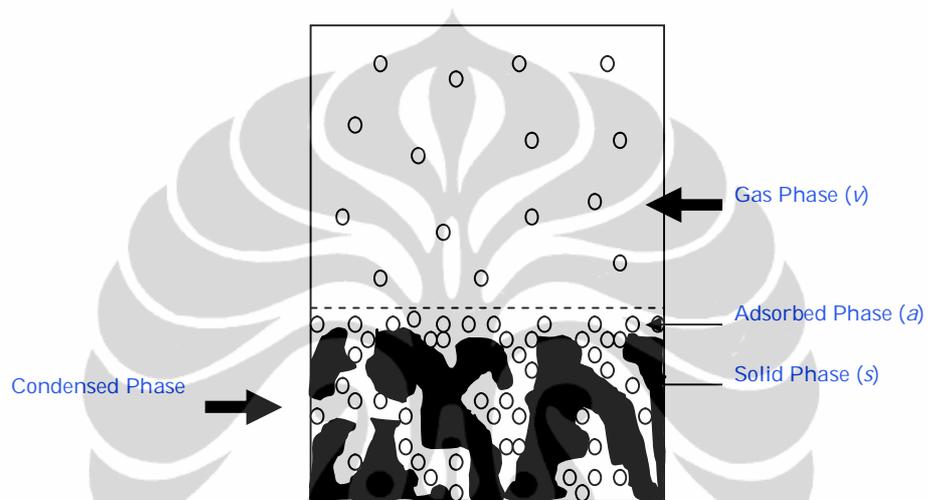


BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Adsorptive Storage

Penggunaan adsorben sebagai media penyimpanan gas dapat diilustrasikan sebagaimana Gambar 2.1.



Gambar 2.1 *Adsorptive Storage* [Sontheimer 1985]

Gas yang tersimpan di dalam *adsorptive storage* terdiri dari gas yang terkondensasi membentuk fasa teradsorpsi dan gas bebas. Suatu *storage* dengan kapasitas 1 liter, misalnya, dapat diisi penuh dengan adsorben seperti karbon aktif. Jika densitas terukur karbon aktif adalah $2,2 \text{ g/cm}^3$, maka dalam 1 liter *storage* tersebut bisa diisi dengan karbon aktif sebanyak kurang lebih 500 gram, dimana 0,227 liter akan terisi oleh kerangka atom karbon (padat) dan 0,773 liter rongga. Tergantung dari tekanan adsorpsi, jumlah gas yang teradsorpsi ini jauh lebih banyak dibandingkan dengan gas yang menempati ruang kosong. Untuk kasus hidrogen pada 2 MPa, secara teoritis, jumlah gas teradsorpsi bisa mencapai lima kali jumlah gas yang menempati rongga, dengan demikian kapasitas *storage* bisa enam kali lipat dibandingkan dengan penyimpanan tanpa adsorpsi pada tekanan dan temperatur yang sama.

Jumlah gas yang teradsorpsi bagaimanapun tergantung dari jenis adsorben yang dipakai, semakin besar luas permukaan karbon aktif yang digunakan, maka semakin banyak jumlah gas yang bisa teradsorpsi per satuan berat adsorben yang sama. Oleh karena itu penelitian yang didedikasikan untuk mendapatkan karbon aktif dengan luas permukaan yang besar masih terus berkembang sampai saat ini. Secara umum, perkembangan pembuatan karbon aktif dengan cara ini akan dibahas di subbab berikutnya.

2.2 Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan salah satu adsorben yang paling sering digunakan pada proses adsorpsi. Hal ini disebabkan karena karbon aktif mempunyai daya adsorpsi dan luas permukaan yang lebih baik dibandingkan adsorben lainnya. [Walas 1990]. Karbon aktif yang baik haruslah memiliki luas area permukaan yang besar sehingga daya adsorpsinya juga akan besar (Sudibandriyo *et al*, 2003).

Karbon aktif adalah senyawa karbon yang telah ditingkatkan daya adsorpsinya dengan proses aktivasi. Pada proses aktivasi ini terjadi penghilangan hidrogen, gas-gas dan air dari permukaan karbon sehingga terjadi perubahan fisik pada permukaannya. Aktivasi ini terjadi karena terbentuknya gugus aktif akibat adanya interaksi radikal bebas pada permukaan karbon dengan atom-atom seperti oksigen dan nitrogen. Pada proses aktivasi juga terbentuk pori-pori baru karena adanya pengikisan atom karbon melalui oksidasi ataupun pemanasan.

Karbon aktif terdiri dari 87 – 97 % karbon dan sisanya berupa hidrogen, oksigen, sulfur dan nitrogen serta senyawa-senyawa lain yang terbentuk dari proses pembuatan. Volume pori-pori karbon aktif biasanya lebih besar dari 0,2 cm³/gram dan bahkan terkadang melebihi 1 cm³/gram. Luas permukaan internal karbon aktif yang telah diteliti umumnya lebih besar dari 500 m²/gram dan bisa mencapai 1908 m²/gram.

Karbon aktif dapat dibuat dari berbagai macam bahan dasar yang mengandung karbon. Yang biasa dipakai sebagai bahan dasar karbon aktif antara lain batu bara, tempurung kelapa, tempurung kelapa sawit, *petrol coke*, limbah pinus, dan kayu. Perubahan bahan dasar juga mempunyai efek terhadap kapasitas adsorpsi dan kinetik dari karbon aktif. Bahan dasar yang digunakan memberikan pengaruh terhadap struktur permukaan besar dari karbon aktif yang dapat dilihat

Universitas Indonesia

dari *Scanning Electron Micrographs (SEM)*. Karbon aktif yang berbahan dasar dari kayu mempunyai struktur pori-pori besar yang jauh lebih teratur dibandingkan karbon aktif berbahan dasar batu bara. Ada 3 kriteria bahan dasar yang dapat dibuat sebagai karbon aktif, yaitu:

- bahan dasar harus mengandung karbon
- pengotor pada bahan dasar harus dijaga seminimal mungkin
- bahan dasar harus mempunyai kualitas yang konstan

Konsentrasi pengotor yang serendah mungkin sangat penting karena setelah proses aktivasi juga akan terbentuk senyawa-senyawa pengotor tersebut dengan konsentrasi yang lebih tinggi. Pada karbon aktif juga terdapat pengotor berupa logam. Hal ini menjadi perhatian khusus karena adanya kemungkinan untuk proses *leaching* sehingga bisa masuk ke dalam air, reaksi permukaan katalitik, dan racun terhadap aktivitas biologi yang menguntungkan pada kolom karbon aktif granular atau *Granular Activated Carbon (GAC)*.

2.2.1 Proses Produksi Karbon Aktif

Secara umum, proses pembuatan karbon aktif terdiri dari proses karbonisasi pirolitik bahan dasar serta proses aktivasi. Selama proses karbonisasi, komponen yang mudah menguap akan terlepas dan karbon mulai membentuk struktur pori-pori dimana proses pembentukan pori-pori ini akan ditingkatkan pada proses aktivasi. Pada proses aktivasi, terjadi pembukaan pori-pori yang masih tertutup dan peningkatan ukuran dari pori-pori kecil yang telah terbentuk (Sontheimer, 1985).

Proses pembuatan karbon aktif dibedakan menjadi 2, yaitu metode langsung dan tidak langsung. Pada metode langsung, bahan dasar dibentuk sesuai ukuran yang diinginkan kemudian akan melalui proses karbonisasi serta aktivasi, lalu produk yang didapatkan kemudian disaring. Metode langsung ini biasa dipakai untuk karbon aktif yang berbahan dasar tempurung kelapa, batu bara yang relatif padat, dan bahan dasar lainnya yang digunakan untuk membuat karbon aktif yang berbentuk serbuk atau *Powdered Activated Carbon (PAC)*. Metode tidak langsung digunakan untuk karbon aktif yang berbahan dasar batu bara muda, *peat*, serta *petrol coke*. Untuk karbon aktif dengan bahan dasar seperti ini

diperlukan proses *reconstitution* dan *pretreatment* selain proses-proses pada metode langsung di atas. Pada karbon aktif yang berbahan dasar batu bara muda, diperlukan proses *pretreatment* untuk mengontrol kehilangan pori-pori kecil selama proses karbonisasi yang disebabkan karena adanya *sweeling* dan *softening* dari batu bara tersebut (Sontheimer, 1985).

Pada proses produksi karbon aktif, proses aktivasi merupakan proses yang terpenting karena proses ini sangat menentukan sekali terhadap kualitas karbon aktif yang dihasilkan baik luas area permukaan maupun daya adsorpsinya. Pada prakteknya, karbon aktif diproduksi baik dengan aktivasi kimiawi maupun aktivasi fisis.

- Aktivasi kimiawi digunakan untuk bahan dasar yang mengandung selulosa dan menggabungkan antara tahap karbonisasi dan tahap aktivasi. Zat kimia yang dapat mendehidrasi seperti seng (II) klorida ($ZnCl_2$) atau *phosporic acid* (H_3PO_4) ditambahkan ke bahan dasar pada temperatur yang telah dinaikkan. Produk ini kemudian dipanaskan secara pirolisis sehingga menyebabkan degradasi selulosa. Kemudian produk tersebut didinginkan dan *activating agent* kemudian diekstrak. Karbon aktif yang diproduksi dengan cara ini adalah karbon aktif serbuk dengan densitas rendah, tanpa proses *treatment* yang khusus, mempunyai proporsi pori-pori kecil yang rendah, sehingga membuat kurang cocok digunakan pada proses penghilangan *micropollutants* dan zat-zat yang menyebabkan bau tidak sedap. Masalah yang timbul jika menggunakan H_3PO_4 sebagai zat kimia yang dapat mendehidrasi adalah diperlukannya proses tambahan yaitu *leaching* ion fosfat dari karbon. Aktivasi kimiawi ini bertujuan mengurangi pembentukan pengotor dan produk samping dengan cara merendam bahan mentah (contoh: kayu) dalam senyawa aktivasi kimiawi, contohnya senyawa: asam sulfat (Baksi, 2006).
- Aktivasi fisis biasa digunakan untuk memproduksi karbon aktif yang akan digunakan untuk *water treatment* dan prosesnya adalah endotermis. Proses endotermis ini melibatkan kontak antara *activating agent* berfasa gas, biasanya *steam*, walaupun CO_2 dan air juga terkadang digunakan, dengan arang pada temperatur 850 - 1000 °C. Pada proses ini seringkali terjadi reduksi dari ukuran adsorben yang disebabkan karena kelebihan oksidasi eksternal selama

gas pengoksidasi berdifusi ke dalam karbon yang tidak teraktivasi (Goodman *et al*, 2004).

Perkembangan penelitian untuk meningkatkan daya adsorpsi karbon aktif dalam skala laboratorium dapat dilihat pada Tabel 2.1. Dari tabel tersebut terlihat

Tabel 2.1 Perkembangan Penelitian Pembuatan Karbon Aktif

No	Nama jurnal	Proses	Hasil
1	<i>Activated carbon from Moringa husks and pods</i> [McConnachie, 1996]	Dipanaskan dengan dialiri steam (2 ml/min) dan besar laju pemanasan adalah 20 ⁰ C/min, temperatur akhir bervariasi dari 500 ⁰ C sampai 800 ⁰ C selama 1 atau 2 jam	Surface area untuk 800 ⁰ C = 713 m ² /gr
2	<i>Preparation of Activated Carbons from Bituminous Coals with CO₂ Activation. 1. Effects of Oxygen Content in Raw Coals</i> [Teng, 1996]	Pirolisis dengan aliran CO ₂ /N ₂ dipanaskan dengan laju pemanasan 30 °C/min dari temperatur ruang ke <i>maximum heat treatment Temperatures</i> yaitu 800-950 °C. Kemudian dilakukan gasifikasi dengan aliran CO ₂ pada temperatur <i>maximum heat treatment</i> .	Hasil yang terbaik adalah 658 m ² /g
3	<i>Production of Activated Carbon from Palm-oil shell by pyrolysis and steam activation in a fixed bed reactor</i> [Vitidsant, 1999]	Pirolisis bahan baku dengan laju alir udara 0.72 ml/min selama 30 menit dengan menggunakan steam dengan temperatur 750 ⁰ C selama 3 jam	$\rho_{\text{bulk}}=0.505 \text{ g/cm}^3$ Surface area = 669.75 m ² /g
4	<i>High-Porosity Carbons Prepared from Bituminous Coal with Potassium Hydroxide Activation</i> [Teng, 1999]	Dilakukan karbonasi di <i>horizontal cylindrical furnace</i> (60-mm i.d.) dengan atmosfer N ₂ (100 mL/min) dan laju pemanasan (v) = 30 °C/min dari temperatur ruang sampai 500-1000 °C selama 0-3 jam.	KOH/coal = 4.25:1 dengan 800°C selama 1 jam mendapat surface area = 3000 m ² /g
5	<i>Production and characterization of Activated Carbon from pine wastes gasified in a pilot reactor</i> [Garcia, 2002]	Pencampuran bahan baku dengan KOH (rasio berat alkali/char = 4/1) Dialiri gas N ₂ 4 l/min dengan temperatur bervariasi dari 725 sampai 800 ⁰ C selama 1 jam	Volume mikropori = 0.678 cm ³ /g, Surface area = 1908 m ² /g
6	<i>Preparation and Examination of Activated Carbon from Date Pits Impregnated with KOH</i> [Banat, 2003]	Dengan mencampur 30 wt% KOH dan kemudian dipanaskan sampai temperatur 600 C selama 2 jam	Surface area adalah 470 m ² /g
7	<i>Understanding chemical reaction between carbon and NaOH and KOH</i> [Lillo, 2003]	Bahan baku dicampur dengan NaOH (NaOH/C=3:1) dengan laju pemanasan adalah 5 ⁰ C/min sampai 760 ⁰ C Dengan dialiri N ₂ ,CO ₂ dan Steam (laju steam adalah 40,100 dan 500 ml/min)	Hasil paling baik : dialiri N ₂ 500 ml/min= 2193 m ² /g Hasil plg jelek : dialiri CO ₂ =36 m ² /g
8	<i>Effect of Two-Stage Process on the Preparation and Characterization of Porous Carbon Composite from Rice Husk by Phosphoric Acid Activation</i> [Kennedy, 2004]	Pre-carbonized karbon dengan dicampur 250 g yang mengandung 85% berat H ₃ PO ₄ . Rasio H ₃ PO ₄ : coal = 4,2:1 pada 85 ⁰ C selama 4 jam. Lalu dikeringkan dengan kondisi vacuum pada 110 °C selama 24 jam dan diaktivasi dengan atmosfer N ₂ ($v=100 \text{ mL/min}$) dan laju pemanasan = 5 °C/min. Temperatur yang digunakan adalah dari 700, 800,900 ⁰ C selama 1 jam lalu didinginkan.	Surface area T = 900 ⁰ C adalah 438.9 (m ² /g)

9	<i>Activated Carbon from Bamboo - Technology Development towards Commercialisation</i> [Baksi,2006]	Dicampur asam fosfat (H ₃ PO ₄), Zinc Klorid (ZnCl ₂) di <i>fluidised bed reactor</i> pada 900-1100 ⁰ C dengan adanya steam atau CO ₂ .	Surface area rata-rata adalah 1250 m ² /g
---	--	--	--

Bahan baku yang dipakai meliputi batubara dan kayu pinus (Teng, 1999; Garcia, 2002; Lillo, 2003). Selanjutnya juga dijelaskan bahwa aktivasi dengan menggunakan KOH dengan tanpa kehadiran gas oksigen akan mengontrol reaksi pembakaran karbon melalui mekanisme sebagai berikut:



Pada proses tersebut, karbon bereaksi dengan *oxidizing agent* dan menghasilkan karbon dioksida yang berdifusi pada permukaan karbon. *Amorphous carbon* yang menghalangi pori bereaksi pada tahap oksidasi awal dan sebagai hasilnya *closed pore* akan terbuka. Selanjutnya reaksi akan berlanjut dengan mengikis dinding karbon untuk membentuk pori-pori baru (lihat Gambar 2.2).



Gambar 2.2 Struktur Karbon Aktif Sebelum dan Sesudah Aktivasi
(Sontheimer, 1985)

Pada tahun 2005, penelitian dengan metode sejenis telah dilakukan di Departemen Teknik Kimia UI dengan menggunakan batubara lokal sebagai bahan bakunya. Hasilnya masih kurang maksimal yaitu karbon aktif dengan luas permukaan 854 m²/gram. Kemungkinan hasil ini bisa ditingkatkan lagi dengan perubahan waktu aktivasi. Penelitian selanjutnya digunakan bahan baku batubara dan tempurung kelapa dengan perlakuan aktivasi pada temperatur yang lebih

rendah (500 – 600 °C), namun hasil luas permukaan karbon aktif yang dihasilkan hanya berkisar 100 – 300 m²/gram untuk karbon aktif dari tempurung kelapa dan berkisar 400 – 600 m²/gram untuk karbon aktif dari batu bara. Hal ini karena temperatur aktivasi yang kurang tinggi. Dari hasil ini juga terlihat bahwa bahan baku batubara menghasilkan karbon aktif yang lebih baik dibandingkan dengan bahan baku tempurung kelapa (Sudibandriyo dan Mulyati, 2008).

Tempurung kelapa memiliki beberapa alasan untuk digunakan sebagai bahan dasar karbon aktif antara lain karena kandungan karbonnya yang sangat banyak serta kemudahan bahan tersebut untuk didapatkan secara komersial sehingga sering disebutkan bahwa tempurung kelapa merupakan bahan dasar yang paling cocok untuk karbon aktif. Tempurung kelapa mengandung material lignoselulosis. Tempurung kelapa terdiri dari 62 % selulosa dan hemiselulosa yang merupakan polimer linear dari glukosa serta mengandung 35 % lignin yang merupakan polimer 3 dimensi dari alkohol aromatik. Sementara itu sisa kandungan tempurung kelapa sebesar 3 % merupakan zat intraselular (McKay dan Roberts, 1982).

Sedangkan Batu bara yang akan digunakan adalah batu bara Ombilin. Dimana batu bara tersebut merupakan batu bara jenis *bituminous* yang mempunyai kadar karbonnya cukup tinggi, dapat dilihat pada Tabel 2.3 (Megasari *et al*, 2008). Selain itu batu bara ini merupakan batu bara sejenis yang digunakan oleh Teng yaitu batu bara *bituminous* Australia yang menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan 3000 m²/g. Untuk komposisi yaitu batu bara *bituminous* dapat dilihat pada tabel 2.4. Dengan melihat data tersebut maka batu bara *bituminous* ombilin dapat dijadikan kandidat untuk menghasilkan sebagai karbon aktif super.

Tabel 2.3 Komposisi Batu Bara *Bituminous* di Indonesia (Megasari *et al*,2008)

Komposisi	Persen (%) berat (Batu Bara Kering)
Karbon	78
Oksigen	5
Hidrogen	4,3
Nitrogen	1
Sulfur	0,8
Kandungan Air	5,2
Lain-Lain : Abu (Ash)	5,7

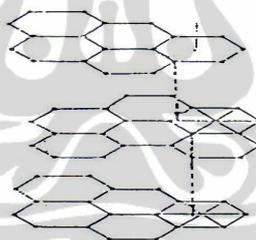
Universitas Indonesia

Tabel 2.4 Komposisi Batu Bara *Bituminous* Australia (Teng, 1999)

Komposisi	Persen (%) berat (Batu Bara Kering)
Karbon	83,2
Oksigen	7,4
Hidrogen	5,1
Nitrogen	3,7
Sulfur	0,6
Kandungan Air	2,7
Lain-Lain : Abu (Ash)	8,9

2.2.2 Sifat Fisis dan Struktur Kimia Karbon Aktif

Karbon aktif mempunyai bentuk yang amorf yang terdiri dari pelat-pelat datar di mana atom-atom karbonnya tersusun dan terikat secara kovalen dalam kisi heksagonal. Hal tersebut telah dibuktikan dengan penelitian menggunakan sinar-X yang menunjukkan adanya bentuk-bentuk kristalin yang sangat kecil dengan struktur grafit (Gambar 2.3).



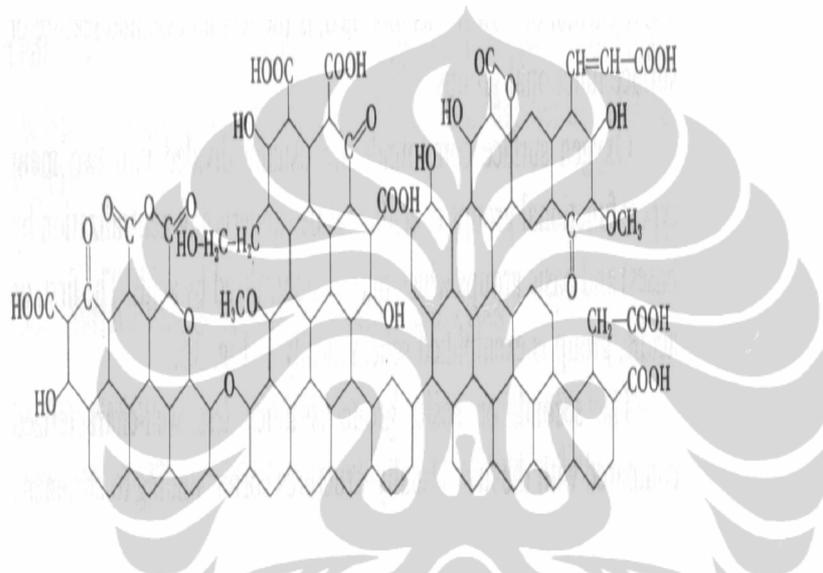
Gambar 2.3 Struktur Fisik Karbon Aktif (Sontheimer, 1985)

Daerah kristalin memiliki ketebalan 0,7-1,1 nm, jauh lebih kecil dari grafit. Hal ini menunjukkan adanya 3 atau 4 lapisan atom karbon dengan kurang lebih terisi 20-30 heksagon di tiap lapisannya. Rongga antara kristal-kristal karbon diisi oleh karbon-karbon amorf yang berikatan secara tiga dimensi dengan atom-atom lainnya terutama oksigen. Susunan karbon yang tidak teratur ini diselingi oleh retakan-retakan dan celah yang disebut pori dan kebanyakan berbentuk silindris.

Selain mengandung karbon, karbon aktif juga mengandung sejumlah kecil hidrogen dan oksigen yang secara kimiawi terikat dalam berbagai gugus fungsi seperti karbonil, karboksil, fenol, lakton, quinon, dan gugus-gugus eter. Oksida permukaan tersebut seringkali berasal dari bahan bakunya, atau dapat pula

terbentuk akibat reaksi dengan udara maupun uap air. Oksida-oksida tersebut biasanya bersifat asam sehingga menurun ke karbon aktifnya.

Gugus fungsional dibentuk selama proses aktivasi oleh interaksi radikal bebas pada permukaan karbon dengan atom-atom seperti oksigen dan nitrogen. Gugus fungsional ini membuat permukaan karbon aktif reaktif secara kimiawi dan mempengaruhi sifat adsorbsinya. Ilustrasi struktur kimia karbon aktif dengan gugus fungsionalnya dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Struktur Kimia Karbon Aktif (Sudibandriyo, 2003)

2.3 Karakterisasi Karbon Aktif Super

2.3.1 Karakterisasi Luas Permukaan

Karakterisasi luas permukaan dapat dilakukan dengan metode BET untuk mengukur luas permukaan karbon aktif yang dihasilkan dari batu bara dan tempurung kelapa. Metode BET dikembangkan oleh Brunauer–Emmet–Teller pada tahun 1938 dengan dua jenis pengukuran yaitu *single point* dan *multi point*. Pengukuran *single point* dilakukan bila profil *isotherm* telah diketahui dan dilaksanakan pada suatu nilai tekanan parsial adsorbat di mana profil isothermnya linier. Sedangkan pengukuran *multi point* dilakukan jika profil isothermnya belum diketahui dilakukan dengan memvariasikan nilai tekanan parsial adsorbat pada rentang $0.05 < (P/P_0) < 0.35$. Bila adsorbat yang digunakan adalah gas nitrogen, maka nitrogen cair digunakan sebagai media pendinginnya. Selain itu, melalui

karakterisasi BET kita juga dapat mengetahui volume pori-pori total dan diameter pori rata-rata. Panas adsorpsi untuk semua lapisan kecuali lapisan pertama dianggap sama dengan panas kondensasi gas yang diadsorp (Slamet *et al*, 2007). Jumlah lapisan yang diadsorp ditunjukkan dengan persamaan (Maron dan Lando,

$$1974) : \quad \frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad (2.4)$$

dengan :

P = tekanan gas saat teradsorpsi

P_0 = tekanan saturasi gas yang diadsorp pada temperatur percobaan

V = volume gas yang diadsorp pada tekanan P

V_m = volume gas yang diadsorp dalam lapisan tunggal

C = konstanta yang dihubungkan secara eksponensial dengan panas adsorpsi dan pencairan gas. Konstanta ini dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$c = e^{(E_1 - E_L)/RT} \quad (2.5)$$

E_1 = Panas adsorpsi layer 1

E_L = Panas Pencairan gas pada layer lain

Persamaan di atas dapat dibuat satu grafik yang linear dengan mem-plot antara $P/V(P_0 - P)$ vs P/P_0 sehingga didapat *slope* = $(C-1)/V_m C$ dan *intercept* = $1/V_m C$. Dari hubungan di atas kita dapat menghitung harga V_m dan dengan diketahuinya V_m maka luas permukaan karbon aktif dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$A = V_m \cdot N_{av} \cdot \frac{\pi}{4} \sigma^2 \quad (2.6)$$

dengan :

A = luas permukaan

N_{av} = Bilangan Avogadro

σ = diameter absorbat

2.3.2 Karakterisasi SEM (Skoog *et al*, 1992)

Untuk melihat perubahan struktur permukaan dari batu bara dan tempurung kelapa menjadi menjadi karbon aktif dilakukan pengujian dengan alat SEM. *Scanning Electron Microscope* (SEM) adalah mikroskop yang menggunakan hamburan elektron sebagai ganti cahaya untuk membentuk bayangan/gambar. Alat ini memiliki banyak keuntungan jika dibandingkan dengan mikroskop cahaya. SEM menghasilkan bayangan dengan resolusi yang tinggi, artinya pada jarak yang sangat dekat tetap dapat menghasilkan perbesaran yang maksimal tanpa memecahkan gambar. Elektron diproduksi pada bagian atas mikroskop dengan menggunakan *electron gun*. Kemudian elektron akan melintasi lintasan vertikal dalam kondisi vakum di sepanjang mikroskop. Ketika sinar elektron ini menumbuk sampel, maka sejumlah elektron dan sinar-X akan dipancarkan. Detektor akan mengumpulkan sinar X-ray dan elektron (*secondary electrons* dan *backscattered electrons*) dan mengubahnya menjadi sinyal yang dikirim ke layar yang mirip dengan layar televisi. Tahap inilah yang akan memproduksi gambar .

Karena SEM digunakan pada kondisi vakum dan menggunakan elektron untuk membentuk gambar, perlu dilakukan preparasi khusus pada sampel. Semua air harus dihilangkan dari sampel karena air dapat menguap pada kondisi vakum. Semua logam bersifat konduktif dan tidak memerlukan preparasi sebelum digunakan. Semua non-logam harus dibuat konduktif terlebih dahulu dengan melapisi sampel dengan lapisan tipis material konduktif. Alat yang digunakan untuk melapisi sampel non-logam disebut *sputter coater*. Ketebalan sampel tidak berpengaruh seperti pada Mikroskop Elektron Transmisi (TEM). Karena itu sampel yang tebal sekalipun (*bulk*) dapat dianalisis dengan SEM. Kombinasi dari perbesaran kedalaman jarak fokus, resolusi yang bagus, dan persiapan yang mudah membuat SEM merupakan satu dari alat-alat yang sangat penting untuk digunakan dalam penelitian saat ini.