

Kajian Perubahan Struktur Kristal dan Konduktivitas Listrik Akibat Penambahan Variasi Dopan pada Bahan ZrO₂

B. Budiana^{1*}, F. Fitriana², Nadhrah Wivanius¹, Widya Rika Puspita¹ dan Fitriyanti Nakul¹

¹Politeknik Negeri Batam, Jurusan Teknik Elektro, Batam

²Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Dep. Fisika, Surabaya

*E-mail: budiana@polibatam.ac.id

Received: 16-03-2020

Accepted: 16-04-2020

Published: 30-04-2020

Abstrak

ZrO₂ merupakan bahan keramik yang memiliki banyak struktur (Polimorpi). Struktur yang dimiliki oleh ZrO₂ terdiri dari struktur monoklinik yang stabil pada temperatur ruang, tetragonal dan kubik. Metode penelitian pada penulisan jurnal ini menggunakan teknik review dari beberapa peneliti yang telah melakukan kajian secara intensif dengan berbagai variasi metode yang telah dilakukan. Selain dari itu, penyusunan jurnal ini dilengkapi dengan penggunaan *software* Vesta yang terintegrasi dengan data-data kristalografi yang tersedia pada laman crystallography.net/cod/ sehingga dapat memberikan simulasi atas pemberian dopan yang diberikan pada ZrO₂. Berdasarkan kajian yang telah dilakukan, penambahan variasi dopan yang diberikan pada ZrO₂ mengakibatkan ZrO₂ kubik dan tetragonal stabil pada temperatur ruang dan terjadi perubahan nilai konduktivitas listrik akibat adanya kehadiran vakansi oksigen yang terbentuk dari adanya pemberian dopan yang diberikan. Perubahan nilai konduktivitas listrik tergantung dari jenis dan konsentrasi dopan yang diberikan.

Kata kunci: Kubik, monoklinik, Vesta, Struktur, Tetragonal

Abstract

ZrO₂ is a ceramic material that has many structures (polymorph). The structure of ZrO₂ consists of monoclinic structures at room temperature, tetragonal and cubic. The research method in this journal was a review technique from several researchers who have conducted intensive studies with various methods that have been carried out. Apart from that, the preparation of this journal is complemented by the use of Vesta software that is integrated with crystallography.net/cod/ so that it can provide simulations for the effect of dopants given to ZrO₂. Based on studies, it can be concluded that with the addition of dopants given to ZrO₂, cubic and tetragonal structure can be stable at room temperature. While for ionic conductivity, there is an increase in dopant in the presence of vacancies oxygen formed. The electrical conductivity can change with variations and concentration of dopant.

Keywords: Cubic, monoclinic, Vesta, Structure, Tetragonal

Pendahuluan

Secara umum zat padat dapat dikelompokkan menjadi 3 kategori dasar yaitu logam, polimer dan keramik. Logam merupakan kelompok zat padat yang tersusun atas satu atau lebih elemen-elemen logam dengan elektron bebas yang dimilikinya. Polimer merupakan kelompok zat padat yang tersusun atas untai gugus hidrokarbon dengan struktur molekul yang sangat besar. Sedangkan keramik merupakan kelompok zat padat yang tersusun atas elemen logam dan nonlogam [1].

Keramik merupakan kategori material yang memiliki karakteristik yang unik untuk dipelajari baik dari sifat listrik [2], sifat mekanik [3,4] maupun sifat panas yang dimilikinya [5,6]. Pada temperatur ruang, keramik merupakan kelompok material yang tidak dapat menghantarkan listrik dan panas dengan baik. Namun di atas temperatur ruang, keramik dapat memiliki nilai konduktivitas yang tinggi [7]. Karakteristik yang dimiliki oleh keramik tersebut tidak terlepas dari sistem kristal yang membentuknya sehingga untuk memahami secara spesifik perlu dilakukan kajian.

Kajian yang paling dasar dalam mempelajari keramik adalah sistem kristal yang membentuk suatu material, proses yang terjadi pada saat pembentukan material dan sistem kristal yang terbentuk akibat proses tertentu (misalnya proses pemberian dopan baik secara substitusi maupun intertisi) [8]. Secara umum, sistem kristal terdiri dari 7 sistem kristal yaitu triklinik, monoklinik, ortorombik, tetragonal, hexagonal, rhombohedral dan kubik [9-12]. Penggolongan 7 sistem kristal tersebut berdasarkan pada hubungan diantara parameter kisi yang terbentuk dalam ranah 3 dimensi.

Salah satu contoh material keramik yang dapat dijadikan sebagai bahan kajian adalah ZrO₂ [13-15]. Bahan ini sering digunakan sebagai material *solid oxide fuel cell* (SOFC) [16-18], penggunaan dalam bidang medis [19,20], bahan dielektrik [7,21], proteksi material dari korosi dan oksidasi logam [22-24] serta dapat digunakan sebagai matriks kolom generator radioisotop [25].

Jika ditinjau berdasarkan struktur yang membentuknya, ZrO₂ tersusun atas kation Zr⁴⁺ dan anion O₂⁻. ZrO₂ memiliki struktur polimorpi (memiliki banyak struktur) [26-28]. Struktur ZrO₂ terdiri dari struktur monoklinik, tetragonal dan kubik dan dapat bertransformasi dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Dalam mempelajari material ini, tentu diperlukan kajian yang intensif yang ha-

rus dilakukan sehingga pendalaman bahan ini dapat teroptimalisasi dengan baik [28]. Struktur dari ZrO₂ dengan bentuk polimorfinya akan sangat sulit untuk difahami jika tidak dilakukan pendalaman yang intensif baik pada saat ZrO₂ dalam keadaan murni atau ZrO₂ dalam keadaan diberi dopan dengan kation divalent atau kation trivalent.

Dalam jurnal ini, material ZrO₂ akan dilakukan kajian secara intensif dengan menggunakan teori-teori yang sudah ada, penelitian-penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti dan juga menggunakan software yang terintegrasi dengan data-data kristalografi yang terdapat pada *Crystallography Open Data Base* (COD) [29-36].

Metode Penelitian

Metode Penelitian yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan melakukan kajian atas berbagai penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti yang berhubungan dengan struktur ZrO₂, dopan yang diberikan pada ZrO₂, perubahan struktur pada ZrO₂ serta dampak yang ditimbulkan akibat pemberian dopan. Pembuatan Struktur ZrO₂ dilakukan menggunakan *software Visualisation for electronic and structure analysis* (VESTA) versi 3.4.8 [37]. Informasi fasa, unit cell, struktur kisi, struktur parameter, volumetrik data dan bentuk kristal diperoleh data dari *Crystallography open Database* (COD). Bibliografi dari semua CIF file yang digunakan telah dicantumkan pada referensi.

Tujuan adanya pembuatan jurnal ini adalah untuk melakukan kajian atas perubahan struktur ZrO₂ akibat pemberian dopan serta pengaruhnya terhadap sifat listrik.

Hasil dan Diskusi

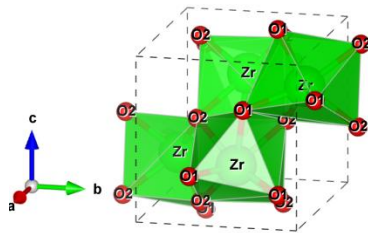
A. Kajian Penambahan Dopan pada struktur ZrO₂

ZrO₂ merupakan material polimori yang memiliki 3 struktur utama yaitu monoklinik, tetragonal dan kubik. Pada temperatur ruang, struktur ZrO₂ adalah monoklinik sedangkan untuk struktur lainnya yaitu tetragonal akan terbentuk di atas suhu 1170 °C dan struktur kubik akan terbentuk di atas suhu 2370 °C [38]. Perbedaan Fase monoklinik, tetragonal dan kubik dapat dilihat pada tabel 1.

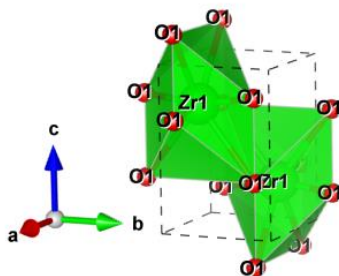
Tabel 1. Perbedaan monoklinik, tetragonal dan kubik

Sitem Kristal	Hubungan Aksial	Sudut Axial
Monoklinik	$a \neq b \neq c$	$\alpha, \beta = 90^\circ \neq \gamma$
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Kubik	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

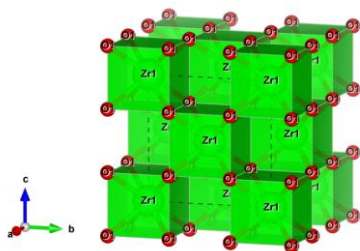
Berikut disajikan struktur kristal ZrO₂ dalam fasa monoklinik (gambar 1), tetragonal (gambar 2) dan kubik (gambar 3).



Gambar 1. Struktur kristal ZrO₂ fasa monoklinik



Gambar 2. Struktur kristal ZrO₂ fasa tetragonal



Gambar 3. Struktur kristal ZrO₂ fasa kubik

Monoklinik zirkonia merupakan struktur umum zirkonia pada temperatur ruang dan kubik merupakan struktur zirkonia yang stabil pada temperatur tinggi sedangkan struktur tetragonal merupakan struktur transisi dari struktur monoklinik ke struktur kubik [39]. Untuk mencegah terjadinya perubahan bentuk (transformasi), ZrO₂ membutuhkan dopan sehingga dapat stabil pada temperatur ruang dengan struktur kubik [40]. Zirkonia dalam bentuk tetragonal dan kubik memiliki densitas yang sangat tinggi dan temperatur kristalisasi yang

tinggi dibandingkan dengan struktur monoklinik sehingga struktur monoklinik ZrO₂ dihindari sistem kristalnya ketika digunakan dalam beberapa aplikasi material. Hal ini bertujuan untuk menghindari terjadinya ketidakstabilan struktur akibat adanya perubahan volume yang terjadi melalui mekanisme transformasi fasa [41]. Berikut adalah beberapa dopan yang sering digunakan pada ZrO₂ (Tabel 2).

Tabel 2. Dopan yang dapat diberikan pada ZrO₂

Muatan Kation	Dopan
2+	BeO, MgO, CaO, SrO
3+	Sc ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , La ₂ O ₃
4+	TiO ₂ , HfO ₂ , CeO ₂

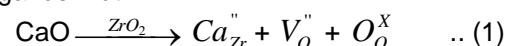
Salah satu pertimbangan yang dapat digunakan dalam memberikan dopan pada ZrO₂ adalah jari-jari atom dari masing-masing dopan. Berikut adalah jari-jari dopan seperti pada tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Jari-Jari atom dopan pada ZrO₂ [42]

Kation	Radius Ioni Kristal (pm)			
	Bilangan Koordinasi			
	4	6	8	12
Ca ²⁺	-	100	112	134
La ³⁺	-	103	-	136
Y ³⁺	-	90	102	-
Ti ⁴⁺	42	61	-	-
Zr ⁴⁺	-	72	84	-

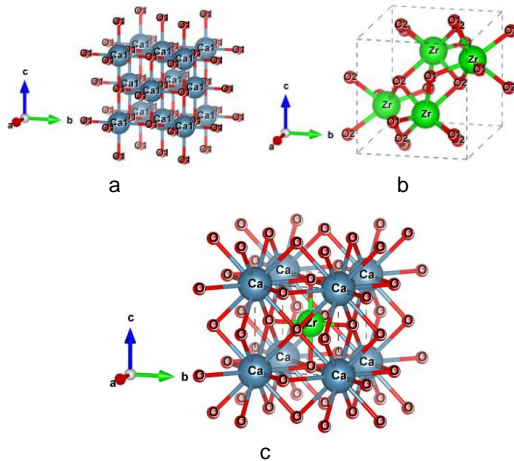
Salah satu dopan yang sering dipakai pada ZrO₂ dengan muatan kation sebesar 2+ adalah CaO [43]. Jika dilihat berdasarkan tabel 3 terlihat bahwa kation Ca²⁺ memiliki radius ion yang lebih besar jika dibandingkan dengan radius ion Zr⁴⁺ (baik untuk bilangan koordinasi 6 maupun bilangan koordinasi 8). Sehingga proses yang terjadi pada saat pemberian dopan kation Ca⁺ yang diberikan disebut sebagai substitusi dopan.

Ketika kation Ca²⁺ ditambahkan pada ZrO₂ dapat menstabilkan kubik temperatur tinggi dan tetragonal ke temperatur rendah melalui pembentukan larutan padat ZrO₂. Posisi atom Ca²⁺ dalam menempati kisi dapat dijelaskan dengan menggunakan notasi Kroger-Vink sebagai berikut:



Berdasarkan gambar 4 terlihat bahwa struktur ZrO₂ mengalami perubahan ketika diberikan dopan CaO. Atom Zr terlihat seolah olah berada pada posisi sentral yang berikatan dengan atom oksigen. Jumlah ikatan antara atom Zr dengan atom oksigen sebanyak 6 ikatan (6

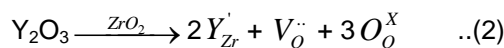
buah atom tetangga terdekat) sedangkan untuk ikatan diagonal bidang yang terbentuk antara atom Ca dengan Zr tidak ada. Posisi atom Ca berada pada sudut kubus dengan jumlah 4 atom yang berada dibagian atas dan 4 atom yang berada dibagian bawah. Sehingga jumlah atom Ca sebanyak 8 buah.



Gambar 5. a. Struktur atom CaO b. Struktur atom ZrO₂ monoklinik c. Struktur ZrO₂ yang didoping CaO

Pemberian dopan yang lain adalah muatan kation sebesar 3+. Dopan yang sering dipakai adalah Y₂O₃ [18]. Berdasarkan tabel 3 terlihat bahwa selisih radius ionik untuk kation Y³⁺ dengan Zr⁴⁺ adalah 18 pm baik untuk bilangan koordinasi 6 maupun untuk bilangan koordinasi 8. Nilai ini jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan selisih kation Ca²⁺ dengan Zr⁴⁺ yang mencapai 28 pm. Jika selisih radiusnya sangat kecil maka perubahan volum yang terjadi juga akan sangat kecil.

Penambahan kation Yttria (Y³⁺) pada ZrO₂ dapat menstabilkan kubik temperatur tinggi dan tetragonal ke temperatur rendah melalui pembentukan larutan padat ZrO₂. Posisi atom Y³⁺ dalam menempati kisi dapat dijelaskan menggunakan notasi Kroger-Vink sebagai berikut:

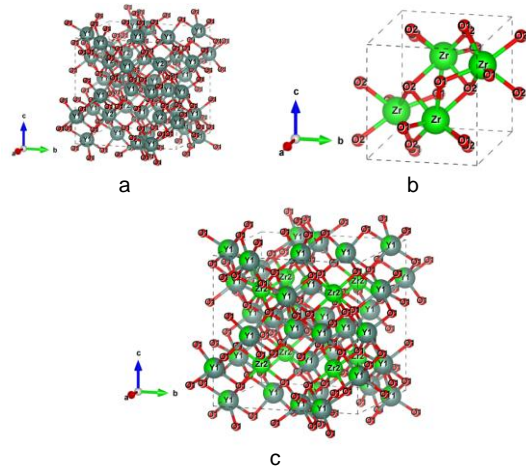


Berdasarkan persamaan 2 dapat dilihat bahwa 2 atom Y dapat menggantikan 1 atom Zr dalam menempati struktur kristalnya. Ketika posisi kation Y³⁺ mensubstitusi Zr⁴⁺ di posisi yang sama baik x,y maupun z. Maka akan berlaku nilai okupansi sebagai berikut :

$$Y^{3+} + Zr^{4+} = 1 \quad ..(3)$$

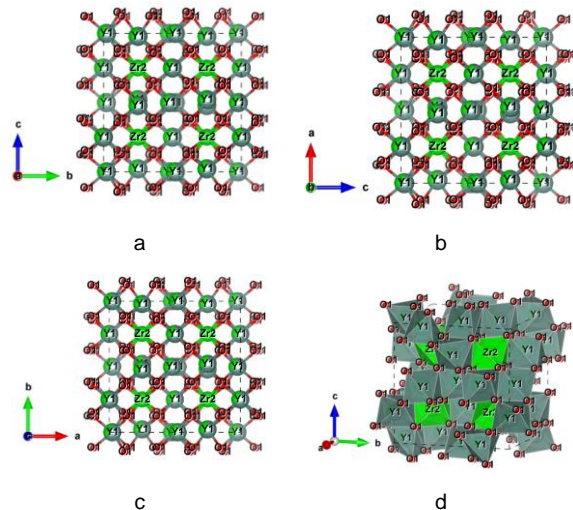
Misalkan Zr⁴⁺ okupansinya bernilai 0.667 maka nilai Y³⁺ bernilai 0.333. Nilai ini menunjukkan

kation Zr⁴⁺ menempati situs bersama dengan Y³⁺ sebanyak 2/3, sedangkan sisanya ditempati kation Y³⁺ sebanyak 1/3 dari total keseluruhan. Adapun struktur yang terbentuk dengan nilai okupansi Zr⁴⁺ (0.667) dan Y³⁺ (0.333) dapat ditunjukkan pada gambar seperti pada gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. a. Struktur atom Y₂O₃ b. Struktur atom ZrO₂ monoklinik c. Struktur ZrO₂ yang didoping Y₂O₃

Jika dilihat dari struktur kristal baru (Gambar 6), struktur baru ZrO₂ terlihat lebih kompleks jika dibandingkan dengan struktur ZrO₂ yang didoping dengan menggunakan CaO. Adapun struktur baru yang terbentuk dari berbagai arah dapat dilihat pada gambar 7 berikut ini.

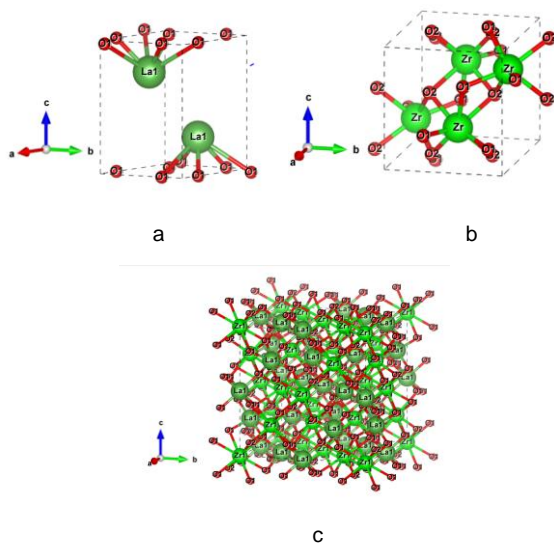
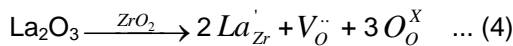


Gambar 7. Struktur ZrO₂ yang didoping Y₂O₃ pada arah., a. Sejajar sumbu a (dilihat pada arah a),. b. Sejajar sumbu b (dilihat pada arah b),. c. Sejajar sumbu c (dilihat pada arah c),. d. Semua sumbu ditampilkan dengan jenis tampilan Polyhedral style.

ikatan yang terjadi antara atom Y dengan O membentuk 5 tangan ikatan dalam struktur

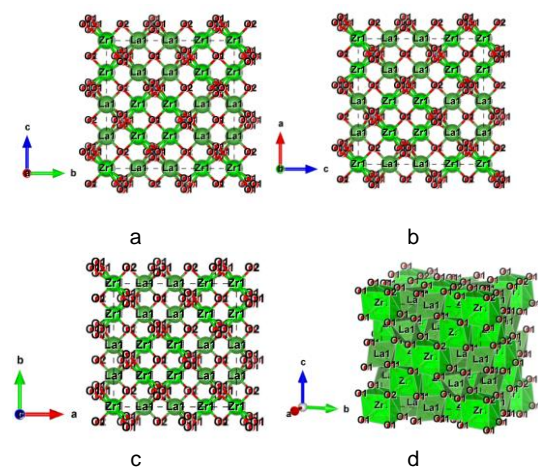
kristalnya dan tidak langsung membentuk tangan ikatan dengan atom Zr lainnya. Jika mengikuti persamaan 2, setiap 2 atom Y akan menggantikan 1 atom Zr dalam struktur kristal ZrO₂.

Selain kation Y³⁺ sebagai dopan, terdapat kation La³⁺ yang dapat digunakan sebagai dopan [44]. Persamaan La₂O₃ dapat ditulis dengan menggunakan notasi Kroger-Vink sebagai berikut:



Gambar 8. a. Struktur atom La₂O₃ b. Struktur atom ZrO₂ monoklinik c. Struktur ZrO₂ yang didoping La₂O₃

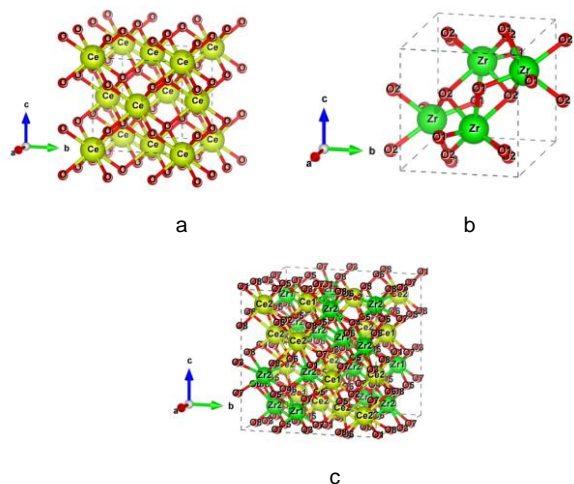
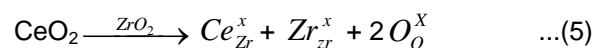
Ikatan yang terbentuk dengan adanya penambahan silikon pada struktur ZrO₂ dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. Struktur ZrO₂ yang didoping La₂O₃ pada arah., a. Sejajar sumbu a (dilihat pada arah a), b. Sejajar sumbu b (dilihat pada arah b), c. Sejajar sumbu c (dilihat pada arah c), d. Semua sumbu ditampilkan dengan jenis tampilan Polyhedral style

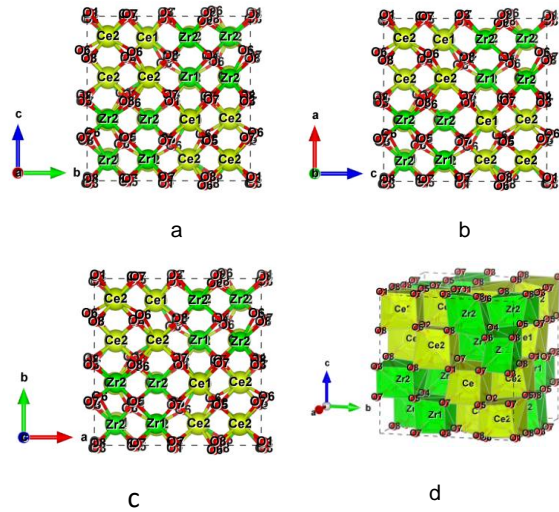
Berdasarkan gambar 9 terlihat bahwa posisi atom La memiliki pola yang berbeda dengan atom Y ketika masuk kedalam struktur ZrO₂. Posisi atom La memiliki pola Zr-La-La-Zr-Zr dan berulang secara periodik baik dari kiri ke kanan ataupun dari atas ke bawah (Gambar 8 dan Gambar 9) sedangkan pola atom Y dalam menggantikan kedudukan Zr memiliki pola Y-Y-Y-Y-Y untuk kolom pertama dari kiri ke kanan dan barisan pertama dari atas ke bawah. Barisan kedua kemudian memiliki pola Y-Zr-Y-Zr-Y kemudian berulang ke pola awal Y-Y-Y-Y-Y (Gambar 6 dan gambar 7). Perbedaan pola ini disebabkan karena masing-masing atom dopan memiliki karakteristik sendiri sebelum membentuk larutan solid ZrO₂. Jika dilihat dari sistem kristal yang digunakan dapat dilakukan perbandingan sebagai berikut. La₂O₃ sendiri memiliki sistem kristal kubik dengan space group P213 sedangkan Y₂O₃ sendiri memiliki sistem kristal kubik dengan space group Ia-3 [45]. Space group ini menyatakan susunan/konfigurasi ruang dalam ranah 3 dimensi sehingga ketika berbeda space group maka pola ZrO₂ yang telah di doping memiliki pola yang berbeda juga.

Selain dari kation yang bermuatan 2+ dan kation yang bermuatan 3+ terdapat kation yang bermuatan 4+ yang dapat digunakan sebagai dopan (seperti pada tabel 2). Dopan yang sering dipakai adalah CeO₂ [46]. Persamaan CeO₂ dapat ditulis dengan menggunakan notasi Kroger-Vink sebagai berikut:



Gambar 8. a. Struktur CeO₂ b. Struktur ZrO₂ monoklinik dan c. Struktur ZrO₂ substitusi CeO₂

Ikatan yang terbentuk antara atom Zr dengan Ce dapat dilihat pada gambar 9.

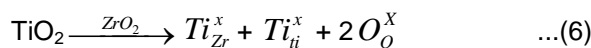


Gambar 9. Struktur ZrO₂ yang didoping CeO₂ pada arah., a. Sejajar sumbu a (dilihat pada arah a), b. Sejajar sumbu b (dilihat pada arah b), c. Sejajar sumbu c (dilihat pada arah c), d. Semua sumbu ditampilkan dengan jenis tampilan *Polyhedral style*

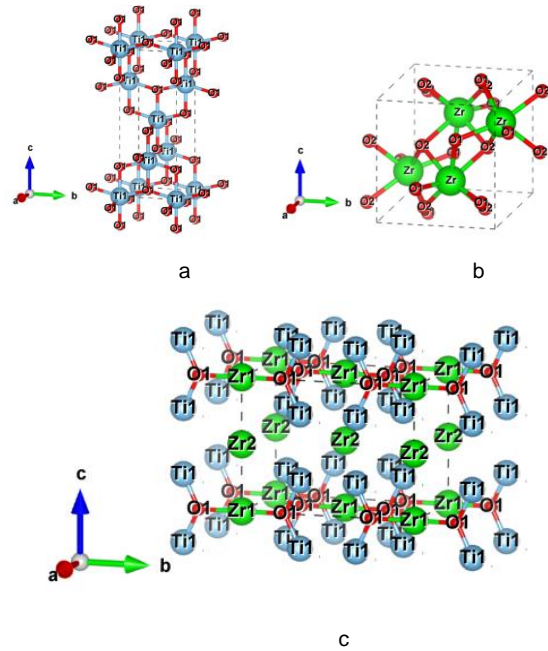
Berdasarkan gambar 9, pola yang terbentuk antara atom Ce dengan O dan Zr adalah sebagai berikut:

- Jika ditinjau dari baris
Baris pertama dan baris kedua memiliki pola Ce-Ce-Zr-Zr sedangkan baris ketiga dan keempat memiliki pola Zr-Zr-Ce-Ce.
- Jika ditinjau dari kolom
Kolom pertama dan kolom kedua memiliki pola Ce-Ce-Zr-Zr sedangkan kolom ketiga dan kolom keempat memiliki pola Zr-Zr-Ce-Ce.
- Jika ditinjau dari diagonal bidang
Diagonal bidang membentuk pola Ce-O-Ce-O-Ce-O-Ce dan diagonal bidang lainnya membentuk Ce-O-Ce-O-Ce-O-Ce

Contoh lain dengan muatan kation 4+ adalah TiO₂ [47]. Persamaan TiO₂ dapat ditulis dengan menggunakan notasi Kroger-Vink sebagai berikut:

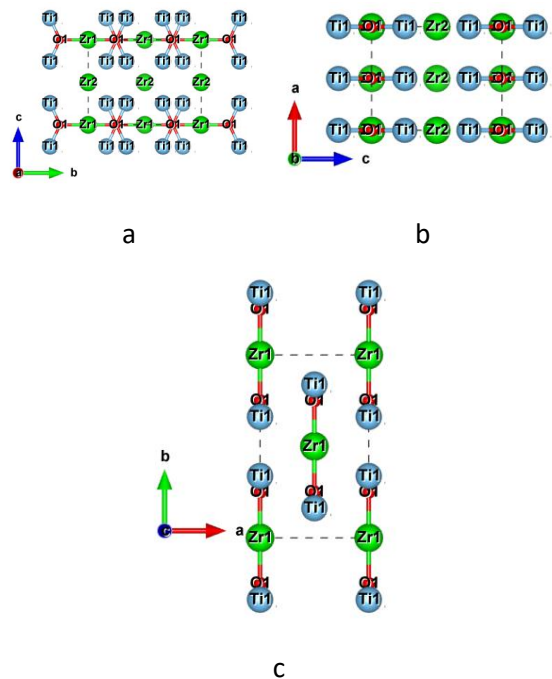


Untuk lebih jelasnya, struktur ZrO₂ yang didoping TiO₂ dapat dilihat pada gambar 10 berikut ini.



Gambar 10. a. Struktur TiO₂ b. Struktur ZrO₂ monoklinik dan c. Struktur ZrO₂ substitusi TiO₂

Ikatan yang terbentuk antara atom Zr dengan Ti dapat dilihat pada gambar 11.



Gambar 11. Struktur ZrO₂ yang didoping TiO₂ pada arah., a. Sejajar sumbu a (dilihat pada arah a), b. Sejajar sumbu b (dilihat pada arah b), c. Sejajar sumbu c (dilihat pada arah c).

Berdasarkan gambar 10 dan 11, pola yang terbentuk antara atom Ti dengan O dan Zr adalah sebagai berikut:

- a. Jika ditinjau dari arah a, b dan c
 Pola yang terbentuk dengan adanya tambahan dopan adalah sebagai berikut Ti-O-Zr-O-Zr-O-Zr-O dimana atom O berikatan dengan dua atom Ti disetiap ujungnya dan 4 atom Ti dititik tengahnya.

Struktur yang terbentuk dengan adanya penambahan dopan Ti tersebut memiliki struktur yang khas berbeda dengan dopan Ce dalam larutan ZrO₂. Perbedaan ini disebabkan karena karakter masing-masing dopan sebelum masuk kedalam struktur ZrO₂. Sistem kristal TiO₂ memiliki sistem Orthorombik dengan space group Cmmm dengan bentuk pola Cmmm(a,b,c) sedangkan sistem kristal CeO₂ memiliki sistem kubik dengan space group P213.

B. Pengaruh Penambahan Dopan pada sifat listrik

Salah satu sifat yang berubah karena adanya Transformasi struktur ZrO₂ adalah sifat listrik. ZrO₂ pada temperatur ruang merupakan material isolator (material yang tidak dapat menghantarkan arus listrik) namun setelah adanya penambahan dari material lain kedalam strukturnya, material ini dapat menghantarkan listrik melalui peristiwa konduksi ionik [48].

Konduktivitas ionik ZrO₂ merupakan kemampuan material ZrO₂ dalam menghantarkan arus listrik melalui pergerakan ionik didalam strukturnya.

$$\sigma_i = en\mu \quad \dots(7)$$

Keterangan :

- σ : Konduktivitas ionik ($\Omega^{-1}m^{-1}$)
- μ : Mobilitas vakansi oksigen (m^2V/s)
- n : Jumlah vakansi ion oksigen yang bergerak (m^3)
- e : Muatan elektron (C)

Berdasarkan persamaan 4 dapat dilihat bahwa faktor-faktor yang mempengaruhi nilai konduktivitas ionik suatu material terdiri dari mobilitas vakansi oksigen, jumlah vakansi ion oksigen yang bergerak dan besarnya muatan elektron[42][49].Pemberian doping (penambahan material) ZrO₂ akan mengakibatkan terbentuknya vakansi oksigen didalam strukturnya. Vakansi oksigen tersebut ditentukan oleh material pendopingnya. Sebagai contoh, doping Y₂O₃ akan menghasilkan vakansi oksigen sebanyak 2

vakansi maka nilai konduktivitasnya menjadi dua kali konduktiv jika dibandingkan dengan ZrO₂ tanpa doping.

Kemudahan elektron atau ion untuk berpindah dari satu posisi ke posisi yang lain dapat dilihat dari energi aktivasi yang dimiliki oleh suatu bahan. Persamaan yang digunakan untuk menyatakan hubungan antara energi aktivasi dengan konduktivitas ionik disebut sebagai persamaan Arrhenius seperti pada persamaan 5 [42].

$$\sigma = \sigma_o \exp (-Q/kT) \quad \dots(8)$$

Keterangan :

- σ : Konduktivitas ionik ($\Omega^{-1}m^{-1}$)
- σ_o : Konduktivitas awal ionik ($\Omega^{-1}m^{-1}$)
- Q : Energi Aktivasi (Joule)
- k : Konstanta Boltzman (Joule Kelvin⁻¹)
- T : Temperatur Absolute (Kelvin)

Beberapa penelitian mengenai sifat listrik ZrO₂ telah dilakukan secara intensif, diantaranya adalah penelitian mengenai konduktivitas ionik pada ZrO₂ monoklinik (m-ZrO₂) yang disinter pada suhu 1200 °C. Kemudian dilakukan pengujian konduktivitas listrik pada suhu 900 °C. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, nilai konduktivitas listrik total yang dimiliki oleh m-ZrO₂ adalah sebesar 4.4 x 10⁻⁴ S/cm dengan energi aktivasi yang dimilikinya adalah sebesar 1.62 eV dan dengan nilai densitas yang dimiliki pada saat pengujian adalah sebesar 89% [50].

Kajian tentang penambahan dopan telah dilakukan secara intensif dengan menggunakan variasi dopan diantaranya adalah 93% ZrO₂ -7% Y₂O₃ (7YSZ), 93% ZrO₂ -7% Y₂O₃ (8YSZ) dan 88%ZrO₂-12% CaO (CSZ). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa 8YSZ memiliki konduktivitas lebih tinggi jika dibandingkan dengan 7YSZ. Hal ini berkaitan dengan jumlah konsentrasi vakansi oksigen yang dimiliki oleh 8YSZ lebih tinggi jika dibandingkan dengan 7YSZ. Selain dari itu, faktor lain yang dapat dilihat adalah nilai energi aktivasi untuk 8YSZ adalah 1.03 eV lebih rendah jika dibandingkan dengan 7YSZ yang memiliki energi aktivasi sebesar 0.96 eV . Sedangkan 12 CSZ memiliki nilai konduktivitas yang paling rendah bila dibandingkan dengan 7YSZ dan 8YSZ, hal ini disebabkan karena vakansi oksigen yang dimiliki oleh 12 CSZ lebih rendah bila dibandingkan dengan 7YSZ/8YSZ. Sedangkan untuk nilai energi aktivasi yang dimiliki oleh 12 CSZ adalah sekitar 0.76 eV lebih rendah dibandingkan dengan 7YSZ/8YSZ. Rendahnya nilai energi aktivasi ini berhubungan dengan

jumlah vakansi yang dimiliki oleh 12 CSZ dibandingkan dengan 7YSZ/8YSZ [18].

Penelitian lain telah dilakukan dengan menggunakan variasi komposisi YSZ yang digunakan yaitu 4.5YSZ, 8YSZ dan 10 YSZ. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh nilai energi aktivasi 4.5YSZ sebesar 0.846 eV, 8 YSZ sebesar 0.741 eV dan 10 YSZ sebesar 0.999 eV [51].

Penambahan dopan yang lain adalah TiO₂ dan CeO. Kajian tentang penambahan TiO₂ dengan ZrO₂ telah dilakukan oleh Bensaha, R., 2012 dengan menggunakan persentase TiO₂ sebesar 5%. Energi aktivasi *grain* dengan adanya pemberian dopan yang diberikan adalah sebesar 0.096 eV untuk fase anatase dan 0.012 eV untuk fase brookite [52]. Sedangkan penggunaan dopan dengan menggunakan CeO₂ telah dilakukan oleh Lee (2012). Hasil yang diperoleh dengan menggunakan penambahan dopan CeO₂ nilai energi aktivasi yang dihasilkan adalah berkisar antara nilai 0.96 eV – 0.97 eV [53].

Simpulan

Penambahan dopan yang diberikan pada ZrO₂, struktur ZrO₂ monoklinik dapat menjadi ZrO₂ kubik dan tetragonal pada temperatur ruang sedangkan untuk konduktivitas ionik dari adanya penambahan dopan terjadi perubahan nilai konduktivitas. Perubahan nilai konduktivitas yang terjadi tergantung pada jenis dan konsentrasi dopan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada jurusan Jurusan Teknik Elektro Politeknik Ngeri Batam yang telah memberikan dukungan atas terbentuknya jurnal ASEECT ini.

Daftar Pustaka

- [1]. D. Eliche-Quesada, L. Pérez-Villarejo, and P. Sánchez-Soto, "Introduction to Ceramic Materials: Synthesis, Characterization, Applications, and Recycling," 2019.
- [2]. A. Cheikh, A. Madani, A. Touati, H. Boussetta, and C. Monty, "Ionic Conductivity of Zirconia Based Ceramics from Single Crystals to Nanostructured Polycrystals," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 21, pp. 1837–1841, Dec. 2001.
- [3]. S. Kulkov, S. Buyakova, and L. Gömze, "Structure and mechanical properties of ZrO₂-based systems," *Epitoanyag - J. Silic. Based Compos. Mater.*, vol. 66, pp. 2–6, Jan. 2014.
- [4]. W. Shao, "Research and Application of Engineering Ceramic Material Processing Technology," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 394, p. 032030, Aug. 2018.
- [5]. V. Viswanathan, G. Dwivedi, and S. Sampath, "Multilayer, Multimaterial Thermal Barrier Coating Systems: Design, Synthesis, and Performance Assessment," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 98, no. 6, pp. 1769–1777, 2015.
- [6]. X. Luo, B. Guo, X. Wang, and Z. Zhang, "Development Trend of Low Thermal Conductivity Ceramic Materials," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 735, p. 012019, Jan. 2020.
- [7]. A. E. Pramono, M. Z. Nura, J. W. M. Soedarsono, and N. Indayaningsih, "Effect of sintering temperature on the relationship of electrical conductivity and porosity characteristics of carbon ceramic composites," *J. Ceram. Process. Res.*, vol. 20, no. 4, pp. 333–346, Aug. 2019.
- [8]. W. Wong-Ng, R. S. Roth, T. A. Vanderah, and H. F. McMurdie, "Phase Equilibria and Crystallography of Ceramic Oxides," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 106, no. 6, pp. 1097–1134, 2001.
- [9]. G. Burns and A. M. Glazer, Eds., "Appendix 2 - Crystal Families, Systems, and Bravais Lattices," in *Space Groups for Solid State Scientists (Third Edition)*, Oxford: Academic Press, 2013, pp. 319–320.
- [10]. G. Burns and A. M. Glazer, "Chapter 3 - Bravais Lattices," in *Space Groups for Solid State Scientists (Third Edition)*, G. Burns and A. M. Glazer, Eds. Oxford: Academic Press, 2013, pp. 45–64.
- [11]. X. Shen *et al.*, "Interlaced crystals having a perfect Bravais lattice and complex chemical order revealed by real-space crystallography," *Nat. Commun.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–6, Nov. 2014.
- [12]. L. Cai and J. C. Nino, "Complex ceramic structures. I. Weberites," *Acta Crystallogr. B*, vol. 65, no. 3, pp. 269–290, Jun. 2009.
- [13]. P. F. Manicone, P. Rossi Iommetti, and L. Raffaelli, "An overview of zirconia ceramics: basic properties and clinical applications," *J. Dent.*, vol. 35, no. 11, pp. 819–826, Nov. 2007.

- [14]. S. Thomas, P. Balakrishnan, and M. S. Sreekala, *Fundamental Biomaterials: Ceramics*. Woodhead Publishing, 2018.
- [15]. S. Saridag, O. Tak, and G. Alniacik, "Basic properties and types of zirconia: An overview," *World J. Stomatol.*, vol. 2, no. 3, pp. 40–47, Aug. 2013.
- [16]. S.-J. Hao, C. Wang, T.-L. Liu, Z.-M. Mao, Z.-Q. Mao, and J.-L. Wang, "Fabrication of nanoscale yttria stabilized zirconia for solid oxide fuel cell," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 42, no. 50, pp. 29949–29959, Dec. 2017.
- [17]. S. Ji *et al.*, "Fabrication of low-temperature solid oxide fuel cells with a nanothin protective layer by atomic layer deposition," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 8, no. 1, p. 48, Jan. 2013.
- [18]. B. Budiana, F. Fitriana, N. Ayu, and S. Suasmoro, "Preparation and conductivity measurement of 7-8 mol % YSZ and 12 mol % CSZ for electrolyte SOFC," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 739, p. 012022, Aug. 2016.
- [19]. I. Denry and J. R. Kelly, "State of the art of zirconia for dental applications," *Dent. Mater.*, vol. 24, no. 3, pp. 299–307, Mar. 2008.
- [20]. J. Grech and E. Antunes, "Zirconia in dental prosthetics: A literature review," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 4956–4964, Sep. 2019.
- [21]. S. A. Fowziya *et al.*, "Dielectric Studies of ZrO₂ Semiconducting Oxide Materials and its Characterization," *Nano Trends- J. Nano Technol. Its Appl.*, vol. 20, no. 2, pp. 26–35, Aug. 2018.
- [22]. M. Y. Al-Daraghme, M. T. Hayajneh, M. A. Almomani, M. Y. Al-Daraghme, M. T. Hayajneh, and M. A. Almomani, "Corrosion Resistance of TiO₂-ZrO₂ Nanocomposite Thin Films Spin Coated on AISI 304 Stainless Steel in 3.5 wt. % NaCl Solution," *Mater. Res.*, vol. 22, no. 5, 2019.
- [23]. W. Zhang, G. Ji, A. Bu, and B. Zhang, "Corrosion and Tribological Behavior of ZrO₂ Films Prepared on Stainless Steel Surface by the Sol-Gel Method," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 51, pp. 28264–28272, Dec. 2015.
- [24]. B. Budiana and S. Suasmoro, "Pelapisan Yttria Stabilized Zirconia Dan Calcia Stabilized Zirconia Pada Baja S45c Dengan Teknik Flame Spray Coating," *J. Sains Materi Indones.*, vol. 15, no. 1, pp. 18–23, Oct. 2013.
- [25]. D. S. Fuji Octa Indah Suciati, "Sintesis Dan Karakterisasi Zirkonium Dioksida Untuk Digunakan Sebagai Matrik Kolom Generator Radioisotop ¹¹³Sn -^{113m}In," *GANENDRA Maj. IPTEK Nukl.*, vol. 20, no. 1, p. 41, Apr. 2017.
- [26]. C. PHILLIPPI and K. MAZDIYASNI, "Infrared and Raman Spectra of ZrO₂ Polymorphs," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 54, pp. 254–258, Jun. 2006.
- [27]. Neetu, D. Singh, N. Kumar, and J. Gangwar, "Comparative study of crystallographic representation on the three ZrO₂ polymorphs: structural models, lattice planes, model electron and nuclear densities," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 11, p. 1150f8, Nov. 2019.
- [28]. F. Qunbo, W. Fuchi, Z. Huiling, and Z. Feng, "Study of ZrO₂ phase structure and electronic properties," *Mol. Simul.*, vol. 34, no. 10–15, pp. 1099–1103, Sep. 2008.
- [29]. "Crystallography Open Database." [Online]. Available: <http://www.crystallography.net/cod/>. [Accessed: 13-Mar-2020].
- [30]. M. Quirós, S. Gražulis, S. Girdzijauskaitė, A. Merkys, and A. Vaitkus, "Using SMILES strings for the description of chemical connectivity in the Crystallography Open Database," *J. Cheminformatics*, vol. 10, no. 1, p. 23, May 2018.
- [31]. Merkys, A., Vaitkus, A., Butkus, J., Okulič-Kazarinas, M., Kairys, V. & Gražulis, S. (2016) 'COD::CIF::Parser: an error-correcting CIF parser for the Perl language'. *Journal of Applied Crystallography*.
- [32]. S. Gražulis, A. Merkys, A. Vaitkus, and M. Okulič-Kazarinas, "Computing stoichiometric molecular composition from crystal structures," *J. Appl. Crystallogr.*, vol. 48, no. Pt 1, pp. 85–91, Jan. 2015.
- [33]. S. Gražulis *et al.*, "Crystallography Open Database – an open-access collection of crystal structures," *J. Appl. Crystallogr.*, vol. 42, no. Pt 4, pp. 726–729, Aug. 2009.
- [34]. R. T. Downs and M. Hall-Wallace, "The American Mineralogist crystal structure database," *Am. Mineral.*, vol. 88, no. 1, pp. 247–250, Jan. 2003.
- [35]. S. Gražulis *et al.*, "Crystallography Open Database (COD): an open-access collection of crystal structures and platform for world-wide collaboration," *Nucleic Acids Res.*, vol. 40, no. Database issue, pp. D420–D427, Jan. 2012.
- [36]. A. Le Bail, "Inorganic structure prediction with GRINSP," *J. Appl. Crystallogr.*, vol. 38, no. 2, pp. 389–395, Apr. 2005.
- [37]. K. Momma and F. Izumi, "VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal,

- volumetric and morphology data," *J. Appl. Crystallogr.*, vol. 44, no. 6, pp. 1272–1276, Dec. 2011.
- [38]. R. Terki, G. Bertrand, H. Aourag, and C. Coddet, "Structural and electronic properties of zirconia phases: A FP-LAPW investigations," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 9, pp. 1006–1013, Dec. 2006.
- [39]. D. Vollath, F. Fischer, M. Hagelstein, and D. V. Szabó, "Phases and Phase Transformations in Nanocrystalline ZrO₂," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 8, pp. 1003–1016, Dec. 2006.
- [40]. M. H. Bocanegra-Bernal and S. D. de la Torre, "Phase transitions in zirconium dioxide and related materials for high performance engineering ceramics," *J. Mater. Sci.*, vol. 37, no. 23, pp. 4947–4971, Dec. 2002.
- [41]. P. Pramanik *et al.*, "Cubic phase stability, optical and magnetic properties of Cu-stabilized zirconia nanocrystals," *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 22, p. 225304, May 2018.
- [42]. C. B. Carter and M. G. Norton, *Ceramic Materials: Science and Engineering*, 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2013.
- [43]. Y. L. Bruni, L. B. Garrido, and E. F. Aglietti, "Properties of CaO-ZrO₂ Based Composites," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 8, pp. 203–210, Jan. 2015.
- [44]. S. M. Shugurov, O. Y. Kurapova, S. I. Lopatin, V. G. Konakov, and E. A. Vasil'eva, "Thermodynamic properties of the La₂O₃-ZrO₂ system by Knudsen effusion mass spectrometry at high temperature," *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, vol. 31, no. 23, pp. 2021–2029, 2017.
- [45]. G. Baldinozzi, J. F. Bérrar, and G. Calvarin-Amiri, "Rietveld Refinement of Two-Phase Zr-Doped Y₂O₃," *Materials Science Forum*, 1998. [Online]. Available: /MSF.278-281.680. [Accessed: 13-Mar-2020].
- [46]. D. Tian *et al.*, "Performance of cubic ZrO₂ doped CeO₂: First-principles investigation on elastic, electronic and optical properties of Ce_{1-x}Zr_xO₂," *J. Alloys Compd.*, vol. 671, pp. 208–219, Jun. 2016.
- [47]. J. G. Mahy *et al.*, "Ambient temperature ZrO₂-doped TiO₂ crystalline photocatalysts: Highly efficient powders and films for water depollution," *Mater. Today Energy*, vol. 13, pp. 312–322, Sep. 2019.
- [48]. V. G. Zavodinsky, "The mechanism of ionic conductivity in stabilized cubic zirconia," *Phys. Solid State*, vol. 46, no. 3, pp. 453–457, Mar. 2004.
- [49]. W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction*. 2014.
- [50]. O. H. Kwon *et al.*, "Investigation of the electrical conductivity of sintered monoclinic zirconia (ZrO₂)," *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 11, pp. 8236–8245, Aug. 2017.
- [51]. F. Rahmawati, I. Permadani, D. Syarif, and S. Soepriyanto, "Electrical Properties of Various Composition of Yttrium Doped-Zirconia Prepared from Local Zircon Sand," *Int. J. Technol.*, vol. 8, p. 939, Oct. 2017.
- [52]. R. Bensaha and H. Bensouyad, "Synthesis, Characterization and Properties of Zirconium Oxide (ZrO₂)-Doped Titanium Oxide (TiO₂) Thin Films Obtained via Sol-Gel Process," *Heat Treat. - Conv. Nov. Appl.*, Sep. 2012.
- [53]. J. H. Lee, S. Yoon, B. Kim, H. Lee, and H. Song, "Electrical conductivity and defect structure of CeO₂-ZrO₂ mixed oxide," *J. Mater. Sci.*, vol. 37, pp. 1165–1171, Mar. 2002.