

## Model Dinamis Non Ideal *Ferroelectric Capacitor* pada Sifat Ferroelektrik Material Zinc Oxide (ZNO) dengan Doping Li 1%

Septian Rahmat Adnan

Fakultas Teknik, Universitas Esa Unggul, Jakarta, Indonesia, 11510

### ABSTRAK

Sifat ferroelektrik telah sejak lama mendapat perhatian para peneliti karena dapat diaplikasikan pada berbagai bidang teknologi salah satunya adalah pada divais elektronik. Pada perkembangan penelitian ditemukan bahwa adanya fenomena ferroelektrik dari material berbasis material Zinc Oxide (ZnO) dengan diberikan doping ataupun bentuk komposit dengan material tambahan seperti BaTiO<sub>3</sub>. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memodelkan karakteristik ferroelektrik material Zinc Oxide (ZnO) dengan doping Li 1% yaitu polarisasi spontan ( $P_s$ ), polarisasi saturasi ( $P_{sat}$ ) dan medan koersif ( $E_c$ ) menggunakan model *non ideal ferroelectric capacitor* yang dijalankan pada program Delphi 7 yang berbasis pascal dan dilanjutkan perhitungan R-Weighted pattern (Rwp) untuk mengetahui tingkat perbedaan antara antara hasil pemodelan dan eksperimen. Dari hasil pemodelan didapatkan nilai polarisasi saturasi dan polarisasi remanen menggunakan model *non ideal ferroelectric capacitor* mendekati nilai eksperimen yaitu  $5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  dan  $3,9 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  dengan nilai R-Weighted Pattern 18%. Dari hasil tersebut didapatkan bahwa model *non ideal ferroelectric capacitor* dapat memprediksi sifat karakteristik *ferroelectric* dari material Zinc Oxide (ZnO) dengan doping Li 1% dengan cukup baik.

**Kata kunci :** *ferroelectric; non-ideal ferroelectric capacitor; Zinc Oxide*

### ABSTRACT

*The phenomenon of ferroelectric has received the attention of researchers because it can be applied to various fields of technology, one of which is in electronic devices. It was found that there was a ferroelectric phenomenon from materials based on Zinc Oxide (ZnO) with doping or in composite forms with additional materials such as BaTiO<sub>3</sub>. The current study was aimed model the ferroelectric characteristics of Zinc Oxide (ZnO) material with 1% Li doping, namely spontaneous polarization ( $P_s$ ), saturation polarization ( $P_{sat}$ ) and coercive field ( $E_c$ ) by using a non-ideal ferroelectric capacitor model. The study was run on the Delphi program. 7 based on Pascal and continued calculating the R-Weighted Pattern (Rwp) to determine the level of difference between the modeling and experimental results. The modelling result showed that the values for saturation polarization and remanent polarization using the non ideal ferroelectric capacitor model were close to the experimental values, namely  $5 \text{ C}/\text{cm}^2$  and  $3.9 \text{ C}/\text{cm}^2$  respectively, with an R-Weighted Pattern value of 18%. These results suggest the non-ideal ferroelectric capacitor model can predict the ferroelectric characteristics of Zinc Oxide (ZnO) material with 1% Li doping quite well.*

**Keywords :** *ferroelectric; non-ideal ferroelectric capacitor; Zinc Oxide*

---

\* Penulis korespondensi

Email: septian.rahmat@esaunggul.ac.id

Diterima 21 Mei 2022; Disetujui 25 Mei 2022

AME (Aplikasi Mekanika dan Energi): Jurnal Ilmiah Teknik Mesin 2022

## PENDAHULUAN

Sifat ferroelektrik telah diteliti dan dikembangkan oleh banyak peneliti karena sifatnya yang dapat diterapkan pada berbagai jenis aplikasi terutama pada industry elektronik (Hendri et al., 2022). Salah satu kandidat material ferroelektrik yang mendapat banyak perhatian para peneliti adalah material Zinc Oxide (ZnO) karena stuktur kristal dari Zinc Oxide pada beberapa fasa terutama pada struktur nano memiliki banyak potensi aplikasi terutama pada aplikasi sensor (Li et al., 2019b). Beberapa aplikasi pada bidang teknologi elektronika dari material material Zinc Oxide adalah sebagai nano sensor, memory dan generator. (Adnan, 2018) Dari hasil perkembangan penelitian, ditemukan sifat ferroelektrik pada beberapa material berbasis material Zinc Oxide (ZnO) salah satunya adalah material komposit BLLT/ZnO, BaTiO<sub>3</sub>/ZnO dan carbon doped ZnO. Serta ZnO yang di doping Vanadium (Li et al., 2019b) (Ma et al., 2022) (Seol et al., 2021) (Wang et al., 2022) (Hendri et al., 2022). Sehingga material Zinc Oxide (ZnO) menjadi salah satu material yang memiliki sifat ferroelektrik yang menjadi kandidat untuk diaplikasikan pada berbagai alat elektronik (Maiz et al., 2019). Beberapa penelitian tentang sifat ferroelektrik dari material Zinc Oxide (ZnO) yang telah dilakukan oleh para peneliti (Maiz et al., 2019) (Ma et al., 2022) (Seol et al., 2021) (Wang et al., 2022) (Hendri et al., 2022).

Pada penelitian ini, Sifat karakteristik ferroelektrik pada sifat polarisasi saturasi, polarisasi spontan, polarisasi remanen dan medan koersif dari material Zinc Oxide (ZnO) dengan didoping 1% Li di modelkan menggunakan model non ideal *ferroelectric capacitor* yang dijalankan pada program berbasis pascal pada Delphi 7 (Miller et al., 1990). Selanjutnya, beberapa besaran masukan digunakan untuk melakukan pemodelan yaitu polarisasi remanen ( $P_r$ ), polarisasi saturasi ( $P_s$ ) dan medan koersif ( $E_c$ ) dari nilai eksperimen serta faktor skala. Untuk mengetahui tingkat perbedaan hasil pemodelan dan eksperimen dilakukan perhitungan statistic berupa R-Weighted Pattern ( $R_{wp}$ ) (Miller et al., 1990) (Adnan, 2018) (Wang et al., 2007) (Adnan, 2022)

## METODE PENELITIAN

Sifat karakteristik ferroelektrik dari suatu material ferroelektrik yang terjadi pada domain-domain penyusun dapat di jelaskan sebagai polarisasi positif yang disebabkan oleh medan listrik positif dan polarisasi negatif yang

disebabkan oleh medan listrik negatif, seperti ditunjukkan pada persamaan 1: (Miller et al., 1990)

$$P_d^-(E) = -P_d^+(-E) \quad (1)$$

Hubungan antara polarisasi pada domain dan medan listrik yang mempengaruhi domain dapat dijelaskan dengan suatu hubungan matematis dalam bentuk fungsi hiperbolik seperti ditunjukkan pada persamaan 2 (Miller et al., 1990) :

$$P_d^+(E) = P_s \tanh \left[ \frac{E - E_c}{2\delta} \right] \quad (2)$$

Dengan  $E$  adalah medan listrik luar,  $E_c$  adalah medan koersif dan  $\delta$  adalah konstanta hubungan antara medan listrik spontan dan polarisasi remanen. Selanjutnya konstanta  $\delta$  dapat dihitung menggunakan persamaan 3 (Miller et al., 1990) :

$$\delta = E_c \left[ \ln \left( \frac{1 + P_R/P_S}{1 - P_R/P_S} \right) \right] \quad (3)$$

Polarisasi yang terjadi saat medan listrik luar yang diberikan bernilai nol didefinisikan sebagai polarisasi remanen seperti ditunjukkan pada persamaan 4 (Miller et al., 1990) :

$$P_d^+(0) = -P_R \quad (4)$$

Hubungan antara polarisasi remanen dan medan koersif ditunjukkan pada persamaan 5 :

$$-P_R = P_s \tanh \left[ \frac{-E_c}{2\delta} \right] \quad (5)$$

Selanjutnya, persamaan 5 dapat dituliskan menjadi persamaan 6 :

$$\frac{E_c}{2\delta} = \operatorname{arctanh} \left( \frac{P_R}{P_S} \right) \quad (6)$$

Dengan menggunakan persamaan 3 dan persamaan 6, selanjutnya dapat dituliskan menjadi persamaan 7 sebagai berikut :

$$\frac{E_C}{2\delta} = \frac{1}{2} \left[ \ln \left( \frac{1 + \frac{P_R}{P_S}}{1 - \frac{P_R}{P_S}} \right) \right] \quad (7)$$

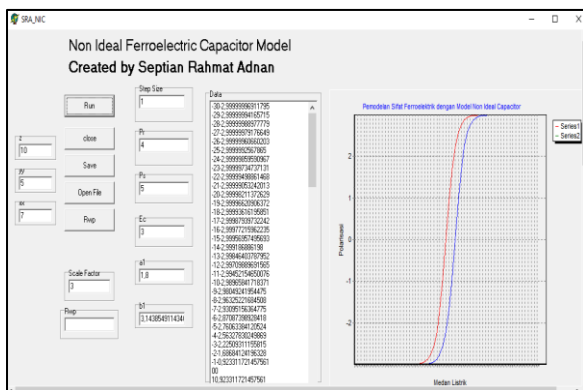
Untuk mengetahui selisih dan tingkat kecocokan antara hasil pemodelan dan data eksperimen dilakukan perhitungan dengan pendekatan statistic berupa R-Weighted Pattern (Rwp) dengan persamaan seperti ditunjukkan pada persamaan 8 : (Hikam et al., 2014)(Adnan, 2018)

$$R_{wp} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_{i(\text{exp})} - P_{i(\text{mod})})^2}{\sum_{i=1}^n P_{i(\text{exp})}^2} \right] \times 100\% \quad (8)$$

Dengan beberapa variabel yang digunakan yaitu  $P_{\text{exp}}$  merupakan data polarisasi eksperimen dan  $P_{\text{mod}}$  merupakan data polarisasi yang didapatkan dari hasil pemodelan. Pada perhitungan  $R_{wp}$  (*R-weighted pattern*), digunakan pendekatan dengan polarisasi yang didapatkan dari eksperimen dan hasil pemodelan merupakan kurva simetris pada sisi atas dan bawah sehingga hanya digunakan data kurva bagian bawah untuk menghitung nilai  $R_{wp}$  (*R-weighted pattern*) dari kedua kurva.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

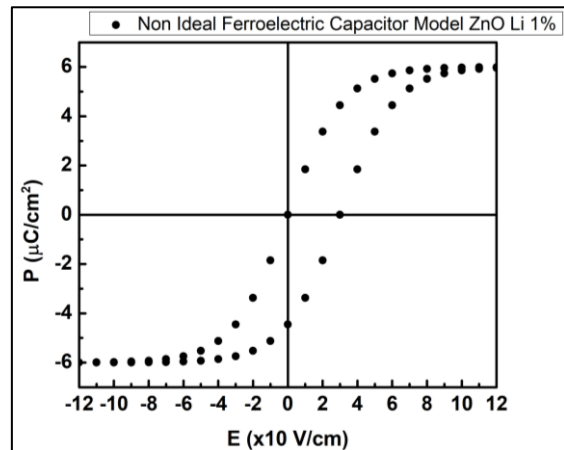
Hasil pemodelan sifat karakteristik material Zinc Oxide (ZnO) dengan doping Li 1% menggunakan model non ideal *ferroelectric capacitor* yang dijalankan pada Delphi 7 ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Pemodelan sifat karakteristik ferroelektrik material ZnO dengan doping Li 1% pada Delphi 7

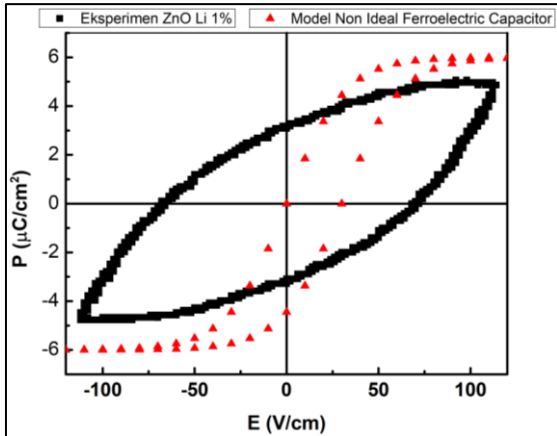
Data variabel yang digunakan sebagai data masukan pada pemodelan ini adalah nilai polarisasi remanen ( $P_r$ ), polarisasi spontan ( $P_s$ ), nilai medan listrik koersif ( $E_c$ ) dan nilai Medan listrik input ( $E$ ) eksperimen dan menggunakan nilai faktor skala 2. Dari hasil pemodelan

didapatkan nilai polarisasi saturasi ( $P_s$ )  $5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , Polarisasi remanen ( $P_r$ )  $3,9 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  dan nilai medan listrik koersif ( $E_c$ )  $74,5 \text{ kV}/\text{cm}$ .



Gambar 2. Kurva sifat karakteristik ferroelektrik material Zinc Oxide (ZnO) dengan doping Li 1% Menggunakan Model *Non Ideal Ferroelectric Capacitor*

Dari hasil pemodelan dapat diamati bahwa terjadi pergeseran medan koersif dari material Zinc Oxide (ZnO) dengan doping Li 1% sehingga terjadi perbedaan nilai antara medan koersif positif dan medan koersif negatif. Serta dapat diamati juga bahwa didapatkan medan koersif negatif bernilai hampir mendekati nol. Hal ini dapat dijelaskan bahwa pendekatan pada model non ideal *ferroelectric capacitor* sangat bergantung pada faktor pengurang medan koersif dari data masukan. Hal serupa juga pada nilai polarisasi remanen ( $P_r$ ) dari hasil pemodelan sifat ferroelektrik menggunakan model non ideal *ferroelectric capacitor*. Pada Gambar 2 terlihat bahwa pergeseran kurva juga berdampak pada perbedaan nilai polarisasi remanen ( $P_r$ ) positif dan nilai polarisasi remanen ( $P_r$ ) negatif. Serta didapatkan polarisasi remanen bernilai mendekati nol dan menyebabkan nilai polarisasi remanen negatif menjadi lebih besar. Hal ini dapat jelaskan karena besar medan listrik yang diterapkan pada saat dipol-dipol terpolarisasi pada satu arah lebih besar dibandingkan pada saat dipol-dipol penyusun material mengalami polarisasi balik (Adnan, 2018). Tetapi, perbedaan nilai tidak terjadi pada polarisasi spontan dan polarisasi saturasi.



Gambar 3. Kurva sifat karakteristik ferroelektrik eksperimen (kotak) dan pemodelan (segitiga) dari material Zinc Oxide (ZnO) dengan doping Li 1%

Hasil pemodelan dan eksperimen sifat ferroelektrik dari material Zinc Oxide (ZnO) dengan doping Li 1% ditunjukkan pada Gambar 3. Dari sifat ferroelektrik terlihat bahwa material Zinc Oxide (ZnO) dengan doping Li 1% cukup mudah terpolarisasi. Hal ini ditandai dengan diberikannya medan listrik luar dengan nilai rendah sudah cukup dapat menyebabkan polarisasi yang cukup besar pada dipol-dipol penyusun dari material Zinc Oxide (ZnO) dengan doping Li 1%. Serta dapat dijelaskan juga bahwa doping li 1% pada struktur kristal Zinc Oxide (ZnO) menyebabkan beberapa atom Li menggantikan atom Zn pada struktur kristal ZnO yang berdampak pada dipol-dipol penyusun material ZnO lebih mudah untuk terpolarisasi hingga mencapai polarisasi saturasi (Seol et al., 2021) (Wang et al., 2022).

Dari hasil simulasi dan eksperimen dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan pada beberapa nilai karakteristik sifat ferroelektrik dari material Zinc Oxide (ZnO) dengan doping Li 1% seperti medan koersif ( $E_c$ ), polarisasi saturasi ( $P_s$ ) dan polarisasi spontan serta polarisasi remanen ( $P_r$ ) seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa nilai polarisasi saturasi antar hasil pemodelan mendekati nilai eksperimen dengan selisih yang sangat kecil. Hal serupa juga terlihat pada nilai polarisasi remanen hasil pemodelan dengan nilai eksperimen. Hal ini dapat dijelaskan bahwa faktor skala pada pemodelan mempengaruhi nilai karakteristik polarisasi saturasi dan polarisasi remanen yang menyebabkan polarisasi yang terjadi pada dipol-dipol penyusun material Zinc Oxide (ZnO) dengan doping Li 1% terpolarisasi menjadi lebih besar. Serta faktor skala menyebabkan nilai medan koersif yang diterapkan pada material

menjadi lebih besar sesuai nilai faktor skala yang diberikan (Adnan, 2018).

Tabel 1. Hasil Pemodelan dan Eksperimen

	Polarisasi Remanem ( $P_r$ ) ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	Polarisasi Saturasi ( $P_s$ ) ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	Medan Koersif ( $E_c$ ) (kV/cm)	$R_{wp}$ (%)
Model	3,9	5	74,5	18
Eksperimen	4,8	6	27,3	-

Dari Tabel 1. dapat dilihat bahwa ada nya perbedaan yang cukup besar pada nilai karakteristik medan koersif hasil pemodelan dan eksperimen. Hal ini dapat dijelaskan bahwa medan listrik yang diterapkan pada pemodelan terdapat faktor pengurang yang menyebabkan nilai medan listrik yang diterapkan pada material menurun. Dari data pemodelan dan eksperimen dapat dinyatakan bahwa model non ideal *ferroelectric capacitor* dapat dengan cukup baik untuk memodelkan sifat karakteristik ferroelektrik dari material Zinc Oxide (ZnO) dengan doping Li 1%. Hal ini dinyatakan dengan nilai R-weighted pattern ( $R_{wp}$ ) antara hasil pemodelan dan eksperimen adalah 18 % yang dapat dinyatakan cukup rendah. Pada penelitian lanjutan akan dikembangkan model non ideal *ferroelectric capacitor* dengan menggunakan variabel struktur kristal dari material.

**KESIMPULAN DAN SARAN**

Dari pemodelan sifat ferroelektrik Zinc Oxide (ZnO) dengan doping 1% Li dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil pemodelan nilai polarisasi saturasi dan polarisasi remanen menggunakan model non ideal *ferroelectric capacitor* mendekati nilai eksperimen yaitu 5  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  dan 3,9  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  dengan nilai eksperimen adalah 6  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  4,8  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  dan 27,3 kV/cm.
2. Nilai R-weighted pattern ( $R_{wp}$ ) antara hasil pemodelan dan eksperimen didapatkan 18%.
3. Model non ideal *ferroelectric capacitor* telah cukup baik untuk memprediksi sifat karakteristik ferroelektrik yaitu polarisasi saturasi dan polarisasi remanen dari material Zinc Oxide (ZnO) dengan doping Li 1%

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Republik Indonesia, sebagian dana riset ini berasal dari Hibah Penelitian Kerjasama Antar Perguruan Tinggi Tahun 2022 dengan no kontrak 069/E5/PG.02.00.PT/2022, 455/LL3/AK.04/2022, 002/SP-P.JAMAK/LPPM/VI/2022

## REFERENSI

- Adnan, S. R. (2018). Landau-Khalatnikov modified model for predicting ZnO ferroelectric properties. *AIP Conference Proceedings*, 2043(November). <https://doi.org/10.1063/1.5080026>.
- Adnan, S. R. (2022). Simulasi Sifat Polarisasi Material Zinc Oxide (Zno) Menggunakan Model Dipole Switching. *AME (Aplikasi Mekanika Dan Energi): Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 8(1), 17. <https://doi.org/10.32832/ame.v8i1.5835>.
- Hendri, Y. N., Kurniawan, R., Takase, K., & Darma, Y. (2022). Origin of ferroelectricity in carbon-doped ZnO nanocolumnars: Experimental and density-functional studies. *Ceramics International*, 48(2), 2038–2044. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2021.09.289>.
- Hikam, M., Adnan, S. R., Soegijono, B., Sudarmaji, A., Sanhaji, G., & Husein, O. (2014). *P ENYESUAIAN KURVA MODEL DINAMIS LANDAU - KHALATNIKOV PADA BZT*. 15(2), 108–111.
- Li, L., Zhang, Y., Wang, R., Sun, J., Si, Y., Wang, H., Pan, C., & Dai, Y. (2019a). Ferroelectricity-induced performance enhancement of V-doped ZnO/Si photodetector by direct energy band modulation. *Nano Energy*, 65(August). <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104046>.
- Li, L., Zhang, Y., Wang, R., Sun, J., Si, Y., Wang, H., Pan, C., & Dai, Y. (2019b). Ferroelectricity-induced performance enhancement of V-doped ZnO/Si photodetector by direct energy band modulation. *Nano Energy*, 65, 104046. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2019.104046>.
- Ma, S., Li, W., Hao, J., Ren, S., Wang, M., & Xu, Z. (2022). Microstructure and ferroelectric properties of Ta-doped Bi<sub>3.25</sub>La<sub>0.75</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub>/ZnO thin film capacitors. *Ceramics International*, 48(4), 5239–5245. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2021.11.064>.
- Maiz, J., Loxq, P., Fau, P., Fajerweg, K., Kahn, M. L., Fleury, G., Hadziioannou, G., Guegan, G., Majimel, J., Maglione, M., Rodriguez, V., & Pavlopoulou, E. (2019). Ferroelectricity in Undoped ZnO Nanorods. *Journal of Physical Chemistry C*, 123(48), 29436–29444. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b08247>.
- Miller, S. L., Nasby, R. D., Schwank, J. R., Rodgers, M. S., & Dressendorfer, P. V. (1990). Device modeling of ferroelectric capacitors. *Journal of Applied Physics*, 68(12), 6463–6471. <https://doi.org/10.1063/1.346845>.
- Seol, W. J., Anoop, G., Park, H., Shin, C. W., Lee, J. Y., Kim, T. Y., Kim, W. S., Joh, H., hikam, S., & Jo, J. Y. (2021). Ferroelectricity in solution-processed V-doped ZnO thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 853, 157369. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2020.157369>.
- Wang, L., Yu, J., Wang, Y., Peng, G., Liu, F., & Gao, J. (2007). Modeling ferroelectric capacitors based on the dipole switching theory Modeling ferroelectric capacitor switching with asymmetric nonperiodic input signals and arbitrary initial Modeling ferroelectric capacitors based on the dipole switching theory. *Journal of Applied Physics Journal of Applied Physics Journal of Applied Physics Journal of Applied Physics Journal of Applied Physics*, 101(10), 104505–2849. <https://doi.org/10.1063/1.2729470>.
- Wang, Y., Liu, L., Zhao, W., Ma, R., Pang, J., Hu, D., Dou, Z., Song, M., Li, T., & Miao, K. (2022). Spontaneous polarisation of ferroelectric BaTiO<sub>3</sub>/ZnO heterostructures with enhanced performance in a Fenton-like catalytic reaction. *Ceramics International*, 48(2), 2726–2735. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2021.10.059>.