



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN ADSORBEN HYDROGEN STORAGE
UNTUK APLIKASI FUEL CELL DALAM BENTUK PADATAN
PARTIKEL NANO KARBON AKTIF DENGAN BAHAN
PENGIKAT LIKUIDA LIGNOSELULOSA**

TESIS

JAUHARI ALI

0906579254

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM MAGISTER**

DEPOK

JANUARI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN ADSORBEN HYDROGEN STORAGE
UNTUK APLIKASI FUEL CELL DALAM BENTUK PADATAN
PARTIKEL NANO KARBON AKTIF DENGAN BAHAN
PENGIKAT LIKUIDA LIGNOSELULOSA**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik

JAUHARI ALI

0906579254

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

KEKHUSUSAN KONVERSI ENERGI

DEPOK

JANUARI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

NAMA :JAUHARI ALI

NPM : 0906579254

Tanda Tangan :

A photograph of a handwritten signature in dark ink on a light-colored background. The signature is stylized and appears to read 'Jauhari Ali'.

Tanggal :16 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : JAUHARI ALI

NPM : 0906579254

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Tesis :

PENGEMBANGAN ADSORBEN HYDROGEN STORAGE UNTUK APLIKASI FUEL CELL DALAM BENTUK PADATAN PARTIKEL NANO KARBON AKTIF DENGAN BAHAN PENGIKAT LIKUIDA LIGNOSELULOSA

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

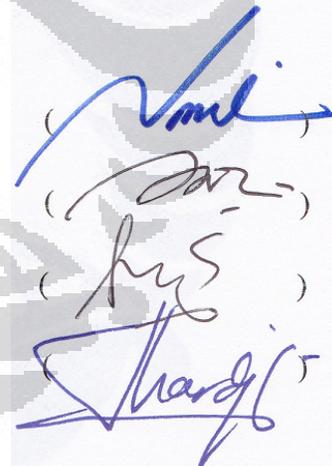
DEWAN PENGUJI

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

Pembimbing 2 : Dr. Ir. Awaludin Martin MT

Tim Penguji : Ir. Mahmud Sudibandriyo. MSc. PhD

: Dr. Ir. Sri Harjanto



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 16 Januari 2012

UCAPAN TERIMA KASIH

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

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

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

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

Akhirnya, penulis ingin sampaikan terima kasih yang tiada hingga kepada almarhum kedua orang-tuaku tercinta yang telah membesarkan, mendidik, dan membimbing penulis selama ini. Rasa terima kasih yang juga tiada hingga penulis

sampaikan pula kepada istri dan anakku tercinta untuk semua pengertian dan pemahamannya. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak selama ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan Tesis ini. Penulis berharap Allah swt berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu.

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

Depok, Januari 2012

Penulis



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

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

Nama : JAUHARI ALI

NPM : 0906579254

Program Studi : Teknik Mesin

Kekhususan : Konversi Energi

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Tesis

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

**PENGEMBANGAN ADSORBEN HYDROGEN STORAGE UNTUK
APLIKASI FUEL CELL DALAM BENTUK PADATAN PARTIKEL
NANO KARBON AKTIF DENGAN BAHAN PENGIKAT LIKUIDA
LIGNOSELULOSA**

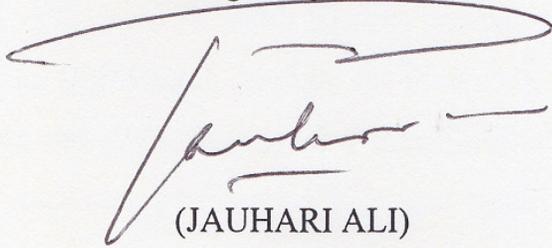
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal : 16 Januari 2012

Yang menyatakan


(JAUHARI ALI)

ABSTRAK

Nama : Jauhari Ali
Program Studi : Teknik Mesin
Judul :

**PENGEMBANGAN ADSORBEN HYDROGEN STORAGE UNTUK
APLIKASI FUEL CELL DALAM BENTUK PADATAN PARTIKEL
NANO KARBON AKTIF DENGAN BAHAN PENGIKAT LIKUIDA
LIGNOSELULOSA**

Salah satu alternatif penyimpanan hidrogen adalah dengan metode adsorpsi menggunakan karbon aktif, karena memiliki kemampuan adsorpsi yang yang besar berkaitan dengan luas permukaan dan ukuran porinya. Untuk meningkatkan daya adsorpsi dari adsorben dapat dilakukan dengan menjadikan sebanyak mungkin porinya yang termasuk kategori micropori sehingga sesuai dengan ukuran molekul hidrogen sebagai adsorbate. Dengan semakin besarnya prosentase mikropori yang dimiliki dibandingkan makropori dan mesoporinya, maka kemampuan adsorpsi dari adsorben tersebut diharapkan akan meningkat. Cara yang dilakukan untuk itu adalah dengan membuatnya menjadi partikel berukuran nano melalui proses ball-milling dan selanjutnya dibentuk menjadi padatan (pellet) melalui penekanan mekanis dengan penambahan likuida lignoselulosa sebagai pengikat.

Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa pencampuran antara likuida lignoselulosa dan serbuk patikel nano untuk membentuk pellet karbon aktif sangat cocok digunakan dalam perbandingan 3:4, karena setelah dilakukan proses reaktivasi dengantiga variasi waktu yaitu 1 jam, 3 jam dan 6 jam, bentuk pellet karbon aktif tetap stabil.

Kemampuan adsorpsi hidrogen terhadap karbon aktif berbentuk pellet tersebut diketahui melalui pengujian menggunakan metode volumetrik dengan variasi temperatur isothermal -5°C dan 35°C serta tekanan sampai dengan 4 Mpa masing-masing terhadap karbon aktif bentuk granular (as received), pellet reaktivasi 1jam, pellet reaktivasi 3 jam dan pellet reaktivasi 6 jam. Data adsorpsi isothermal yang didapat adalah data kapasitas penyerapan hidrogen pada setiap bentuk karbon

aktif dan pada setiap variasi tekanan dan temperatur isothermal, kemudian diplot dalam grafik hubungan tekanan dan kapasitas penyerapan.

Dari hasil penelitian didapat bahwa kapasitas penyerapan (adsorpsi) karbon aktif berbentuk pellet lebih baik dibandingkan karbon aktif bentuk granular, hal tersebut dikarenakan setelah dilakukan reaktivasi terjadi peningkatan kandungan unsur karbon (C) dan pengurangan unsur-unsur pengotor dalam karbon aktif bentuk pellet. Kapasitas adsorpsi hidrogen maksimum terjadi pada karbon aktif pellet dengan reaktivasi 3 jam yaitu 0.0027261kg/kg pada temperatur -5°C dan tekanan 3899.54kPa, sedangkan untuk karbon aktif pellet reaktivasi 6 jam adalah 0.0020384kg/kg pada temperatur -5°C dan tekanan 3897.501 kPa. Untuk karbon aktif pellet reaktivasi 1 jam adalah 0.0016873kg/kg pada temperatur -5°C dan tekanan 3854.83kPa dan untuk karbon aktif granular (as received) adalah 0.0014779kg/kg karbon aktif pada temperatur -5°C dan tekanan 3869.19kPa.

ABSTRACT

Name : Jauhari Ali
Department : Mechanical Engineering
Topic :

DEVELOPMENT OF HYDROGEN STORAGE ADSORBENT FOR FUEL CELL APPLICATION IN THE FORM OF SOLIDACTIVATED CARBON NANO PARTICLE WITH LIGNOSELULOSE LIQUID AS A BINDER

One alternative of hydrogen storage by adsorption method is using activated carbon, because it has a large adsorption capacity associated with a surface area and size of pores. To enhance the adsorption of the adsorbent can be done by making as many pores which include categories micropori to fit the size of the hydrogen molecule as an adsorbate. With a growing percentage of micropore compared with its macropori and mesopori, then the adsorption capacity of adsorbent is expected to increase. How that is done to it is by making nano-sized particles through ball-milling process and then formed into solids (pellets) through the mechanical suppression by the addition of lignocellulose as a binder liquid. From the results of this study found that the mixing between the liquid and powder lignocellulose nano particle to form pellets of activated carbon is suitable for use in a 3:4 ratio, because after the reactivation process with three variations of the time is 1 hour, 3 hours and 6 hours, the form of activated carbon pellets remained stable.

The ability of hydrogen adsorption on activated carbon pellet form is known through testing using the volumetric method with a variation of isothermal temperature -5°C and 35°C and pressures up to 4 MPa respectively to granular activated carbon (as received), pellets reactivation 1 hour, pellets reactivation 3 hours and pellets reactivation 6 hours. Adsorption isotherms data obtained is the data capacity of hydrogen absorption on any form of activated carbon and on any variation of pressure and isotherms temperature, then plotted in the graph the relationship of pressure and absorption capacity.

From the research results obtained that the absorption capacity (adsorption) activated carbon pellets better than the granular activated carbon, it is because after the reactivation there is increasing of the content of carbon (C) element and reduction of the impurities elements in the pellets activated carbon. Maximum capacity of hydrogen adsorption on activated carbon pellets occur with reactivation of 3 hours is $0.0027261\text{kg} / \text{kg}$ at a temperature -5°C and the pressure is 3899.54kPa , while for the reactivation of activated carbon pellets 6 hours is $0.0020384\text{kg} / \text{kg}$ at a temperature -5°C and the pressure is $3897,501\text{ kPa}$. For reactivation of activated carbon pellets for 1 hour is $0.0016873\text{kg} / \text{kg}$ at a temperature -5°C and the pressure is $3854,83\text{ kPa}$ and for granular activated carbon (as received) is $0.0014779\text{kg} / \text{kg}$ of activated carbon at a temperature of -5°C and the pressure is $3869,19\text{ kPa}$.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
UCAPAN TERIMA KASIH	iii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR NOTASI	xv
BAB 1PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB 2LANDASAN TEORI	7
2.1 Hidrogen Sebagai Sel Bahan Bakar5	7
2.2 Hidrogen	10
2.2.1 Hydrogen properties.....	10
2.2.2 Hydrogen Storage	12
2.2.3 Adsorption Hydrogen Storage	14
2.3 Mekanisme Adsorpsi Hidrogen pada Karbon aktif.....	16
2.4 Adsorpsi Equilibrium	19
2.4.1. Adsorpsi Isotermal.....	19
2.4.2. Adsorpsi Isobar	20
2.4.3. Adsorpsi Isosterik	20
2.5 Persamaan Adsorpsi Isotermal	21
2.5.1 Persamaan Isotermal Langmuir	22
2.5.2 Persamaan Isotermal Toth	22
2.5.3 Persamaan Isotermal Langmuir-Freundlich	23
2.6 Metode Pengujian Adsorpsi	23
2.6.1 Metode Gravimetrik	24
2.6.2 Metode Volumetrik	25
2.7 Adsorben	27
2.7.1. Karbon Aktif	28
2.7.2. Proses Pembuatan Karbon Aktif	30
2.8 Pembuatan Likuida Lignoselulosa	31
2.9 Pembuatan Padatan Partikel Nano Karbon Aktif	32

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 Produksi Padatan Partikel Nano Karbon Aktif	34
3.2 Reaktivasi Padatan Partikel Nano Karbon Aktif	48
3.3 Pengujian Adsorpsi Volumetrik	48
3.4 Pengukuran Volume Charging Cell dan Volume Kosong Measuring Cell	40
3.4.1 Pengukuran Volume Charging Cell	41
3.4.2 Pengukuran Volume Kosong Measuring Cell	42
3.4.3 Persiapan Penelitian	43
3.5 Prosedur Penelitian	44
3.6 Error analisis pada adsorpsi isothermal	45
3.6.1 Error pada Volume Charging Cell (Vcc) dan Volume Kosong pada Measuring Cell (Vvv)	45
3.6.2 Error pada Pengukuran Temperatur	46
3.6.3 Error pada Pengukuran Tekanan	46
3.6.4 Error pada Pengukuran Massa Sampel	46
3.7 Perhitungan Massa Adsorbat yang Terserap	46
3.8 Pengujian Propertis Padatan Partikel Nano Karbon Aktif.....	48
3.8.1 Pengukuran Luas Permukaan Partikel Dengan Uji Brunner Emmet Teller (BET).....	48
3.8.2 Iodine Number	48
3.8.3 Karakteristik struktur Permukaan dengan Scanning Electron Microscopy (SEM)	49
3.8.4 Uji Energy Dispersive X-ray Analysis	49
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	50
4.1 Propertis Karbon Aktif	50
4.1.1 Luas Permukaan	50
4.1.2 Iodine Number	50
4.1.3 Komposisi Penyusun Padatan Karbon Aktif	52
4.2 Kapasitas Adsorpsi Hidrogen pada karbon aktif	54
4.3 Korelasi Adsorpsi Isotermal	60
4.3.1 Persamaan Model Langmuir	60
4.3.2 Persamaan Model Toth	63
4.3.3 Persamaan Model Langmuir-Freundlich	66
4.4 Analisa Morfologi Permukaan dengan SEM	69
BAB 5 KESIMPULAN	72
DAFTAR PUSTAKA.....	73
LAMPIRAN	76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bagan Kinerja Hydrogen Fuel Cell	9
Gambar 2.2	Diagram Phase Hydrogen	11
Gambar 2.3	Densitas Hydrogen terhadap temperatur dan tekanan	12
Gambar 2.4	Rasio Ekspansi Hydrogen dalam fase cair dan gas	14
Gambar 2.5	Komparasi Asorption storage dan Compression Storage	15
Gambar 2.6	Hubungan luas permukaan dan kapasitas penyerapan Hidrogen pada 4 mpa	15
Gambar 2.7	Potongan Melintang Material karbon Aktif	18
Gambar 2.8	Proses Adsorpsi Pada Karbon Aktif	18
Gambar 2.9	Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isotermal	20
Gambar 2.10	Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isobar	20
Gambar 2.11	Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isostere	21
Gambar 2.12	Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan Two Beam Balance	24
Gambar 2.13	Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan Magnetic Suspension	25
Gambar 2.14	Skema Metode Volumetrik	26
Gambar 2.15	Porositas pada karbon	29
Gambar 3.1	Diagram alir Penelitian	33
Gambar 3.2	Alat Planetary Ball Milling	34
Gambar 3.3	Pencampuran Likuida Lignoselulosa dengan Serbuk Nano Karbon Aktif secara Langsung	36
Gambar 3.4	Pencampuran Pengenceran Likuida Lignoselulosa dengan Serbuk Nano Karbon Aktif	37
Gambar 3.5	Alat Cetak	37
Gambar 3.6	Pellet sebagai Produk Kompaksi Karbon Aktif	38
Gambar 3.7	Skema Alat Uji Adsorpsi Isotermal	40
Gambar 3.8	Skema Proses Pengukuran Volume <i>Charging Cell</i>	41
Gambar 3.9	Skema Proses Pengukuran Volume Kosong <i>Measuring Cell</i>	42

Gambar 3.10 Skema Keseimbangan Massa pada Proses Penyerapan	48
Gambar 4.1 Perbandingan Iodine Number dari Karbon Aktif Berbagai Keadaan	51
Gambar 4.2 Perbandingan Unsur Penyusun Karbon Aktif dalam Berbagai Keadaan	53
Gambar 4.3 Adsorpsi Isotermal Rata-rata Hidrogen pada Karbon Aktif Granular ■ Temperatur 35°C ♦ Temperatur -5°C	54
Gambar 4.4 Adsorpsi Isotermal Rata-rata Hidrogen pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 1 Jam ■ Temperatur 35°C ♦ Temperatur -5°C	55
Gambar 4.5 Adsorpsi Isotermal Rata-rata Hidrogen pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 3 Jam ■ Temperatur 35°C ♦ Temperatur -5°C	56
Gambar 4.6 Adsorpsi Isotermal Rata-rata Hidrogen pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 6 jam ■ Temperatur 35°C ♦ Temperatur -5°C	56
Gambar 4.7 Komparasi Adsorpsi Isotermal rata-rata Hidrogen pada Temperatur -5°C x Pellet Reaktivasi 3 jam ♦ Pellet reaktivasi 1 jam ▲ Granular ■ Pellet reaktivasi 6 jam	58
Gambar 4.8 Komparasi Adsorpsi Isotermal rata-rata Hidrogen pada Temperatur 35°C x Pellet Reaktivasi 3 jam ♦ Pellet reaktivasi 1 jam ▲ Granular ■ Pellet reaktivasi 6 jam	58
Gambar 4.9 Komparasi Adsorpsi Isotermal terhadap Sampel Karbon Aktif	60
Gambar 4.10 Adsorpsi Isotermal H ₂ pada Karbon Aktif Granular; ♦ 35°C; □ -5°C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan Persamaan Langmuir	61
Gambar 4.11 Adsorpsi Isotermal H ₂ pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 1 jam; ♦ 35°C; □ -5°C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan Persamaan Langmuir	61
Gambar 4.12 Adsorpsi Isotermal H ₂ pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 3 jam; ♦ 35°C; □ -5°C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan Persamaan Langmuir	62
Gambar 4.13 Adsorpsi Isotermal H ₂ pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 6 jam; ♦ 35°C; □ -5°C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan Persamaan Langmuir	62
Gambar 4.14 Adsorpsi Isotermal H ₂ pada Karbon Aktif Granular; ♦ 35°C; □ -5°C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan Persamaan Toth	64

Gambar 4.15 Adsorpsi Isotermal H ₂ pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 1 jam; ♦ 35°C; □ -5° C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan Persamaan Toth	64
Gambar 4.16 Adsorpsi Isotermal H ₂ pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 3 jam; ♦ 35°C; □ -5° C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan Persamaan Toth	65
Gambar 4.17 Adsorpsi Isotermal H ₂ pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 6 jam; ♦ 35°C; □ -5° C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan Persamaan Toth	
Gambar 4.18 Adsorpsi Isotermal H ₂ pada Karbon Aktif Granular; ♦ 35°C; ■ -5° C; Garis Tebal adalah Regresi dengan Persamaan Langmuir-Freundlich	65
Gambar 4.19 Adsorpsi Isotermal H ₂ pada Karbon Aktif Reaktivasi 1 jam; ♦ 35°C; ■ -5° C; Garis Tebal adalah Regresi dengan Persamaan Langmuir-Freundlich	67
Gambar 4.20 Adsorpsi Isotermal H ₂ pada Karbon Aktif Reaktivasi 3 jam; ♦ 35°C; ■ -5° C; Garis Tebal adalah Regresi dengan Persamaan Langmuir-Freundlich	67
Gambar 4.21 Adsorpsi Isotermal H ₂ pada Karbon Aktif Reaktivasi 6 jam; ♦ 35°C; ■ -5° C; Garis Tebal adalah Regresi dengan Persamaan Langmuir-Freundlich	68
Gambar 4.22 Hasil SEM terhadap Pellet dengan Reaktifasi 1 jam	68
Gambar 4.23 Hasil SEM terhadap Pellet dengan Reaktifasi 3 jam	
Gambar 4.24 Hasil SEM terhadap Pellet dengan Reaktifasi 6 jam	69
	70
	70

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Volume Kosong pada <i>Measuring cell</i> (V_{vv})	46
Tabel 4.1	Luas Permukaan Sampel Karbon Aktif	50
Tabel 4.2	Iodine Number dari Karbon Aktif Batubara	51
Table 4.3	Unsur Dalam Sampel Karbon Aktif	52
Tabel 4.4	Adsorpsi Isotermal Rata-Rata untuk Setiap Sampel Karbon Aktif.	59
Tabel 4.5	Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Langmuir Untuk Adsorpsi Isotermal H_2	63
Tabel 4.6	Besaran yang Digunakan pada Persamaan Model Toth Untuk Adsorpsi Isotermal H_2	66
Tabel 4.7	Besaran yang Digunakan pada Persamaan Model Langmuir-Freundlich untuk Adsorpsi Isotermal H_2	69

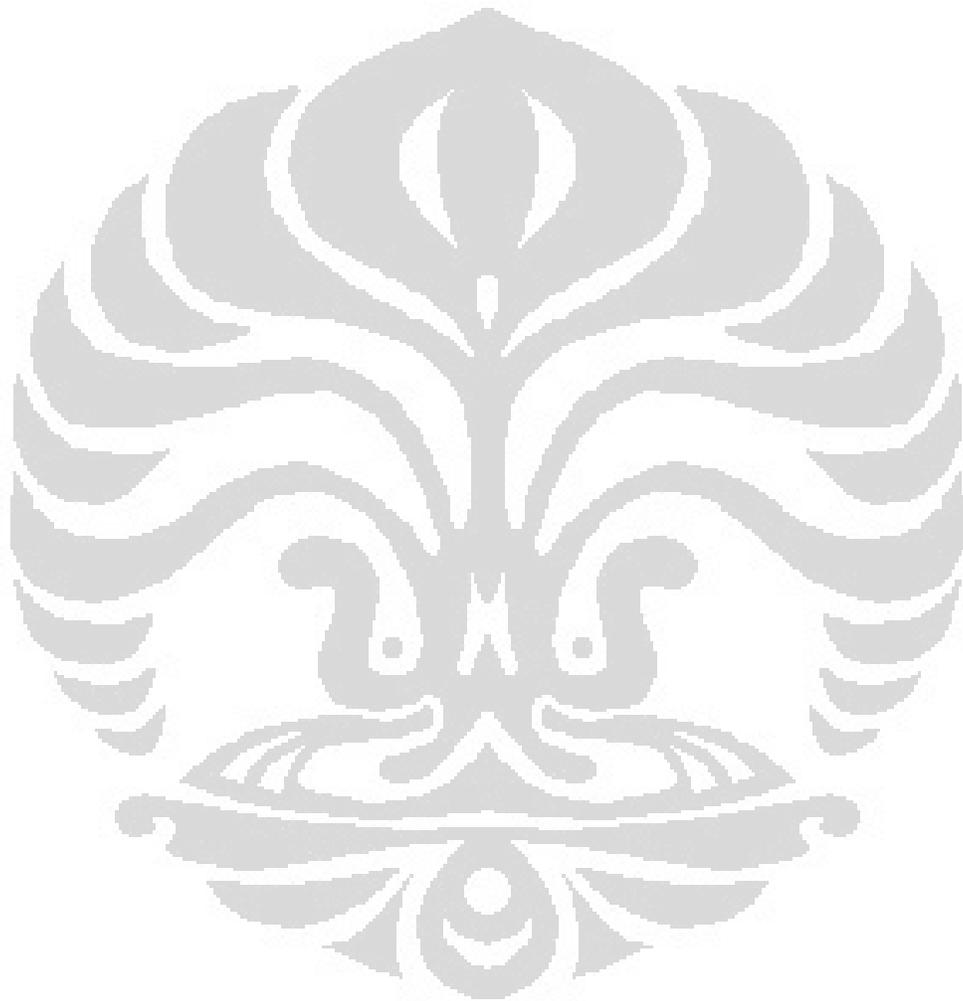
DAFTAR NOTASI

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

R_s	Laju pergerakan molekul yang menuju permukaan
SEM	<i>Scanning Electron Micrograph</i>
t	Parameter karakteristik heterogenitas permukaan adsorben
T	Temperatur equilibrium [°C]
T_c	Temperatur kritis [°C]
TMA	<i>Thermograph Microbalance Aparatus</i>
W	Jumlah adsorbat yang diserap [kg/kg adsorben]
W_o	Kapasitas penyerapan maksimum adsorben [kg/kg adsorben]
x/m	Jumlah adsorbat yang terserap per unit massa adsorben pada tekanan equilibrium dan pada temperatur adsorpsi [kg/kg adsorben]
Z	Faktor kompresibilitas
$-\Delta H$	Perbedaan panas adsorpsi [kJ/kg adsorben]
Δx	Perbedaan jumlah masa adsorbat yang terserap adsorben
$dm_{d,mc}$	Massa adsorbat di <i>measuring cell</i> [kg]
$ m_{cc} $	Massa adsorbat di <i>charging cell</i> [kg]
m_{ads}	Massa adsorbat yang diserap oleh adsorben [kg]
m_{air}	Massa air [kg]
m_{PV+air}	Massa <i>charging cell</i> yang berisi air [kg]
m_{PV}	Massa <i>charging cell</i> kosong [kg]
V_{PV}	Volume <i>charging cell</i> [m ³]
$V_{kosong} =$	Volume <i>measuring cell</i> yang berisi adsorben [m ³]
V_{void}	
V_{MC}	Volume <i>measuring cell</i> kosong [m ³]

Huruf Yunani

$\rho_{air(T,P)}$	Massa jenis air pada tekanan dan temperatur saat pengukuran
π	3,14
θ	Bagian permukaan yang tertutupi oleh adsorbat
α	Koefisien perekatan
τ_a	Rata-rata waktu tunggu adsorpsi
ρ_{cc}	Massa jenis adsorbat pada tekanan dan temperatur di <i>charging cell</i> [kg/m ³]
τ_{doo}	Rata-rata waktu tunggu desorpsi
ρ_{mc}	Massa jenis adsorbat pada tekanan dan temperatur di <i>measuring cell</i> [kg/m ³]
δ	Deviasi [%]



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

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

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

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

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

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

Walaupun memiliki banyak keunggulan, penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar juga memiliki kekurangan yaitu dalam hal penyimpanannya. Hidrogen dalam suhu kamar dan tekanan atmosfer berbentuk fase gas sehingga memiliki rasio energi yang sangat rendah terhadap volumenya jika disimpan dalam bentuk gas. Penelitian berkaitan dengan metode dan material untuk menyimpan Hidrogen terus dilakukan, dengan hasil sejauh ini adalah kesimpulan bahwa penyimpanan hidrogen memakai prinsip adsorpsi dengan karbon aktif berbentuk granular sebagai adsorben sangat menjanjikan karena bisa menurunkan tekanan dalam tangki dengan kapasitas penyimpanan yang relatif sama (Awasthia, K., 2002)

Setelah penelitian daya adsorpsi hidrogen pada karbon aktif dalam bentuk granular mulai mapan, maka penelitian mulai mengarahkan pada usaha meningkatkan daya adsorpsi dari karbon aktif yang salah satunya dapat dilakukan dengan menjadikan partikelnya berukuran nano (Shindoa, K., 2007) sehingga akan lebih banyak memiliki mikropori yang akan meningkatkan kemampuan adsorpsinya. Dalam bentuk nano partikel kemampuan adsorpsi hidrogen oleh karbon aktif akan meningkat dibandingkan bentuk karbon aktif granular tapi bulk densitasnya masih rendah. Menjadikan partikel nano karbon aktif menjadi bentuk padatan dengan penekanan mekanis dan penambahan likuida lignoselulosa sebagai pengikat akan lebih meningkatkan lagi

kemampuan adsorpsi hidrogen oleh karbon aktif karena bulk densitasnya akan meningkat (Inomata, K., 2002)

1.2. PERUMUSAN MASALAH

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

Karena hidrogen adalah berupa gas pada temperatur dan tekanan atmosferik 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 micropore yang sesuai dengan ukuran molekul hidrogen yang menjadi adsorbate. Dengan semakin besarnya prosentase mikropori yang dihasilkan dibandingkan makropori dan mesoporinya, maka kemampuan adsorpsi dari adsorben tersebut diharapkan akan meningkat. Salah satu cara untuk itu adalah dengan membuatnya menjadi partikel berukuran nano melalui ball-milling proses. Menjadikan karbon aktif sebagai adsorben dalam bentuk nano menimbulkan kesulitan dalam melakukan proses degassingnya (pembersihan), sehingga perlu dilakukan proses pemadatan (kompaksi) menggunakan alat penekan hidrolis. Untuk itu diperlukan zat pengikat berupa likuida Lignoselulosa yang diharapkan tidak akan menutupi mikropori yang terbentuk ketika dilakukan proses aktivasi, karena zat pengikat ini berbahan dasar karbon.

1.3. TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk membuat padatan karbon aktif yang tersusun dari partikel berukuran nano hasil dari proses ball-milling batubara Indonesia kelas rendah dengan penambahan lignoselulosa sebagai bahan pengikat untuk digunakan sebagai adsorben pada hydrogen storage. Sehingga memiliki rasio berat terhadap volume (bulk densitas) yang lebih tinggi dibandingkan dengan partikel nano karbon aktif berbentuk serbuk. Dengan memiliki bulk densitas yang lebih tinggi maka kapasitas penyimpanan dari hydrogen storage akan lebih banyak. Dari pengujian kemampuan adsorpsi hidrogen dengan memvariasikan parameter komposisi zat pengikat akan didapat kesimpulan tentang parameter komposisi yang paling tepat untuk menghasilkan padatan nano karbon aktif dengan kemampuan adsorpsi paling besar.

Tujuan rinci dari penelitian ini adalah:

- Membuat karbon aktif berbentuk padatan (pellet) yang diharapkan memiliki luas permukaan lebih besar dibandingkan karbon aktif granular dengan menjadikannya berukuran nano dan dikompaksi dengan pengikat likuida lignoselulosa.
- Mendapatkan data komposisi perbandingan antara karbon aktif dan zat pengikatnya.
- Melakukan pengujian adsorpsi isothermal gas hidrogen pada padatan partikel nano karbon aktif untuk tekanan hingga 4 MPa dengan temperatur 35°C dan -5°C , sehingga didapat data kapasitas penyerapannya, dibandingkan penyerapan karbon aktif dalam bentuk granular.

1.4. BATASAN MASALAH

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah menghasilkan padatan adsorben karbon aktif yang berasal dari batubara Indonesia kelas rendah yang tersusun dari partikel nano dengan lignoselulosa sebagai zat pengikat dengan melalui proses penekanan mekanis untuk memperbaiki densitas energi terhadap volume

hydrogen storage . Adapun permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini diuraikan dengan beberapa pertanyaan penuntun berikut:

1. Bagaimana komposisi optimal antara partikel nano karbon aktif dan lignoselulosa yang dibutuhkan untuk menghasilkan padatan partikel nano karbon aktif dengan kapasitas adsorpsi yang baik ?
2. Bagaimana kapasitas adsorpsi dari padatan partikel karbon aktif yang dihasilkan dibandingkan dengan kapasitas adsorpsinya dalam bentuk granular?

1.5. SISTEMATIKA PENULISAN

Tulisan ini terdiri atas 5 bab, daftar pustaka dan lampiran. Adapun ketiga bab tersebut adalah sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan, terdiri atas latar belakang, tujuan penelitian, perumusan masalah, batasan masalah dan sistematika penulisan.

Bab 2 Landasan Teori, terdiri atas teori-teori dasar yang mendasari penelitian ini. Teori dasar ini meliputi teori dasar karbon aktif dan teori dasar proses adsorpsi dan metode pengujiannya.

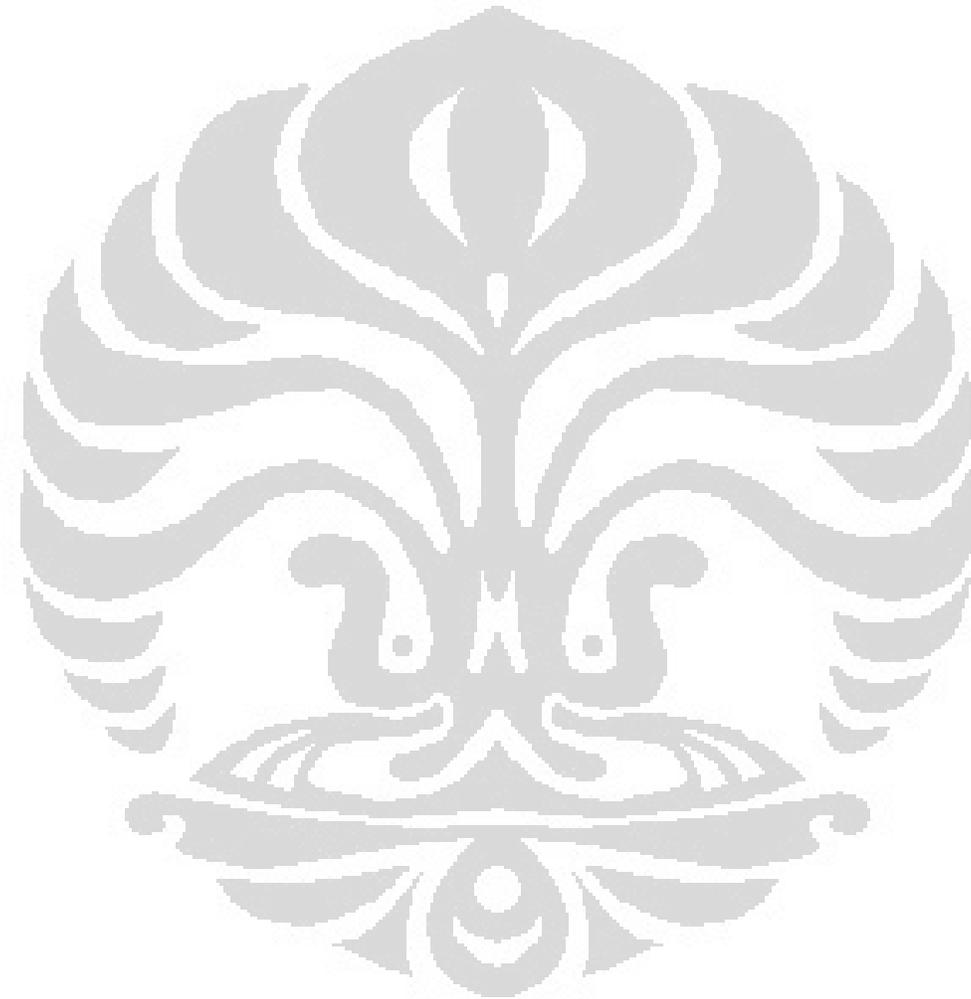
Bab 3 Metodologi Penelitian, terdiri atas metode penelitian yang dilakukan terhadap padatan partikel nano karbon aktif yang direaktifasi dengan metode fisika menggunakan nitrogen sebagai activating agent dan absorpsi isothermal gas hidrogen pada padatan karbon aktif tersebut dengan menggunakan metode volumetrik.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan. Berisi data dan analisis data yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan. Data karbon aktif yang didapat dari hasil penelitian berupa komposisi material penyusun padatan karbon aktif dan angka iodine.

Data adsorpsi isothermal adalah data kapasitas penyerapan gas hidrogen oleh karbon aktif granular, pellet reaktivasi 1 jam, pellet reaktivasi 3 jam dan pellet reaktivasi 6 jam masing-masing pada temperatur 35°C dan -5°C dengan tekanan sampai dengan 4 Mpa.

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

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



BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 HIDROGEN SEBAGAI SEL BAHAN BAKAR

Laju pertumbuhan penggunaan hidrogen di dunia saat ini adalah 10% per tahun dan terus meningkat. Untuk tahun 2004, produksi hidrogen dunia mencapai 50 juta metrik ton (million metric tons-MMT) atau setara dengan 170 juta ton minyak bumi. Diharapkan pada tahun 2010 sampai 2020, laju penggunaan hidrogen bisa menjadi dua kali lipat dari laju penggunaan saat ini. Industri di USA sendiri telah menghasilkan 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). Diperlukan metode baru untuk menghasilkan hidrogen tanpa melepaskan CO₂ ke atmosfer. Hidrogen bukanlah sumber energi (energy source) melainkan pembawa energi (energy carrier), 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 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. 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, lebih baik daripada mesin pembakaran, untuk memproduksi energi listrik. 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. Efisiensi konversi energi dapat dicapai hingga 60-80%. Keuntungan lain *fuel cell* adalah 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* yaitu, efisiensi tinggi dapat mencapai 80%, tidak bising dan gas buang yang bersih bagi lingkungan.

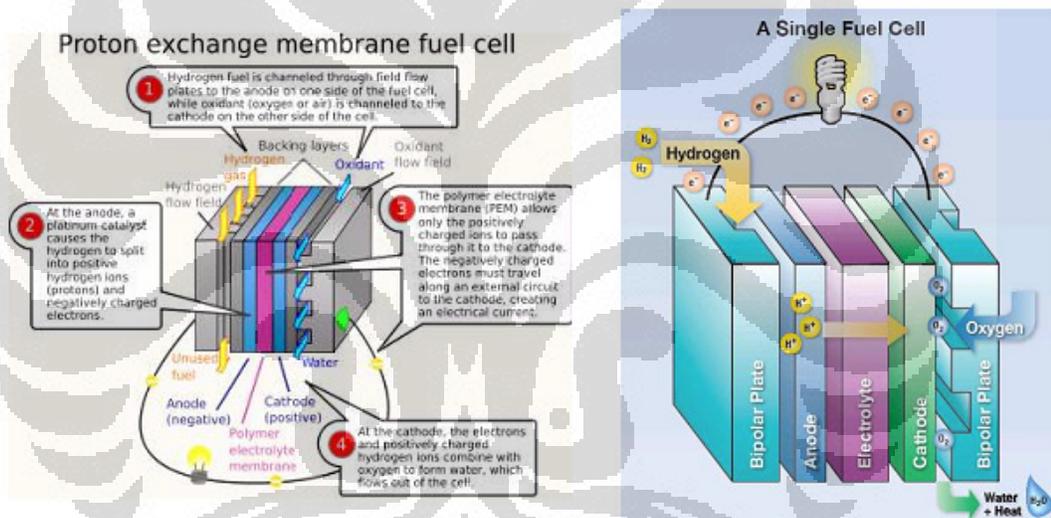
Kendala yang masih membatasi penggunaan *fuel cell* adalah :

1. Apabila digunakan bahan bakar hidrogen, maka dibutuhkan tanki pengaman yang berdinding tebal dan memiliki katup pengaman. Selain itu diperlukan kompresor untuk memasukan ke dalam tanki.
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°-120°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 2.2 di atas :

- Hidrogen (yang ditampung dalam sebuah tabung khusus) dialirkan melewati anoda, dan oksigen/udara dialirkan pada katoda
- Pada anoda dengan bantuan katalis platina Pt hidrogen dipecah menjadi bermuatan positif (ion/proton), dan negatif (elektron)
- Membran di tengah-tengah anoda-katoda kemudian hanya berfungsi mengalirkan proton menyebrang ke katoda
- Proton yang tiba di katoda bereaksi dengan udara dan menghasilkan air

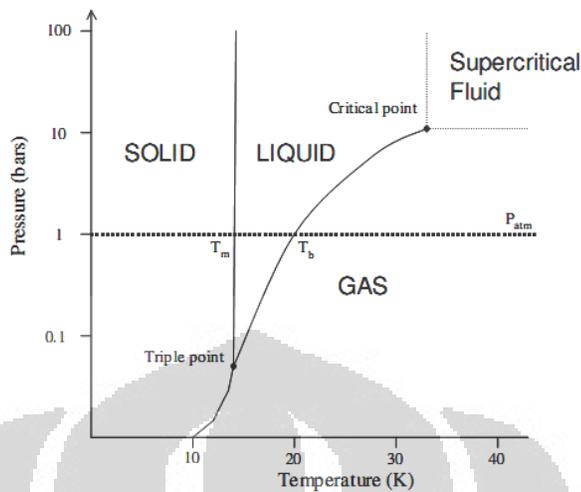
e) Tumpukan elektron di anoda akan menjadi energi listrik searah yang dapat menyalakan lampu.

2.2 HIDROGEN

Hidrogen ditemukan pada 1766 oleh Henry Cavendish dan dinamai oleh Lavoisier dari kata Yunani *hydro* yang berarti air dan *genes* yang berarti generator. Ini adalah elemen pertama dari tabel periodik dan unsur yang paling melimpah di alam semesta. Hidrogen merupakan 90 persen dari unsur alam semesta menurut beratnya. Namun, tidak umum ditemukan dalam bentuknya yang murni, karena mudah bergabung dengan unsur-unsur lainnya. Hidrogen tidak berasa, tidak berwarna, tidak berbau, dan non-gas beracun dalam kondisi normal di bumi. 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 *Hydrogen properties*

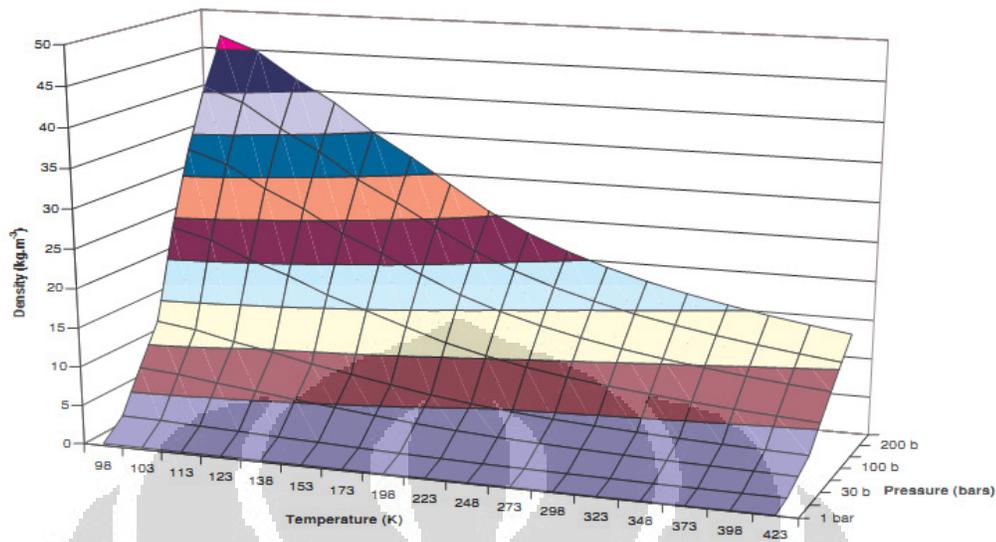
Hidrogen ini paling sering dilihat sebagai gas atau cairan, dan pada kondisi kamar itu adalah gas. Hidrogen memiliki nomor atom 1, berat molekul 2,016 g.mol⁻¹ dan dimensi molekul yang bervariasi 3,1-2,4 Angstrom. Molekul hidrogen pada kondisi atmosfer adalah campuran dari 75% dari orto-hidrogen dan 25% 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 bawah ini, dengan titik triple di -259,1° C dan 0,07 bar dan titik kritis pada -239,8° C dan 13.3 bar. 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 $0,09 \text{ kg.m}^{-3}$, sebagai cairan (pada -253° C) $70,8 \text{ kg.m}^{-3}$ dan sebagai padat (pada -262° C) $70,6 \text{ kg.m}^{-3}$. Titik kritis untuk hidrogen pada tekanan 13 bar dan suhu sekitar -240° C , yang berarti bahwa pada setiap suhu di atas -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 yang lebih rendah tekanan yang dibutuhkan untuk hidrogen menjadi cair.

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



Gambar 2.3 Densitas Hidrogen terhadap Temperatur dan Tekanan

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

2.2.2 Hydrogen Storage

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

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

1. Tangki bertekanan tinggi

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

2. Tangki hidrogen cair (Cryogenic)

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

3. Logam dan alloy

Logam atau paduan logam (alloy) menyerupai sponge yang dapat menyerap hidrogen. Hidrogen akan terabsorpsi pada ruang interstitial pada kisi kristal logam sehingga hidrogen tidak mudah terbakar dan lebih aman. Contohnya: TiFe (1,5 wt%) dan Mg_2NiH_4 (3,3 wt%).

4. Kimiawi

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

a. Metanol

Infrastruktur untuk distribusi metanol sangat mudah karena sama dengan gasolin. Pada saat digunakan, metanol akan diubah menjadi gas H_2 dengan melepaskan gas CO dan CO_2 .

b. Ammonia

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

c. Hidrida logam

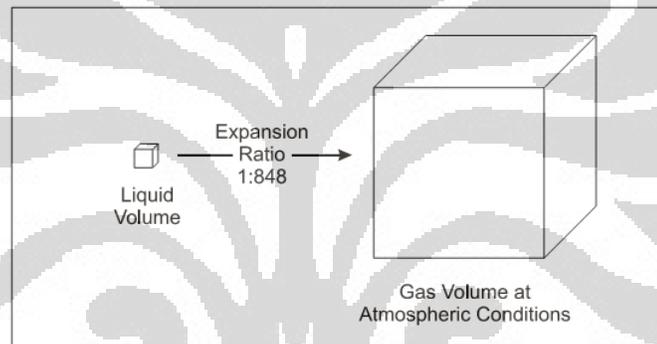
Merupakan senyawa reaktif yang akan segera melepaskan hidrogen apabila bereaksi dengan air. Contohnya adalah NaH, LiH, $NaAlH_4$, $NaBH_4$, $LiBH_4$, dan CaH_2

5. Adsorpsi Storage

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

2.2.3 Adsorption Hydrogen Storage

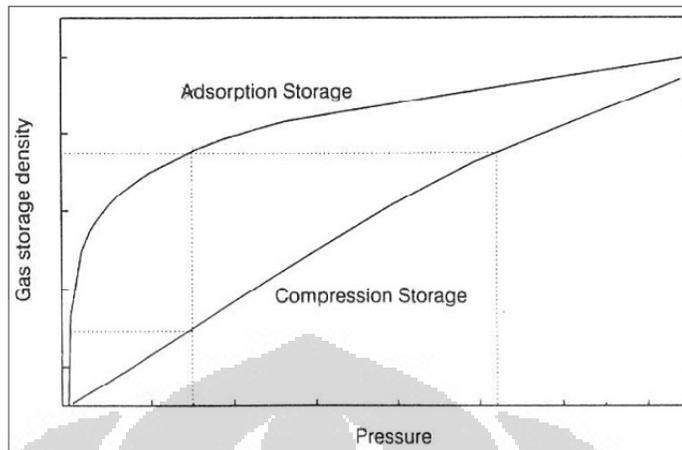
Teknologi penyimpanan memiliki posisi paling strategis dalam isu aplikasi Hidrogen sebagai sumber energi karena hidrogen memiliki karakteristik fisik yang membuatnya sulit untuk disimpan dalam jumlah besar tanpa menyita sejumlah besar ruang.



Gambar 2.4 Rasio Ekspansi Hidrogen dalam Fase Cair dan Gas

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

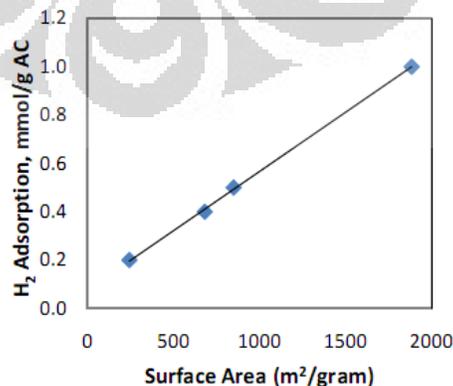
Karena hidrogen adalah berupa gas dalam temperatur dan tekanan atmosfer, maka kemungkinan untuk disimpan dengan menggunakan metode adsorpsi semisal karbon aktif menjadi sangat menarik. Material karbon aktif dapat dengan mudah untuk mengikat dan melepas *hydrogen* melalui mekanisme adsorpsi dan desorpsi. 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

(Mahmud sudibandriyo 2001)

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

- a. Jumlah mikropori yang besar, karena mikropor merupakan komponen yang banyak menyerap molekul yang kecil
- b. Memiliki bentuk yang sangat kompak, hal ini akan meningkatkan bulk density dan akhirnya juga *volumetric storage capacity*
- c. Memiliki ukuran pori yang sesuai dengan diameter molekul adsorbat, yang akan mengoptimalkan jumlah zat yang teradsorpsi
- d. Memiliki mesoporosity yang relatif rendah, karena mesopori memiliki kontribusi yang kecil terhadap kapasitas adsorpsi dan mengurangi bulk density
- 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. Ketidaksetimbangan gaya-gaya tersebut menyebabkan zat padat atau zat cair tersebut cenderung menarik zat-zat lain atau gas yang bersentuhan pada permukaannya. Fenomena konsentrasi zat pada permukaan padatan atau cairan disebut fasa teradsorbat atau adsorbat sedangkan zat yang menyerap atau menariknya disebut adsorben.

Dua prinsip penyimpanan hidrogen pada beberapa material adsorben

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

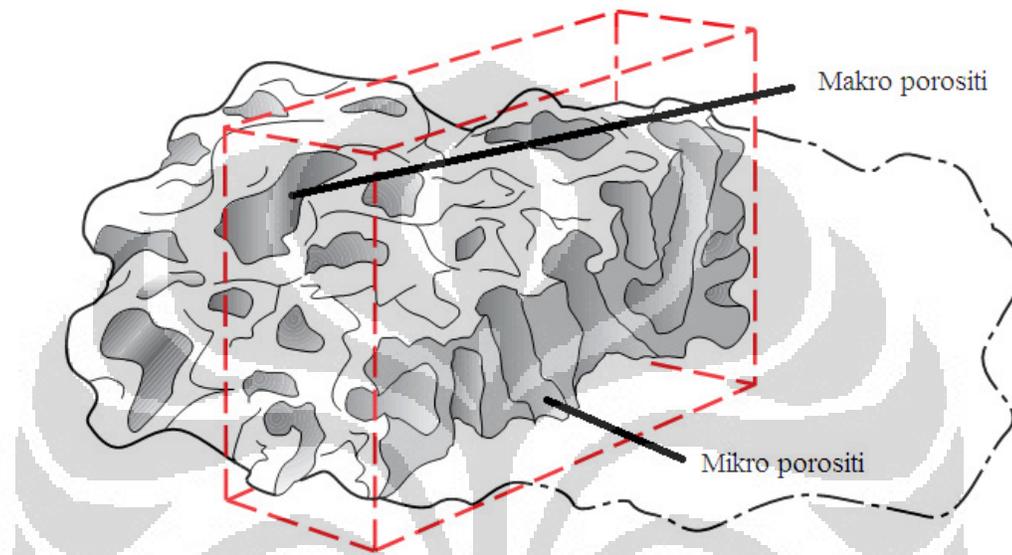
Adsorpsi fisika terjadi bila gaya intermolekular lebih besar dari gaya intramolekular. Gaya intermolekular adalah gaya tarik menarik antar molekul-molekul fluida itu sendiri sedangkan gaya intramolekular adalah

gaya tarik menarik antara molekul fluida dengan molekul permukaan padatan. Di dalam penyerapan ini, adsorbat ditahan pada bagian permukaan karbon karena adanya fluktuasi distribusi muatan listrik yang lemah. Adsorpsi ini dapat berlangsung di bawah temperatur kritis adsorbat yang relatif rendah. Adsorpsi menurun dengan meningkatnya temperatur. Energi aktivasi yang terjadi untuk adsorpsi biasanya tidak lebih dari 1 kkal/g.mol. Oleh karena itu gaya yang dilibatkan pada adsorpsi fisika adalah gaya *Van Der Walls* yaitu gaya tarik menarik yang relatif lemah antara permukaan adsorben dengan adsorbat. Dengan demikian adsorbat tidak terikat secara kuat pada permukaan adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan ke bagian permukaan lainnya. Dan pada permukaan yang ditinggalkan oleh adsorbat yang satu dapat digantikan oleh adsorbat lainnya. Bila dalam keadaan kesetimbangan kondisinya diubah misalnya tekanan diturunkan atau temperatur dinaikkan maka sebagian adsorbat akan terlepas dan akan membentuk kesetimbangan baru. Proses adsorpsi fisika terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi sehingga pada proses tersebut akan membentuk lapisan *multilayer* pada permukaan adsorben. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi fisika dapat diputuskan dengan mudah.

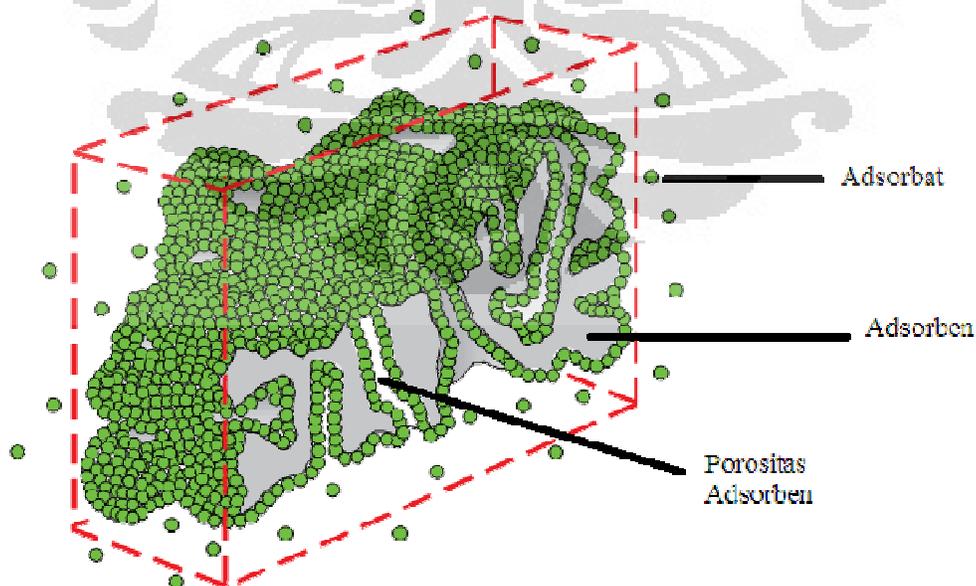
- b) Atom-atom hidrogen larut dan membentuk ikatan kimia seperti *chemisorption* (penyerapan kimia).

Adsorpsi jenis ini merupakan adsorpsi yang terjadi karena terbentuknya ikatan kovalen dan ion antara molekul-molekul adsorbat dengan adsorben. Ikatan yang terbentuk merupakan ikatan yang kuat sehingga lapisan yang terbentuk adalah lapisan *monolayer*. Yang paling penting dalam adsorpsi kimia adalah spesifikasi dan kepastian pembentukan *monolayer*. Pendekatannya adalah dengan menentukan kondisi reaksi sehingga hanya adsorpsi kimia yang terbentuk dan hanya terbentuk *monolayer*. Fisisorpsi membatasi rasio hidrogen ke karbon kurang dari satu atom hidrogen per dua atom karbon (4.2 % massa). Berbeda dengan kemisorpsi, rasio pada dua atom hidrogen persatu karbon yang diwujudkan dalam kasus polietilen (Stroebel,

R., 2006). Gaya *Van Der Walls* sering terjadi pada atom molekul non-polar (beberapa hidrokarbon adalah molekul non polar). Penyerapan secara fisika memiliki sebuah ikatan energi secara normal biasanya dari urutan 0.1 eV sedangkan penyerapan secara kimia memiliki ikatan kovalen C-H , dengan energi yang meningkat dari 2-3eV.



Gambar 2.7 Potongan Melintang Material Karbon Aktif



Gambar 2.8 Proses Adsorpsi Pada Karbon Aktif

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

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

2.4 ADSORPSI EQUILIBRIUM

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

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

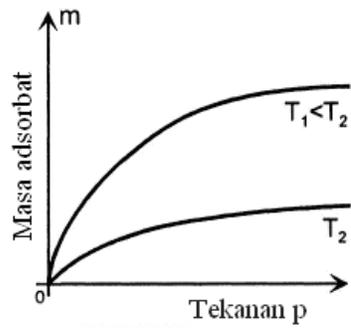
Dimana, x/m adalah jumlah adsorbat yang terserap per unit massa adsorben pada tekanan equilibrium dan pada temperatur adsorpsi.

Adsorpsi equilibrium dapat didekati dalam tiga cara, yaitu:

2.4.1 Adsorpsi Isotermal

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

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



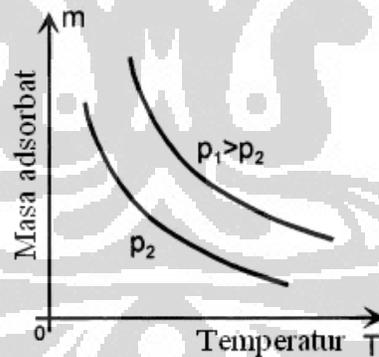
Gambar 2.9 Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isotermal

(Keller, Jurgen., 2005)

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):

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



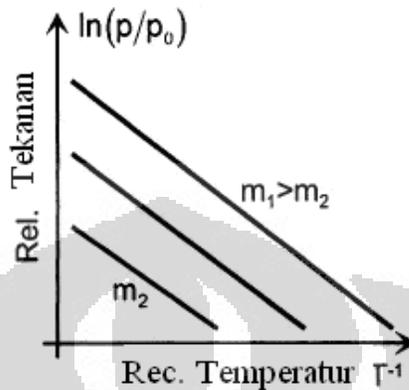
Gambar 2.10 Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isobar

(Keller, Jurgen., 2005)

2.4.3 Adsorpsi Isosterik

Pada adsorpsi isosterik dimana jumlah adsorbat yang terserap per unit massa adsorben adalah konstan dan temperatur divariasikan sehingga tekanan menjadi fungsi yang sangat esensial untuk menjaga x/m tetap konstan (Bansal, R.C. dkk., 2005).

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



Gambar 2.11 Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi *Isostere*

(Keller, Jurgén., 2005)

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

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

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

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

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

Jika C_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:

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

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-Freundlich memiliki prediksi yang lebih baik pada tekanan tinggi (Byoung-Uk Choi, 2003). Dengan adanya tiga parameter dalam persamaan ini, akan memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan persamaan Langmuir yang hanya memiliki dua parameter.

Persamaan isotermal Langmuir-Freundlich adalah sebagai berikut:

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

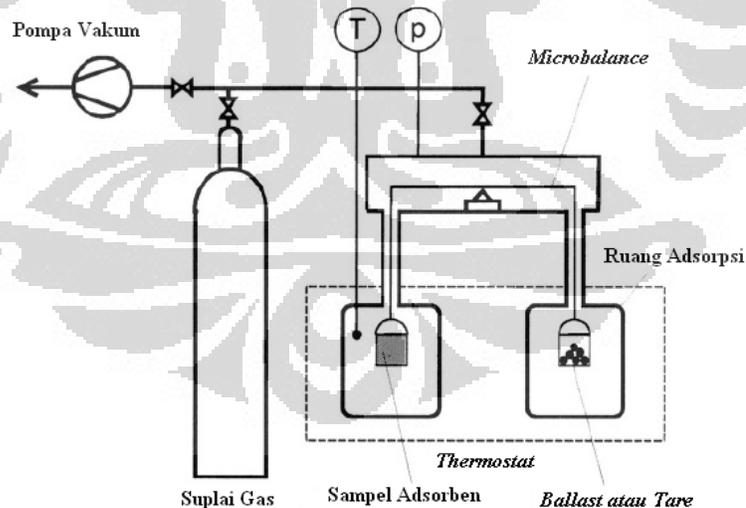
2.6 METODE PENGUJIAN ADSORPSI

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

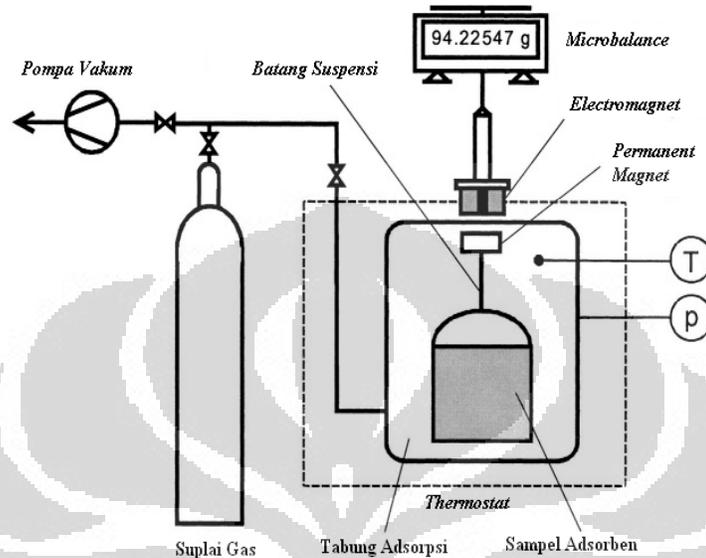
Preparasi sampel pengujian menggunakan metode gravimetrik mutlak dilakukan untuk mendapatkan pengujian yang optimum. Preparasi sampel dilakukan dengan *degassing* sampel untuk mendapatkan massa kering sampel serta temperatur, tekanan dan waktu untuk mendapatkan data pengujian yang valid (Keller, J.U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



Gambar 2.12 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.



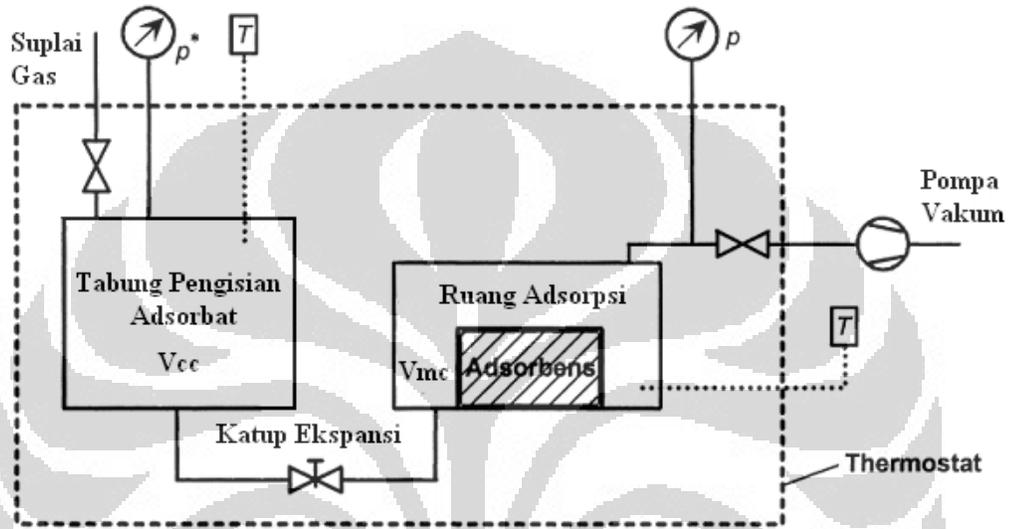
Gambar 2.13 Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Magnetic Suspension Balance*
(Keller, Jurgen., 2005)

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, Jurgen., 2005)

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

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

1. Volume efektif alat uji harus diketahui.
2. Alat uji harus dapat mengukur temperatur dari gas yang menjadi adsorbat.
3. Keakuratan alat uji untuk mengukur perubahan tekanan pada metode volumetrik adalah hal yang utama.

4. Kesetimbangan adsorpsi terjadi apabila tekanan relatif mencapai $p/p_0 = 1$, maka pengukuran berakhir.
5. Perhitungan adsorbat yang terserap dapat diukur menggunakan persamaan gas ideal.

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

2.7 ADSORBEN

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

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

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

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

2.7.1 Karbon Aktif

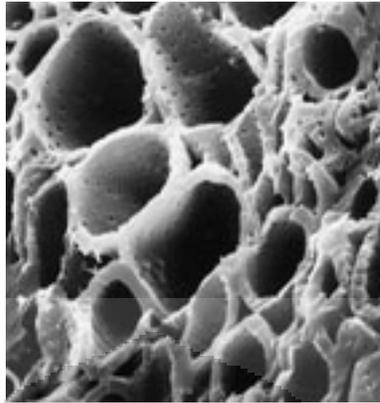
Material karbon aktif adalah salah satu kandidat untuk menyimpan hidrogen karena memiliki kemampuan penyerapan yang tinggi, luas permukaan spesifik yang tinggi, mikrostruktur berpori, densitas masa yang rendah dan murah menjadi salah satu penelitain yang sangat menarik.

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

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

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

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



Gambar 2.15 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:



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

Karbon aktif batu bara dan Tempurung Kelapa memiliki struktur kristalin, sehingga memungkinkan material tersebut dapat digunakan sebagai material penyimpan. Fenomena penggilingan mekanika membantu partikel menjadi fasa mikro atau nanokristalin sehinggamenyebabkan penurunanenergiaktivasi desorpsi (Stroebel, R., 2006) (peristiwa pelepasan molekul, ion dan sebagainya dari permukaan zat padat sehingga molekul atau ion itu menjadi gas). Namun tingginya energi aktifasi bergantung pada elemen permukaan.

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

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

2.7.2 Proses Pembuatan Karbon Aktif

Ada dua metode dalam pengaktifan karbon yaitu :

1. Dengan menggunakan gas untuk mengoksidasi karbon pada suhu tinggi, gas yang digunakan biasanya adalah CO₂ dan udara / gabungan antara keduanya,

pengaktifan gas ini selalu berjalan dalam kecepatan reaksi orde pertama dengan temperatur 100 - 1000⁰C. Pengaktifan dengan gas ini ditujukan untuk memperluas struktur pori karbon melalui proses oksidasi.

2. Dengan pengaktifan secara kimia, zat kimia yang digunakan adalah ZnCl₂, asam phosphor, Na₂SO₄ dan KOH. pengaktifan secara kimia berjalan pada temperatur 400-650⁰C. Proses ini ditujukan untuk memperluas permukaan pori bagian dalam karbon. (anonim, 2005 dikutip Wahid, 2006)

Karbon aktif diklasifikasikan menjadi dua kelompok, yakni powder: jika ukuran diameter karbon aktif lebih kecil dari 200 mesh dan granular jika diameter karbon aktif berukuran lebih besar dari 160 mesh (0,1mm).

Ukuran partikel dan luas permukaan merupakan hal yang penting dalam karbon aktif. Ukuran partikel karbon aktif mempengaruhi kecepatan adsorpsi, tetapi tidak mempengaruhi kapasitas adsorpsi. Jadi kecepatan adsorpsi yang menggunakan karbon aktif serbuk (powder) lebih besar daripada karbon aktif butiran (granular). Luas permukaan total mempengaruhi kapasitas adsorpsi total sehingga meningkatkan efektifitas karbon aktif dalam adsorpsi. Luas permukaan karbon aktif berkisar antara 500-1400 m²/gr. (Graham dkk, 1951 dikutip Wahid, 2006).

Ukuran partikel tidak terlalu mempengaruhi luas permukaan total sebagian besar meliputi pori-pori partikel karbon. Jadi berat yang sama dari karbon aktif serbuk dengan butiran mempunyai kapasitas yang sama. Struktur pori-pori karbon aktif mempengaruhi perbandingan antara luas permukaan dan ukuran partikel.

2.8 PEMBUATAN LIKUIDA LIGNOSELULOSA

Menurut Risnasari, I., Rohendi, S., 2006, pembuatan likuida lignoselulosa menggunakan bahan baku berupa partikel kayu berukuran 40 mesh yang memiliki kandungan zat ekstraktif berbeda dari jenis kayu jati, keruing dan agatis. Bahan lainnya adalah larutan fenol teknis, formalin, NaOH 40%, H₂SO₄ 98% dan aquades. Proses pembuatan likuida kayu dimulai dengan persiapan bahan baku berupa partikel kayu berukuran 40 mesh dan penentuan kadar air setiap jenisnya. Partikel kayu tersebut siap digunakan setelah kadar airnya mencapai ± 5%. Selain

itu juga ditentukan kadar ekstraktif masing-masing jenis dengan menggunakan metode kelarutan dalam air dingin. Partikel kayu berukuran 40 mesh dengan kadar air $\pm 5\%$ dari masing-masing jenis disiapkan untuk dimodifikasi dengan cara mencampurkan partikel kayu dengan larutan fenol teknis dengan perbandingan 1 : 5 berdasarkan berat. Kemudian dilakukan penambahan H_2SO_4 98% sebanyak 5% dari jumlah larutan fenol. Campuran diaduk hingga merata dan dipanaskan pada suhu $100^{\circ}C$ selama ± 30 menit atau sampai larutan menjadi homogen. Larutan yang sudah homogen tersebut didinginkan dan siap digunakan sebagai likuida kayu. Perikat utama hasil liquifikasi dicampur dengan NaOH 40% sampai pH-nya menjadi 11, kemudian ditambahkan formalin pada molar rasio F/P : 2.1. Selanjutnya perikat yang telah jadi siap diaplikasikan pada produk.

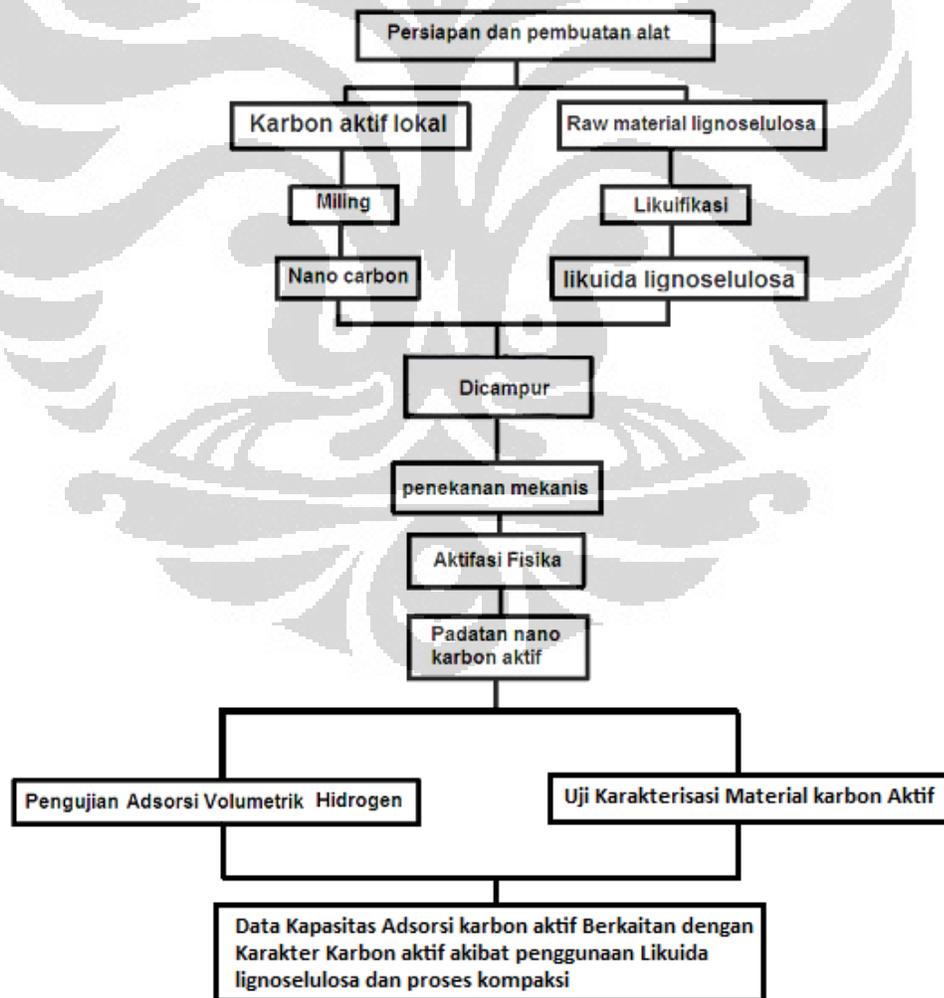
2.9 PEMBUATAN PADATAN NANO KARBON AKTIF DENGAN ZAT PENGIKAT LIKUIDA LIGNOSELULOSA

Penelitian tentang pembuatan padatan karbon aktif dengan bahan dasar mikro kristal anhidrous selulosa (Inomata, K., 2002) menunjukkan hasil yang menggembirakan dimana bisa menghasilkan luas permukaan karbon aktif hingga $2340m^2/gram$ beratnya. Dengan demikian tantangan yang selama ini dihadapi saat penggunaan pengikat sintetis yang menutup pori dari karbon aktif akan dapat diatasi dengan penggunaan likuida lignoselulosa sebagai pengikatnya, dimana proses aktivasi fisika dilakukan setelah nano karbon aktif berbentuk padatan.

Untuk membentuk padatan sesuai dengan tingkat kerapatan yang diinginkan, proses penekanan mekanis dilakukan dengan cara menempatkan partikel nano karbon aktif pada sebuah silinder kemudian ditekan dari atas dengan tenaga hidrolis. Dengan membentuk partikel nano karbon aktif menjadi bentuk padatan maka dengan ukuran tangki yang sama akan mampu menampung lebih banyak hidrogen jika dibandingkan dengan bentuk partikel.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini terdiri dari dua bagian yaitu produksi padatan partikel nano karbon aktif dan pengujian adsorpsi terhadap padatan tersebut seperti dicantumkan dalam diagram alir di bawah ini.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.1 PRODUKSI PADATAN PARTIKEL NANO KARBON AKTIF

Bahan dasar untuk pembuatan padatan partikel nano karbon aktif adalah karbon aktif granular komersil dengan bahan dasar batu bara Indonesia kualitas rendah. Pembuatannya dilakukan melalui tahapan sebagai berikut:

1. Pembuatan partikel Nano Karbon Aktif

Karbon aktif dalam bentuk granular tersebut dihaluskan lebih dahulu menggunakan ball mill machine. Proses penghalusan ini memerlukan waktu lebih kurang 24 jam, sehingga diperoleh karbon aktif dalam bentuk partikel. Selanjutnya dilakukan pengayakan secara manual dengan menggunakan saringan dengan ukuran mesh 400. Artinya akan diperoleh partikel karbon aktif yang memiliki tingkat kehalusan mesh 400 atau lebih. Kemudian partikel karbon aktif ini mengalami penghalusan lebih lanjut dengan cara diproses dalam mesin planetary ball mill (PBM) selama 30 jam. Sehingga diharapkan partikel karbon aktif yang dihasilkan sudah berbentuk nano.



Gambar 3.2 Alat Planetary Ball Milling

2. Pembuatan Likuida Lignoselulosa sebagai Pengikat Padatan Nano Karbon Aktif

Pembuatan likuida ini menggunakan bahan baku berupa partikel kayu jati berukuran 40 mesh. Penggunaan partikel kayu jati dipilih karena merupakan salah satu jenis bahan perekat likuida kayu yang memenuhi standar yang dipersyaratkan oleh SNI 06-0121-1987 untuk perekat fenol formaldehida (Risnasari,I,2006). Bahan lainnya adalah larutan fenol teknis, formalin, H_2SO_4 98% dan aquades.

Proses pembuatan likuida kayu dimulai dengan persiapan bahan baku berupa partikel kayu jati berukuran 40 mesh dan penentuan kadar air nya, Partikel kayu tersebut siap digunakan setelah kadar airnya mencapai $\pm 5\%$. Partikel kayu berukuran 40 mesh dengan kadar air $\pm 5\%$ disiapkan untuk dimodifikasi dengan cara mencampurkan partikel kayu dengan larutan fenol teknis dengan perbandingan 1:5 berdasarkan berat. Kemudian dilakukan penambahan H_2SO_4 98% sebanyak 5% dari jumlah larutan fenol. Campuran diaduk hingga merata dan

dipanaskan pada suhu 100°C selama ± 30 menit atau sampai larutan menjadi homogen. Larutan yang sudah homogen tersebut didinginkan dan siap digunakan sebagai likuida kayu (Risnasari,I., 2006). Selanjutnya akan dipergunakan sebagai pengikat pada padatan nano karbon aktif.

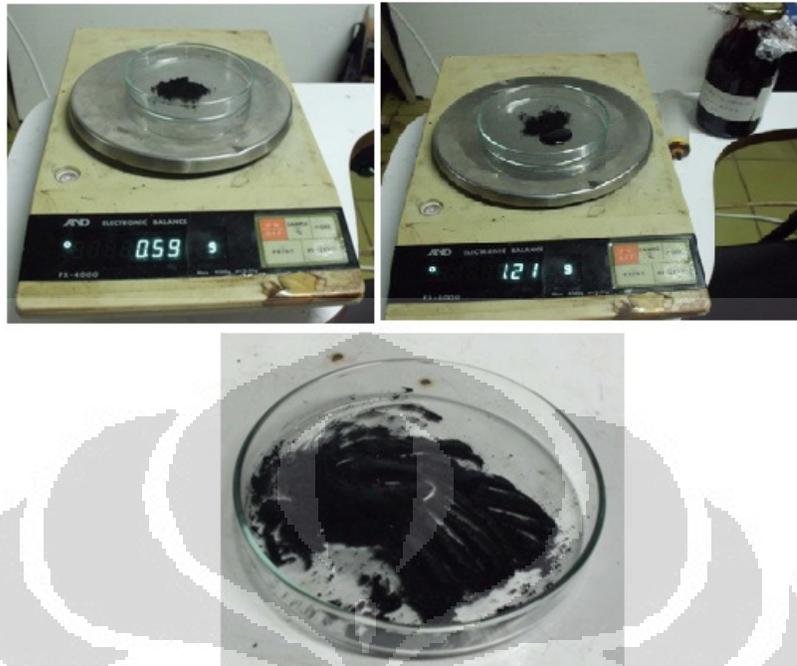
3. Pencampuran Partikel Partikel Nano Karbon Aktif dengan Likuida Lignoselulosa.

Perbandingan antara likuida lignoselulosa sebagai pengikat dan partikel partikel nano karbon aktif berdasarkan persen berat. Untuk pencampuran coba dilakukan dengan dua cara yaitu:

a. Likuida langsung dicampur dengan partikel partikel nano karbon aktif.

Dengan cara ini perbandingan campuran antara likuida lignoselulosa dengan partikel partikel nano karbon aktif adalah 1:4, 2:4, 3:4 dan 4:4.

Hasil yang didapatkan pada pencampuran likuida lignoselulosa dengan partikel partikel nano karbon aktif dengan perbandingan 1:4 sampai 2:4 adalah bahwa tidak terbentuk campuran yang homogen antara likuida lignoselulosa dengan partikel partikel nano karbon aktif. Dimana masih ada sebagian karbon aktif yang masih berbentuk partikel. Untuk pencampuran dengan perbandingan 3:4 campuran baru bisa homogen setelah dilakukan pengadukan manual dengan tangan, sementara itu jika hanya diaduk dengan menggunakan spatula tidak terbentuk campuran yang homogen antara likuida lignoselulosa dengan partikel partikel nano karbon aktif. Pada pencampuran dengan perbandingan 4:4 , langsung terbentuk campuran yang homogen antara likuida lignoselulosa dengan partikel partikel nano karbon aktif hanya dengan mengaduk menggunakan spatula.



Gambar 3.3. Pencampuran Likuida Lignoselulosa dengan Serbuk Nano Karbon Aktif secara Langsung.

b. Likuida diencerkan dengan aquades.

Dengan cara ini likuida lignoselulosa diencerkan terlebih dahulu dengan aquades. Perbandingan campuran antara likuida dan aquades adalah 1:1 dan 1:2. Kemudian hasil pengenceran tersebut dicampur dengan partikel partikel nano karbon aktif dengan perbandingan 1: 4, 2:4, 3:4, dan 4:4

Pada pencampuran antara pengenceran likuida dengan aquades ditambah dengan powder nano karbon aktif didapat hasil relative sama dengan pencampuran langsung antara likuida lignoselulosa langsung ditambah powder nano karbon aktif. Yang membedakan hanya pada hasil proses pencetakannya.



Gambar 3.4. Pencampuran Pengenceran Likuida Lignoselulosa dengan Serbuk Nano Karbon Aktif.

4. Pencetakan Campuran Likuida Lignoselulosa dan Partikel Nano Karbon Aktif

Pencetakan atau proses kompaksi dilakukan dengan menggunakan alat cetak untuk mendapatkan padatan partikel nano karbon aktif yang bisa disebut juga sebagai pellet. Alat untuk mencetak padatan karbon aktif terbuat dari baja St.60 seperti ditunjukkan gambar di bawah ini. Pencampuran antara likuida lignoselulosa dan partikel partikel nano karbon aktif yang telah dilakukan dengan berbagai variasi perbandingan di atas, dimasukkan kedalam cetakan, kemudian ditekan atau dipress pada mesin hidrolik dengan tekanan sebesar 20 kg/cm^2 .



Gambar 3.5. Alat Cetak

Kemudian hasil cetakan tersebut dikeluarkan dari cetakan dengan cara membuka lebih dahulu skrup-skrup landasan di bawahnya.



Gambar 3.6 Pellet sebagai Produk Kompaksi Karbon Aktif

3.2 REAKTIVASI PADATAN KARBON AKTIF

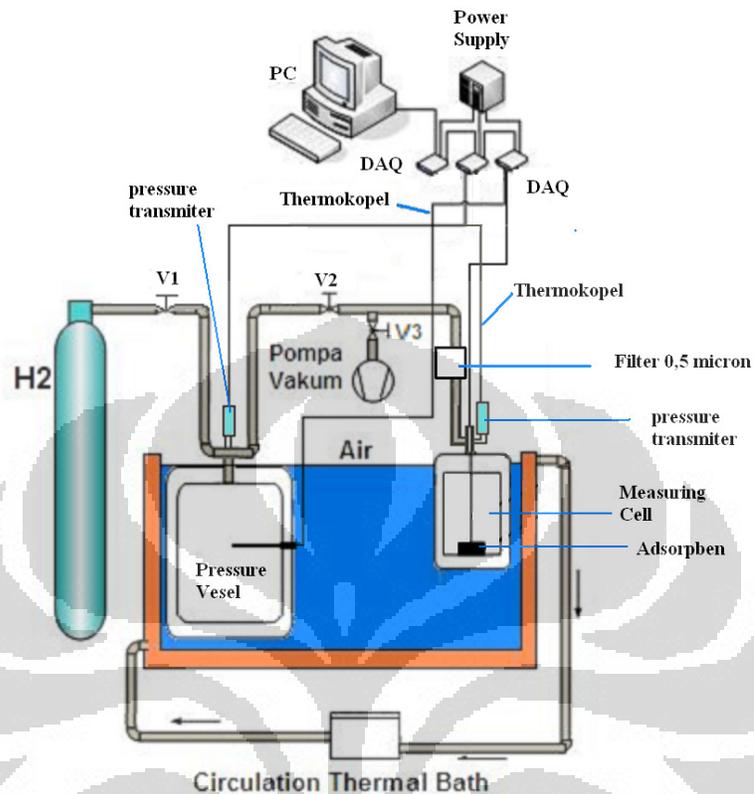
Proses reaktivasi dilakukan menggunakan tube furnace dengan gas nitrogen sebagai activated agent pada temperatur 700°C . Jumlah aliran gas nitrogen yang dialirkan sebanyak 300 CC/ menit. Padatan partikel nano karbon aktif dikelompokkan dalam tiga macam waktu reaktivasi yaitu 1 jam, 3 jam dan 6 jam.

3.3 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) seperti terlihat pada gambar 3.2. Kedua tabung tersebut dihubungkan dengan tube stainless steel dimana keduanya terendam dalam fluida yang temperturnya 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.

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



Gambar 3.7 Skema Alat Uji Adsorpsi Isothermal

Setelah temperatur pada system konstan (isothermal), gas hydrogen (H_2) dimasukan 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.

3.4 PENGUKURAN VOLUME CHARGING CELL DAN VOLUME KOSONG MEASURING CELL

Volume merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam pengukuran adsorpsivolumetrik. Ketidakpastian kalibrasi volume gas, pengukuran tekanan, dan kebocoran merupakan sumber kesalahan dari pengukuran metode volumetrik,

yang mungkin mengakibatkan data adsorpsi tidak realistis (Belmabkhout, et. al, 2004).

3.4.1 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:

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

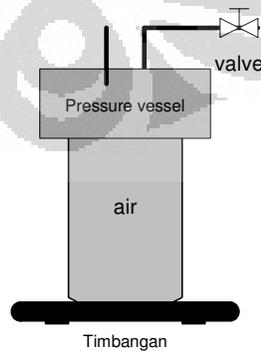
dengan : m_{air} : massa air (kg)

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 3.8 Skema Proses Pengukuran Volume *Charging Cell*

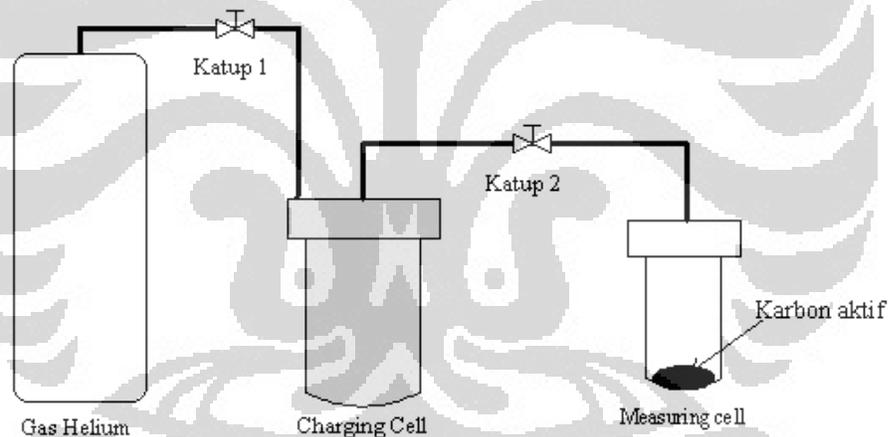
3.4.2 Pengukuran Volume Kosong *Measuring Cell*

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

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

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

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



Gambar 3.9 Skema Proses Pengukuran Volume Kosong *Measuring Cell*

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

- 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*:

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

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

3.4.3 Persiapan Penelitian

Sebelum dilakukan pengujian adsorpsi isoterml, 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.

3.5 PROSEDUR PENELITIAN

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

1. Karbon aktif dimasukkan ke dalam *measuring cell* dan antara *measuring cell* dan *charging cell* dihubungkan dengan sistem *tubing*.
2. Proses awal pengujian adalah proses *degassing*. Proses *degassing* dimaksudkan untuk mengeluarkan seluruh unsur atau zat pengotor (impurity) yang kemungkinan terserap oleh karbon aktif selama penyimpanan. Proses *degassing* berlangsung sampai dengan 8 jam dan selama proses sistem divakum dengan pompa vakum satu tingkat sampai dengan tekanan mendekati 0,01 mbar. Selama proses tersebut *measuring cell* dipanaskan dengan cara dililiti pemanas (heater) untuk menjaga temperatur karbon aktif pada kisaran 130 – 140°C.
3. Gas helium (He) dimasukkan ke dalam sistem beberapa kali pada tekanan sampai dengan 7 bar untuk meningkatkan proses pengeluaran zat pengotor pada karbon aktif.
4. Setelah proses *degassing* selesai, *charging cell* dan *measuring cell* direndam dengan air yang disirkulasikan oleh *circulating thermal bath* untuk menjaga agar temperatur pada sistem terjaga konstan pada temperatur tertentu yang diinginkan.

5. Setelah temperatur pada sistem konstan (isotermal), gas H₂ dimasukan ke dalam *charging cell*, dimana sebelumnya katup yang menghubungkan antara *charging cell* dan *measuring cell* ditutup.
6. Setelah temperatur pada *charging cell* kembali ke temperatur isotermal, katup penghubung tersebut dibuka dan proses ini adalah proses awal adsorpsi isotermal.
7. Gas 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.

3.6 ERROR ANALISIS PADA ADSORPSI ISOTERMAL

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

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

Volume *charging cell* (V_{cc}) diukur dengan mengisi air dan menimbang selisih berat *charging cell* (V_{cc}) sebelum dan setelah diisi air, dengan akurasi timbangan yang digunakan 1 g. Pengukuran volume *charging cell* (V_{cc}) yang telah dilakukan adalah $1170 \pm 0,66$ ml atau dengan nilai ketidakpastian 0,056%.

Volume kosong pada *measuring cell* (V_{vv}) dihitung dengan menggunakan gas helium yang dimasukan ke dalam *measuring cell*. Volume kosong pada *measuring cell* (V_{vv}), nilainya berbeda untuk tiap jenis sampel karbon aktif yang digunakan dengan nilai ketidakpastian 0,28% pada tabel berikut.

Tabel 3.1 Volume Kosong pada *Measuring cell*(V_{vv})

Sampel	Volume Void rata2	
	-5	35
Granular	m = 4,22 g	m = 4,67 g
	V = 86,853 cm ³	V = 87,397 cm ³
1 Jam	m = 2,36 g	m = 3,1 g
	V = 87,394 cm ³	V = 88,017 cm ³
3 jam	m = 1,4 g	m = 1,4 g
	V = 87,9 cm ³	V = 87,9 cm ³
6 Jam	m = 2,18	m = 3,17
	V = 86,853 cm ³	V = 87,465 cm ³

3.6.2 Error pada Pengukuran Temperatur

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

3.6.3 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.

3.6.4 Error pada Pengukuran Massa Sampel

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

3.7 PERHITUNGAN MASSA ADSORBAT YANG DISERAP

Pengujian adsorpsi isothermal dilakukan dengan menggunakan metode volumetrik, skema keseimbangan massa adsorpsi isothermal terlihat pada Gambar 4.9. 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:

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

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

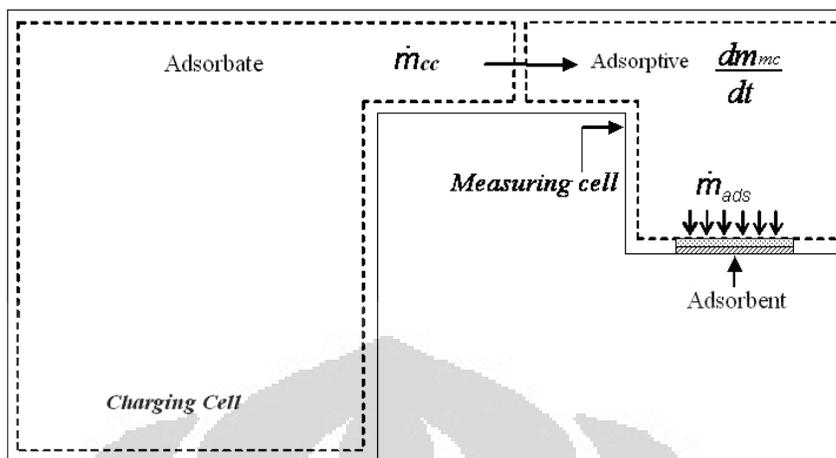
Dengan mensubstitusikan persamaan (2) dan (3) ke dalam pers (1), maka didapat:

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

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 3.10 Skema Keseimbangan Massa pada Proses Penyerapan

3.8 PENGUJIAN PROPERTIES SAMPEL PADATAN PARTIKEL NANO KARBON AKTIF

3.8.1. Pengukuran Luas Permukaan Partikel Dengan Menggunakan Uji Brunner Emmet Teller (BET)

Pengukuran luas permukaan dan volume mikropori dilakukan pada alat *quatachrome novawin2 - acquisition data and reduction for NOVA INSTRUMENTS 1004-2003*. Alat ini menggunakan nitrogen murni tinggi (99,99%). Sebelum dianalisis, sampel karbon harus didegassing untuk menghilangkan kontaminasi gas pada mikropori karbon aktif. Luas permukaan spesifik berasal dari metode BET isotherm menggunakan toleransi Tekanan di 0.100/0.100 (ads/des). Volume pori total dihitung dari jumlah teradsorpsi (volume cairan nitrogen) pada tekanan relatif dari 0,99.

3.8.2 Iodine Number

Merupakan suatu parameter daya serap oleh suatu zat terhadap iodium, dalam hal ini massa iodium yang diserap per seratus gram karbon aktif. Besarnya jumlah iodium yang diserap menunjukkan banyaknya ikatan rangkap atau ikatan tak jenuh.

3.8.3 Karakteristik Struktur Permukaan Karbon Aktif dengan Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM adalah adalah jenis mikroskop elektron dengan mekanisme penggambar sampel yaitu memindai dengan sinar energi elektron yang tinggi dalam pola pengamatan acak. Elektron berinteraksi dengan atom-atom menghasilkan sinyal yang mengandung informasi tentang topografi permukaan sampel, komposisi, dan properti lainnya seperti konduktivitas listrik. Gambar SEM secara jelas menggambarkan pori-pori dan sifat permukaan karbon aktif.

3.8.4 Uji Energy Dispersive X-Ray Analisis

Analisis EDAX atau EDS dapat digunakan untuk analisis kualitatif dan kuantitatif. Analisis kualitatif memberikan informasi jenis unsur yang terkandung dalam bahan, sedangkan analisis kuantitatif memberikan informasi jumlah unsur yang terdapat dalam bahan tersebut. Analisis menggunakan EDAX atau EDS dilakukan berdasarkan identifikasi dan pencacahan sinar-x karakteristik yang terjadi dari peristiwa efek fotolistrik.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 PROPERTIS KARBON AKTIF

Untuk mendapatkan propertis sampel karbon aktif yang digunakan maka dilakukan beberapa pengujian. Propertis yang diperoleh dari pengujian tersebut mencakup luas permukaan, iodine number, kandungan unsur dalam karbon aktif dan morfologi permukaannya.

4.1.1 Luas Permukaan

Melalui pengujian Brunner Emmet Teller (BET) diketahui luas permukaan sampel karbon aktif yang digunakan seperti ditunjukkan tabel berikut ini.

Tabel 4.1 Luas Permukaan Sampel Karbon Aktif

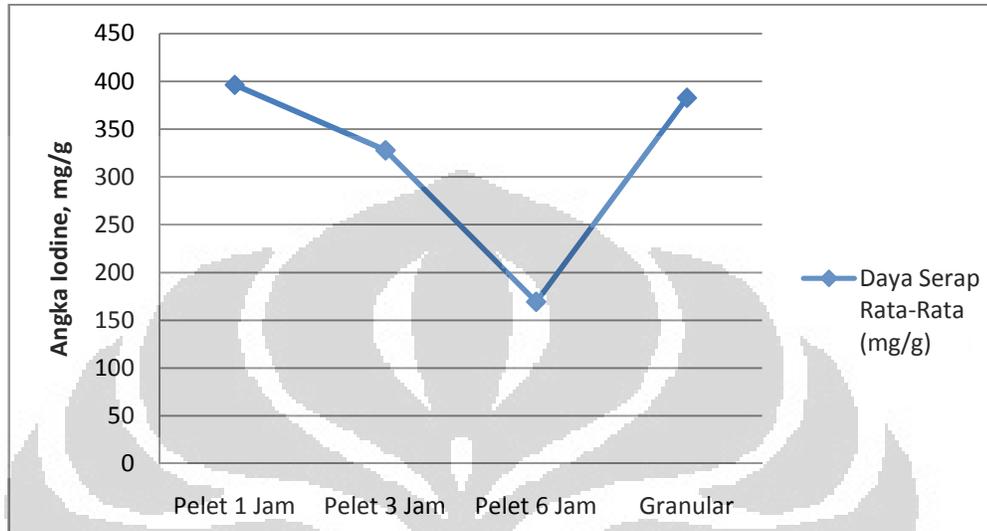
Sampel	Luas Permukaan (m ² /g)
Granular	729,944
Pellet Reaktivasi 1 jam	331,921
Pellet Reaktivasi 3 jam	390,113
Pellet Reaktivasi 6 jam	319,942

Dari tabel 4.1 di atas terlihat bahwa luas permukaan karbon aktif berbentuk pellet mengalami penurunan jika dibandingkan dengan karbon aktif bentuk granular. Hal ini menunjukkan adanya penutupan sebagian pori karbon aktif akibat penambahan lignoselulosa.

4.1.2 Iodine Number

Selain dengan pengukuran luas permukaan dan volume pori, kapasitas adsorpsi dari karbon aktif dapat diprediksi dengan melihat iodine numbernya. Bentuk dari hasil kompaksi karbon aktif yang berbentuk selinder dengan tinggi 10 mm tidak memungkinkan untuk dilakukan pengujian BET tanpa di haluskan terlebih dahulu, kondisi ini menyulitkan dalam analisa dan proses pengujian BET itu sendiri karena karbon aktif yang akan di analisa sudah tidak dalam bentuk dan kondisi

aslinya. Sebagai pembandingan dilakukan pula pengujian daya serap karbon aktif untuk mendapatkan iodine numbernya dengan metode titrasi.



Gambar 4.1 Perbandingan Iodine Number dari Karbon Aktif pada Berbagai Keadaan

Tabel 4.2 Iodine Number dari Karbon Aktif Batubara

NO	NAMA CONTOH	SATUAN	HASIL UJI		METODE
			DAYA SERAP	DAYA SERAP RERATA	
7	BB-6 (Pelet Aktivasi 1 jam)	mg/g	396.0902	396.0902	Titrimetri
8	BB-7 (Pelet Aktivasi 3 jam)	mg/g	327.7715	327.7715	Titrimetri
9	BB-8 (Pelet Aktivasi 6 jam)	mg/g	169.3493	169.3493	Titrimetri
10	BB-9 Granular (B: 5 gram)	mg/g	350.2389	382.6047	Titrimetri
			414.9704		

Dari tabel diatas, karbon aktif batu bara granular yang diterima hingga pellet dengan reaktifasi 6 jam, Iodine number mengalami peningkatan pada proses reaktifasi 1 jam, selanjutnya kembali turun pada hasil reaktifasi 3 dan 6 jam. Pada karbon aktif pellet dengan proses reaktifasi 6 jam terjadi penurunan iodine number yang sangat signifikan.

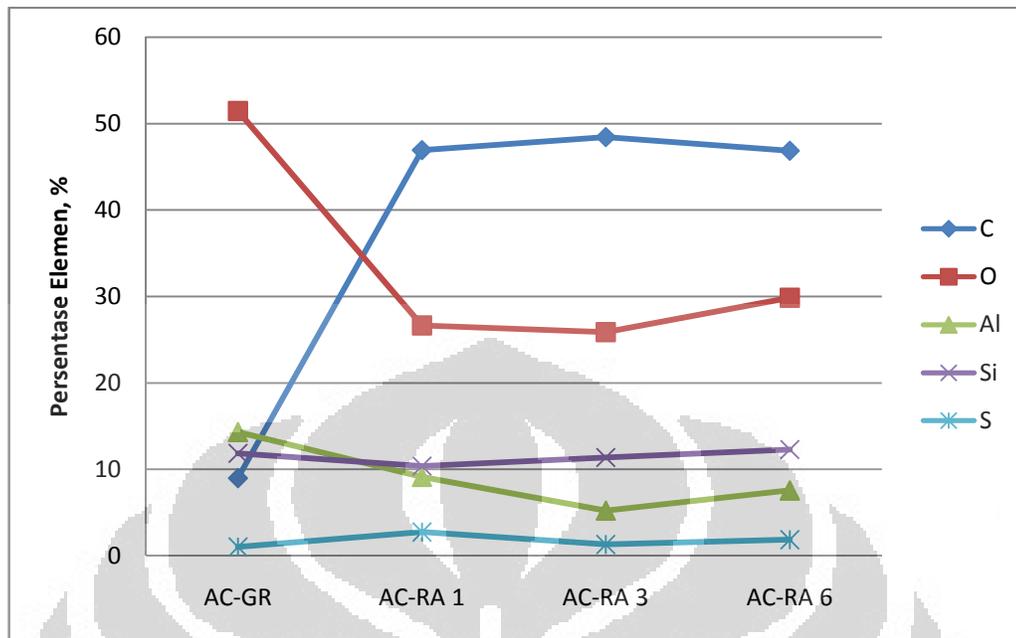
4.1.3 Komposisi Penyusun Padatan Karbon aktif

Komposisi material yang menyusun padatan karbon aktif juga memberi pengaruh terhadap kapasitas adsorpsinya, data dari hasil pengujian Energy Dispersive X-ray Analysis memperlihatkan adanya peningkatan persentase unsur low karbon (C) pada karbon aktif yang telah dikompaksi. Peningkatan persentase unsur low karbon yang ada didalam karbon aktif diharapkan akan meningkatkan kapasitas adsorpsinya karena secara keseluruhan unsur pengotor yang ada didalam karbon aktif menjadi jauh berkurang. Dibandingkan karbon aktif granular, hasil proses reaktivasi membantu menghilangkan unsur P, Cs dan Mn. Kehilangan unsur pengotor ini sangat berpengaruh pada kapasitas adsorpsi dari adsorben karbon aktif karena persen berat adsorbat terhadap berat adsorben jadi jauh lebih besar.

Table 4.3 Unsur Dalam Sampel Karbon Aktif

Unsur	AC-GR	AC-RA 1	AC-RA 3	AC-RA 6
	% Elemen	% Elemen	% Elemen	% Elemen
C	9	46.93	48.43	46.85
O	51.43	26.63	25.87	29.83
Mg	0.3			
Al	14.3	9.12	8.75	7.57
Si	11.86	10.39	11.39	12.3
P	1.57			
S	1.02	2.75	2.57	1.86
Ca	2.25	1.68	1.17	1.6
Mn	3.03			
Fe	5.24	2.49	1.82	

AC-GR : Karbon Aktif Granular, AC-RA 1: Karbon Aktif Reaktivasi 1 jam,
AC-RA 3: Karbon Aktif Reaktivasi 3 jam, AC-RA 6: Karbon Aktif Reaktivasi 6 jam.



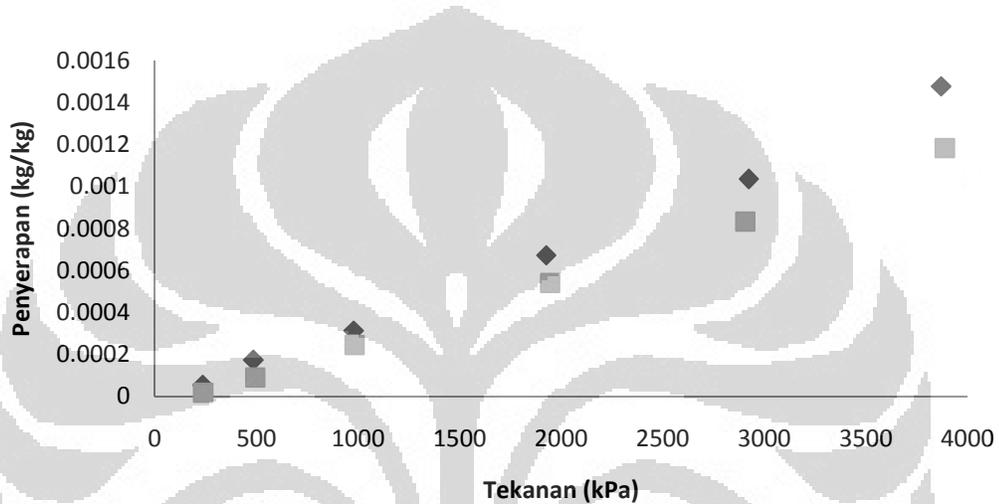
Gambar 4.2 Perbandingan Unsur Penyusun Karbon Aktif dalam Berbagai Keadaan

Dengan menggunakan material pengikat yang berbasis bahan likuida lignoselulosa dengan unsur utama adalah karbon, komposisi dan persentase low karbon yang terdapat dalam produk hasil kompaksi terjadi peningkatan sehingga kemampuan dan kapasitas adsorpsinya diharapkan juga terjadi peningkatan.

Tantangan terbesar dari material untuk pengikat produk kompaksi karbon aktif adalah kemampuan pengikatan yang baik tanpa disertai dengan adanya penyumbatan pada porositas yang ada didalam karbon aktif tersebut, sehingga kapasitas adsorpsinya tidak terganggu. Material lignoselulosa dengan unsur utama karbon terbukti efektif dipakai sebagai pengikat untuk kompaksi karbon aktif, dimana produk hasil kompaksi setelah direaktifasi tetap memiliki bentuk yang solid. Disamping itu disaat proses reaktifasi unsur karbon yang ada didalam likuida lignoselulosa akan menyumbangkan persentase kadar low karbon yang cukup banyak terhadap unsur penyusun padatan karbon aktif.

4.2 KAPASITAS ADSORPSI HIDROGEN PADA KARBON AKTIF

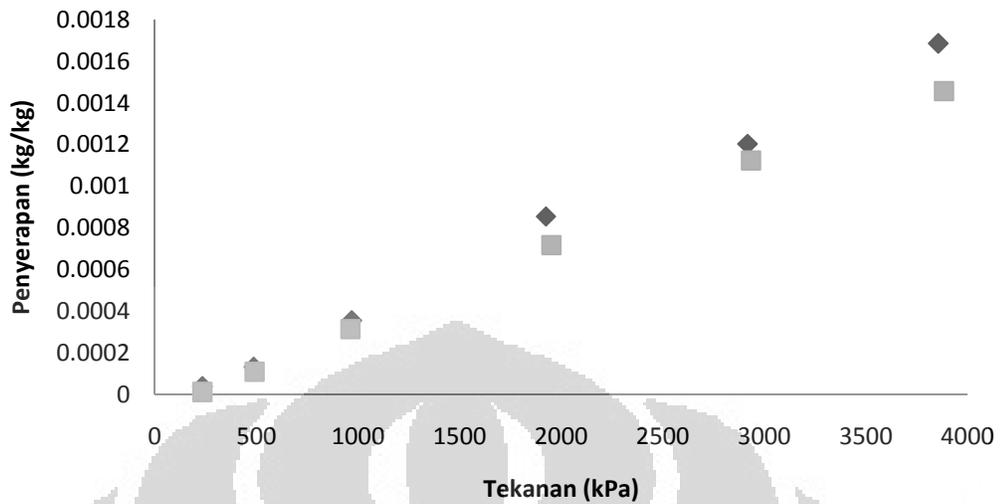
Pada Gambar 4.3 terlihat bahwa kapasitas penyerapan rata-rata maksimum pada karbon aktif granular adalah sebesar 0.0014779kg/kg karbon aktif pada temperatur -5°C dan tekanan 3869.19 kPa. Dengan demikian pada karbon aktif granular jumlah hidrogen yang mampu terserap pada temperatur dan tekanan tersebut adalah sebesar 0,14% dari massa karbon aktif.



Gambar 4.3. Adsorpsi Isotermal Rata-rata Hidrogen pada Karbon aktif Bentuk Granular

◆ Suhu -5°C , ■ Suhu 35°C

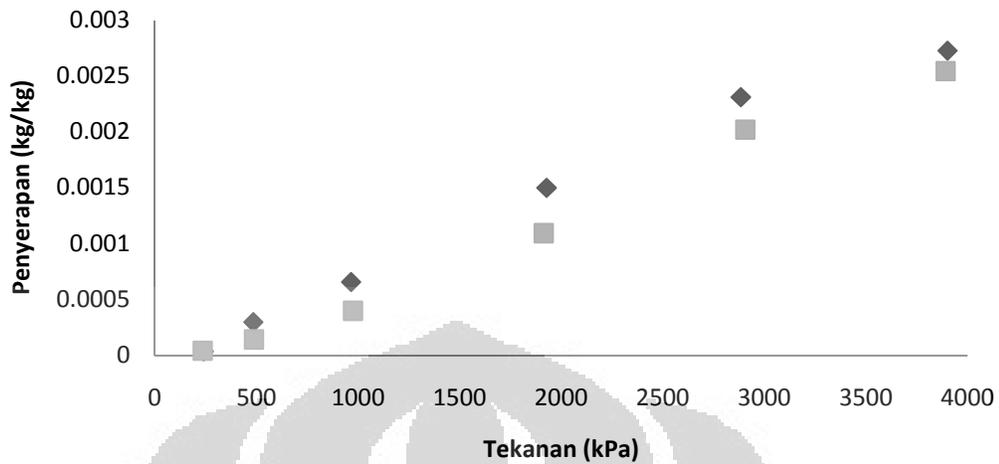
Gambar 4.4 adalah gambar grafik hubungan antara tekanan dan kapasitas penyerapan adsorpsi isotermal hidrogen pada karbon aktif reaktivasi 1 jam. Pada gambar tersebut dapat diketahui bahwa kapasitas penyerapan rata-rata maksimum hidrogen pada karbon aktif reaktivasi 1 jam adalah 0.0016873kg/kg pada temperatur -5°C dan tekanan 3854.83kPa.



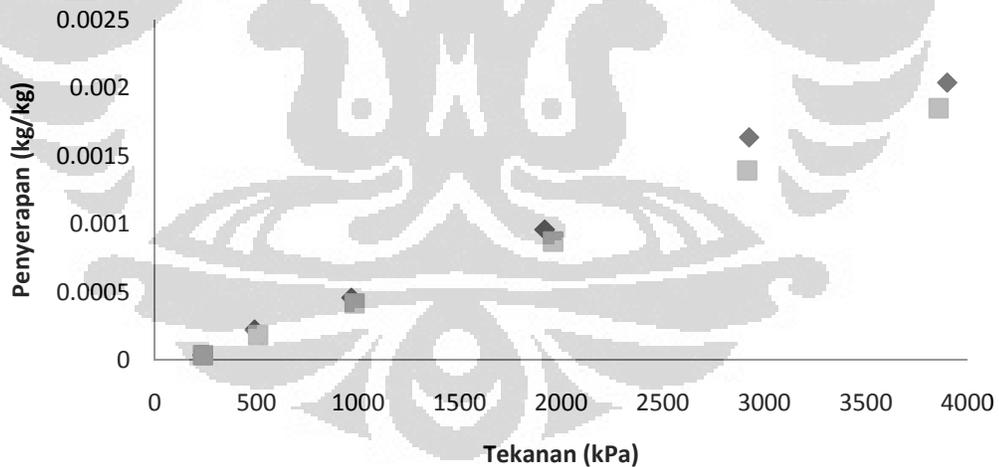
Gambar 4.4. Adsorpsi Isotermal Rata-rata Hidrogen pada Karbon aktif Bentuk Pellet 1 Jam ♦ Suhu -5°C, ■ Suhu 35°C

Pada Gambar 4.5 terlihat bahwa penyerapan rata-rata maksimum pada karbon aktif reaktivasi 3 jam adalah sebesar 0.0027261 kg/kg pada temperatur -5°C dan tekanan 3899.54 kPa.

Gambar 4.6 terlihat bahwa penyerapan rata-rata maksimum pada karbon aktif reaktivasi 6 jam adalah sebesar 0.0020384kg/kg pada temperatur -5°C dan tekanan 3897.501 kPa.



Gambar 4.5. Adsorpsi Isotermal Rata-rata Hidrogen pada Karbon aktif
Bentuk Pellet 3 Jam ♦ Suhu -5⁰C, ■ Suhu 35⁰C

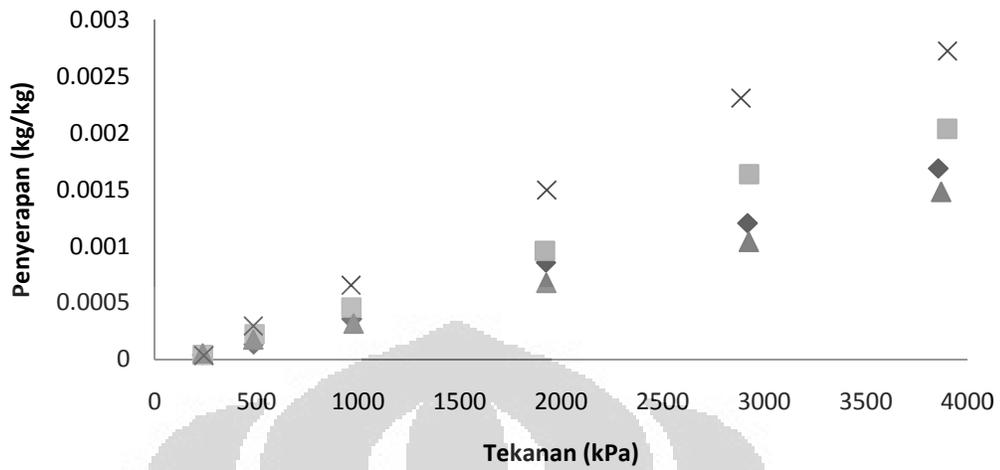


Gambar 4.6 Adsorpsi Isotermal Rata-rata Hidrogen pada Karbon aktif
Bentuk Pellet 6 Jam ♦ Suhu -5⁰C, ■ Suhu 35⁰C

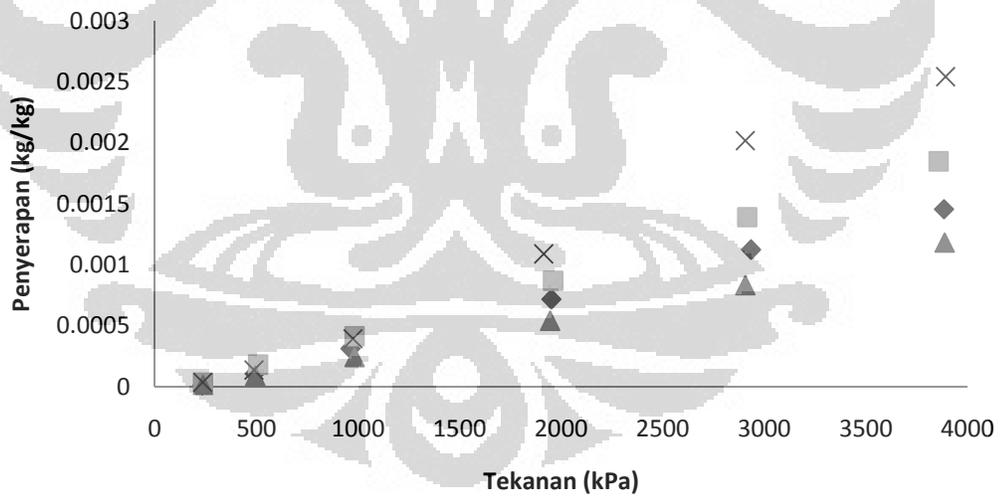
Pada Gambar 4.3 sampai dengan Gambar 4.6 menjelaskan bahwa kapasitas penyerapan sangat tergantung pada tekanan dan temperatur proses penyerapan. Semakin besar tekanan penyerapan maka kapasitas penyerapan karbon dioksida pada karbon aktif juga akan semakin besar. Hal tersebut terjadi dikarenakan

bahwa pada proses adsorpsi, adsorbat yang dialirkan dan menumbuk permukaan karbon aktif sangat bergantung pada tekanan yang diberikan, semakin besar tekanan yang diberikan maka kecepatan atau laju aliran gas yang menumbuk karbon aktif akan semakin besar sehingga kemungkinan jumlah adsorbat yang menempel pada permukaan karbon aktif juga semakin besar (Awaluddin, M.,2010). Kapasitas penyerapan juga sangat dipengaruhi oleh temperatur isothermal proses adsorpsi, semakin rendah temperatur isothermal proses adsorpsi maka kapasitas penyerapan juga semakin besar. Hal tersebut terjadi karena pada proses adsorpsi, adsorbat yang dialirkan ke permukaan karbon aktif akan menumbuk dan menempel pada permukaan karbon aktif kemudian terkondensasi pada permukaan padat berpori tersebut (Awaluddin,M., 2010). Sehingga pada temperatur yang lebih rendah jumlah adsorbat yang terkondensasi pada permukaan karbon aktif akan semakin besar, dengan demikian adsorbat yang terserap pada karbon aktif juga semakin besar.

Kapasitas penyerapan hidrogen pada karbon aktif maksimum adalah pada karbon aktif pellet yang direaktivasi 3 jam, hal tersebut dikarenakan karbon aktif tersebut memiliki kandungan unsur karbon (C) yang lebih besar dibandingkan dengan karbon aktif bentuk granular, pellet reaktivasi 1 jam dan pellet reaktivasi 6 jam seperti terlihat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8. Hal ini berdasarkan penelitian Do, Duong Do., 2008 bahwa unsur terbesar yang terkandung pada karbon aktif adalah unsur karbon (C) yaitu sebesar 85-95% dan unsur lainnya adalah hidrogen, nitrogen, sulfur dan oksigen (Bansal R.C. et al., 2005). Artinya semakin besar kandungan karbon dalam suatu karbon aktif maka semakin besar pula potensinya sebagai penyerap.



Gambar 4.7. Komparasi Adsorpsi Isotermal rata-rata Hidrogen pada Temperatur -5°C
 ▲ Granular, ◆ Pellet Reaktivasi 1 Jam, ■ Pellet Reaktivasi 6 jam, x Pellet Reaktivasi 3 jam

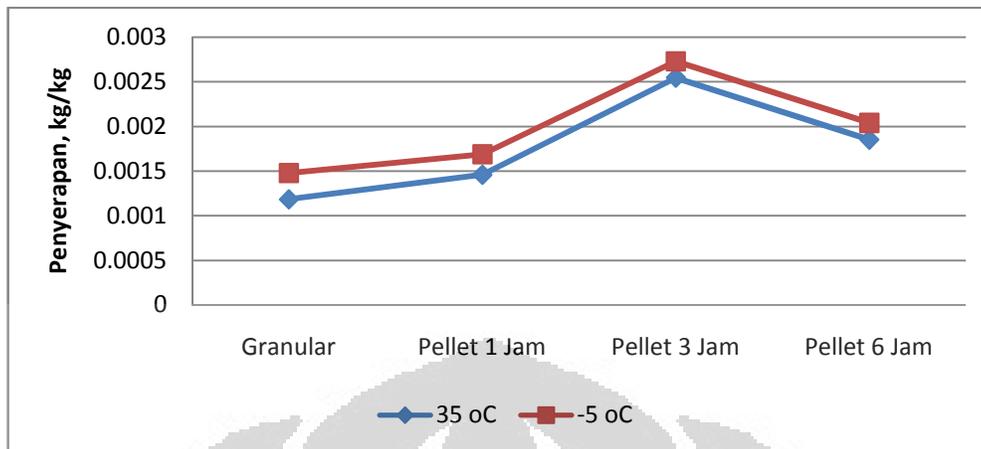


Gambar 4.8. Komparasi Adsorpsi Isotermal rata-rata Hidrogen pada Temperatur 35°C
 ▲ Granular, ◆ Pellet Reaktivasi 1 Jam, ■ Pellet Reaktivasi 6 jam, x Pellet Reaktivasi 3 jam

Tabel 4.4 Adsorpsi Isotermal Rata-Rata untuk Setiap Sampel Karbon Aktif.

Sampel	Penyerapan rata-rata maksimum (kg/kg)		Penyerapan rata-rata maksimum (% wt)	
	35 °C	-5 °C	35 °C	-5 °C
Granular	0.0011842	0.0014779	0.11842	0.14779
Pellet 1 Jam	0.0014588	0.0016873	0.14588	0.16873
Pellet 6 Jam	0.0018505	0.0020384	0.18505	0.20384
Pellet 3 Jam	0.0025442	0.0027261	0.25442	0.27261

Dari gambar 4.9 terlihat bahwa besarnya penyerapan rata rata maksimum akan meningkat pada karbon aktif berbentuk pellet dibandingkan dengan karbon aktif granular. Sementara luas permukaan karbon aktif pellet menurun dibanding karbon aktif granular. Dengan penambahan likuida lignoselulosa dalam proses pembuatan pellet di samping mengakibatkan penurunan luas permukaan terjadi juga peningkatan gaya elektrostatis. Adanya gaya elektrostatis akan meningkatkan interaksi antar molekul sehingga penyerapan (adsorpsi) hidrogen oleh karbon aktif pada temperatur ruang dapat ditingkatkan (Sun, Xiang., 2009) Dengan demikian penyerapan yang terjadi pada karbon aktif pellet disebabkan oleh gaya elektrostatisnya yang lebih besar dibanding karbon aktif granular walaupun luas permukaannya menurun. Ketika dilakukan proses reaktivasi maka gaya elektrostatis tersebut akan meningkat untuk waktu reaktivasi 3 jam dan akan menurun untuk reaktivasi 6 jam. Penyebab lainnya adalah akibat meningkatnya persentase kandungan unsur karbon dalam karbon aktif bentuk pellet yang berasal dari zat pengikat likuida lignoselulosa. Pengaruh lamanya waktu reaktivasi ternyata tidak menyebabkan peningkatan kapasitas penyerapan secara linier, tetapi terdapat titik maksimum. Dalam hal ini, karbon aktif pellet dengan waktu reaktivasi selama 3 jam memiliki kapasitas penyerapan yang maksimum dan kapasitas penyerapan tersebut akan menurun untuk karbon aktif pellet dengan waktu reaktivasi 6 jam. Berdasarkan persentase kandungan unsur karbon dalam karbon aktif pellet reaktivasi 6 jam, memang mengalami penurunan namun perlu dilakukan penelitian lebih lanjut melalui pengujian BET yang lengkap untuk mendapatkan data diameter pori dan volume porinya.



Gambar 4.9 Komparasi Adsorpsi Isotermal terhadap Sampel Karbon Aktif

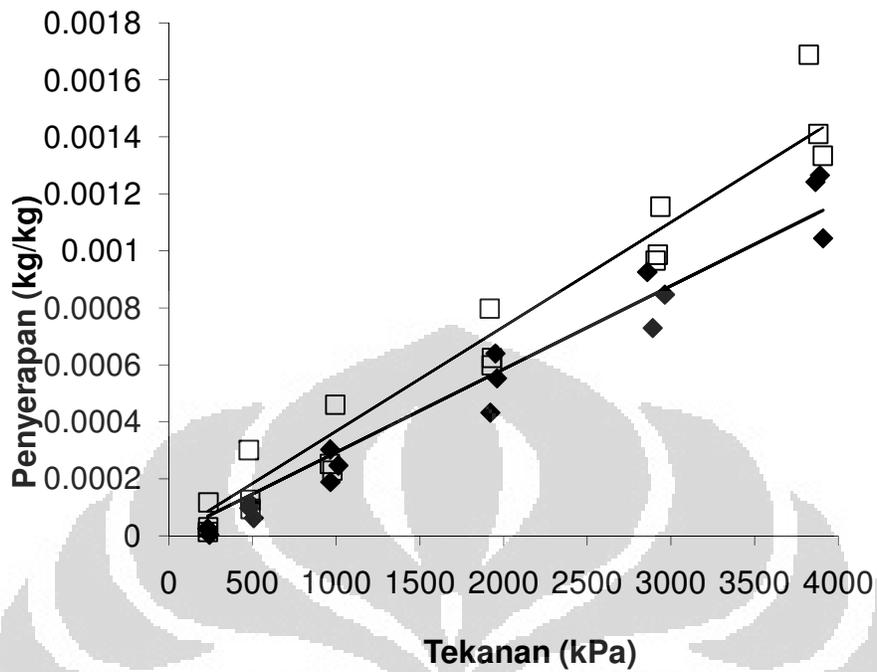
4.3 KORELASI ADSORPSI ISOTERMAL

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.

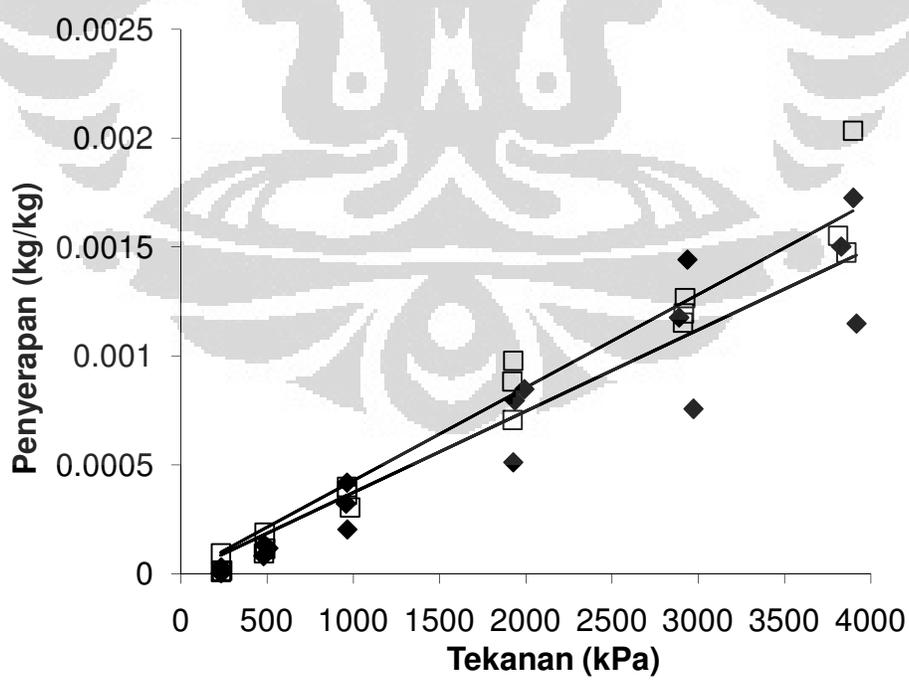
4.3.1 Persamaan Model Langmuir

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

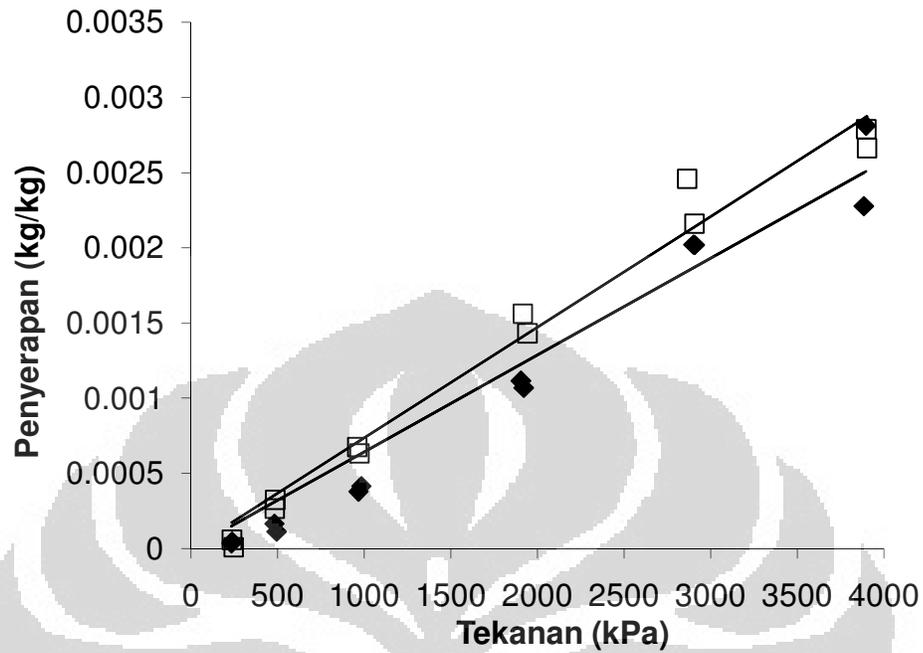
Gambar 4.10 sampai dengan Gambar 4.13 adalah grafik adsorpsi isotermal hidrogen pada karbon aktif, sementara garis tebal pada grafik tersebut adalah garis regresi dengan persamaan model Langmuir.



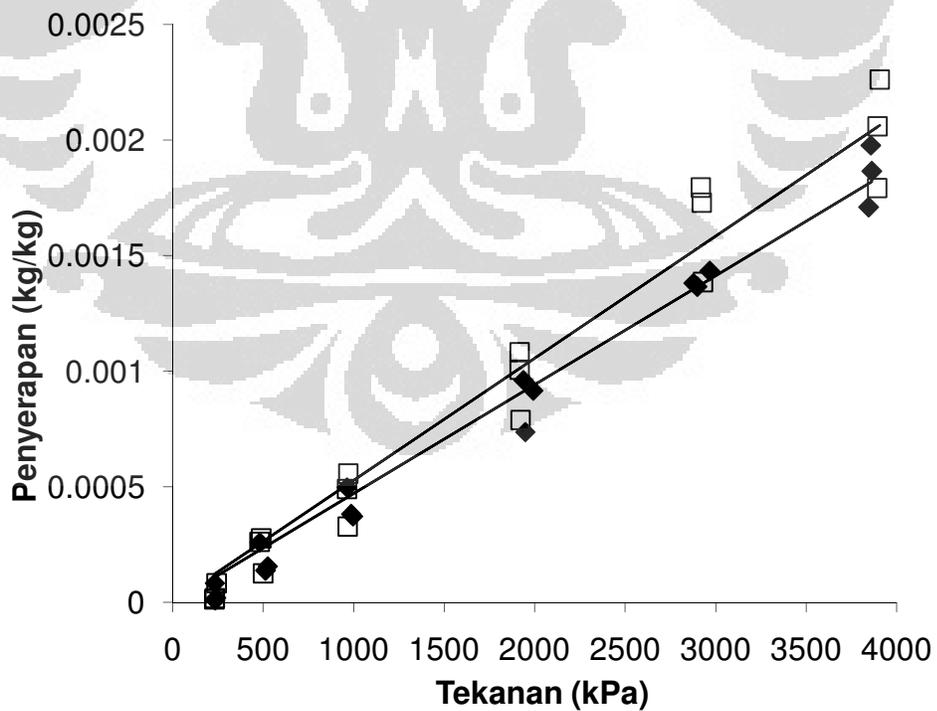
Gambar 4.10 Adsorpsi Isotermal H₂ pada Karbon Aktif Granular;
 ♦ 35°C; □ -5°C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan
 Persamaan Langmuir



Gambar 4.11 Adsorpsi Isotermal H₂ pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 1 jam;
 ♦ 35°C; □ -5°C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan
 Persamaan Langmuir



Gambar 4.12 Adsorpsi Isotermal H_2 pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 3 jam;
 ♦ $35^\circ C$; □ $-5^\circ C$; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan
 Persamaan Langmuir



Gambar 4.13 Adsorpsi Isotermal H_2 pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 6 jam;
 ♦ $35^\circ C$; □ $-5^\circ C$; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan
 Persamaan Langmuir

Tabel 4.5 adalah besaran yang didapat dengan menyelesaikan persamaan model Langmuir dengan menggunakan metode iterasi serta melalui bantuan *Software Excel*, dan dari hasil perhitungan didapat simpangan terbesar terjadi pada karbon aktif pellet reaktivasi 1 jam yaitu sebesar 22,694% dan terendah adalah pada karbon aktif pellet reaktivasi 6 jam yaitu 14,002%.

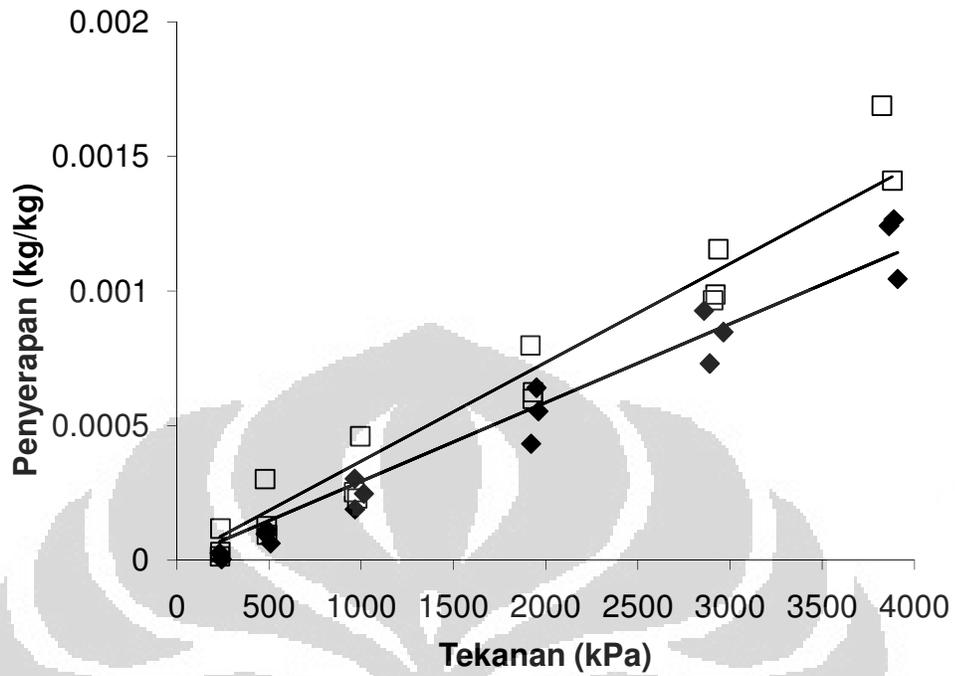
Tabel 4.5 Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Langmuir Untuk Adsorpsi Isotermal H₂

Parameter	Granular	Pellet 1 jam	Pellet 3 jam	Pellet 6 jam
C _μ (kg/kg)	6,804	16,867	16,279	29,288
Q/R (K)	324,116	135,395	135,395	92,669
k	1490	1490	1490	1490
α	0,00283	0,00269	0,00481	0,00225
b	1,50E-08	1,43E-08	2,55E-08	1,19E-08
δ(%)	17,212	22,694	14,644	14,002

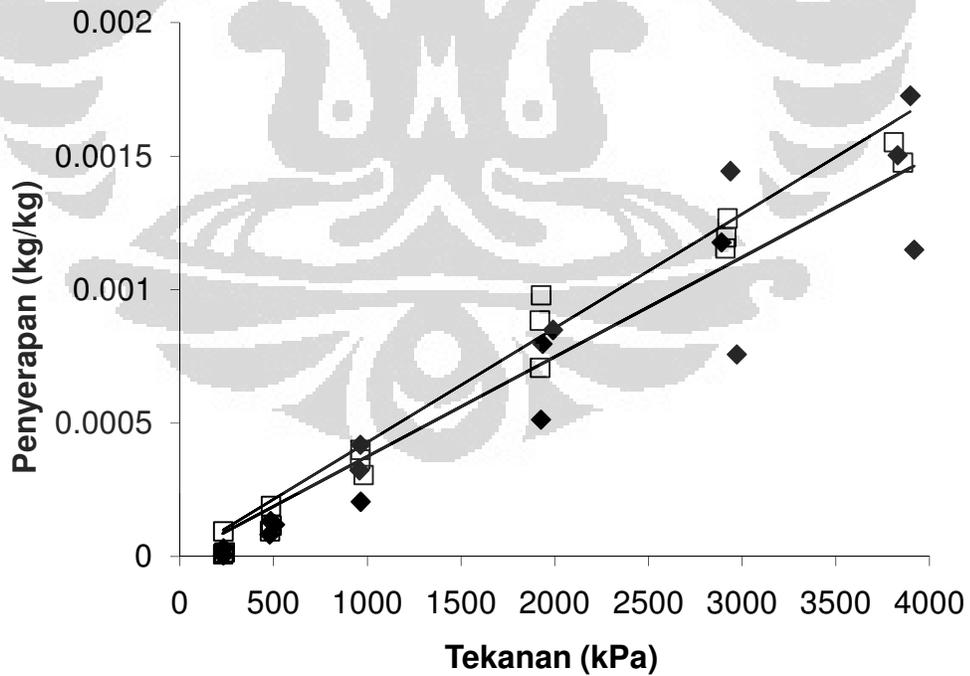
4.3.2 Persamaan Model Toth

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).

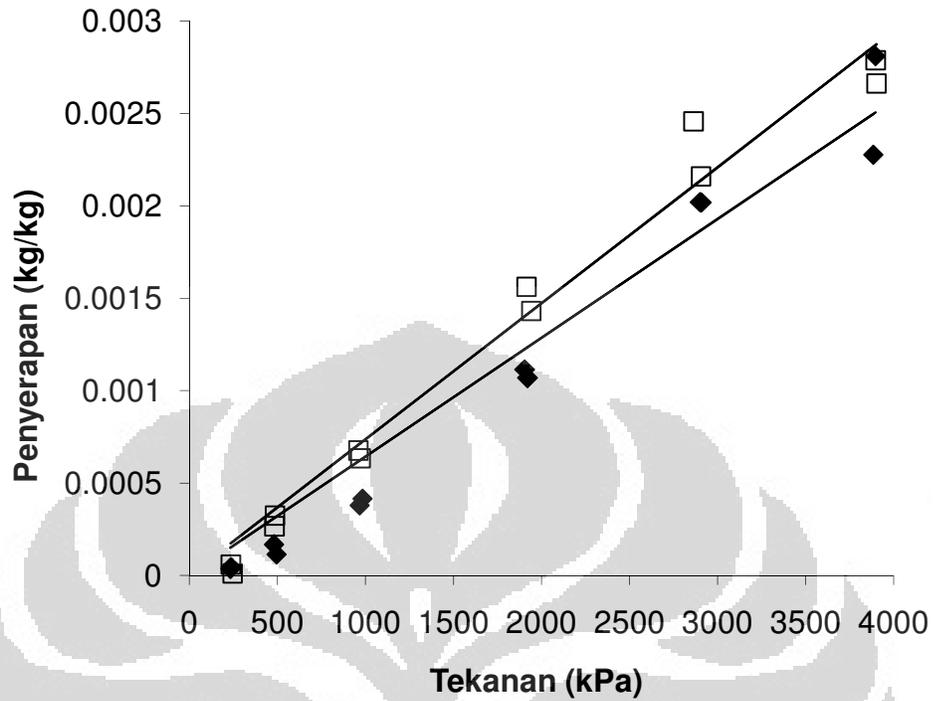
Gambar 4.14 sampai dengan Gambar 4.17 adalah grafik adsorpsi isotermal hidrogen pada karbon aktif, sementara garis tebal pada grafik tersebut adalah garis regresi dengan persamaan model Toth.



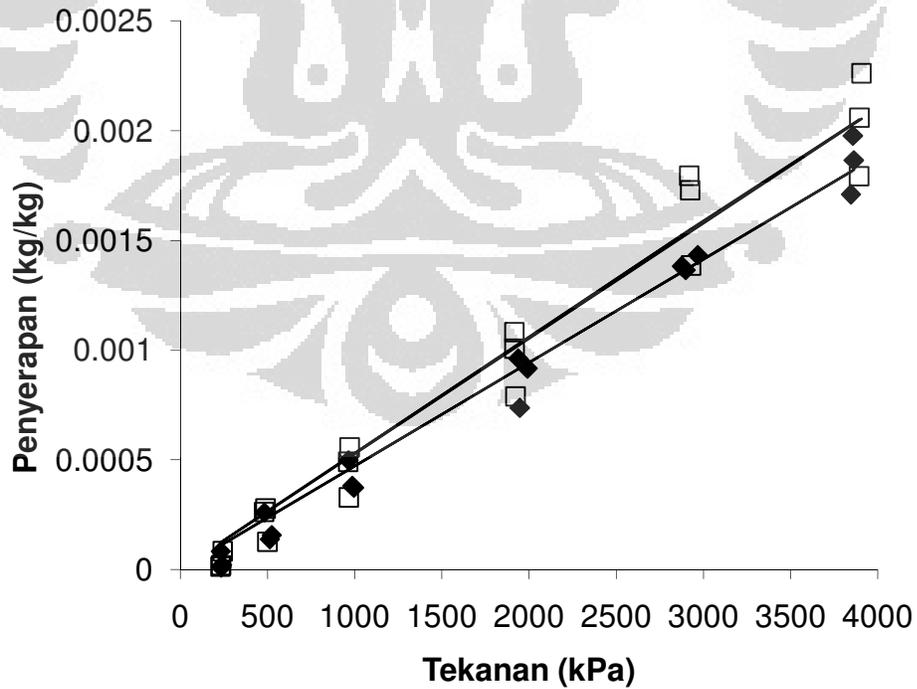
Gambar 4.14 Adsorpsi Isotermal H₂ pada Karbon Aktif Granular;
 ♦ 35°C; □ -5°C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan
 Persamaan Toth



Gambar 4.15 Adsorpsi Isotermal H₂ pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 1 jam;
 ♦ 35°C; □ -5°C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan
 Persamaan Toth



Gambar 4.16 Adsorpsi Isotermal H₂ pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 3 jam;
 ◆ 35°C; □ -5°C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan
 Persamaan Toth



Gambar 4.17 Adsorpsi Isotermal H₂ pada Karbon Aktif Pellet Reaktivasi 6 jam;
 ◆ 35°C; □ -5°C; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan
 Persamaan Toth

Tabel 4.6 adalah besaran yang didapat dengan menyelesaikan persamaan model Toth dengan menggunakan metode iterasi serta melalui bantuan *Software Excel*, dan dari hasil perhitungan didapat simpangan terbesar terjadi pada karbon aktif pellet reaktivasi 1 jam yaitu sebesar 22,694% dan terendah adalah pada karbon aktif pellet reaktivasi 6 jam yaitu sebesar 14,002%.

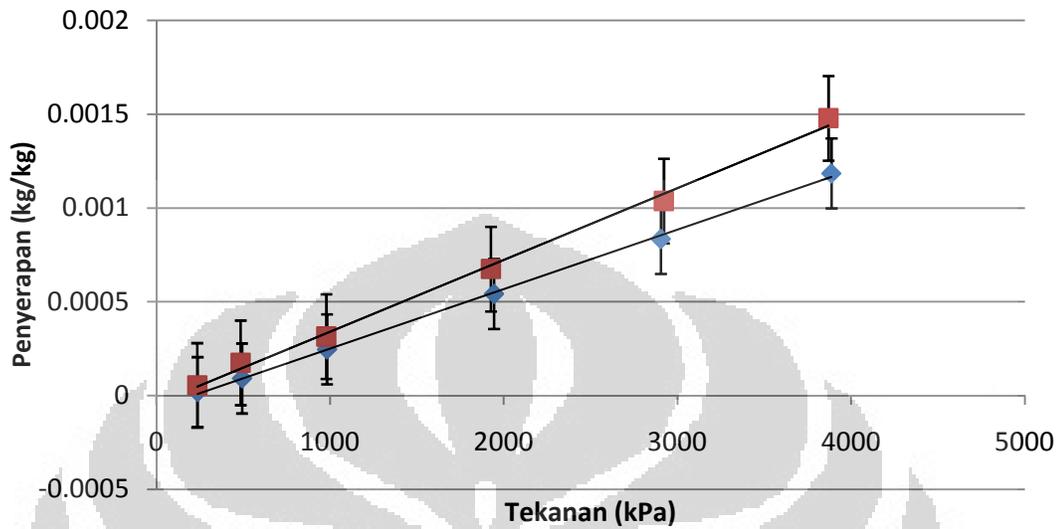
Tabel 4.6 Besaran yang Digunakan pada Persamaan Model Toth Untuk Adsorpsi Isotermal H₂

Parameter	Granular	Pellet 1 jam	Pellet 3 jam	Pellet 6 jam
C _μ (kg/kg)	0,00179	0,00249	0,00549	0,00209
Q/R (K)	323,705	135,629	135,624	98,627
k	231	232	232	231
α	1,672	2,834	2,212	4,793
b	5,70E-05	9,65E-05	7,53E-05	1,64E-04
t	55,777	56,351	56,351	56,348
δ(%)	17,212	22,694	14,644	14,002

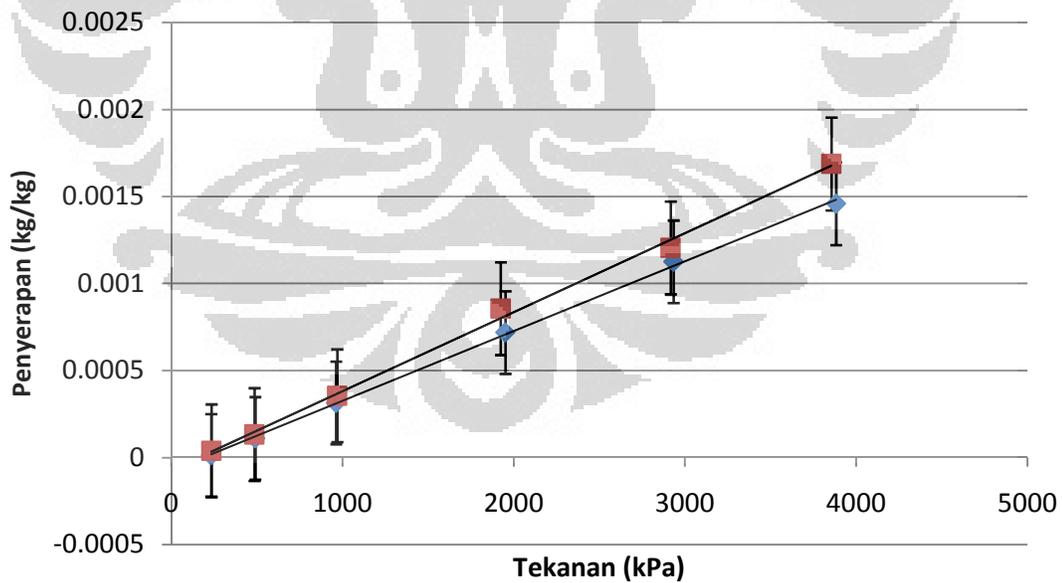
4.3.3. Persamaan Model Langmuir-Freundlich

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.

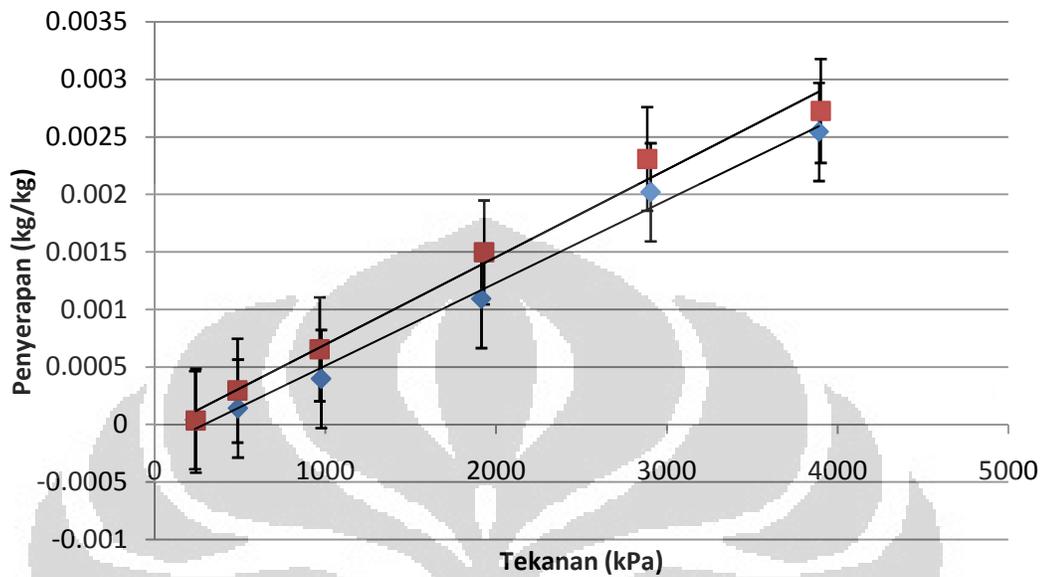
Gambar 4.18 sampai dengan Gambar 4.21 adalah grafik adsorpsi isotermal hidrogen pada karbon aktif, sementara garis tebal pada grafik tersebut adalah garis regresi dengan persamaan model Langmuir-Freundlich.



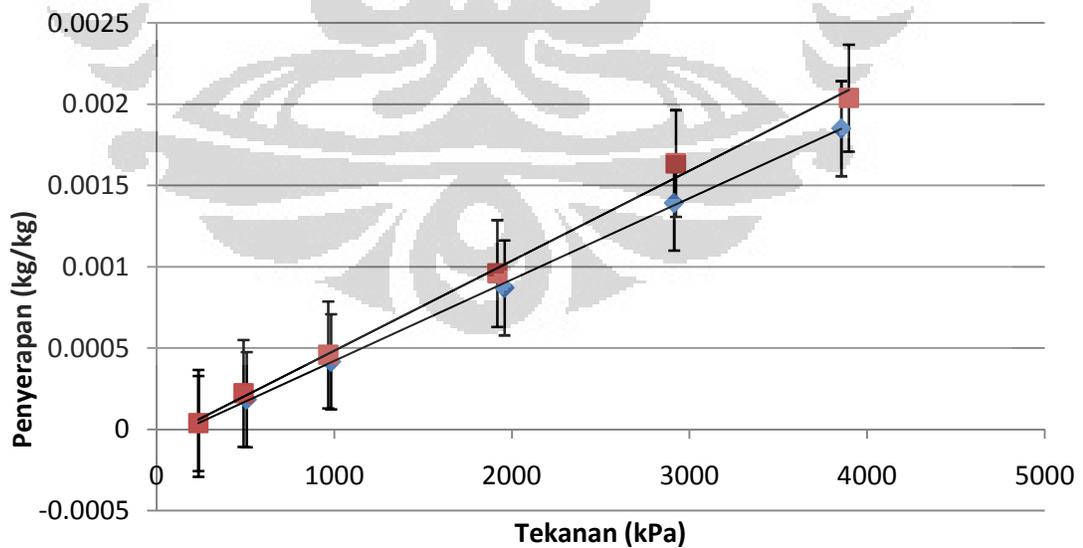
Gambar 4.18 Adsorpsi Isotermal H₂ pada Karbon Aktif Granular;
 ◆ 35°C; ■ -5° C; Garis Tebal adalah Regresi dengan
 Persamaan Langmuir-Freundlich



Gambar 4.19 Adsorpsi Isotermal H₂ pada Karbon Aktif Reaktivasi 1 jam;
 ◆ 35°C; ■ -5° C; Garis Tebal adalah Regresi dengan
 Persamaan Langmuir-Freundlich



Gambar 4.20 Adsorpsi Isotermal H₂ pada Karbon Aktif Reaktivasi 3 jam;
 ◆ 35°C; ■ -5° C; Garis Tebal adalah Regresi dengan
 Persamaan Langmuir-Freundlich



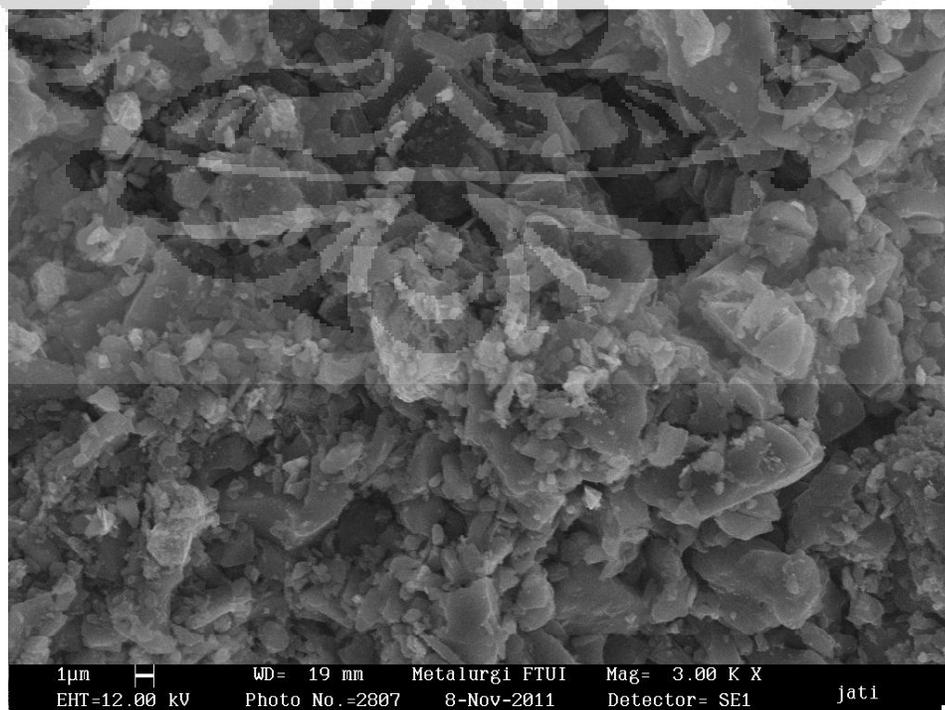
Gambar 4.21 Adsorpsi Isotermal H₂ pada Karbon Aktif Reaktivasi 6 jam;
 ◆ 35°C; ■ -5° C; Garis Tebal adalah Regresi dengan
 Persamaan Langmuir-Freundlich

Tabel 4.7 adalah besaran yang didapat dengan menyelesaikan persamaan model Langmuir-Freudlich dengan menggunakan metode iterasi serta melalui bantuan *Software Excel*, dan dari hasil perhitungan didapat simpangan terbesar terjadi pada karbon aktif granular yaitu sebesar 14,1996754354% dan terendah adalah pada karbon aktif pellet reaktivasi 6 jam yaitu sebesar 7,4885638431%.

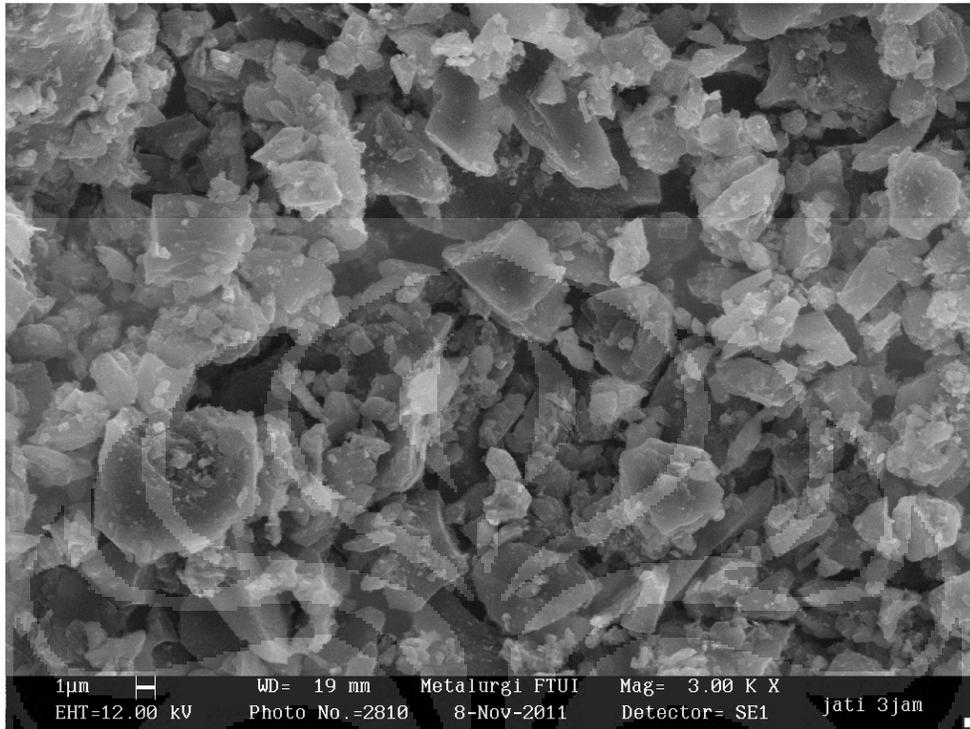
Tabel 4.7 Besaran yang Digunakan pada Persamaan Model Langmuir-Freundlich untuk Adsorpsi Isotermal H₂

Parameter	Granular	Pellet 1 jam	Pellet 3 jam	Pellet 6 jam
C _μ (kg/kg)	0,00583218	0,0055761229	0,0063745220	0,0066028088
Q/R (K)	130,2661632235	130,2661632607	130,2661740895	135,2661632244
k	0,0000898714	0,0001134430	0,0001875521	0,0001187985
t	0,7609846554	0,7610688862	0,6772608608	0,7609822840
δ(%)	14,1996754354	8,7521187551	11,2257970146	7,4885638431

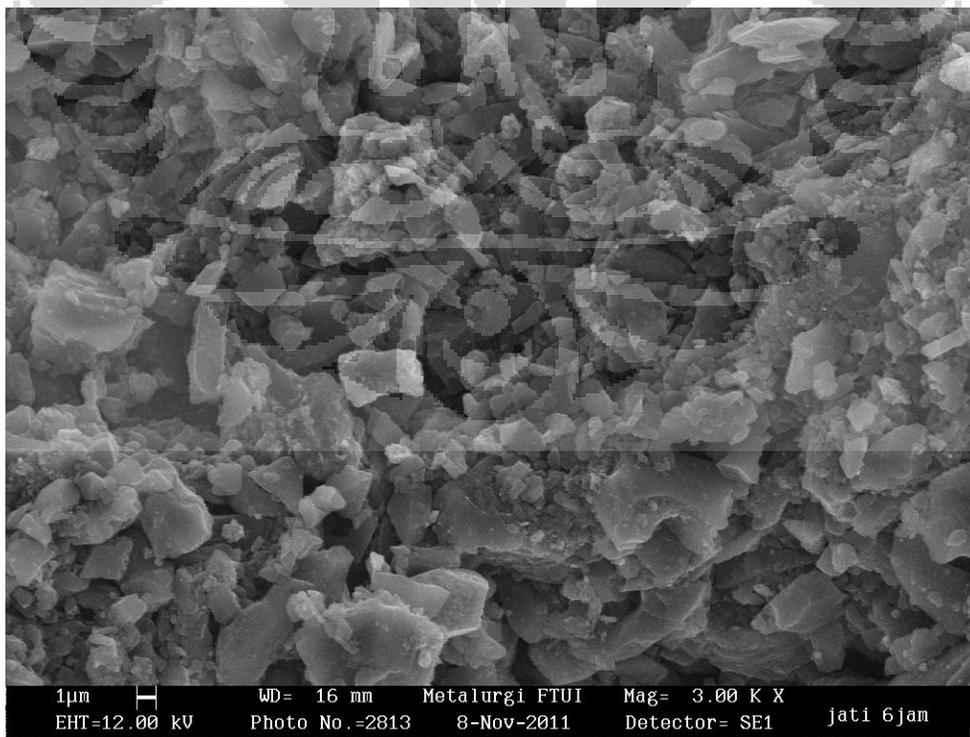
4.4 ANALISA MORFOLOGI PERMUKAAN DENGAN SEM



Gambar 4.22 Hasil SEM terhadap Pellet dengan Reaktivasi 1 jam
Pengembangan adsorben..., Jauhari Ali, FT UI, 2012

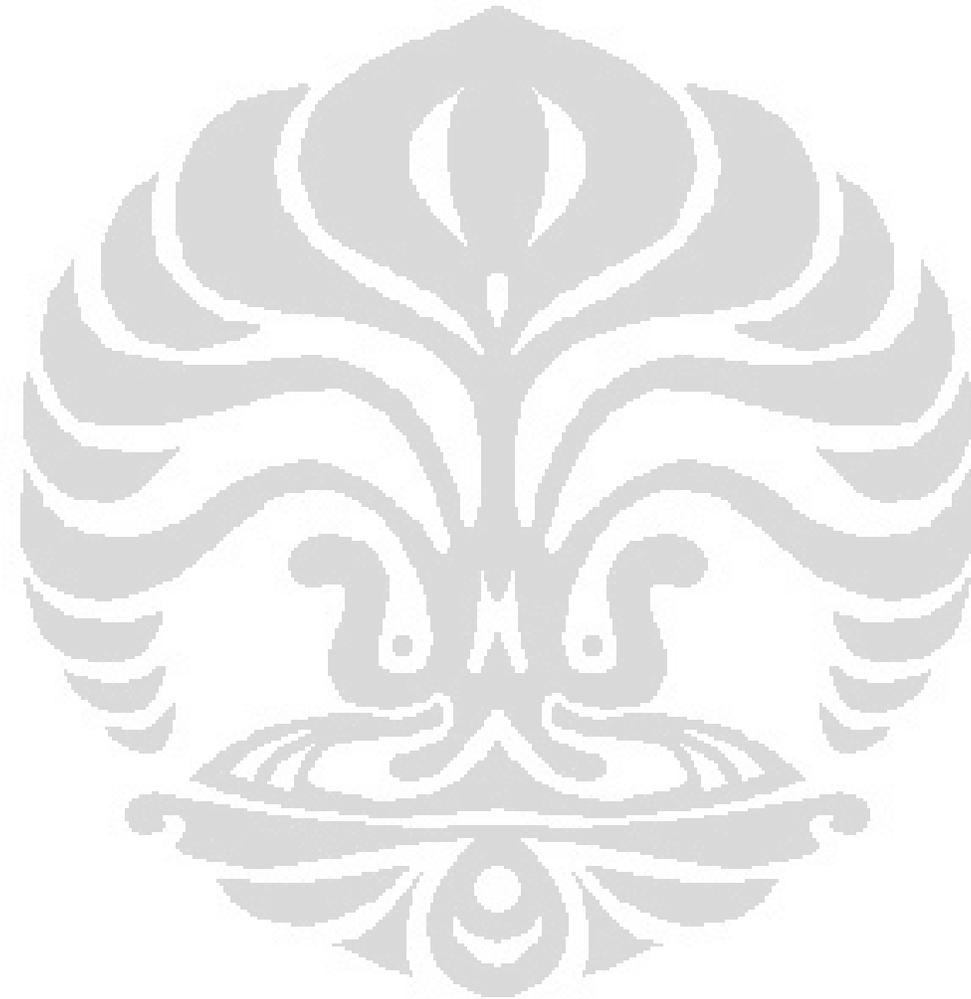


Gambar 4.23 Hasil SEM terhadap Pellet dengan Reaktivasi 3 jam



Gambar 4.24 Hasil SEM terhadap Pellet dengan Reaktivasi 6 jam

Dari hasil pengamatan menggunakan SEM dengan pembesaran sampai 3000 kali, belum didapatkan sebuah gambaran yang dapat mewakili sebuah argumentasi tentang kaitan antara kapasitas adsorpsi dengan morfologi permukaan. Hal ini dikarenakan gambar yang didapat masih belum mampu memperlihatkan distribusi ukuran partikel dan porositas dari karbon aktif.



BAB 5

KESIMPULAN

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

1. Material lignoselulosa sangat cocok sekali dipakai untuk bahan pengikat pada proses kompaksi partikel nano karbon aktif. Dengan menggunakan pengikat berbahan dasar karbon, terjadinya penambahan material asing yang akan menutup porositas yang ada pada karbon aktif akan bisa diminimalisasi.
2. Dengan jumlah perbandingan yang tepat antara partikel nano karbon aktif dan likuida lignoselulosa yaitu 4:4 dengan tanpa pengadukan manual atau 3:4 untuk pengadukan manual akan didapatkan produk hasil kompaksi (pellet) yang tetap solid setelah melewati proses reaktifasi.
3. Proses reaktifasi secara fisika ternyata juga memiliki batasan waktu yang akan menghasilkan produk dengan kemampuan adsorpsi terbaik, yang berdasarkan data dalam penelitian ini adalah proses reaktifasi fisika selama 3 jam pada suhu 700°C dengan laju aliran gas nitrogen sebesar 300 cc/menit. Jika melewati batasan waktu tersebut yakni sampai 6 jam, terjadi penurunan kapasitas adsorpsi dari produk kompaksi karbon aktif yang dihasilkan.
4. Peningkatan kapasitas adsorpsi produk kompaksi partikel nano karbon aktif dengan pengikat likuida lignoselulosa didapat dari efek reaktifasi yang diberikan. Pada proses reaktifasi terjadi reduksi zat-zat pengotor yang ada didalam karbon aktif. Semakin besar persentase kadar low karbon (C) yang ada maka nilai kapasitas adsorpsi akan semakin besar.
5. Dari hasil penelitian didapat bahwa kapasitas penyerapan (adsorpsi) karbon aktif berbentuk pellet lebih baik dibandingkan karbon aktif bentuk granular, hal tersebut dikarenakan setelah dilakukan reaktivasi terjadi peningkatan kandungan unsur karbon (C) dan pengurangan unsur-unsur pengotor dalam karbon aktif bentuk pellet. Kapasitas adsorpsi hidrogen maksimum terjadi pada karbon aktif pellet dengan reaktivasi 3 jam yaitu 0.0027261kg/kg pada temperatur -5°C dan tekanan 3899.54kPa.



DAFTAR PUSTAKA

1. 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
2. Awaludin, M.,Suryawan, B., Alhamid, M.I., Nasruddin. Adsorpsi Isothermal CO₂ pada Karbon Aktif dengan Metode Volumetrik. *Jurnal Makara*, submitted.
3. Awasthia, K., Kamalakaran, R., Singha, A.K., Srivastavaa, O.N. (2002) Ball-milled Carbon and Hydrogen Storage.*International Journal of Hydrogen Energy*, 27 , 425–432.

4. Bansal, Roop Chand., Meenakshi, Goyal.(2005).*Activated Carbon Adsorption*. USA: Taylor & Francis Group
5. Belmabkhout, Y., Frère, M., DeWeireld, G.(2004).High Pressure Adsorption Measurements: A Comparative Study of The Volumetric and Gravimetric Methods.*Measurement Science Technology*,15, 848–858
6. 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
7. David, I. *A Study on Hydrogen Trough Adsorption in Nanostructured Carbons*. These, Ecole De Mines De Paris College Doctoral
8. Do, Duong D., (2008). *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte
9. Hydrogen coordination group. Hydrogen from Natural Gas and Coal : The Road to Sustainable Energy Future. *Hydrogen Program PlanReport*, U.S. Departement Of energy
10. Inomata, K., Kanazawa. K., Uribe,Y., Hasono, H., Araki, T. (2002). Natural gas storage in activated carbon pellets without a binder. *Carbon*, 40, 87-93.
11. 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

12. Keller, Jürgen U. Staudt, Reiner. (2005). *Gas adsorption equilibria; Experimental methods and Adsorptive Isotherms*. Boston, United States of America: Springer Science & Business Media, Inc.
13. Risnasari, I., Rohendi, S. (2006). Sifat Dasar Perakal Likuida Kayu Dari Beberapa Jenis Kayu. *Peronema Forestry Journal*.
14. Risnasari, I. *Pemanfaatan limbah lignoselulosa untuk bahan perekat likuida sebagai substansi alternatif perekat sintetis*. Lecture paper, Departemen Kehutanan Fakultas Pertanian, USU.
15. Rouquerol, Jean., Rouquerol, Francois., Sing, Kenneth. (1998). *Adsorption By Powders And Porous Solids*. Elsevier.
16. Shindoa, K., Kondoa, T., Arakawab, M., Sakuraia, Y. (2003) Hydrogen adsorption / desorption properties of mechanically milled activated carbon. *Journal of Alloys and Compounds*, 359, 267–271.
17. Spencer, A. *Results of national energy Roadmap Workshop*. U.S. Departement Of Energy.
18. 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.
19. Sudibandriyo, M. High Pressure Adsorption of Methane and Hydrogen at 25°C on Activated Carbons Prepared from Coal and Coconut Shell. *Ijens Vol 11 / 02*.
20. Sudibandriyo, M.; Pan, Z., Fitzgerald, J.E., Robinson, Jr., R. L.; Gasem, K. A. M. (2003) Adsorption of Methane, Nitrogen, Carbon Dioxide and

their Binary Mixtures on Dry Activated Carbon at 318.2K and Pressures to 13.6 Mpa. *Langmuir*,19(13), 5323-5331.

21. Sun, Xiang. (2009). Charge Induced Enhancement of Adsorption for Hydrogen Storage Materials. Dissertation, Michigan Technological University
22. Suzuki, Motoyuki. *Adsorption Engineering*. (1990). Tokyo: Kodansha Ltd.
23. 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
24. Yurum, Yuda., Taralp, Alpay., Nejat Veziroglu, T. (2009). Review Storage of Hydrogen in Nanostructured Carbon Materials. *International Journal of Hydrogen Energy*,34, 3784 – 3798

LAMPIRAN