



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**UJI ADSORPSI ISOTHERMAL HYDROGEN PADA KARBON  
AKTIF DARI BAHAN LOKAL INDONESIA DALAM BENTUK  
GRANULAR DAN NANO PARTIKEL**

**TESIS**

**MIKO SATRIA**

**0906496200**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM MAGISTER**

**DEPOK**

**JULI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**UJI ADSORPSI ISOTHERMAL HYDROGEN PADA KARBON  
AKTIF DARI BAHAN LOKAL INDONESIA DALAM BENTUK  
GRANULAR DAN NANO PARTIKEL**

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik**

**Miko Satria**

**0906496200**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**KEKHUSUSAN KONVERSI ENERGI**

**DEPOK**

**JULI 2011**

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**



**NAMA : MIKO SATRIA**

**NPM : 0906496200**

**Tanda Tangan :**

A handwritten signature in blue ink is written over the 'Tanda Tangan' label. The signature is stylized and appears to read 'Miko Satria'.

**Tanggal : 11 Juli 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : MIKO SATRIA

NPM : 0906496200

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Tesis :

### UJI ADSORPSI ISOTHERMAL HYDROGEN PADA KARBON AKTIF DARI BAHAN LOKAL INDONESIA DALAM BENTUK GRANULAR DAN NANO PARTIKEL

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

#### DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Dr.-Ing Ir. Nasruddin, M.Eng.

Pembimbing 2 : Dr. Awaludin Martin MT

Tim Penguji : Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc. PhD

: Dr. Ir M Idrus Alhamid



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 11 Juli 201

## UCAPAN TERIMA KASIH

*“Allah akan meninggikan derajat orang-orang yang beriman di antara kalian dan orang-orang yang berilmu pengetahuan beberapa derajat. Dan Allah Maha Mengetahui apa yang kamu kerjakan.” (QS. Al-Mujadah : 11)*

*“Dan katakanlah : Ya Rabbku, tambahkanlah kepadaku ilmu pengetahuan.” (QS. Thaha : 114).  
"Maka bertanyalah kepada orang yang mempunyai pengetahuan jika kamu tidak mengetahui."  
(QS. An-Nahl:43).*

*alhamdulillah.....  
terimakasih untuk mentari dan tetesan hujan....*

*untuk mawar biruku...  
teman yang seperti orang tua.....*

*...  
dan guru dan sahabat sahabat terbaik..... Perjuangan memang tiada Akhir.....  
akhirnya..... sebuah awalan dan akhir telah sempurna kita lewati.....*

*alhamdulillah*

Alhamdulillah, sebuah sebuah awalan dan akhir telah sempurna kita lewati. Dengan segenap syukur pada allah swt atas karunianya sehingga Tesis ini bisa diselesaikan, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang tiada hingga untuk :

1. Dr.-Ing Ir. Nasruddin, M.Eng atas kesediaannya untuk menjadi pembimbing Tesis ini, yang dengan penuh keteladanannya memberikan bimbingan, pengarahan, masukan yang tidak ternilai sejak awal hingga selesainya penulisan Tesis ini.
2. Dr. Awaludin Martin, MT. selaku Pembimbing 2 yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing, mengoreksi, dan memberikan saran konstruktif dalam penyusunan Tesis ini.
3. Anggota panitia penguji yang terdiri dari Ir. Mahmud Sudibandriyo, M.Sc, dan Dr. Ir. Muhammad Idrus Alhamid untuk diskusi dan saran yang sangat membangun.
4. Ketua Departemen dan seluruh staf pengajar Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, atas semua dukungan dan bantuan yang telah diberikan selama penulis menyelesaikan studi
5. Teman-teman Laboratorium Pendingin dan Pengkondisian Udara, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas

6. Kepada semua pihak yang telah berkenan membantu penyelesaian tesis ini, yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Akhir nya, penulis ingin sampaikan terima kasih yang tiada hingga kepada orang tua tercinta yang telah membesarkan, mendidik, dan membimbing penulis selama ini. Rasa terima kasih yang juga tiada hingga penulis sampaikan pula kepada istri tercinta untuk semua pengertian dan pemahamannya. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan Tesis ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan Tesis ini. Penulis berharap Allah swt berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu.

Semoga Tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di Indonesia.

Depok, Juli 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI**  
**TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : MIKO SATRIA

NPM : 0906496200

Program Studi : Teknik Mesin

Kekhususan : Konversi Energi

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**UJI ADSORPSI ISOTHERMAL HYDROGEN PADA KARBON AKTIF**  
**DARI BAHAN LOKAL INDONESIA DALAM BENTUK GRANULAR**  
**DAN NANO PARTIKEL**

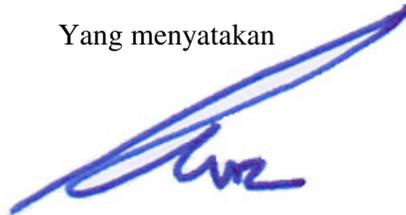
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal : 11 Juli 2011

Yang menyatakan



(Miko satria)

v

Universitas Indonesia

## ABSTRAK

**Nama** : Miko Satria  
**Program Studi** : Teknik Mesin  
**Judul** :

### **UJI ADSORPSI ISOTHERMAL HYDROGEN PADA KARBON AKTIF DARI BAHAN LOKAL INDONESIA DALAM BENTUK GRANULAR DAN NANO PARTIKEL**

Dibanding bahan bakar fosil, pemakaian hidrogen sebagai bahan bakar jauh lebih efektif dalam energy pembakaran hampir 3 kali lipat. Keunggulan lain dari hidrogen adalah jumlahnya di alam ini sangat melimpah, 93 % dari seluruh atom yang ada di jagat raya ini adalah hidrogen. Tiga perempat dari massa jagat raya ini adalah hidrogen. Walaupun memiliki banyak keunggulan, penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar juga memiliki kekurangan yaitu dalam hal penyimpanannya, hidrogen dalam suhu kamar dan tekanan atmosfer berbentuk fase gas sehingga memiliki rasio energi yang sangat rendah terhadap volumenya jika disimpan dalam bentuk gas. Penelitian berkaitan dengan metode dan material untuk menyimpan Hidrogen terus dilakukan, dengan hasil sejauh ini adalah kesimpulan bahwa penyimpanan hidrogen memakai prinsip adsorpsi dengan karbon aktif berbentuk granular sebagai adsorben sangat menjanjikan karena bisa menurunkan tekanan dalam tangki dengan kapasitas penyimpanan yang relatif sama. Untuk meningkatkan daya adsorpsi dari karbon aktif dapat dilakukan dengan menjadikan partikelnya berukuran nano sehingga akan lebih banyak memiliki mikropori. Dari data hasil eksperimen diketahui kapasitas adsorpsi tempurung kelapa dalam bentuk granular pada suhu  $-5^{\circ}\text{C}$  sebesar  $0.004214\text{ kg/kg}$  adsorben, untuk suhu  $25^{\circ}\text{C}$  sebesar  $0.003428\text{ kg/kg}$  adsorben. Untuk tempurung kelapa hasil mechanical ball milling diperoleh hasil yang tidak jauh berbeda dengan bentuk granular yaitu sebesar  $0.004187\text{ kg/kg}$  adsorben pada suhu  $-5^{\circ}\text{C}$  dan sebesar  $0.003694\text{ kg/kg}$  adsorben pada suhu  $25^{\circ}\text{C}$ . hal ini dikarenakan jumlah total volume pori dari karbon aktif tempurung kelapa hasil mechanical ball milling relative sama dengan karbon aktif granular, walaupun dari segi luas permukaan terjadi penurunan yang cukup signifikan. Peningkatan kapasitas adsorpsi yang cukup signifikan didapat pada karbon aktif tempurung kelapa yang telah dibentuk menjadi pellet dan mengalami reaktifasi secara kimia dengan menggunakan KOH pada suhu  $700^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam yaitu sebesar  $0.019434\text{ kg/kg}$  adsorben pada suhu  $-5^{\circ}\text{C}$  dan sebesar  $0.018756\text{ kg/kg}$  adsorben pada suhu  $25^{\circ}\text{C}$ .

## ABSTRACT

**Name** : Miko Satria  
**Department** : Teknik Mesin  
**Topic** :

Hydrogen adsorption isothermal test on activated carbon from Indonesia local material in granular and nano particles

Compared to fossil fuels, use of hydrogen as a fuel is much more effective at burning energy is almost three times as Another advantage is the amount of hydrogen is very abundant in nature, 93% of all the atoms in the universe are hydrogen. Three quarters of the mass of the universe are hydrogen. Although it has many advantages, the use of hydrogen as a fuel also has the disadvantage that in terms of storage, hydrogen at room temperature and atmospheric pressure so that the shape of the gas phase has a very low energy ratio of the volume if stored in gaseous form. Research related to methods and materials for storing hydrogen is ongoing, with results so far is the conclusion that the principle of hydrogen storage by adsorption in the form of granular activated carbon as adsorbent is very promising because it can decrease the pressure in the tank with a storage capacity of the same relative. to enhance adsorption of activated carbon can be done by making nano-sized particles that would have more micropore. From the results of experimental data known to the adsorption capacity of coconut shell in granular form at a temperature of  $-5^{\circ}\text{C}$  of  $0.004214\text{ kg / kg adsorbent}$ , at temperature of  $25^{\circ}\text{C}$  at  $0.003428\text{ kg / kg adsorbent}$ . For the coconut shell mechanical ball milling results obtained with the results are not much different from the granular form that is equal to  $0.004187\text{ kg / kg adsorbent}$  at a temperature of  $-5^{\circ}\text{C}$  and amounted to  $0.003694\text{ kg / kg adsorbent}$  at  $25^{\circ}\text{C}$ . this is because the total pore volume of activated carbon coconut shell with the results of mechanical ball milling is relatively similar to granular activated carbon, although in terms of surface area decreased significantly. The increase is quite significant adsorption capacity obtained on activated carbon coconut shell which has been formed into pellets and had reactivation of chemically using KOH at a temperature of  $700^{\circ}\text{C}$  for 1 hour is equal to  $0.019434\text{ kg / kg adsorbent}$  at a temperature of  $-5^{\circ}\text{C}$  and amounted to  $0.018756\text{ kg / kg adsorbent}$  at  $25^{\circ}\text{C}$ .

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	<b>iii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>iv</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	<b>v</b>
<b>LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xii</b>
<b>DAFTAR NOTASI</b> .....	<b>xiv</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB 2 STUDI PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Energi, ekonomi dan lingkungan .....	5
2.2 Ekonomi Berdasarkan Hidrogen .....	7
2.2.1 Transisi Ekonomi Hidrogen .....	8
2.3 Hidrogen .....	8
2.3.1 Hydrogen properties .....	9
2.3.2 <i>Hydrogen Storage</i> .....	11
2.3.2.1 <i>Adsorption Hydrogen Storage</i> .....	13
2.4. Mekanisme Adsorpsi .....	16
2.4.2. Adsorpsi Equilibrium .....	19
2.4.2.1. Adsorpsi Isotermal .....	19
2.4.2.2. Adsorpsi Isobar .....	20
2.4.2.3. Adsorpsi Isosterik .....	20
2.5 Metode Pengujian Adsorpsi .....	21
2.5.1 Metode Gravimetrik .....	22
2.5.2 Metode Volumetrik .....	23
2.6. ADSORBEN .....	25
2.6.1. Karbon Aktif .....	26
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>29</b>
3.1 material dan alat .....	29
3.2 Pengujian adsorpsi Volumetrik .....	30
3.2.1 Pengukuran Volume charging cell dan volume kosong measuring cell .....	32
icrograph pengukuran Volume charging cell .....	32
3.2.1.2 Pengukuran volume kosong measuring cell .....	33

3.3	Persiapan Penelitian .....	35
3.4	prosedur Penelitian .....	35
3.5	Error analisis pada adsorpsi isothermal .....	36
3.5.1	<i>Error</i> pada Volume <i>Charging Cell</i> ( $V_{cc}$ ) dan Volume Kosong pada <i>Measuring Cell</i> ( $V_{vv}$ ) .....	37
3.5.2	<i>Error</i> pada Pengukuran Temperatur .....	37
3.5.3	<i>Error</i> pada Pengukuran Tekanan .....	37
3.5.4	<i>Error</i> pada Pengukuran Massa Sampel .....	37
3.6	Korelasi Adsorpsi Isotermal .....	38
3.7	Panas Adsorpsi .....	38
3.8	Adsorpsi Isosterik .....	38
3.9	Perhitungan masa adsorbat yang terserap .....	38
<b>BAB 4</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>41</b>
4.1	Propertis Karbon Aktif .....	41
4.2	Kapasitas Adsorpsi Hidrogen pada karbon aktif .....	43
4.2.1	Kapasitas Adsorpsi Hidrogen pada karbon aktif tempurung kelapa.....	44
4.2.2	Kapasitas Adsorpsi Hidrogen dibandingkan CH <sub>4</sub> .....	48
<b>BAB 5</b>	<b>KESIMPULAN .....</b>	<b>49</b>
	<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>50</b>
	<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>51</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pertumbuhan Konsumsi Minyak Bumi Dunia	5
Gambar 2.2	Peningkatan Jumlah Emisi akibat pemakaian bahan bakar berbasis Karbon	6
Gambar 2.3	Peningkatan Suhu Rata-rata Permukaan bumi	7
Gambar 2.4	skema ekonomi Hidrogen	8
Gambar 2.5	Diagram Phase Hydrogen	10
Gambar 2.6	Densitas Hydrogen terhadap temperatur dan tekanan	11
Gambar 2.7	Rasio Ekspansi Hydrogen dalam fase cair dan gas	13
Gambar 2.8	Komparasi Adsorption storage dan Compression Storage	14
Gambar 2.9	Hubungan luas permukaan dan kapasitas penyerapan Hidrogen pada 4 mpa	15
Gambar 2.10	Potongan Melintang Material karbon Aktif	18
Gambar 2.11	Proses Adsorpsi Pada Karbon Aktif	18
Gambar 2.12	Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isotermal	20
Gambar 2.13	Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isobar	20
Gambar 2.14	Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isostere	21
Gambar 2.15	Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan Two Beam Balance	22
Gambar 2.16	Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan Magnetic Suspension	23
Gambar 2.17	Skema Metode Volumetrik	24
Gambar 2.18	porositas pada karbon	27
Gambar 3.1	Diagram alir Penelitian	29
Gambar 3.2	Skema Alat Uji adsorpsi Isothermal	31
Gambar 3.3	Skema Proses Pengukuran Volume Charging Cell	33
Gambar 3.4	Skema Proses Pengukuran Volume Kosong Measuring Cell	33
Gambar 3.5	Skema Keseimbangan Massa pada Proses Penyerapan	40

Gambar 4.1	Perbandingan Luas Permukaan tempurung kelapa dalam berbagai keadaan	42
Gambar 4.2	Nilai Luas Permukaan , diameter pori dan total pore vol dari ukuran granular (as-received-37 $\mu\text{m}$ ), 37 $\mu\text{m}$ milling 30 jam untuk karbon aktif Tempurung Kelapa	42
Gambar 4.3	Perbandingan Luas Permukaan Batu bara dalam berbagai keadaan	42
Gambar 4.4	Nilai Luas Permukaan , diameter pori dan total pore vol dari ukuran granular (as-received-37 $\mu\text{m}$ ), 37 $\mu\text{m}$ milling 30 jam untuk karbon aktif batubara	43
Gambar 4.5	Kapasitas Adsorpsi Hydrogen pada karbon Aktif Tempurung kelapa granular	44
Gambar 4.6	Kapasitas Adsorpsi Hydrogen pada karbon Aktif Tempurungkelapa Hasil PBM	45
Gambar 4.7	Kapasitas Adsorpsi Hydrogen pada karbon Aktif Tempurung kelapa dalam Bentuk Pelet	45
Gambar 4.8	8 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Hydrogen pada karbon Aktif Tempurung kelapa pada suhu -5oC	46
Gambar 4.9	Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Hydrogen pada karbon Aktif Tempurung kelapa pada suhu 25oC	46
Gambar 4.10	Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Hydrogen dan CH4 pada karbon Aktif pada suhu 25oC	48

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Pengujian Daya Serap Hidrogen pada Karbon Aktif	15
Tabel 4.1`	Luas Permukaan pada Karbon Aktif Batubara dan Tempurung Kelapa	41



## DAFTAR NOTASI

A	Potensi adsorpsi
b	Konstanta gaya tarik menarik antara adsorbat dengan adsorben atau konstanta Langmuir
$b_{\infty}$	Konstanta equilibrium
BET	Brunauer-Emmett-Teller
C	Kapasitas adsorpsi per unit massa adsorben pada kondisi equilibrium
CB	Komersial
$C_o$	Kapasitas penyerapan maksimum [kg/kg adsorben]
$C_{\mu s}$	Jumlah penyerapan maksimum; kapasitas penyerapan maksimum [kg/kg adsorben]
$C_{\mu}$	Jumlah penyerapan dalam satuan mol per satuan massa atau volume; kapasitas adsorpsi per unit massa adsorben pada kondisi equilibrium [kg/kg adsorben]
d	Diameter pori [ $\text{\AA}$ ]
E	Energi karakteristik pada sistem adsorpsi [kJ/kg]
$E_d$	Energi aktivasi untuk desorpsi [kJ/kg]
$h_{st}$	Panas adsorpsi isosterik [kJ/kg]
$k_d$	Konstanta untuk proses desorpsi
$k_{d-\infty}$	Konstanta untuk proses desorpsi pada temperatur tak terbatas
$k_o$	Konstanta equilibrium [1/kPa]
M	Massa molekul adsorbat [gram]
MSC	<i>Molecular-Sieve Carbons</i>
n	Parameter heterogenitas; Jumlah mol helium pada <i>charging cell</i>
$n_i$	Jumlah mol He yang masuk ke dalam <i>measuring cell</i> [mol]
P	Tekanan [Pa]
$P_c$	Tekanan kritis [Pa]
$P_{cci}$	Tekanan awal pada <i>charging cell</i> [Pa]
$P_{mcf}$	Tekanan akhir <i>measuring cell</i> [Pa]
$P_o$	Tekanan saturasi [Pa]
$P_s$	Tekanan saturasi [Pa]
Q	Panas adsorpsi dan sama dengan energi aktivasi untuk desorpsi [J/kg adsorben]
R	Konstanta gas [kJ/ kg.mol. K]
$R_a$	Jumlah penyerapan pada permukaan yang kosong
$R_d$	Jumlah adsorbat yang terlepas/terdesorpsi
$R_g$	Konstanta gas adsorbat [kJ/ kg. K]
$R_s$	Laju pergerakan molekul yang menuju permukaan
SEM	<i>Scanning Electron Micrograph</i>
t	Parameter karakteristik heterogenitas permukaan adsorben
T	Temperatur equilibrium [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_c$	Temperatur kritis [°C]
TMA	<i>Thermograph Microbalance Aparatus</i>
W	Jumlah adsorbat yang diserap [kg/kg adsorben]
$W_o$	Kapasitas penyerapan maksimum adsorben [kg/kg adsorben]
$x/m$	Jumlah adsorbat yang terserap per unit massa adsorben pada tekanan equilibrium dan pada temperatur adsorpsi [kg/kg adsorben]
Z	Faktor kompresibilitas
$-\Delta H$	Perbedaan panas adsorpsi [kJ/kg adsorben]
$\Delta x$	Perbedaan jumlah masa adsorbat yang terserap adsorben
$dm_{d,mc}$	Massa adsorbat di <i>measuring cell</i> [kg]
$ m_{cc} $	Massa adsorbat di <i>charging cell</i> [kg]
$m_{ads}$	Massa adsorbat yang diserap oleh adsorben [kg]
$m_{air}$	Massa air [kg]
$m_{PV+air}$	Massa <i>charging cell</i> yang berisi air [kg]
$m_{PV}$	Massa <i>charging cell</i> kosong [kg]
$V_{PV}$	Volume <i>charging cell</i> [m <sup>3</sup> ]
$V_{kosong} = V_{void}$	Volume <i>measuring cell</i> yang berisi adsorben [m <sup>3</sup> ]
$V_{MC}$	Volume <i>measuring cell</i> kosong [m <sup>3</sup> ]
Huruf Yunani	
$\rho_{air(T,P)}$	Massa jenis air pada tekanan dan temperatur saat pengukuran
$\pi$	3,14
$\theta$	Bagian permukaan yang tertutupi oleh adsorbat
$\alpha$	Koefisien perekatan
$\tau_a$	Rata-rata waktu tunggu adsorpsi
$\rho_{cc}$	Massa jenis adsorbat pada tekanan dan temperatur di <i>charging cell</i> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_{d\infty}$	Rata-rata waktu tunggu desorpsi
$\rho_{mc}$	Massa jenis adsorbat pada tekanan dan temperatur di <i>measuring cell</i> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\delta$	Deviasi [%]

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 LATAR BELAKANG**

Selama bertahun-tahun, bahan bakar fosil nyaris menjadi satu-satunya sumber energi di planet ini. Sehingga tidak heran kalau tahun-tahun belakangan ini kita dihadapkan dengan berbagai masalah. Ketika dibakar untuk menghasilkan energi, bahan bakar fosil ini melepaskan karbon ke udara. Pelepasan karbon ini menyebabkan polusi dan merusak ozon, membuat bumi yang kita diami semakin panas. Meningkatnya produksi karbon hasil pembakaran bahan bakar fosil ini belakangan disinyalir telah menyebabkan fenomena pemanasan global (Global Warming).

Masalah dengan bahan bakar fosil ini tidak hanya sampai di situ. Besarnya konsumsi bahan bakar ini dalam seabad terakhir, membuat fakta menipisnya cadangan bahan bakar ini tidak bisa kita hindari. Sementara itu, ketika cadangan bahan bakar fosil semakin menipis, kebutuhan atas energi bukannya turun malah semakin hari semakin tinggi. Akibatnya sesuai prinsip ekonomi penawaran dan permintaan, maka tanpa bisa dihindari harga bahan bakar ini pun semakin hari semakin melambung tinggi.

Hal ini tentu sangat mengkhawatirkan, karena kalau sampai terjadi dan manusia belum menemukan alternatif lain sebagai sumber energi maka krisis energi parah tidak akan dapat dielakkan. Karena alasan itulah, belakangan kita melihat mulai banyak usaha manusia untuk mulai memanfaatkan sumber energi terbarukan dengan lebih maksimal. Sumber energi terbarukan itu bisa berupa tenaga matahari, angin, air, panas bumi, bio massa, gelombang laut dan hidrogen. Dibandingkan semua energi terbarukan yang lain, hidrogen memiliki beberapa keunggulan antara lain bahan bakar hidrogen bersifat mobile seperti bahan bakar fosil yang kita kenal selama ini. Bedanya, tidak seperti bahan bakar fosil, pembakaran hidrogen tidak menyebabkan polusi karbon. Ketika terbakar, hidrogen melepaskan energi berupa panas dan menghasilkan air sebagai

bahan buangan ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ ). Sama sekali tidak mengeluarkan polutan karbon.

Dibanding bahan bakar fosil yang umum kita gunakan selama ini, bensin dan solar, pemakaian hidrogen sebagai bahan bakar jauh lebih efektif dalam pembakaran hampir 3 kali lipat dari panas yang bisa dihasilkan oleh pembakaran bensin dan solar. Keunggulan lain dari hidrogen adalah jumlahnya di alam ini sangat melimpah, 93 % dari seluruh atom yang ada di jagat raya ini adalah hidrogen, unsur yang paling sederhana dari semua unsur yang ada di alam ini. Tiga perempat dari massa jagat raya ini adalah hidrogen. Di bumi sendiri bentuk hidrogen yang paling umum kita kenal adalah air ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Walaupun memiliki banyak keunggulan, penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar juga memiliki kekurangan yaitu dalam hal penyimpanannya. Hidrogen dalam suhu kamar dan tekanan atmosfer berbentuk fase gas sehingga memiliki rasio energi yang sangat rendah terhadap volumenya jika disimpan dalam bentuk gas. Penelitian berkaitan dengan metode dan material untuk menyimpan Hidrogen terus dilakukan, dengan hasil sejauh ini adalah kesimpulan bahwa penyimpanan hidrogen memakai prinsip adsorpsi dengan karbon aktif berbentuk granular sebagai adsorben sangat menjanjikan karena bisa menurunkan tekanan dalam tangki dengan kapasitas penyimpanan yang relatif sama.

Setelah penelitian daya adsorpsi hidrogen pada karbon aktif dalam bentuk granular mulai mapan, maka penelitian mulai mengarahkan pada usaha meningkatkan daya adsorpsi dari karbon aktif yang salah satunya dapat dilakukan dengan menjadikan partikelnya berukuran nano sehingga akan lebih banyak memiliki mikropori yang akan meningkatkan kemampuan adsorpsinya.

## **1.2. PERUMUSAN MASALAH**

Mengembangkan teknologi penyimpanan hidrogen yang aman, handal, kompak, dan hemat biaya adalah salah satu hambatan teknis paling menantang untuk meluasnya penggunaan hidrogen sebagai bentuk energi. karena hidrogen

memiliki karakteristik fisik yang membuatnya sulit untuk disimpan dalam jumlah besar tanpa menyita sejumlah besar ruang.

Karena hidrogen adalah berupa gas pada temperatur dan tekanan atmosfer maka kendala terbesar penggunaannya selama ini adalah penyimpanannya dimana membutuhkan konstruksi tangki kuat untuk menahan tekanannya yang bisa mencapai 2000 Psi, maka kemungkinan untuk disimpan dengan menggunakan metode adsorpsi semisal karbon aktif menjadi sangat menarik karena menjanjikan penurunan tekanan yang cukup signifikan dengan kapasitas penyimpanan yang sama.

Salah satu cara untuk meningkatkan daya adsorpsi dari suatu adsorben adalah dengan menjadikan sebanyak mungkin pori adsorben (karbon aktif) yang termasuk kategori micropore yang sesuai dengan ukuran molekul hidrogen yang menjadi adsorbate. Dengan semakin besarnya prosentase mikropori yang dihasilkan dibandingkan makropori dan mesoporinya, maka kemampuan adsorpsi dari adsorben tersebut diharapkan akan meningkat. Salah satu cara untuk itu adalah dengan membuatnya menjadi partikel berukuran nano melalui ball-milling proses.

### **1.3. TUJUAN PENELITIAN**

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan kapasitas adsorpsi dari karbon aktif komersial yang berasal dari batu bara Indonesia kelas rendah dan Tempurung Kelapa dalam bentuk granular dibandingkan dengan Nano partikel karbon aktif dari bahan yang sama yang telah melalui proses mechanical ball milling selama 30 jam.

### **1.4. BATASAN MASALAH**

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah meneliti perbandingan kemampuan adsorpsi karbon aktif komersial yang berasal dari batu bara Indonesia kelas rendah dan Tempurung Kelapa dalam bentuk granular dibandingkan dengan Nano partikel karbon aktif dari bahan yang sama yang telah melalui proses mechanical ball milling selama 30 jam.

## 1.5. SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan disertasi ini terdiri atas 5 bab, daftar pustaka dan lampiran, adapun kelima bab tersebut adalah sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan. Terdiri atas latar belakang, tujuan Penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

Bab 2 Landasan Teori. Terdiri atas teori dasar yang terdiri atas teori-teori yang mendasari penelitian ini. Teori dasar ini meliputi teori dasar karbon aktif dan teori dasar adsorpsi isothermal.

Bab 3 Metodologi Penelitian. Terdiri atas metode penelitian yang dilakukan untuk mendapatkan data kemampuan adsorpsi karbon aktif komersial yang berasal dari batu bara Indonesia kelas rendah dan Tempurung Kelapa dalam bentuk granular dibandingkan dengan Nano partikel karbon aktif dari bahan yang sama yang telah melalui proses mechanical ball milling selama 30 jam dengan menggunakan metode adsorpsi volumetrik.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan. Berisi tentang data dan analisis data yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan. Data propertis karbon aktif yang didapat dari hasil penelitian berupa kadar karbon, distribusi keteraturan pori, partikel size analisis, hasil scanning electron microscope, diameter porositas, volume porositas dan luas permukaan karbon aktif.

Data adsorpsi isothermal adalah data kapasitas penyerapan gas H<sub>2</sub> pada karbon aktif dari batu bara dan Tempurung Kelapa dalam bentuk granular dan nano partikel pada temperatur -5<sup>0</sup>C, dan 25<sup>0</sup>C dengan tekanan sampai dengan 4 MPa.

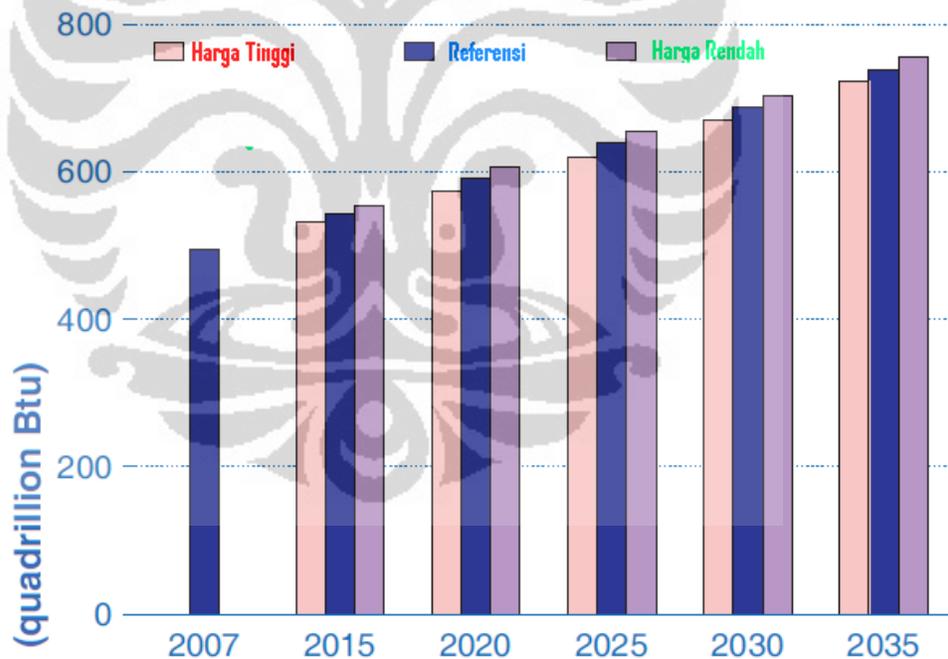
Bab 5 Kesimpulan. Berisi kesimpulan yang didapat dari penelitian yang dilakukan termasuk hubungan antara kualitas karbon aktif dengan kapasitas penyerapannya.

Daftar Pustaka. Berisi beberapa sumber baik dalam bentuk buku maupun dalam bentuk paper serta jurnal yang digunakan sebagai referensi dalam penelitian ini.

## BAB II. STUDI PUSTAKA

### 2.1 Energi, ekonomi dan lingkungan

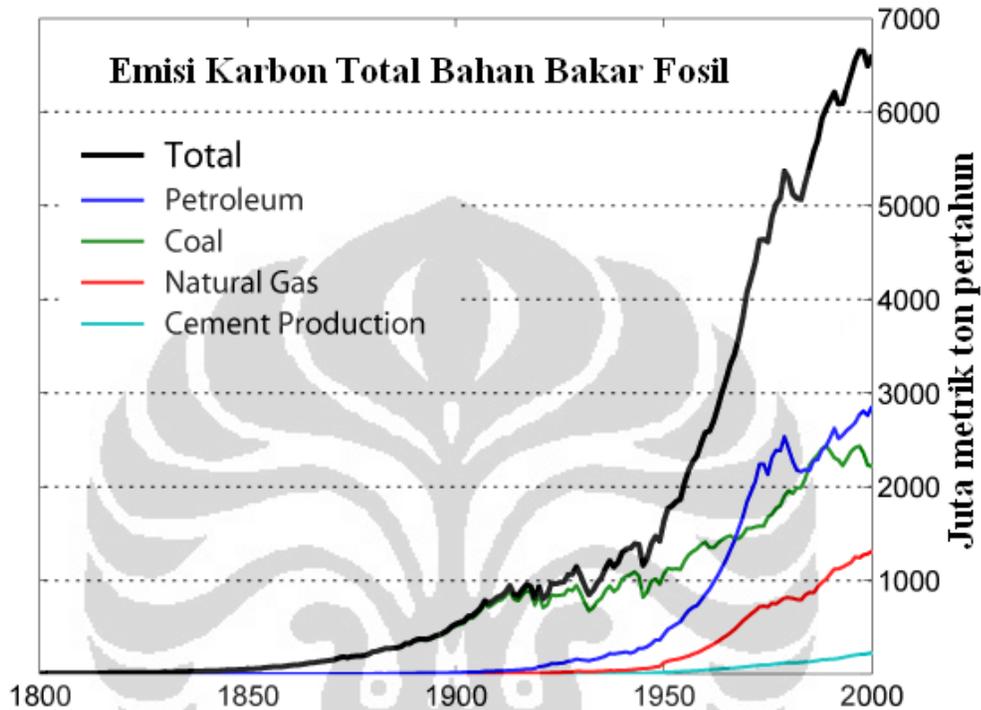
Kegiatan perekonomian dunia yang semakin berkembang seiring meningkatnya populasi membutuhkan sumber energi yang sangat besar dan tidak tidak lagi bisa mengandalkan satu jenis sumber energi. Sebagai konsekuensi logis, manusia berusaha untuk memenuhi kondisi tersebut. Berbagai sumber energi primer telah dimanfaatkan oleh manusia untuk memenuhi kebutuhan akan energi. Dari berbagai sumber energi primer yang telah dimanfaatkan oleh manusia, hampir seluruhnya didominasi oleh bahan bakar yang berdasarkan karbon. Jika dilihat dari konsumsi minyak mentah sebagai wakil dari sumber energi primer, jumlahnya terus meningkat dari tahun ketahun.



Gambar 2.1 Pertumbuhan Konsumsi Minyak Bumi Dunia

Sumber : International energy Outlook, DOE 2010

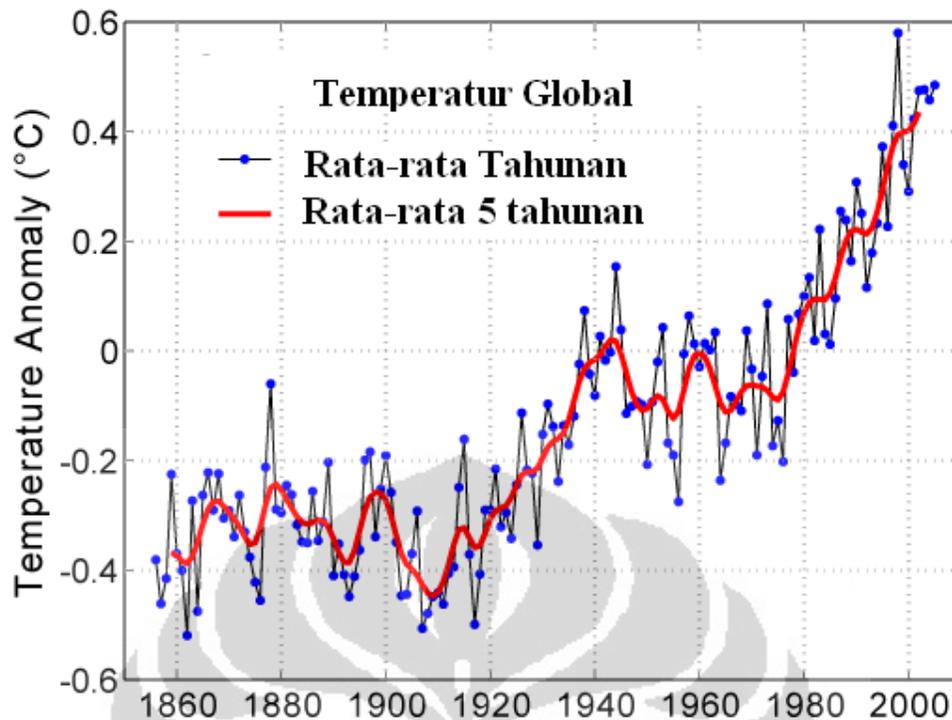
Penggunaan bahan bakar berbasis karbon menghasilkan gas buang yang salah satunya adalah karbon dioksida. Seiring dengan meningkatnya penggunaan bahan bakar berbasis karbon tersebut, maka jumlah karbon dioksida yang dihasilkannya pun meningkat. Berikut ini grafik yang menggambarkan peningkatan jumlah karbon dioksida sebagai gas buang dari tahun ketahun.



Gambar 2.2 Peningkatan Jumlah Emisi akibat pemakaian bahan bakar berbasis Karbon

Sumber : institute of climate studies, USA

Meningkatnya konsentrasi Carbon dioksida Di udara dituding banyak ahli lingkungan sebagai penyebab meningkatnya temperatur dunia akibat efek rumah kaca. Fenomena tersebut saat ini menjadi perhatian utama segenap penduduk di muka bumi ini. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai alternatif pemecahan telah banyak dikembangkan. Salah satu alternatif yang banyak diperbincangkan adalah peralihan paradigma ekonomi berdasarkan karbon menjadi paradigma ekonomi berdasarkan hidrogen

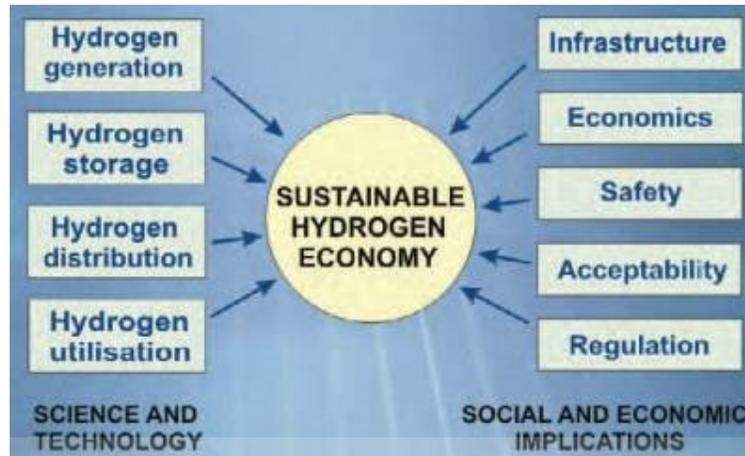


Gambar 2.3 Peningkatan Suhu Rata-rata Permukaan bumi

Sumber : schlumberger excellence in educational development

## 2.2 Ekonomi Berdasarkan Hidrogen

Ekonomi Hidrogen adalah Paradigma yang menawarkan cara berfikir dengan mendasarkan pada hidrogen untuk memenuhi kebutuhan energi dalam mengerjakan aktifitas ekonomi. Perlunya perubahan paradigma ini didasarkan pada beberapa hal sebagai berikut: upaya penyelamatan lingkungan global, pencegahan polusi di tingkat lokal, polusi kebisingan, serta dalam upaya menjamin kebutuhan energi dunia. Seperti diketahui hidrogen merupakan salah satu elemen yang menghasilkan energi jika direaksikan dengan oksigen. Faktor lebih dari penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar adalah menghasilkan gas buang air dan pengotor mikro lainnya, bukan karbon dioksida seperti yang dihasilkan oleh bahan bakar berbasis karbon. Oleh *Energy Saving Trust*, Inggris, digambarkan bahwa hidrogen merupakan bahan bakar yang menjanjikan untuk menghasilkan *zero carbon* pada moda transportasi.



**Gambar 2.4 skema ekonomi Hidrogen**

Sumber :United Kingdom Sustainable Hydrogen Energy Consortium

Sebenarnya penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar sudah dilakukan sejak lama. Di Inggris, hidrogen dengan komposisi hingga 50% dijadikan bahan pencampur untuk gas kota pada tahun 1950-an. Selain itu, hidrogen juga telah digunakan sebagai bahan bakar roket. Jika dirunut lebih belakang lagi, ketertarikan akan penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar sudah terjadi pada tahun 1800-an. Ketertarikan tersebut kembali muncul sekitar tahun 1970-an ketika terjadi krisis minyak dan kembali lagi pada tahun 1980-an setelah berkembangnya teknologi produksi dan penyimpanan hidrogen.

### **2.2.1 Transisi Ekonomi Hidrogen**

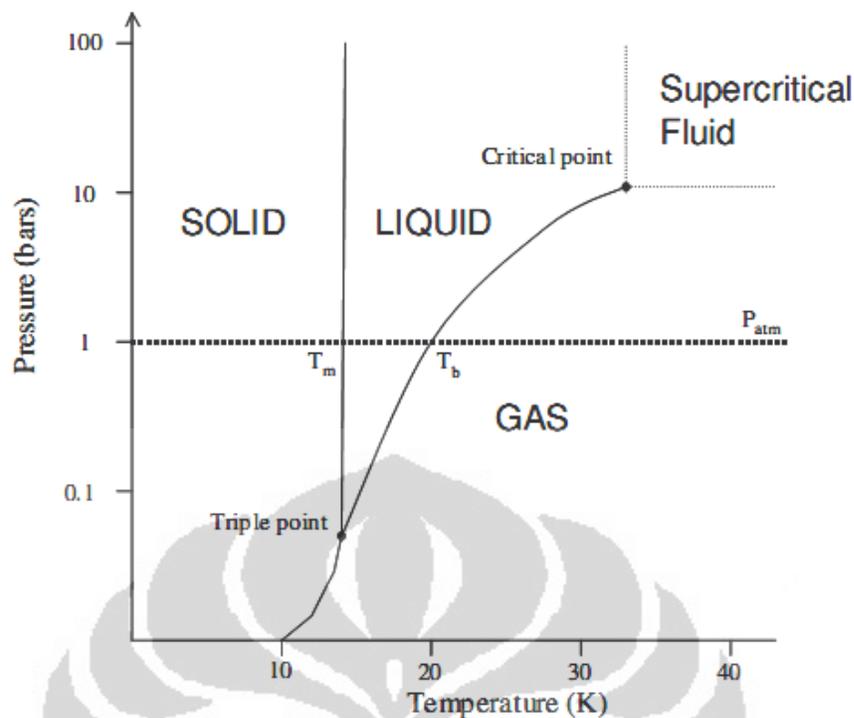
Harus diakui bahwa transisi menuju ekonomi hidrogen penuh ketidakpastian dan juga tidak bisa dihindari. Hal ini disebabkan transisi ekonomi hidrogen membutuhkan infrastruktur dengan investasi yang cukup besar. Beberapa analis memperkirakan bahwa setidaknya ada dua penyebab utama yang memperlambat proses transisi ekonomi hidrogen. Penyebab utama tersebut antara lain: hidrogen membutuhkan biaya yang cukup tinggi karena membutuhkan jalur distribusi yang cukup banyak; untuk kendaraan bermotor, membutuhkan infrastruktur yang cukup banyak.

## 2.4 Hydrogen

Hidrogen ditemukan pada 1766 oleh Henry Cavendish dan dinamai oleh Lavoisier dari kata Yunani hydro yang berarti air dan gen makna generator. Ini adalah elemen pertama dari tabel periodik dan unsur yang paling melimpah di alam semesta, Hydrogen merupakan 90 persen dari unsure alam semesta menurut beratnya. Namun, tidak umum ditemukan dalam bentuknya yang murni, karena mudah menggabungkan dengan unsur-unsur lainnya. Hidrogen tidak berasa, tidak berwarna, tidak berbau, dan non-gas beracun dalam kondisi normal di Bumi. Hydrogen biasanya ada sebagai molekul diatomik, yang berarti setiap molekul memiliki dua atom hydrogen, ini adalah mengapa hidrogen murni biasanya dinyatakan sebagai "H<sub>2</sub>".

### 2.3.1 Hydrogen properties

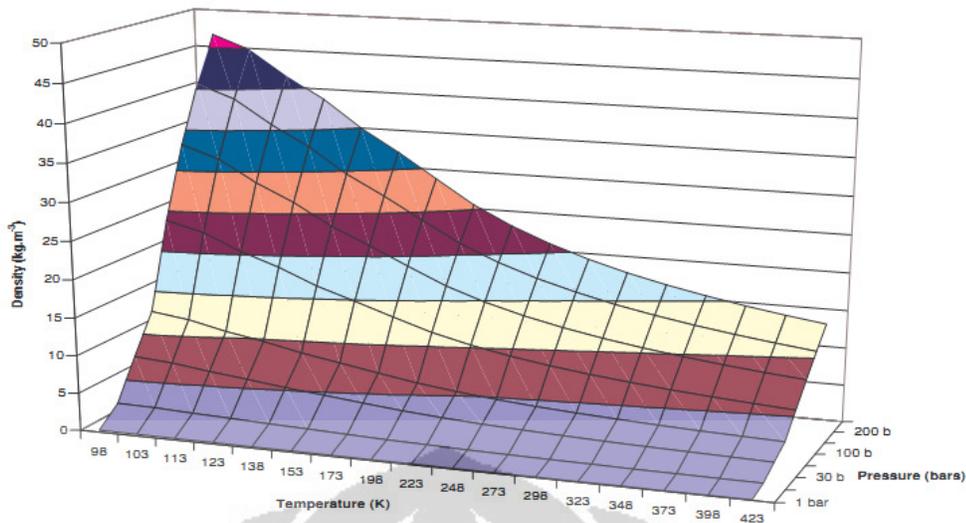
Hidrogen ini paling sering dilihat sebagai gas atau cairan, dan pada kondisi kamar itu adalah gas. hydrogen memiliki nomor atom 1, berat molekul 2,016 g.mol<sup>-1</sup> dan dimensi molekul yang bervariasi 3,1-2,4 Angstrom. Molekul hidrogen pada kondisi atmosfer adalah campuran dari 75% dari orto-hidrogen dan 25% para-hidrogen, dua bentuk isometrik dibedakan oleh berbagai spin nuklir nya. Berbagai stabil di bawah -253 ° C adalah para-hidrogen, dan komposisi kesetimbangan diperoleh pada -73 ° C. Diagram fase hidrogen ditunjukkan di bawah ini, dengan titik tiga di -259,1 ° C dan 0,07 bar bar dan titik kritis pada -239,8 ° C dan 13. Pada tekanan atmosfer titik didih (T<sub>b</sub>) adalah pada -253 ° C dan titik leleh (T<sub>m</sub>) pada -259 ° C. Garis putus-putus adalah hipotetik, dengan mengingat bahwa informasi yang paling penting dari diagram fase menjadi transisi fase pada tekanan atmosfer dan titik-titik triple dan kritis.



Gambar 2.5 Diagram Phase Hydrogen

Density hidrogen pada tekanan atmosfer sebagai gas (pada suhu kamar) adalah  $0,09 \text{ kg.m}^{-3}$ , sebagai cairan (pada  $-253 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $70,8 \text{ kg.m}^{-3}$  dan sebagai padat (pada  $-262 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $70,6 \text{ kg.m}^{-3}$ . Titik kritis untuk hidrogen pada tekanan 13 bar dan suhu sekitar  $-240 \text{ }^\circ\text{C}$ , yang berarti bahwa pada setiap suhu diatas  $-240 \text{ }^\circ\text{C}$  hidrogen tetap gas pada tekanan berapapun, dan tidak akan pernah menjadi cair pada suhu kamar. Untuk hidrogen cair, suhu harus dijaga antara  $-240 \text{ }^\circ\text{C}$  dan  $-259 \text{ }^\circ\text{C}$  dengan tekanan yang sesuai. Semakin rendah suhu yang lebih rendah tekanan yang dibutuhkan untuk hidrogen menjadi cair.

Hidrogen sebagai gas sangat sensitif terhadap fluktuasi suhu dan / atau tekanan dan variasi density gas sebagai fungsi tekanan dan temperatur ditunjukkan di bawah ini. Density gas meningkat dengan suhu turun pada tekanan konstan, dan pada suhu konstan semakin besar tekanan yang lebih besar kepadatan gas. Dalam rangka untuk meningkatkan densitas pada suhu konstan tekanan harus ditingkatkan, dan sama, untuk meningkatkan densitas gas pada tekanan konstan, suhu harus dikurangi.



**Gambar 2.6 Densitas Hydrogen terhadap temperatur dan tekanan**

Sumber : David LANGOHR, Ecole Des mines de Paris, These

### 2.3.2 *Hydrogen Storage*

*Hydrogen storage* saat ini menjadi kendala terbesar dalam upaya untuk membuat penggunaan *hydrogen* menjadi lebih komersial, melihat tantangan tersebut banyak peneliti yang menjadikan Hydrogen sebagai topic riset utama. Penyimpanan *hydrogen* yang *feasible* haruslah *cost-effective* dan harus memenuhi standar international yang terkait dengan lingkungan dan keselamatan.

Berbagai teknologi penyimpanan gas hidrogen telah dikembangkan dengan mempertimbangkan biaya, berat dan volume, efisiensi, keawetan, waktu pengisian dan pengosongan (charge and discharge), temperatur kerja serta efisiensinya.

#### 1. Tangki bertekanan tinggi

Merupakan teknologi yang paling umum dan simpel walaupun secara volumetrik dan grafimetrik tidak efisien. Semakin tinggi tekanan, semakin besar energi per unit volume. Hidrogen tidak terkompresi mempunyai densitas energi 10,7 kJ/L, pada saat dikompresi pada tekanan 750 bar, densitas energinya meningkat menjadi 4,7 MJ/L. Namun masih jauh lebih kecil daripada gasoline, yaitu 34,656 MJ/L

## 2. Tangki hidrogen cair (Cryogenic)

Pada teknologi ini, gas hidrogen dicairkan pada suhu yang sangat rendah. Pada tekanan 1 atm, dibutuhkan temperatur hingga 22 K. Energi untuk mendinginkan hidrogen cukup energi yang besar, hingga mencapai 1/3 dari energi yang disimpan. Densitas energi hingga mencapai 8,4 MJ/L. Walaupun sangat berat, namun volumenya lebih kecil daripada tangki tekanan tinggi sehingga cocok untuk aplikasi statis.

## 3. Logam dan alloy

Logam atau paduan logam (alloy) menyerupai sponge yang dapat menyerap hidrogen. Hidrogen akan terabsorpsi pada ruang interstitial pada kisi kristal logam sehingga hidrogen tidak mudah terbakar dan lebih aman. Contohnya: TiFe (1,5 wt%) dan Mg<sub>2</sub>NiH<sub>4</sub> (3,3 wt%).

## 4. Kimiawi

Pada metode ini, hidrogen disimpan dalam bentuk senyawa kimia lain yang lebih aman. Pada saat akan digunakan, baru senyawa ini diubah menjadi hidrogen melalui reaksi kimia.

### a. Metanol

Infrastruktur untuk distribusi metanol sangat mudah karena sama dengan gasolin. Pada saat digunakan, metanol akan diubah menjadi gas H<sub>2</sub> dengan melepaskan gas CO dan CO<sub>2</sub>.

### b. Ammonia

Efisiensi volumetrik sedikit lebih tinggi daripada metanol namun bersifat toksik. Harus dikatalisi pada suhu 800-900 oC agar dapat melepaskan hidrogen. Biasanya didistribusikan dalam bentuk cair pada tekanan 8 atm.

c. Hidrida logam

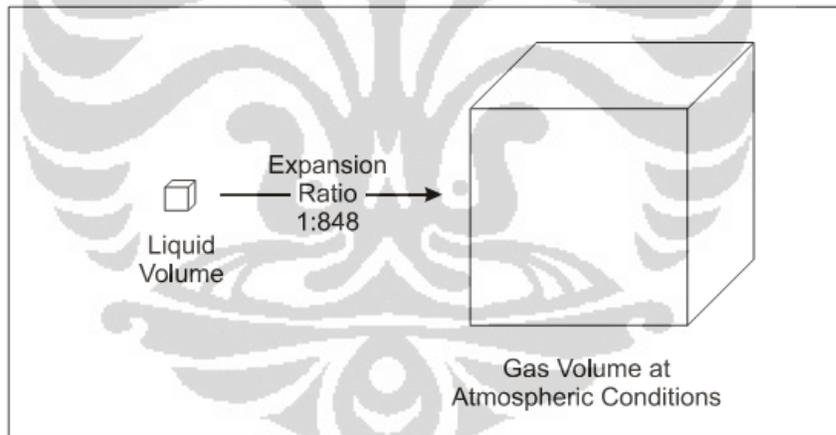
Merupakan senyawa reaktif yang akan segera melepaskan hidrogen apabila bereaksi dengan air. Contohnya adalah NaH, LiH, NaAlH<sub>4</sub>, NaBH<sub>4</sub>, LiBH<sub>4</sub>, dan CaH<sub>2</sub>

5. *Adsorpsi Storage*

Pada metode ini, hidrogen diadsorpsi pada permukaan bahan berpori seperti nanofiber grafit, nanotube karbon, zeolit dan *Metal Organic Framework* (MOF)

2.3.2.1 *Adsorption Hydrogen Storage*

Teknologi penyimpanan memiliki posisi paling strategis dalam isu aplikasi Hidrogen sebagai sumber energi karena hidrogen memiliki karakteristik fisik yang membuatnya sulit untuk disimpan dalam jumlah besar tanpa menyita sejumlah besar ruang.

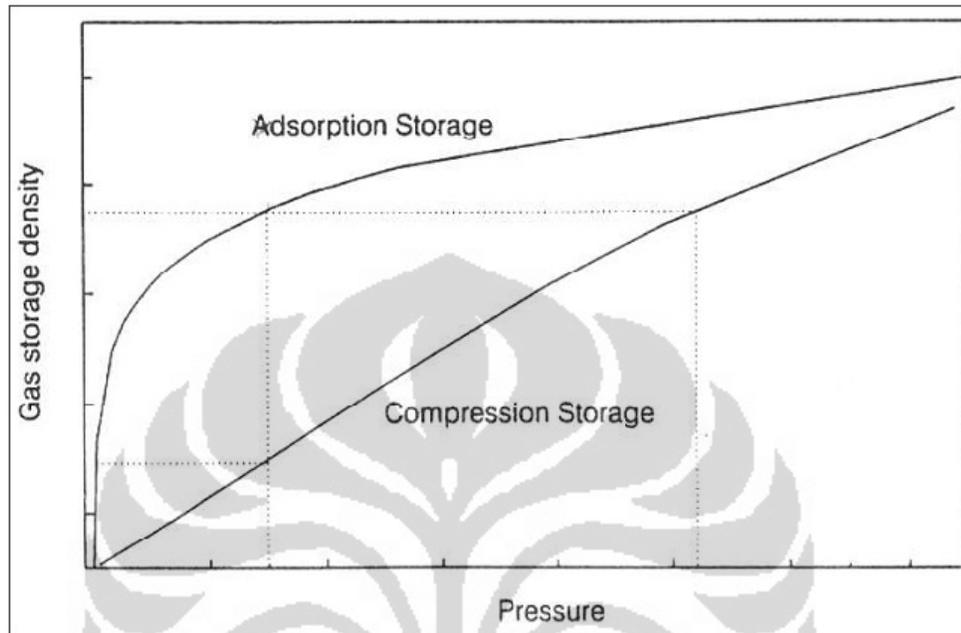


Gambar 2.7 Rasio Ekspansi Hydrogen dalam fase cair dan gas

Sumber : David LANGOHR, Ecole Des mines de Paris, These

Karena hidrogen adalah berupa gas dalam temperatur dan tekanan atmosfer, maka kemungkinan untuk disimpan dengan menggunakan metode adsorpsi semisal karbon aktif menjadi sangat menarik. Material karbon aktif dapat dengan mudah untuk mengikat dan melepas *hydrogen* melalui mekanisme adsorpsi dan desorpsi. Hal ini menjadikan *hydrogen storage* dengan menggunakan material karbon aktif menjanjikan sebagai teknologi penyimpanan Hydrogen

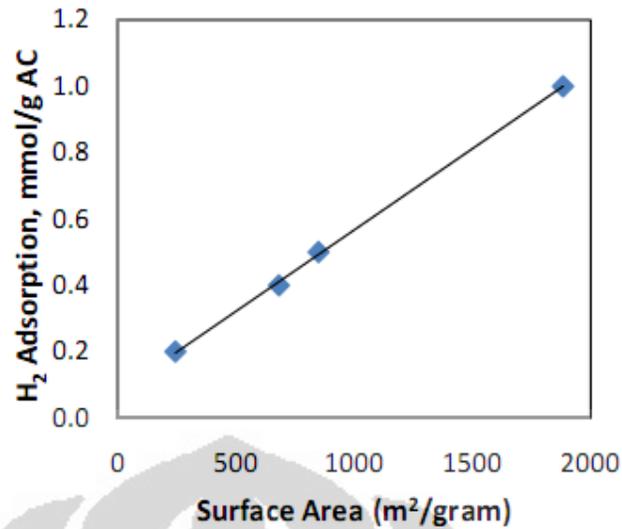
dimasa yang akan datang. Dengan mengadsorpsi Hydrogen pada karbon aktif, fase hydrogen akan berubah dari gas ke fase mendekati cair sehingga memungkinkan untuk menurunkan tekanan pada kapasitas penyimpanan yang sama atau meningkatkan kapasitas penyimpanan dengan tekanan yang sama.



**Gambar 2.8** Komparasi *Asorption storage* dan *Compression Storage*

Sumber : David LANGOHR, Ecole Des mines de Paris, These

Metode penyimpanan hydrogen dengan menggunakan system adsorpsi dalam material karbon dapat dilihat sebagai sebuah proses dengan dua mekanisme yaitu adsorpsi awal dari hydrogen pada permukaan dari adsorben dan mass transfer dari hydrogen molekul masuk ke bagian dalam dari adsorben. Kapasitas adsorpsi sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor yang saling mempengaruhi dan dalam proses yang kompleks, misalnya luas permukaan, ukuran pori, jenis permukaan, komposisi permukaan adsorben dan temperatur serta tekanan kerjanya. Dari parameter-parameter tersebut, ada dua parameter yang cukup penting untuk melihat pengaruh terhadap daya adsorpsinya yaitu struktur pori dan luas permukaan spesifik.



**Gambar 2.9. Hubungan luas permukaan dan kapasitas penyerapan Hidrogen pada 4 mpa**  
( Mahmud sudibandriyo 2001 )

Beberapa pengujian daya serap karbon aktif terhadap hydrogen untuk jenis adsorben yang berbeda serta temperatur kerja yang bervariasi sebagaimana terlihat pada Tabel 1.1.

**Tabel 1.1 Pengujian Daya Serap Hidrogen pada Karbon Aktif**

<b>Material</b>	<b>Temperatur</b>	<b>Loading</b>
AC Maxorb	303 K	0,67 wt%
ACF	77 K	5,4 wt%
AC Maxorb	303 K	2,6 w%
SWCNT	77 K	4,5 w%
CNT	298 K	2 w%
AC	77 K	2,02 w%
ACF	77 K	3,8 w%
AC	77 K	4,5 w%

Material karbon aktif yang digunakan sebagai adsorben yang baik untuk gas storage harus memiliki kapasitas adsorpsi yang cukup tinggi dalam basis volumetrik. Untuk mencapai kondisi ini karbon harus:

- a. Jumlah mikropori yang besar, karena mikropor merupakan komponen yang banyak menyerap molekul yang kecil
- b. Memiliki bentuk yang sangat kompak, hal ini akan meningkatkan bulk density dan akhirnya juga *volumetric storage capacity*
- c. Memiliki ukuran pori yang sesuai dengan diameter molekul adsorbat, yang akan mengoptimalkan jumlah zat yang teradsorpsi
- d. Memiliki mesoporosity yang relatif rendah, karena mesopori memiliki kontribusi yang kecil terhadap kapasitas adsorpsi dan mengurangi bulk density
- e. Memiliki global heat and mass transfer dari material karbon yang cukup tinggi

#### **2.4. Mekanise Adsorpsi Hydrogen pada karbon aktif**

Adsorpsi merupakan suatu peristiwa dimana molekul-molekul dari suatu senyawa terikat oleh permukaan zat padat. Molekul-molekul pada zat padat atau zat cair memiliki gaya dalam keadaan tidak setimbang dimana gaya kohesi cenderung lebih besar dari pada gaya adhesi. Ketidaksetimbangan gaya-gaya tersebut menyebabkan zat padat atau zat cair tersebut cenderung menarik zat-zat lain atau gas yang bersentuhan pada permukaannya. Fenomena konsentrasi zat pada permukaan padatan atau cairan disebut fasa teradsorbat atau adsorbat sedangkan zat yang menyerap atau menariknya disebut adsorben.

Dua prinsip penyimpanan hidrogen pada beberapa material adsorben

- a) Penyerapan molekul hidrogen pada permukaan seperti *physisorption* (penyerapan fisika).

Adsorpsi fisika terjadi bila gaya intermolekular lebih besar dari gaya intramolekular. Gaya intermolekular adalah gaya tarik menarik antar molekul-molekul fluida itu sendiri sedangkan gaya intramolekular adalah gaya tarik menarik antara molekul fluida dengan molekul permukaan padatan.

Di dalam penyerapan ini, adsorbat ditahan pada bagian permukaan karbon karena adanya fluktuasi distribusi muatan listrik yang lemah. Adsorpsi ini dapat berlangsung di bawah temperatur kritis adsorbat yang relatif rendah.

Adsorpsi menurun dengan meningkatnya temperatur. Energi aktivasi yang terjadi untuk adsorpsi biasanya tidak lebih dari 1 Kkal/g.mol. Oleh karena itu gaya yang dilibatkan pada adsorpsi fisika adalah gaya *Van Der Waals* yaitu gaya tarik menarik yang relatif lemah antara permukaan adsorben dengan adsorbat. Dengan demikian adsorbat tidak terikat secara kuat pada permukaan adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan ke bagian permukaan lainnya. Dan pada permukaan yang ditinggalkan oleh adsorbat yang satu dapat digantikan oleh adsorbat lainnya. Bila dalam keadaan kesetimbangan kondisinya diubah misalnya tekanan diturunkan atau temperatur dinaikkan maka sebagian adsorbat akan terlepas dan akan membentuk kesetimbangan baru.

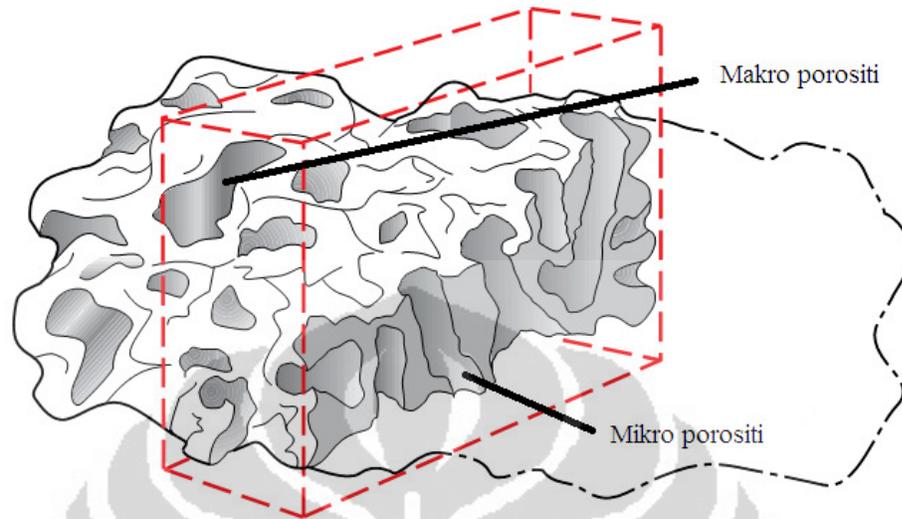
Proses adsorpsi fisika terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi sehingga pada proses tersebut akan membentuk lapisan *multilayer* pada permukaan adsorben. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi fisika dapat diputuskan dengan mudah.

b) Atom-atom hidrogen larut dan membentuk ikatan kimia seperti *chemisorption* (penyerapan kimia)[19].

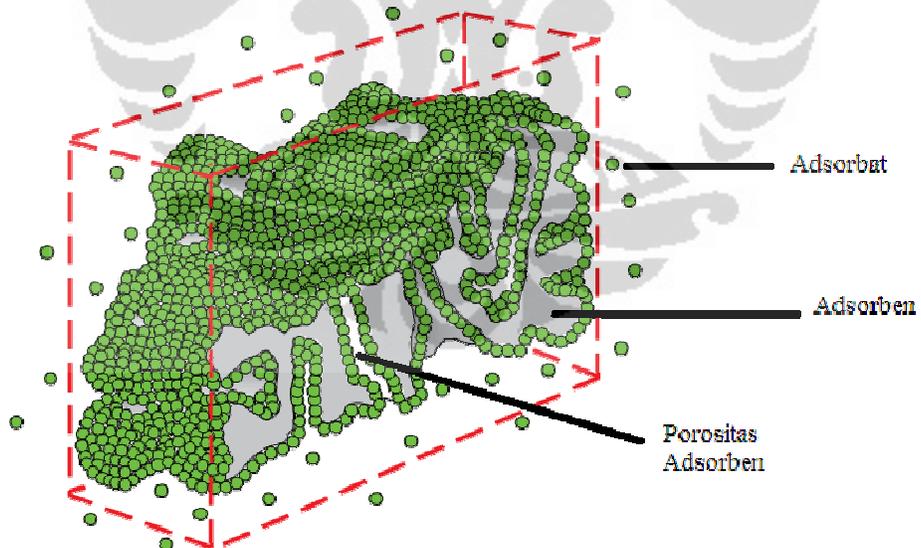
Adsorpsi jenis ini merupakan adsorpsi yang terjadi karena terbentuknya ikatan kovalen dan ion antara molekul-molekul adsorbat dengan adsorben. Ikatan yang terbentuk merupakan ikatan yang kuat sehingga lapisan yang terbentuk adalah lapisan *monolayer*. Yang paling penting dalam adsorpsi kimia adalah spesifikasi dan kepastian pembentukan *monolayer*. Pendekatannya adalah dengan menentukan kondisi reaksi sehingga hanya adsorpsi kimia yang terbentuk dan hanya terbentuk *monolayer*.

Fisisorpsi membatasi rasio hidrogen ke karbon kurang dari satu atom hidrogen perdua atom karbon (4.2 % massa). Berbeda dengan kemisorpsi, rasio pada dua atom hidrogen persatu karbon yang diwujudkan dalam kasus polietilen [16]. Gaya *Van Der Waals* sering terjadi pada atom molekul non-polar (beberapa hidrokarbon adalah molekul non polar). Penyerapan secara fisika memiliki sebuah ikatan energi secara normal biasanya dari urutan 0.1 eV sedangkan penyerapan

secara kimia memiliki ikatan kovalen C-H , dengan energi yang meningkat dari 2-3eV[16].



Gambar 2.10 Potongan Melintang Material karbon Aktif



Gambar 2.11 Proses Adsorpsi Pada Karbon Aktif

Faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi adalah (Hammer, 1977 dikutip petrus, 1996) :

1. Karakteristik fisik dan kimia dari adsorben seperti luas permukaan, ukuran pori-pori, komposisi dan lain-lain.
2. Karakteristik fisik dan kimia dari zat terlarut yang teradsorpsi, seperti ukuran molekul, polaritas molekul, komposisi kimia, PH, suhu dan lain sebagainya.
3. Konsentrasi zat terlarut yang teradsorpsi.
4. Waktu kontak.

## 2.5. Adsorpsi Equilibrium

Pada sistem adsorbat-adsorben, jumlah adsorbat yang terserap pada kondisi equilibrium adalah merupakan fungsi dari tekanan dan temperatur (Bansal, R.C. dkk., 2005);

$$\frac{x}{m} = f(p, T) \quad (2.1)$$

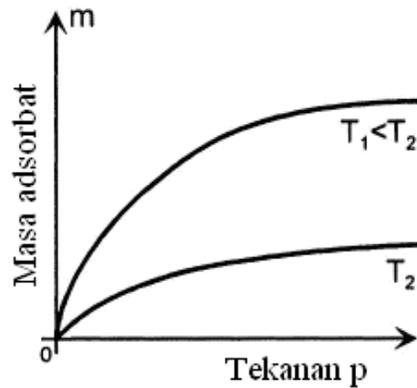
Dimana,  $x/m$  adalah jumlah adsorbat yang terserap per unit massa adsorben pada tekanan equilibrium dan pada temperatur adsorpsi.

Adsorpsi equilibrium dapat didekati dalam tiga cara, yaitu:

### 2.5.1. Adsorpsi Isotermal

Pada adsorpsi isotermal, temperatur adsorpsi dijaga konstan dengan demikian  $x/m$  tergantung pada tekanan equilibrium sehingga jumlah adsorbat yang terserap adalah (Bansal, R.C. dkk., 2005):

$$\frac{x}{m} = f(p) \quad [T = \text{konstan}] \quad (2.2)$$



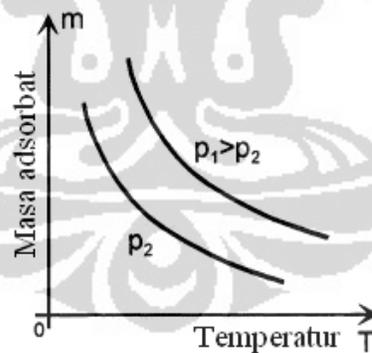
Gambar 2.12 Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isotermal

(Keller, Jurgen., 2005)

### 2.5.2. Adsorpsi Isobar

Pada adsorpsi isobar, tekanan adsorpsi dijaga konstan dan temperatur adsorpsi divariasikan dengan demikian  $x/m$  adalah (Bansal, R.C. dkk., 2005):

$$\frac{x}{m} = f(T) \quad [p = \text{konstan}] \quad (2.3)$$



Gambar 2.13 Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isobar

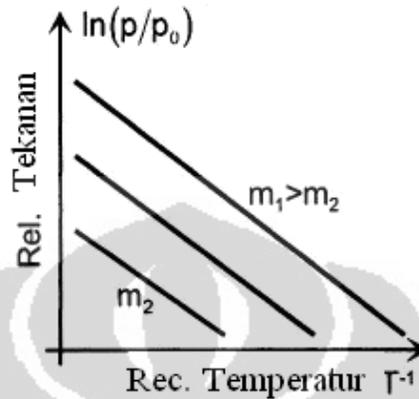
(Keller, Jurgen., 2005)

### 2.5.3. Adsorpsi Isosterik

Pada adsorpsi isosterik dimana jumlah adsorbat yang terserap per unit massa adsorben adalah konstan dan temperatur divariasikan sehingga tekanan menjadi

fungsi yang sangat esensial untuk menjaga  $x/m$  tetap konstan (Bansal, R.C. dkk., 2005).

$$p = f(T) \quad \left[ \frac{x}{m} = \text{kons tan} \right] \quad (2.4)$$



Gambar 2.14 Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi *Isostere*

(Keller, Jurgen., 2005)

Data eksperimen adsorpsi yang berupa jumlah adsorbat yang terserap pada adsorben biasanya dihasilkan dari proses adsorpsi isothermal, hal tersebut dikarenakan investigasi proses adsorpsi pada temperatur konstan adalah cara atau metode yang paling mudah. Selain itu, analisis teoritis data adsorpsi untuk asumsi pada pemodelan biasanya juga menggunakan data adsorpsi isothermal (Bansal, R.C. dkk., 2005).

Dikarenakan ketiga tipe adsorpsi equilibrium tersebut di atas adalah merupakan fungsi equilibrium, sehingga dimungkinkan untuk menghasilkan atau mendapatkan satu parameter dengan menggunakan parameter dari salah satunya (Bansal, R.C. dkk., 2005).

## 2.6 Metode Pengujian Adsorpsi

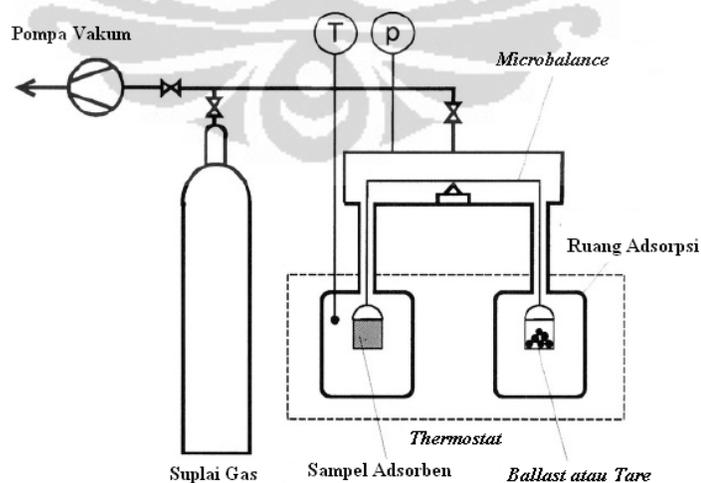
Terdapat empat metode pengukuran penyerapan adsorpsi, yaitu: metode *carrier gas*, metode volumetrik, metode gravimetrik dan metode kalorimetrik. Empat

metode pengukuran penyerapan adsorpsi tersebut telah digunakan di berbagai negara dan telah diakui secara internasional (Keller, J.U et al, 2002). Dalam tinjauan pustaka ini hanya akan dibahas dua buah metode yang paling banyak digunakan yaitu metode gravimetrik dan volumetrik.

### 2.6.1 Metode Gravimetrik

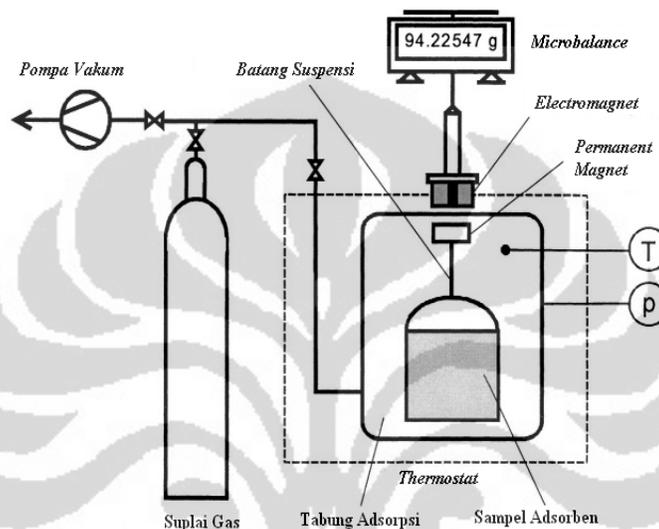
Metode gravimetrik memiliki akurasi untuk pengukuran paling tinggi diantara metode lain pada pengukuran adsorpsi isothermal. Pengukuran adsorpsi isothermal yang dapat dilakukan menggunakan metode gravimetrik, antara lain: massa yang terserap pada adsorben, tekanan gas dan temperatur. Alat yang digunakan untuk mengukur adsorpsi isothermal adalah *Thermograph Microbalance Aparatus* (TMA) (Rouquerol, J et al, 1998).

Preparasi sampel pengujian menggunakan metode gravimetrik mutlak dilakukan untuk mendapatkan pengujian yang optimum. Preparasi sampel dilakukan dengan *degassing* sampel untuk mendapatkan massa kering sampel serta temperatur, tekanan dan waktu untuk mendapatkan data pengujian yang valid (Keller, J.U et al, 2002). Alat uji adsorpsi menggunakan metode gravimetrik membutuhkan investasi yang cukup besar, karena untuk memiliki TGA dengan keakurasian tinggi harus menyediakan jutaan dollar (Rouquerol, J et al, 1998). Skematik *Thermograph Microbalance Aparatus* sebagai berikut:



Gambar 2.15 Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Two Beam Balance* (Keller, Jurgen., 2005)

Pada Gambar 2.15 terlihat skema metode gravimetrik dengan menggunakan *Two Beam Balance*, dimana sampel adsorben diletakkan di dalam tabung, dan selanjutnya ketika massa adsorben bertambah karena akibat terserapnya adsorbat, maka *microbalance* langsung membaca perubahan berat sampel adsorben tersebut.



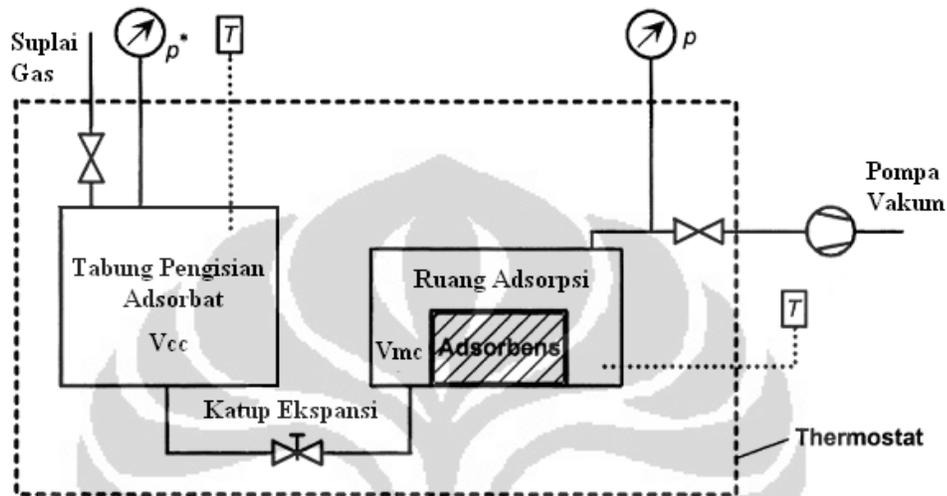
Gambar 2.16 Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Magnetic Suspension Balance* (Keller, Jurgen., 2005)

Pada Gambar 2.16 terlihat skema metode gravimetrik dengan menggunakan *Magnetic Suspension Balance*, dimana sampel adsorben diletakkan di dalam tabung dan selanjutnya ketika massa adsorben bertambah karena akibat terserapnya adsorbat, maka medan magnet juga akan berubah disebabkan karena adanya perubahan jarak antara *permanent magnet* dengan *electromagnet*.

### 2.6.2 Metode Volumetrik

Dasar pengukuran metode volumetrik adalah tekanan, volume, dan temperatur. Teknik pengukuran adsorpsi dengan metode volumetrik ini lebih sering digunakan, karena sederhana dan efektif selama alat ukur tekanan dan temperatur dapat memberikan informasi yang dibutuhkan pada proses adsorpsi (Rouquerol, J et al, 1998). Skematik metode volumetrik terlihat pada Gambar 2.17.

Data pengukuran pada metode volumetrik adalah tekanan dan temperatur, dimana data diukur saat adsorbat masuk ke tempat diletakkannya adsorben (adsorption bulb). Setelah keseimbangan adsorpsi terjadi, jumlah adsorbat yang terserap dihitung dari perubahan tekanan yang terjadi.



Gambar 2.17 Skema Metode Volumetrik (Keller, Jurgen., 2005)

Peralatan untuk pengukuran adsorpsi equilibrium dengan menggunakan metode volumetrik pada dasarnya terdiri atas *storage vessel* dan *adsorption chamber* yang keduanya dihubungkan dengan menggunakan *tube*. Kedua tabung tersebut harus ditempatkan dalam sebuah wadah yang dilengkapi dengan *thermostat*, sehingga temperaturnya dapat dijaga konstan dan juga dilengkapi dengan katup sehingga gas atau adsorbat dapat disuplai dan dibuang, selain itu juga dilengkapi dengan termometer dan manometer, sehingga temperatur dan tekanan di dalam *vessel* dapat diukur (Keller, Jurgen., 2005).

Hal yang terpenting dalam pengukuran adsorpsi isothermal menggunakan metode volumetrik adalah, sebagai berikut (Keller, J.U et al, 2002):

1. Volume efektif alat uji harus diketahui.
2. Alat uji harus dapat mengukur temperatur dari gas yang menjadi adsorbat.

3. Keakuratan alat uji untuk mengukur perubahan tekanan pada metode volumetrik adalah hal yang utama.
4. Kesetimbangan adsorpsi terjadi apabila tekanan relatif mencapai  $p/p_0 = 1$ , maka pengukuran berakhir.
5. Perhitungan adsorbat yang terserap dapat diukur menggunakan persamaan gas ideal.

Kelebihan metode volumetrik adalah dapat mengukur beberapa jenis sampel, dan memiliki *sensitivity* yang tinggi. Biaya pembuatan alat ukur menggunakan metode volumetrik murah dan mudah dibuat karena komponennya ada di pasar dan relatif murah (Keller, J.U et al, 2002).

## 2.7. ADSORBEN

Material penyerap atau adsorben adalah zat atau material yang mempunyai kemampuan untuk mengikat dan mempertahankan cairan atau gas didalamnya (Suryawan, Bambang, 2004). Adsorben dikelompokkan berdasarkan kemampuannya menyerap jenis zat tertentu, kelompok polar adsorben yaitu kelompok adsorben yang mampu menyerap air sebagai adsorbat dengan baik, kelompok polar adsorben ini biasa disebut sebagai kelompok adsorben *hydrophilic* (menyukai air) seperti silika gel, alumina aktif, dan zeolit. Kelompok lainnya adalah kelompok non-polar adsorben, yaitu kelompok adsorben yang mampu menyerap adsorbat dengan baik selain air, kelompok non-polar adsorben ini biasa juga disebut sebagai kelompok adsorben *hydrophobic* (tidak menyukai air) seperti polimer adsorben dan karbon aktif (Suzuki, M, 1990).

Kemampuan adsorpsi dari adsorben tergantung pada beberapa parameter fisik sebagai berikut (Do, Duong D., 2008):

1. Memiliki luas permukaan atau volume mikropori yang tinggi.
2. Memiliki jaringan pori (mesopori) yang besar sehingga molekul gas atau adsorbat dapat masuk ke bagian dalam adsorben.

Untuk memenuhi kriteria yang pertama adsorben harus memiliki ukuran pori yang kecil. Dengan demikian adsorben yang bagus harus memiliki dua kombinasi ukuran pori, mesopori dan mikropori.

### 2.7.1. Karbon Aktif

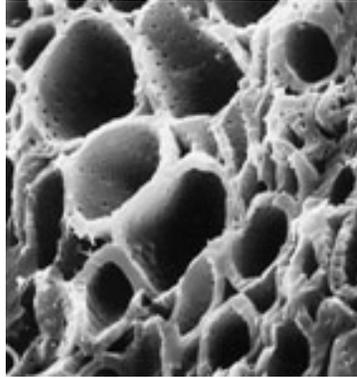
Material karbon aktif adalah salah satu kandidat untuk penyimpanan hidrogen karena memiliki kemampuan penyerapan yang tinggi, luas permukaan spesifik yang tinggi, mikrostruktur berpori, densitas masa yang rendah dan murah menjadi salah satu penelitain yang sangat menarik.

Karbon aktif adalah material yang memiliki lubang (*voids*, ruang, situs dan pori-pori). Karbon aktif adalah senyawa karbon yang telah ditingkatkan daya adsorpsinya dengan melakukan proses karbonisasi dan aktivasi. Pada proses tersebut 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. Menurut Sontheimer, 1985 pada proses aktivasi terjadi pembentukan pori-pori yang masih tertutup dan peningkatan ukuran serta jumlah pori-pori kecil yang telah terbentuk. Dengan demikian karbon aktif hasil aktivasi memiliki luas permukaan internal yang lebih besar. Karbon hasil aktivasi disebut dengan karbon aktif. Walaupun lubang ini memiliki ruang kerapatan elektron sama dengan nol namun pori-pori ini memiliki gaya van der Waals (dari kedekatan atom karbon). Adapun kemampuan material karbon terhadap penyerapan (adsorpsi) berdasarkan kemampuan molekul yang berdifusi kedalam volume mikropori.

Adapun pembagian ukuran porositas pada material karbon dibagi atas 3 yaitu:

- a. Mikroporositas  $< 2.0\text{nm}$  yang terdiri dari supermikropori ( $0.7 - 2\text{ nm}$ ) dan ultramikropori dengan diameter kurang dari  $0.7\text{ nm}$ .
- b. Mesoporositas  $2.0 - 50\text{ nm}$
- c. Makroporositas  $> 50\text{ nm}$

Pori dengan ukuran besar digunakan untuk transportasi cairan pada karbon, penyerapan terjadi pada pori yang kecil atau sedang. Pori terbentuk selama proses aktivasi, ketika karbon diaktifkan dengan sebuah reaksi kimia yang melibatkan reaktan seperti KOH (potasium hidroksida).



Gambar 2.18 porositas pada karbon

Dua metode yang berbeda akan menghasilkan struktur pori yang berbeda - beda yaitu:

- a. Aktifasi kimia, yaitu peningkatan pori atau luas permukaan suatu karbon aktif dengan penyerapan larutan kimia yang kemudian diaktifasi didalam sebuah reaktor inert dimana hanya ada gas nitrogen yang mengalir sehingga
- b. Aktifasi dengan uap, adalah peningkatan pori atau luas permukaan dengan pemanasan pada temperatur aktifasi.

Karbon aktif berbentuk granular selalu memiliki pori yang besar, tetapi pada karbon aktifasi dalam bentuk serbuk sering tidak ditemukan pori besar setelah penggilingan. Atom karbon dapat dihilangkan dari karbon berpori dengan gasifikasi menggunakan karbon dioksida atau uap air pada suhu 800- 900 °C seperti pada reaksi dibawah ini:



aktifasi dengan karbon dioksida dan uap menghasilkan karbon dengan karakteristiknya berbeda. Secara singkat, aktifasi termal adalah sebuah proses gasifikasi selektif (pengangkatan) individu atom karbon. Tidak semua atom karbon memiliki reaktifitas yang sama. [5]

Karbon aktif batu bara dan Tempurung Kelapa memiliki struktur kristalin, sehingga memungkinkan material tersebut dapat digunakan sebagai material penyimpan. Fenomena penggilingan mekanika membantu partikel menjadi fasa mikro atau nanokristalin sehingga menyebabkan penurunan energi aktivasi

desorpsi [16] (peristiwa pelepasan molekul, ion dan sebagainya dari permukaan zat padat sehingga molekul atau ion itu menjadi gas). Namun tingginya energi aktivasi bergantung pada elemen permukaan.

Dari Melanie Francke et.al (2004) pada Modifikasi karbon struktur nano dengan penggilingan bola dengan energi tinggi pada kondisi argon dan hidrogen, dengan proses penggilingan bola dengan energi tinggi pada grafit mengerahkan kepada struktur kristal nano pada karbon. Struktur dikarakteristik dengan sedikit partikel kristalin yang tertanam dalam sebuah matriks amorf yang menyebabkan luas permukaan tertentu tinggi.

Pada prakteknya, karbon aktif mengandung beberapa elemen yang dikenal dengan heteroatom seperti hidrogen, oksigen, nitrogen dan sulfur. Hal ini sangat berpengaruh terhadap kualitas karbon aktif sehingga perlu perlakuan khusus. Beberapa tipe pada grup oksigen ditemukan dipermukaan karbon, karena elektronegativitas pada atom oksigen, memiliki momen dipol dan dengan hadirnya oksigen ditandai dengan pengaruh pembentukan penyerapan isothermal pada adsorbat polar. Oleh karena itu, sangat penting untuk dilakukan analisa terhadap permukaan karbon aktivasi yang dikenal dengan *surface oxygen complexes* (SOC) /permukaan dengan oksigen kompleks.

Karbon aktif yaitu karbon dengan struktur amorphous atau mikrokristalin yang dengan perlakuan khusus dapat memiliki luas permukaan dalam yang sangat besar antara 300 - 2000 m<sup>2</sup>/gram. Pada dasarnya ada dua jenis karbon aktif yaitu karbon aktif fasa cair yang dihasilkan dari material dengan berat jenis rendah, seperti misalnya karbon sekam padi dengan bentuk butiran rapuh dan mudah hancur, mempunyai kadar abu yang tinggi berupa silika dan biasanya digunakan untuk menghilangkan bau, rasa, warna dan kontaminan organik lainnya, sedangkan karbon aktif fasa gas dihasilkan dari bahan dengan berat jenis tinggi

### BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. MATERIAL DAN ALAT

Material yang digunakan sebagai adsorben dalam penelitian ini adalah karbon Aktif dalam bentuk granular dan nano partikel yang berasal dari batubara Indonesia kelas rendah dan Tempurung Kelapa. Sebagai adsorbatnya dipakai Gas hidrogen yang memiliki kemurnian 99,9%.



Gambar 3.1. Diagram alir Penelitian

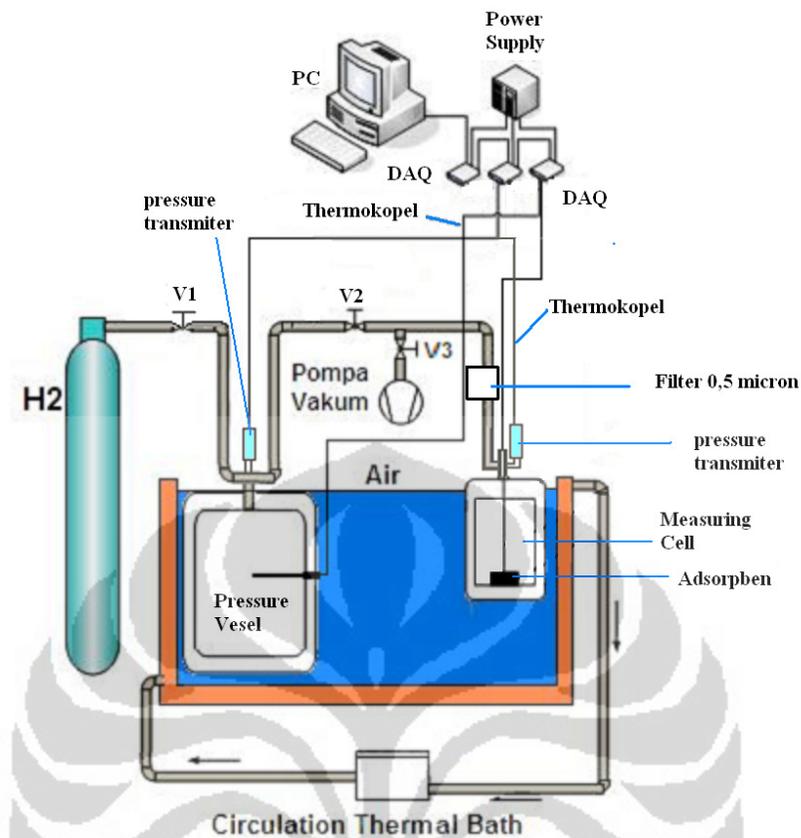
Diagram alir penelitian diperlihatkan pada Gambar 3.1 di atas.

### 3.2 PENGUJIAN ADSORPSI VOLUMETRIK

Alat uji adsorpsi isothermal pada prinsipnya terdiri atas dua buah silinder yaitu silinder pengisian (charging cell) dan silinder pengukuran (measuring cell) dengan volume masing-masing adalah 1186.62 ml dan 84,58 ml yang terbuat dari stainless steel 304 (SS 304) seperti terlihat pada gambar 3.2. Kedua tabung tersebut dihubungkan dengan tube stainless steel dimana keduanya terendam dalam fluida yang temperaturnya di kontrol oleh circulating thermal bath merk HUBER dengan akurasi  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Tekanan pada kedua silinder diukur dengan menggunakan pressure transmitter dengan kisaran pengukuran 0-40 bar absolut (DRUCK PTX 1400) dengan akurasi 0,15%. Thermocouple kelas A tipe K digunakan untuk mengukur temperatur adsorbat (gas hidrogen) dan adsorben (karbon aktif). Data tekanan dan temperatur direkam melalui data akuisisi dari National Instrument.

Setelah karbon aktif dimasukkan kedalam measuring cell dan antara measuring cell dan charging cell telah terhubung maka proses awal pengujian adalah proses degassing. Proses degassing dimaksudkan untuk mengeluarkan seluruh unsur atau zat pengotor (impurity) yang kemungkinan teradsorpsi oleh karbon aktif selama penyimpanan. Proses degassing berlangsung sampai dengan 8 jam dimana system di vakum dengan pompa vakum satu tingkat ARUKI sampai dengan tekanan mendekati 1 mbar dan selama proses tersebut measuring cell dililiti dengan pemanas (heater) untuk menjaga temperatur karbon aktif pada kisaran  $130\text{--}140^{\circ}\text{C}$ . Gas Helium (He) dimasukkan ke dalam system pada tekanan sampai dengan 7 bar untuk meningkatkan proses pengeluaran zat pengotor pada karbon aktif. Setelah proses degassing, charging cell dan measuring cell direndam dengan air yang disirkulasikan oleh Circulating Thermal Bath HUBER dengan akurasi  $0,1^{\circ}\text{C}$  untuk menjaga agar temperatur pada system konstan pada temperatur tertentu.



Gambar 3.2. Skema Alat Uji adsorpsi Isothermal

Setelah temperatur pada system konstan (isothermal), gas hydrogen ( $H_2$ ) dimasukkan kedalam charging cell dimana sebelumnya katup yang menghubungkan antara charging cell dan measuring cell ditutup. Setelah temperatur pada charging cell kembali ke temperatur isothermal katup penghubung tersebut dibuka, proses ini adalah proses awal adsorpsi isothermal. Gas  $H_2$  kembali diisikan pada tekanan berikutnya kedalam charging cell setelah temperatur pada charging cell kembali pada temperatur semula. Proses tersebut berlangsung sampai dengan dengan tekanan pengisian 40 bar. Proses diatas dilakukan kembali untuk tiap temperatur isothermal yang berbeda.

### 3.2.1 Pengukuran Volume *Charging Cell* dan Volume Kosong *Measuring Cell*

Volume merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam pengukuran adsorpsi volumetrik. Ketidakpastian kalibrasi volume gas, pengukuran tekanan, dan kebocoran merupakan sumber kesalahan dari pengukuran metode volumetrik, yang mungkin mengakibatkan data adsorpsi tidak realistis (Belmabkhout, et. al, 2004).

#### 3.2.1.1 Pengukuran Volume *Charging Cell*

Pengukuran volume *charging cell* dilakukan dengan cara menimbang massa kosong dan massa *charging cell* yang diisi dengan air, maka akan diperoleh massa air yang mengisi *charging cell*.

$$m_{air} = m_{PV+air} - m_{PV} \quad (3.1)$$

Setelah massa air yang mengisi *charging cell* diketahui maka akan didapat volume dari *charging cell*, dengan menggunakan persamaan:

$$V_{PV} = \frac{m_{air}}{\rho_{air(T,P)}} \quad (3.2)$$

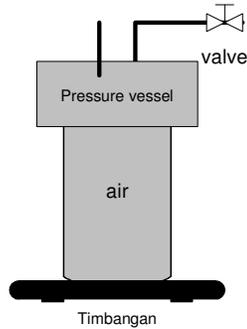
dengan :  $m_{air}$  : massa air (kg)

$m_{PV+air}$  : massa *charging cell* yang berisi air (kg)

$m_{PV}$  : massa *charging cell* kosong (kg)

$V_{PV}$  : volume *charging cell* (m<sup>3</sup>)

$\rho_{air(T,P)}$  : massa jenis air pada tekanan dan temperatur saat pengukuran



Gambar 3.3 Skema Proses Pengukuran Volume *Charging Cell*

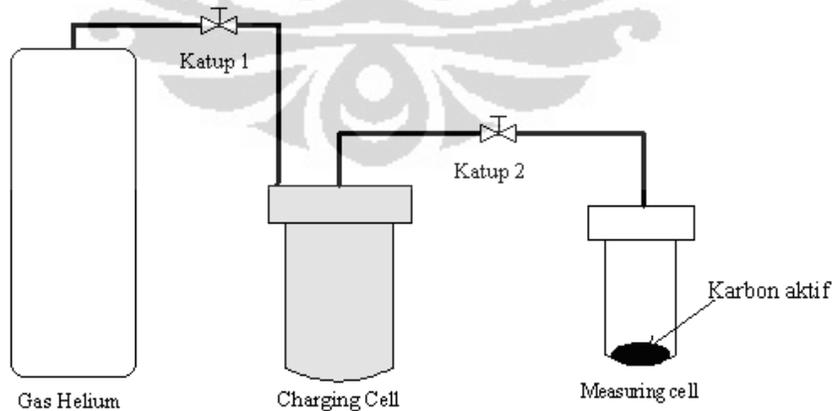
### 3.2.1.2 Pengukuran Volume Kosong *Measuring Cell*

Pengukuran volume kosong pada *measuring cell* dilakukan untuk mendapatkan volume pada *measuring cell*, hal tersebut dilakukan dikarenakan *measuring cell* diisi dengan karbon aktif yang juga memiliki volume pori. Volume kosong dari *measuring cell* adalah volume total dari ruang kosong yang terdapat pada *measuring cell*.

$$V_{kosong} = V_{MC} - V_{ruang\ yang\ terisi\ adsorben} + V_{pori-pori\ adsorben} \quad (3.4)$$

dengan  $V_{kosong}$  : volume *measuring cell* yang berisi adsorben ( $m^3$ )

$V_{MC}$  : volume *measuring cell* kosong ( $m^3$ )



Gambar 3.4 Skema Proses Pengukuran Volume Kosong *Measuring Cell*

Prosedur pengukuran volume kosong pada *measuring cell* adalah sebagai berikut:

- a. Temperatur di dalam *charging cell* dan *measuring cell* dikondisikan pada temperatur 30°C dengan menggunakan *circulating thermal bath*.
- b. Gas helium dimasukkan ke dalam *charging cell* dengan cara membuka katup 1. Katup ditutup kembali saat tekanan pada *charging cell* telah mencapai tekanan yang diinginkan.

Tekanan awal *charging cell* ( $P_{cci}$ ) dicatat, dengan data tersebut akan diperoleh jumlah mol He yang terdapat pada *charging cell* berdasarkan persamaan:

$$n = \frac{P_{cci} \cdot V_{cc}}{Z_{He} \cdot R \cdot T} \quad (3.5)$$

Dimana  $n$  adalah jumlah mol helium pada *charging cell* dan pada prosedur ini  $V_{charging\ cell} = V_{He}$

- c. Dengan membuka katup 2 maka gas He masuk ke dalam *measuring cell*, kemudian tekanan akhir pada *charging cell* ( $P_{ccf}$ ) dicatat. Dengan data ini, maka akan diketahui jumlah mol ( $n_i$ ) He yang masuk ke dalam *measuring cell*, dengan persamaan:

$$n_i = \left( \frac{P_{cci}}{Z_{He, P_{cci}} \cdot R \cdot T} - \frac{P_{ccf}}{Z_{He, P_{ccf}} \cdot R \cdot T} \right) V_{cc} \quad (3.6)$$

- d. Setelah tercapai kondisi equilibrium, dimana tekanan pada *charging cell* dan *measuring cell* konstan, kira-kira selama 15 menit, tekanan akhir *measuring cell* ( $P_{mcf}$ ) dicatat. Sehingga dengan menggunakan persamaan 3.11 diketahui volume kosong *measuring cell*:

$$V_{void} = \frac{n_i \cdot Z_{He, P_{mcf}} \cdot R \cdot T}{P_{mcf}} \quad (3.7)$$

- e. Prosedur ini dilakukan beberapa kali untuk mendapatkan volume kosong *measuring cell*.

### 3.3 Persiapan Penelitian

Sebelum dilakukan pengujian adsorpsi isotermal, berat kering adsorben atau karbon aktif harus diketahui terlebih dahulu. Berikut adalah prosedur untuk mendapatkan berat kering karbon aktif.

1. Karbon aktif dimasukkan ke dalam *measuring cell*  $\pm 5$  g, kemudian ditimbang kembali bersama dengan *measuring cell* nya.
2. Karbon aktif yang telah dimasukkan ke dalam *measuring cell* kemudian dipanaskan dengan cara dililiti heater sampai pada temperatur  $170^{\circ}\text{C}$ .
3. Setelah  $\pm 60$  menit lilitan *heater* pada *measuring cell* dilepas, kemudian *measuring cell* kembali ditimbang.
4. Selisih antara berat *measuring cell* sebelum dipanaskan dengan berat *measuring cell* setelah dipanaskan adalah massa air atau zat lainnya yang terserap pada karbon aktif selama masa penyimpanan dan menguap pada proses nomor 2 di atas.
5. Massa kering karbon aktif adalah massa karbon aktif awal ( $\pm 5$  g) dikurangi dengan selisih massa *measuring cell* seperti pada proses nomor 4 di atas.

### 3.4 Prosedur Penelitian

Penelitian adsorpsi isotermal dilakukan di laboratorium Teknik Pendingin dan Pengkondisian Udara Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sehingga kondisi lingkungan adalah kondisi lingkungan pada ruang laboratorium tersebut. Prosedur penelitian adsorpsi yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Karbon aktif dimasukkan ke dalam *measuring cell* dan antara *measuring cell* dan *charging cell* dihubungkan dengan sistem *tubing*.
2. Proses awal pengujian adalah proses *degassing*. Proses *degassing* dimaksudkan untuk mengeluarkan seluruh unsur atau zat pengotor (impurity) yang kemungkinan terserap oleh karbon aktif selama penyimpanan. Proses *degassing* berlangsung sampai dengan 8 jam dan selama proses sistem divakum dengan pompa vakum satu tingkat

sampai dengan tekanan mendekati 0,01 mbar. Selama proses tersebut *measuring cell* dipanaskan dengan cara dililiti pemanas (heater) untuk menjaga temperatur karbon aktif pada kisaran 130 – 140°C.

3. Gas helium (He) dimasukkan ke dalam sistem beberapa kali pada tekanan sampai dengan 7 bar untuk meningkatkan proses pengeluaran zat pengotor pada karbon aktif.
4. Setelah proses *degassing* selesai, *charging cell* dan *measuring cell* direndam dengan air yang disirkulasikan oleh *circulating thermal bath* untuk menjaga agar temperatur pada sistem terjaga konstan pada temperatur tertentu yang diinginkan.
5. Setelah temperatur pada sistem konstan (isotermal), gas H<sub>2</sub> dimasukan ke dalam *charging cell*, dimana sebelumnya katup yang menghubungkan antara *charging cell* dan *measuring cell* ditutup.
6. Setelah temperatur pada *charging cell* kembali ke temperatur isotermal, katup penghubung tersebut dibuka dan proses ini adalah proses awal adsorpsi isotermal.
7. Gas H<sub>2</sub> kembali dimasukkan pada tekanan berikutnya ke dalam *charging cell* setelah temperatur pada *charging cell* kembali pada temperatur semula. Proses tersebut berlangsung sampai dengan tekanan pengisian 4 MPa. Proses tersebut di atas dilakukan kembali untuk temperatur isotermal yang berbeda.

### **3.5 Error Analisis pada Adsorpsi Isotermal**

Perhitungan jumlah adsorbat yang diserap oleh adsorben berdasar pada pengukuran temperatur, tekanan, massa sampel, volume *charging cell* ( $V_{cc}$ ), dan volume kosong pada *measuring cell* ( $V_{vv}$ ). Konsekuensi dari metode volumetrik yang digunakan pada perhitungan jumlah massa adsorbat yang terserap adalah dibutuhkanannya *error* analisis pada tiap parameter tersebut di atas.

### 3.5.1 **Errors pada Volume Charging Cell ( $V_{cc}$ ) dan Volume Kosong pada Measuring Cell ( $V_{vv}$ )**

Volume *charging cell* ( $V_{cc}$ ) diukur dengan mengisi air dan menimbang selisih berat *charging cell* ( $V_{cc}$ ) sebelum dan setelah diisi air, dengan akurasi timbangan yang digunakan 1 g.

Pengukuran volume *charging cell* ( $V_{cc}$ ) yang telah dilakukan adalah  $1150,98 \pm 0,66$  ml atau dengan nilai ketidakpastian 0,058%.

Volume kosong pada *measuring cell* ( $V_{vv}$ ) dihitung dengan menggunakan gas helium yang dimasukkan ke dalam *measuring cell*. Volume kosong pada *measuring cell* ( $V_{vv}$ ), nilainya berbeda untuk tiap jenis karbon aktif yang digunakan. Untuk karbon aktif komersial  $V_{vv} = 82,45 \pm 0,23$  ml atau dengan nilai ketidakpastian 0,28%. Untuk karbon aktif dari batubara Kalimantan Timur  $V_{vv} = 83,262 \pm 0,904$  ml atau dengan nilai ketidakpastian 1,09%. Untuk karbon aktif dari batubara Riau  $V_{vv} = 81,3485 \pm 0,364$  ml atau dengan nilai ketidakpastian 0,45%.

### 3.5.2 **Error pada Pengukuran Temperatur**

Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan *thermocouple* type K kelas I dengan akurasi 0,15 K.

### 3.5.3 **Error pada Pengukuran Tekanan**

Pengukuran tekanan dilakukan dengan menggunakan *pressure transmitter* dengan rentang pengukuran 0 – 40 bar absolut dengan akurasi 0,15%, sehingga *error* maksimum pada pengukuran tekanan adalah  $60 \times 10^{-3}$  bar.

### 3.5.4 **Error pada Pengukuran Massa Sampel**

Pada pengukuran berat sampel karbon aktif digunakan timbangan dengan akurasi 0,01 g, berat karbon aktif yang digunakan pada penelitian ini maksimum adalah 5 g sehingga *error* pada pengukuran berat sampel adalah  $2 \times 10^{-5}$  %.

### **3.6 Korelasi Adsorpsi Isotermal**

Model Langmuir digunakan untuk meregresi data keseimbangan adsorpsi, sehingga data hasil regresi tersebut dapat digunakan untuk memprediksi data keseimbangan adsorpsi pada tekanan dan temperatur lain.

Persamaan Model Langmuir

Asumsi model Langmuir adalah bahwa permukaan adsorben homogen dimana energi adsorpsi konstan pada seluruh permukaan adsorben. Model ini juga mengasumsikan bahwa adsorpsi dilokalisasi dan tiap lokasi hanya dapat mengakomodasi satu molekul atau atom (Do, Duong D., 2008).

### **3.7 Panas Adsorpsi**

Panas adsorpsi diperoleh dengan menggunakan persamaan model yang memiliki simpangan yang paling kecil. Data panas adsorpsi dibutuhkan untuk mengetahui atau memprediksi berapa besar panas adsorpsi yang harus diberikan pada proses adsorpsi. Sehingga dengan data tersebut dapat diprediksi berapa besar energi yang dibutuhkan untuk menyerap sejumlah gas CO<sub>2</sub> atau CH<sub>4</sub> pada tekanan dan temperatur tertentu.

### **3.8 Adsorpsi Isosterik**

Data adsorpsi isosterik diperoleh dengan menggunakan persamaan model yang juga memiliki simpangan yang paling kecil, data adsorpsi isosterik digunakan untuk memprediksi tekanan dan temperatur yang dibutuhkan untuk menyerap adsorbat pada jumlah tertentu.

### **3.9. PERHITUNGAN MASSA ADSORBAT YANG DISERAP**

Pengujian adsorpsi isotermal dilakukan dengan menggunakan metode volumetrik, skema keseimbangan massa adsorpsi isotermal terlihat pada Gambar 3.3. Dasar pengukuran metode volumetrik adalah tekanan, volume dan temperatur, dimana data diukur saat adsorbat masuk ke tempat diletakkannya adsorben (adsorption bulb). Setelah keseimbangan adsorpsi terjadi, jumlah

adsorbat yang terserap dihitung dari perubahan tekanan yang terjadi dengan menggunakan persamaan gas ideal.

Kesetimbangan massa uap adsorbat dalam *charging cell* dan *measuring cell* dapat diasumsikan sebagai berikut (Belal, Dawoud, et al., 2003):

$$m_{d,mc} = |m_{cc}| - m_{ads} \quad (3.8)$$

dengan:  $dm_{d,mc}$  = massa adsorbat di *measuring cell* (kg)

$|m_{cc}|$  = massa adsorbat di *charging cell* (kg)

$m_{ads}$  = massa adsorbat yang diserap oleh adsorben (kg)

Selama proses dari mulai *charging cell* sampai pada *measuring cell* adsorbat tidak bersifat ideal sehingga dibutuhkan parameter Z, dimana Z adalah faktor kompresibilitas, sehingga:

$$|m_{cc}| = \Delta m_{cc} = m_{cc}(t) - m_{cc}(t + \Delta t) = \frac{(p_{cc}(t) - p_{cc}(t + \Delta t)) \cdot V_{cc}}{Z \cdot R_{cc} \cdot T_{cc}} \quad (3.9)$$

$$dm_{d,mc} = m_{d,mc}(t + \Delta t) - m_{d,mc}(t) = \frac{(p_{mc}(t + \Delta t) - p_{mc}(t)) \cdot V_{mc}}{Z \cdot R_{mc} \cdot T_{mc}} \quad (3.10)$$

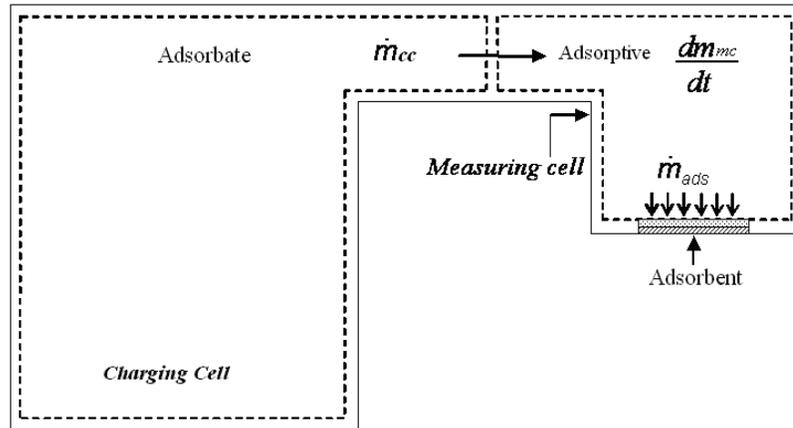
Dengan mensubstitusikan persamaan (2) dan (3) ke dalam pers (1), maka didapat:

$$m_{ads} = \Delta m_{ads}(t) = \frac{(p_{cc}(t) - p_{cc}(t + \Delta t)) \cdot V_{cc}}{Z \cdot R_{cc} \cdot T_{cc}} - \frac{(p_{mc}(t + \Delta t) - p_{mc}(t)) \cdot V_{mc}}{Z \cdot R_{mc} \cdot T_{mc}} \quad (3.11)$$

Atau

$$m_{ads} = \rho_{cc}(p, T) V_{cc} - \rho_{mc}(p, T) V_{mc} \quad (3.12)$$

Dimana  $\rho_{cc}$  dan  $\rho_{mc}$  adalah massa jenis adsorbat pada tekanan dan temperatur di *charging cell* dan *measuring cell*. Besaran  $\rho_{cc}$  dan  $\rho_{mc}$  didapat dengan menggunakan *software* REFPROP Versi 8.



Gambar 3.3 Skema Keseimbangan Massa pada Proses Penyerapan



## BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN

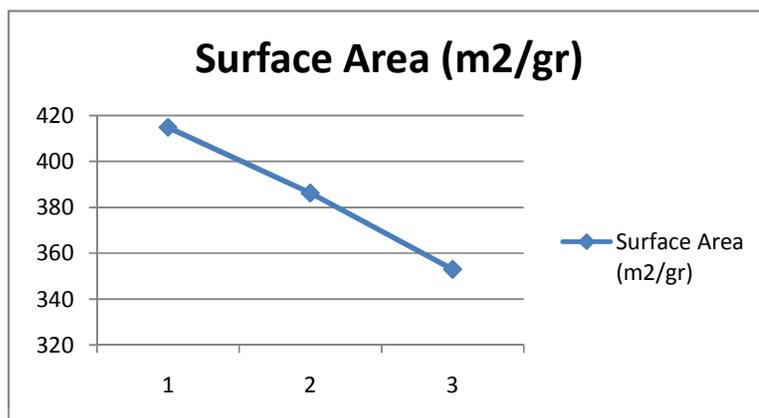
### 4.1 PROPERTIS KARBON AKTIF

Ratio permukaan dan volume pada material karbon aktif memiliki implikasi yang signifikan terhadap penyimpanan energi. Baik luas permukaan yang tinggi dan kesempatan untuk konsolidasi nanomaterial adalah kunci dari syarat suatu material karbon aktif bisa digunakan sebagai penyimpanan hidrogen.

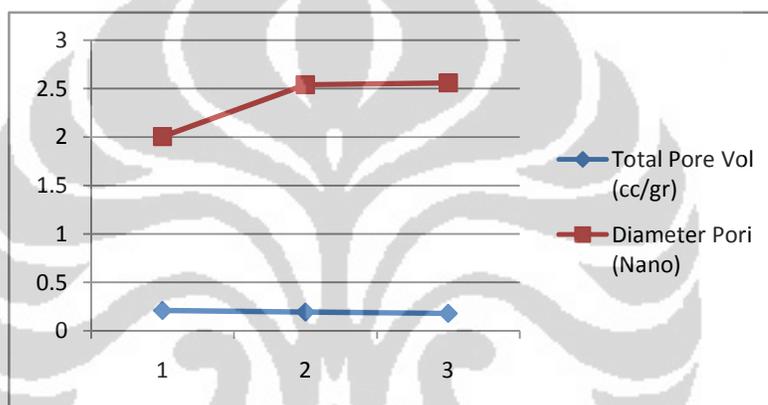
Adapun hasil penggilingan terhadap luas permukaan, volume total pori dan diameter pori seperti dijelaskan ditabel 1.

**Table 4.1. Luas Permukaan pada Karbon Aktif Batubara dan Tempurung Kelapa**

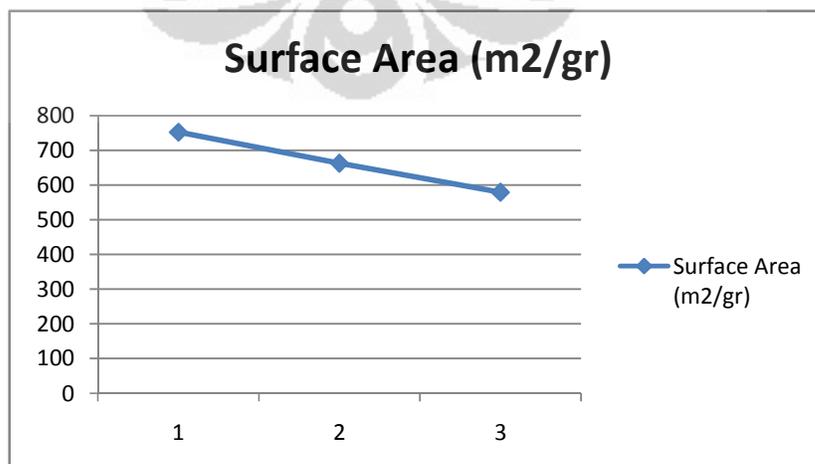
JENIS SAMPEL	PERLAKUAN	SURFACE AREA m <sup>2</sup> /gr	TOTAL PORE VOLUME cc/gr	DIAMETER PORI Å
Batubara	As Received	752,01	0,403	21,435
	KA 400 Mesh (37µm)	662,69	0,431	25,985
	PBM 30 Jam	579,31	0,406	28,039
Tempurung Kelapa	As Received	414,9	0,208	20,051
	KA 400 Mesh (37µm)	386,2	0,193	25,38
	PBM 30 Jam	353	0,178	25,56



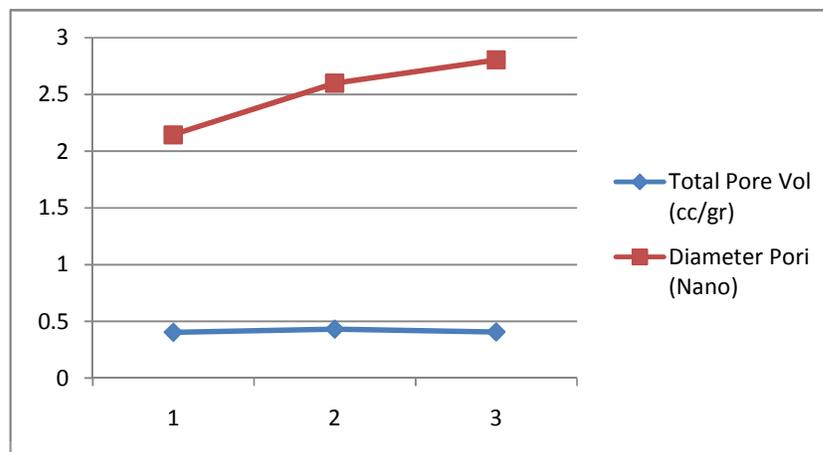
Gambar 4.1 Perbandingan Luas Permukaan tempurung kelapa dalam berbagai keadaan



Gambar 4.2. Nilai Luas Permukaan , diameter pori dan total pore vol dari ukuran granular (as-received-37  $\mu$ m), 37  $\mu$ m milling 30 jam untuk karbon aktif Tempurung Kelapa



Gambar 4.3 Perbandingan Luas Permukaan Batu bara dalam berbagai keadaan



Gambar 4.4. Nilai Luas Permukaan , diameter pori dan total pore vol dari ukuran granular (as-received-37  $\mu\text{m}$ ), 37  $\mu\text{m}$  milling 30 jam untuk karbon aktif batubara

Dari tabel diatas, dari material komersil yang diterima hingga dengan pemilinan hingga 30 jam, luas permukaan mengalami penurunan, sedangkan diameter pori meningkat serta total volum pori menurun untuk Tempurung Kelapa dan batubara.

Penggilingan dengan bola ini akan fokus pada *physisorption* bahan nano baru dengan spesifik tinggi luas permukaan yang disebabkan oleh kekuatan Van der Waals yang lemah antara adsorbat dan adsorben. Hal ini terjadi disebabkan selama pemilinan terjadi oksidasi sehingga volume pori menurun diakibatkan struktur yang terjadi dipermukaan adalah O-C=Meningkat sedangkan C-O, C=O menurun

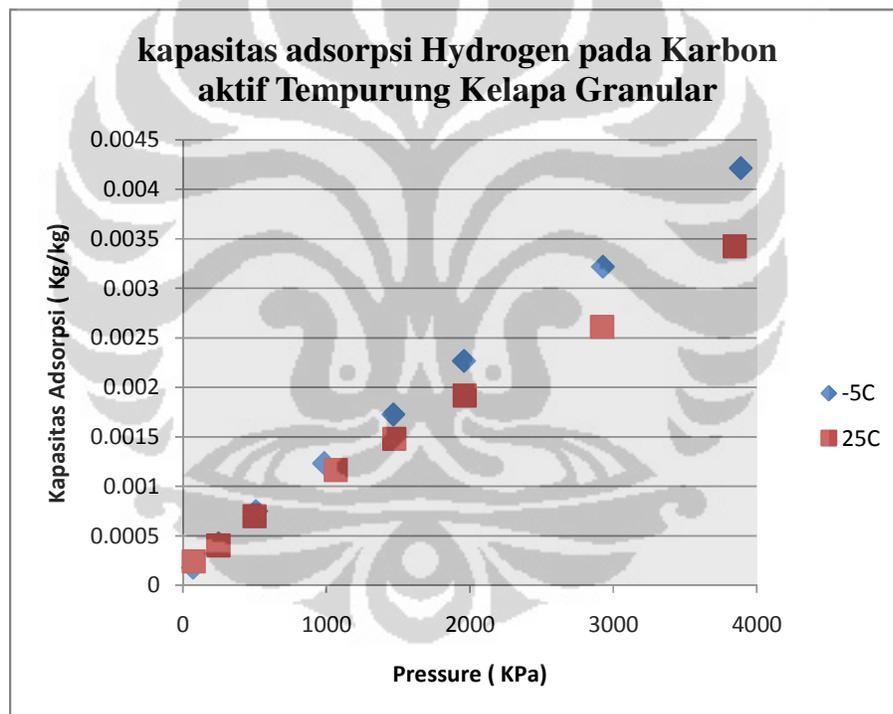
#### 4.2 KAPASITAS ADSORPSI HYDROGEN PADA KARBON AKTIF

Dari Hangkyo Jin et.al (2006) pada hidrogen adsorption characteristics of activated carbon, Tempurung Kelapa yang diaktifasi dengan potasium hidroksida (KOH) menghasilkan karbon aktif dengan porositas yang berbeda. Semua karbon aktif yang disiapkan adalah mikroporos dengan sifat penyerapan yang sama. Reversibilitas yang lengkap dan kinetika yang cepat pada penyerapan hidrogen menunjukkan kuantitas penyerapan dikarenakan karena penyerapan fisisorpsi. Sebuah hubungan linear antara kapasitas penyerapan hidrogen dan tekanan yang diperoleh untuk semua sampel terlepas dari porositas mereka. Kapasitas

penyerapan hidrogen adalah fungsi linear pada fungsi seperti luas permukaan khusus, area permukaan mikropori, total volume pori adalah volume micropori.

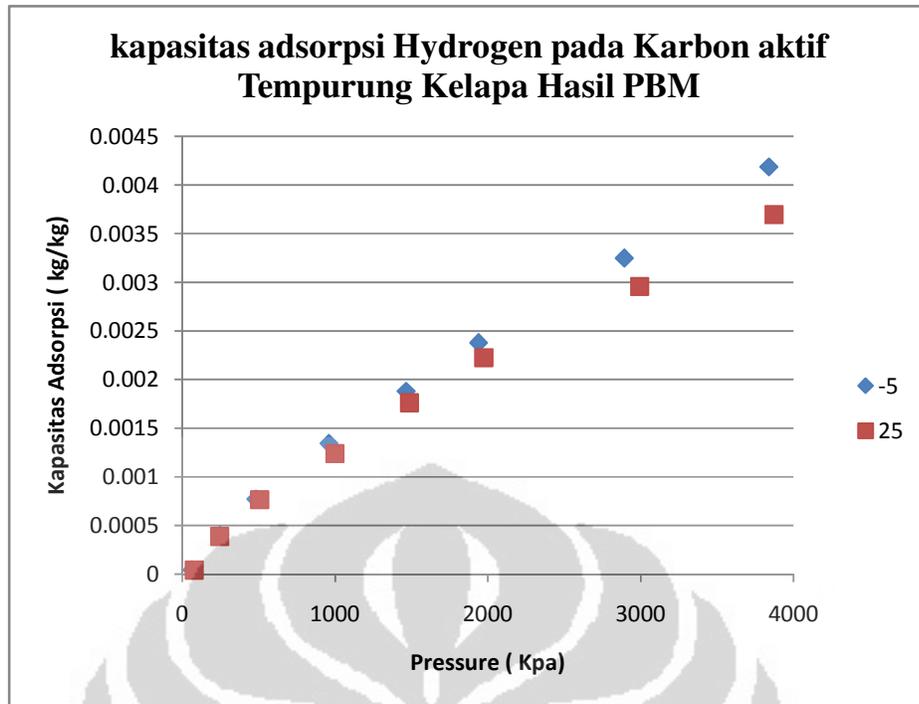
Energi interaksi antara antara molekul hidrogen dan adsorben karbon seharusnya ditingkatkan dalam pori-pori yang sempit , karena overlap pada bidang potensial dari masing-masing bagian pada pori. Untuk perlu dicatat bahwa ukuran molekul hidrogen memiliki diameter kinetika 2.9 Å(K.Kadono et al. (2003) dan A.W.C. Van den Berg et al.(2008)). Hubungan antara kapasitas penyimpanan hidrogen dan luas permukaan mikropori yang spesifik bergantung pada kelinearannya.

#### 4.2.1 kapasitas Adsorpsi Hydrogen pada karbon Aktif Tempurung Kelapa

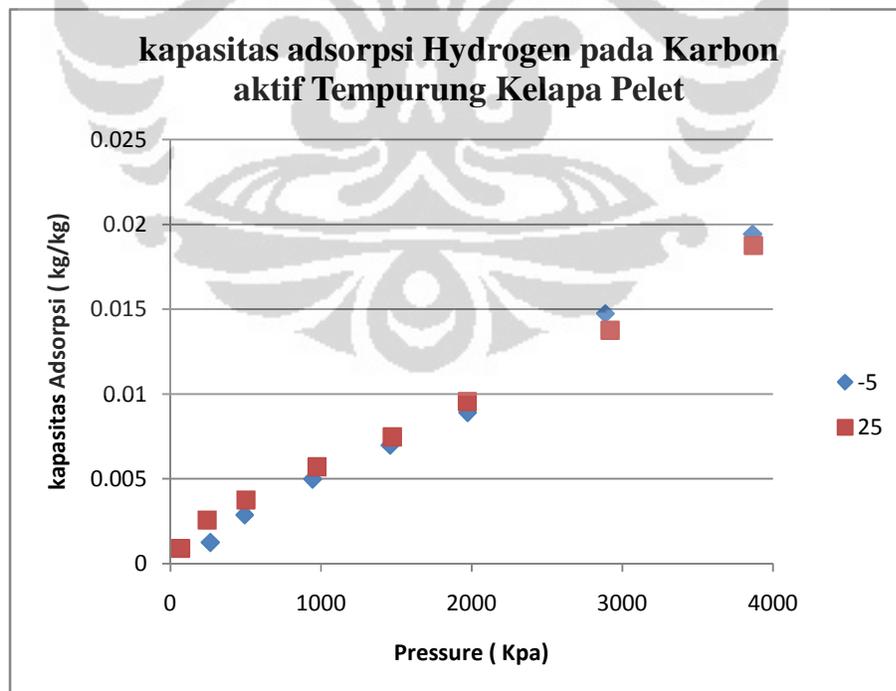


Gambar 4.5 Kapasitas Adsorpsi Hydrogen pada karbon Aktif Tempurung kelapa granular

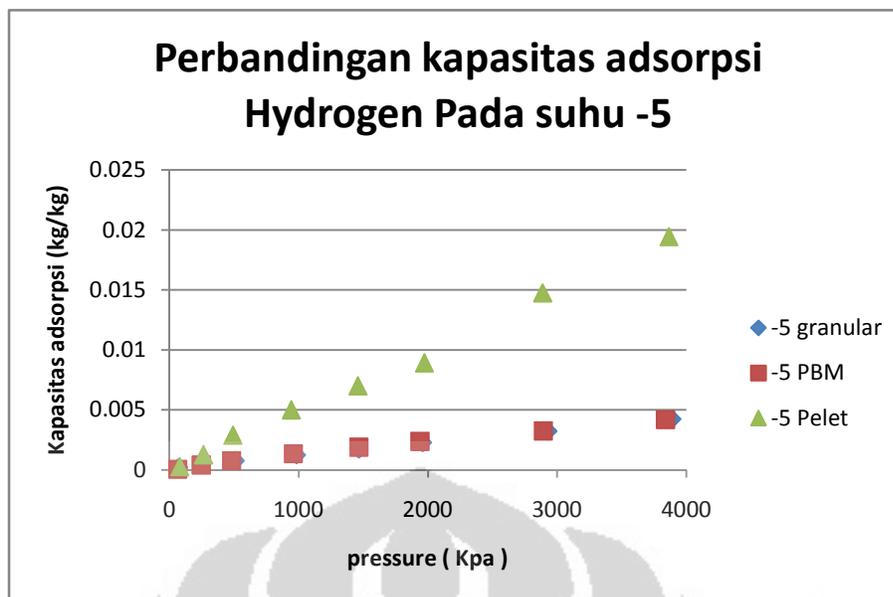
Data rata-rata kapasitas adsorpsi Hydrogen pada karbon aktif dari Tempurung Kelapa memperlihatkan bahwa suhu proses adsorpsi mempengaruhi kapasitas dari adsorpsi Hydrogen oleh karbon aktif. Makin rendah suhu proses adsorpsi maka kapasitas adsorpsi juga semakin tinggi. Kondisi ini berlaku untuk semua jenis dan kondisi dari karbon aktif



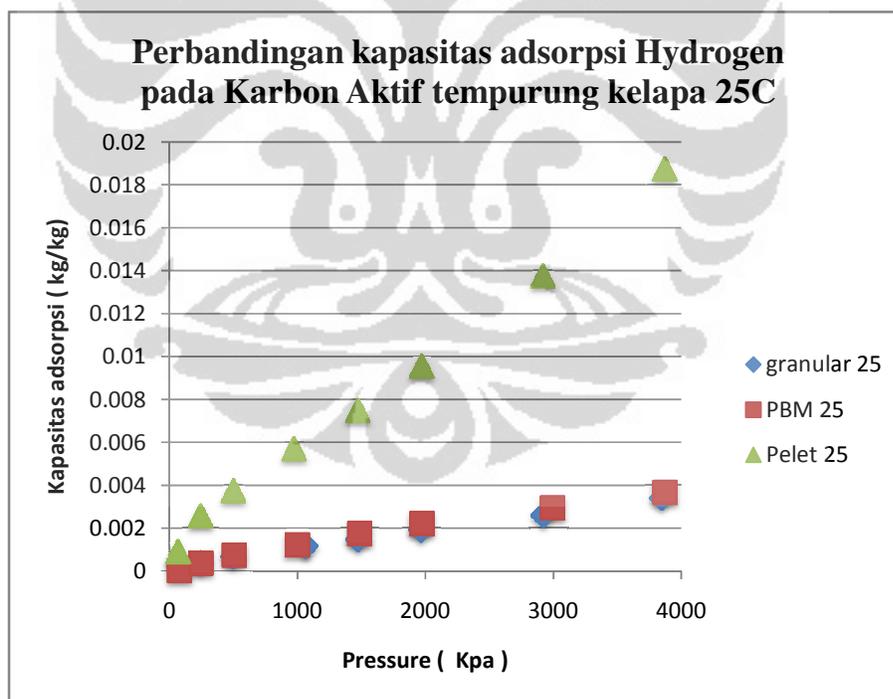
Gambar 4.6 Kapasitas Adsorpsi Hydrogen pada karbon Aktif Tempurung kelapa Hasil PBM



Gambar 4.7 Kapasitas Adsorpsi Hydrogen pada karbon Aktif Tempurung kelapa dalam Bentuk Pelet



Gambar 4.8 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Hydrogen pada karbon Aktif Tempurung kelapa pada suhu -5°C



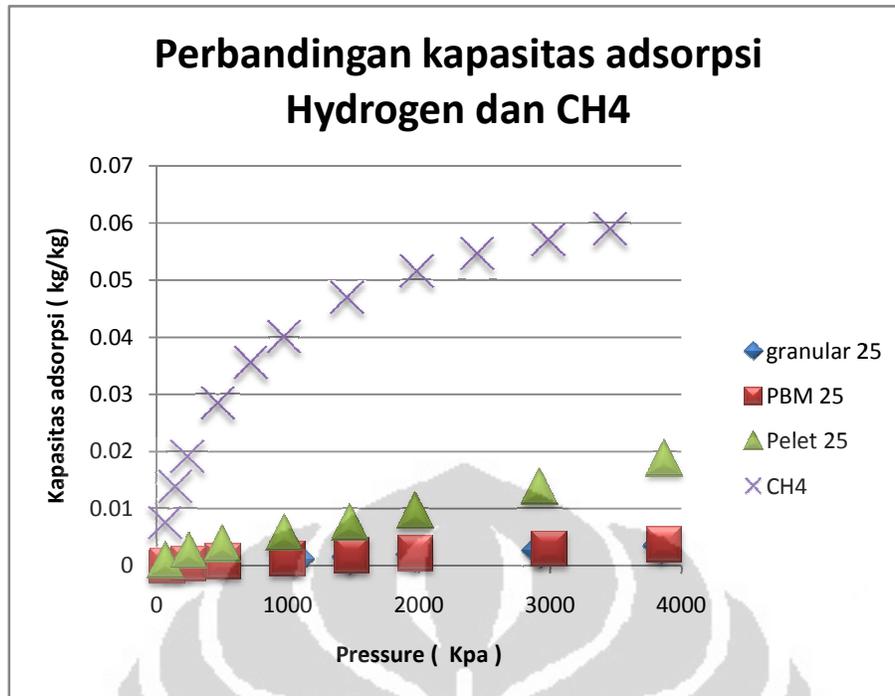
Gambar 4.9 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Hydrogen pada karbon Aktif Tempurung kelapa pada suhu 25°C

Dari data hasil eksperimen didapat data bahwa kapasitas adsorpsi hydrogen tertinggi diperoleh pada karbon aktif nano pertikel yang telah dibentuk jadi pelet dengan pengikat fruktosa dan menggunakan Reaktifasi kimia dengan waktu tahan selama 1 jam pada suhu 700°C. Hal ini dikarenakan bentuk pelet memiliki heat dan mass transfer yang lebih baik dibandingkan bentuk powder atau bentuk granular. Sedangkan kapasitas adsorpsi Hydrogen pada karbon aktif dalam bentuk Powder dan granular relatif hampir sama walaupun ada perbedaan dari luas permukaannya dimana luas permukaan karbon aktif dalam bentuk granular lebih tinggi dari pada karbon aktif berbentuk powder hasil planetari ball milling. Hal ini dikarenakan volume pori dari kedua bentuk karbon aktif ini hampir sama, sehingga dapat di ketahui bahwa jumlah volume pori memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap kapasitas adsorpsi dari karbon aktif.

Proses mechanical ball milling akan membuat luas permukaan karbon aktif menjadi turun karena pecahnya macro dan mesoporositas dari karbon aktif dimana macro dan mesoporositas memiliki pengaruh besar terhadap luas permukaan tapi tidak terhadap kapasitas adsorpsi dari karbon aktif. Yang memiliki peran terbesar dalam proses adsorpsi adsorbat pada adsorben karbon aktif adalah microporositasnya karena ukuran microporositi hampir mendekati sama dengan ukuran molekul dari adsorbat. Kesesuaian ukuran ini penting karena jika ukuran porositas terlalu besar dibandingkan ukuran diameter molekul adsorbat, maka adsorbat cenderung hanya lewat saja pada jenis pori ini tanpa teradsorpsi. Ukuran diameter pori yang lebih kecil dari ukuran diameter molekul adsorbat juga tidak dikehendaki pada proses adsorpsi, karena adsorbat cenderung hanya menempel pada permukaan luar adsorben tanpa mengisi dari volume pori yang ada

#### **4.2.2 Kapasitas adsorpsi hidrogen dibandingkan CH<sub>4</sub>**

Dibandingkan dengan kapasitas adsorpsi gas CH<sub>4</sub>, kapasitas adsorpsi Hidrogen masih jauh lebih kecil. Hal ini dikarenakan perbedaan sifat fisik dan kimia dari kedua jenis adsorbat ini.



Gambar 4.10 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Hydrogen dan CH4 pada karbon Aktif pada suhu 25°C

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

Berdasarkan analisis data hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Karbon aktif nano partikel hasil Proses Mechanical ball milling memiliki kapasitas adsorpsi yang relatif sama dengan karbon aktif granular, hal ini dikarenakan proses mecanical ball milling menyebabkan terjadinya penurunan luas permukaan dari karbon aktif. Kapasitas adsorpsi yang relatif sama didapat karena total volume pori dari kedua jenis karbon aktif ini relatif tidak berbeda.
2. Temperatur Proses adsorpsi mempengaruhi jumlah adsorbat yang di adsorpsi oleh adsorben, dimana semakin rendah temperatur proses adsorpsi semakin banyak jumlah adsorbat yang teradsorpsi oleh adsorben.
3. Karbon aktif dalam bentuk pelet yang dibuat dari powder nano karbon aktif hasil planetari ball milling dengan pengikat fruktosa dan diaktifasi secara kimiawi pada suhu 700°C dengan waktu tahan 1 jam memiliki kapasitas adsorpsi yang jauh lebih baik karena mass dan heat transfer proses adsorpsi pada karbon aktif berbentuk pelet jauh lebih baik dibandingkan bentuk powder nano dan bentuk granular.

## Daftar Pustaka

1. Awaludin, M, Adsorpsi Isotermal Karbon Dioksida dan Metana pada Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Sub Bituminus Indonesia untuk Pemurnian dan Penyimpanan Gas Alam. Disertasi FTUI, Depok 2010
2. Awasthia, K., Kamalakaran, R., Singha, A.K., Srivastavaa, O.N. Ball-milled carbon and hydrogen storage, *International Journal of Hydrogen Energy* 27 (2002): 425–432.
3. Barbara Panella, Michael, Siegmarr Roth, Hydrogen adsorption in different carbon nanostructures, *Carbon* 43 (2005) 2209–2214
4. David I., A study on Hydrogen Trough Adsorption in nanostructured carbons,. These, Ecole De Mines De Paris College Doctoral
5. Do, Duong D., 2008, *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore
6. Hydrogen coordination group., Hydrogen from natural gas and coal : The road to sustainable energy future, Hydrogen Program PlanReport, U.S. Departement Of energy
7. K. Shindoa, T. Kondoa, M. Arakawab, Y. Sakuraia, Hydrogen adsorption / desorption properties of mechanically milled activated carbon, *Journal of Alloys and Compounds* 359 (2003) 267–271
8. K. Inomata, K. Kanazawa, Y. Uribe, H. Hasono, T. Araki. Natural gas storage in activated carbon pellets without a binder. *Carbon* 40 (2002): 87-93.
9. M. Hirscher, B. Panella, Nanostructures with high surface area for hydrogen storage, *Journal of Alloys and Compounds* 404–406 (2005) 399–401
10. Manocha, Satish. M, 2003, *Porous Carbons*, Sadhana volume 28 part 1 & 2 pp 335-348, India
11. Marsh, Harry and Francisco Rodriguez-Reinoso, *Activated Carbon*, Elsevier Ltd, Oxford, UK, 2006

12. R. Stroebel, J. Garche, P.T. Moseley, L. Joerissen, G. Wolf, Review Hydrogen storage by carbon materials, *Journal of Power Sources* 159 (2006) 781–801
13. Rouquerol, Jean, François Rouquerol, Kenneth Sing, 1998, *Adsorption By Powders And Porous Solids*, Elsevier
14. Shindoa, K., Kondoa, T., Arakawab, M., Sakuraia, Y., Hydrogen adsorption / desorption properties of mechanically milled activated carbon, *Journal of Alloys and Compounds* 359 (2003): 267–271.
15. Spencer A., Results of national energy Roadmap Workshop, U.S. Department Of energy
16. Sudibandriyo, M “*High Pressure Adsorption of Methane and Hydrogen at 25 o. C on Activated Carbons*. Prepared from Coal and Coconut Shell. *ijens* Vol 11 / 02
17. Sudibandriyo, M.; Pan, Z.; Fitzgerald, J.E.; Robinson, Jr., R. L.; Gasem, K. A. M. “Adsorption of Methane, Nitrogen, Carbon Dioxide and their Binary Mixtures on Dry Activated Carbon at 318.2K and Pressures to 13.6 MPa,” *Langmuir*, 19(13), 5323-5331 ( 2003).
18. Suzuki Motoyuki, *Adsorption Engineering*, 1990, Kodansha Ltd, Tokyo
19. Vicente Jiménez, Paula Sánchez, José Antonio Díaz, José Luis Valverde, Amaya Romero, Hydrogen storage capacity on different carbon materials, *Chemical Physics Letters* 485 (2010) 152–155
20. W.-C. Xua, K. Takahashia, Y. Matsuo, Y. Hattoria, M. Kumagaia, S. Ishiyamab, K. Kanekoc, S. Iijimad, Investigation of hydrogen storage capacity of various carbon materials, *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (2007) 2504 – 2512
21. Welham, N.J., Setoudeh, N., Highly adsorbent carbon formed by ball milling, *Letters to the Editor / Carbon* 43 (2005): 855–894.

22. Welhama, N.J., Berbenni, V., Chapman, P.G., Increased chemisorption onto activated carbon after ball-milling. *Carbon* 40 (2002): 2307–2315.
23. Yang, Ralph. T, 2003, *Adsorbents: Fundamentals and Applications*, John Wiley and Sons, New Jersey
24. Yuda Yurum, Alpay Taralp, T. Nejat Veziroglu, Review Storage of hydrogen in nanostructured carbon materials, *Int. J. hydrogen energy* 34 (2009) 3784 – 3798
25. Zuttela, Ch. Nutzenadela, P. Sudana, Ph. Maurona, Ch. Emmeneggera, S. Rentscha, L. Schlapbach , A. Weidenkaff , T. Kiyobayashi, Hydrogen sorption by carbon nanotubes and other carbon nanostructures, *Journal of Alloys and Compounds* 330–332 (2002) 676–682

