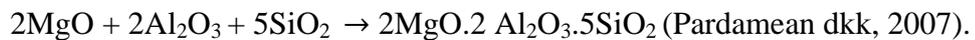


II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Cordierite

1. Karakteristik Cordierite

Secara umum, cordierite alam mempunyai bentuk kimia $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$. Cordierite dapat dibentuk dari tiga macam oksida MgO, Al_2O_3 , dan SiO_2 melalui reaksi padatan pada suhu sekitar 1100°C - 1200°C (Charles, 2001). Reaksi pembentukan senyawa cordierite adalah sebagai berikut:



Cordierite memiliki keunggulan yang bersumber dari oksida-oksida penyusunnya. Silika memiliki koefisien muai yang rendah, magnesium oksida meningkatkan kekerasan sedangkan alumina meningkatkan ketahanan terhadap kekuatan mekanik.

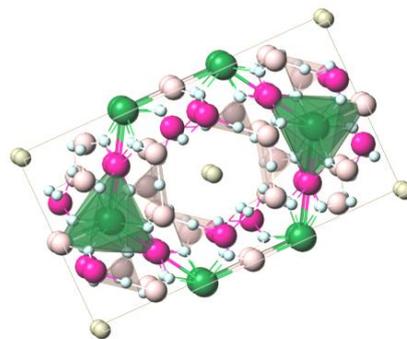
Cordierite merupakan salah satu material keramik yang berbasis silika, beberapa sifat spesifik yang dimiliki cordierite antara lain mempunyai koefisien ekspansi termal dan konduktivitas yang rendah, memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi, resistivitas tinggi (Naskar and Chartterjee, 2004) dan tetapan dielektrik rendah (Gunay, 2004). Karakteristik cordierite ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Cordierite (Charles, 2001; Quakertown, 2007; dan Zhang dkk, 2012).

Karakteristik	Nilai
Warna	Tak berwarna, putih, biru muda, violet, kuning
Densitas	2,3-2,5 (g/cm ³)
Kekerasan	7-7,5 (Mohs)
Kekuatan renggang	3,5-5,5 (kpsi)
Modulus elastisitas	12 x 10 ⁶ (psi)
<i>Dielectric strength</i>	212 (AC Volt/mil)
<i>Dielectric constant</i>	9,3 (pada 1 MHz)
Volume Resistivitas	>10 ¹⁴ (Ohm-cm ² /cm)
Koefisien ekspansi termal	1,4 (x 10 ⁻⁶ /°K)
Konduktivitas termal	18 (W/m ^o K)
Hambatan jenis, (suhu ruang)	10 ¹² Ohm cm

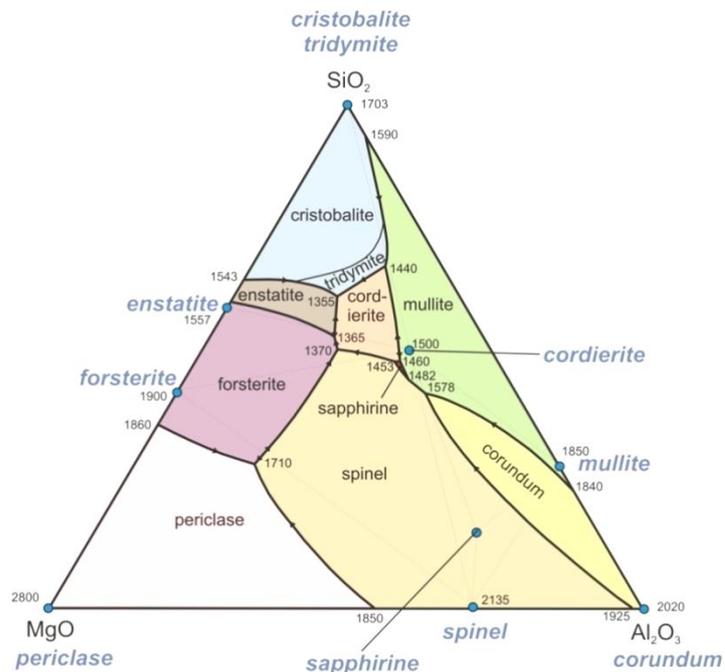
2. Struktur Cordierite

Struktur kristal merupakan susunan khas atom-atom dalam suatu kristal. Pada umumnya, semua logam dan bahan keramik memiliki bentuk struktur kristal seperti Al₂O₃, MgO, CaO, Fe (Surdia, 2000). Struktur kristal cordierite adalah ortorombik dengan parameter $a \neq b \neq c$ dan $\alpha = \beta = \gamma = 90$ (Smith, 1996) dan terbentuk dari unsur silikon (Si), oksigen (O), aluminium (Al) dan magnesium (Mg). Bentuk kristal cordierite ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kristal Cordierite (Magee, 2010).

Cordierite terjadi dalam tiga bentuk polimorfik: (i) bentuk tidak teratur yang stabil pada suhu tinggi dikenal sebagai *indialite* (α -atau cordierite heksagonal), stabil di bawah 1450°C, (ii) β -cordierite disebut sebagai cordierite ortorombik, stabil antara 1450°C dan titik leleh 1460°C, dan (iii) μ -cordierite disebut sebagai fase cordierite metastabil, yang dapat dibuat hanya dalam kondisi khusus, suhu rendah memberikan instruksi bentuk ortorombik (Goren dkk, 2006). Cordierite merupakan salah satu fasa dalam diagram fasa sistem silika-alumina-magnesium oksida yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram fasa sistem silika-alumina-magnesium oksida (Sciencedirect, 2012).

3. Aplikasi Corderiete

Cordierite telah banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi karena karakteristik yang dimilikinya. Keramik cordierite memiliki keunggulan dalam sifat termalnya sehingga material cordierite banyak digunakan sebagai material tahan suhu tinggi

(refraktori) untuk kelengkapan tungku pembakaran (Sijabat, 2007), sebagai filter gas buang (Sebayang dkk, 2007), dan sebagai penyangga katalis untuk filter gas beracun. Selain itu cordierite juga memiliki sifat isolator listrik yang baik sehingga dapat digunakan sebagai bahan penyangga *heating element* dan substrat elektronika. Paduan cordierite dengan bahan lain telah banyak diteliti untuk meningkatkan kualitas cordierite. Cannillo dkk (2003) membuat komposit cordierite-*mullite* dengan teknik tembakan cepat untuk meningkatkan sifat refraktori. Penelitian lain menambah alumina pada cordierite untuk meningkatkan sifat mekanik keramik cordierite (Sijabat, 2007).

B. Alumina

1. Karakteristik Alumina

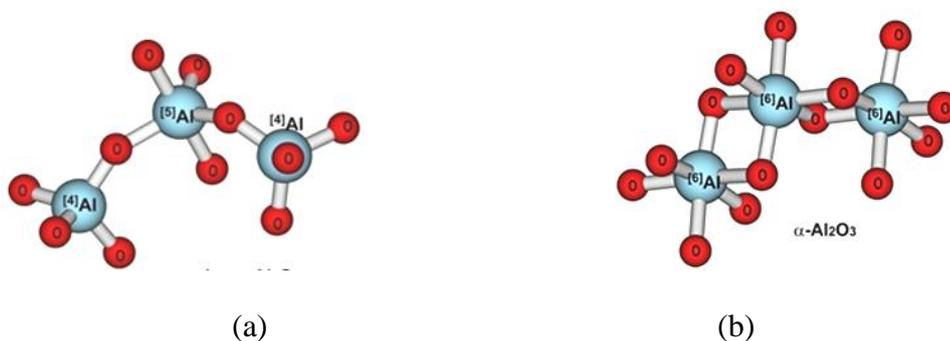
Alumina (Al_2O_3) adalah senyawa kimia yang terdiri dari 2 atom aluminium dan 3 atom oksigen. Alumina pada umumnya memiliki ikatan ion yang kuat yang menentukan karakteristik alumina. Karakteristik alumina diantaranya: memiliki kekuatan mekanik (*flexural strength*), kekakuan, dan kekerasan yang tinggi, ketahanan terhadap serangan kimia dari asam kuat dan alkali hingga suhu yang tinggi. Selain itu, alumina juga memiliki ketahanan pakai yang tinggi, koefisien ekspansi termal yang rendah, sifat isolasi dan konduktivitas termal yang baik, koefisien ekspansi termal yang rendah, struktur pori-pori yang besar, mudah dibentuk dan memiliki kemurnian yang tinggi hingga 99,99%, partikel yang halus dan homogen (Fujiwara dkk, 2007; Kopeliovich, 2010). Karakteristik alumina ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Alumina (Charles, 2001; Gernot, 1998; dan Buchanan, 1986).

Parameter	Nilai
Densitas	2,9-3,1 gr/cm ³
Hardness	1500-1800 kgf/mm ²
Kuat tekan	230-350 MPa
Koefisien ekspansi termal	7-8 (10 ⁻⁶ /°C)
Modulus of repture	350 MPa
Konduktivitas termal (suhu kamar)	24-26 W/mK
Titik lebur	2050 °C
Hambatan jenis, (suhu ruang)	10 ¹² -10 ¹⁴ Ohm cm

2. Struktur Alumina

Alumina mempunyai struktur kristal tumpukan padat heksagonal atau *Heksagonal Closed Packed* (HCP), bentuk struktur yang paling stabil pada suhu tinggi. Kation (Al⁺³) menempati 2/3 bagian dari sisipan oktahedral, sedangkan anion (O⁻²) menempati HCP. Bilangan koordinasi dari struktur korundum (α -Al₂O₃) adalah 6, maka tiap ion Al⁺³ dikelilingi 6 ion O⁻² dan tiap ion O⁻² dikelilingi oleh 4 ion Al⁺³ untuk mencapai muatan yang netral (Worral, 1986). Struktur kristal alumina diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Struktur kristal alumina (a) *amorf* (b) α -Al₂O₃ (NPG Asia Materials, 2009).

Alumina bersifat polimorfi yaitu memiliki beberapa bentuk struktur kristal tetapi dengan formula yang sama Al_2O_3 . Macam dari alumina antara lain: δ - Al_2O_3 , θ - Al_2O_3 dan α - Al_2O_3 (Sijabat, 2007). Bentuk alumina yang paling umum dan stabil adalah korundum atau α - Al_2O_3 (Timmings, 1991). Transformasi fase alumina ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Transformasi fase γ - Al_2O_3 ke fase α - Al_2O_3 (Clifton and Risbud, 2000).

Reaksi	Suhu pembentukan
$\text{Al}(\text{OOH})_3 \rightarrow \text{AlOOH}$	200-300°C
$\text{AlOOH} \rightarrow \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	500-800°C
$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \delta\text{-Al}_2\text{O}_3$	800-900°C
$\delta\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \theta\text{-Al}_2\text{O}_3$	900-1000°C
$\theta\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	1000-1100°C

Transformasi dari fase $\gamma \rightarrow \alpha$ pada suhu di atas 1000°C menghasilkan struktur berukuran mikro dengan derajat hubungan porositas yang tinggi. Perubahan bentuk termasuk *irreversible* dan bentuk α -*polymorph*-nya stabil dengan titik lebur 2050°C (Junita, 2011).

3. Pengaruh Alumina (Al_2O_3) terhadap Cordierite

Salwa dkk (2007) melaporkan hasil penelitiannya tentang pengaruh alumina terhadap sifat keramik gelas cordierite dari batu basal yang disintering pada suhu 1100°C. Penambahan alumina menyebabkan penurunan nilai densitas, kenaikan nilai porositas, dan berkurangnya penyusutan pada cordierite. Tanpa penambahan alumina terjadi kristalisasi cordierite heksagonal tertanam dalam serat *anorthite*, dan penambahan 10% alumina menampilkan beberapa batang alumina selain cordierite dan serat *anorthite* ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Jumlah batang alumina semakin meningkat seiring dengan penambahan presentasi alumina.

Penambahan alumina juga mempengaruhi sifat listrik cordierite, dimana terjadi penurunan konstanta dielektrik seiring dengan penambahan alumina. Konstanta dielektrik pada suhu ruang dari sampel dan perkembangan fase diperlihatkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Konstanta dielektrik dan perkembangan fase sampel (Salwa dkk, 2007).

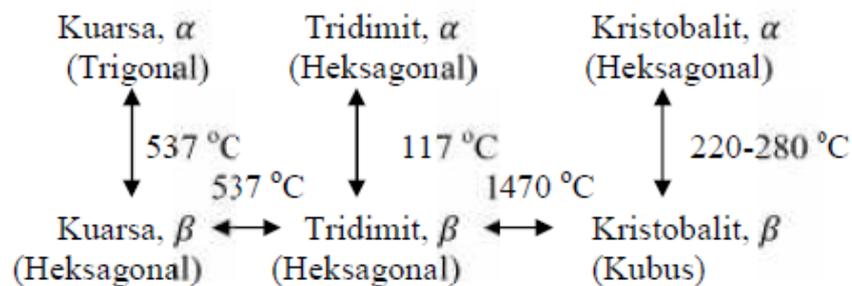
Penambahan Alumina	Konstanta dielektrik (ϵ)	Perkembangan fase
0%	10,3	α -cordierite, <i>anorthite</i> , β - <i>quarte</i> ss dan <i>pesudobrookite</i>
10%	8,9	α -cordierite, <i>anorthite</i> , β - <i>quarte</i> ss dan <i>pesudobrookite</i> + α -Al ₂ O ₃
20%	8,8	α -cordierite, <i>anorthite</i> , β - <i>quarte</i> ss dan <i>pesudobrookite</i> + α -Al ₂ O ₃
30%	8,3	α -cordierite, <i>anorthite</i> , β - <i>quarte</i> ss dan <i>pesudobrookite</i> + α -Al ₂ O ₃

Li dkk (2014) membuat cordierite dengan variasi mol alumina pada suhu 1200°C. Terjadi kenaikan densitas dan penyusutan serta penurunan porositas seiring dengan berkurangnya mol alumina pada cordeirite. Cordierite merupakan fasa dominan dan muncul fasa lain seperti *sapphirine* dan *mullite*. Penelitian lain oleh Goren dkk (2006) membuat cordierite dengan bahan α -alumina pada suhu 1200°C. Hasil XRD menunjukkan adanya fasa α -cordierite, *spinel*, *corundum*, *cristobalite*, dan *protoenstatite*.

C. Silika Sekam Padi

Pemanfaatan silika sekam padi pada berbagai aplikasi dipengaruhi oleh karakteristik yang dimilikinya. Silika sekam padi diketahui berisi selulosa dan lignin serta berwarna putih. Selain itu, silika sekam padi memiliki stabilitas termal yang tinggi hingga mencapai 1414°C dan kerapatan sebesar 2,6 gr/cm³. Perlakuan

suhu tinggi tidak menghilangkan silika silinder karena tidak dipengaruhi oleh proses gasifikasi dan akan terbentuk pori setelah senyawa organiknya mengalami pirolisis. Struktur mikro hasil perlakuan suhu tinggi pada silika sekam padi akan mengakibatkan penampang lintangnya memiliki lubang pori seragam yang berarti silika sekam padi melindungi struktur geometrinya selama proses pemanasan atau pembakaran (Bharadwaj dkk, 2004; Sembiring dan Karo-Karo, 2008). Perlakuan termal menyebabkan perubahan struktur silika yang ditunjukkan oleh skema pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema perubahan struktur silika akibat perlakuan termal (Worrall, 1986).

Keunggulan lain dari silika sekam padi adalah bersifat *amorf* sehingga memiliki reaktivitas yang lebih tinggi dibandingkan silika kristal (Beltran dkk, 2006), menyebabkan mudah bereaksi (*panzolane*) dengan senyawa lain untuk membentuk berbagai produk.

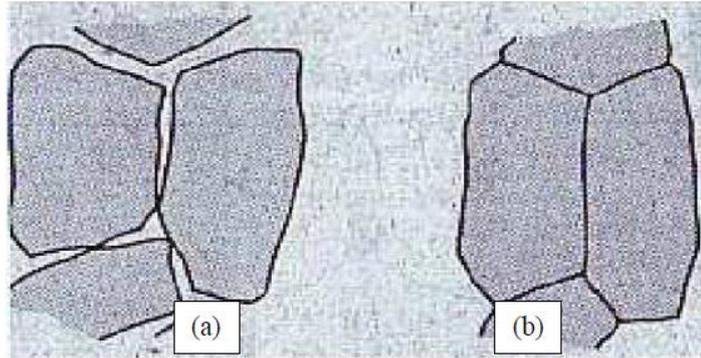
Menurut penelitian Siriluk dan Yuttapong (2005) dan Houston (1972), silika sekam padi memiliki kadar silika terbesar sebagai sumber silika nabati yaitu sebesar 94-96%. Silika dari sekam padi dapat diperoleh dengan mudah dan sederhana yakni dengan metode ekstraksi alkalis (Sembiring dan Karo-Karo, 2007). Metode ekstraksi alkalis merupakan metode pemisahan suatu unsur kimia

melalui reaksi dengan basa kuat yang mengandung unsur alkali seperti KOH dan NaOH. Silika yang diperoleh melalui metode ekstraksi alkalis berupa larutan sol yang merupakan fase *amorf*. Kelarutan silika *amorf* yang besar dalam larutan alkalis dan pengendapan silika terlarut menggunakan asam, seperti asam klorida (HCl), asam sitrat ($C_6H_8O_7$) dan asam oksalat ($H_2C_2O_4$) (Kalaphaty dkk, 2000) menjadi dasar metode ekstraksi. Suka dkk (2008) melakukan penelitian untuk memperoleh silika menggunakan metode ekstraksi alkalis dengan larutan KOH konsentrasi 5%. Dari penelitian tersebut dihasilkan silika dengan ukuran butir yang lebih halus dan seragam serta tingkat kemurniannya lebih tinggi.

D. Sintering

1. Proses Sintering

Sintering merupakan proses perlakuan termal pada temperatur tinggi yang secara global menurunkan energi bebas disertai perubahan dimensional. Menurut Vlack (1992) sintering merupakan proses pengikatan secara termal yang bertujuan untuk merubah bentuk partikel-partikel kecil yang seragam sehingga membentuk ikatan yang kuat dan keras. Tujuan dari proses sintering adalah untuk menghasilkan ikatan antar partikel sehingga koheren dimana struktur padat yang terbentuk didominasi oleh mekanisme perpindahan massa pada skala atomik. Prinsip-prinsip yang melandasi proses sintering ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Prinsip sintering (a) sebelum sintering, (b) setelah sintering (Vlack, 1991).

Terdapat tiga tahapan dalam proses sintering yaitu tahap awal, tahap intermedier, dan tahap akhir. Secara mikrostruktural pada keadaan awal terdapat pemuaihan, belum terjadi proses sintering dan susunan partikel tidak berubah. Selain itu, terjadi penyusunan kembali (*rearrangement*) yaitu sedikit gerakan atau rotasi partikel untuk mempertinggi jumlah kontak antar partikel dan pembentukan kaitan antar butir (*neck*). Pada tahap intermedier ukuran kaitan antar butir tumbuh dan porositasnya menurun dikarenakan partikel-partikel saling mendekat. Pertumbuhan butir (*grain growth*) mulai terjadi pada tahap ini, terbentuk pori yang berbentuk pipa, jarak antar butir semakin dekat dan terjadi penyusutan. Tahap akhir ditandai dengan perubahan pori dari bentuk pipa menjadi bulat, ukuran butir meningkat dan laju penyusutan pori lebih kecil.

2. Sintering pada Cordierite

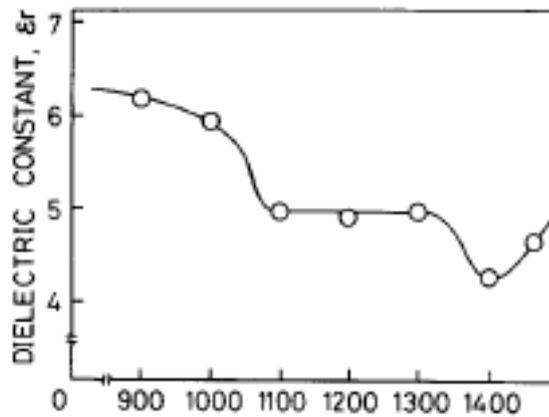
Hans K.S. (1992) telah melakukan sintesis serbuk cordierite ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) dan ternyata suhu pembentukan fasa cordierite tergantung pada jenis bahan baku dan umumnya sekitar $1100\text{-}1250^\circ\text{C}$. Penelitian yang dilakukan oleh Naskar dan Chatterje (2004) menunjukkan bahwa struktur

cordierite yang terbuat dari abu sekam padi akan terbentuk seiring kenaikan suhu sintering 1400°C yang diawali dengan pembentukan fase cristobalit pada suhu 400°C dan 600°C dan fase spinel pada suhu 800°C. Dordevic dan Jovanic (2008) melaporkan jumlah α -cordierite meningkat seiring dengan peningkatan suhu sintering, dan gradien tertinggi antara 1100-1300°C. Tabel 5 berikut ini menunjukkan pengaruh temperatur sintering terhadap pembentukan fase cordierite.

Tabel 5. Fase kristal cordierite sinter padatan (Suzuki dkk, 1992).

Temperatur Sintering (°C)	Fase Cordierite
900	μ -Cordierite
1000	μ -Cordierite > α -cordierite
1100	α -Cordierite > α -cordierite
1200	α -Cordierite
1300	α -Cordierite
1400	β -Cordierite
1450	α -Cordierite

Sintering dapat mempengaruhi sifat fisis dan elektris cordierite. Lama waktu sintering mempengaruhi densitas dan porositas cordierite, sintering dengan waktu tahan 2 sampai 6 jam menyebabkan penurunan nilai densitas dan kenaikan nilai porositas (Ewais dkk, 2009). Penurunan densitas sampel mempengaruhi penurunan konduktivitas yang menyebabkan kenaikan resistansi listrik. Resistivitas keramik menurun dengan kenaikan temperatur karena konduktivitas ionik meningkat secara eksponensial dengan temperatur. Suzuki dkk (1992) melaporkan bahwa semakin tinggi suhu sintering maka konstanta dielektrik cordierite semakin menurun, seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Konstanta dielektrik keramik cordierite pada temperatur sintering yang berbeda (Suzuki dkk, 1992).

E. Karakterisasi

1. Penyusutan

Penyusutan (*shrinkage*) merupakan persen pengurangan massa sampel sebelum disintering (M_0) terhadap sampel yang telah disintering (M). Penyusutan pada sampel terjadi akibat perubahan densitas dari temperatur proses ke temperatur ruang yang ditandai dengan berkurangnya massa, volum, dan dimensi. Penyusutan dipengaruhi oleh faktor pembentukan, lama pembakaran (sintering), ukuran butiran, dan komposisi sampel. Untuk mengukur penyusutan digunakan persamaan berikut:

$$S = \frac{M_0 - M}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

dimana:

S = Penyusutan (%)

M_0 = Massa pelet sebelum disintering (gram)

M = Massa pelet sesudah disintering (gram)

2. Densitas dan Porositas

Densitas merupakan jumlah massa persatuan volum yang menunjukkan nilai kerapatan suatu bahan. Densitas terjadi akibat perpindahan partikel ketika partikel mengalami pertumbuhan butir dan perubahan bentuk butiran. Penyusutan akan terjadi ketika slip cairan antara partikel dan peningkatan tekanan pada titik kontak yang menyebabkan material menjauh dari daerah kontak dan memaksa pusat partikel untuk mendekat satu sama lain (Kingery dkk,1976).

Porositas dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah volume lubang-lubang kosong yang dimiliki oleh zat padat dengan jumlah dari volume zat padat yang ditempati oleh zat padat. Porositas memiliki nilai yang berbanding terbalik dengan densitas, dimana semakin besar nilai densitas maka nilai porositasnya semakin kecil. Untuk mendapatkan sifat mekanik keramik yang baik dibutuhkan presentase porositas yang minim. Penggunaan material awal, perlakuan sintesis, dan sintering merupakan faktor yang mempengaruhi porositas. Untuk mengetahui nilai densitas dan porositas suatu bahan digunakan pengujian menggunakan prinsip Archimides (Australian Standards, 1989) dengan persamaan sebagai berikut:

$$\rho = \frac{W_k}{W_j - W_b} \times \rho \text{ air} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{W_j - W_k}{W_j - W_b} \times 100\% \quad (3)$$

dimana:

ρ = densitas (gr/cm^3)

W_k = berat sampel kering (gr)

W_j = berat sampel jenuh (gr)

W_b = berat sampel basah (gr)

$W_j - W_b$ = berat benda yang hilang (gr)

ε = porositas (%)

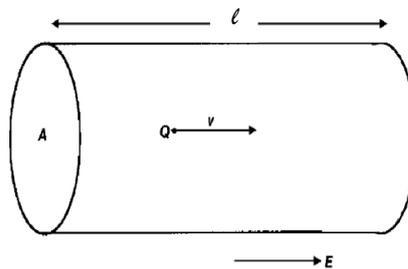
ρ untuk air = 1 g/cm³

3. Konduktivitas Listrik

Konduktivitas adalah kemampuan dari suatu bahan untuk menghantarkan arus listrik. Kemampuan ini dilakukan oleh kation dan anion, sedangkan dalam logam dilakukan oleh elektron. Pada ujung-ujung sebuah konduktor yang potensial listriknya berbeda, muatan-muatannya akan berpindah, menghasilkan arus listrik. Secara matematis, konduktivitas didefinisikan sebagai:

$$J = \sigma E. \quad (4)$$

Dimana J merupakan rapat arus yang mempunyai kerapatan n pada pembawa muatan yang bergerak Q , tiap pembawa muatan Q terdapat dalam sebuah medan listrik E . Pembawa muatan Q mengalami sebuah paksaan yang menyebabkan pergerakan yang cepat dengan kecepatan aliran v . Aliran muatan dalam suatu material diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Aliran muatan dalam material (Moulson and Habert, 2003).

Semua pembawa muatan Q terkandung dalam badan material pada luas penampang A yang akan terus bergerak sampai akhir permukaan, maka rapat arus J dinyatakan sebagai:

$$J = nQv \quad (5)$$

Jika aliran kecepatan muatan sebanding dengan gaya gerak, maka:

$$v = uE \quad (6)$$

dimana u adalah besarnya aliran kecepatan persatuan medan listrik dan E disebut sebagai mobilitas. Dari persamaan 5 dan 6 maka diperoleh:

$$J = \sigma E \quad (7)$$

$$\text{Dimana } \sigma = nQu \quad (8)$$

yang merupakan konduktivitas material.

Konduktivitas listrik σ merupakan sifat material yang berbanding terbalik dengan resistivitas listrik ρ .

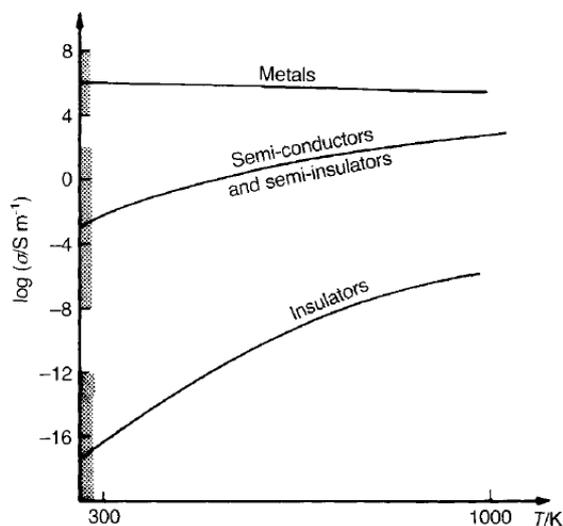
$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (9)$$

Konduktivitas listrik memiliki hubungan yang berbanding lurus dengan konstanta dielektrik dalam persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{I \epsilon_r \epsilon_0}{Q} \quad (10)$$

Dimana I , ϵ_r , ϵ_0 dan Q berturut-turut adalah kuat arus (Ampere), konstanta dielektrik, permitivitas vacuum ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m), dan jumlah muatan listrik (Coloumb).

Dibawah ini merupakan grafik batas nilai konduktivitas material yang berguna untuk menentukan sifat kelistrikan suatu material, ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Batas nilai konduktivitas pada tingkat jenis material (Moulson and Herbert, 2003).

Konduktivitas listrik sampel dapat diukur menggunakan LCR. Pengukuran menggunakan LCR menampilkan nilai resistansi masing-masing sampel. Berdasarkan nilai resistansi, ketebalan sampel dan luas penampang maka dapat dihitung besar nilai konduktivitas listrik dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{L}{RA} \quad (11)$$

Dimana: σ adalah konduktivitas ionik (S/cm), A adalah luas penampang sampel (cm^2) dan L adalah tebal pelet (cm).

Nilai yang didapat dari pengukuran sampel dengan LCR meter pada penelitian ini berupa konduktivitas AC yang dipengaruhi oleh perubahan frekuensi. Ketergantungan konduktivitas terhadap frekuensi dikenal sebagai *Universal Frequency Response*. Salah satu model persamaan yang dapat digunakan adalah:

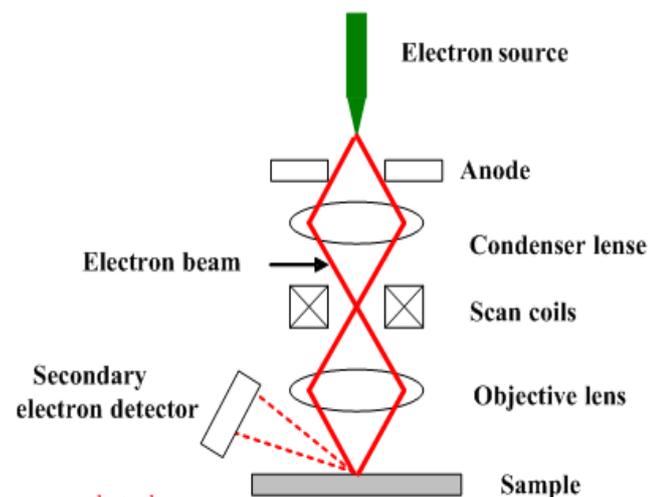
$$\sigma = \sigma_0 f^s \quad (12)$$

Dimana σ adalah konduktivitas ionik, f adalah frekuensi listrik, s adalah power eksponen dan σ_0 jika dilogkan nilainya adalah konduktivitas pada frekuensi 1 Hz.

3. Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah suatu alat yang dapat digunakan untuk mengamati dan menganalisis struktur mikro dan morfologi berbagai material seperti keramik, komposit, dan polimer. Prinsip kerja SEM sama dengan mikroskop optik namun memiliki kemampuan yang lebih dibandingkan mikroskop optik. SEM dan mikroskop optik memiliki perbedaan utama dimana untuk sumber energi, mikroskop optik memanfaatkan energi cahaya sedangkan SEM menggunakan berkas elektron.

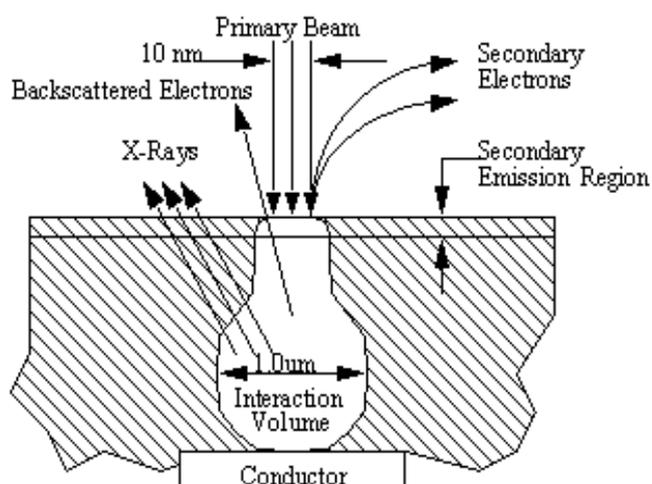
Penggunaan elektron sebagai sumber energi pada SEM menghasilkan resolusi dan kedalaman fokus yang lebih tinggi dibandingkan mikroskop optik. Oleh karena resolusi SEM yang tinggi, tekstur, topografi, dan morfologi serta tampilan permukaan suatu sampel dapat terlihat dalam ukuran mikron. Selain itu, SEM juga memberikan informasi dalam skala atomik dari suatu sampel. Daya pisah SEM berkisar 0,5 nm dengan perbesaran maksimum sampai 500.000 kali (Griffin and Riessen, 1991). Perangkat SEM diperlihatkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Perangkat SEM (Substech, 2015).

Pada tahun 1942 SEM mulai dikembangkan dan bagian-bagiannya terdiri dari penembak elektron (*electron gun*), tiga lensa elektrostatik, kumparan pengulas elektromagnetik yang terletak diantara lensa kedua dan ketiga, dan tabung foto multifier sebagai pendeteksi cahaya pada layar phospor. Pemanasan filamen menghasilkan elektron yang kemudian dikumpulkan oleh lensa kondensor elektromagnetik dan difokuskan oleh lensa objektif. Tumbukan elektron terhadap sampel karena dipercepat medan listrik menghasilkan pantulan elektron sekunder yang dideteksi dan dikuatkan oleh tabung multiplifier. Sinyal yang dihasilkan kemudian ditransmisikan ke dalam monitor komputer untuk menampilkan hasil dalam bentuk gambar (mikrograf).

Elektron kehilangan energi pada saat bertumbukan dengan material akibat hamburan dan adsorpsi pada daerah interaksi. Kedalaman daerah interaksi 100 nm sampai 2 μm menghasilkan radiasi emisi yang meliputi *backscatter* elektron dan elektron sekunder. Interaksi radiasi yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Skema interaksi antara pancaran elektron dan sampel (Semitrack, 2014).

SEM dilengkapi dengan EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) yang dapat digunakan untuk menentukan unsur dan komposisi kimia dari suatu material dengan memanfaatkan *backscattered electron* (BSE). BSE dihasilkan dari pancaran elektron dengan inti yang menyebabkan adanya interaksi elektron. Analisis visual mikrograf pada warna yang lebih terang menunjukkan unsur kimia yang memiliki nomor atom lebih besar sementara warna gelap menunjukkan unsur dengan nomor atom lebih rendah.

Elektron-elektron sekunder memiliki energi rendah yang mengakibatkan elektron tersebut dapat dibelokkan membentuk sudut dan menimbulkan bayangan topografi sedangkan sinar X amat peka terhadap jumlah elektron, hal ini penting untuk menunjukkan perbedaan dari perubahan komposisi kimia sampel. Selain itu, intensitas sinar X juga peka terhadap orientasi berkas sinar datang relatif terhadap kristal. Efek yang ditimbulkan adalah perbedaan orientasi antar butir dalam suatu sampel kristal yang dapat memberikan informasi kristalografi.