



UNIVERSITAS INDONESIA

**Analisa Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada Karbon Aktif  
Berbahan Dasar Batok Kelapa Granular dengan Pendekatan  
Persamaan Adsorpsi Isotermal**

SKRIPSI

Indra Mario

0806454802

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**Analisa Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada Karbon Aktif  
Berbahan Dasar Batok Kelapa Granular dengan Pendekatan  
Persamaan Adsorpsi Isotermal**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Indra Mario

0806454802

FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JUNI 2012

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

**ANALISA KAPASITAS PENYERAPAN HIDROGEN PADA KARBON  
AKTIF BERBAHAN DASAR BATOK KELAPA GRANULAR DENGAN  
PENDEKATAN ADSORPSI ISOTERMAL**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Universitas Indonesia, adalah hasil karya saya sendiri dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Skripsi ini merupakan bagian dari skripsi yang dikerjakan bersama dengan saudara Daniel (0806329924) dengan judul: **ANALISA PENGARUH PERUBAHAN TEMPERATUR TERHADAP PROSES ADSORPSI DAN KAPASITAS PENYERAPAN HIDROGEN PADA KARBON AKTIF BERBAHAN DASAR BATU BARA**. Sehingga terdapat kesamaan pada sebagian buku skripsi ini.

Nama : Indra Mario

NPM : 0806454802

Tanda Tangan :



Tanggal : 29 Juni 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Indra Mario  
NPM : 0806454802  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Analisa Kapasitas Penyerapan Hidrogen Pada Karbon Aktif Berbahan Dasar Batok Kelapa Granular dengan Pendekatan Persamaan Adsorpsi Isotermal

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

### DEWAN PENGUJI

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

Penguji : Dr. Ir. Muhammad Idrus Alhamid

Penguji : Dr. Ir. Awaludin Martin MT

Ditetapkan di : Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok

Tanggal : 29 Juni 2012

## KATA PENGANTAR

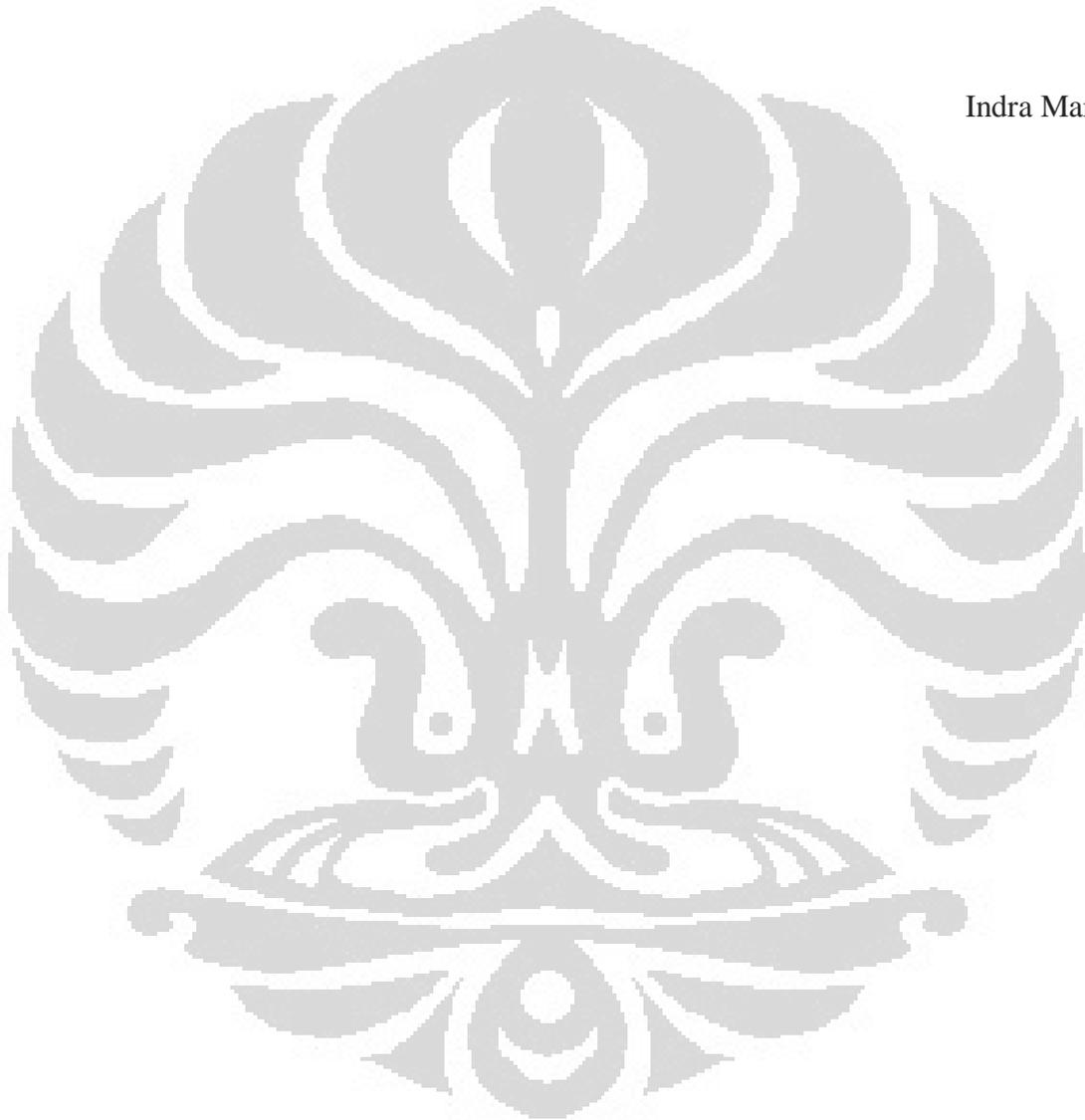
Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan berkah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini tepat waktu. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Dr.-Ing. Ir. Nasruddin M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Awaludin Martin dan Bapak Jauhari Ali selaku senior sekaligus pembimbing di Laboratorium Teknik Pendingin dan Tata Udara program studi Teknik Mesin yang telah menularkan ilmu dan pengalamannya mengenai adsorpsi hidrogen.
3. Orangtua tercinta, atas dukungan spiritual, moral dan materil yang diberikan tanpa hentinya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
4. Daniel selaku partner dalam menyelesaikan skripsi ini hingga selesai.
5. Lucky Jayadi atas bantuannya sehingga kami dapat melanjutkan penelitian Adsorpsi Hidrogen hingga saat ini.
6. Krista Natalia yang selalu mendampingi dan memberikan dukungan kepada penulis.
7. Teman – teman seperjuangan di Laboratorium Teknik Pendingin dan Tata Udara program studi Teknik Mesin (Hernadi, Surya, Hanif, Rozi, Abib, Mike, Fajar, Iwan, Regi, Dias, Helmi, dan Machi) atas kebersamaan dan bantuannya.
8. Teman – teman jurusan Teknik Mesin dan Teknik Perkapalan, khususnya angkatan 2008 yang telah bersama – sama mengukir kisah perjalanan hidup di FT UI.
9. Para sahabat dan semua pihak yang telah membantu dalam bentuk doa yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

Akhir kata, semoga Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah disebutkan di atas. Semoga skripsi ini membawa manfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juni 2012

Indra Mario



## HALAMAN PERNYATAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

### TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

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

Nama : Indra Mario  
NPM : 0806454802  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**“Analisa Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada Karbon Aktif Berbahan Dasar Batok Kelapa Granular dengan Pendekatan Persamaan Adsorpsi Isotermal”**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak bebas royalti noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/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 : 29 Juni 2012



Yang menyatakan,

Indra Mario

## Abstrak

Nama : Indra Mario  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Analisa Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada Karbon Aktif Berbahan Dasar Batok Kelapa Granular dengan Pendekatan Persamaan Adsorpsi Isotermal

Adsorpsi hidrogen merupakan cara alternatif dalam penyimpanan hidrogen yang menggunakan metode adsorpsi dimana digunakan karbon aktif sebagai media untuk menyimpan hidrogen. Karbon aktif merupakan adsorben yang memiliki luas permukaan dan volume pori, dimana gas hidrogen akan tersimpan di dalamnya. Sehingga untuk mendapatkan jumlah hidrogen yang tersimpan semakin banyak, maka diperlukan sebuah karbon aktif yang memiliki volume pori yang semakin besar. Jenis karbon aktif yang digunakan batok kelapa berbentuk granular. Percobaan untuk mengetahui kapasitas penyerapan hidrogen ini dilakukan pada temperatur 35°C, 25°C dan 0°C, sedangkan variasi tekanannya dimulai dari 2,5 sampai 40 bar. Hasilnya adalah semakin rendah temperatur, maka semakin banyak pula penyerapannya, dan semakin tinggi tekanan semakin besar pula penyerapannya. Setelah mendapatkan data kapasitas penyerapan hidrogen pada batok kelapa, dilakukan sebuah pendekatan persamaan isotermal untuk mengetahui kesetimbangan kapasitas penyerapannya. Pendekatan persamaan tersebut menggunakan persamaan Langmuir, Toth, dan Langmuir-Freundlich. Hasilnya ada pendekatan dengan menggunakan persamaan Langmuir-Freundlich adalah pendekatan terbaik untuk percobaan ini, karena simpangan atau standar deviasi yang dihasilkan paling kecil daripada 2 persamaan lainnya.

Kata kunci: adsorpsi, hidrogen, karbon aktif, batok kelapa

## Absract

Name : Indra Mario  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : Analysis of Hydrogen Absorption Capacity on Activated Carbon from Coconut Shell Granular by Equations Approach of Adsorption Isothermal

Adsorption of hydrogen is an alternative way of storing hydrogen in the use of methods which use activated carbon adsorption as a medium for storing hydrogen. Activated carbon is an adsorbent which has a surface area and pore volume, in which hydrogen gas is stored in it. So to get the amount of hydrogen stored more and more, it would require an active carbon having a pore volume increases. Types of activated carbon used is coconut shell granular form. Experiments to determine the absorption capacity of hydrogen at a temperature of 35°C, 25°C and dilakaukan 0°C, whereas the pressure variation starts from 2.5 to 40 bar. The result is the lower the temperature, so the more absorption, and the higher the pressure the greater the absorption. After getting the data on the hydrogen absorption capacity of coconut shells, carried out an isothermal equation approach to determine the equilibrium absorption capacity. Approach to these equations using the Langmuir equation, Toth, and Langmuir-Freundlich. The result is an approach using the Langmuir-Freundlich equation is the best approach for this experiment, because the standard deviation or produced the smallest deviation than the other two equations.

Key words: adsorption, hydrogen, activated carbon, coconut shell

## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	iii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
Abstrak .....	viii
Absract .....	ix
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiii
PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Metode Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Hidrogen.....	6
2.1.1 Hydrogen Storage.....	8
2.1.2 <i>Adsorption Hydrogen Storage</i> .....	10
2.2 Adsorben.....	12
2.3 Mekanisme Adsorpsi Hidrogen Pada Karbon Aktif.....	16
2.4 Metode Pengujian Adsorpsi .....	19
2.4.1 Metode Gravimetrik .....	19
2.4.2 Metode Volumetrik .....	21
2.5 Adsorpsi Equilibrium .....	22
2.5.1 Adsorpsi Isotermal .....	23
2.5.2 Adsorpsi Isobar .....	23
2.5.3 Adsorpsi Isosterik.....	24
2.6 Persamaan Adsorpsi Isotermal.....	24
2.6.1 Persamaan Isotermal Langmuir.....	25
2.6.2 Persamaan Isotermal Toth .....	26
2.6.3 Persamaan Isotermal Langmuir-Freundlich.....	26
RANCANGAN ALAT UJI DAN PROSEDUR PENGUJIAN .....	27
3.1 Pengujian Adsorpsi Volumetrik.....	27
3.2 Pengukuran Volume Charging Cell dan Volume Kosong Measuring Cell .....	30

3.2.1	Pengukuran Volume <i>Charging Cell</i> .....	30
3.2.2	Pengukuran Volume Kosong <i>Measuring Cell</i> .....	31
3.3	Persiapan Penelitian .....	33
3.4	Prosedur Penelitian.....	33
3.5	Perhitungan Massa Adsorbat yang Diserap .....	34
	<b>PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA DATA.....</b>	<b>37</b>
4.1	Error Analisis Pada Adsorpsi Isotermal .....	37
4.1.1	Errors pada Volume Charging Cell ( $V_{cc}$ ) .....	37
4.1.2	<i>Errors</i> pada Volume Kosong pada <i>Measuring Cell</i> ( $V_{vv}$ ).....	37
4.1.3	<i>Error</i> pada Pengukuran Temperatur.....	38
4.1.4	<i>Error</i> pada Pengukuran Tekanan .....	38
4.1.5	<i>Error</i> pada Pengukuran Massa Sampel .....	38
4.2	Kapasitas Adsorpsi Hidrogen Pada Batok Kelapa .....	38
4.2.1	Kapasitas Penyerapan pada Temperatur 35°C .....	39
4.2.2	Kapasitas Penyerapan pada Temperatur 25°C .....	40
4.2.3	Kapasitas Penyerapan pada Temperatur 0°C .....	42
4.2.4	Perbandingan Kapasitas Penyerapan Berdasarkan Temperatur.....	44
4.3	Perbandingan Kapasitas Penyerapan Batok Kelapa Dibandingkan dengan Batu Bara 45	
4.3.1	Perbandingan pada Temperatur 35°C.....	46
4.3.2	Perbandingan pada Temperatur 25°C.....	47
4.3.3	Perbandingan pada Temperatur 0°C.....	48
4.4	Perbandingan Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada Batok Kelapa Mesin – Metal.....	48
4.4.1	Perbandingan pada Temperatur 25°C.....	49
4.4.2	Perbandingan pada Temperatur Rendah (0°C : -5°C).....	50
4.5	Persamaan Adsorpsi Isotermal.....	51
4.5.1	Persamaan Model Langmuir .....	51
4.5.2	Persamaan Model Toth.....	53
4.5.3	Persamaan Model Langmuir-Freundlich .....	54
	<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>57</b>
5.1	Kesimpulan .....	57
5.2	Saran.....	57
	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>58</b>
	<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Fasa Hidrogen .....	7
Gambar 2.2 Densitas Hidrogen Terhadap Temperatur dan Tekanan .....	8
Gambar 2.3 Rasio Ekspansi Hidrogen dalam Fase Cair dan Gas.....	10
Gambar 2.4 Komparasi Adsorption Storage dan Compression Storage .....	11
Gambar 2.5. Hubungan Luas Permukaan dan Kapasitas Penyerapan Hidrogen Pada 4 Mpa.....	11
Gambar 2.6 Porositas Pada Karbon .....	14
Gambar 2.7 Potongan Melintang Material Karbon Aktif .....	18
Gambar 2.8 Proses Adsorpsi Pada Karbon Aktif .....	18
Gambar 2.9 Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan Two Beam Balance .....	19
Gambar 2.10 Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan Magnetic Suspension Balance.....	20
Gambar 2.11 Skema Metode Volumetrik .....	21
Gambar 2.12 Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isotermal .....	22
Gambar 2.13 Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isobar .....	23
Gambar 2.14 Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isosterik .....	23
Gambar 3.1 Sistem Alat Uji Adsorpsi Isotermal.....	27
Gambar 3.2 Pompa Huber.....	27
Gambar 3.3 Circulating Thermal Bath.....	27
Gambar 3.4 National Instrument .....	28
Gambar 3.5 Pompa Vakum Aruki .....	29
Gambar 3.6 Heater.....	29
Gambar 3.7 Skema Alat Uji Adsorpsi Isotermal.....	29
Gambar 3.8 Skema Proses Pengukuran Volume Charging Cell .....	31
Gambar 3.9 Skema Proses Pengukuran Volume Kosong Measuring Cell .....	31
Gambar 3.10 Skema Keseimbangan Massa pada Proses Penyerapan .....	36
Gambar 4.1 Grafik Percobaan Adsorpsi Isotermal Hidrogen Pada Temperatur 35°C ...	39
Gambar 4.2 Grafik Percobaan Adsorpsi Isotermal Hidrogen Pada Temperatur 25°C ...	40
Gambar 4.3 Grafik Percobaan Adsorpsi Isotermal Hidrogen Pada Temperatur 0°C .....	42
Gambar 4.4 Grafik Adsorpsi Isotermal Rata-Rata pada Batok Kelapa .....	44
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Adsorpsi Isotermal Batok Kelapa Dibandingkan dengan Batu Bara pada Temperatur 35°C .....	46
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Adsorpsi Isotermal Batok Kelapa Dibandingkan dengan Batu Bara pada Temperatur 25°C .....	47

Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Adsorpsi Isotermal Batok Kelapa Dibandingkan dengan Batu Bara pada Temperatur 0°C .....	48
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Adsorpsi Isotermal Batok Kelapa Dibandingkan dengan Data Teknik Metalurgi pada Temperatur 25°C.....	49
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Adsorpsi Isotermal Batok Kelapa Dibandingkan dengan Batu Bara pada Temperatur Rendah (0°C : -5°C) .....	50
Gambar 4.10 Grafik Adsorpsi Isotermal Hidrogen pada Batok Kelapa Granular dengan Pendekatan Persamaan Langmuir .....	52
Gambar 4.11 Grafik Adsorpsi Isotermal Hidrogen pada Batok Kelapa Granular dengan Pendekatan Persamaan Toth .....	53
Gambar 4.12 Grafik Adsorpsi Isotermal Hidrogen pada Batok Kelapa Granular dengan Pendekatan Persamaan Langmuir-Freundlich .....	55

### **DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1 Luas Permukaan pada Karbon Aktif Batubara dan Batok Kelapa.....	16
Tabel 4.1 Perhitungan Void Volume .....	37
Tabel 4.2 Adsorpsi Isotermal Hidrogen Pada Temperatur 35°C.....	40
Tabel 4.3 Adsorpsi Isotermal Hidrogen Pada Temperatur 25°C.....	41
Tabel 4.4 Adsorpsi Isotermal Hidrogen Pada Temperatur 0°C.....	42
Tabel 4.5 Adsorpsi Isotermal Hidrogen Rata-Rata .....	45
Tabel 4.6 Perbandingan Adsorpsi Isotermal Hidrogen Mesin - Metal .....	51
Tabel 4.7 Besaran yang Digunakan pada Persamaan Model Langmuir untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen.....	52
Tabel 4.8 Besaran yang Digunakan pada Persamaan Model Toth untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen.....	53
Tabel 4.9 Besaran yang Digunakan pada Persamaan Model Langmuir-Freundlich untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen .....	55

## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Bertahun-tahun belakangan ini kita dihadapkan pada isu-isu energi, yaitu masalah keterbatasan sumber energi fosil, terutama bahan bakar minyak serta masalah sumber energi yang ramah lingkungan. Penggunaan bahan bakar minyak pada kendaraan dan industri yang semakin meningkat membuat produksi karbon hasil pembakaran meningkat pula yang membuat terjadinya pemanasan global atau global warming.

Dengan semakin menipisnya cadangan minyak di bumi kita ini membuat masalah energi yang tak kunjung selesai, ditambah lagi dengan semakin meningkatnya konsumsi akan bahan bakar minyak membuat masalah energi ini semakin rumit. Jika masalah ini dilanjutkan maka akan terjadi sebuah krisis energi yang semakin parah. Karena hal inilah diperlukan sebuah sumber energi alternatif yang diharapkan dapat menggantikan peran sumber energi fosil yang mulai menipis di masa mendatang.

Sumber energi alternatif tersebut merupakan sumber energi yang terbarukan, yaitu yang tidak akan habisnya. Sumber energi terbarukan itu bisa berupa tenaga matahari, angin, air, panas bumi, bio massa, dan gelombang laut. Semua sumber-sumber energi tersebut sudah banyak dicoba dan dikembangkan, namun masih diharapkan agar terus bermunculan sumber-sumber energi alternatif yang lain termasuk hidrogen.

Hidrogen merupakan sumber energi yang unsurnya tersedia dalam jumlah yang banyak di dunia ini, sehingga untuk masalah ketersediaan tidak perlu dikhawatirkan lagi. Namun senyawa hidrogen di dunia ini relatif langka, dan biasanya dihasilkan melalui industri dari air ( $H_2O$ ) dan berbagai senyawa hidrokarbon seperti metana. Hidrogen juga merupakan sumber energi yang ramah lingkungan, sehingga sangat cocok untuk dijadikan fuel cell sebagai pengganti bahan bakar minyak yang sudah ada saat ini. Proses pembakaran hidrogen tidak

akan menghasilkan gas buang karbon saat digunakan, sehingga penggunaan hidrogen tidak menyebabkan polusi. Selain itu, pemakaian hidrogen sebagai bahan bakar jauh lebih efektif ketimbang bensin dan solar karena pembakarannya hampir 3 kali lipat lebih banyak daripada bensin dan solar.

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. Oleh sebab itu diperlukan sebuah penelitian yang membuktikan karbon aktif manakah yang paling efektif dan terbaik dalam menyimpan hidrogen

## **1.2 Perumusan Masalah**

Mengembangkan teknologi penyimpanan hidrogen yang aman, handal, kompak, dan hemat biaya adalah salah satu hambatan teknis paling menantang untuk menyebar-luaskan penggunaan hidrogen sebagai salah satu bentuk energi, karena hidrogen memiliki karakteristik fisik yang membuatnya sulit untuk disimpan dalam jumlah besar tanpa menyita sejumlah besar ruang. 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 (Awasthia, K., 2002).

Salah satu cara untuk meningkatkan daya adsorpsi dari suatu adsorben berbentuk granular adalah dengan mencari jenis karbon aktif yang memiliki sebanyak mungkin pori. Dengan semakin besarnya prosentase

mikropori yang dihasilkan dibandingkan makropori dan mesoporinya, maka kemampuan adsorpsi dari adsorben tersebut diharapkan akan meningkat.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan karbon aktif granular manakah yang memiliki kemampuan terbaik dalam menyimpan hidrogen dalam jumlah yang banyak.

Tujuan rinci dari penelitian ini adalah:

- Melakukan pengujian adsorpsi isothermal gas hidrogen pada karbon aktif berbentuk granular yaitu batok kelapa kelas A untuk tekanan hingga 4 MPa dengan temperatur 35<sup>0</sup>C, 25<sup>0</sup>C dan 0<sup>0</sup>C, sehingga didapat data kapasitas penyerapannya.
- Mendapatkan persamaan garis sebagai pendekatan terhadap data kapasitas hidrogen.

### 1.4 Batasan Masalah

Adapun permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini diuraikan dengan pertanyaan Bagaimana kapasitas adsorpsi dari padatan karbon aktif berbentuk batok kelapa granular beserta persamaan adsorpsi isothermal yang paling mendekati.

### 1.5 Metode Penelitian

Metodologi penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

#### 1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan proses pengumpulan informasi yang berkaitan dengan materi bahasan yang berasal dari buku–buku, jurnal yang berasal dari dosen maupun perpustakaan.

#### 2. Perbaikan Alat uji

Pada tahap ini meliputi perbaikan, penggantian, dan penambahan alat uji. Hal ini dilakukan untuk mengembalikan dan meningkatkan kondisi alat, sehingga pengujian dapat dilakukan dan data yang diperoleh lebih akurat.

### 3. Kalibrasi alat uji

Kalibrasi adalah membandingkan alat ukur yang akan kita gunakan dengan alat ukur standar, sebelum pengujian dilakukan dilakukan kalibrasi terhadap alat ukur tekanan dan temperatur agar data yang dihasilkan nantinya lebih akurat.

### 4. Pengecekan sistem

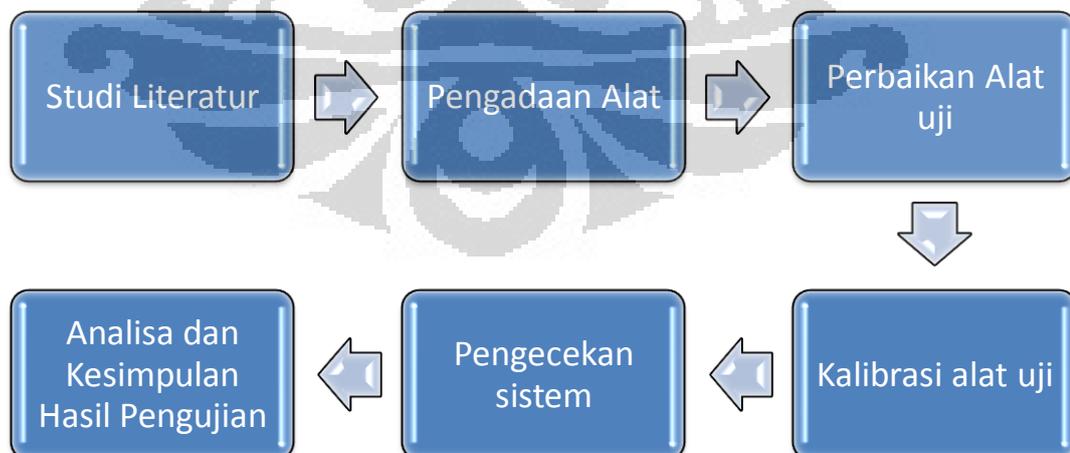
Setelah semua alat terpasang pada sistem proses selanjutnya adalah pengecekan yang meliputi tes kebocoran, vakum, dan pengetesan kelistrikan

### 5. Pengujian sistem

Pengujian dilakukan dengan memantau data dari alat ukur seperti thermocouple, pressure transmitter melalui data akuisisi (*NationalInstrumentLabView*) untuk mengetahui proses adsorpsi secara keseluruhan. Proses pengujian ini meliputi pengambilan data pada alat ukur.

### 6. Analisa dan Kesimpulan Hasil Pengujian

Data yang telah diolah, kemudian dianalisa terhadap grafik yang diperoleh. Dari analisa tersebut akan diperoleh kesimpulan terhadap proses pengujian sistem Adsorpsi Hidrogen.



## 1.6 Sistematika Penulisan

Agar laporan tugas akhir ini memiliki struktur yang baik dan tujuan penulisan dapat tercapai dengan baik, maka penulisan skripsi ini mengikuti sistematika penulisan sebagai berikut :

### BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini berisi tentang latar belakang yang melandasi penulisan skripsi, perumusan masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

### BAB II DASAR TEORI

Bab ini menjelaskan tentang teor-teori yang mendasari penelitian ini. Dasar teori meliputi: dasar teori tentang sistem adsorpsi hidrogen dan dasar teori karbon akrif. Dasar teori yang ada dikutip dari beberapa buku dan referensi lain yang mendukung dalam penulisan ini.

### BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang deskripsi alat pengujian yang digunakan, metode persiapan, dan metode pengambilan data yang dilakukan.

### BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bagian ini berisikan tentang hasil data yang diperoleh dari proses pengujian, serta berisikan tentang analisa dari data yang telah diperoleh yang nantinya dapat ditarik kesimpulan dari analisa tersebut

### BAB V KESIMPULAN

Bab ini tentang kesimpulan dari hasil data dan analisa percobaan dan beberapa saran yang diberikan untuk perbaikan pada percobaan yang akan datang.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

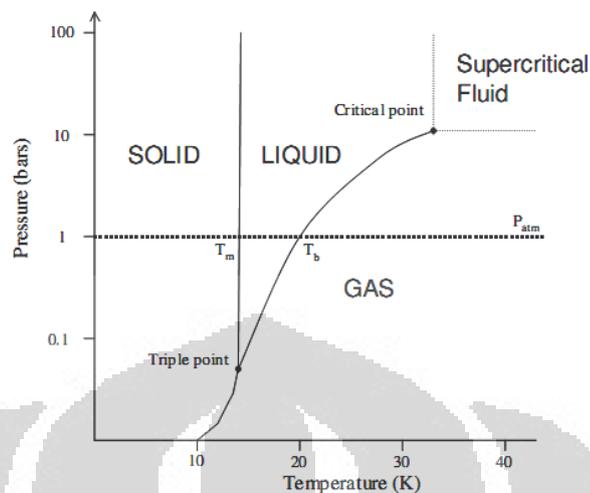
#### 2.1 Hidrogen

Nama kimia untuk unsur dengan lambang H ini adalah Hydrogen. Nama hydrogen diberikan oleh Lavoiser pada tahun 1783 dan berasal dari bahasa Yunani yaitu “Hydro” yang artinya air dan “Genes” yang artinya membentuk atau menghasilkan. Jadi hydrogen berarti unsur pembentuk air atau yang menghasilkan air.

Hidrogen adalah unsur teringan yang terdapat dalam tabel periodik dan merupakan unsur yang paling banyak terdapat di jagat raya dengan prosentase kadar hydrogen di jagat raya adalah 75% berat atau 93% mol. Hidrogen terdapat di bumi sampai diruang angkasa sebagai penyusun bintang. Hidrogen dalam bentuk unsurnya berupa gas diatomic ( $H_2$ ), gas  $H_2$  merupakan gas yang paling ringan, tidak berwarna, dan tidak berbau, dan gas ini bersifat mudah terbakar dengan adanya oksigen.

Jarang sekali menemukan hydrogen dalam bentuk unsurnya ( $H_2$ ) di alam bebas (bumi). Pada kondisi biasa hydrogen terdapat dalam gas diatomik  $H_2$  dimana gas ini bisa keluar dari atmosfer bumi disebabkan berat molekulnya yang ringan. Disebabkan hydrogen adalah unsur yang reaktif maka umumnya hydrogen di bumi ditemukan dalam bentuk senyawanya misalnya dalam bentuk hidrokarbon seperti metana dan air.

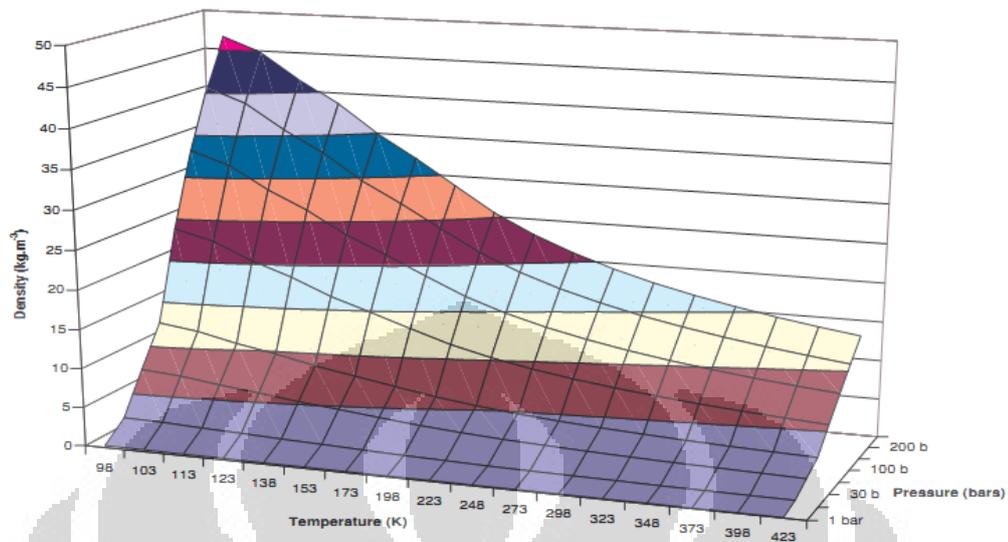
Diagram fase hidrogen ditunjukkan di bawah ini, dengan titik triple di  $-259,1^{\circ}C$  dan  $0,07$  bar dan titik kritis pada  $-239,8^{\circ}C$  dan  $13$  bar. Pada tekanan atmosfer titik didih ( $T_b$ ) adalah pada  $-253^{\circ}C$  dan titik leleh ( $T_m$ ) pada  $-259^{\circ}C$ . Garis putus-putus 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 2.1 Diagram Phasa Hidrogen

Density hidrogen pada tekanan atmosfer sebagai gas (pada suhu kamar) adalah  $0,09 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , sebagai cairan (pada  $-253^\circ \text{C}$ )  $70,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  dan sebagai padat (pada  $-262^\circ \text{C}$ )  $70,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Titik kritis untuk hidrogen pada tekanan 13 bar dan suhu sekitar  $-240^\circ \text{C}$ , yang berarti bahwa pada setiap suhu diatas  $-240^\circ \text{C}$  hidrogen tetap gas pada tekanan berapapun, dan tidak akan pernah menjadi cair pada suhu kamar. Untuk hidrogen cair, suhu harus dijaga antara  $-240^\circ \text{C}$  dan  $-259^\circ \text{C}$  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 2.2 Densitas Hidrogen terhadap Temperatur dan Tekanan

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

### 2.1.1 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 internasional 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 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  $Mg_2NiH_4$  (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  $H_2$  dengan melepaskan gas CO dan  $CO_2$ .

### b. Ammonia

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

### c. Hidrida logam

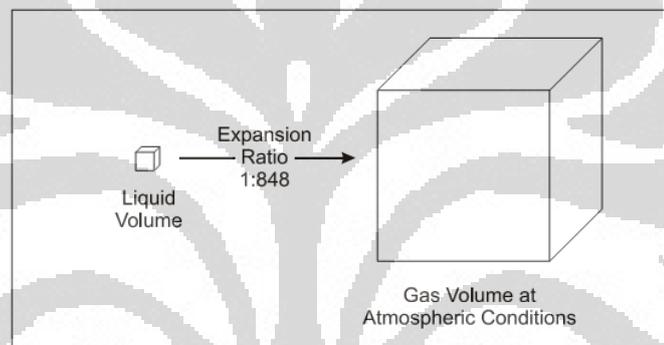
Merupakan senyawa reaktif yang akan segera melepaskan hidrogen apabila bereaksi dengan air. Contohnya adalah NaH, LiH,  $NaAlH_4$ ,  $NaBH_4$ ,  $LiBH_4$ , dan  $CaH_2$

## 5. Adsorpsi Storage

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

### 2.1.2 Adsorption Hydrogen Storage

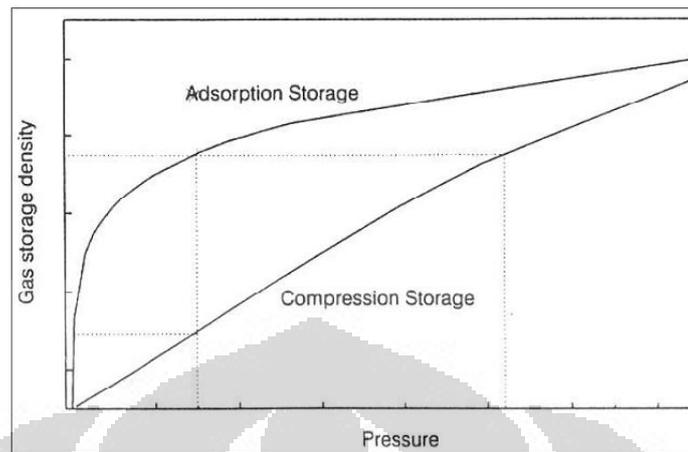
Teknologi penyimpanan memiliki posisi paling strategis dalam isu aplikasi Hidrogen sebagai sumber energi karena hidrogen memiliki karakteristik fisik yang membuatnya sulit untuk disimpan dalam jumlah besar tanpa menyita sejumlah besar ruang.



Gambar 2.3 Rasio Ekspansi Hidrogen dalam Fase Cair dan Gas

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

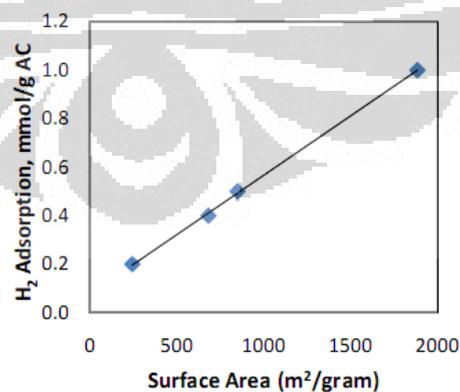
Karena hidrogen adalah berupa gas dalam temperatur dan tekanan atmosfer, maka kemungkinan untuk disimpan dengan menggunakan metode adsorpsi semisal karbon aktif menjadi sangat menarik. Material karbon aktif dapat dengan mudah untuk mengikat dan melepas *hydrogen* melalui mekanisme adsorpsi dan desorpsi. 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 2.4 Komparasi *Adsorption 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 2.5 Hubungan Luas Permukaan dan Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada 4 MPa ( Mahmud sudibandriyo 2001 )

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

## 2.2 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.

### 2.2.1 Karbon Aktif

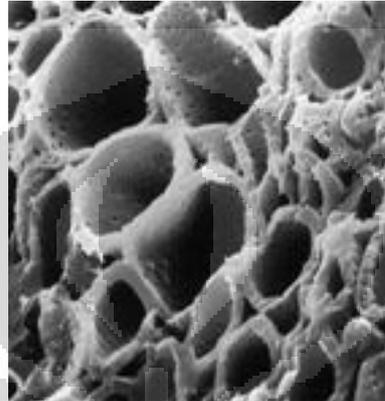
Material karbon aktif adalah salah satu kandidat untuk penyimpanan hidrogen karena memiliki kemampuan penyerapan yang tinggi, luas permukaan spesifik yang tinggi, mikrostruktur berpori, densitas masa yang rendah dan murah menjadi salah satu penelitan yang sangat menarik.

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 aktifasi, ketika karbon diaktifkan dengan sebuah reaksi kimia yang melibatkan reaktan seperti KOH (potasium hidroksida).



Gambar 2.6 Porositas pada Karbon

Karbon aktif berbentuk granular selalu memiliki pori yang besar, tetapi pada karbon aktif dalam bentuk partikel 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.

Karbon aktif batu bara dan Tempurung Kelapa memiliki struktur kristalin, sehingga memungkinkan material tersebut dapat digunakan sebagai material penyimpanan. Fenomena penggilingan mekanika membantu partikel menjadi fasa mikro atau nanokristalin sehinggamenyebabkan penurunanenergiaktivasi desorpsi (Stroebe, R., 2006) (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 mengarahkan 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.

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.

Tabel 2.1 Luas Permukaan pada Karbon Aktif Batubara dan Batok Kelapa

Jenis Sampel	Surface Area (m <sup>2</sup> /gr)	Total Pore Volume (cc/gr)	Diameter Pori (Å)
Batubara	752.01	0.403	21.435
Batok Kelapa	414.9	0.208	20.051

### 2.3 Mekanisme Adsorpsi Hidrogen 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

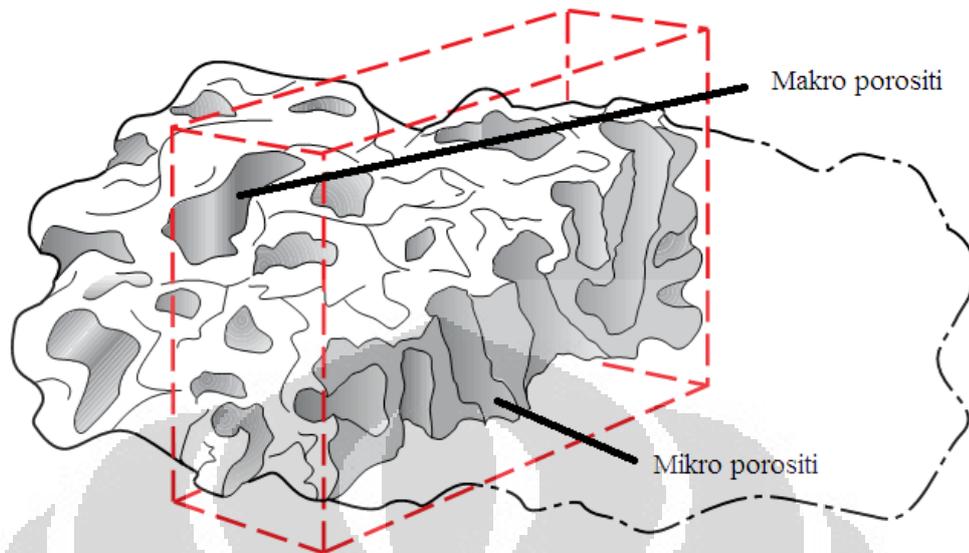
- a) Penyerapan molekul hidrogen pada permukaan seperti *physisorption* (penyerapan fisika).

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*

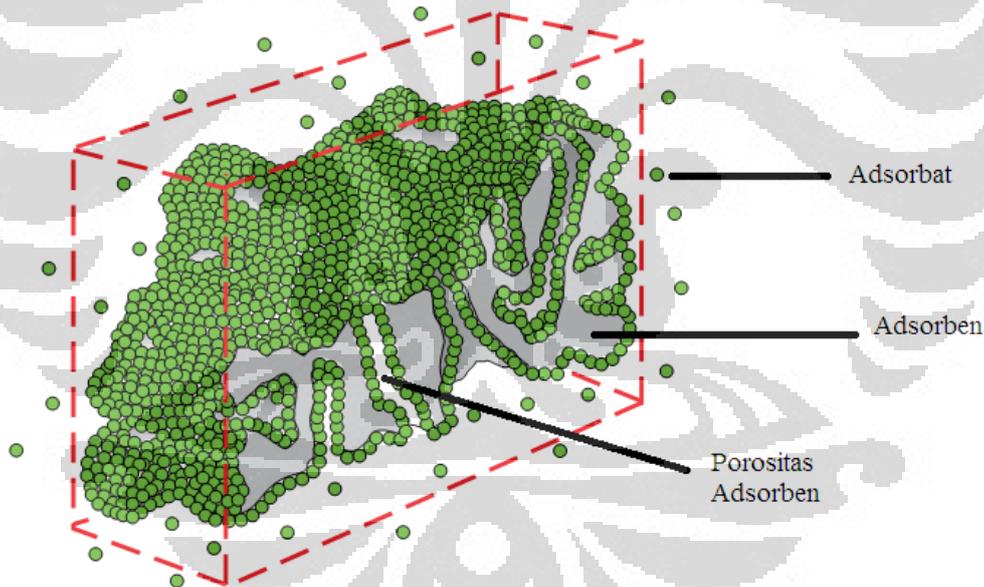
*Walls* yaitu gaya tarik menarik yang relatif lemah antara permukaan adsorben dengan adsorbat. Dengan demikian adsorbat tidak terikat secara kuat pada permukaan adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan ke bagian permukaan lainnya. Dan pada permukaan yang ditinggalkan oleh 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).

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 per dua atom karbon (4.2 % massa). Berbeda dengan kemisorpsi, rasio pada dua atom hidrogen persatu karbon yang diwujudkan dalam kasus polietilen (Stroebel, R., 2006). Gaya *Van Der Walls* 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.



Gambar 2.7 Potongan Melintang Material Karbon Aktif



Gambar 2.8 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.

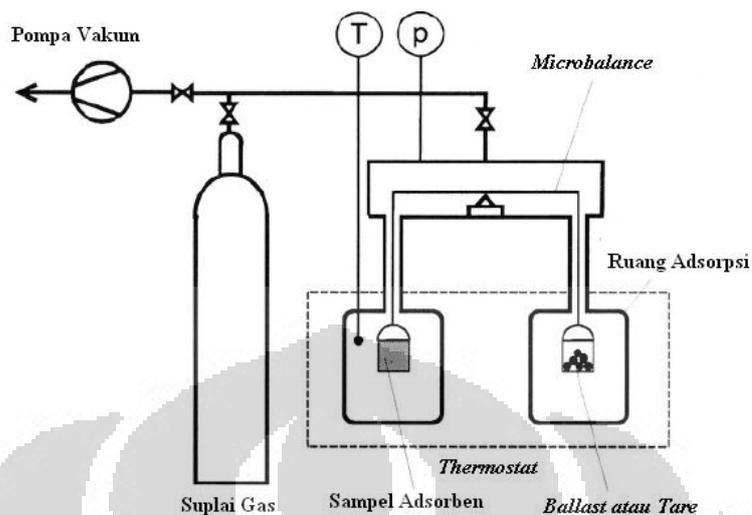
## 2.4 Metode Pengujian Adsorpsi

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.

### 2.4.1 Metode Gravimetrik

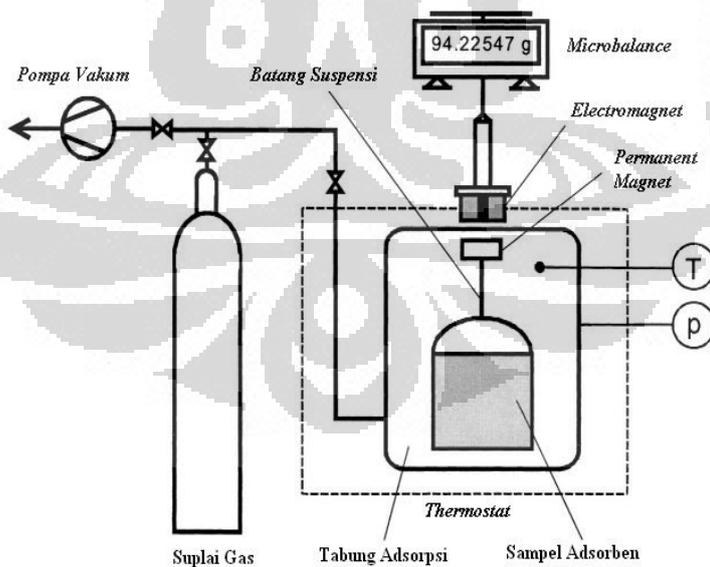
Metode gravimetrik memiliki akurasi untuk pengukuran paling tinggi diantara metode lain pada pengukuran adsorpsi isothermal. Pengukuran adsorpsi isothermal yang dapat dilakukan menggunakan metode gravimetrik, antara lain: massa yang terserap pada adsorben, tekanan gas dan temperatur. Alat yang digunakan 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 2.9 Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Two Beam Balance* (Keller, Jurgen., 2005)

Pada Gambar 2.9 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.



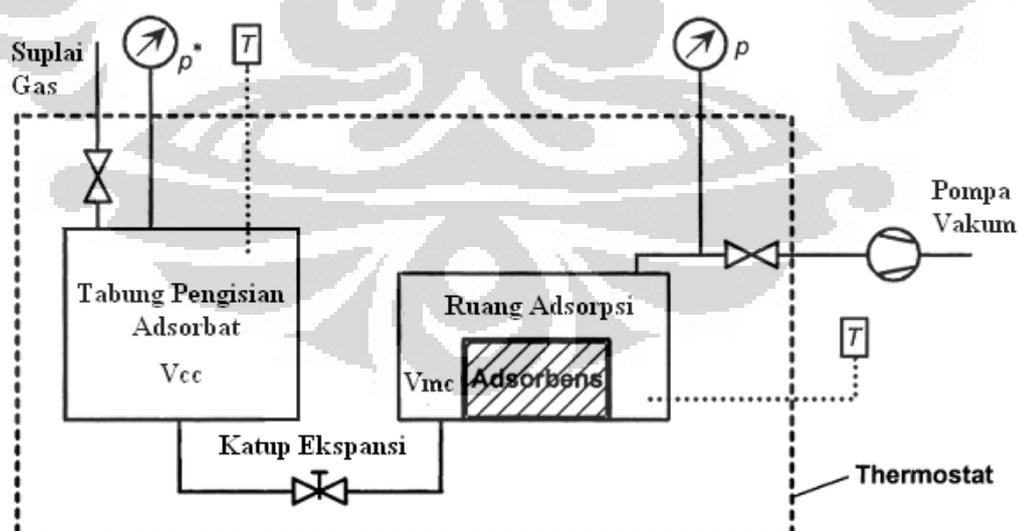
Gambar 2.10 Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Magnetic Suspension Balance* (Keller, Jurgen., 2005)

Pada Gambar 2.10 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*.

#### 2.4.2 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 2.11.

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 2.11 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).

## 2.5 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);

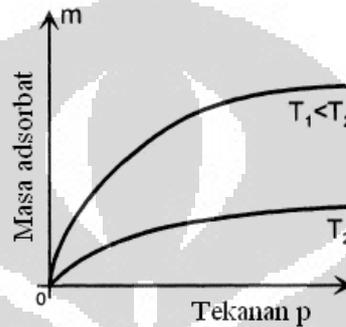
$$\frac{x}{m} = f(p, T) \quad (2.2)$$

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

### 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):

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

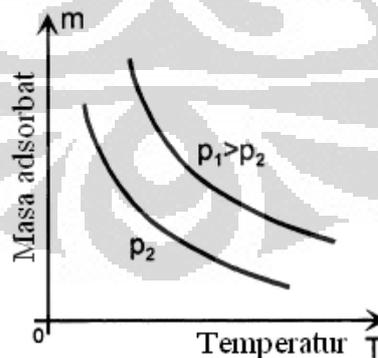


Gambar 2.12 Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isotermal  
(Keller, Jurgen., 2005)

### 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):

$$\frac{x}{m} = f(T) \quad [p = \text{konstan}] \quad (2.4)$$

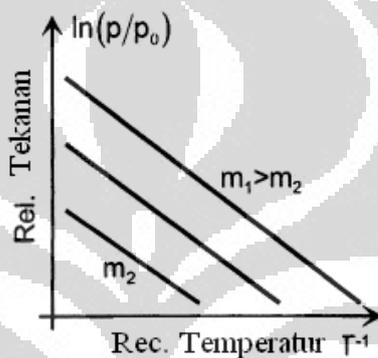


Gambar 2.13 Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isobar  
(Keller, Jurgen., 2005)

### 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).

$$p = f(T) \quad \left[ \frac{x}{m} = \text{konstan} \right] \quad (2.5)$$



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 Persamaan Adsorpsi Isothermal

Persamaan adsorpsi isothermal digunakan untuk meregresi data keseimbangan adsorpsi, sehingga melalui data hasil regresi tersebut dapat dilihat sejauh mana korelasi data hasil eksperimen dengan data regresinya. Selanjutnya

data hasil regresi tersebut digunakan untuk memprediksi data keseimbangan adsorpsi pada tekanan dan temperatur yang lain.

### 2.6.1 Persamaan Isotermal Langmuir

Persamaan isotermal Langmuir adalah teori pertama yang dikembangkan pada adsorpsi isotermal (Bansal, R.C., 2005 and Do, Duong D., 2008).

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

Jumlah molekul atau adsorbat yang menabrak dan kemudian terserap permukaan dalam satuan mol per unit waktu per unit area didapat dari teori kinetik gas (Do, Duong D., 2008):

Jika  $C_\mu$  adalah jumlah penyerapan dalam satuan mol per satuan massa atau volume dan  $C_{\mu s}$  adalah jumlah penyerapan maksimum dimana permukaan tertutup oleh lapisan monolayer adsorbat secara total, sehingga persamaan Langmuir menjadi (Do, Duong D., 2008),

$$C_\mu = C_{\mu s} \frac{b.P}{1 + b.P} \quad (2.6)$$

dengan:

$P$  = Tekanan adsorpsi

$b$  = Konstanta daya tarik menarik antara adsorbat dengan adsorben/konstanta Langmuir. Parameter ini adalah parameter yang menyatakan kekuatan sebuah molekul gas atau adsorbat menempel pada permukaan.

$$b = \frac{\alpha \exp\left(\frac{Q}{R_g T}\right)}{K_{d\infty} \sqrt{2\pi m R_g T}} = k \exp\left(\frac{Q}{R_g T}\right) \quad (2.7)$$

### 2.6.2 Persamaan Isotermal Toth

Persamaan isotermal Toth adalah persamaan isotermal yang dapat digunakan pada tekanan rendah maupun tinggi serta asumsi bahwa permukaan adsorben adalah homogen tidak berlaku. Pada persamaan isotermal Toth terdapat parameter  $t$  yang merupakan parameter karakteristik heterogenitas permukaan adsorben (Do, Duong D., 2008).

Persamaan isotermal Toth adalah sebagai berikut:

$$C_{\mu} = C_{\mu s} \frac{b.P}{[1 + (b.P)^t]^{1/t}} \quad (2.8)$$

### 2.6.3 Persamaan Isotermal Langmuir-Freundlich

Persamaan model Langmuir-Freundlich juga digunakan pada permukaan adsorbent yang heterogen seperti karbon aktif dan juga digunakan untuk tekanan rendah dan tinggi seperti halnya persamaan model Toth, bahkan persamaan Langmuir-Freundlich memiliki prediksi yang lebih baik pada tekanan tinggi (Byoung-Uk Choi, 2003). Dengan adanya tiga parameter dalam persamaan ini, akan memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan persamaan Langmuir yang hanya memiliki dua parameter.

Persamaan isotermal Langmuir-Freundlich adalah sebagai berikut:

$$C_{\mu} = C_{\mu s} \frac{(b.P)^{1/t}}{1 + (b.P)^{1/t}} \quad (2.9)$$

## BAB 3

### RANCANGAN ALAT UJI DAN PROSEDUR PENGUJIAN

#### 3.1 Pengujian Adsorpsi Volumetrik



Gambar 3.1 Sistem Alat Uji Adsorpsi Isotermal

Alat uji adsorpsi isothermal pada prinsipnya terdiri atas dua buah silinder yaitu silinder pengisian (charging cell) dan silinder pengukuran (measuring cell) yang terbuat dari stainless steel 304 (SS 304) seperti terlihat pada gambar 3.1. 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  $0,1^{\circ}\text{C}$ .



Gambar 3.2 Pompa Huber



Gambar 3.3 Circulating Thermal Bath

Tekanan pada kedua silinder diukur dengan menggunakan pressure transmitter dengan kisaran pengukuran 0-40 bar absolut (merk WIKA) dengan akurasi 0,25%. 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.



Gambar 3.4 National Instrument

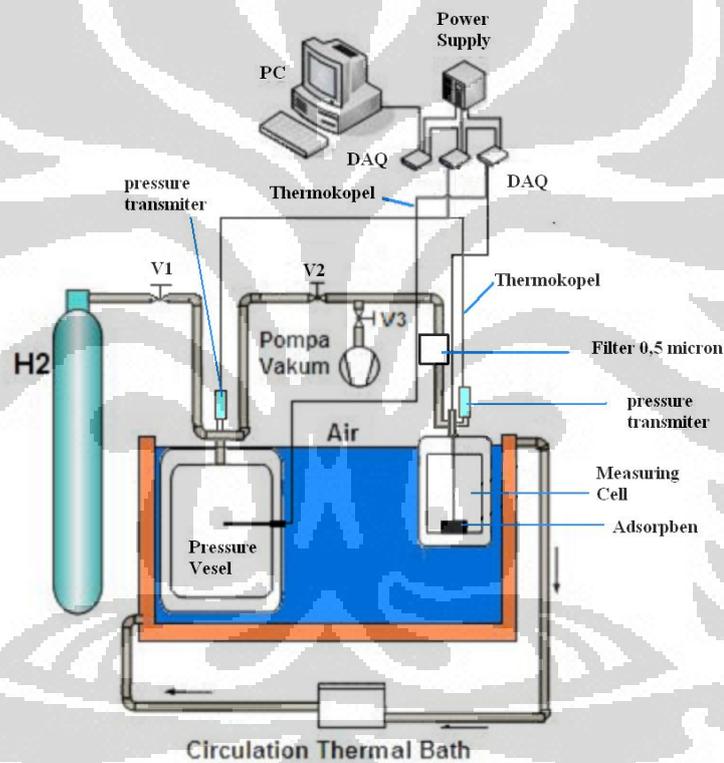
Setelah karbon aktif dimasukkan kedalam measuring cell dan antara measuring cell dan charging cell telah terhubung maka proses awal pengujian adalah proses degassing. Proses degassing dimaksudkan untuk mengeluarkan seluruh unsur atau zat pengotor (impurity) yang kemungkinan teradsorpsi oleh karbon aktif 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 130–140°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° C untuk menjaga agar temperatur pada system konstan pada temperatur tertentu.



Gambar 3.5 Pompa Vakum Aruki



Gambar 3.6 Heater



Gambar 3.7 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 tekanan pengisian 40 bar. Proses diatas dilakukan kembali untuk tiap temperatur isothermal yang berbeda.

### 3.2 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 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:

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

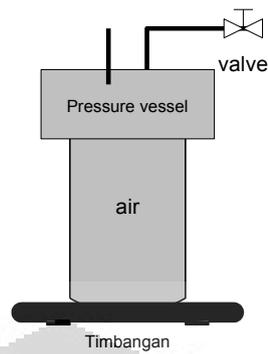
dengan :  $m_{air}$  : massa air (kg)

$m_{PV+air}$  : 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 3.8 Skema Proses Pengukuran Volume *Charging Cell*

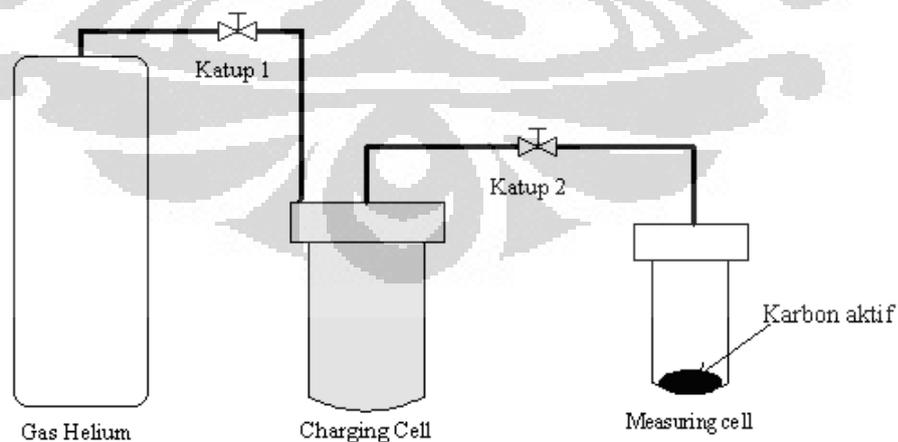
### 3.2.2 Pengukuran Volume Kosong *Measuring Cell*

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*.

$$V_{kosong} = V_{MC} - V_{ruang\ yang\ terisi\ adsorben} + V_{pori-pori\ adsorben} \quad (3.3)$$

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

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



Gambar 3.9 Skema Proses Pengukuran Volume Kosong *Measuring Cell*

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

- a. Pastikan *measuring cell* dalam keadaan vakum.
- 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:

$$n = \frac{P_{cci} \cdot V_{cc}}{Z_{He} \cdot R \cdot T} \quad (3.4)$$

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* ( $P_{cef}$ ) dicatat. Dengan data ini, maka akan diketahui jumlah mol ( $n_i$ ) He yang masuk ke dalam *measuring cell*, dengan persamaan:

$$n_i = \left( \frac{P_{cci}}{Z_{He, P_{cci}} \cdot R \cdot T} - \frac{P_{cef}}{Z_{He, P_{cef}} \cdot R \cdot T} \right) \cdot V_{cc} \quad (3.5)$$

- 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*:

$$V_{void} = \frac{n_i \cdot Z_{He, P_{mcf}} \cdot R \cdot T}{P_{mcf}} \quad (3.6)$$

- e. Prosedur ini dilakukan 3 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 (Awaludin, 2010).

1. Karbon aktif dimasukkan kedalam *measuring cell*  $\pm 4.35$  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 ( $\pm 4.35$  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 5 sampai 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 Perhitungan Massa Adsorbat yang Diserap

Pengujian adsorpsi isotermal dilakukan dengan menggunakan metode volumetrik, skema keseimbangan massa adsorpsi isotermal terlihat pada Gambar 3.10. 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):

$$m_{d,mc} = |m_{cc}| - m_{ads} \quad (3.7)$$

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:

$$|m_{cc}| = \Delta m_{cc} = m_{cc}(t) - m_{vcc}(t + \Delta t) = \frac{(p_{cc}(t) - p_{cc}(t + \Delta t)) \cdot V_{cc}}{Z \cdot R_{cc} \cdot T_{cc}} \quad (3.8)$$

$$dm_{d,mc} = m_{d,mc}(t + \Delta t) - m_{d,mc}(t) = \frac{(p_{mc}(t + \Delta t) - p_{mc}(t)) \cdot V_{mc}}{Z \cdot R_{mc} \cdot T_{mc}} \quad (3.9)$$

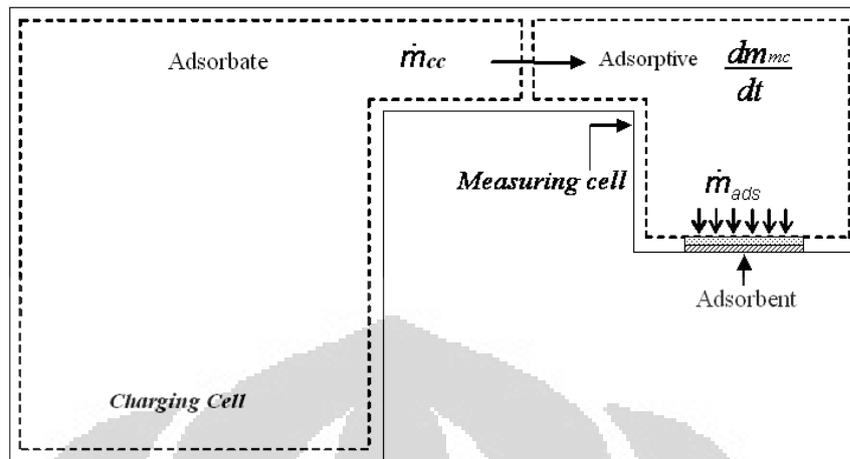
Dengan mensubstitusikan persamaan (2) dan (3) ke dalam pers (1), maka didapat:

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

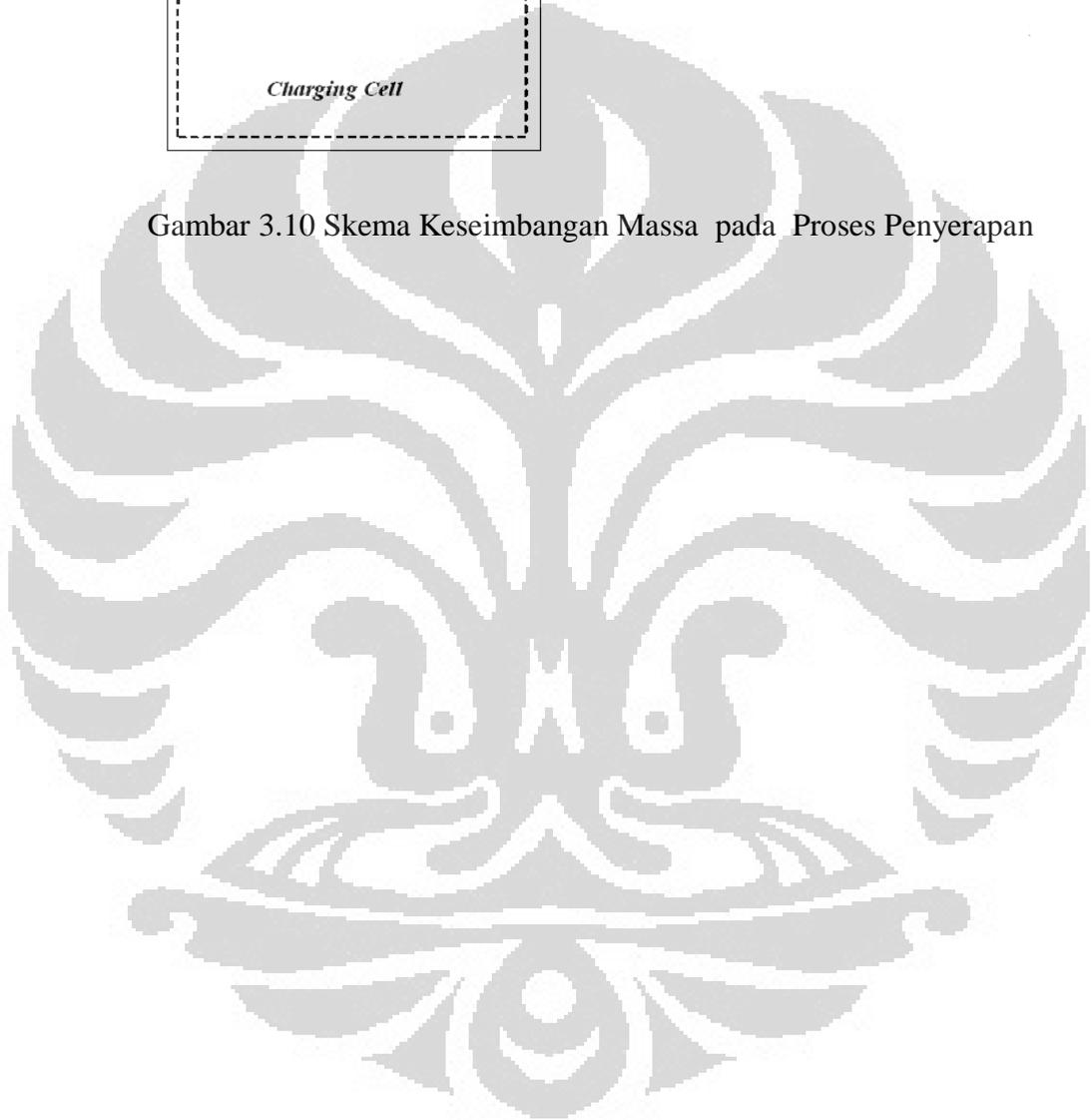
Atau

$$m_{ads} = \rho_{cc}(p, T) V_{cc} - \rho_{mc}(p, T) V_{mc} \quad (3.11)$$

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 3.10 Skema Keseimbangan Massa pada Proses Penyerapan



## BAB 4

### PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA DATA

#### 4.1 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 dibutuhkan *error* analisis pada tiap parameter tersebut di atas.

##### 4.1.1 Errors pada Volume Charging Cell ( $V_{cc}$ )

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  $1170 \pm 0,66$  ml atau dengan nilai ketidakpastian 0,056%.

##### 4.1.2 Errors pada Volume Kosong pada *Measuring Cell* ( $V_{vv}$ )

Volume kosong pada *measuring cell* ( $V_{vv}$ ) dihitung dengan menggunakan gas helium yang dimasukkan ke dalam *measuring cell*. Volume kosong pada *measuring cell* ( $V_{vv}$ ), nilai volume void karbon aktif granular rata-rata yang digunakan sebesar 87.17452 dengan massa karbon aktif 4,35 gr dengan nilai ketidakpastian 0,031%.

Tabel 4.1 Perhitungan Void Volume

		Pressure (kpa)	Suhu (C)	Vmc (cm3)
1	PV awal	704.641	35	87.42350
	PV akhir	655.446	35	
	MC	657.072	35	
2	PV awal	712.006	35	87.04574
	PV akhir	662.534	35	
	MC	663.633	35	

3	PV awal	698.398	35.1	87.05433
	PV akhir	649.865	35.1	
	MC	651.060	35.1	

#### 4.1.3 Error pada Pengukuran Temperatur

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

#### 4.1.4 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.

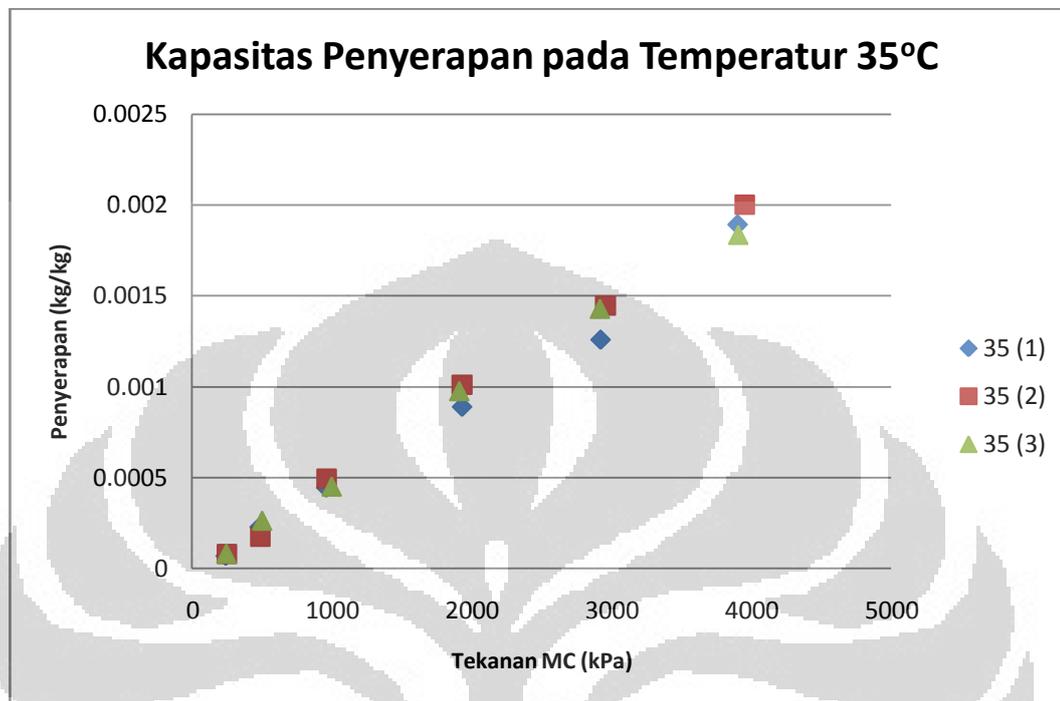
#### 4.1.5 Error pada Pengukuran Massa Sampel

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  $2 \times 10^{-5}$  %.

### 4.2 Kapasitas Adsorpsi Hidrogen Pada Batok Kelapa

Berdasarkan data percobaan yang telah diambil akan dianalisa kapasitas penyerapan hidrogen pada karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular berdasarkan temperatur, yaitu pada temperatur 35°C dan 0°C. Adsorpsi Isotermal pada tiap temperatur diambil sebanyak 3 kali untuk validasi sehingga diketahui standar deviasinya.

#### 4.2.1 Kapasitas Penyerapan pada Temperatur 35°C



Gambar 4.1 Percobaan Adsorpsi Isotermal Hidrogen Pada Temperatur 35°C

Pada grafik diatas terlihat bahwa kapasitas penyerapan maksimum hidrogen pada karbon aktif batok kelapa granular pada temperatur 35°C berkisar diantara 0.0018 kg/kg sampai 0.0020 kg/kg pada tekanan measuring cell berkisar diantara 3900 kPa hingga 3950 kPa. Dengan demikian kemampuan karbon aktif berbentuk batok kelapa granular dalam menyimpan hidrogen adalah sebesar 0.18% sampai 0.20% dari massa batok kelapa itu sendiri.

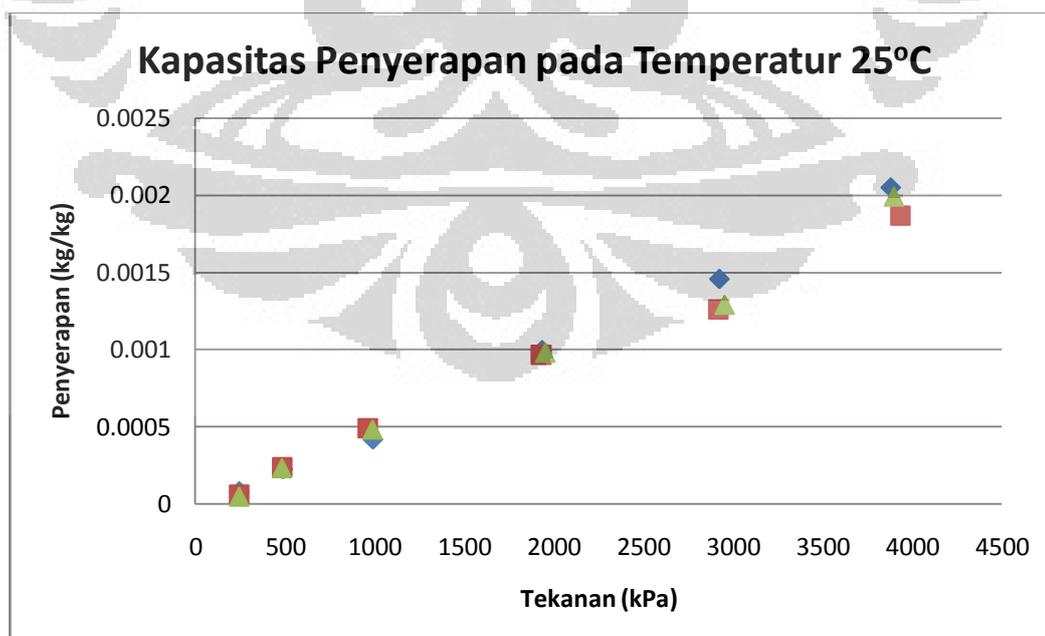
Tabel 4.2 Adsorpsi Isotermal Hidrogen Pada Temperatur 35°C

	<b>T (°C)</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>Abs (kg/kg)</b>
<b>1</b>	35.10	242.4	6.82233E-05
	35.20	485.505	0.000227209
	35.20	961.156	0.000443708
	35.20	1931.501	0.000888945
	35.20	2921.623	0.001258453
	35.30	3900.699	0.001892805
<b>2</b>	<b>T (°C)</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>Abs (kg/kg)</b>

	35.00	251.435	8.09365E-05
	35.00	488.663	0.000175105
	35.00	963.267	0.00049476
	35.10	1931.42	0.00101172
	35.00	2957.099	0.001448429
	35.10	3951.786	0.002002361
3	<b>T (°C)</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>Abs (kg/kg)</b>
	35.00	243.429	8.30643E-05
	35.00	499.361	0.000262971
	35.00	997.124	0.000451041
	35.00	1909.961	0.000976642
	35.00	2915.416	0.001429714
	35.00	3905.345	0.001837169

Setelah dilakukan proses perhitungan untuk mencari rata-rata penyerapan maka didapatkan nilai standar deviasi (error) pada kapasitas penyerapan hidrogen pada karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular yaitu sebesar 0.00006863.

#### 4.2.2 Kapasitas Penyerapan pada Temperatur 25°C



Gambar 4.2 Percobaan Adsorpsi Isotermal Hidrogen Pada Temperatur 25°C

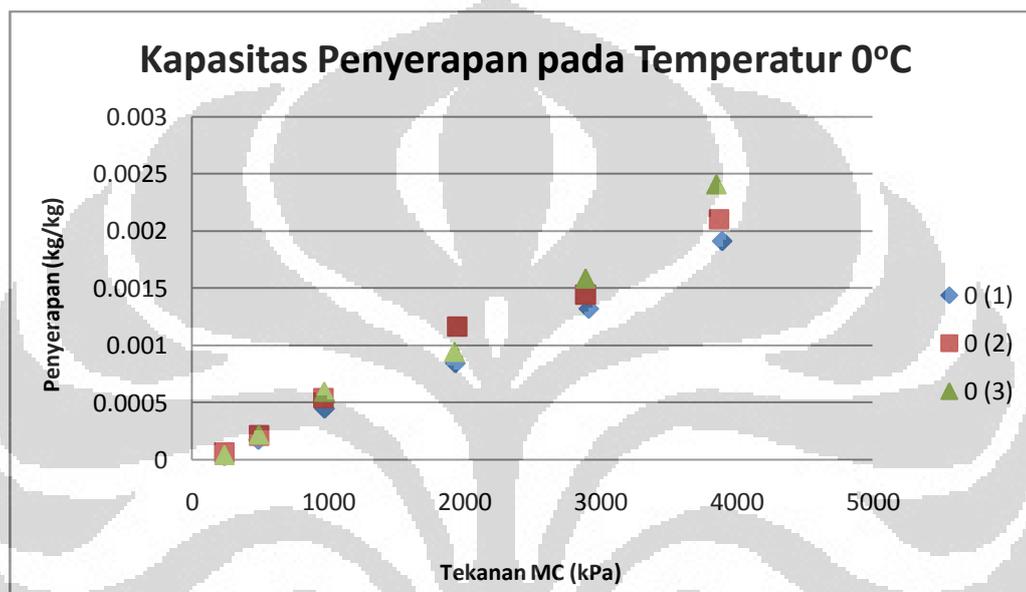
Pada grafik diatas terlihat bahwa kapasitas penyerapan maksimum hidrogen pada karbon aktif batok kelapa granular pada temperatur 25°C berkisar diantara 0.00186 kg/kg sampai 0.00204 kg/kg pada tekanan measuring cell berkisar diantara 3870 kPa hingga 3940 kPa. Dengan demikian kemampuan karbon aktif berbentuk batok kelapa granular dalam menyimpan hidrogen adalah sebesar 0.186% sampai 0.204% dari massa batok kelapa itu sendiri.

Tabel 4.3 Adsorpsi Isotermal Hidrogen Pada Temperatur 25°C

<b>1</b>	<b>T (oC)</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>Abs (kg/kg)</b>
	24.90	245.549	8.0315E-05
	25.00	488.757	0.000223894
	25.00	991.358	0.000416961
	25.00	1934.778	0.000994552
	25.10	2923.516	0.001455687
	25.10	3879.000	0.002047841
<b>2</b>	<b>T (oC)</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>Abs (kg/kg)</b>
	25.00	245.075	5.97468E-05
	25.00	485.195	0.000236286
	25.00	960.904	0.000487957
	25.10	1929.004	0.000964963
	25.10	2918.355	0.001257326
	25.20	3932.477	0.001865595
<b>3</b>	<b>T (oC)</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>Abs (kg/kg)</b>
	25.00	244.989	5.0391E-05
	25.10	483.468	0.00023407
	25.10	988.862	0.000483969
	25.10	1952.678	0.000980898
	25.10	2952.811	0.001290626
	25.10	3897.507	0.001990573

Setelah dilakukan proses perhitungan untuk mencari rata-rata penyerapan maka didapatkan nilai standar deviasi (error) pada kapasitas penyerapan hidrogen pada karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular yaitu sebesar 0.000076094.

#### 4.2.3 Kapasitas Penyerapan pada Temperatur 0°C



Gambar 4.3 Percobaan Adsorpsi Isotermal Hidrogen Pada Temperatur 0°C

Pada grafik diatas terlihat bahwa kapasitas penyerapan maksimum hidrogen pada karbon aktif batok kelapa granular pada temperatur 0°C berkisar diantara 0.0019 kg/kg sampai 0.0024 kg/kg pada tekanan measuring cell berkisar diantara 3850 kPa hingga 3890 kPa. Dengan demikian kemampuan karbon aktif berbentuk batok kelapa granular dalam menyimpan hidrogen adalah sebesar 0.19% sampai 0.24% dari massa batok kelapa itu sendiri.

Tabel 4.4 Adsorpsi Hidrogen Pada Temperatur 0°C

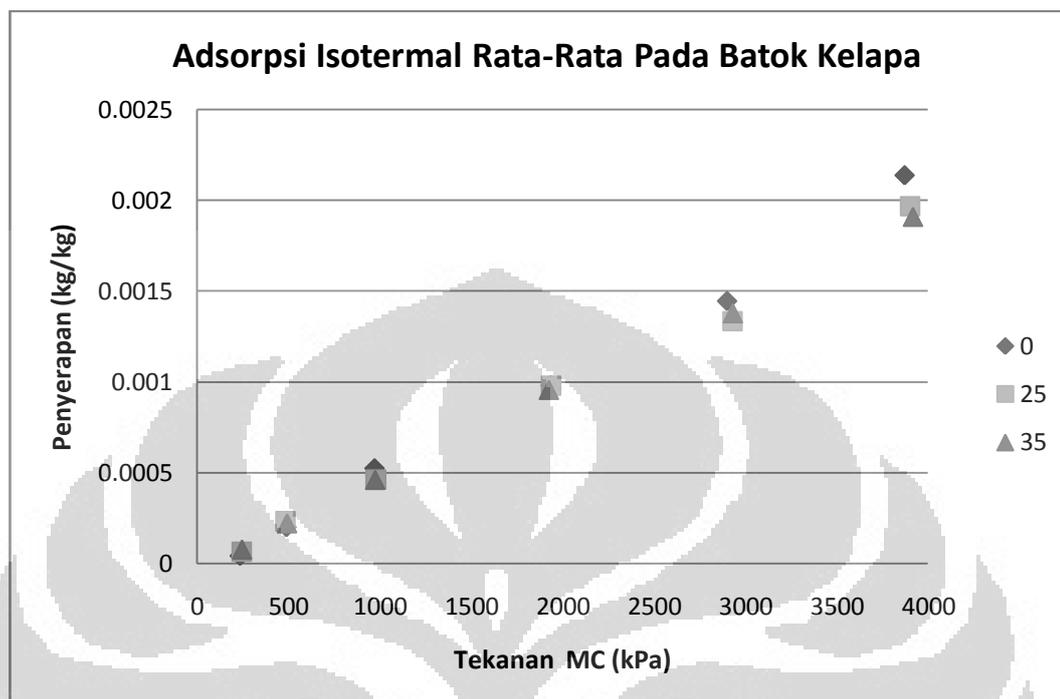
	T (°C)	P (kPa)	Abs (kg/kg)
1	0.00	238.269	2.794E-05
	0.10	488.001	0.000170349
	0.00	974.253	0.000444548
	0.00	1935.345	0.000841115

	0.10	2914.981	0.00131849
	0.10	3894.777	0.001911221
2	<b>T (°C)</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>Abs (kg/kg)</b>
	0.00	236.663	6.46669E-05
	0.10	490.219	0.000211359
	0.10	965.639	0.000537111
	0.10	1947.896	0.001163277
	0.20	2891.170	0.001440412
	0.20	3872.095	0.002098486
	3	<b>T (°C)</b>	<b>P (kPa)</b>
0.00		236.933	4.10297E-05
0.10		490.208	0.000219428
0.10		971.065	0.00059503
0.00		1927.873	0.000943878
0.10		2892.142	0.001585749
0.10		3853.595	0.002410585

Setelah dilakukan proses perhitungan untuk mencari rata-rata penyerapan maka didapatkan nilai standar deviasi (error) pada kapasitas penyerapan hidrogen pada karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular yaitu sebesar 0.000205977.

Setelah dilakukan proses penghitungan standar deviasi (error) diketahui bahwa nilai standar deviasi adsorpsi isothermal hidrogen pada temperatur 0°C lebih besar, sehingga nilai kepastiannya pun lebih baik adsorpsi hidrogen pada temperatur 35°C. Hal ini disebabkan karena dari 3 kali percobaan pengambilan data, hasil penyerapannya jangkauan datanya terlalu melebar dari nilai rata-ratanya.

#### 4.2.4 Perbandingan Kapasitas Penyerapan Berdasarkan Temperatur



Gambar 4.4 Adsorpsi Isotermal Rata-Rata pada Batok Kelapa

Pada grafik diatas terlihat bahwa kapasitas penyerapan rata-rata hidrogen pada karbon aktif batok kelapa granular pada temperatur 35°C sebesar 0.00191078 kg/kg pada tekanan meassuring cell 3919.28 kPa dan pada temperatur 0°C sebesar 0.0021401 kg/kg pada tekanan meassuring cell 3873.49 kPa. Bisa dilihat bahwa dengan tekanan yang lebih rendah sekitar 45 mbar, jumlah penyerapan yang dihasilkan pada temperatur 0°C tetap lebih besar. Dengan demikian kemampuan rata-rata karbon aktif berbentuk batok kelapa granular dalam menyimpan hidrogen adalah sebesar 0.214% dari massa batok kelapa itu sendiri yaitu sebesar 4.35 gr.

Tabel 4.5 Adsorpsi Isotermal Hidrogen Rata-Rata

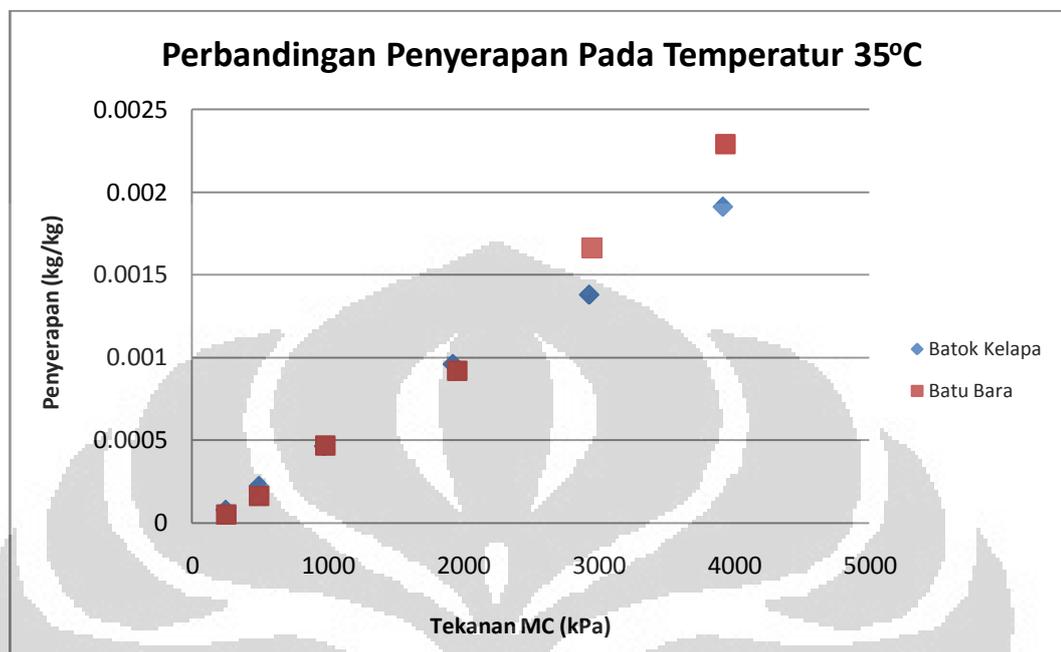
	P (kPa)	Abs (kg/kg)
35°C	245.75	7.7408E-05
	491.18	0.00022176
	973.85	0.00046317
	1924.29	0.00095910
	2931.38	0.00137887

	3919.28	0.00191078
<b>25°C</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>Abs (kg/kg)</b>
	245.20	6.34843E-05
	485.81	0.00023142
	980.37	0.00046296
	1938.82	0.00098014
	2931.56	0.00133455
	3902.99	0.00196800
<b>0°C</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>Abs (kg/kg)</b>
	237.29	4.45455E-05
	489.48	0.00020038
	970.32	0.00052556
	1937.04	0.00098276
	2899.43	0.00144822
	3873.49	0.00214010

### **4.3 Perbandingan Kapasitas Penyerapan Batok Kelapa Dibandingkan dengan Batu Bara**

Pada sub bahasan ini akan dibahas mengenai perbandingan kapasitas penyerapan hidrogen pada karbon aktif berbahan dasar batok kelapa, yaitu yang penulis bahas dengan kapasitas penyerapan hidrogen pada karbon aktif berbahan dasar batu bara yang diambil bersamaan saat pengambilan data. Perbandingan ini akan dibahas perbedaan pada temperaturnya, yaitu 35°C, 25° dan 0°C. Disini akan diketahui seberapa besar kemampuan batok kelapa dalam menyerap hidrogen dibandingkan batu bara yang memiliki volume pori lebih besar dengan massa karbon aktif yang tidak berbeda jauh.

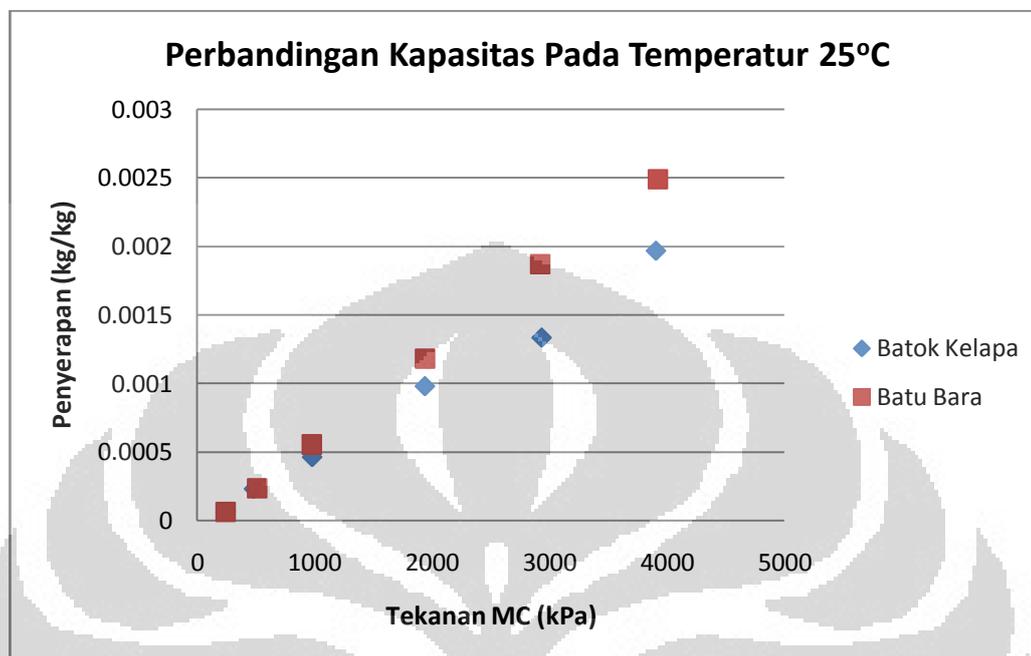
### 4.3.1 Perbandingan pada Temperatur 35°C



Gambar 4.5 Perbandingan Adsorpsi Isotermal Batok Kelapa Dibandingkan dengan Batu Bara pada Temperatur 35°C

Pada grafik diatas yaitu grafik perbandingan kapasitas penyerapan hidrogen antara karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular dan batu bara granular pada temperatur 35°C dapat dilihat bahwa kapasitas penyerapan pada batu bara akan jauh lebih besar ketimbang pada batok kelapa. Hal ini terlihat jelas pada tekanan tinggi, yaitu pada 30 bar dan 40 bar. Perbedaan ini jelas disebabkan akibat volume pori batu bara jauh lebih besar sehingga jumlah hidrogen yang terserap juga akan lebih besar ketimbang pada batok kelapa.

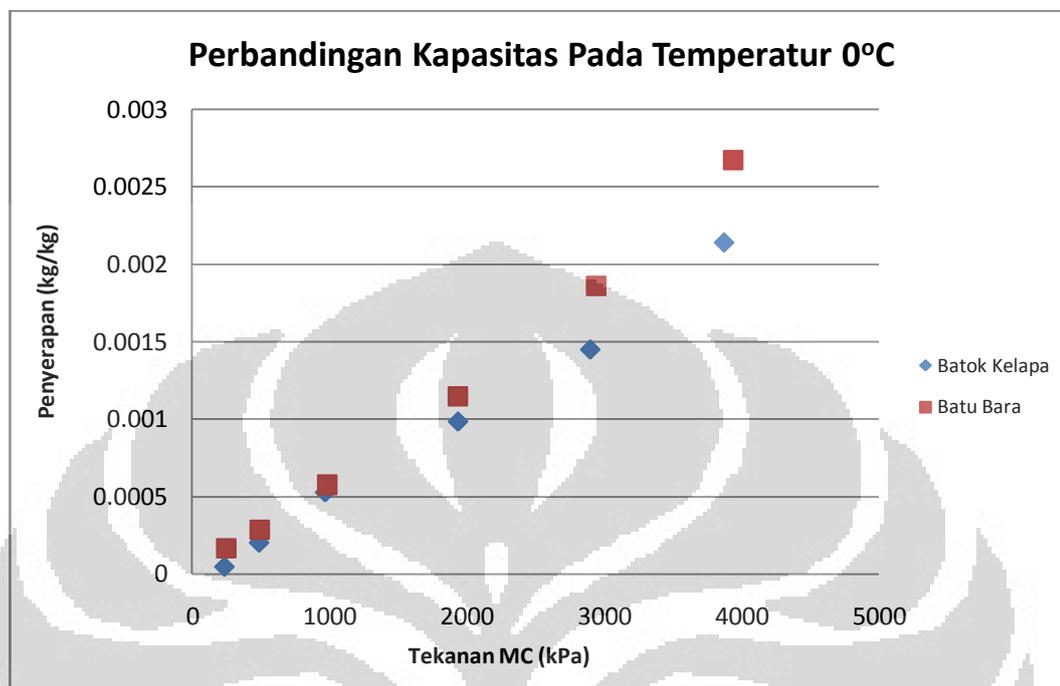
### 4.3.2 Perbandingan pada Temperatur 25°C



Gambar 4.6 Perbandingan Adsorpsi Isotermal Batok Kelapa Dibandingkan dengan Batu Bara pada Temperatur 25°C

Pada grafik diatas yaitu grafik perbandingan kapasitas penyerapan hidrogen antara karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular dan batu bara granular pada temperatur 25°C dapat dilihat bahwa kapasitas penyerapan pada batu bara akan jauh lebih besar ketimbang pada batok kelapa. Hal ini terlihat jelas pada tekanan tinggi, yaitu pada 30 bar dan 40 bar. Perbedaan ini jelas disebabkan akibat volume pori batu bara jauh lebih besar sehingga jumlah hidrogen yang terserap juga akan lebih besar ketimbang pada batok kelapa.

### 4.3.3 Perbandingan pada Temperatur 0°C



Gambar 4.7 Perbandingan Adsorpsi Isotermal Batok Kelapa Dibandingkan dengan Batu Bara pada Temperatur 0°C

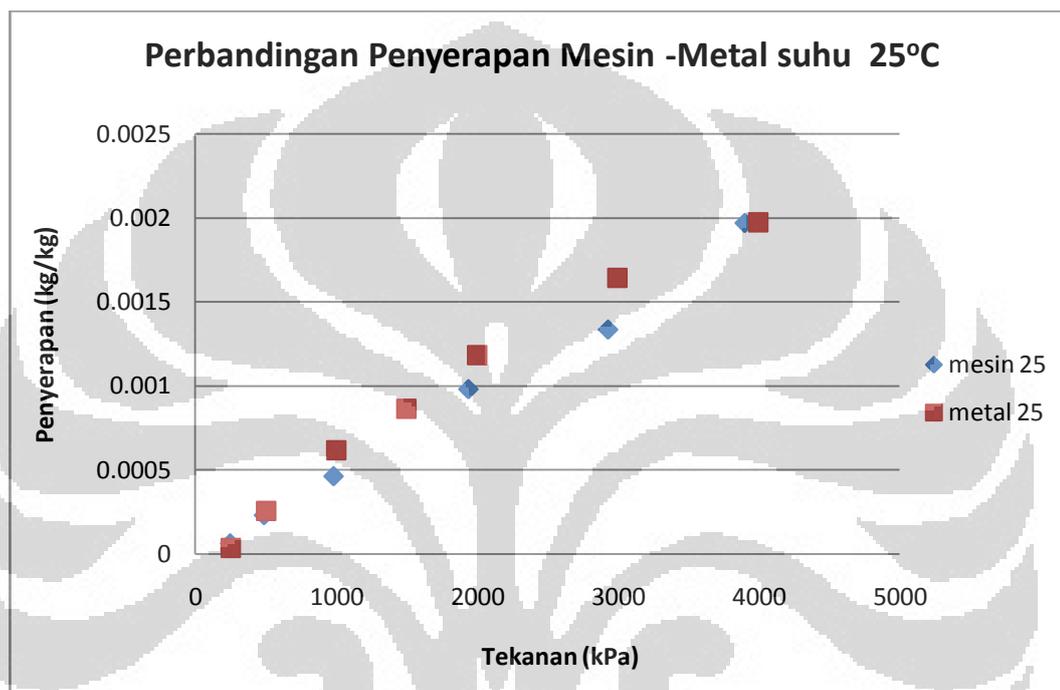
Pada grafik diatas yaitu grafik perbandingan kapasitas penyerapan hidrogen antara karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular dan batu bara granular pada temperatur 0°C dapat dilihat bahwa kapasitas penyerapan pada batu bara lebih besar ketimbang pada batok kelapa. Hal ini terlihat pada hampir semua tekanan. Perbedaan yang besar disebabkan akibat volume pori batu bara lebih besar daripada batok kelapa. Hal yang lain adalah penyerapan ini dilakukan pada temperatur yang lebih rendah yang memungkinkan terjadinya perbedaan yang cukup besar.

### 4.4 Perbandingan Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada Batok Kelapa Mesin – Metal

Pada bagian ini akan dibahas mengenai data perbandingan kapasitas penyerapan hidrogen pada karbon aktif berbahan dasar batok kelapa, yaitu pengambilan data yang dilakukan oleh penulis di Laboratorium Teknik Pendingin dan Tata Udara Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia dengan data

yang diambil oleh rekan di Departemen Teknik Metalurgi Universitas Indonesia. Perbandingan ini akan dibahas perbedaan temperatur 25°C dan temperatur rendah (Mesin pada temperatur 0°C dan Metal pada Temperatur -5°C). Disini akan diketahui seberapa valid data yang diambil oleh penulis.

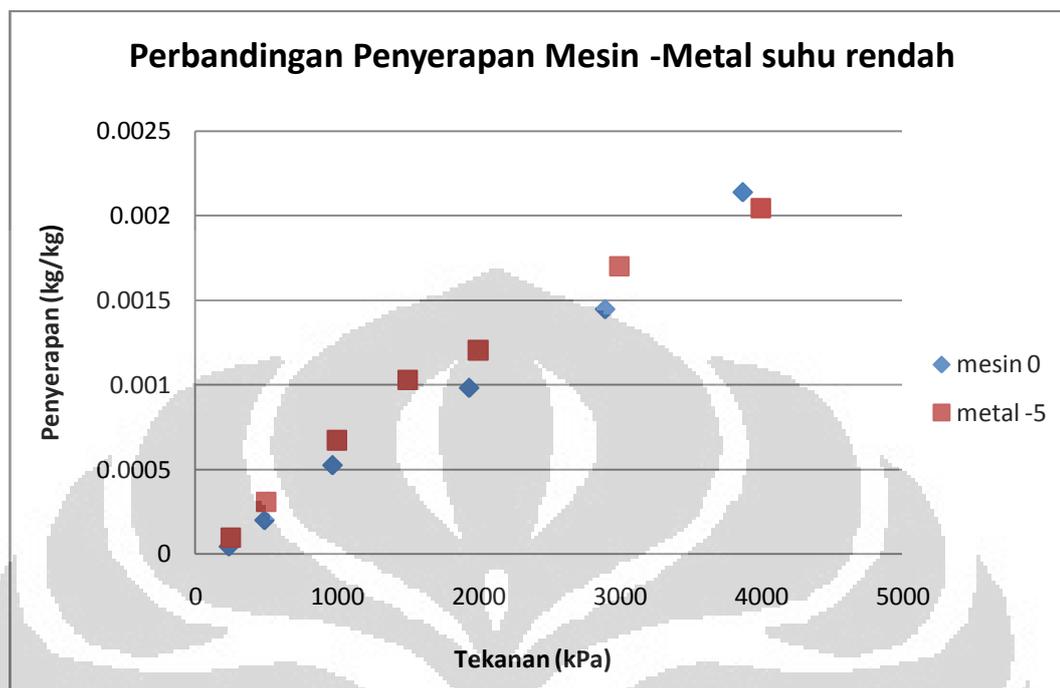
#### 4.4.1 Perbandingan pada Temperatur 25°C



Gambar 4.8 Perbandingan Adsorpsi Isotermal Batok Kelapa Dibandingkan dengan data Teknik Metalurgi pada Temperatur 25°C

Pada grafik di atas yaitu grafik perbandingan kapasitas penyerapan hidrogen pada karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular antara data penyerapan mesin dan metal. Perbandingan kapasitas penyerapan pada temperatur 25°C. Pada grafik dapat dilihat bahwa data penyerapan metal menggunakan 7 titik tekanan, perbedaan dengan mesin yaitu metal menambah tekanan pada titik 1500 kPa. Perbedaan data penyerapan hanya terlihat pada tekanan 2000 kPa dan 3000 kPa, namun sebagian besar berdekatan, terutama pada titik tekanan maksimum (4000 kPa) yaitu sebesar 0.00196 sampai 0.00197 kg/kg.

#### 4.4.2 Perbandingan pada Temperatur Rendah ( $0^{\circ}\text{C}$ : $-5^{\circ}\text{C}$ )



Gambar 4.9 Perbandingan Adsorpsi Isotermal Batok Kelapa Dibandingkan dengan data Teknik Metalurgi pada Temperatur Rendah

Pada grafik di atas yaitu grafik perbandingan kapasitas penyerapan hidrogen pada karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular antara data penyerapan mesin dan metal. Perbandingan kapasitas penyerapan pada temperatur rendah (mesin  $0^{\circ}\text{C}$  dan metal  $-5^{\circ}\text{C}$ ). Pada grafik dapat dilihat bahwa data penyerapan metal menggunakan 7 titik tekanan, perbedaan dengan mesin yaitu metal menambah tekanan pada titik 1500 kPa. Data penyerapan hidrogen sudah sesuai literatur sampai tekanan 3000 kPa, yaitu semakin rendah temperatur semakin besar pula penyerapannya. Namun pada titik tekanan maksimum 4000 kPa penyerapan pada mesin  $0^{\circ}\text{C}$  lebih besar ketimbang metal  $-5^{\circ}\text{C}$ . Hal ini mungkin disebabkan akibat tekanan pada saat uji adsorpsi isotermal di mesin lebih tinggi ketimbang uji adsorpsi isotermal di metal.

Tabel 4.6 Perbandingan Adsorpsi Isotermal Hidrogen Mesin - Metal

Temperatur (°C)	Tekanan (kPa)	Penyerapan mesin (kg/kg)	Penyerapan metal (kg/kg)
25°C	250	6.3484E-05	4.33405E-05
	500	0.00023142	0.000248664
	1000	0.00046296	0.000561976
	1500	-	0.000741138
	2000	0.00098014	0.001183579
	3000	0.00133455	0.001646964
	4000	0.001968	0.00198069
rendah (0°C :-5°C)	250	2.794E-05	9.61739E-05
	500	0.000170349	0.000305908
	1000	0.000444548	0.000671271
	1500	-	0.001029484
	2000	0.000841115	0.001203804
	3000	0.00131849	0.001699815
	4000	0.001911221	0.002043002

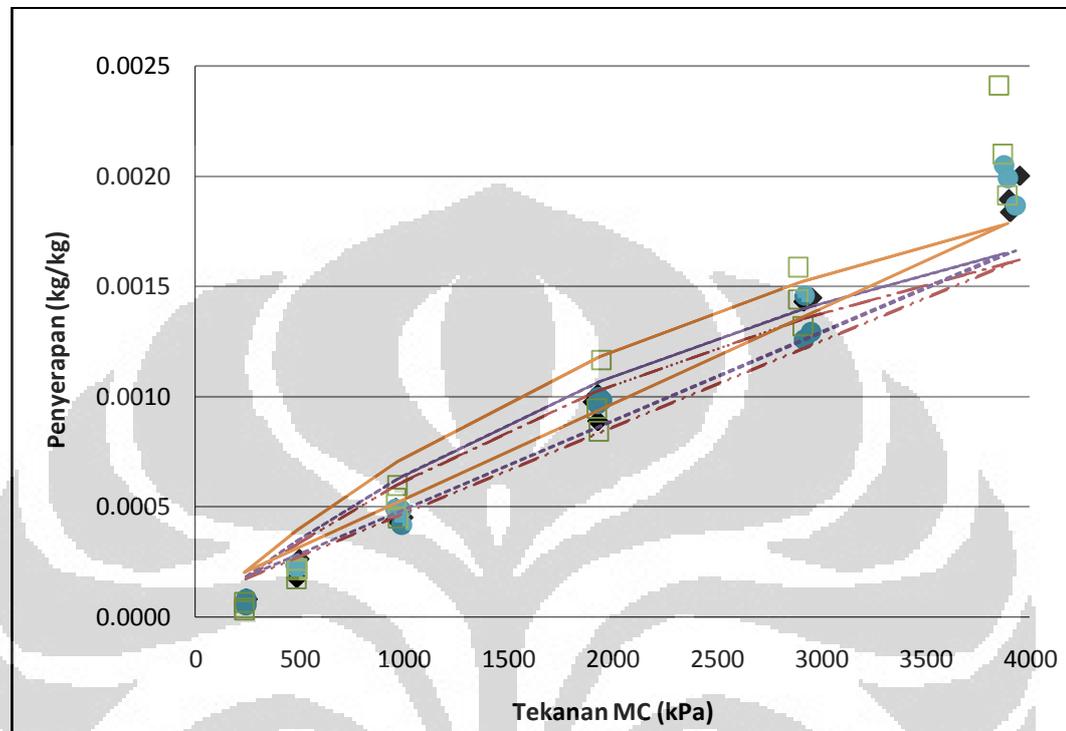
#### 4.5 Persamaan Adsorpsi Isotermal

Korelasi adsorpsi isotermal dilakukan dengan menggunakan dua persamaan model yaitu persamaan model Langmuir dan persamaan model Toth. Korelasi adsorpsi isotermal dilakukan untuk mendapatkan persamaan model yang paling cocok yang dapat digunakan untuk memprediksi kapasitas penyerapan pada tekanan dan temperatur isotermal yang berbeda.

##### 4.5.1 Persamaan Model Langmuir

Persamaan model Langmuir digunakan untuk merepresentasikan data keseimbangan adsorpsi. 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).



Gambar 4.10 Adsorpsi Isotermal Hidrogen pada Batok Kelapa Granular;

◆35°C; ●25°C; □0°C;

Garis Tebal adalah Regresi dengan Persamaan Langmuir

Tabel 4.7 Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Langmuir Untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen

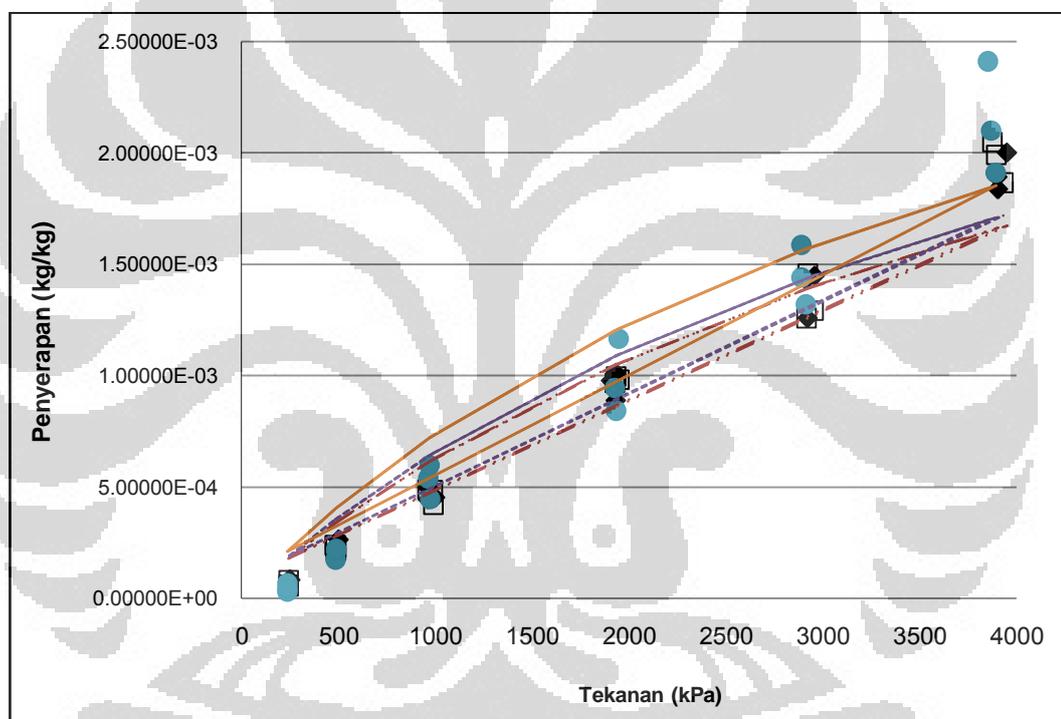
Parameter	Granular
$C_{\mu}$ (kg/kg)	0.0036233
$Q/R$ (kJ/kg)	329.385
$k$	1548.34
$\alpha$	13.7944
$b$	1.554E-08
$\delta$ (%)	22.71

Setelah dilakukan proses optimasi dengan menggunakan tools Solver pada software Microsoft Excel didapati nilai penyerapan hidrogen maksimum pada

karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular adalah sebesar 0.0036233 kg/kg, energi karakteristik pada sistem adsorpsi sebesar 329.385 kJ/kg, konstanta equilibrium 1548.34, konstanta perekatan 13.7944, konstanta Langmuir 1.554E-08, dan standar deviasi (error) sebesar 22.71%.

#### 4.5.2 Persamaan Model Toth

Model persamaan Toth biasanya digunakan pada permukaan adsorben yang heterogen seperti pada karbon aktif dan juga persamaan tersebut dapat digunakan pada tekanan rendah dan tekanan tinggi (Shuji Himeno, dkk., 2005).



Gambar 4.11 Adsorpsi Isotermal Hidrogen pada Batok Kelapa Granular;  
◆35°C; □25°C; ●0°C;

Garis Tebal adalah Regresi dengan Persamaan Toth

Tabel 4.8 Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Toth Untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen

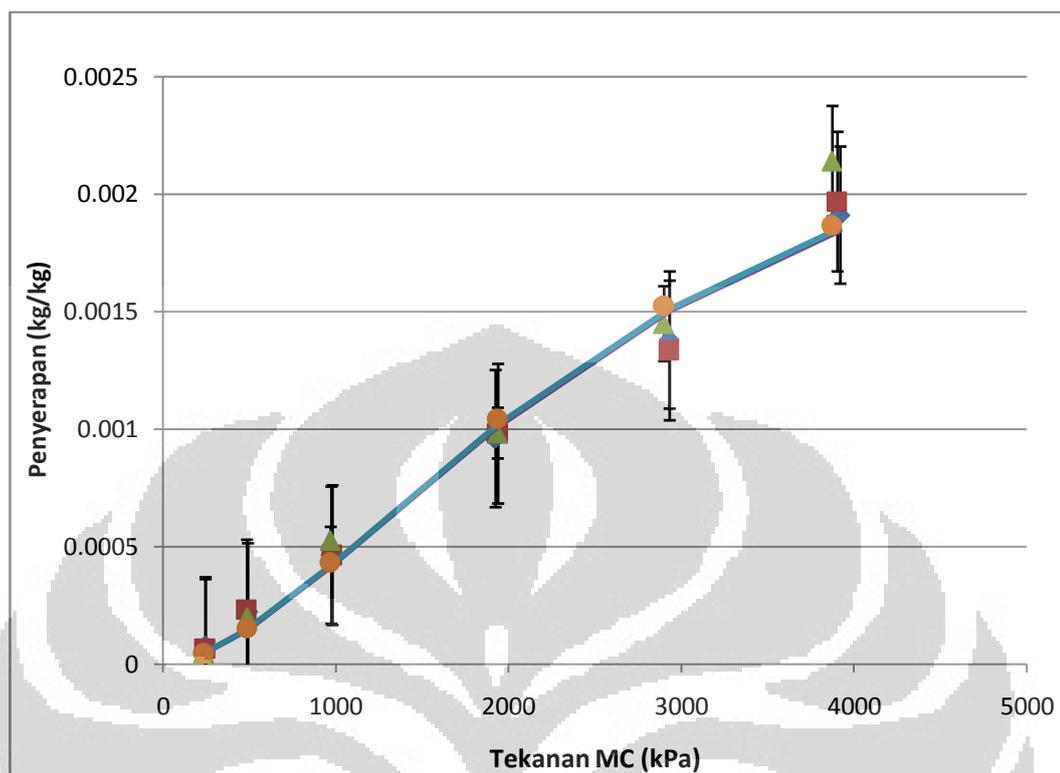
Parameter	Granular
$C_{\mu}$ (kg/kg)	0.004506
$Q/R$ (kJ/kg)	324.760

k	1950.83
$\alpha$	15.069
b	6.0903E-05
t	0.878
$\delta(\%)$	21.98

Setelah dilakukan proses optimasi dengan menggunakan tools Solver pada software Microsoft Excel didapati nilai penyerapan hidrogen maksimum pada karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular adalah sebesar 0.004506 kg/kg, energi karakteristik pada sistem adsorpsi sebesar 324.760 kJ/kg, konstanta equilibrium 1950.83, konstanta perekatan 15.069, konstanta daya tarik menarik adsorbat dengan adsorben 6.0903E-05, faktor heterogenitas adsorben 0.878 dan standar deviasi (error) sebesar 21.71%. Disini didapati nilai deviasi yang lebih baik ketimbang model persamaan Langmuir, hal ini disebabkan karena adanya penggunaan faktor heterogenitas, karena pada dasarnya karakteristik permukaan karbon aktif batok kelapa itu berbeda-beda.

#### 4.5.3 Persamaan Model Langmuir-Freundlich

Persamaan model Langmuir-Freundlich juga digunakan pada permukaan adsorbent yang heterogen seperti karbon aktif dan juga digunakan untuk tekanan rendah dan tinggi seperti halnya persamaan model Toth, bahkan persamaan Langmuir-Freundlich memiliki prediksi yang lebih baik pada tekanan tinggi (Byoung-Uk Choi, 2003). Dengan adanya tiga parameter dalam persamaan ini, akan memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan persamaan Langmuir yang hanya memiliki dua parameter.



Gambar 4.12 Adsorpsi Isotermal H<sub>2</sub> pada Batok Kelapa Granular;

● 35°C; ■ 25°C; ▲ 0°C;

Garis Tebal adalah Regresi dengan Persamaan Langmuir-Freundlich

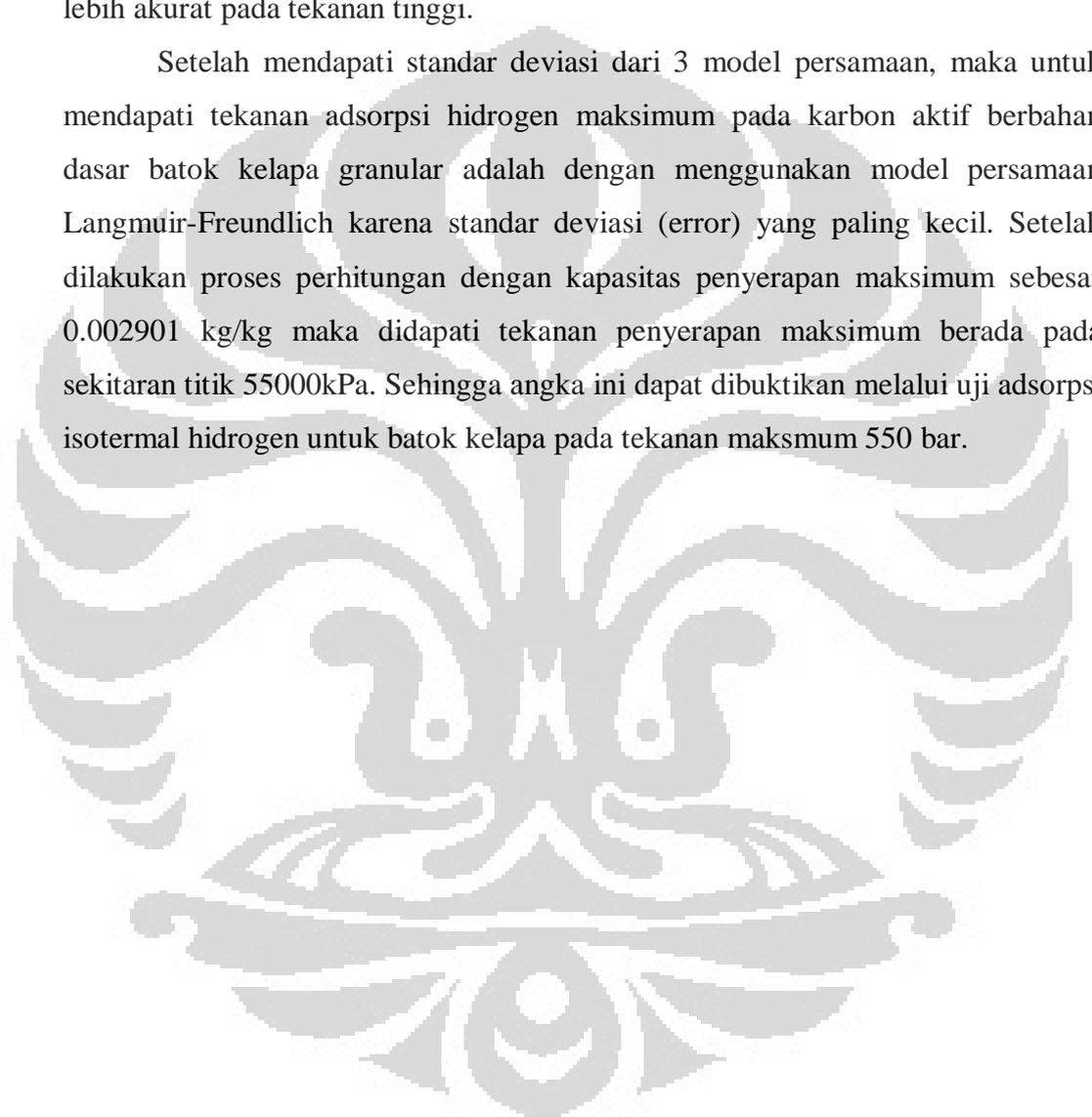
Tabel 4.9 Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Langmuir-Freundlich Untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen

Parameter	Granular
$C_{\mu}$ (kg/kg)	0.00290138
Q/R (kJ/kg)	304.918
k	0.0002802
t	0.593
$\delta$ (%)	11.72

Setelah dilakukan proses optimasi dengan menggunakan tools Solver pada software Microsoft Excel didapati nilai penyerapan hidrogen maksimum pada karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular adalah sebesar 0.002901 kg/kg, energi karakteristik pada sistem adsorpsi sebesar 304.918 kJ/kg, konstanta

equilibrium 0.00028, faktor heterogenitas adsorben 0.593 dan standar deviasi (error) sebesar 11.72%. Disini didapati nilai deviasi yang lebih baik ketimbang model persamaan Langmuir dan Toth, hal ini disebabkan karena adanya penggunaan faktor heterogenitas, karena pada dasarnya karakteristik permukaan karbon aktif batok kelapa itu berbeda-beda serta model Langmuir-Freundlich ini lebih akurat pada tekanan tinggi.

Setelah mendapati standar deviasi dari 3 model persamaan, maka untuk mendapati tekanan adsorpsi hidrogen maksimum pada karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular adalah dengan menggunakan model persamaan Langmuir-Freundlich karena standar deviasi (error) yang paling kecil. Setelah dilakukan proses perhitungan dengan kapasitas penyerapan maksimum sebesar 0.002901 kg/kg maka didapati tekanan penyerapan maksimum berada pada sekitaran titik 55000kPa. Sehingga angka ini dapat dibuktikan melalui uji adsorpsi isotermal hidrogen untuk batok kelapa pada tekanan maksimum 550 bar.



## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Kasimpulan yang dapat diambil dari percobaan ini adalah:

1. Semakin tinggi tekanan dan semakin tinggi temperatur akan membuat kapasitas penyerapan semakin besar pula. Hal ini terlihat dari kapasitas terbesar batok kelapa berada pada temperatur 0°C yaitu sebesar 0.00214.
2. Kapasitas adsorpsi karbon aktif berbahan dasar batu bara lebih baik ketimbang karbon aktif berbahan dasar batok kelapa. Hal ini disebabkan karena volume pori batu bara lebih besar daripada batok kelapa. Hal ini terlihat dari penyerapan hidrogen oleh batu bara sebesar 0.00267.
3. Pendekatan persamaan adsorpsi isothermal terbaik untuk percobaan adsorpsi isothermal hidrogen pada karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular adalah persamaan Langmuir-Freundlich dengan standar deviasi 11.72%.
4. Kapasitas penyerapan hidrogen maksimum didapati melalui model persamaan Langmuir-Freundlich sebesar 0.002901 kg/kg dengan tekanan maksimum 550 bar.

#### 5.2 Saran

1. Proses Adsorpsi Isotermal Hidrogen diharapkan dapat dilakukan pada tekanan yang lebih tinggi lagi (pembuktian hipotesis penulis), yaitu menurut penulis pada tekanan maksimum 550 bar untuk mencapai penyerapan maksimum, namun dengan faktor keamanan dan keselamatan yang lebih baik lagi.
2. Pencarian jenis batok kelapa dari variasi pohon kelapa, agar diketahui dan didapat jenis batok kelapa terbaik dalam menyerap dan menyimpan hidrogen.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ali, Jauhari (2012) *Pengembangan Adsorben Hydrogen Storage untuk Aplikasi Fuel Cell dalam Bentuk Padatan Partikel Nano Karbon Aktif dengan Bahan Pengikat Likuida Lignoselulosa*. Tesis FTUI, Depok
- Awaludin, M. (2010) *Adsorpsi Isotermal Karbon Dioksida dan Metana pada KarbonAktif Berbahan Dasar Batubara Sub Bituminus Indonesia untuk Pemurnian dan Penyimpanan Gas Alam*. Disertasi FTUI, Depok
- Awaludin, M.,Suryawan, B., Alhamid, M.I., Nasruddin. Adsorpsi Isothermal CO<sub>2</sub> pada Karbon Aktif dengan Metode Volumetrik. *Jurnal Makara*, submitted.
- Bansal, Roop Chand., Meenakshi, Goyal.(2005).*Activated Carbon Adsorption*. USA: Taylor & Francis Group
- Belmabkhout, Y., Fr`ere, M., DeWeireld, G.(2004).High Pressure Adsorption Measurements: A Comparative Study of The Volumetric and Gravimetric Methods.*Measurement Science Technology*,15, 848–858
- Choi, Byoung-Uk., Choi, Dae-Ki., Lee, Young-Whan., Lee, Byung-Kwon.(2003). Adsorption Equilibria of Methane, Ethane, Ethylene, Nitrogen and Hydrogen onto Activated Carbon. *J.Chem.Eng*, 48, 603-607
- Do, Duong D., (2008). *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte
- Jiménez, Vicente., Sánchez, Paula., Antonio Díaz, Jose., Luis Valverde Jose., Romero, Amaya. (2010). Hydrogen storage capacity on different carbon materials. *Chemical Physics Letters*, 485, 152–155
- Keller, Jürgen U. Staudt, Reiner. (2005). *Gas adsorption equilibria; Experimental methods and Adsorptive Isotherms*. Boston, United States of America: Springer Science & Business Media, Inc.

Stroebel, R., Garche, J., Moseley, P.T., Joerissen, L., Wolf, G. (2006). Review : Hydrogen Storage by Carbon Materials. *Journal of Power Sources*, 159, 781–801.

Suzuki, Motoyuki. *Adsorption Engineering*. (1990). Tokyo: Kodansha Ltd.

Xua, W.C., Takahashi, K., Matsuo, Y., Hattoria, Y., Kumagaia, M., Ishiyama, S., Kaneko, K., Iijima, S. (2007). Investigation of hydrogen storage capacity of various carbon materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2504 – 2512

