

## Spektroskopi Impedansi dari BaTiO<sub>3</sub>: Studi Efek Self-Heating

Vivi Fauzia, Cuk Imawan

Smart Systems Technology Group  
Departemen Fisika, FMIPA Universitas Indonesia, Kampus Depok  
E-mail : [vivi@fisika.ui.ac.id](mailto:vivi@fisika.ui.ac.id), [imawan@fisika.ui.ac.id](mailto:imawan@fisika.ui.ac.id)

### Abstrak

Telah diteliti efek self heating yang mempengaruhi sifat konduksi listrik material BaTiO<sub>3</sub> dengan metode spektroskopi impedansi. Efek ini teramati setelah tegangan eksekusi lebih dari 5 Vpp. Spektrum impedansi (Cole-Cole Plot) material BaTiO<sub>3</sub> terlihat mengalami penyimpangan (depresi) dari spektrum sebelum terjadinya efek self heating yaitu pada tegangan eksekusi 1Vpp. Pemodelan rangkaian ekuivalen listrik yang sesuai dengan data eksperimen berupa rangkaian seri antara rangkaian paralel R<sub>g</sub>//C<sub>1</sub> yang merupakan sumbangan konduksi di dalam grain dan rangkaian paralel R<sub>gb</sub>//CPE yang merepresentasikan sumbangan konduksi dari batas grain. Efek self heating dimodelkan dengan faktor CPE yang mengakomodasi ketidakhomogenan sifat elektronis material.

*Keywords:* Spektroskopi impedansi, BaTiO<sub>3</sub>, self-heating

### 1. PENDAHULUAN

Salah satu aspek menarik dari spektroskopi impedansi sebagai alat investigasi sifat kelistrikan material adalah dapat dimodelkannya mekanisme konduksi di dalam material dengan menggunakan rangkaian listrik seperti komponen elektronika. Peneliti dapat membandingkan atau mencocokkan data impedansi dengan suatu model rangkaian listrik ekuivalen yang representatif dengan proses mekanisme konduksi yang berlangsung pada material sehingga diperoleh pemahaman sifat listrik material yang lebih baik [1].

Pada penelitian ini dipilih material BaTiO<sub>3</sub> karena mempunyai sifat yang menarik yaitu feroelektrik dan memiliki efek PTCR (*positif temperature coefficient of resistance*). Sifat-sifat ini sangat berguna dan banyak diaplikasikan pada piranti elektronika yang menjadikan BaTiO<sub>3</sub> merupakan salah satu material cerdas yang terkenal. Telah banyak usaha dilakukan untuk menerangkan efek PTCR dan sampai saat ini dianggap berasal dari sumbangan *grain* dan *grain boundary*[2]. Penelitian sebelumnya mengindikasikan adanya perubahan sifat konduksi jika terjadi efek self-heating[3]. Pada paper ini akan didiskusikan lebih lanjut dengan menggunakan pemodelan yang lebih baik untuk menerangkan efek tersebut.

### 2. TEORI

Spektrum impedansi untuk material non magnetik secara sederhana dapat ditampilkan seperti pada gambar 1. Plot antara komponen real dari impedansi Z'

dan komponen imajiner -Z'' menghasilkan suatu pola setengah lingkaran. Secara teoritis pola ini dapat diekivalenkan dengan model rangkaian sederhana dari paralel R//C tunggal. Pemodelan ini berlaku untuk material yang secara elektronis homogen [1]. Penggambaran spektrum impedansi kompleks seperti ini dikenal dengan nama Cole-Cole plot.

Impedansi Z untuk rangkaian tunggal R//C paralel dapat dinyatakan dengan persamaan [2]:

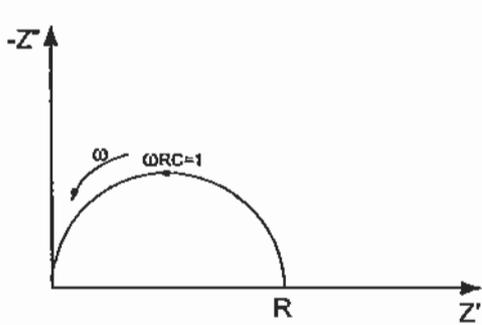
$$Z = \frac{R}{1 + j\omega RC} = Z' + jZ'' \quad (1)$$

dimana 
$$Z' = \frac{R}{1 + (\omega RC)^2} \quad (2)$$

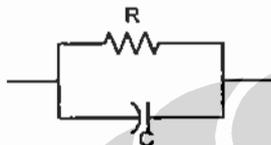
dan 
$$Z'' = \frac{\omega R^2 C}{1 + (\omega RC)^2} \quad (3)$$

Kurva impedansi setengah lingkaran memberikan R sebagai diameter setengah lingkaran dan nilai kapasitansi C diperoleh saat frekuensi mencapai -Z'' maksimum melalui hubungan  $\omega RC = 1$ . Waktu relaksasi  $\tau = RC$  merupakan parameter penting karena nilainya hanya tergantung pada sifat material, tidak tergantung pada geometrinya [4].

Sering dijumpai suatu data eksperimen yang tidak memenuhi kriteria di atas, yang terjadi adalah suatu



(a)



(b)

$$Z' = \frac{R \left[ 1 + (\omega RC)^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \right]}{1 + 2(\omega RC)^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) + (\omega RC)^2} \quad (5)$$

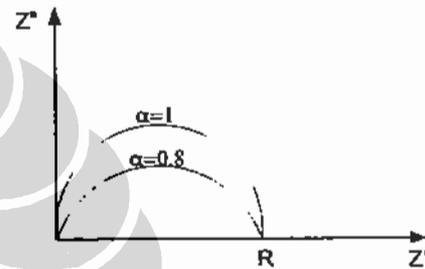
$$Z'' = \frac{R(\omega RC)^\alpha \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)}{1 + 2(\omega RC)^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) + (\omega RC)^2} \quad (6)$$

Gambar 1. Spektrum impedansi yang sederhana (a) dan pemodelan rangkaian paralel RC tunggal yang bersesuaian (b).

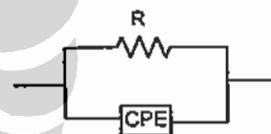
penurunan nilai-nilai  $-Z''$ . Gejala ini sering disebut depresi, seperti diilustrasikan pada gambar 2. Untuk menerangkan kejadian ini secara pemodelan rangkaian ekuivalen listrik, digunakan suatu faktor koreksi untuk nilai kapasitansi C dengan suatu elemen CPE (*Constant Phase Element*) yang secara fisis merepresentasikan suatu gejala sifat ketidakhomogenan elektronis dari material. CPE menghasilkan karakteristik  $\tau = RC$  yang tidak tunggal melainkan nilainya terdistribusi [1,5].

Koreksi dari faktor sifat ketidakhomogenan elektronis dari material akan menghasilkan bentuk spektrum impedansi yang berbeda. Persamaan impedansi kompleks untuk model sederhana rangkaian tunggal R/C paralel yang mengalami depresi diperlihatkan oleh persamaan (4-6). Parameter yang menunjukkan faktor depresi direpresentasikan oleh nilai  $\alpha$ . Nilai ini berkisar pada  $0 \leq \alpha \leq 1$ , yang mana untuk nilai 1 menunjukkan peristiwa tanpa terjadi depresi sedangkan dengan semakin besar nilai depresinya maka nilai  $\alpha$  menuju ke angka nol [4].

$$Z = \frac{R}{1 + (j\omega RC)^\alpha} = Z' - jZ'' \quad (4)$$



(a)



(b)

Gambar 2. Spektrum impedansi yang mengalami depresi (a) dan pemodelan rangkaian ekuivalen listrik R/C paralel tunggal dengan koreksi CPE (b).

### 3. EKSPERIMEN

Sampel yang diteliti adalah sebuah komponen PTCR yang terbuat dari bahan keramik BaTiO<sub>3</sub>. Sampel berbentuk disk berdiameter 90 mm dan tebal 25 mm dengan kontak elektroda berupa lapisan perak.

Tegangan input  $V_{in}$  yang diberikan pada sampel adalah tegangan sinusoidal *peak to peak* yang nilainya divariasi antara 1 volt hingga 30 volt dengan rentang frekuensi yang digunakan antara 300 kHz - 12 MHz. Untuk menghindari gangguan gelombang RF pada saat pengukuran sampel, sampel diletakkan dalam sistem alat yang terbuat dari bahan tembaga berukuran 15 cm x

20 cm x 7 cm sebagai *shielding* dengan sistem kabel dan kontak koaksial. Metode karakterisasi sampel telah diterangkan pada artikel sebelumnya [3].

Data hasil pengukuran berupa tegangan sampel  $V$ , arus yang melalui sampel  $I$  yang diukur secara tidak langsung dengan menggunakan suatu resistor standar dan beda fasa antara tegangan dan arus  $\theta$  yang diukur dengan menggunakan osiloskop, pada berbagai nilai frekuensi. Data hasil pengukuran ini selanjutnya diolah untuk menghasilkan nilai-nilai  $Z'$  dan  $Z''$  yang kemudian digunakan untuk membuat spektrum impedansinya.

#### 4. HASIL DAN DISKUSI

Spektrum impedansi untuk tegangan eksekusi 1 Vpp ditunjukkan pada gambar 3. Pada spektrum ini terlihat adanya dua bukit yang mana pada frekuensi rendah (300 kHz – 8 MHz) menunjukkan adanya setengah lingkaran besar dan pada frekuensi tinggi (8-12 MHz) terdapat setengah lingkaran kecil yang berimpit dengannya. Pemodelan rangkaian ekuivalen listrik diberikan oleh dua buah rangkaian R//C paralel yang diserikan. Hasil fitting dari model yang diperlihatkan dengan garis putus-putus menunjukkan suatu kuva yang berimpit dengan nilai data eksperimen.

Spektrum impedansi untuk tegangan eksekusi lebih dari 1 Vpp yaitu mulai dari 5 – 30 Vpp mempunyai kecenderungan yang identis yaitu pola setengah lingkaran yang besar pada frekuensi rendah mengalami depresi. Semakin besar tegangan eksekusi yang diberikan, efek depresi semakin kelihatan nyata. Gambar 4 memperlihatkan hasil pengukuran spektrum impedansi untuk tegangan eksekusi 5 Vpp dan 30 Vpp. Garis putus-putus menunjukkan hasil fitting pemodelan dengan menggunakan rangkaian ekuivalen listrik seperti untuk tegangan eksekusi 1 Vpp (gambar 3, kanan) yaitu tanpa efek depresi. Hasil ini menunjukkan bahwa data impedansi mengalami depresi artinya menyimpang dari pola setengah lingkaran. Koreksi faktor depresi untuk pola di frekuensi rendah dilakukan dengan memasukkan faktor CPE, dan hasil fitting pemodelan ditunjukkan dengan garis tebal yang terlihat sesuai dengan data eksperimen.

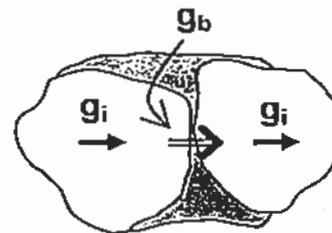
Pemodelan teoritis dari spektrum impedansi BaTiO<sub>3</sub> ini secara lengkap diberikan oleh persamaan (7 dan 8). Pada persamaan ini terlihat adanya nilai  $R_0$  sebagai akibat dari pergeseran spektrum untuk frekuensi tak berhingga yang bergeser dari nilai  $Z' = 0$ . Kemudian pada frekuensi tinggi 8-12 MHz dijumpai pola setengah lingkaran kecil yang dapat dimodelkan dengan rangkaian  $R_1//C_1$  paralel dan pada frekuensi rendah antara 300 – 8 MHz terjadi setengah lingkaran besar yang dimodelkan dengan  $R_2//C_2$  paralel. Nilai  $\alpha$  merupakan faktor koreksi depresi yang diberikan pada rangkaian  $R_2//C_2$  paralel untuk tegangan eksekusi

antara 5 – 30 Vpp. Jika nilai  $\alpha = 1$  maka tidak terjadi depresi dan model menjadi lebih sederhana, seperti yang terjadi pada tegangan eksekusi 1 Vpp. Hasil ekstraksi nilai masing-masing komponen pemodelan pada eksperimen ini ditampilkan di Tabel 1.

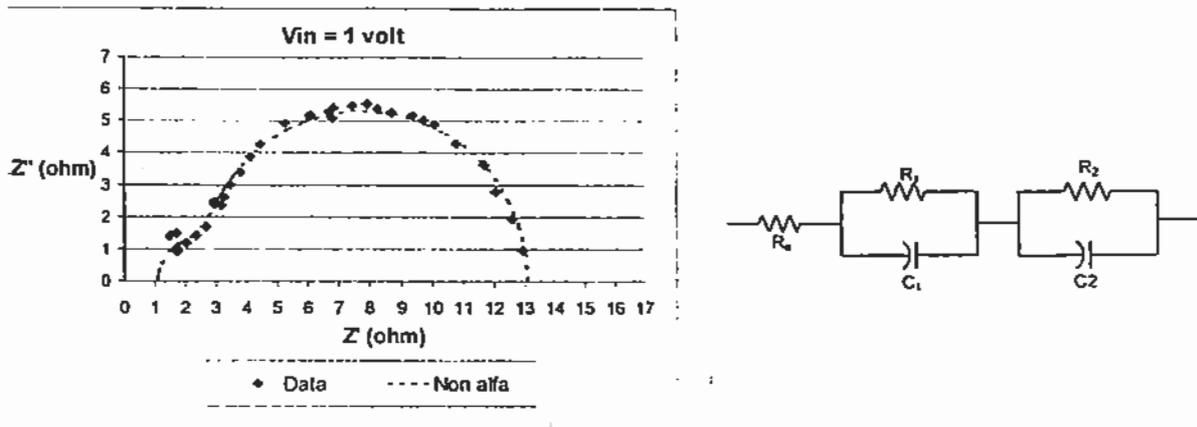
Fenomena fisis yang terjadi pada sifat konduksi BaTiO<sub>3</sub> ini dapat diterangkan sebagai berikut. Pada spektrum dijumpai pergeseran dari sumbu nol  $Z'$  yang menunjukkan sifat resistif murni dari material. Sumbangan sifat ini diduga berasal dari komponen ionik di dalam BaTiO<sub>3</sub>. Untuk menghasilkan sifat PTCR material BaTiO<sub>3</sub> harus didoping. Sifat konduksi listrik dari doping ini seperti larutan ionik yang mana efeknya terhadap listrik ac bersifat resistif. Kecuali itu pada keramik seperti ini tidak pernah diperoleh komposisi stokiometri, sehingga terdapat ion-ion oksigen yang mudah untuk bermigrasi.

Spektrum setengah lingkaran menunjukkan terdapatnya sifat kapasitif pada konduksi listrik. Spektrum setengah lingkaran pada frekuensi tinggi tidak dipengaruhi oleh perubahan tegangan eksekusi, sedangkan setengah lingkaran di frekuensi rendah sensitif terhadap perubahan tegangan. Semakin besar tegangan eksekusi, berarti semakin besar arus yang diberikan ke material, menyebabkan material menjadi panas atau disebut efek self-heating.

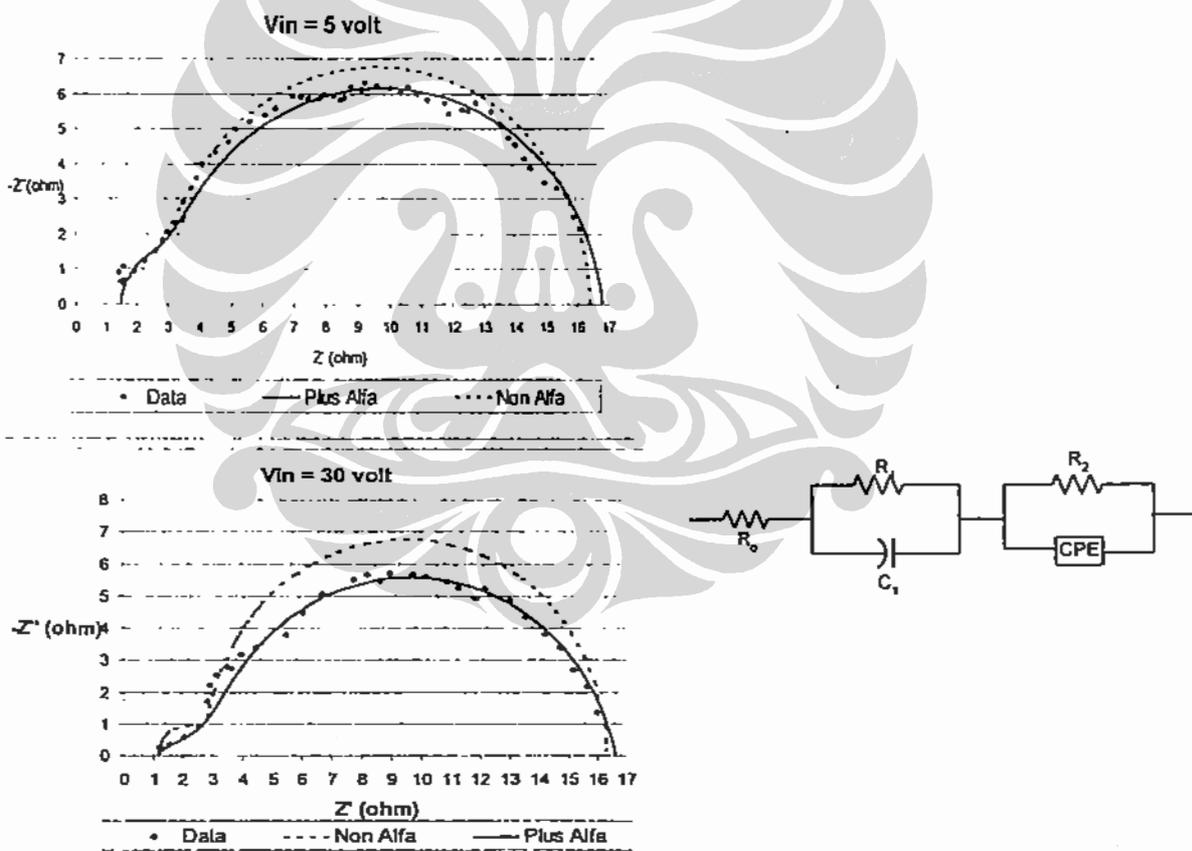
Mikrostruktur material terdiri dari grain dan grain-boundary. Bagian yang tidak stabil adalah grain-boundary, sehingga saat terjadinya self-heating maka bagian yang lebih sensitif untuk merespon adalah daerah grain-boundary. Jika diperhatikan dari hasil eksperimen, sumbangan sifat kapasitif merupakan representasi konduksi dari dalam grain dan grain-boundary, sehingga jika dimodelkan mekanisme konduksi di BaTiO<sub>3</sub> terdiri dari sumbangan konduksi di dalam grain (internal grain,  $g_i$ ) dan di daerah batas grain (grain-boundary,  $g_b$ ), seperti diilustrasikan pada gambar 5. Efek self heating hanya mempengaruhi depresi pada frekuensi rendah, sehingga disimpulkan bahwa pada frekuensi ini spektrum impedansi merupakan hasil dari sumbangan konduksi listrik pada grain-boundary.



Gambar 5. Model konduksi listrik yang terjadi pada BaTiO<sub>3</sub> karena sumbangan internal-grain dan grain-boundary.



Gambar 3. Spektrum impedansi dari BaTiO<sub>3</sub> dengan tegangan eksekusi 1 Vpp (kiri). Garis putus-putus adalah hasil fitting dari perhitungan teoritis dengan model rangkaian ekivalen listriknya (kanan) tanpa melibatkan faktor koreksi alfa (CPE).



Gambar 4. Spektrum impedansi pada tegangan eksekusi 5 Vpp dan 30 Vpp yang menunjukkan adanya efek depresi pada spektrum. Pemodelan rangkaian ekivalen listrik yang memasukkan faktor koreksi CPE (kanan) menghasilkan fitting yang baik pada data eksperimen (garis tebal pada data eksperimen, kiri).

$$Z' = R_o + \frac{R_1}{1 + (\omega R_1 C_1)^2} + \frac{R_2 \left[ 1 + (\omega R_2 C_2)^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \right]}{1 + 2(\omega R_2 C_2)^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) + (\omega R_2 C_2)^2} \quad (7)$$

$$Z'' = \frac{\omega R_1^2 C_1}{1 + (\omega R_1 C_1)^2} + \frac{R_2 (\omega R_2 C_2)^\alpha \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)}{1 + 2(\omega R_2 C_2)^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) + (\omega R_2 C_2)^2} \quad (8)$$

Tabel 1. Nilai-nilai komponen yang digunakan pada parameter pemodelan rangkaian ekuivalen listrik untuk spektrum impedansi dari BaTiO<sub>3</sub>.

No.	V <sub>ia</sub> (volt)	R <sub>o</sub> (Ω)	τ <sub>1</sub> =R <sub>1</sub> C <sub>1</sub> (S)	τ <sub>2</sub> =R <sub>2</sub> C <sub>2</sub> (S)	α
1	1	1.1	2.78E-09	6.67E-08	1.00
2	5	1.5	2.45E-09	6.08E-08	0.94
3	10	1.5	4.26E-09	4.84E-08	0.91
4	15	1.5	3.64E-09	5.20E-08	0.90
5	20	1.5	4.13E-09	5.13E-08	0.90
6	30	1.2	1.86E-09	6.19E-08	0.88

## 5. KESIMPULAN

Spektrum impedansi BaTiO<sub>3</sub> terdiri dari kurva setengah lingkaran pada daerah frekuensi tinggi yang merepresentasikan konduksi di dalam grain dan kurva setengah lingkaran lain pada frekuensi lebih rendah yang menggambarkan konduksi pada daerah batas grain. Jika tegangan eksekusi dinaikkan terjadi efek self heating yang mengakibatkan terjadinya depresi pada spektrum. Efek ini hanya terlihat berpengaruh pada konduksi di daerah batas butir. Pada material ini juga dijumpai sumbangan konduksi ionik yang menghasilkan sifat resistif mumi seperti yang sering dijumpai pada material elektrolit padatan.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada QUE Project Departemen Fisika FMIPA UI yang telah membiayai penelitian ini.

## DAFTAR ACUAN

- [1] Macdonald J R, Impedance Spectroscopy, Wiley, New York (1987)
- [2] Sinclair DC and West AR, Impedance and modulus spectroscopy of semiconducting BaTiO<sub>3</sub> showing PTCR, J. Appl. Phys. Vol.66, No. 8, (1989)
- [3] Vivi Fauzia, Cuk Imawan, Pemodelan mekanisme konduksi dengan spektroskopi impedansi, Prosiding seminar fisika dan aplikasinya 206 - 209, Surabaya (2003)
- [4] Srinivas K, Sarah P, Suryanarayana, Impedance spectroscopy study of polycrystalline Bi<sub>4</sub>Fe<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>18</sub>, Bull. Mater.Sci. Vol. 26, No. 2 (2003)
- [5] [Http://www.gamry.com](http://www.gamry.com) (Gamry Instrument).