih besar rata-rata sekitar  $9\mu\text{m}\text{-}11\mu\text{m}$ . Butiran-butirannya terlihat semakin jelas karena butiran-butiran kecil yang menggumpal disekitar partikel yang besar semakin berkurang. Dari segi bentuk, bila diamati bentuk partikelnya tidak beraturan.



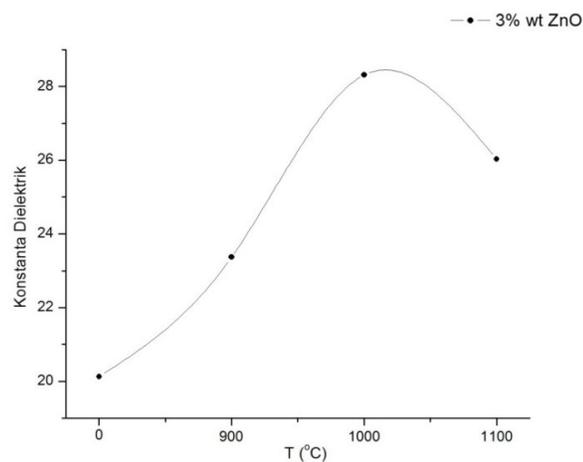
Gambar 3.4 Grafik Perbandingan Ukuran Butir dengan Variasi Temperatur pada Doping 3% ZnO

Dari pengamatan ketiga hasil SEM sampel  $\text{PbTiO}_3$  dengan variasi temperatur sintering pada doping 3% mol ZnO, terlihat jelas adanya perubahan ukuran ukuran butir yang terjadi pada masing-masing temperatur sintering. Perubahan ukuran butir ditunjukkan pada Gambar 3.4 diatas yang menunjukkan bahwa semakin bertambahnya temperatur sintering akan semakin memperbesar ukuran butir keramik  $\text{PbTiO}_3$ . Semakin tinggi temperatur maka akan semakin tinggi pula energi yang diberikan, sehingga difusi atom semakin besar. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Jeeran Nonkumwong (2014).

Pengaruh variasi temperatur sintering terhadap konduktivitas bahan dan konstanta dielektrik ditunjukkan pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6



Gambar 3.5. Grafik Pengaruh Variasi Temperatur Sintering terhadap Konduktivitas Bahan pada doping 3% ZnO



Gambar 3.6. Grafik Pengaruh Variasi Temperatur Sintering terhadap Konstanta Dielektrik pada doping 3% ZnO

Gambar 3.6 menunjukkan semakin bertambahnya temperatur sintering konstanta dielektrik juga semakin naik. Namun pada saat temperatur sintering lebih dari 1000°C nilai konstanta dielektrik turun. Hal ini dimungkinkan karena adanya pengaruh dari ukuran butir. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Vijendra [10] menyatakan bahwa konstanta dielektrik akan meningkat dengan peningkatan temperatur sintering

dan akan mencapai nilai maksimal pada temperatur Curie nya. Begitu pula yang terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh Venkata[11], mengatakan bahwa konstanta dielektrik bertambah dengan pertambahan temperatur dan mencapai nilai maksimal pada temperatur transisi curie dan kemudian nilainya akan berkurang dengan bertambahnya temperatur.

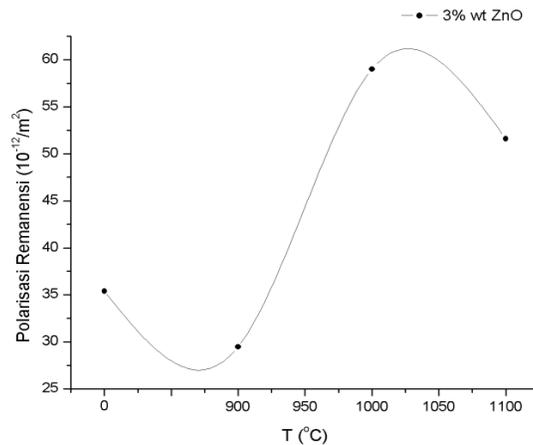
Pada penelitian ini nilai konstanta dielektrik dan nilai konduktivitas bahan maksimal pada doping 3% mol ZnO di temperatur sintering 1000°C yaitu 28,31 dan  $1,584 \times 10^{-6} \Omega/m$ . Berdasarkan teori yang ada, nilai konduktivitas dari semikonduktor adalah berada dikisaran  $10^{-8}$  hingga  $10^3$ . Dengan demikian, maka sampel yang diuji termasuk dalam semikonduktor.

Pengujian ferroelektrik dilakukan untuk mendapatkan polarisasi remanensi dan medan koersif. Pengujian mendapatkan kurva histeresis sehingga didapatkan nilai Polarisasi remanensi dan medan koersivitasnya yang dihitung dengan persamaan.

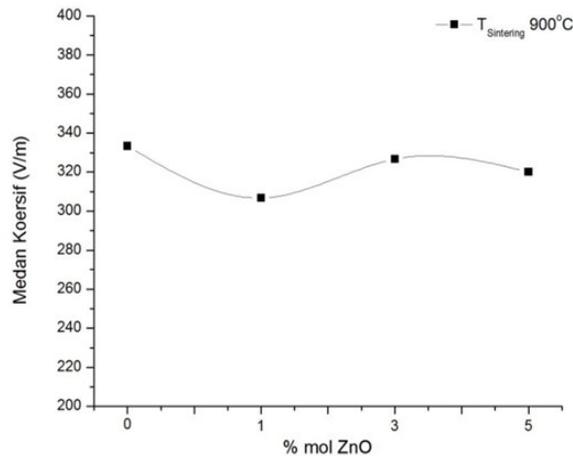
$$P_r = \epsilon_0 \times V_y / d \quad (6)$$

$$E_c = V_x / d \quad (7)$$

Grafik nilai  $P_r$  dan  $E_c$  dengan variasi doping dapat dilihat pada Gambar 3.7 dan Gambar 3.8.



Gambar 3.7 Grafik nilai Polarisasi Remanensi dengan variasi doping pada Temperatur 900°C



Gambar 3.8 Grafik Nilai Medan Koersivitas dengan Variasi Doping Pada Temperatur 900°C

Hasil pengujian polarisasi menunjukkan nilai polarisasi remanen naik saat temperatur sintering naik kemudian nilainya turun saat mencapai temperatur 1100°C. Sedangkan dengan ditambahkan doping ZnO nilai  $P_r$  turun kemudian sedikit naik saat doping 3% dan 5% mol. Nilai  $P_r$  relatif naik dengan bertambahnya temperatur sintering diindikasikan karena adanya pengaruh terhadap ukuran butir. Semakin tinggi temperatur sintering maka semakin besar ukuran butir. Sehingga semakin besar ukuran butir akan semakin banyak polarisasi yang tersisa dan semakin besar medan yang dibutuhkan untuk mengembalikan polarisasi menjadi nol. Begitu pula sebaliknya dengan bertambahnya % ZnO maka ukuran butir semakin kecil sehingga polarisasi

remanenya tidak banyak. Ukuran butir diperlihatkan pada hasil SEM. Venkata (2014) juga mengatakan nilai  $P_r$ ,  $P_s$ , dan  $E_c$  bertambah dengan bertambahnya ukuran butir dan berkurang dengan berkurangnya ukuran butir.

Nilai  $E_c$  tidak berubah secara signifikan dengan bertambahnya temperatur sintering maupun dengan bertambahnya % doping ZnO. Banyak faktor yang mempengaruhi nilai  $E_c$ , seperti defect dan proses sintesis pellet yaitu saat milling dan sintering yang mempengaruhi bentuk dan ukuran butir pada keramik.

Semakin tinggi nilai  $P_r$  semakin baik pula sifat ferroelektriknya[12]. Pada penelitian kali ini nilai  $P_r$  dan  $E_c$  maksimal pada temperatur 1000°C dengan doping 3% mol ZnO yang nilainya  $59 \times 10^{-12} \text{ C/m}^2$  dan 366,7 V/m.

#### 4. KESIMPULAN

Dari analisa data dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Ukuran butir meningkat dengan meningkatnya temperatur sintering.
2. Nilai konstanta dielektrik dan konduktivitas bahan nilainya naik dan maksimal pada temperatur 1000°C yaitu 28,31 dan  $1,584 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$ .
3. Sifat ferroelektrik meningkat seiring dengan kenaikan temperatur sintering. Nilai  $P_r$  dan  $E_c$  maksimal pada temperatur 1000°C dengan doping 3% mol ZnO yang nilainya  $59 \times 10^{-12} \text{ C/m}^2$  dan 366,7 V/m

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Rahmayeni, Emriadi, E. Susanti dan D. Silvia, "Pembuatan Lapisan Tipis Dan Serbuk Timbal Titanat Dengan Metoda Sol Gel," J. Ris. Kim, Vol. 1, No.1(2007)
- Suryanarayana, "Mechanical Alloying and Milling," *Progress in Materials Science*, (2001), 46. 1-184
- R. M. German, "Powder Metallurgy Science. Princeton : Metal Powder Industries Federaion,"(1984)
- Effendi, "Medan Elektromagnetika Terapan," Jakarta, Erlangga, (2007)
- R. E. Smallman, R. J. Bishop, "Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material," Jakarta, Erlangga, (2000)
- Xu Y, "Ferroelectric Material and Their Applications," North-Holland, Netherland, (1991)
- R. Wongmaneerunga., S. Choopanb, R. Yimnirunc, S. Anantab, "Dielectric Properties of PbTiO3/ZnO Ceramic Nanocomposites Obtained by Solid-State Reaction Method," *Journal of Alloys and Compounds* 509, (2011)3547–3552.
- Vallant M., Survorof D., Pullar RC., Sarma K., Alford NM. 2006. "A Mechanism for Low-Temperatur Sintering," *J Eur Ceram Soc*; 26:27, (2006), 77-83.
- J. Nonkumwong , L. Srisombat , S. Ananta, "Effect of Sintering Temperature on Phase Formation, Microstructure and Dielectric Properties of Nanogold Modified Barium Titanate Ceramics," *ELSEVIER, Current Applied Physics* 14 (2014) 1312e1317.
- V. A. Chaudari, G. K. Bichile. "Synthesis, Structural, and Electrical Properties of Pure PbTiO3 Ferroelectric Ceramics". *Hindawi Publishing Corporation Smart Materials Research Volume 2013, Article ID 147524,(2013,) 9 pages*
- V. R. Mudinepali, S. Song, J. Li, B.S. Murty. "Effect of Grain Size on The Electrical Properties of High Dense BPT Nanocrystalline Ferroelectric Ceramics". *Science Direct, Ceramics International*40(2014)1781–1788.
- W. Sakamoto, A. Iwata, T. Yogo. "Ferroelectric properties of chemically synthesized perovskite BiFeO3–PbTiO3 thin films," *J. Appl. Phys*, 104, (2008), 104106