

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. *Solid Oxide Fuel Cells*

*Fuel Cells* atau sel bahan bakar adalah sel elektrokimia yang mengubah energi kimia dari bahan bakar langsung menjadi energi listrik.

Beberapa karakteristik umum dari *fuel cell* yang sangat menonjol adalah:

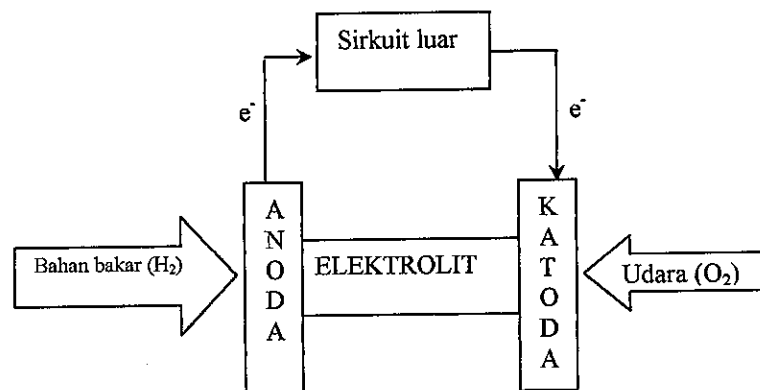
1. Gas buang sangat rendah dan ramah lingkungan
2. Lokasi penempatannya tidak khusus
3. Efisiensi sangat tinggi
4. Fleksibilitas jenis bahan bakar yang digunakan [Yundra, 2000]

Sel bahan bakar mempunyai komponen dasar elektrolit, elektroda, dan penghubung. Salah satu jenis elektrolit yang digunakan pada sel bahan bakar adalah yang biasa disebut sebagai elektrolit padat atau *solid electrolyte*.

Beberapa persyaratan yang harus dimiliki oleh suatu elektrolit padat adalah:

1. Padat dan tidak berpori
2. Kuat pada suhu tinggi
3. Tidak mudah terkorosi oleh bahan bakar
4. Tidak mudah teroksidasi
5. Dapat dibuat menjadi lapisan tipis
6. Memiliki sifat hantaran ion yang baik [Minh, 1993; Nunn, 1999; Yundra, 2000].

Suatu sel bahan bakar memiliki dua elektroda yang melingkupi suatu elektrolit. Oksigen dialirkan melalui suatu katoda sedangkan hidrogen pada sisi anoda, menghasilkan listrik, air, dan panas [Minh, 1993].



Gambar. 2.1. Sistem kerja sel bahan bakar [Minh, 2000].

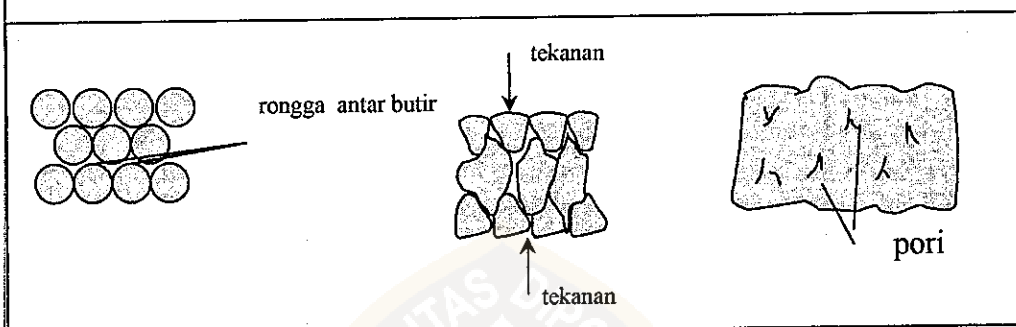
## 2.2. Kalsinasi

Kalsinasi merupakan pemanasan suatu bahan anorganik dengan tujuan untuk menghilangkan senyawa-senyawa yang bersifat volatil. Proses kalsinasi adalah reaksi dekomposisi secara endotermik senyawa garam oksida seperti karbonat atau hidroksida sehingga menghasilkan produk padatan yang berupa oksida [Minh, 2000; Randal, 1988; Yundra, 2000].

Hasil dari kalsinasi merupakan kumpulan dari kristal-kristal sederhana. Butiran oksida dengan kemurnian tinggi dapat diperoleh dari kalsinasi senyawa hidroksida, karbonat, atau senyawa-senyawa anorganik lain [Minh, 1993].

### 2.3. Kompaksi

Kompaksi merupakan proses pembentukan serbuk dengan cara menekan serbuk material menjadi benda uji atau benda jadi. Penekanan merupakan suatu proses pemasukan serbuk keramik kedalam suatu wadah berongga dengan bentuk tertentu dan ditekan sehingga serbuk akan mengalami konsolidasi dan memiliki bentuk yang sesuai dengan cetaknya [Yundra, 2000]



Gambar. 2.2. Tahapan kompaksi pada serbuk material [Yundra, 2000].

### 2.4. Sintering

Sintering merupakan proses pemanasan bahan padat hingga mencapai temperatur 80 – 90 % di bawah titik leleh bahan padat tersebut [Yundra, 2000]

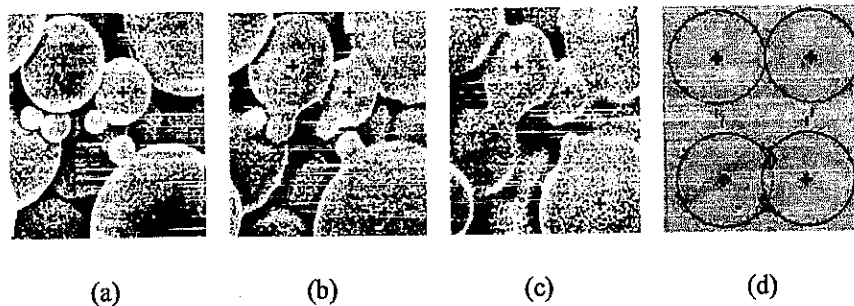
Tahap-tahap sintering terdiri dari:

1. Tahap awal
2. Tahap intermediet
3. Tahap akhir

Pada tahap awal, partikel yang ada akan membentuk ikatan pada bidang kontak [Randal, 1988]. Dengan perpanjangan waktu sintering, struktur pori akan menjadi lebih halus, yang mendorong menuju proses intermediet. Tahap ini sangat berpengaruh pada morfologi dari pori pada batas butiran. Pertumbuhan butiran

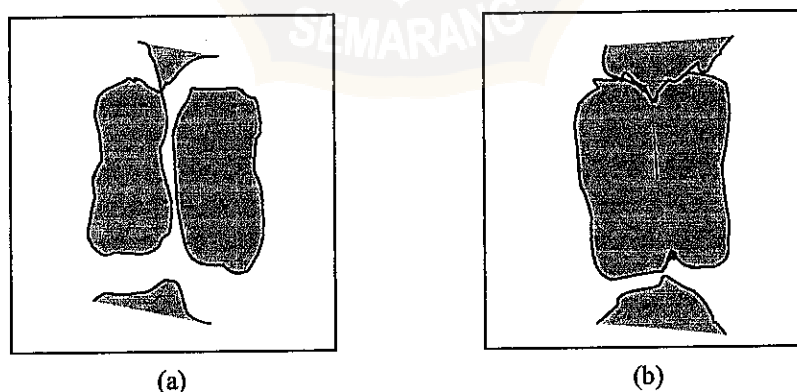
terjadi pada proses selanjutnya dimana pori yang ada menjadi bulat dan terisolasi [Randal, 1988; Van, 1992].

Mekanisme sintering dapat dijelaskan pada Gambar 2.3.



Gambar. 2.3. Peristiwa sintering bahan logam [Van, 1992]  
Titik singgung (a) menjadi bidang singgung (b) dan (c) sewaktu pemanasan, (d) atom-atom berdifusi dari titik singgung sehingga memperluas daerah kontak. Partikel serbuk saling mendekati, dan luas permukaan partikel berkurang.

Sintering memerlukan pemanasan agar partikel halus yang beraglomerasi menjadi bahan padat. Kebanyakan benda logam serbuk dan berbagai keramik dibuat dengan cara sintering padat. Bahan keramik ini tidak dapat dicor dalam keadaan cair karena belum ditemukan cetakan yang sesuai. Prinsip-prinsip sintering dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar.2.4. Sintering padat.  
Pada (a) sebelum sintering partikel mempunyai permukaan sendiri-sendiri. (b) Setelah sintering butiran hanya mempunyai satu permukaan saja [Van, 1992].

Dengan semakin meningkatnya temperatur sintering, maka semakin tinggi pula kecepatan serta perubahan-perubahan dalam proses sintering [Randal, 1988; Van, 1992; Yundra, 2000]

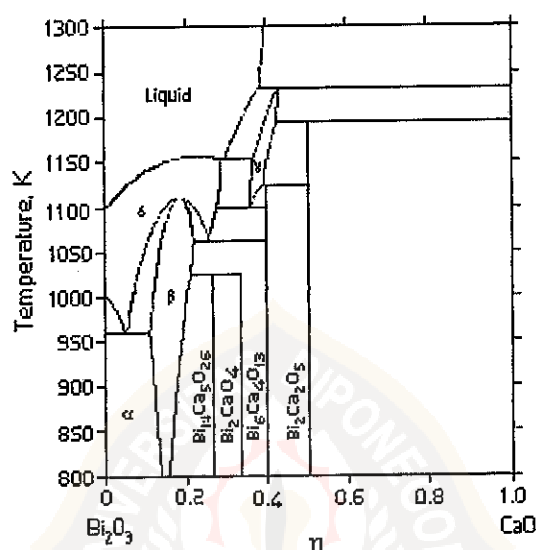
## 2.5. Sifat-sifat bismut oksida

Bismut oksida merupakan bahan padat berbentuk serbuk berwarna kuning, bahan ini dapat larut dalam asam, namun tidak larut dalam air. Mempunyai titik leleh pada suhu 825 °C. Bismut oksida murni mempunyai dua bentuk kristal yang stabil yaitu  $\alpha$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang berstruktur monoklin dan stabil pada suhu di bawah 730 °C serta memiliki konduktivitas yang rendah dan  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang stabil pada suhu di atas 730 °C sampai mendekati titik lelehnya yaitu 825 °C dan mengkristal dalam struktur kubik fluorit. Bentuk tersebut mengandung kisi anion kosong sebanyak 25 % sehingga mempunyai konduktivitas ion oksigen yang sangat tinggi ( $\sim 1 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  di dekat titik lelehnya) [Azad, 1994; Nunn, 1999].

Sejumlah penelitian telah membuktikan bahwa tingginya konduktivitas Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada fasa  $\delta$  ini dapat distabilkan pada suhu rendah dengan cara menambahkan dopan berupa kation di-, tri-, tetra-, penta-, atau heksavalen. Namun penambahan dopan tersebut juga berakibat turunnya konduktivitas dari bahan tersebut [Yundra, 1998].

## 2.6. Sistem $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CaO}$

Berdasarkan data difraksi sinar-X diketahui bahwa setelah penambahan dopan, struktur  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  berubah dari monoklin menjadi tiga macam bentuk kristal yaitu kubik pusat muka, kubik pusat badan serta rhombohedral. Diagram fasa untuk sistem Bi-Ca-O ini telah ditemukan oleh Coflant, Burton, dan Vstavskaya [Hallsdet, 1997].



Gambar. 2.5. Diagram fasa sistem  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CaO}$  [Hallsdett, 1997].

Transformasi yang dapat terjadi adalah dari fasa  $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$  berubah menjadi fasa  $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ , dan  $\gamma\text{-Bi}_2\text{O}_3$ , sedangkan fasa stoikiometri yang terbentuk adalah  $\text{Bi}_{14}\text{Ca}_5\text{O}_{26}$ ,  $\text{Bi}_2\text{CaO}_4$ ,  $\text{Bi}_6\text{Ca}_4\text{O}_{13}$ ,  $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{O}_5$ .

## 2.7. Konduktivitas Bahan

Konduktivitas dapat diartikan sebagai kemampuan mobilisasi ion-ion dalam ruang kosong pada struktur kristal suatu bahan [Kittel, 1986; Yundra, 1998].

Beberapa padatan mempunyai konduktivitas ionik pada suhu tertentu. Konduktivitas bahan merupakan hal yang sangat penting dalam sel bahan bakar, semakin tinggi konduktivitas suatu bahan, maka semakin mudah ion-ion oksigen untuk bergerak melalui ruang kosong dalam struktur kristal material oksida [Kittel, 1986; Yundra, 1998].

Konduktivitas suatu padatan biasanya dinyatakan dalam konduktivitas spesifik yang dinyatakan dalam satuan  $\text{ohm}^{-1} \text{cm}^{-1}$  atau  $\text{S cm}^{-1}$  [Kittel, 1986].

Tabel 2.1. Nilai konduktivitas ionik untuk beberapa jenis elektrolit padat.

<i>Material</i>	<i>Temperatur Operasi (°C)</i>	<i>Konduktivitas Ionik (<math>\sigma</math>) <math>\times 10^2 \text{ S/cm}</math></i>
ZrO <sub>2</sub> – Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	600-1400	2,0-100
Zr <sub>2</sub> – Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	600-1400	0,3-50
Zr <sub>2</sub> – CaO	640-1400	0,2-50
ThO <sub>2</sub> – Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1000-1500	1,3-12
BiO <sub>3</sub> – Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	270-730	0,001-45

Konduktivitas ionik merupakan fungsi suhu yang dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right)$$

dimana  $\sigma$  = konduktivitas

T = suhu mutlak

k = konstanta Boltzmann

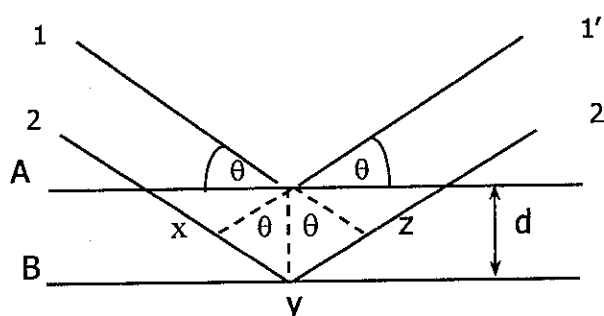
E<sub>a</sub> = energi aktivasi [Kittel, 1986; Minh, 1993].

## 2.8. Difraksi Sinar-X

Analisa dengan metoda difraksi sinar-X dapat digunakan untuk mengetahui struktur kristal suatu senyawa inorganik. Analisa ini didasarkan pada difraksi sinar-X yang mengenai permukaan suatu kisi kristal dimana sudut difraksi dari sinar-X tersebut berbeda-beda tergantung jenis dan struktur kristal suatu senyawa. [Kittel, 1986].

Sinar-X adalah radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang  $\sim 1 \text{ \AA}$  ( $10^{-10} \text{ m}$ ), sinar-X dihasilkan jika sebuah elektron pada kulit K dalam atom ditembak oleh sebuah energi sehingga keluar dari orbitalnya. Dengan keluarnya elektron ini maka terjadi kekosongan dalam kulit K. Selanjutnya kekosongan tersebut akan diisi oleh elektron yang terdapat dalam kulit di atasnya. Perpindahan elektron dari tingkat energi yang lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah ini diiringi dengan peristiwa pelepasan energi yang berupa sinar-X [Randal, 1988].

Jika sinar X diarahkan ke sebuah permukaan kristal, maka sebagian akan dipantulkan dengan sudut pantul sama dengan sudut datangnya, sedangkan sebagian lagi diteruskan kemudian dipantulkan oleh lapisan di bawah lapisan permukaan kristal yang pertama [Randal, 1988; Whitson, 1987].



Gambar 2.6. Skema sinar X dalam kristal.



Dua berkas sinar-X, 1 dan 2, diarahkan secara sejajar terhadap dua buah permukaan A dan B dalam kristal. Sinar 1 dipantulkan menjadi 1' dan sinar 2 diteruskan kemudian dipantulkan oleh lapisan B menjadi 2'. Dibandingkan dengan sinar 11', sinar 22' harus melewati jarak yang lebih panjang sejauh  $xyz$ . Agar sinar 1' dan 2' berada dalam satu fasa, maka jarak  $xyz$  harus sebanding dengan jumlah keseluruhan dari panjang gelombang sinar yang diarahkan,  $n\lambda$ . Jarak antar lapisan A dan B yang sejajar adalah  $d$ , sedangkan sudut datang sinar sama dengan sudut pantulnya adalah  $\theta$ . Hubungan antara sudut tersebut dengan jarak  $xy$  dinyatakan dalam persamaan:

$$xy = yz = d \sin \theta$$

$$\Rightarrow xyz = 2d \sin \theta$$

$$\Rightarrow xyz = n\lambda$$

$$\Rightarrow 2d \sin \theta = n\lambda$$

Persamaan yang terakhir dikenal dengan Hukum Bragg [Kittel, 1986].