



UNIVERSITAS INDONESIA

**Analisa Pengaruh Perubahan Temperatur terhadap Proses Adsorpsi
dan Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada Karbon Aktif Granular
Berbahan Dasar Batu Bara**

SKRIPSI

Daniel

0806329924

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**Analisa Pengaruh Perubahan Temperatur terhadap Proses Adsorpsi
dan Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada Karbon Aktif Granular
Berbahan Dasar Batu Bara**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Daniel

0806329924

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

**Analisa Pengaruh Perubahan Temperatur terhadap Proses Adsorpsi
dan Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada Karbon Aktif Granular
Berbahan Dasar Batu Bara**

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 Indra Mario (0806454802) dengan judul **Analisa Kapasitas Hidrogen pada Karbon Aktif Berbahan Dasar Batok Kelapa Granular dengan Pendekatan Persamaan Adsorpsi Isothermal.**

Sehingga terdapat kesamaan pada sebagian buku skripsi ini.

Nama : Daniel
NPM : 0806329924
Tanda Tangan :



Tanggal : 18 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Daniel
NPM : 0806329924
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Analisa Pengaruh Perubahan Temperatur terhadap Proses Adsorpsi dan Kapasitas Penyerapan pada Karbon Aktif Granular Berbahan Dasar Batu Bara

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 :

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yesus Kristus yang telah memberikan berkat dan karunia-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. Ayah dan Ibu tercinta, atas dukungan spiritual, moral dan materil yang diberikan tanpa hentinya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
3. Indra Mario selaku partner dalam penelitian Adsorpsi Hidrogen hingga selesainya skripsi ini.
4. Ir. Jauhari Ali M.T atas bimbingan dan bantuannya sehingga kami dapat melanjutkan penelitian Adsorpsi Hidrogen.
5. Hernadi, Surya Aurum Fikri, Hanif, M.Fachrur Rozi, M.Abib Alhabsi, Helmi Dadang, dan Mach Novviali selaku teman-teman seperjuangan di Laboratorium lantai 3 FT UI dalam menyusun skripsi ini.
6. Teman – teman jurusan Teknik Mesin dan Teknik Perkapalan, khususnya angkatan 2008 yang telah bersama – sama mengukir kisah perjalanan hidup di FT UI.
7. Para sahabat dan semua pihak yang telah membantu dalam bentuk doa yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

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

Depok, 18 Juni 2011

Daniel

HALAMAN PERNYATAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Daniel
NPM : 0806329924
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 Pengaruh Perubahan Temperatur terhadap Proses Adsorpsi dan Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada Karbon Aktif Granular Berbahan Dasar Batu Bara”

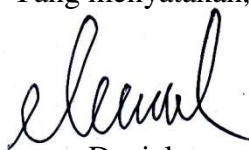
Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak bebas royalti noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 18 Juni 2012

Yang menyatakan,



Daniel

Abstrak

Nama : Daniel

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Analisa Pengaruh Perubahan Temperatur terhadap Proses Adsorpsi dan Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada Karbon Aktif Granular Berbahan Dasar Batu Bara

Hidrogen adalah salah satu energi terbarukan yang menjanjikan dan berpotensi menjadi pengganti bahan bakar fosil. Namun, aplikasi hidrogen sebagai bahan bakar memiliki kekurangan, yaitu dalam hal penyimpanannya. Dalam suhu kamar dan tekanan atmosfer, hidrogen memiliki rasio energi yang sangat rendah terhadap volumenya jika disimpan dalam bentuk gas sehingga perlu dilakukan berbagai penelitian yang berkaitan dengan metode dan material untuk menyimpan hidrogen terus dilakukan. Sejauh ini metode 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. Pada penelitian ini, karbon aktif yang digunakan pada penelitian ini adalah karbon aktif berbahan dasar batu bara. Proses pengambilan data dilakukan dengan metode volumetrik dan tipe adsorpsi yang digunakan adalah adsorpsi isothermal. Penyerapan dilakukan pada 3 temperatur berbeda, pertama pada temperatur 35°C dan tekanan mencapai 40 bar; yang kedua adalah pada temperatur 25°C dan tekanan mencapai 40 bar dan ketiga adalah pada temperatur 0 °C dan tekanan mencapai 40 bar. Pada temperatur 35°C, penyerapan hidrogen sebesar 0.00228995 kg/kg pada tekanan 3935.22 kPa. Pada temperatur 25°C, penyerapan hidrogen sebesar 0.00249057 kg/kg pada tekanan 3939.24 kPa Pada temperatur 0°C, penyerapan hidrogen sebesar 0.00267156kg/kg pada tekanan 3939.24 kPa. Data yang didapat selanjutnya dikorelasi dengan menggunakan persamaan model Langmuir, Toth, dan Langmuir-Freudlich.

Kata kunci : Adsorpsi Hidrogen, Metode Volumetrik, Adsorpsi Isotermal

Abstract

Name : Daniel
Department : Mechanical Engineering
Title : Analysis of the Effect of Temperature to Hydrogen Adsorption
Isothermal Process and Adsorption Capacity of Granular
Activated Carbon Coal Derived.

Hydrogen is one of promising and potential new energy sources as the substitute of fossil fuel. But, the application of hydrogen as fuel still has weakness in a storage system. In room temperature and atmosphere pressure, hydrogen has a very low energy/volume ratio if the hydrogen is stored in gas phase, so it's needed to do some research about the method and materials to adsorb hydrogen. Nowadays, hydrogen adsorption's method using granular activated carbon as the adsorbent is very promising since can reduce the pressure in cell with the adsorption capacity relatively same as other methods. In this research, the activated carbon which used is coal based. The method which used in this research is volumetric method and the type of adsorption in this research is isothermal adsorption. The adsorptions in this research are in 3 temperature, first adsorption in 35°C and the pressure up to 40 bars and second adsorption in 25°C and the pressure up to 40 bars and third adsorption in 0°C and the pressure up to 40 bars. At temperature 35°C, the hydrogen adsorption is 0.00228995 kg/kg at 3935.22 kPa. At temperature 25°C, the hydrogen adsorption is 0.00249057 kg/kg at 3939.24 kPa. At temperature 0°C, the hydrogen adsorption is 0.00267156 kg/kg at 3939.24 kPa. The Data are correlated with some model equations Langmuir, Toth, and Langmuir-Freudlich.

Keywords : Hydrogen Storage, Volumetric Method, Isothermal Adsorption

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
Abstrak	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH	2
1.3 TUJUAN PENELITIAN	3
1.4 RUANG LINGKUP PENELITIAN	3
1.5 METODE PENELITIAN	4
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN	5
BAB 2 DASAR TEORI	6
2.1 HIDROGEN SEBAGAI SEL BAHAN BAKAR	6
2.2 HIDROGEN	9
2.2.1 Profil Hidrogen	9
2.2.2 Penyimpanan Hidrogen	11
2.2.3 Adsorption Hydrogen Storage	13
2.3 MEKANISME ADSORPSI HIDROGEN PADA KARBON AKTIF	15
2.4 KESETIMBANGAN ADSORPSI	18
2.4.1 Adsorpsi Isosterik	18
2.4.2 Adsorpsi Isobar	19
2.4.3 Adsorpsi Isotermal	19
2.5 PERSAMAAN ADSORPSI ISOTERMAL	20
2.5.1 Persamaan Isotermal Langmuir	20
2.5.2 Persamaan Isotermal Toth	21
2.5.3 Persamaan Isotermal Langmuir-Freundlich	22
2.6 METODE PENGUJIAN ADSORPSI	22
2.6.1 Metode Gravimetrik	22
2.6.2 Metode Volumetrik	24
2.7 ADSORBEN	25
2.7.1 Karbon Aktif	26
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 PENGUJIAN ADSORPSI VOLUMETRIK	29
3.2 PENGUKURAN VOLUME CHARGING CELL DAN VOLUME KOSONG	

MEASURING CELL	30
3.2.1 Pengukuran Volume Charging Cell	31
3.2.2 Pengukuran Volume Kosong Measuring Cell	32
3.2.3 Persiapan Penelitian	33
3.3 PROSEDUR PENELITIAN	34
3.4 ANALISIS ERROR PADA ADSORPSI ISOTERMAL	35
3.4.1 Errors pada Volume Charging Cell dan Volume Kosong Measuring Cell	35
3.4.2 Error pada Pengukuran Temperatur	36
3.4.3 Error pada Pengukuran Tekanan	36
3.4.4 Error pada Pengukuran Massa Sampel	36
3.5 PERHITUNGAN MASSA ADSORBAT YANG DISERAP	36
BAB 4 PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA DATA	38
4.1 DATA PERCOBAAN	38
4.1.1 Data Adsorpsi Batu Bara pada Temperatur 35°C	38
4.1.2 Data Adsorpsi Batu Bara pada Temperatur 25°C	41
4.1.3 Data Adsorpsi Batu Bara pada Temperatur 0°C	45
4.2 KARAKTERISTIK DATA HASIL PERCOBAAN	48
4.2.1 Karakteristik Data Hasil Percobaan Adsorpsi pada Temperatur 35°C	48
4.2.2 Karakteristik Data Hasil Percobaan Adsorpsi pada Temperatur 25°C	49
4.2.3 Karakteristik Data Hasil Percobaan Adsorpsi pada Temperatur 0°C	50
4.3 PENGOLAHAN DAN ANALISA HASIL PERCOBAAN	51
4.3.1 Perbandingan Adsorpsi Temperatur 35°C, 25°C dan 0°C	51
4.3.2 Perbandingan Adsorpsi Batu Bara dan Batok Kelapa	53
4.4 PERSAMAAN ADSORPSI ISOTERMAL	56
4.4.1 Persamaan Model Langmuir	56
4.4.2 Persamaan Model Toth	57
4.4.3 Persamaan Model Langmuir-Freudlich	57
4.5 TEKANAN MAKSIMUM ADSORPSI HIDROGEN	59
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1 KESIMPULAN	61
5.2 SARAN	61
DAFTAR PUSTAKA	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bagan Kinerja 'Hydrogen Fuel Cells	8
Gambar 2.2	Diagram Phasa Hidrogen	10
Gambar 2.3	Densitas Hidrogen terhadap Temperatur dan Tekanan	11
Gambar 2.4	RasioEkspansi HidrogendalamFaseCair danGas	13
Gambar 2.5	KomparasiAsorptionStorage dan <i>Compression Storage</i>	14
Gambar 2.6	HubunganLuasPermukaan dan KapasitasPenyerapan Hidrogen pada 4 MPa	14
Gambar 2.7	Potongan Melintang Material Karbon Aktif	17
Gambar 2.8	Proses Adsorpsi Pada Karbon Aktif	17
Gambar 2.9	Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi <i>Isostere</i>	18
Gambar 2.10	Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isobar	19
Gambar 2.11	Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isotermal	19
Gambar 2.12	Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan <i>Two Beam Balance</i>	23
Gambar 2.13	Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan <i>Magnetic Suspension Balance</i>	23
Gambar 2.14	Skema Metode Volumetrik	24
Gambar 2.15	Porositas pada Karbon	27
Gambar 3.1	Skema Alat Uji Adsorpsi Isothermal	30
Gambar 3.2	Skema Proses Pengukuran Volume <i>Charging Cell</i>	31
Gambar 3.3	Skema Proses Pengukuran Volume Kosong <i>Measuring Cell</i>	32
Gambar 3.4	Skema Keseimbangan Massa pada Proses Penyerapan	37
Gambar 4.1	Penyerapan Adsorpsi 35°C Pertama	39
Gambar 4.2	Penyerapan Adsorpsi 35°C Kedua	40
Gambar 4.3	Penyerapan Adsorpsi 35°C Ketiga	41
Gambar 4.4	Penyerapan Adsorpsi 25°C Pertama	42

Gambar 4.5 Penyerapan Adsorpsi 25°C Kedua	43
Gambar 4.6 Penyerapan Adsorpsi 25°C Ketiga	44
Gambar 4.7 Penyerapan Adsorpsi 0°C Pertama	45
Gambar 4.8 Penyerapan Adsorpsi 0°C Kedua	46
Gambar 4.9 Penyerapan Adsorpsi 0°C Ketiga	47
Gambar 4.10 Perbandingan Adsorpsi 35°C	48
Gambar 4.11 Perbandingan Adsorpsi 25°C	49
Gambar 4.12 Perbandingan Adsorpsi 0°C	50
Gambar 4.13 Perbandingan Adsorpsi 35°C, Adsorpsi 25°C dan Adsorpsi 0°C	52
Gambar 4.14 Adsorpsi Isotermal Batu Bara dan Batok Kelapa pada Temperatur 35°C	53
Gambar 4.15 Adsorpsi Isotermal Batu Bara dan Batok Kelapa pada Temperatur 25°C	54
Gambar 4.16 Adsorpsi Isotermal Batu Bara dan Batok Kelapa pada Temperatur 0°C	55
Gambar 4.17 Adsorpsi Isotermal Hidrogen pada Batu Bara Granular Pendekatan Persamaan Langmuir	57
Gambar 4.18 Adsorpsi Isotermal Hidrogen pada Batu Bara Granular Pendekatan Persamaan Toth	58
Gambar 4.19 Adsorpsi Isotermal Hidrogen pada Batu Bara Granular Pendekatan Persamaan Langmuir-Freudlich	59

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Properti Fisik Karbon Aktif Batu Bara	38
Tabel 4.2 Adsorpsi 35oC yang Pertama	38
Tabel 4.3 Adsorpsi 35°C yang Kedua	39
Tabel 4.4 Adsorpsi 35°C yang Ketiga	40
Tabel 4.5 Adsorpsi 25°C yang Pertama	42
Tabel 4.6 Adsorpsi 25°C yang Kedua	43
Tabel 4.7 Adsorpsi 25°C yang Ketiga	44
Tabel 4.8 Adsorpsi 0°C yang Pertama	45
Tabel 4.9 Adsorpsi 0°C yang Kedua	46
Tabel 4.10 Adsorpsi 0°C yang Ketiga	47
Tabel 4.11 Tekanan MC dan Penyerapan Rata-Rata pada Temperatur 35°C	51
Tabel 4.12 Tekanan MC dan Penyerapan Rata-Rata pada Temperatur 25°C	51
Tabel 4.13 Tekanan MC dan Penyerapan Rata-Rata pada Temperatur 0°C	52
Tabel 4.14 Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Langmuir Untuk Adsorpsi Isotermal	
Hidrogen	57
Tabel 4.15 Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Toth Untuk Adsorpsi Isotermal	
Hidrogen	58
Tabel 4.16 Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Langmuir-Freundlich Untuk	
Adsorpsi Isotermal Hidrogen	59

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Bahan bakar fosil nyaris menjadi satu-satunya sumber energi yang digunakan secara massal, maka tidak heran jika muncul masalah-masalah yang terkait dengan kasus bahan bakar selama beberapa tahun belakangan ini. Ketika bahan bakar fosil ini digunakan (dibakar) akan menghasilkan energi. Selain energi yang dihasilkan, bahan bakar fosil ini juga menghasilkan karbon yang dilepaskan ke udara. Dampak dari pelepasan karbon ini antara lain polusi lingkungan dan merusak ozon, membuat bumi yang kita diami semakin panas. Produksi karbon hasil pembakaran bahan bakar fosil yang beberapa tahun ini meningkat disinyalir telah menyebabkan fenomena pemanasan global (Global Warming).

Konsumsi bahan bakar fosil dalam jumlah besar pada seabad terakhir turut berperan dalam menipisnya cadangan bahan bakar, yang sampai sekarang belum bisa kita hindari. Sementara cadangan bahan bakar fosil semakin menipis, kebutuhan atas energi bukannya turun malah semakin tinggi. Akibatnya sesuai prinsip ekonomi penawaran dan permintaan, maka tanpa bisa dihindari harga bahan bakar inipun semakin hari semakin melambung tinggi.

Hal ini tentu sangat mengkhawatirkan karena sampai saat ini belum ditemukan alternatif lain sebagai sumber energi pengganti bahan bakar fosil sehingga krisis energi yang parah pun tidak dapat dielakkan lagi. Akhir-akhir ini kita melihat mulai banyak usaha manusia untuk mulai mencari sumber energi baru yang bisa dimanfaatkan. Ada beberapa sumber energi baru yang telah ditemukan dan dimanfaatkan. Sumber energi terbarukan itu bisa berupa tenaga matahari, angin, air, panas bumi, bio massa, gelombang laut dan hidrogen.

Namun semua sumber energi itu belum dimanfaatkan secara maksimal dan optimal. Hidrogen, dibandingkan semua energi terbarukan yang lain, memiliki beberapa keunggulan antara lain, bahan bakar hidrogen bersifat mobile seperti bahan bakar fosil yang kita kenal selama ini. Bedanya, tidak seperti bahan bakar fosil, pembakaran hidrogen tidak menyebabkan polusi karbon. Ketika terbakar, hidrogen melepaskan energi berupa panas dan menghasilkan air sebagai bahan buangan ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$). Pemakaian hidrogen sebagai bahan bakar

jauh lebih efektif dalam pembakaran hampir 3 kali lipat dari panas yang bisa dihasilkan oleh pembakaran bensin dan solar. Keunggulan lain yang dimiliki hidrogen adalah jumlahnya di alam ini sangat melimpah, 93 % dari seluruh atom yang ada di jagat raya ini adalah hidrogen, unsur yang paling sederhana dari semua unsur yang ada di alam ini. Tiga perempat dari massa jagat raya ini adalah hidrogen. Di bumi sendiri bentuk hidrogen yang paling umum kita kenal adalah air (H_2O).

Hanya saja, selain memiliki keunggulan, aplikasi hidrogen sebagai bahan bakar juga memiliki kekurangan, yaitu dalam hal penyimpanannya. Dalam suhu kamar dan tekanan atmosfer, hidrogen akan berbentuk fase gas sehingga memiliki rasio energi yang sangat rendah terhadap volumenya jika disimpan dalam bentuk gas sehingga perlu dilakukan berbagai penelitian yang berkaitan dengan metode dan material untuk menyimpan hidrogen terus dilakukan. Sejauh ini metode 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).

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Salah satu hambatan teknis yang paling menantang dalam perkembangan teknologi dan pengaplikasian energi hidrogen adalah untuk penyimpanan hidrogen yang aman, handal, kompak, dan hemat biaya serta untuk menyebarluaskan penggunaan hidrogen sebagai salah satu bentuk energi. Hambatan itu dikarenakan karakteristik fisik hidrogen yang membuatnya sulit untuk disimpan dalam jumlah besar pada ruang yang kecil. Hidrogen adalah berupa gas pada temperatur dan tekanan atmosfer maka kendala terbesar penggunaannya selama ini adalah penyimpanannya dimana membutuhkan konstruksi tangki kuat untuk menahan tekanannya yang bisa mencapai 2000 Psi, maka kemungkinan untuk disimpan dengan menggunakan metode adsorpsi semisal karbon aktif menjadi sangat menarik karena menjanjikan penurunan tekanan yang cukup signifikan (Yurum, Yuda., 2009).

Salah satu cara untuk meningkatkan daya adsorpsi dari suatu adsorben adalah dengan menjadikan sebanyak mungkin pori adsorben (karbon aktif) yang termasuk kategori mikropori yang sesuai dengan ukuran molekul hidrogen yang menjadi adsorbate. Dengan semakin besarnya prosentase mikropori yang dihasilkan dibandingkan makropori dan mesoporinya, maka kemampuan adsorpsi dari adsorben tersebut diharapkan akan meningkat. Menjadikan karbon aktif sebagai adsorben dalam bentuk nano menimbulkan kesulitan dalam melakukan proses degassingnya (pembersihan).

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh perubahan temperatur terhadap Dari pengujian kemampuan adsorpsi hidrogen dengan memvariasikan temperatur pada 35°C, 25°C dan 0°C

Tujuan rinci dari penelitian ini adalah:

- Melakukan pengujian adsorpsi isothermal gas hidrogen pada karbon aktif granular berbahan dasar batubara untuk tekanan hingga 4 MPa sehingga didapat data kapasitas penyerapannya hidrogen dan dibandingkan hasilnya sehingga di dapat pengaruh dari temperatur terhadap proses adsorpsi.

1.4 RUANG LINGKUP PENELITIAN

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah menghasilkan padatan adsorben karbon aktif yang berasal dari batubara Indonesia kelas rendah. Adapun permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini diuraikan dengan beberapa pertanyaan penuntun berikut:

1. Bagaimana pengaruh temperatur terhadap proses adsorpsi dan kapasitas penyerapan hidrogennya?
2. Bagaimana korelasi data dan apa persamaan model yang memiliki error paling rendah antara metode Langmuir, Toth, dan Langmuir Freudlich

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. Peralatan

Proses ini meliputi persiapan dan pembelian terhadap alat-alat yang dibutuhkan untuk melakukan pengujian diantaranya pipa stainless steel, pressure valve, measuring cell, pressure transmitter, isolator dinding box (stereofoam), perekat armalflek, panel listrik, kabel, satu set komputer, NI (DAQ), timbangan digital, pompa vakum, tabung gas hidrogen dan helium, regulator gas, circulating thermal bath, heater dan evaporator.

3. 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, perbaikan dilakukan pada bagian-bagian box, isolator dinding pipa, pengecekan alat ukur tekanan dan temperatur, uji tekanan pada pressure valve dan measuring cell.

4. 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.

5. Pengecekan sistem

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

6. Pengujian sistem

Pengujian dilakukan dengan memantau data dari alat ukur seperti thermocouple, pressure transmitter melalui data akuisisi (NI Lab view) untuk mengetahui karakteristik refrigeran secara keseluruhan. Proses pengujian ini meliputi pengambilan data pada alat ukur.

7. Analisa dan Kesimpulan Hasil Pengujian

Data yang telah diolah, kemudian dianalisa terhadap grafik yang diperoleh. Dari analisa tersebut akan diperoleh kesimpulan terhadap proses pengujian adsorpsi isothermal.

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 dan dasar pemilihan proses adsorpsi. 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

DASAR TEORI

2.1 HIDROGEN SEBAGAI SEL BAHAN BAKAR

Dengan sumber daya hidrogen yang besar potensinya, diharapkan pada tahun 2013 sampai 2020, laju penggunaan hidrogen bisa menjadi dua kali lipat dari laju penggunaannya sekarang. Saat ini laju pertumbuhan penggunaan hidrogen di dunia adalah 10% per tahun dan berpotensi mengalami peningkatan. Pada tahun 2004, produksi hidrogen dunia mencapai 50 juta metrik ton (million metric tons-MMT) setara dengan 170 juta ton minyak bumi. Khusus industri di Amerika Serikat sendiri, telah dihasilkan 11 juta metrik ton hidrogen per tahun dan nilai ini setara dengan energi termal sebesar 48 GW. Jumlah hidrogen tersebut dihasilkan dengan proses reforming gas alam (5% dari total kebutuhan gas alam nasional) dan melepaskan 77 juta ton CO₂ per tahun (World Nuclear Association, August 2007). Metode baru sangat diperlukan untuk menghasilkan hidrogen tanpa melepaskan CO₂ ke atmosfer. Hidrogen sendiri bisa dikategorikan sebagai pembawa energi (energy carrier) bukan sebagai sumber energi (energy source), artinya hidrogen tidak tersedia bebas di alam atau dapat ditambang layaknya sumber energi fosil. Hidrogen harus diproduksi. Produksi hidrogen dari H₂O merupakan cara utama untuk mendapatkan hidrogen dalam skala besar, tingkat kemurnian yang tinggi dan tidak melepaskan CO₂.

Kendala utama metode elektrolisis H₂O konvensional saat ini adalah pada masalah efisiensi total yang rendah (~30%), umur operasional electrolyzer yang pendek dan jenis material yang ada di pasaran masih sangat mahal. Kendala-kendala tersebut membuat hidrogen belum cukup ekonomis untuk dapat bersaing dengan bahan bakar konvensional saat ini.

Permasalahan energi bagi kelangsungan hidup manusia merupakan masalah besar yang dihadapi oleh hampir seluruh negara di dunia ini. Bahan bakar fosil, terutama minyak bumi masih menjadi konsumsi energi utama, sehingga penelitian mengenai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil terus dilakukan.

Parameter keberhasilan bahan bakar alternatif ini adalah dapat diperbarui (*renewable energy*), ramah lingkungan, dan biaya yang murah.

Konsumsi dunia terhadap energi listrik kian meningkat seiring pesatnya teknologi elektronika. Alternatif yang menarik datang dari *fuel cell*, yang diharapkan dapat menghasilkan energi listrik dengan efisiensi tinggi dan gangguan lingkungan yang minimal.

Fuel cell menggunakan reaksi kimia dan kinerjanya lebih baik daripada mesin pembakaran, untuk memproduksi energi listrik. Efisiensi konversi energi dapat dicapai hingga 60-80%. Istilah *fuel cell* sering dikhususkan untuk hidrogen-oksigen *fuel cell*. Prosesnya merupakan kebalikan dari elektrolisis. Pada elektrolisis, arus listrik digunakan untuk menguraikan air menjadi hidrogen dan oksigen. Dengan membalik proses ini, hidrogen dan oksigen direaksikan dalam *fuel cell* untuk memproduksi air dan arus listrik.

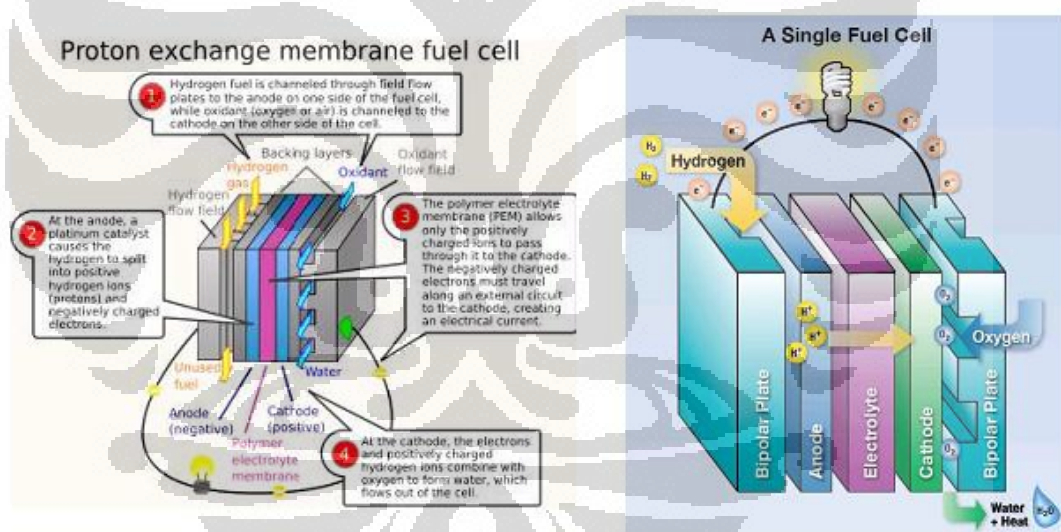
Konversi energi *fuel cell* biasanya lebih efisien daripada jenis pengubah energi lainnya.. Selain itu *fuel cell* mampu menyuplai energi listrik dalam waktu yang cukup lama. Tidak seperti baterai yang hanya mampu mengandung material bahan bakar yang terbatas, *fuel cell* dapat secara kontinu diisi bahan bakar (hidrogen) dan oksigen dari sumber luar. *Fuel cell* merupakan sumber energi ramah lingkungan karena tidak menimbulkan polutan dan sungguh-sungguh dapat digunakan terus-menerus jika ada suplai hidrogen yang berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbarui. Keuntungan *fuel cell* lainnya yaitu tidak bising dan gas buang yang bersih bagi lingkungan.

Kendala yang masih membatasi penggunaan *fuel cell* adalah :

1. Apabila digunakan bahan bakar hidrogen, maka dibutuhkan tangki pengaman yang berdinding tebal dan memiliki katup pengaman. Selain itu diperlukan kompresor untuk memasukan ke dalam tangki.

2. Apabila yang dibawa adalah hidrogen cair, maka akan timbul kesulitan karena harus dipertahankan pada temperatur $-253,15^{\circ}\text{C}$ pada tekanan 10^5Pa .
3. Apabila digunakan metanol sebagai pengganti hidrogen, maka dibutuhkan reformer. Tetapi efisiensi menjadi menurun.
4. Temperatur yang cukup tinggi saat pengoperasian antara $60^{\circ}\text{-}120^{\circ}\text{C}$

Kinerja Hydrogen Fuel Cell serupa seperti aki (accu), hanya saja reaksi kimia penghasil tenaga listrik ini menggunakan hidrogen dan oksigen yg bereaksi dan mengalir seperti aliran bahan bakar melalui sebuah motor bakar. Namun tidak ada pembakaran dalam proses pembangkit listrik ini. Dengan demikian limbah dari proses ini hanyalah air murni yang aman untuk dibuang.



Gambar 2.1 Bagan Kinerja 'Hydrogen Fuel Cells'

Secara sederhana proses dapat dilihat pada Gambar 2.1 di atas :

- a) Hidrogen (yang ditampung dalam sebuah tabung khusus) dialirkan melewati anoda, dan oksigen/udara dialirkan pada katoda
- b) Pada anoda dengan bantuan katalis platina Pt hidrogen dipecah menjadi bermuatan positif (ion/proton), dan negatif (elektron)

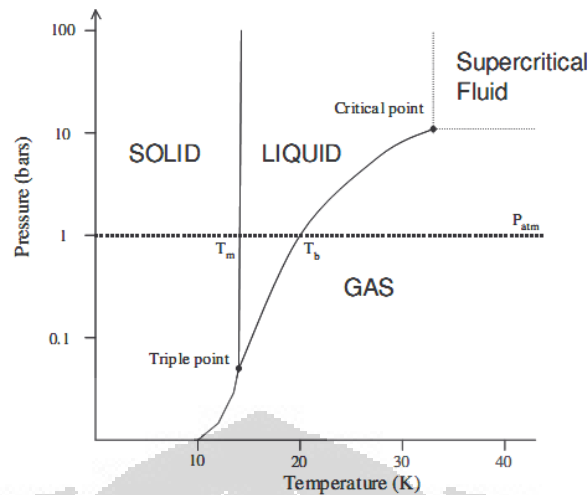
- c) Membran di tengah-tengah anoda-katoda kemudian hanya berfungsi mengalirkan proton menyebrang ke katoda
- d) Proton yang tiba di katoda bereaksi dengan udara dan menghasilkan air
- e) Tumpukan elektron di anoda akan menjadi energi listrik searah yang dapat menyalakan lampu.

2.2 HIDROGEN

Hidrogen pertama kali ditemukan pada 1766 oleh Henry Cavendish. Istilah hidrogen ini dinamai oleh Lavoisier dari kata Yunani *hydro* yang berarti air dan *gen* dengan maksud generator. Ini adalah elemen pertama dari tabel periodik. Hidrogen merupakan unsur yang paling melimpah di alam semesta. Hidrogen tidak berasa, tidak berwarna, tidak berbau, dan non-gas beracun dalam kondisi normal di bumi. Menurut beratnya, hidrogen adalah 90 persen dari unsur alam semesta. Namun, tidak umum ditemukan dalam bentuknya yang murni, karena mudah menggabungkan dengan unsur-unsur lainnya. Hidrogen biasanya ada sebagai molekul diatomik, yang berarti setiap molekul memiliki dua atom hidrogen, ini adalah mengapa hidrogen murni biasanya dinyatakan sebagai " H_2 ".

2.2.1 Profil Hidrogen

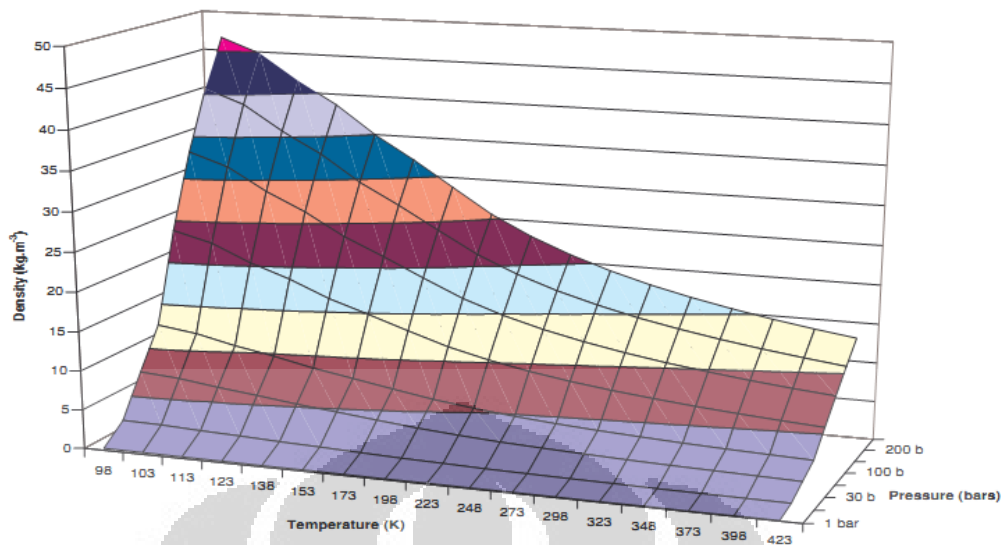
Hidrogen ini paling sering dilihat sebagai gas atau cairan, dan pada kondisi kamar itu adalah gas. Hidrogen memiliki nomor atom 1, berat molekul $2,016\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ dan dimensi molekul yang bervariasi 3,1 - 2,4 Angstrom. Molekul hidrogen pada kondisi atmosfer adalah campuran dari 75% dari orto-hidrogen dan 25% para-hidrogen, dua bentuk isometrik dibedakan oleh berbagai spin nuklirnya. Berbagai stabil di bawah -253°C adalah para-hidrogen, dan komposisi kesetimbangan diperoleh pada -73°C . Diagram fase hidrogen ditunjukkan di Gambar 2.2, dengan titik triple di $-259,1^\circ\text{C}$ dan 0,07 bar dan titik kritis pada $-239,8^\circ\text{C}$ dan 13 bar. Pada tekanan atmosfer titik didih (T_b) adalah pada -253°C dan titik leleh (T_m) pada -259°C . Garis putus-putus adalah hipotetik, dengan mengingat bahwa informasi yang paling penting dari diagram fase menjadi transisi fase pada tekanan atmosfer dan titik-titik triple dan kritis.



Gambar 2.2 Diagram Fasa Hidrogen

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

Gas hidrogen sangat sensitif terhadap fluktuasi temperatur dan/atau tekanan dan variasi *density* gas sebagai fungsi tekanan dan temperatur ditunjukkan Gambar 2.3. Density gas meningkat dengan suhu turun pada tekanan konstan, dan pada suhu konstan semakin besar tekanan, *density* gas yang lebih besar. Dalam rangka untuk meningkatkan densitas pada suhu konstan tekanan harus ditingkatkan, dan sama untuk meningkatkan densitas gas pada tekanan konstan, suhu harus dikurangi.



Gambar 2.3 Densitas Hidrogen terhadap Temperatur dan Tekanan

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

2.2.2 Penyimpanan Hidrogen

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

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

1. Tangki bertekanan tinggi

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

2. Tangki hidrogen cair (Cryogenic)

Pada teknologi ini, gas hidrogen dicairkan pada suhu yang sangat rendah. Pada tekanan 1 atm, dibutuhkan temperatur hingga 22 K. Energi untuk mendinginkan hidrogen cukup 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

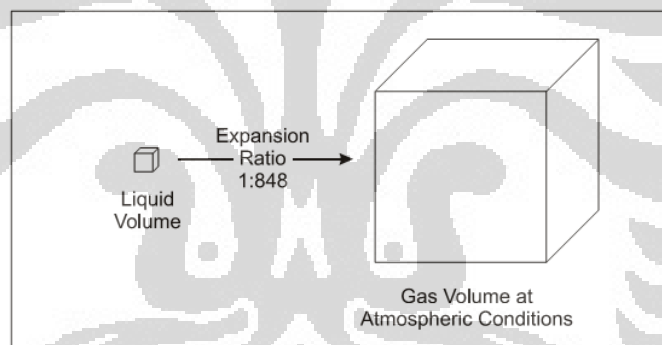
Merupakan senyawa reaktif yang akan segera melepaskan hidrogen apabila bereaksi dengan air. Contohnya adalah NaH, LiH, NaAlH₄, NaBH₄, LiBH₄, dan CaH₂

5. Adsorpsi Storage

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

2.2.3 Adsorption Hydrogen Storage

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

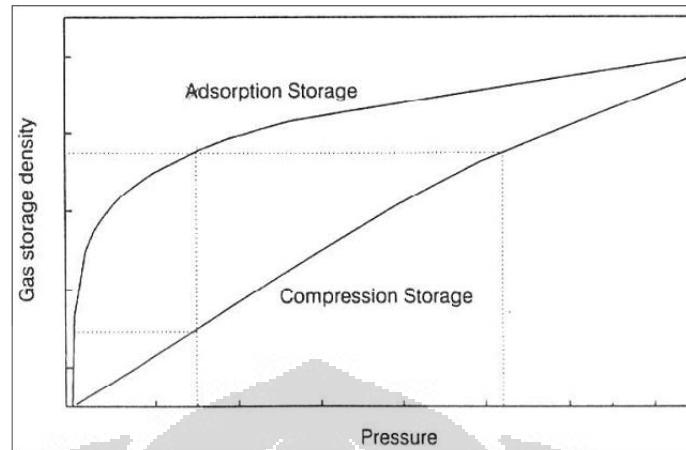


Gambar 2.4 Rasio Ekspansi Hidrogen dalam Fase Cair dan Gas

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

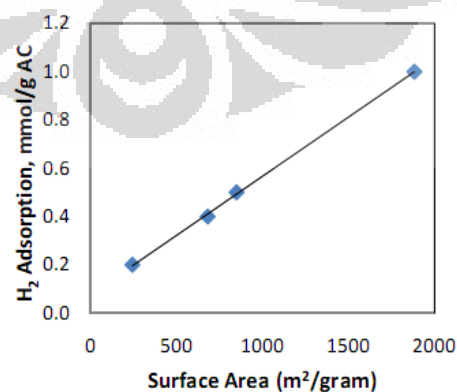
meningkatkan kapasitas penyimpanan dengan tekanan yang sama.



Gambar 2.5 Komparasi *Asorption Storage* dan *Compression Storage*

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

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



Gambar 2.6 Hubungan Luas Permukaan dan Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada 4 MPa Material karbon aktif yang digunakan sebagai adsorben yang baik untuk gas

storage harus memiliki kapasitas adsorpsi yang cukup tinggi dalam basis volumetrik. Untuk mencapai kondisi ini karbon harus:

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

2.3 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. Gaya-gaya yang tidak seimbang tersebut menyebabkan zat padat atau cair tersebut cenderung menarik 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.

Prinsip penyimpanan hidrogen pada beberapa material adsorben ada dua, yaitu:

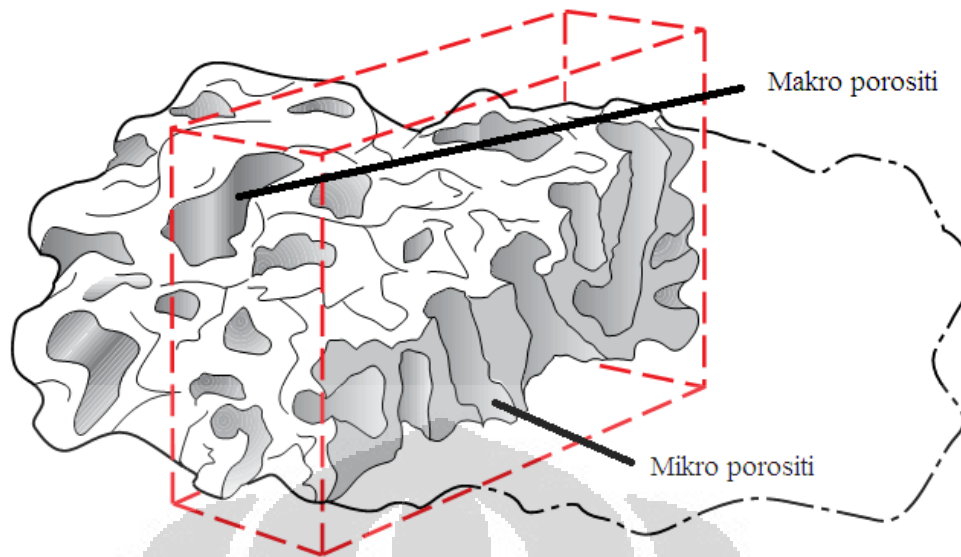
- a) Penyerapan molekul hidrogen pada permukaan seperti *physisorption* (penyerapan fisika).

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. Pada proses adsorpsi ini, adsorbat ditahan pada permukaan karbon karena fluktuasi distribusi muatan listrik yang lemah. Adsorpsi ini berlangsung di bawah

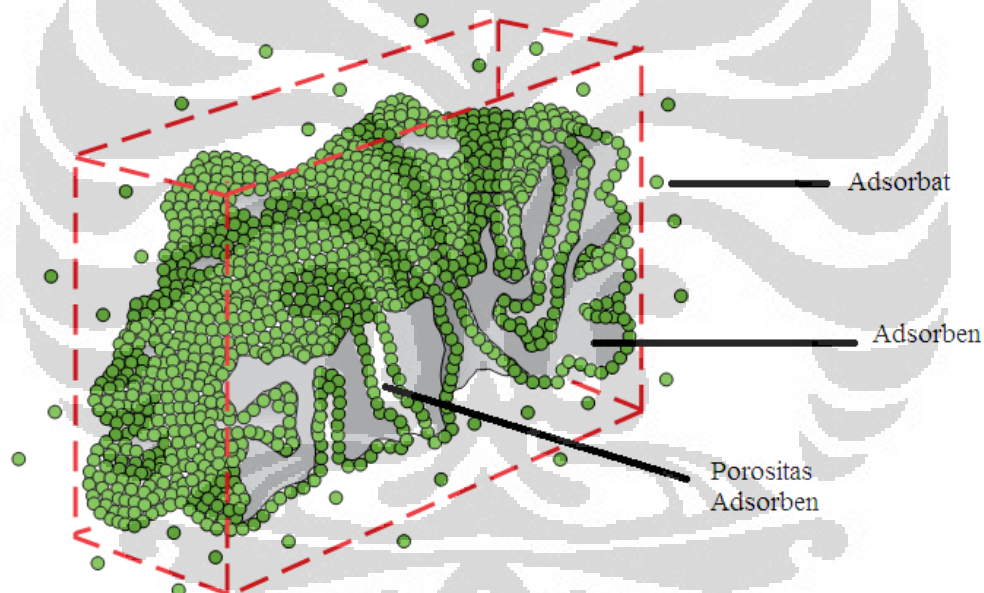
temperatur kritis adsorbat yang relatif rendah. Adsorpsi akan menurun ketika temperatur pada prosesnya meningkat. Energi aktivasi yang terjadi untuk adsorpsi biasanya tidak lebih dari 1 kkal/g.mol. Oleh karena itu gaya yang dilibatkan pada adsorpsi fisika adalah gaya *Van Der Waals* yaitu gaya tarik menarik yang relatif lemah antara permukaan adsorben dengan adsorbat. Dengan demikian adsorbat tidak terikat secara kuat pada permukaan adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan ke bagian permukaan lainnya. Dan pada permukaan yang ditinggalkan oleh adsorbat yang satu dapat digantikan oleh adsorbat lainnya. Bila dalam keadaan kesetimbangan kondisinya diubah misalnya tekanan diturunkan atau temperatur dinaikkan maka sebagian adsorbat akan terlepas dan akan membentuk kesetimbangan baru. Proses adsorpsi fisika terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi sehingga pada proses tersebut akan membentuk lapisan *multilayer* pada permukaan adsorben. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi fisika dapat diputuskan dengan mudah.

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

Adsorpsi 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 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 Waals* sering terjadi pada atom molekul non-polar (beberapa hidrokarbon adalah molekul non polar). Penyerapan secara fisika memiliki sebuah ikatan energi secara normal biasanya dari urutan 0.1 eV sedangkan penyerapan secara kimia memiliki ikatan kovalen C-H, dengan energi yang meningkat dari 2-3 eV.



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 KESETIMBANGAN ADSORPSI

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

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

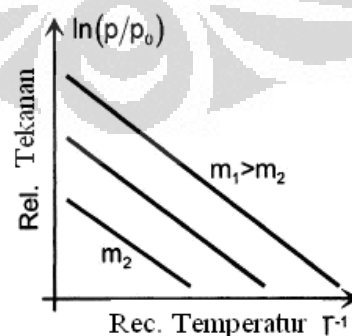
Dimana, x/m adalah jumlah adsorbat yang terserap per unit massa adsorben pada tekanan equilibrium dan pada temperatur adsorpsi.

Adsorpsi equilibrium dapat didekati dalam tiga cara, yaitu:

2.4.1 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).

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

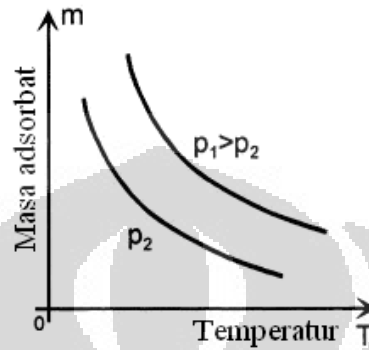


Gambar 2.9 Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi *Isostere*

2.4.2 Adsorpsi Isobar

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

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

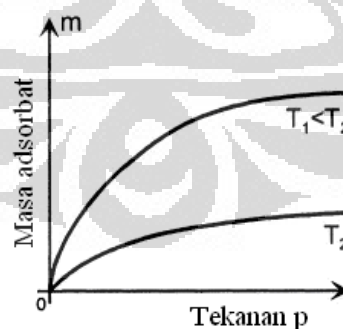


Gambar 2.10 Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isobar

2.4.3 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):

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



Gambar 2.11 Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isotermal

(Keller, Jurgen., 2005)

Pada umumnya, proses adsorpsi isotermal menghasilkan data-data eksperimen adsorpsi yang berupa jumlah adsorbat yang terserap pada adsorben.

Hal itu 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).

Pada percobaan ini, proses adsorpsi yang digunakan adalah proses adsorpsi isothermal.

2.5 PERSAMAAN ADSORPSI ISOTERMAL

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.

2.5.1 Persamaan Isotermal Langmuir

Persamaan isothermal Langmuir adalah teori pertama yang dikembangkan pada adsorpsi isothermal (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_{μ} 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),

$$C_{\mu} = C_{\mu s} \frac{b.P}{1+b.P} \quad (2.5)$$

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.

$$b = \frac{\alpha \exp\left(\frac{Q}{R_g.T}\right)}{K_{d\infty} \sqrt{2\pi m R_g T}} = k \exp\left(\frac{Q}{R_g T}\right) \quad (2.6)$$

2.5.2 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:

$$C_{\mu} = C_{\mu s} \frac{b.P}{\left[1 + (b.P)^t\right]^{1/t}} \quad (2.7)$$

2.5.3 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-Freudlich 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-Freudlich adalah sebagai berikut:

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

2.6 METODE PENGUJIAN ADSORPSI

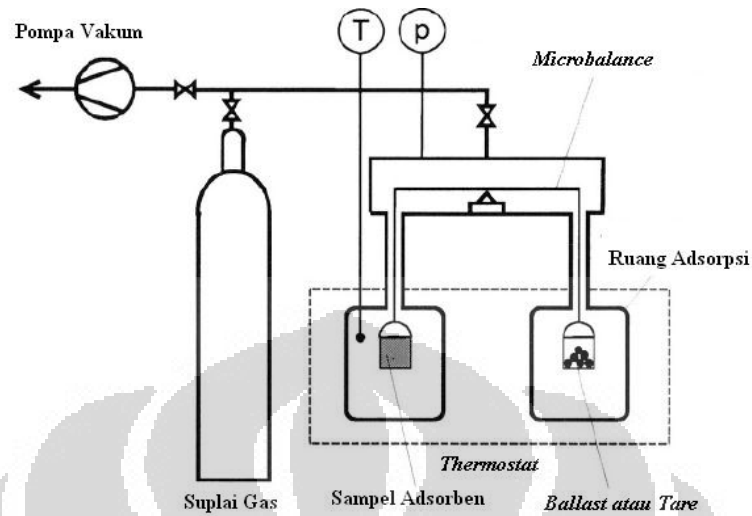
Terdapat empat metode pengukuran penyerapan adsorpsi, yaitu: metode *carrier gas*, metode volumetrik, metode gravimetrik dan metode kalorimetrik. Empat metode pengukuran penyerapan adsorpsi tersebut telah digunakan di berbagai negara dan telah diakui secara internasional (Keller, J.U et al, 2002). Dalam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

2.6.1 Metode Gravimetrik

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

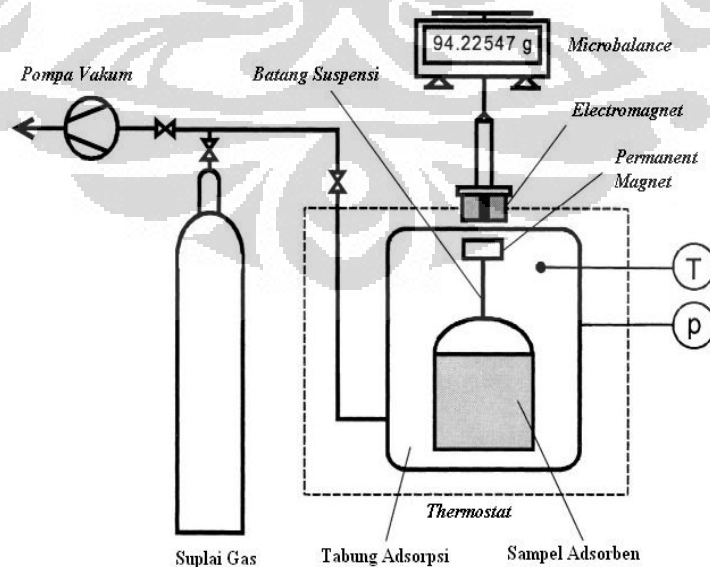
Preparasi sampel pengujian menggunakan metode gravimetrik mutlak dilakukan untuk mendapatkan pengujian yang optimum. Preparasi sampel dilakukan dengan *degassing* sampel untuk mendapatkan massa kering sampel serta temperatur, tekanan dan waktu untuk mendapatkan data pengujian yang valid (Keller, J.U 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 2.12 Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Two Beam Balance* (Keller, Jurgen., 2005)

Pada Gambar 2.12 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.



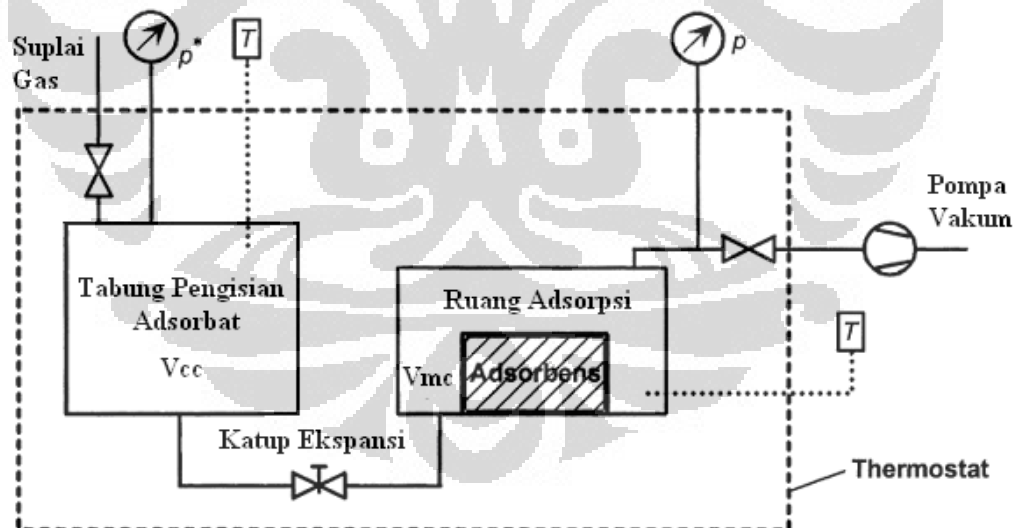
Gambar 2.13 Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Magnetic Suspension Balance* (Keller, Jurgen., 2005)

Pada Gambar 2.13 terlihat skema metode gravimetrik dengan menggunakan *Magnetic Suspension Balance*, dimana sampel adsorben diletakkan di dalam tabung dan selanjutnya ketika massa adsorben bertambah karena akibat terserapnya adsorbat, maka medan magnet juga akan berubah disebabkan karena adanya perubahan jarak antara *permanent magnet* dengan *electromagnet*.

2.6.2 Metode Volumetrik

Dasar pengukuran metode volumetrik adalah tekanan, volume, dan temperatur. Teknik pengukuran adsorpsi dengan metode volumetrik ini lebih sering digunakan, karena sederhana dan efektif selama alat ukur tekanan dan temperatur dapat memberikan informasi yang dibutuhkan pada proses adsorpsi (Rouquerol, J et al, 1998). Skematik metode volumetrik terlihat pada Gambar 2.14.

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 2.14 Skema Metode Volumetrik(Keller, Jurgens., 2005)

Peralatan untuk pengukuran adsorpsi equilibrium dengan menggunakan metode volumetrik pada dasarnya terdiri atas *storage vessel* dan *adsorption chamber* yang keduanya dihubungkan dengan menggunakan *tube*. Kedua tabung tersebut harus ditempatkan dalam sebuah wadah yang dilengkapi dengan

thermostat, sehingga temperaturnya dapat dijaga konstan dan juga dilengkapi dengan katup sehingga gas atau adsorbat dapat disuplai dan dibuang, selain itu juga dilengkapi dengan termometer dan manometer, sehingga temperatur dan tekanan di dalam *vessel* dapat diukur (Keller, Jurgen., 2005).

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

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

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

2.7 ADSORBEN

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

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

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

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

2.7.1 Karbon Aktif

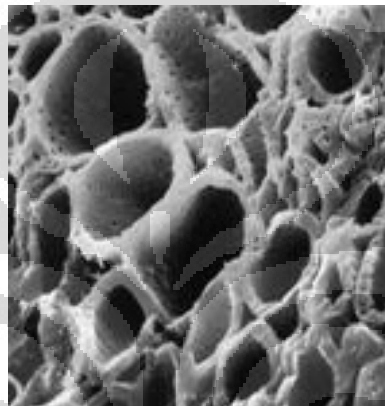
Material karbon aktif adalah salah satu kandidat untuk penyimpanan hidrogen karena memiliki kemampuan penyerapan yang tinggi, luas permukaan spesifik yang tinggi, mikrostruktur berpori, densitas masa yang rendah dan murah menjadi salah satu penelitain yang sangat menarik.

Karbon aktif adalah material yang memiliki lubang (*voids*, ruang, situs dan pori-pori). Karbon aktif adalah senyawa karbon yang telah ditingkatkan daya adsorpsinya dengan melakukan proses karbonisasi dan aktivasi. Pada proses tersebut terjadi penghilangan hidrogen, gas-gas dan air dari permukaan karbon sehingga terjadi perubahan fisik pada permukaannya. Aktivasi ini terjadi karena terbentuknya gugus aktif akibat adanya interaksi radikal bebas pada permukaan karbon dengan atom-atom seperti oksigen dan nitrogen. Menurut Sontheimer, 1985 pada proses aktivasi terjadi pembentukan pori-pori yang masih tertutup dan peningkatan ukuran serta jumlah pori-pori kecil yang telah terbentuk. Dengan demikian karbon aktif hasil aktivasi memiliki luas permukaan internal yang lebih besar. Karbon hasil aktivasi disebut dengan karbon aktif. Walaupun lubang ini memiliki ruang kerapatan elektron sama dengan nol namun pori-pori ini memiliki gaya van der Waals (dari kedekatan atom karbon). Adapun kemampuan material karbon terhadap penyerapan (adsorpsi) berdasarkan kemampuan molekul yang berdifusi kedalam volume mikropori.

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

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

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



Gambar 2.15 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:



aktivasi dengan karbon dioksida dan uap menghasilkan karbon dengan karakteristiknya berbeda. Secara singkat, aktivasi 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 sehingga menyebabkan penurunan energi aktivasi desorpsi (Stroebel, 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. Oleh karena itu, sangat penting untuk dilakukan analisa terhadap permukaan karbon aktifasi yang dikenal dengan *surface oxygen complexes* (SOC) /permukaan dengan oksigen kompleks.

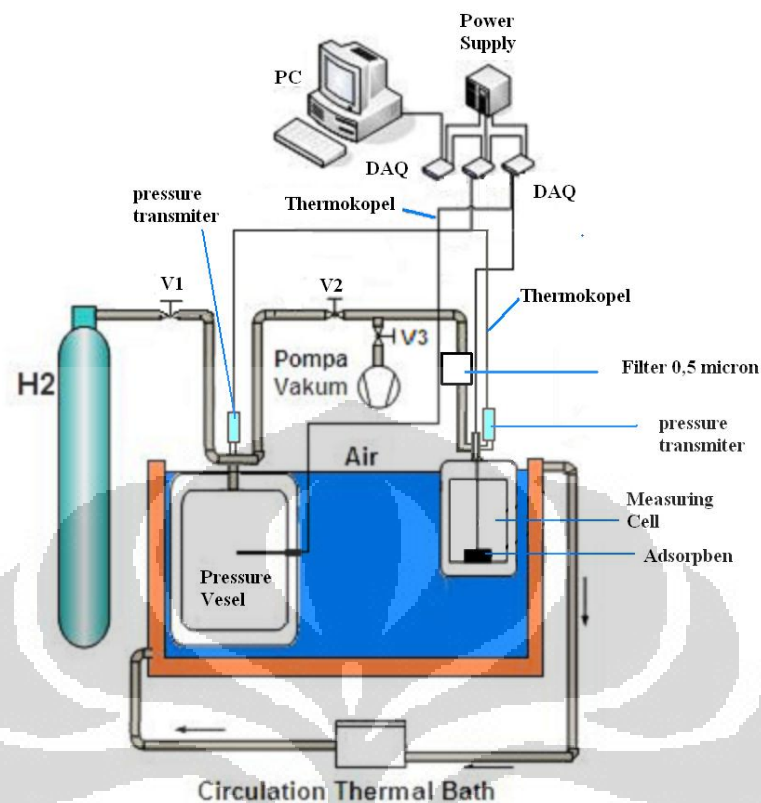
Karbon aktif yaitu karbon dengan struktur amorphous atau mikrokristalin yang dengan perlakuan khusus dapat memiliki luas permukaan dalam yang sangat besar antara 300 - 2000 m²/gram. Pada dasarnya ada dua jenis karbon aktif yaitu karbon aktif fasa cair yang dihasilkan dari material dengan berat jenis rendah, seperti misalnya karbon sekam padi dengan bentuk butiran rapuh dan mudah hancur, mempunyai kadar abu yang tinggi berupa silika dan biasanya digunakan untuk menghilangkan bau, rasa, warna dan kontaminan organik lainnya, sedangkan karbon aktif fasa gas dihasilkan dari bahan dengan berat jenis tinggi.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 PENGUJIAN ADSORPSI VOLUMETRIK

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). Kedua tabung tersebut dihubungkan dengan tube stainless steel dimana keduanya terendam dalam fluida yang temperaturnya di kontrol oleh circulating thermal bath merk HUBER dengan akurasi $0,1^{\circ}\text{C}$. Tekanan pada kedua silinder diukur dengan menggunakan pressure transmitter dengan kisaran pengukuran 0-40 bar absolut (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.

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



Gambar 3.1 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 adalah faktor yang sangat penting dalam pengukuran adsorpsi, khususnya volumetrik. Kebocoran, ketidakpastian kalibrasi volume gas dan pengukuran tekanan, 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:

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

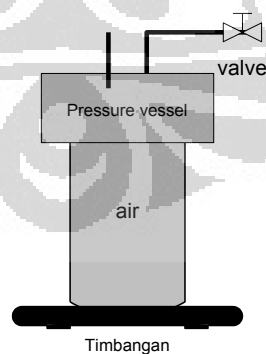
dengan : m_{air} : massa air (kg)

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

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

V_{PV} : volume *charging cell* (m³)

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



Gambar 3.2 Skema Proses Pengukuran Volume *Charging Cell*

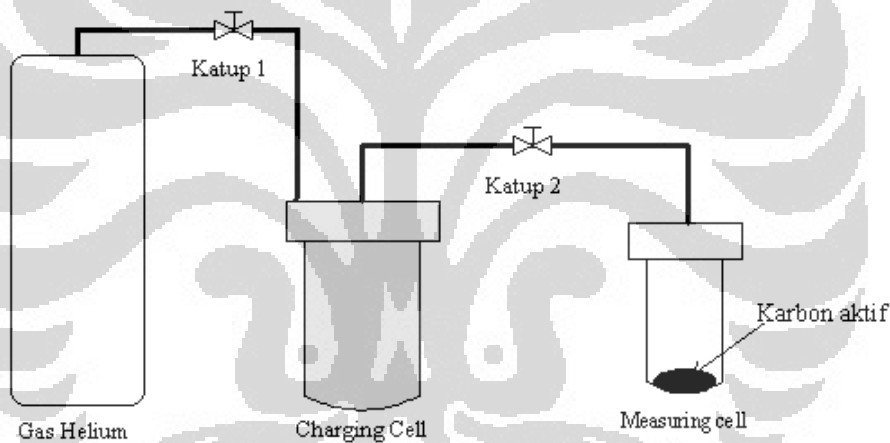
3.2.2 Pengukuran Volume Kosong Measuring Cell

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 3.3 Skema Proses Pengukuran Volume Kosong *Measuring Cell*

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

- Temperatur di dalam *charging cell* dan *measuring cell* dikondisikan pada temperatur $30^{\circ}C$ dengan menggunakan *circulating thermal bath*.
- 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_{ccf}) dicatat. Dengan data ini, maka akan diketahui jumlah mol (n_i) He yang masuk ke dalam *measuring cell*, dengan persamaan:

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

- 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*:

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

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

3.2.3 Persiapan Penelitian

Sebelum dilakukan pengujian adsorpsi isothermal, 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* ± 5 g, kemudian ditimbang kembali bersama dengan *measuring cell* nya.
2. Karbon aktif yang telah dimasukkan ke dalam *measuring cell* kemudian dipanaskan dengan cara dililiti heater sampai pada temperatur 170°C .
3. Setelah ± 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 (± 5 g) dikurangi dengan selisih massa *measuring cell* seperti pada proses nomor 4 di atas.

3.3 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 $130 - 140^{\circ}\text{C}$.
3. Gas helium (He) dimasukkan ke dalam sistem beberapa kali pada tekanan sampai dengan 7 bar untuk meningkatkan proses pengeluaran zat pengotor pada karbon aktif.

4. Setelah proses *degassing* selesai, *charging cell* dan *measuring cell* direndam dengan air yang disirkulasikan oleh *circulating thermal bath* untuk menjaga agar temperatur pada sistem terjaga konstan pada temperatur tertentu yang diinginkan.
5. Setelah temperatur pada sistem konstan (isotermal), gas H₂ dimasukkan 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 H₂ 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.

3.4 ANALISIS ERROR 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.

3.4.1 Errors pada Volume Charging Cell dan Volume Kosong pada Measuring Cell

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%.

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}) adalah 85.5321cm^3

3.4.2 Error pada Pengukuran Temperatur

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

3.4.3 Error pada Pengukuran Tekanan

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

3.4.4 Error pada Pengukuran Massa Sampel

Pada pengukuran berat sampel karbon aktif digunakan timbangan dengan akurasi 0,01 g, berat karbon aktif yang digunakan pada penelitian ini maksimum adalah 4.48 g sehingga *error* pada pengukuran berat sampel adalah 2×10^{-5} %.

3.5 PERHITUNGAN MASSA ADSORBAT YANG DISERAP

Pengujian adsorpsi isothermal dilakukan dengan menggunakan metode volumetrik, skema keseimbangan massa adsorpsi isothermal terlihat pada Gambar 3.4. 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:

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

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

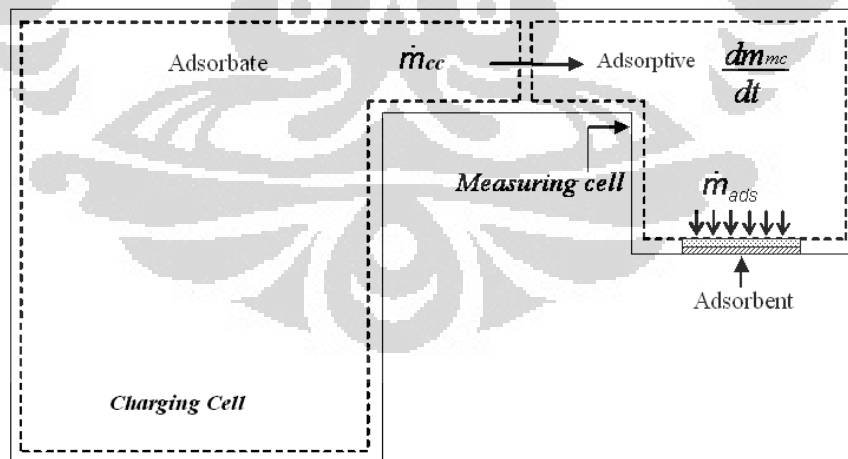
Dengan mensubstitusikan persamaan (2) dan (3) ke dalam pers (1), maka didapat:

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

Atau

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

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



Gambar 3.4 Skema Keseimbangan Massa pada Proses Penyerapan

BAB 4

PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA DATA

4.1 DATA PERCOBAAN

Berikut ini adalah data-data yang diperoleh sebelum proses pengambilan data adsorpsi:

Massa Karbon Aktif: 4.48 gram

Massa Jenis Karbon Aktif: 3.9 gram

Volume Pressure Vessel: 1170 cm³

Volume Void: 85.5321 cm³

Properti Fisik Karbon Aktif:

Tabel 4.1 Properti Fisik Karbon Aktif Batu Bara

Perlakuan	Surface Area (m ² /gr)	Total Pore Volume (cc/gr)	Diameter Pori (Å)
As Received	752,01	0,403	21,435
KA 400 Mesh (37µm)	662,69	0,431	25,985
PBM 30 Jam	579,31	0,406	28,039

4.1.1 Data Adsorpsi Batu Bara pada Temperatur 35°C

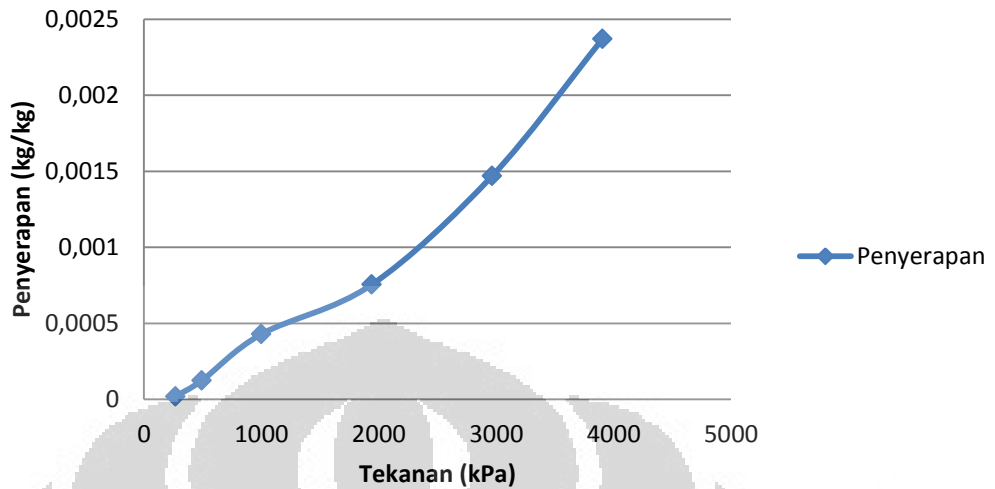
Setelah melakukan percobaan sesuai dengan metode di atas, maka didapatkan data percobaan sebagai berikut:

Percobaan 35°C (1)

Tabel 4.2 Adsorpsi 35°C yang Pertama

Tekanan MC (kPa)	Massa Hidrogen Terserap (kg)	Penyerapan (kg/kg)
267.886	8.71142×10^{-8}	1.9445×10^{-5}
491.440	5.51022×10^{-7}	0.00012300
998.376	1.92010×10^{-6}	0.00042859
1939.976	3.38010×10^{-6}	0.00075449
2965.377	6.58061×10^{-6}	0.00146889
3904.986	1.06127×10^{-5}	0.00236890

Adsorpsi 35 - 1



Gambar 4.1 Penyerapan Adsorpsi 35°C Pertama

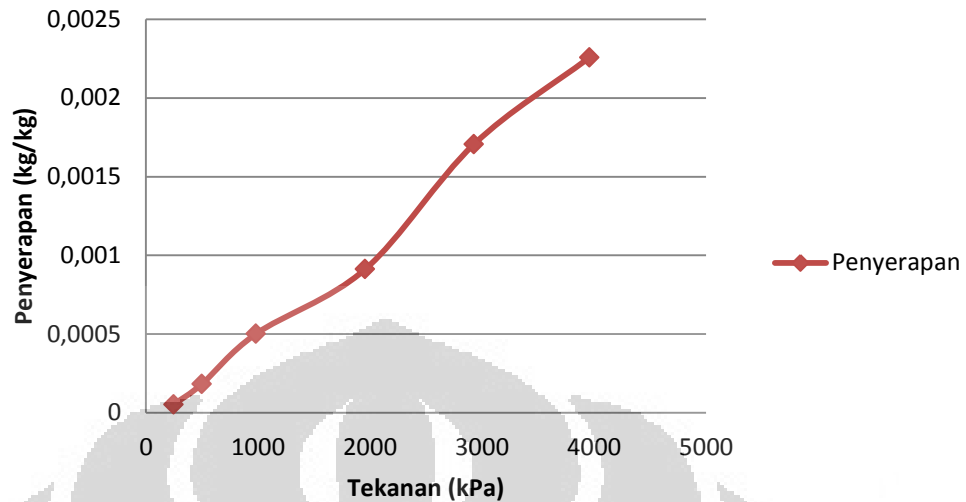
Pada adsorpsi dengan suhu 35°C yang pertama, penyerapan hidrogen maksimum sebesar 0.00236890kg/kg massa adsorbennya. Penyerapan lebih lambat saat tekanan 250 kPa hingga 1000 kPa, sedangkan pada tekanan di atas 2000 kPa, penyerapannya menjadi lebih cepat dengan kenaikan penyerapan sekitar 0.0007 kg/kg massa adsorben tiap kenaikan 1000 kPa tekanan.

Percobaan 35°C (2)

Tabel 4.3 Adsorpsi 35°C yang Kedua

Tekanan MC (kPa)	Massa Hidrogen Terserap (kg)	Penyerapan (kg/kg)
247.741	2.39409×10^{-7}	5.3439×10^{-5}
497.607	8.15921×10^{-7}	0.00018213
981.135	2.24607×10^{-6}	0.00050135
1956.814	4.08531×10^{-6}	0.00091190
2927.955	7.64127×10^{-6}	0.00170564
3958.107	1.01083×10^{-5}	0.00225632

Adsorpsi 35 - 2



Gambar 4.2 Penyerapan Adsorpsi 35°C kedua

Pada adsorpsi dengan suhu 35°C yang kedua, penyerapan hidrogen maksimum sebesar 0.00225632kg/kg massa adsorbennya. Penyerapan hidrogennya fluktuatif. Penyerapan lebih lambat saat tekanan 1000 kPa - 2000 kPa dan 3000-4000 kPa, sedangkan pada tekanan 250 -1000 kPa dan 2000-3000 kPa , penyerapannya menjadi lebih cepat dengan kenaikan penyerapan sekitar 0.0005 kg/kg massa adsorben pada 250-1000 kPa dan 0.0008 kg/kg massa adsorben pada 2000-3000 kPa..

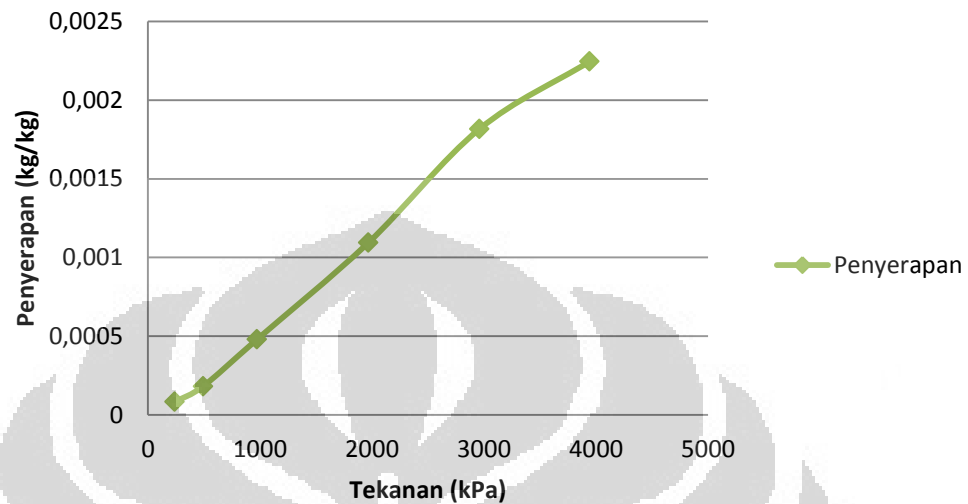
Percobaan 35°C (3)

Tabel 4.4 Adsorpsi 35°C yang Ketiga

Tekanan MC (kPa)	Massa Hidrogen Terserap (kg)	Penyerapan (kg/kg)
239.416	3.71601×10^{-7}	8.2947×10^{-5}
491.392	8.13829×10^{-7}	0.00018166
971.400	2.14474×10^{-6}	0.00047874
1967.060	4.89954×10^{-6}	0.00109365
2957.951	8.13250×10^{-6}	0.00181529

3942.560	1.00560×10^{-5}	0.00224465
----------	--------------------------	------------

Adsorpsi 35 - 3



Gambar 4.3 Penyerapan Adsorpsi 35°C ketiga

Pada adsorpsi dengan suhu 35°C yang ketiga, penyerapan hidrogen maksimum sebesar 0.00224465kg/kg massa adsorbennya. Penyerapan lebih stabil saat tekanan 250 kPa hingga 2000 kPa, sedangkan pada tekanan 3000 kPa, penyerapannya menjadi lebih cepat dengan kenaikan penyerapan sekitar 0.0008 kg/kg massa adsorben tiap kenaikan 1000 kPa tekanan.

4.1.2 Data Adsorpsi Batu Bara pada Temperatur 25°C

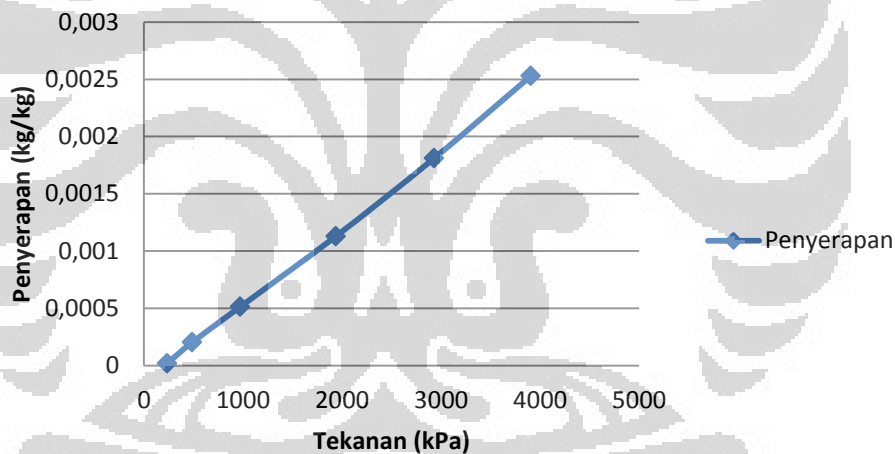
Setelah melakukan percobaan sesuai dengan metode di atas, maka didapatkan data percobaan sebagai berikut:

Percobaan 25°C (1)

Tabel 4.5 Adsorpsi 25°C yang Pertama

Tekanan MC (kPa)	Massa Hidrogen Terserap (kg)	Penyerapan (kg/kg)
234.064	8.6958×10^{-8}	1.9410×10^{-5}
485.235	9.0492×10^{-7}	0.00020199
969.788	2.2956×10^{-6}	0.00051241
1935.900	5.0540×10^{-6}	0.00112811
2928.149	8.1040×10^{-6}	0.00180894
3905.635	1.1323×10^{-5}	0.0025275

Adsorpsi 25 - 1



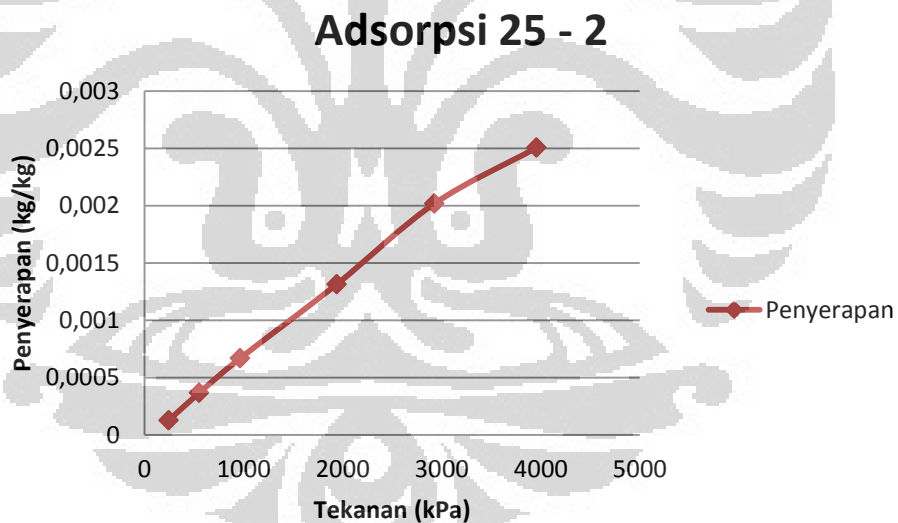
Gambar 4.4 Penyerapan Adsorpsi 25°C Pertama

Pada adsorpsi dengan suhu 25°C yang pertama, penyerapan hidrogen maksimum sebesar 0.0025275 kg/kg massa adsorbennya. Penyerapan cenderung stabil (tidak ada lebih cepat atau lebih lambat) saat tekanan 1000 kPa hingga 4000 kPa, dengan kenaikan penyerapan sekitar 0.0007 kg/kg massa adsorben tiap kenaikan 1000 kPa tekanan.

Percobaan 25°C (2)

Tabel 4.6 Adsorpsi 25°C yang Kedua

Tekanan MC (kPa)	Massa Hidrogen Terserap (kg)	Penyerapan (kg/kg)
244.652	5.7475×10^{-7}	0.00012829
550.789	1.6399×10^{-6}	0.00036604
964.915	2.9947×10^{-6}	0.00066847
1940.999	5.8890×10^{-6}	0.00131451
2924.967	9.0351×10^{-6}	0.00201675
3958.107	1.1223×10^{-5}	0.00250512



Gambar 4.5 Penyerapan Adsorpsi 25°C kedua

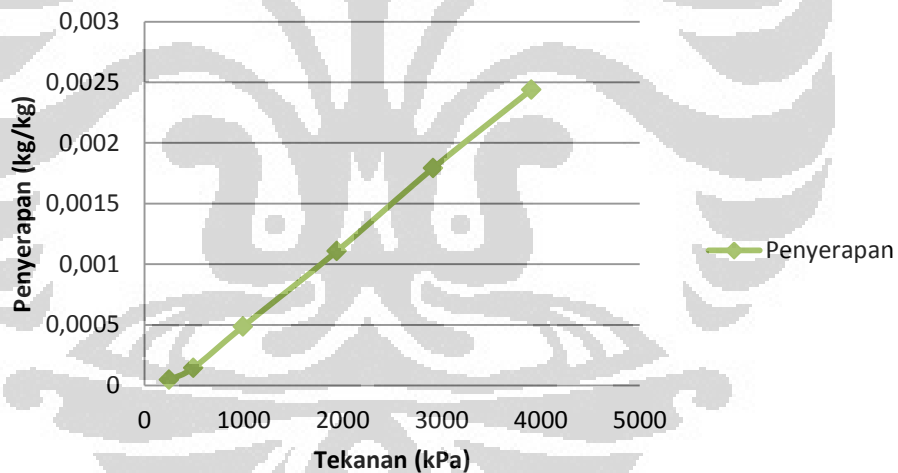
Pada adsorpsi dengan suhu 25°C yang kedua, penyerapan hidrogen maksimum sebesar 0.00250512 kg/kg massa adsorbennya. Penyerapan lebih lambat saat tekanan 3000 kPa - 4000 kPa dengan kenaikan penyerapan sekitar 0.0005 kg/kg massa adsorben, sedangkan pada 1000 kPa - 3000 kPa, penyerapan sekitar 0.0007 kg/kg massa adsorben.

Percobaan 25°C (3)

Tabel 4.7 Adsorpsi 25°C yang Ketiga

Tekanan MC (kPa)	Massa Hidrogen Terserap (kg)	Penyerapan (kg/kg)
246.989	2.0249×10^{-7}	4.520×10^{-5}
491.507	6.4420×10^{-7}	0.00014380
992.640	2.1763×10^{-6}	0.00048578
1941.700	4.9602×10^{-6}	0.00110718
2913.274	8.0293×10^{-6}	0.00179225
3905.331	1.0927×10^{-5}	0.0024391

Adsorpsi 25 - 3



Gambar 4.6 Penyerapan Adsorpsi 25°C ketiga

Pada adsorpsi dengan suhu 25°C yang ketiga, penyerapan hidrogen maksimum sebesar 0.0024391 kg/kg massa adsorbennya. Penyerapan cenderung stabil (tidak ada lebih cepat atau lebih lambat) saat tekanan 1000 kPa hingga 4000 kPa, dengan kenaikan penyerapan sekitar 0.0006 kg/kg massa adsorben tiap kenaikan 1000 kPa tekanan.

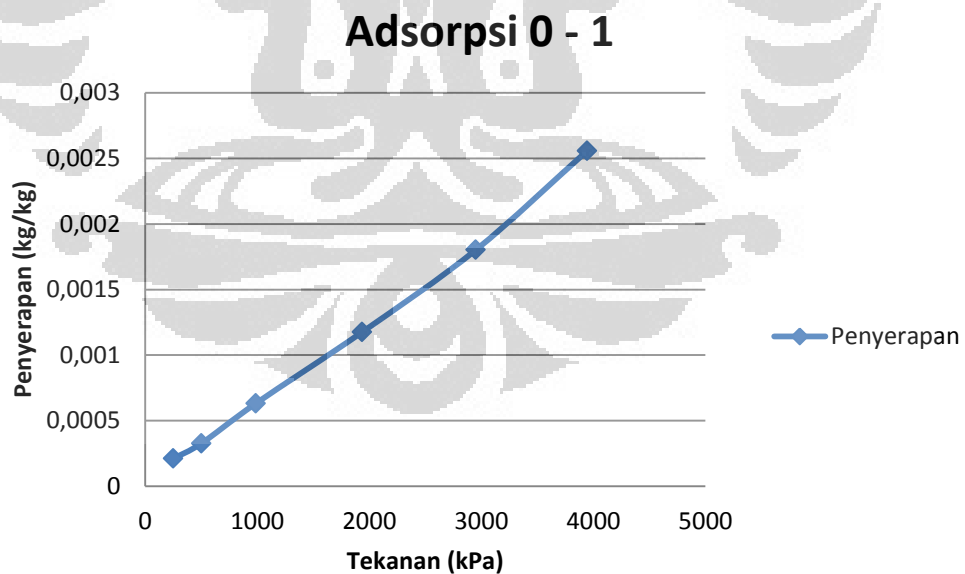
4.1.3 Data Adsorpsi Batu Bara pada Temperatur 0°C

Setelah melakukan percobaan sesuai dengan metode di atas, maka didapatkan data percobaan sebagai berikut:

Percobaan 0 (1)

Tabel 4.8 Adsorpsi 0°C yang Pertama

Tekanan MC (kPa)	Massa Hidrogen Terserap (kg)	Penyerapan (kg/kg)
248.286	9.43964×10^{-7}	0.00021071
499.905	1.46405×10^{-6}	0.00032680
985.608	2.82733×10^{-6}	0.00063110
1935.542	5.26585×10^{-6}	0.00117541
2950.926	8.07157×10^{-6}	0.00180169
3943.437	1.14499×10^{-5}	0.00255579



Gambar 4.7 Penyerapan Adsorpsi 0°C Pertama

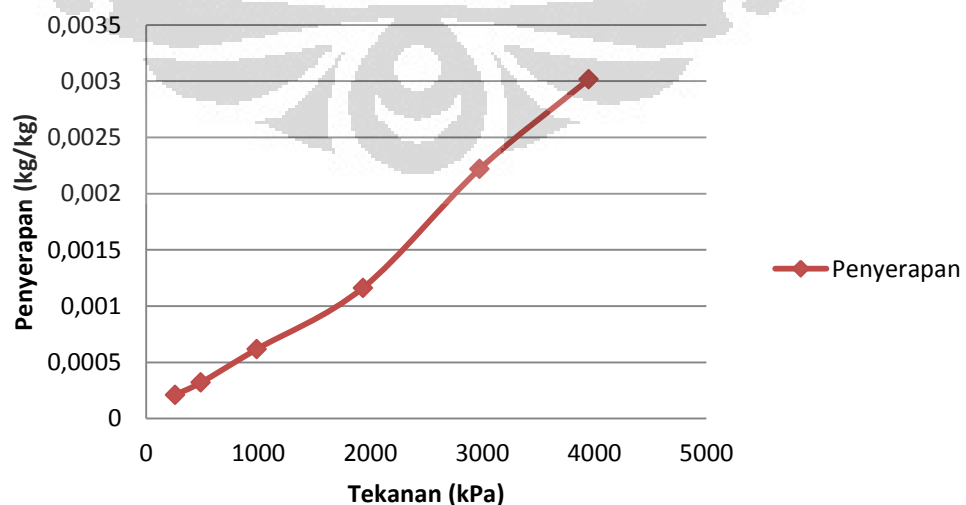
Pada adsorpsi dengan suhu 0°C yang pertama, penyerapan hidrogen maksimum sebesar 0.00255579kg/kg massa adsorbennya. Penyerapan lebih stabil saat tekanan 250 kPa hingga 3000 kPa, sedangkan pada tekanan 4000 kPa, penyerapannya menjadi lebih cepat dengan kenaikan penyerapan sekitar 0.00075 kg/kg massa adsorben tiap kenaikan 10 bar tekanan.

Percobaan 0 (2)

Tabel 4.9 Adsorpsi 0°C yang Kedua

Tekanan MC (kPa)	Massa Hidrogen Terserap (kg)	Penyerapan (kg/kg)
258.343	9.46068×10^{-7}	0.00021118
487.322	1.43921×10^{-6}	0.00031985
987.289	2.76718×10^{-6}	0.00061767
1934.066	5.20606×10^{-6}	0.00116207
2976.767	9.94550×10^{-6}	0.00221998
3951.199	1.35121×10^{-5}	0.00301610

Adsorpsi 0 - 2



Gambar 4.8 Penyerapan Adsorpsi 0°C Kedua

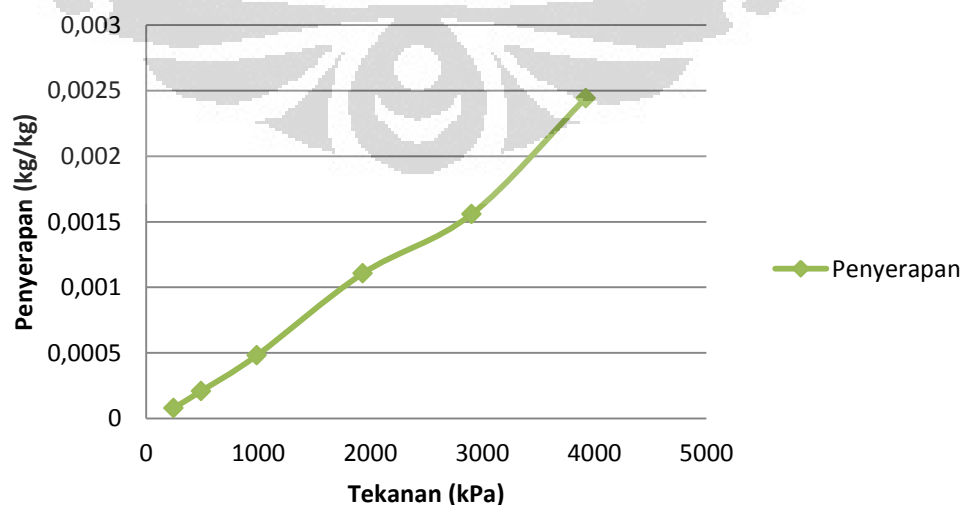
Pada adsorpsi dengan suhu 0°C yang kedua, penyerapan hidrogen maksimum sebesar 0.00301610kg/kg massa adsorbennya. Penyerapan lebih lambat saat tekanan 250 kPa hingga 2000 kPa, sedangkan pada tekanan di atas 20 bar, penyerapannya menjadi lebih cepat dengan kenaikan penyerapan sekitar 0.0008-0.0010 kg/kg massa adsorben tiap kenaikan 10 bar tekanan.

Percobaan 0 (3)

Tabel 4.10 Adsorpsi 0°C yang Ketiga

Tekanan MC (kPa)	Massa Hidrogen Terserap (kg)	Penyerapan (kg/kg)
243.330	3.55192×10^{-7}	7.9284×10^{-5}
489.448	9.37394×10^{-7}	0.00020924
986.950	2.15707×10^{-6}	0.00048149
1933.214	4.95722×10^{-6}	0.00110652
2903.703	6.97747×10^{-6}	0.00155747
3923.076	1.09438×10^{-5}	0.00244281

Adsorpsi 0 - 3



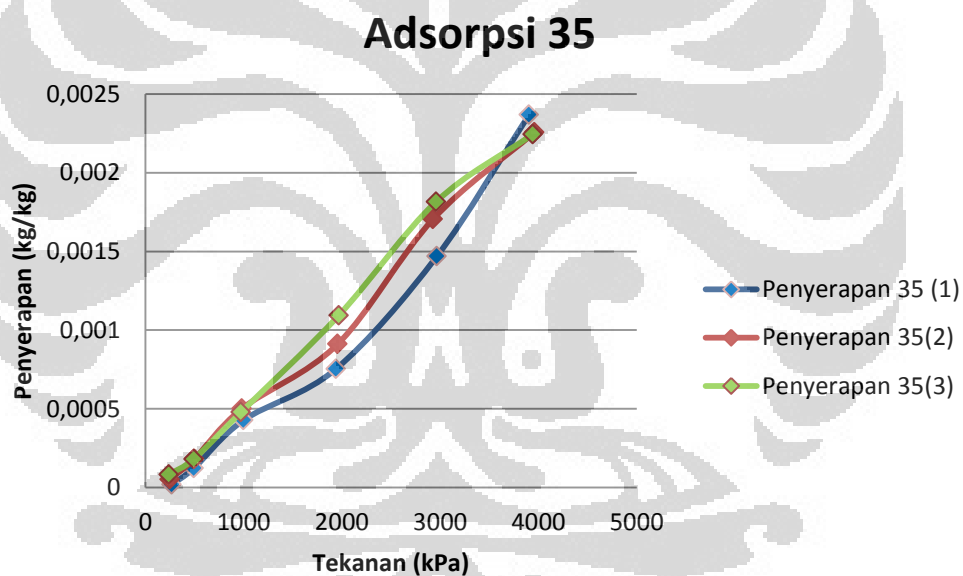
Gambar 4.9 Penyerapan Adsorpsi 0°C Ketiga

Pada adsorpsi dengan suhu 0°C yang ketiga, penyerapan hidrogen maksimum sebesar 0.00244281kg/kg massa adsorbennya. Penyerapan lebih lambat saat tekanan 2000 kPa hingga 3000 kPa, sedangkan pada tekanan 250 -2000kPa dan 3000 -4000 kPa, penyerapannya menjadi lebih cepat dengan kenaikan penyerapan hingga 0.0009 kg/kg massa adsorben.

4.2 KARAKTERISTIK DATA HASIL PERCOBAAN

4.2.1 Karakteristik Data Hasil Percobaan Adsorpsi pada Temperatur 35°C

Berikut ini adalah perbandingan adsorpsi hidrogen pada suhu 35°C



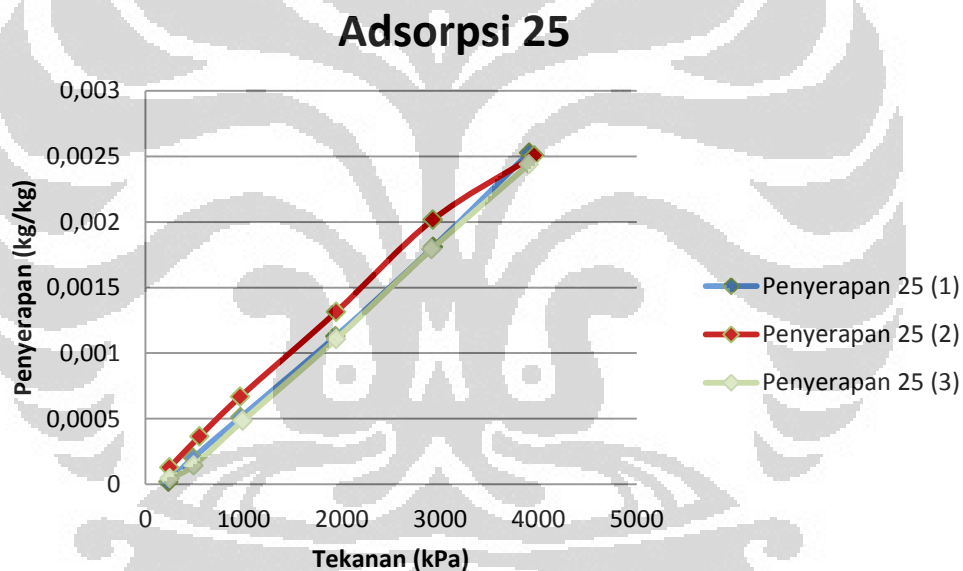
Gambar 4.10 Perbandingan Adsorpsi 35°C

Pada adsorpsi dengan suhu 35°C, grafik penyerapannya cenderung linear. Ada beberapa perbedaan pada proses adsorpsi yang pertama hingga ketiga, khususnya pada tekanan 1000 kPa hingga tekanan 4000 kPa.

Pada proses adsorpsi yang pertama, terjadi penyerapan yang cepat pada tekanan 2000 kPa hingga 4000 kPa. Sedangkan pada proses adsorpsi yang kedua, penyerapan cepat terjadi pada tekanan naik dari 2000 kPa ke 3000 kPa. Dan pada proses adsorpsi ketiga, proses adsorpsi melambat pada saat tekanan naik dari 3000 kPa ke 4000 kPa.

4.2.2 Karakteristik Data Hasil Percobaan Adsorpsi pada Temperatur 25°C

Berikut ini adalah perbandingan adsorpsi hidrogen pada suhu 25°C



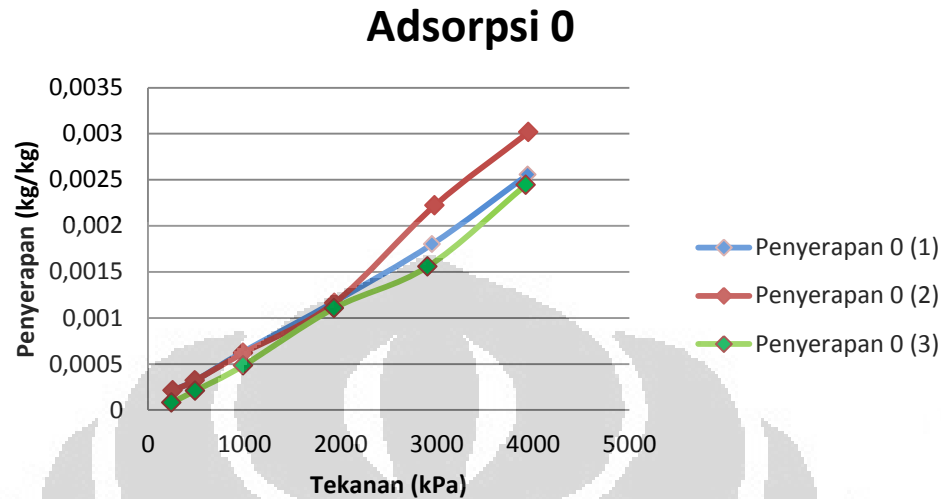
Gambar 4.11 Perbandingan Adsorpsi 25°C

Pada adsorpsi dengan suhu 25°C, grafik penyerapannya cenderung linear. Ada beberapa perbedaan pada proses adsorpsi yang pertama hingga ketiga, khususnya pada tekanan 1000 kPa hingga tekanan 4000 kPa.

Pada proses adsorpsi yang pertama dan ketiga, terjadi penyerapan yang stabil pada tekanan 1000 kPa hingga 4000 kPa. Sedangkan pada proses adsorpsi yang kedua, penyerapan cepat terjadi pada tekanan naik dari 1000 kPa ke 3000 kPa.

4.2.3 Karakteristik Data Hasil Percobaan Adsorpsi pada Temperatur 0°C

Berikut ini adalah perbandingan adsorpsi hidrogen pada suhu 0°C



Gambar 4.12 Perbandingan Adsorpsi 0°C

Pada adsorpsi dengan suhu 0°C, grafik penyerapannya cenderung linear. Sama seperti suhu 35°C, ada beberapa perbedaan antara penyerapan pertama hingga ketiga.

Pada proses adsorpsi yang pertama, penyerapan hidrogen dan linear. Tidak ada penambahan massa yang terserap secara drastis. Sedangkan pada proses adsorpsi yang kedua, terjadi penyerapan hidrogen yang cukup drastis pada tekanan 2000 kPa hingga 4000 kPa, dan pada penyerapan ketiga, penyerapan hidrogen hampir sama dengan penyerapan pertama, hanya besar penyerapan maksimumnya lebih rendah.

4.3 PENGOLAHAN DAN ANALISA HASIL PERCOBAAN

4.3.1 Perbandingan Adsorpsi Temperatur 35°C , 25°C dan 0°C

Berikut adalah rata-rata penyerapan hidrogen pada suhu 35°C

Tabel 4.11 Tekanan MC dan Penyerapan Rata-Rata pada Temperatur 35°C

Tekanan MC rata-rata (kPa)	Penyerapan rata-rata (kg/kg)
241.902	0.00006430
509.177	0.00023728
986.616	0.00055555
1934.274	0.00118327
2943.799	0.00187265
3939.237	0.00249057

Dan ini adalah rata-rata penyerapan hidrogen pada temperatur 25°C

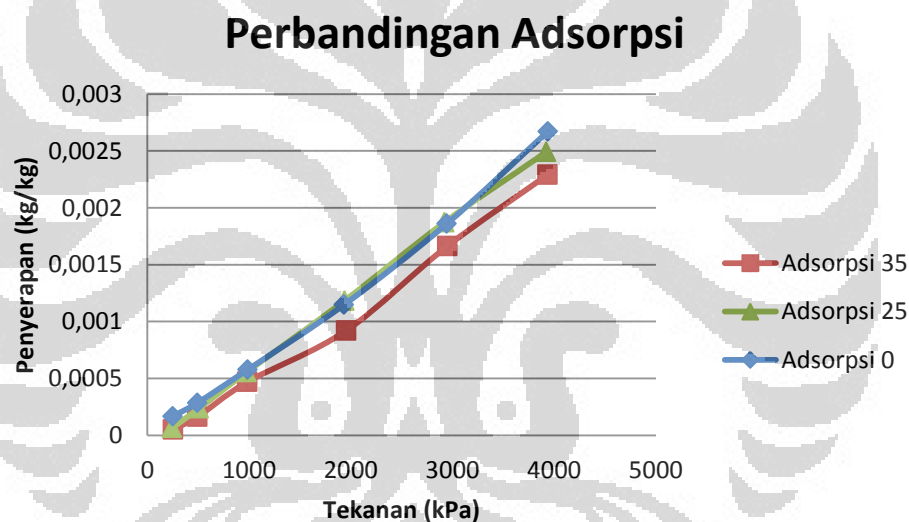
Tabel 4.12 Tekanan MC dan Penyerapan Rata-Rata pada Temperatur 0°C

Tekanan MC rata-rata (kPa)	Penyerapan rata-rata (kg/kg)
249.986	0.00016706
492.225	0.00028529
983.616	0.00057675
1934.274	0.00114800
2943.799	0.00185971
3939.237	0.00267156

Dan ini adalah rata-rata penyerapan hidrogen pada temperatur 0°C

Tabel 4.13 Tekanan MC dan Penyerapan Rata-Rata pada Temperatur 0°C

Tekanan MC rata-rata (kPa)	Penyerapan rata-rata (kg/kg)
249.986	0.00016706
492.225	0.00028529
983.616	0.00057675
1934.274	0.00114800
2943.799	0.00185971
3939.237	0.00267156



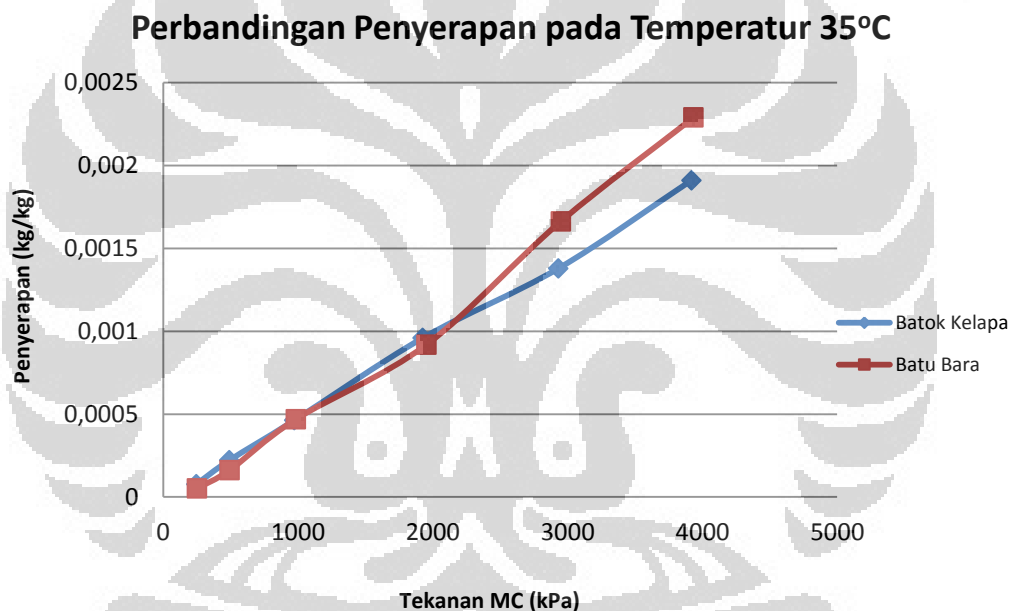
Gambar 4.13 Perbandingan Adsorpsi 35, Adsorpsi 25, dan Adsorpsi 0

Dari grafik dapat dilihat bahwa adsorpsi pada temperatur 0°C memiliki penyerapan lebih baik dibandingkan adsorpsi pada temperatur 35°C . Dari rata-rata penyerapan pada temperatur 0°C dan temperatur 35°C , dapat dilihat fungsi linear pada penyerapan hidrogen. Sedangkan pada adsorpsi pada temperatur 25°C , penyerapan lebih baik daripada adsorpsi pada temperatur 35°C , tetapi masih lebih kecil penyerapannya dibanding dengan temperatur 0°C , walau penyerapannya hampir sama hingga tekanan 3000 kPa

4.3.2 Perbandingan Adsorpsi Batu Bara dan Batok Kelapa

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

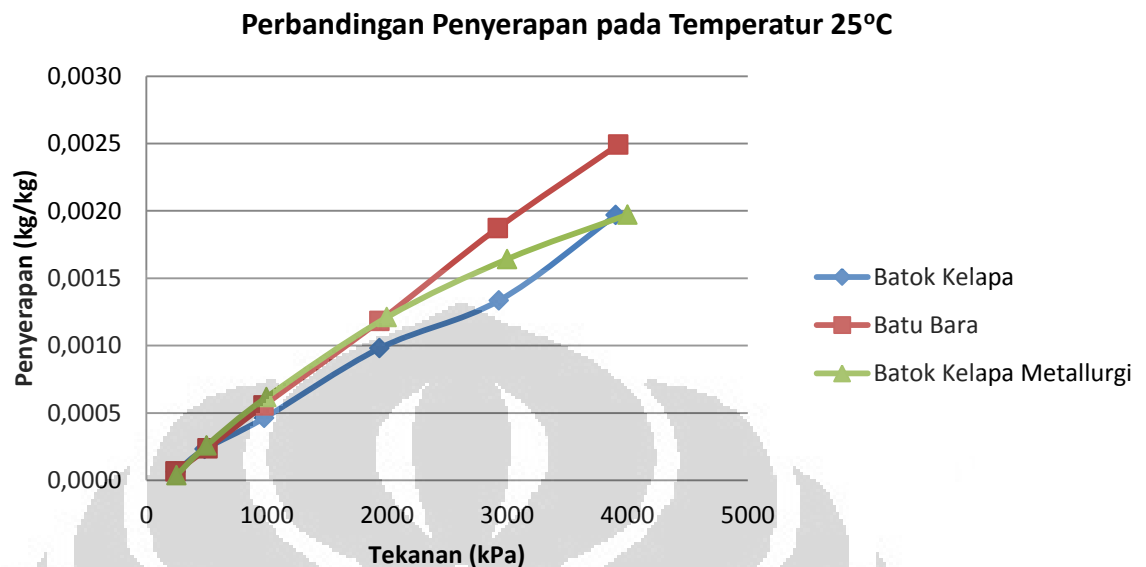
a. Pada Temperatur 35°C



Gambar 4.14 Adsorpsi Isotermal Batu Bara dan Batok Kelapa pada Temperatur 35°C

Grafik diatas yaitu grafik perbandingan kapasitas penyerapan hidrogen antara karbon aktif berbahan dasar batu bara granular dan batok kelapa 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 3000 kPa dan 4000 kPa. 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.

b. Pada Temperatur 25°C

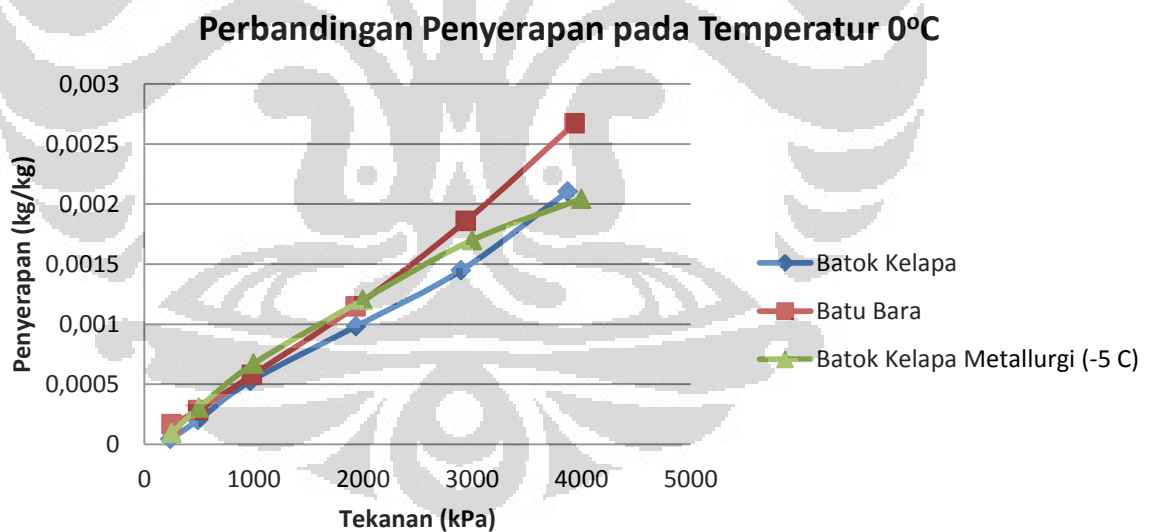


Gambar 4.15 Adsorpsi Isotermal Batu Bara dan Batok Kelapa pada Temperatur 25°C

Gambar 4.15 adalah grafik perbandingan kapasitas penyerapan hidrogen antara karbon aktif berbahan dasar batu bara granular dan batok kelapa granular pada temperatur 25°C. Perbandingan penyerapan juga dilakukan terhadap adsorpsi yang dilakukan di Departemen Teknik Metallurgi dan Material Universitas Indonesia yang melakukan uji adsorpsi dengan batok kelapa. Kapasitas penyerapan pada batu bara akan jauh lebih besar ketimbang pada batok kelapa. Hal ini terlihat jelas pada tekanan tinggi, yaitu pada 2000 kPa hingga 4000 kPa dimana pada batok kelapa terjadi penurunan penyerapan pada tekanan 2000 kPa ke 3000 kPa. 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. Untuk perbandingan uji adsorpsi batok kelapa yang dilakukan di Departemen Teknik Mesin dan Teknik Metallurgi, pada tekanan 4000 kPa, menghasilkan output yang hampir sama, sekitar 0.00197 kg/kg masa penyerapnya.

c. Pada Temperatur 0°C

Pada Grafik di Gambar 4.16, yaitu grafik perbandingan kapasitas penyerapan hidrogen antara karbon aktif berbahan dasar batu bara granular dan batok kelapa granular pada temperatur 0°C dapat dilihat bahwa kapasitas penyerapan pada batu bara akan jauh lebih besar ketimbang pada batok kelapa. Pada gambar tersebut juga dapat dilihat penyerapan yang diuji pada Departemen Teknik Metallurgi yang menggunakan batok kelapa pada suhu -5°C yang juga menunjukkan bahwa hasil penyerapannya masih lebih rendah dibandingkan dengan adsorpsi batu bara. Yang menarik dibahas justru perbandingan adsorpsi batok kelapa yang diuji oleh Departemen Teknik Mesin pada suhu 0°C dan yang diuji oleh Departemen Teknik Metallurgi pada suhu -5°C yang hasilnya sama.



Gambar 4.16 Adsorpsi Isotermal Batu Bara dan Batok Kelapa pada Temperatur 0°C

Hal ini terlihat jelas pada tekanan tinggi, yaitu pada 3000 kPa dan 4000 kPa. 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. Untuk

perbandingan batok kelapa di Departemen Teknik Mesin pada temperatur 0°C dengan batok kelapa di Departemen Teknik Metallurgi pada temperatur -5°C memiliki penyerapan yang hampir sama yaitu 0.002043 kg/kg massa penyerap untuk uji adsorpsi di Teknik Metallurgi dan 0.002104 kg/kg massa penyerap untuk uji adsorpsi di Teknik Mesin. Pada adsorpsi yang di uji di Teknik Metallurgi, hasil adsorpsinya kurang baik karena masih lebih sedikit dari hasil adsorpsi yang dilakukan di Teknik Mesin, karena sesuai teori, semakin rendah temperatur, penyerapan harus lebih besar dan itu bisa dilihat bahwa adsorpsi di Teknik Metallurgi menunjukkan hasil adsorpsi yang lebih kecil dari yang ada di Teknik Mesin walau temperatur lebih rendah.

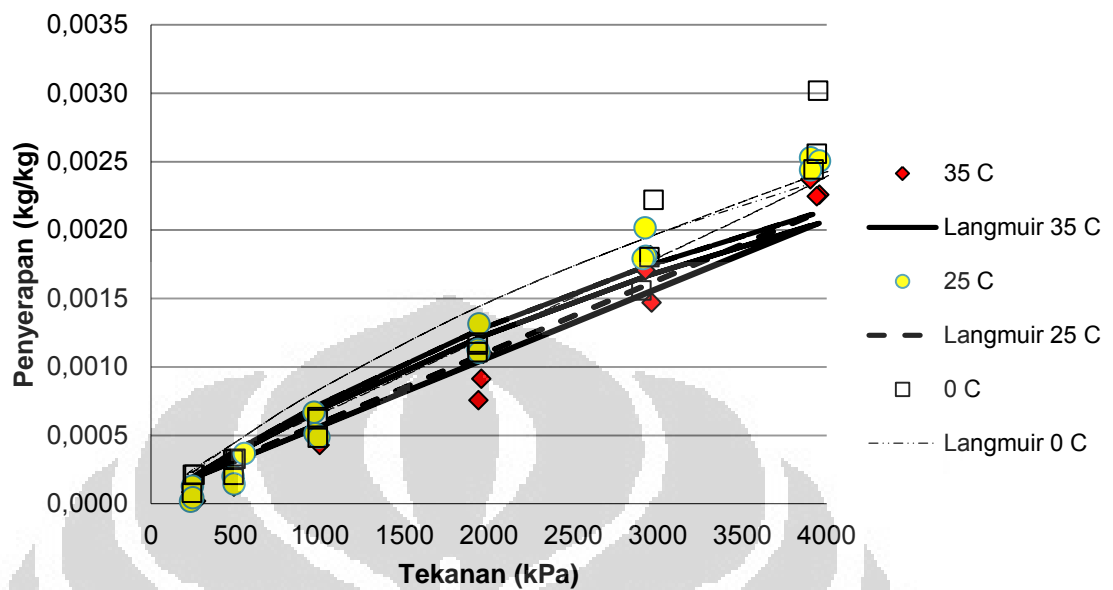
4.4 PERSAMAAN ADSORPSI ISOTERMAL

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.

4.4.1 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).

Pendekatan Kapasitas Penyerapan Hidrogen dengan Persamaan Langmuir



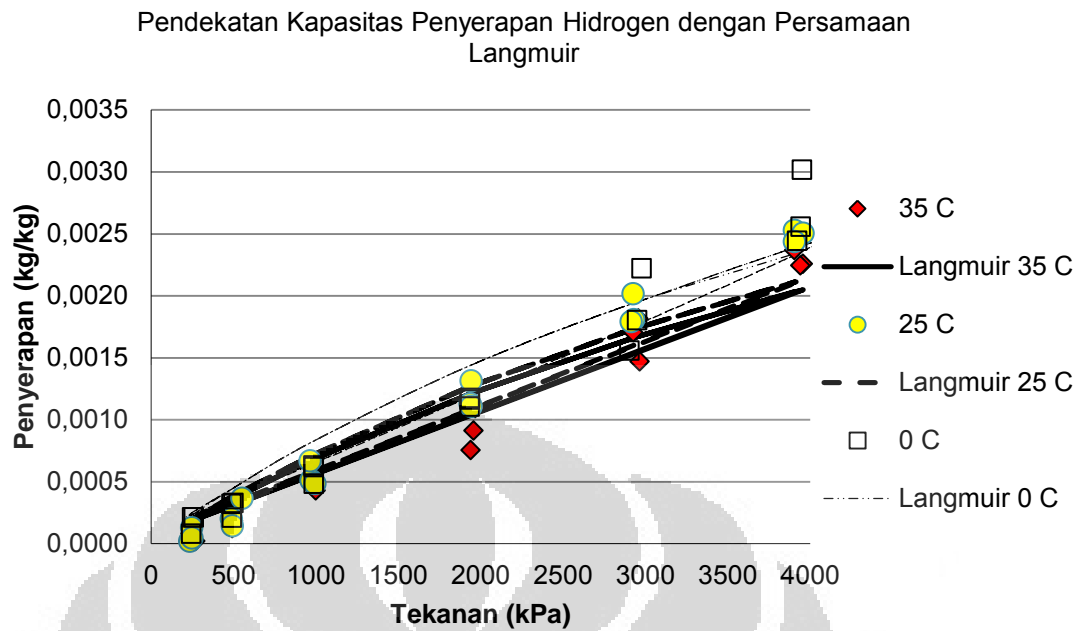
Gambar 4.17 Adsorpsi Isotermal Hidrogen pada Batu Bara Granular; Garis Tebal adalah Regresi dengan Persamaan Langmuir

Tabel 4.14 Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Langmuir Untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen

Parameter	Granular
C_{μ} (kg/kg)	0.006099
Q/R (K)	382.2336
k	1491.9432
α	7.006096
b	0.00003789
δ (%)	22.68

4.4.2 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 4.18 Adsorpsi Isotermal Hidrogen pada Batu Bara Granular; Garis Tebal adalah Regresi dengan Persamaan Toth

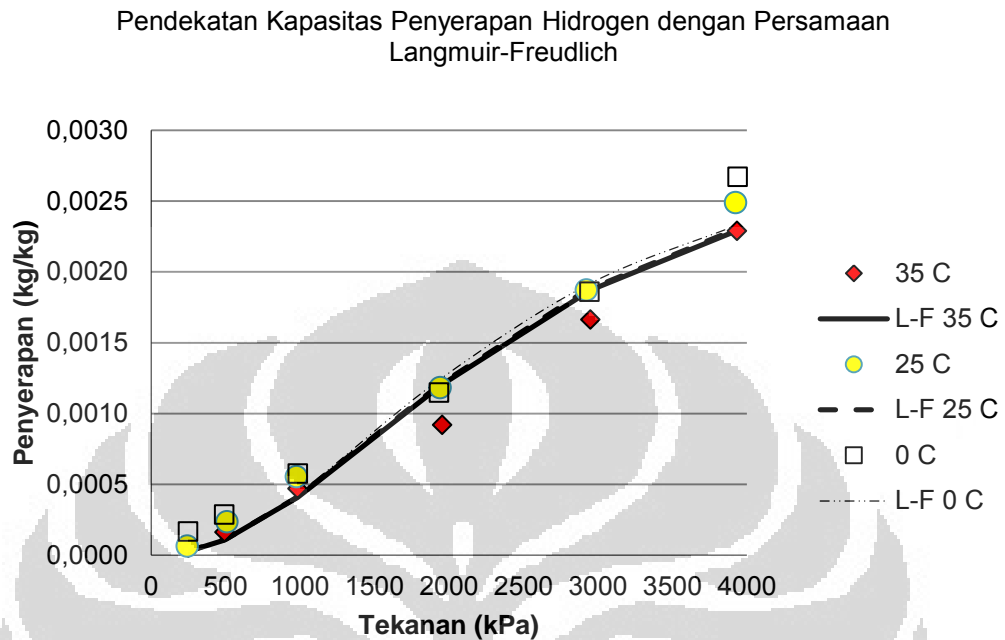
Tabel 4.15 Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Toth Untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen

Parameter	Granular
C_{μ} (kg/kg)	0.0045
Q/R (K)	317.7427
k	1950.7877
α	19.7709
b	7.99×10^{-5}
t	0.9567
δ (%)	22.67

4.4.3 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 4.19 Adsorpsi Isotermal H_2 pada Batu Bara Granular; Garis Tebal adalah Regresi dengan Persamaan Langmuir-Freundlich

Tabel 4.16 Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Langmuir-Freundlich Untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen

Parameter	Granular
C_{μ} (kg/kg)	0.003156
Q/R (K)	305.7081
k	0.0003199
t	0.480233
δ (%)	14.44

4.5 TEKANAN MAKSIMUM ADSORPSI HIDROGEN

Adsorpsi hidrogen cenderung membentuk garis linear seperti apa yang sudah diujikan. Penyerapan semakin meningkat seiring naiknya tekanan. Namun pada titik tekanan tertentu, uji adsorpsi menuju puncaknya.

Dari ketiga persamaan model yang sudah dijelaskan di atas, dapat dilihat persamaan model yang paling akurat. Persamaan yang paling baik adalah Persamaan model Langmuir-Freundlich. Dengan menggunakan solver Microsoft Excel, kita dapat mendapatkan parameter-parameter dari Persamaan Model Langmuir Freundlich. Setelah mendapat parameter yang diperlukan, kita bisa memasukkan parameter-parameter tersebut ke rumus persamaan Langmuir-Freundlich dan menggunakan software Microsoft Excel untuk mendapatkan tekanan maksimum dan dari software tersebut di dapat bahwa tekanan maksimum untuk adsorpsi Hidrogen adalah 100.000 kPa atau setara dengan 1000 bar.

Rumus Persamaan Model Langmuir-Freundlich:

$$C_{\mu} = C_{\mu s} \frac{(bP)^{1/n}}{1 + (bP)^{1/n}}$$

Lalu Parameter-parameter dimasukkan,

$$C_{\mu} = 0.003156 \times \frac{(0.000418766 \times 100000)^{1/0.480233}}{1 + (0.000418766 \times 100000)^{1/0.480233}}$$

$$C_{\mu} = 0.003155 \frac{gr}{gr}$$

Setelah memasukkan tekanan maksimum ke rumus Persamaan Model Langmuir Freundlich, dapat disimpulkan bahwa tekanan maksimum proses adsorpsi berada pada tekanan 100.000 kPa atau setara 1000 bar.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Kasimpulan yang dapat diambil dari percobaan ini adalah:

1. Semakin tinggi tekanan akan membuat kapasitas penyerapan semakin besar.
2. Semakin rendah temperatur akan membuat kapasitas penyerapan semakin besar.
3. 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.
4. 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 8.5315.

5.2 SARAN

1. Proses Adsorpsi Isotermal Hidrogen diharapkan dapat dilakukan pada tekanan yang lebih tinggi lagi, namun dengan faktor keamanan dan keselamatan yang lebih baik lagi.
2. Dalam proses degassing, pengkondisian pemanasan tabung Measuring Cell sering tidak sesuai. Saat degassing, heater sering memanaskan pada suhu lebih dari yang dianjurkan yang bisa merusak box tempat adsorpsi.
3. Variasi terhadap jenis batu bara agar bisa terlihat batu bara jenis apa yang lebih baik sebagai adsorben.

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 CO₂ 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., Takahashia, K., Matsuo, Y., Hattoria, Y., Kumagaia, M., Ishiyamab, S., Kanekoc, K., Iijimad, S. (2007). Investigation of hydrogen storage capacity of various carbon materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2504 – 2512