



UNIVERSITAS INDONESIA

**KAPASITAS ADSORPSI GAS HIDROGEN
MENGUNAKAN NANOTUBE KARBON
SEBAGAI ADSORBEN**

SKRIPSI

**FERRIANSYAH HASAN
0706200301**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
DESEMBER 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**KAPASITAS ADSORPSI GAS HIDROGEN
MENGUNAKAN NANOTUBE KARBON
SEBAGAI ADSORBEN**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**FERRIANSYAH HASAN
0706200301**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
DESEMBER 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Ferriansyah Hasan

NPM : 0706200301

Tanda Tangan :

Tanggal : 30 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Ferriansyah Hasan
NPM : 0706200301
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Kapasitas Adsorpsi Gas Hidrogen Menggunakan Nanotube Karbon sebagai Adsorben

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Mahmud Sudibandriyo, M.Sc., PhD. ()

Penguji : Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA ()

Penguji : Ir. Dijan Supramono, M.Sc. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah S.W.T. yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul **Kapasitas Adsorpsi Gas Hidrogen Menggunakan Nanotube Karbon sebagai Adsorben** ini. Teriring pula penulis panjatkan shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad S.A.W. beserta keluarga, sahabat dan pengikut-Nya.

Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi Teknik Kimia, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, serta untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Bapak Ir. Mahmud Sudibandriyo, M.Sc., PhD., selaku pembimbing I atas bimbingan dan masukan yang diberikan kepada penulis, serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.
2. Mami tercinta atas pengorbanan, kasih sayang, dan perhatian, sehingga penulis mampu menyelesaikan program sarjana.
3. Papi Hasan tersayang atas standar target kehidupan yang diberikan, sehingga penulis menjadi orang yang lebih kuat dari hari ke hari.
4. Endrika Ayang tersayang, atas semua kebahagiaan yang telah diberikan, sehingga penulis dapat mengetahui arti cinta tulus tak terbalaskan.
5. Ka Debby dan Dek Intan, adik kakak tersayang yang selalu hadir dalam kehidupan penulis.
6. Sahabat penulis, Putu, Bang Rony, Bang Darr, Pepen, Ody, Ida, Icis, Bang Yuda, Herry S, Elber, Ardha, atas doa yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
7. Rekan seperjuangan dalam bisnis jam tangan, yang rela memberikan pengertiannya selama ini kepada penulis.

8. Teman seperjuangan penulis, Bang Gozza yang setia menemani penulis serta banyak memberikan masukan pada penulis selama proses pembuatan skripsi ini.
9. Rekan-rekan Teknik Kimia khususnya angkatan 2007 yang telah mengisi keseharian penulis.
10. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata, penulis berharap Allah S.W.T. berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu, khususnya hal-hal yang berkenaan dengan kapasitas adsorpsi gas hidrogen menggunakan nanotube karbon sebagai adsorben ini.

Depok, 30 Desember 2009

Penulis

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

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

Nama : Ferriansyah Hasan
NPM : 0706200301
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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:

Kapasitas Adsorpsi Gas Hidrogen
Menggunakan Nanotube Karbon sebagai Adsorben

beserta perangkat yang ada. Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan 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 : 30 Desember 2009
Yang menyatakan

(Ferriansyah Hasan)

ABSTRAK

Nama : Ferriansyah Hasan
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Kapasitas Adsorpsi Gas Hidrogen Menggunakan Nanotube Karbon sebagai Adsorben

Salah satu cara yang sangat menjanjikan dalam teknologi penyimpanan gas adalah metoda “adsorptive storage”, dimana gas tersebut disimpan dalam keadaan teradsorpsi pada suatu “adsorben” tertentu. *Nanotube carbon* (NTC) merupakan jenis adsorben sintesis yang memiliki kapasitas adsorpsi hidrogen sehingga dapat menjadi alternatif yang menjanjikan sebagai *storage* hidrogen. Penelitian ini mengembangkan *storage* hidrogen, yang terdiri dari beberapa tahap yaitu persiapan *storage* hidrogen, preparasi adsorben dan alat adsorpsi, pengukuran helium void volume, uji adsorpsi dan desorpsi hidrogen pada tekanan tinggi, serta permodelan sederhana adsorpsi Langmuir. Adsorben yang digunakan adalah NTC komersial dan lokal dalam bentuk curah dan *compacted* yang dilakukan pada kondisi isothermal yaitu 25°C. Uji adsorpsi tekanan tinggi dilakukan untuk setiap kondisi nanotube karbon (curah dan *compacted*) sampai diperoleh kurva adsorpsi isothermal dengan kenaikan tekanan 1 Mpa sampai 6 Mpa.

Hasil yang ditunjukkan oleh uji adsorpsi gas hidrogen tekanan tinggi pada kondisi isothermal (25 °C), yaitu adsorpsi hidrogen dengan menggunakan variasi tiga adsorben akan meningkat kapasitas adsorpsinya seiring dengan meningkatnya tekanan. NTC lokal curah mempunyai kapasitas adsorpsi yang lebih rendah dibandingkan dengan kapasitas adsorpsi NTC komersial. Pada tekanan 600 psia, kapasitas adsorpsi NTC lokal sekitar 0,38 %, sedangkan NTC komersil curah pada tekanan yang sama daya adsorpsinya sekitar 0,6 %. Secara umum, data adsorpsi hidrogen dengan menggunakan variasi tiga adsorben dapat direpresentasikan dengan baik oleh permodelan Langmuir, dengan % deviasi NTC lokal curah sebesar 5 – 6 %, dan % deviasi pada NTC komersial curah sebesar 0,004 – 5. Sedangkan untuk % deviasi NTC komersial *compacted* sekitar 9 – 13 %.

Kata kunci:

Adsorpsi, Storage Hidrogen, Nanotube Karbon, Langmuir

ABSTRACT

Name : Ferriansyah Hasan
Study Program : Chemical Engineering
Title : Adsorption Capacity of Hydrogen Gas using Nanotube Carbon as Adsorbent

One of the most promising way in the gas storage technology is a method of "adsorptive storage", where the gas is stored in an "adsorbent". Carbon nanotubes (NTC) is a type of synthesis adsorbent which has hydrogen adsorption capacity, so that would be a promising alternative for hydrogen storage. This research consists of several stages; preparation of hydrogen storage, preparation adsorbent and adsorption equipment, measurement of Helium void volume, and also hydrogen adsorption and desorption at high pressure, as well as simple modeling Langmuir adsorption. This research using a commercial and local NTC in bulk and compacted form, which treated in an isothermal conditions of 25°C. High pressure adsorption analysis is performed for each condition of carbon nanotubes (bulk and compacted) to obtain the isothermal adsorption curve with increasing of pressure from 1 to 6 Mpa.

The results shown by high pressure adsorption of hydrogen gas at isothermal conditions (25 ° C) is the adsorption of hydrogen by using variations of three adsorbent, will increase the adsorption capacity with the increase of pressure. Local NTC bulk adsorption capacity is lower than the adsorption capacity of commercial NTC. At pressure of 600 psia, local NTC adsorption capacity is around 0.38%, while the bulk of commercial NTC at the same pressure is around 0.6%. In general, the hydrogen adsorption data using variations of three adsorbent could be well represented by Langmuir models, the deviation of the local NTC is about 5 to 6%, the deviation in the bulk of commercial NTC is about 0.004 to 5%, and the deviation of NTC commercial compacted is about 9 to 13%.

Key words:

Adsorption, Hydrogen storage, Carbon nanotube, Langmuir

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Adsorpsi	6
2.1.1 Jenis- Jenis Adsorpsi.....	7
2.1.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi.....	8
2.1.3 Kesetimbangan Adsorpsi	9
2.2 Model – Model Adsorpsi	11
2.2.1 Model Adsorpsi Isotermis Absolut	11
2.2.2 Model Adsorpsi Isotermis Gibbs	14
2.3 Jenis-Jenis Adsorben.....	16
2.3.1 Adsorben Tak Berpori.....	17
2.3.2 Adsorben Berpori.....	17
2.4 Nano Karbon	18
2.4.1 <i>Multi-Walled Nanotube Carbon</i> (MWNTC) Produksi Lokal	20
2.4.2 <i>Multi-Walled Nanotube Carbon</i> (MWNTC) Produk Komersial.....	21
2.5 Penyimpanan Hidrogen.....	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Diagram Alir Penelitian	23
3.2 Prosedur Penelitian.....	24
3.2.1 Persiapan Alat dan Bahan	24

3.2.1.1	Alat	24
3.2.1.2	Bahan	24
3.2.2	Persiapan <i>Hydrogen Storage</i>	24
3.2.3	Persiapan Nanotube Karbon.....	25
3.2.3	Pengujian Adsorpsi Hidrogen	25
3.2.4	Pengujian Desorpsi Hidrogen.....	27
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1	Hasil Preparasi Adsorben.....	29
4.2	Hasil Preparasi Peralatan Adsorpsi	31
4.3	Hasil Kalibrasi Pada Volume Dozing Cylinder.....	34
4.4	Hasil Kalibrasi Void Volume.....	34
4.5	Hasil Uji Adsorpsi Tekanan Tinggi	37
4.6	Representasi Data Adsorpsi Dengan Model Langmuir.....	39
4.7	Hasil Uji Adsorpsi Dan Desorpsi	41
BAB V	KESIMPULAN.....	43
5.1	Kesimpulan	43
5.2	Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN	47

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir dan BET 10
Gambar 2.2	Fluktuasi Energi Permukaan 12
Gambar 2.3	Grafik Adsorpsi Isotermis Gibbs 14
Gambar 2.4	Kurva Adsorpsi Isotermis Gibbs 16
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian 23
Gambar 3.2	<i>Storage</i> Hidrogen 24
Gambar 3.3	Skema Alat untuk Uji Adsorpsi Hidrogen 28
Gambar 4.1	<i>Transmission Electron Microscopy (TEM)</i> dan <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i> 30
Gambar 4.2	Raman Spectra 30
Gambar 4.3	<i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i> NTC DTK 31
Gambar 4.4	X-Ray Diffraction (XRD) NTC DTK 31
Gambar 4.5	<i>Hydrogen Storage</i> 32
Gambar 4.6	Rangkaian Peralatan Uji Adsorpsi 32
Gambar 4.7	Tampilan <i>Software</i> Pencatat Data 33
Gambar 4.8	Uji Kebocoran dengan Gas Helium pada Tekanan Tinggi 33
Gambar 4.9	Kurva Adsorpsi Gas Hidrogen 37
Gambar 4.10	Perbandingan Adsorpsi Hidrogen dengan Permodelan Langmuir 41
Gambar 4.11	Perbandingan Adsorpsi dan Desorpsi Hidrogen dengan Variasi Adsorben 42

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1.1 Beberapa Kemampuan Penyimpanan Hidrogen oleh Nanotube Karbon	3
Tabel 2.1 Perbedaan Adsorpsi Fisika dan Adsorpsi Kimia	8
Tabel 2.2 Tipe, Karakteristik, Kegunaan, dan Kerugian Adsorben	18
Tabel 4.1 Spesifikasi NTC dari CAS	29
Tabel 4.2 Perhitungan <i>Volume Dozing Cylinder</i>	34
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Berat Adsorben	35
Tabel 4.4 Void Volume Nanotube Karbon Komersil Curah	36
Tabel 4.5 Void Volume Nanotube Karbon Lokal Curah	36
Tabel 4.6 Void Volume Nanotube Karbon Komersial <i>Compacted</i>	36
Tabel 4.7 Adsorpsi Hidrogen dengan Arang Aktif	39
Tabel 4.8 Adsorpsi Hidrogen Nanotube Karbon Komersial Curah	40
Tabel 4.9 Adsorpsi Hidrogen Nanotube Karbon Lokal Curah	40
Tabel 4.10 Adsorpsi Hidrogen Nanotube Karbon Komersial <i>Compacted</i>	40

DAFTAR LAMPIRAN

		Halaman
Lampiran 1	Perhitungan Kapasitas Storage Gas Hidrogen Tanpa Menggunakan <i>Nanotube Carbon</i>	47
Lampiran 2	Perhitungan Kapasitas Storage Gas Hidrogen dengan Menggunakan <i>Nanotube Carbon</i>	48



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sumber daya alam yang terbatas menyebabkan ketersediaan minyak bumi dan sumber daya energi semakin menipis, padahal kebutuhan energi semakin tinggi seiring dengan berjalannya waktu. Teknologi yang semakin berkembang menyebabkan ketergantungan yang tinggi terhadap energi dari bahan bakar fosil ini, karena telah menjadi kebutuhan primer untuk menunjang kehidupan.

Energi bahan bakar juga memegang peranan penting untuk menjalankan proses industrialisasi, transportasi, dan kehidupan sosial. Namun, cadangan minyak yang semakin menurun, juga harga minyak mentah dunia yang terus menerus berfluktuasi dengan kecenderungan menaik sehingga membahayakan keuangan negara untuk keperluan subsidi. Hal ini menyebabkan kebijakan pemerintah yang berubah dalam arah komposisi pemakaian energi nasional didalam perencanaannya yang akan menurunkan pemakaian bahan bakar minyak. Mengenai kebijakan energi nasional, komposisi pemakaian energi nasional kedepan akan semakin mendominasi ke arah jenis energi yang lebih ramah lingkungan serta jenis sumber energi baru dan terbarukan. Sumber energi hidrogen termasuk dalam kategori ini. Hidrogen diharapkan akan memainkan peran yang sangat vital sebagai bahan bakar masa depan yang ramah lingkungan karena apabila dibakar tidak menghasilkan polutan. Pada umumnya hidrogen diaplikasikan untuk sel bahan bakar dan kendaraan bermotor. Disamping itu, hidrogen telah banyak dipakai sebagai bahan baku dalam jumlah yang besar untuk industri- industri kimia, pengilangan minyak dan makanan.

Meskipun hidrogen adalah sumber energi yang dapat diregenerasi, namun masih ada tiga aspek penting dalam penggunaan gas hidrogen sebagai sumber energi secara ekonomis, yaitu : produksi, *storage*, dan distribusi. Bagaimanapun, sampai saat ini teknologi di ketiga aspek tadi belum ada yang mencapai tahap yang mapan untuk siap diimplementasikan dalam masyarakat secara luas. Oleh karena itu, pengembangan teknologi terutama pada aspek penyimpanan sumber

energi hidrogen merupakan tugas yang sangat penting untuk menunjang kehidupan manusia.

Dalam permasalahan penyimpanan hidrogen, salah satu cara yang sangat menjanjikan dalam teknologi penyimpanan gas adalah metoda “*adsorptive storage*”, dimana gas tersebut disimpan dalam keadaan teradsorpsi pada suatu “*adsorben*” tertentu. Molekul gas dalam keadaan teradsorpsi mempunyai densitas yang mendekati dengan densitas cairnya. Dengan menggunakan karbon aktif sebagai adsorben, dapat diperkirakan bahwa cara penyimpanan gas dengan metoda ini dapat meningkatkan kapasitas penyimpanannya bahkan sampai dua kali lipat dengan tekanan yang hanya 10% dari tekanan senyawa tersebut [Zhou, 1998].

Adsorpsi gas pada dasarnya terjadi karena adanya gaya Van der Waals antara molekul gas dengan molekul adsorben yang menyebabkan molekul gas tersebut terperangkap didalam suatu struktur pori adsorben tersebut. Dengan demikian kemampuan adsorpsi suatu adsorben akan sangat bergantung dari pasangan molekul gas serta struktur pori dari adsorbennya. Molekul gas hidrogen yang mempunyai diameter kinetik sekitar 2,89 Å, kemungkinan akan lebih mudah teradsorpsi pada adsorben yang memiliki struktur lapisan dengan jarak 2-3 kali diameter molekul gas hidrogen [Sudibandriyo, 2003]. Tentu saja kondisi diameter pori yang kecil serta distribusi pori yang sempit akan sulit diperoleh dari jenis adsorben alam seperti karbon aktif. Oleh karena itu, perlu diteliti potensi adsorpsi hidrogen pada jenis-jenis adsorben sintesis yang lebih menjanjikan misalnya *nanotube carbon* (NTC).

Beberapa hasil penelitian kemampuan *Single Wall Nanotube* (SWNT), *Multi Wall Nanotube* (MWNT), dan Nanofiber grafit (GNF) dalam menyimpan gas hidrogen dapat terlihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1.1 Beberapa Kemampuan Penyimpanan Hidrogen oleh Nanotube Karbon

Adsorben	Kapasitas Adsorpsi Hidrogen (% berat)	Kondisi		Sumber
		Temperatur (K)	Tekanan (Mpa)	
SWNT (<i>low purity</i>)	5 – 10	273	0,04	Dillon, dkk.,1997
SWNT (<i>high purity</i>)	3,5 -4,5	298	0,04	Dillon, dkk.,1997
SWNT (<i>50% purity</i>)	4	300	12	Liu, dkk.,1999
SWNT	0,1	300 - 520	0,1	Hirscher, dkk.,2002
SWNT	10	300	0,04	Dillon, dkk.,1999
MWNT	5	300	10	Zhu, dkk.,2000
GNF (tubular)	11,26	298	11,35	Chambers, dkk.,1998
CNF	10	300	10,1	Fan, dkk.,1999
CNF	5	300	10,1	Cheng, dkk.,2000
GNF	10	300	8 - 12	Yang, dkk.,2000

Dari **Tabel 1** terlihat bahwa kemampuan penyimpanan hidrogen pada nanotube karbon cukup bervariasi, bergantung pada temperatur, tekanan serta jenis nanotube karbon. Bahkan beberapa penelitian menunjukkan ketidakkonsistenan hasilnya.

Adsorben yang akan digunakan pada penelitian kali ini adalah NTC yang dihasilkan dari research group kami. Namun potensi produk belum pernah diuji kapasitasnya sebagai adsorben, dengan melakukan penelitian ini diharapkan kapasitas NTC lokal sebagai adsorben dapat diketahui, sebagai acuan digunakan NTC komersial dari luar negeri.

Di akhir penelitian ini, diharapkan dapat memberikan gambaran yang sesuai tentang nanotube karbon, agar dapat diaplikasikan untuk penyimpanan gas hidrogen di Indonesia. Hal ini dilakukan dengan cara pengambilan data adsorpsi tekanan tinggi dan evaluasi model adsorpsi Langmuir yang sesuai untuk adsorpsi tekanan tinggi tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya serta kriteria dalam pembuatan hidrogen storage, maka permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan menjadi, antara lain:

1. Bagaimanakah pengaruh tekanan terhadap kemampuan nanotube karbon dalam bentuk curah maupun *compacted* untuk menyimpan gas hidrogen?
2. Bagaimanakah kapasitas adsorpsi gas hidrogen dari NTC lokal dibandingkan dengan NTC komersial?
3. Bagaimanakah profil model sederhana Langmuir untuk adsorpsi isotermis H₂ dengan menggunakan NTC sebagai adsorben?

1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan judul penelitian yang dikerjakan oleh penulis, tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini antara lain untuk:

1. Mengetahui pengaruh tekanan terhadap kemampuan nanotube karbon dalam bentuk curah maupun *compacted* untuk menyimpan gas hidrogen.
2. Mengetahui kapasitas adsorpsi gas hidrogen dari NTC lokal dan NTC komersial.
3. Dapat mengetahui profil model sederhana Langmuir untuk adsorpsi isotermis H₂ dengan menggunakan NTC sebagai adsorben.

1.4 Batasan Masalah

Aspek yang dibahas berdasarkan tujuan dari penelitian ini, yaitu dibatasi pada permasalahan sebagai berikut:

1. Menggunakan NTC (nanotube carbon) sebagai adsorben dalam bentuk curah dan *compacted*.
2. Menggunakan NTC dari Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, sebagai acuan digunakan NTC komersial dari luar negeri.
3. Penelitian kapasitas adsorpsi hidrogen dengan menggunakan nanotube karbon dilakukan pada kondisi isotermal yaitu 25°C.
4. Rentang variasi tekanan sistem yang digunakan adalah 0 -6 Mpa.

5. Adsorbat yang digunakan adalah gas hidrogen.
6. Uji adsorpsi dilakukan dengan metoda volumetrik.

1.5 Sistematika Penulisan

Tugas skripsi yang berjudul “Kapasitas adsorpsi gas hidrogen menggunakan nanotube karbon sebagai adsorben” ini pembahasannya akan dibagi menjadi lima bab. Hal tersebut dimaksudkan agar dapat lebih mudah memahami tahapan penelitian ini secara lebih sistematis. Kelima bab yang telah tersebut diatas dapat dirinci sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang prinsip dasar ilmu yang berkaitan dengan penelitian untuk menjelaskan masalah yang dibahas.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini memberi gambaran tentang diagram alir penelitian, prosedur dan langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian untuk mencapai tujuan penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan mengenai hasil yang diperoleh pada saat preparasi adsorben, preparasi alat adsorpsi, pengukuran helium *void volume*, dan kurva isothermal adsorpsi dan desorpsi, serta permodelan sederhana adsorpsi Langmuir.

BAB V KESIMPULAN

Bab ini berisi tentang inti dari tujuan dilakukannya penelitian, yang meliputi data - data hasil penelitian dan kesimpulan - kesimpulan yang diambil berdasarkan hasil pengamatan dari data-data tersebut.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses dimana komponen-komponen tertentu dari suatu fasa fluida berpindah ke permukaan zat padat yang digunakan sebagai material berpori (adsorben). Secara umum partikel-partikel kecil zat penyerap ditempatkan di dalam suatu hampan tetap (*fixed bed*), dan fluida lalu dialirkan melalui hampan tersebut sampai adsorben itu mendekati jenuh dan penyerapan yang diinginkan tidak dapat lagi berlangsung (Mc Cabe et al., 1999). Adsorpsi biasanya dilakukan pada *fixed vertical beds* dari adsorben granular yang berpori (Walas, 1990).

Molekul-molekul pada zat padat mempunyai gaya dalam keadaan tidak seimbang. Ketidaksetimbangan gaya-gaya tersebut menyebabkan zat padat tersebut cenderung menarik zat-zat lain atau gas yang bersentuhan pada permukaannya. Fenomena konsentrasi zat pada permukaan padatan disebut fasa teradsorb atau adsorbat, sedangkan zat yang akan menyerap atau menariknya disebut adsorben.

Proses adsorpsi pada suatu adsorben terutama terjadi pada pori-pori kecilnya (*micropore*). Sementara itu, *macropore* hanya berperan sebagai tempat transfer adsorbat dari permukaan luar ke *micropore* (Ding dan Bhatia, 2003). Daya serap adsorben terhadap gas bergantung pada jenis adsorbat, karakteristik adsorben, temperatur, tekanan. Adsorpsi gas pada permukaan zat padat menyebabkan terjadinya kesetimbangan antara gas yang terserap dengan gas sisa. Oleh karena itu, daya serap adsorben dipengaruhi oleh besarnya tekanan dan temperatur. Semakin besar tekanan, semakin banyak pula zat yang diserap. Dan sebaliknya, semakin tinggi temperatur untuk adsorpsi fisika, semakin sedikit jumlah zat yang terserap.

2.1.1 Jenis-jenis Adsorpsi

Berdasarkan interaksi molekular antara permukaan adsorben dengan adsorbat, adsorpsi dibagi menjadi dua bagian, yaitu (Treybal, 1980; Herawaty, 1993):

a. Adsorpsi Fisis

Adsorpsi fisis adalah adsorpsi yang terjadi karena adanya gaya Van Der Waals (gaya tarik-menarik yang relatif lemah) antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Adsorpsi ini terjadi apabila suatu adsorbat dialirkan pada permukaan adsorben yang bersih. Pada adsorpsi fisis, adsorbat tidak terikat 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. Adsorpsi fisis adalah suatu peristiwa yang reversibel, sehingga jika kondisi operasinya diubah akan membentuk kesetimbangan baru. Peristiwa adsorpsi gas terjadi sangat cepat. Proses adsorpsi disertai dengan pengeluaran panas sesuai dengan prinsip Le Chatelier. Panas yang terjadi atau dikeluarkan pada peristiwa adsorpsi disebut panas adsorpsi. Panas adsorpsi fisis umumnya rendah (5 – 10 kkal/grmol gas) dan terjadi pada temperatur rendah yaitu di bawah temperatur didih adsorbat. Hal ini yang menyebabkan kesetimbangan dari proses adsorpsi fisis reversibel dan berlangsung sangat cepat. Proses adsorpsi fisis terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi, sehingga pada proses tersebut akan membentuk lapisan multilayer pada permukaan adsorben. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi fisis dapat diputuskan dengan mudah, yaitu dengan cara pemanasan pada temperatur 150 – 200 °C selama 2 – 3 jam.

b. Adsorpsi Kimia

Adsorpsi kimia adalah 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. Untuk adsorpsi kimia, yang paling penting adalah spesifikasi dan kepastian pembentukan monolayer. Pendekatannya adalah dengan menentukan kondisi reaksi, sehingga hanya adsorpsi kimia yang terjadi dan hanya terbentuk monolayer. Adsorpsi kimia bersifat tidak reversibel dan umumnya

terjadi pada temperatur tinggi di atas temperatur kritis adsorbat, sehingga panas adsorpsi yang dilepaskan juga tinggi (10 –100 kkal/grmol). Sedangkan untuk dapat terjadinya peristiwa desorpsi dibutuhkan energi lebih tinggi untuk memutuskan ikatan yang terjadi antara adsorben dan adsorbat. Energi aktivasi pada adsorpsi kimia berkisar antara 10 – 60 kkal/grmol.

Perbedaan antara adsorpsi kimia dan fisika dapat dilihat pada **Tabel 2.1** berikut ini;

Tabel 2.1 Perbedaan Adsorpsi Fisika dan Adsorpsi Kimia

No.	Parameter	Adsorpsi Fisika	Adsorpsi Kimia
1.	Adsorben	Semua jenis	Terbatas
2.	Adsorbat	Semua gas	Kecuali gas mulia
3.	Jenis ikatan	Fisika	Kimia
4.	Panas adsorpsi	5-10 kkal/gmol gas	10-100 kkal/gmol gas
5.	Energi aktivasi	Kurang dari 1 kkal/gmol	10-60 kkal/gmol
6.	Reversibilitas	Reversible	Irreversible
7.	Tebal lapisan	Jamak (multilayer)	Tunggal (monolayer)
8.	Kecepatan adsorpsi	Besar	Kecil
9.	Jumlah zat teradsorpsi	Sebanding dengan kenaikan tekanan	Sebanding dengan banyaknya inti aktif adsorben yang dapat bereaksi dengan adsorbat
11.	Kegunaan	Untuk penentuan luas permukaan dan ukuran pori	Untuk penentuan daerah pusat aktif dan penjelasan kinetika reaksi permukaan

2.1.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi

Jumlah fluida yang teradsorpsi pada permukaan adsorben dipengaruhi oleh faktor-faktor (Bahl et al., 1997; Treybal, 1980) :

1. Jenis adsorbat
 - a. Ukuran molekul adsorbat

Ukuran molekul yang sesuai merupakan hal yang penting agar proses adsorpsi dapat terjadi, karena molekul-molekul yang dapat diadsorpsi adalah molekul-molekul yang diameternya lebih kecil atau sama dengan diameter pori adsorben.

b. Kepolaran zat

Apabila berdiameter sama, molekul-molekul polar yang lebih kuat diadsorpsi daripada molekul-molekul yang kurang polar. Molekul-molekul yang lebih polar dapat menggantikan molekul-molekul yang kurang polar yang telah lebih dulu teradsorpsi.

2. Karakteristik Adsorben

a. Kemurnian adsorben

Sebagai zat yang digunakan untuk mengadsorpsi, maka adsorben yang lebih murni lebih diinginkan karena memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih baik.

b. Luas permukaan dan volume pori adsorben

Jumlah molekul adsorbat yang teradsorpsi meningkat dengan bertambahnya luas permukaan dan volume pori adsorben. Dalam proses adsorpsi seringkali adsorben diberikan perlakuan awal untuk meningkatkan luas permukaannya seperti karena luas permukaan adsorben merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi proses adsorpsi.

3. Tekanan adsorbat

Pada adsorpsi fisika, jumlah zat yang diadsorpsi akan bertambah dengan menaikkan tekanan adsorbat. Sebaliknya pada adsorpsi kimia, jumlah zat yang diadsorpsi akan berkurang dengan menaikkan tekanan adsorbat.

4. Temperatur

Proses adsorpsi adalah proses eksotermis, berarti peningkatan temperatur pada tekanan yang tetap akan mengurangi jumlah senyawa yang teradsorpsi, berdasarkan prinsip Le Chatelier.

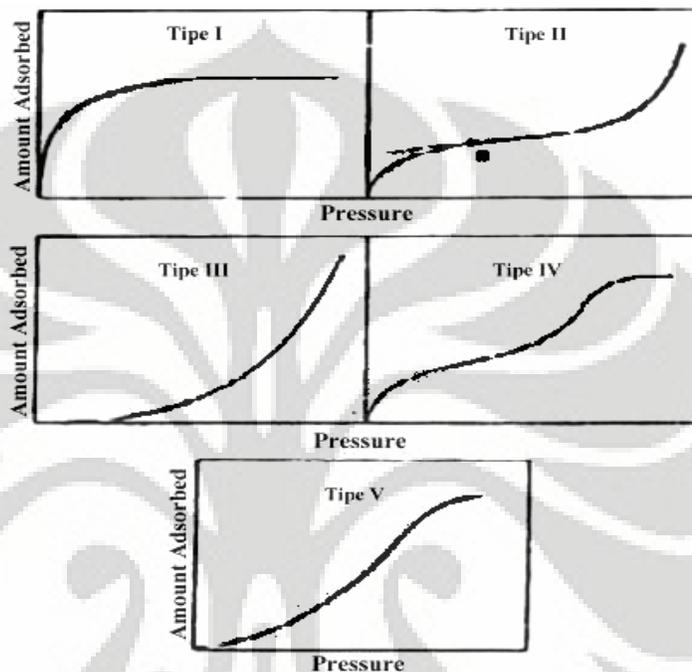
2.1.3 Kesetimbangan Adsorpsi

Pada saat fluida yang mengandung adsorbat dikontakkan dengan padatan adsorben, molekul-molekul adsorbat berpindah dari fluida ke padatan sampai konsentrasi adsorbat di aliran fluida berada dalam keadaan setimbang dengan adsorbat yang teradsorpsi dalam padatan adsorben. Data kesetimbangan adsorpsi yang dihasilkan pada temperatur adalah konstan dan biasa disebut adsorpsi isotermis, dimana terdapat hubungan antara jumlah zat yang teradsorpsi per unit massa padatan dan tekanan gas adsorbatnya. Adsorpsi isotermis dapat dihitung

Universitas Indonesia

dengan mengukur tekanan adsorbat pada saat awal (sebelum terjadi kesetimbangan) dan pada saat terjadinya kesetimbangan (Bahl et al., 1997; Sundstrom dan Herbert, 1979; Ruthven, 1993).

Brunauer mengklasifikasikan adsorpsi isotermis ke dalam lima jenis kurva seperti gambar berikut (Maron dan Lando, 1974; Bond 1987) :



Gambar 2.1 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir dan BET

a. Tipe I

Jenis ini disebut *Langmuir Isoterm* menggambarkan adsorpsi satu lapis (*monolayer*). Banyaknya adsorbat mendekati harga pembatas saat P/P_0 mendekati satu. Jenis ini biasanya diperoleh dari adsorben berpori kecil (*micropore*) kurang dari 2 nm dan luas area eksternal yang sangat sedikit. Kurva jenis ini biasanya diperoleh dari adsorben karbon aktif dan *zeolit molecular sieve*.

b. Tipe II

Jenis ini adalah bentuk normal isoterm pada adsorben tak berpori (*non porous*) atau padatan berpori besar (*macro porous*), yang menunjukkan adsorpsi *monolayer - multilayer*. Titik B yang ditunjukkan pada gambar menunjukkan kondisi awal tahap linier dari isoterm, biasanya digunakan untuk mengindikasikan tekanan relatif saat pelapisan monolayer selesai.

c. Tipe III

Jenis ini menunjukkan tipe kuantitas adsorben semakin tinggi saat tekanan relatif bertambah. Tidak adanya titik B seperti pada jenis kedua disebabkan karena interaksi adsorbat-adsorbat yang lebih kuat dibanding adsorben-adsorben. Sama seperti tipe II, jumlah lapisan pada permukaan adsorben tidak terbatas (*multilayer*).

d. Tipe IV

Jenis ini hampir sama dengan tipe II pada rentang tekanan relatif rendah sampai menengah. Volume terbesar adsorbat yang teradsorpsi dapat dihitung dari *capillary condensation* yang telah sempurna mengisi pori. Kurva jenis ini dihasilkan dari padatan adsorben berukuran *mesopore* (2-50 nm).

e. Tipe V

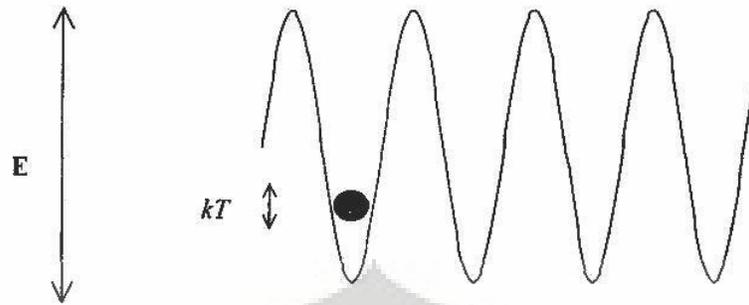
Jenis ini hampir sama dengan tipe III, dihasilkan dari interaksi yang rendah antara adsorben dengan adsorbat. Tipe V ini juga ditunjukkan oleh pori dengan ukuran sama seperti tipe IV.

2.2 Model-Model Adsorpsi

2.2.1 Model Adsorpsi Isotermis Absolut

a. Model Adsorpsi Langmuir

Langmuir isotermal dikembangkan oleh Irving Langmuir pada tahun 1918 untuk menggambarkan hubungan permukaan yang ditutupi oleh gas adsorbat pada tekanan gas di atas permukaan pada temperatur yang tetap. Teori Langmuir menggambarkan adsorpsi *monolayer* pada permukaan ideal. Permukaan ideal yang dimaksud adalah dimana energi fluktuasi (E) pada permukaan bersifat periodik dengan jarak yang sama, dan jarak fluktuasi ini lebih besar dari energi termal sebuah molekul (kT). Ilustrasi Fluktuasi energi permukaan adalah sebagai berikut:



Gambar 2.2 Fluktuasi Energi Permukaan

Persamaan umum yang digunakan pada Langmuir adalah:

$$\theta = \frac{\omega}{L} = \frac{bP}{1 + bP} \quad \text{atau} \quad bP = \frac{\theta}{1 - \theta} \quad (2.1)$$

dimana:

ω = jumlah gas teradsorpsi per satuan massa adsorbent

θ = fraksi luas permukaan yang tertutup oleh lapisan monolayer

b = konstanta adsorpsi Langmuir yang besarnya bergantung pada temperatur

P = tekanan adsorpsi

L = maksimum kapasitas adsorpsi pada model Langmuir dan Model BET

Pada tekanan rendah persamaan di atas akan mengikuti Hukum Henry's dimana $\theta = BP$.

Parameter b dinamakan konstanta afinitas atau konstanta Langmuir. Parameter b mengukur seberapa besar molekul adsorbat yang terserap ke permukaan. Parameter b ini berhubungan dengan kalor adsorpsi (Q), dengan persamaan sebagai berikut:

$$b = b_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.2)$$

dimana faktor pre-eksponensial b_0 merupakan temperatur *dependent* yang dirumuskan dengan persamaan:

$$b_0 = \frac{\alpha}{k_{d\infty}} \sqrt{2\pi MRT} \quad (2.3)$$

dengan:

α = koefisien *nonperfect sticking*

$k_{d\infty}$ = koefisien kecepatan desorpsi pada temperatur tak terhingga

Persamaan Langmuir diatas didasarkan pada asumsi:

- Adsorben dilapisi satu lapisan molekul gas adsorbat (unimolekular atau *monolayer*)
- Molekul teradsorpsi tidak bebas bergerak pada permukaan
- Tidak ada interaksi lateral di antara molekul-molekul adsorbat
- Entalpi adsorpsi sama untuk semua molekul

b. Model Adsorpsi BET

Metode ini dikembangkan oleh Brunauer, Emmet dan Teller pada tahun 1938, yang merupakan suatu metode yang mengacu pada teori kinetika langmuir, dan sering digunakan untuk studi-studi karakteristik dari katalis dengan berdasarkan kepada teori adsorpsi gas.

Adsorpsi isotermis yang menggunakan prinsip dan persamaan BET adalah adsorpsi isotermis tipe II-V yang merupakan adsorpsi fisis. Pada tipe ini, adsorben dapat dilapisi oleh beberapa lapisan molekul gas adsorbat (multimolekular atau *multilayer*). Persamaan dari BET adalah:

$$\frac{\omega}{L} = \frac{CP}{(P_s - P) \left[1 + (C-1) \left(\frac{P}{P_s} \right) \right]} \quad (2.4)$$

dimana:

ω = jumlah gas teradsorpsi per satuan unit massa adsorbent

L = maksimum kapasitas adsorpsi pada model Langmuir dan Model BET

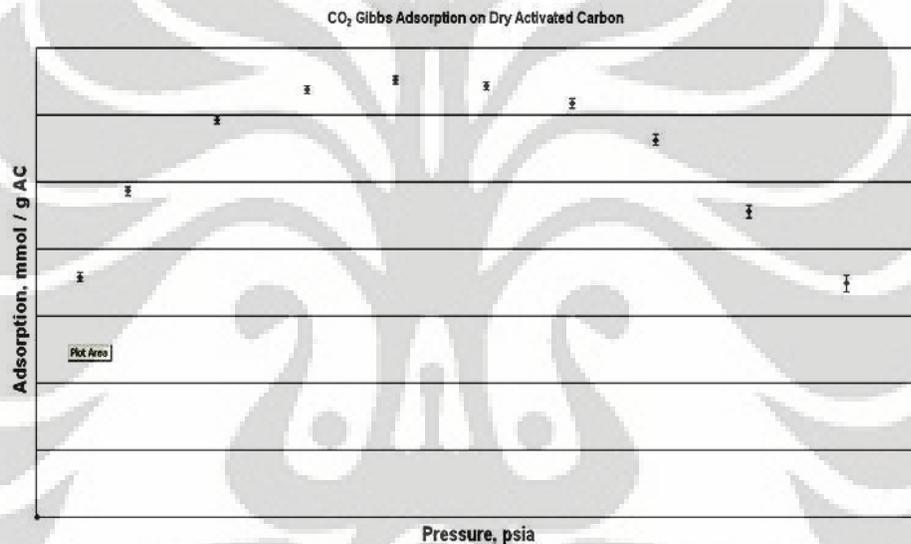
P = tekanan gas saat teradsorpsi

P_s = tekanan jenuh adsorbat gas hingga mencapai kapasitas maksimum adsorpsi

C = parameter adsorpsi isotermis model BET

2.2.2 Model Adsorpsi Isotermis Gibbs

Adsorpsi isotermis Gibbs berbeda dengan adsorpsi absolut. Pada adsorpsi isotermis absolut, jumlah adsorbat yang sudah terlebih dahulu teradsorpsi diperhitungkan, dan model ini hanya bisa digunakan pada tekanan rendah. Pada adsorpsi Gibbs ini, jumlah adsorbat yang telah teradsorpsi lebih dahulu tidak diperhitungkan, sehingga terdapat titik maksimum dari jumlah mol gas yang teradsorpsi per gram adsorben pada tekanan tertentu. Jika sudah tekanan sudah melebihi dari tekanan dimana terdapat titik maksimum, maka jumlah mol gas yang teradsorpsi per gram adsorben akan turun seperti pada **Gambar 2.3** di bawah ini:



Gambar 2.3 Grafik Adsorpsi Isotermis Gibbs

Pada adsorpsi Gibbs, jumlah gas yang diadsorpsi dan yang tidak diadsorpsi diperhitungkan, dengan menggunakan persamaan di bawah ini:

$$n_{ads}^{Gibbs} = n_{inj} - n_{unads}^{Gibbs} - n_{sol} \quad (2.5)$$

dimana

$$n_{inj} = \frac{P\Delta V}{ZRT} \quad (2.6)$$

dan

$$n_{unads}^{Gibbs} = \left(\frac{PV_{void}}{ZRT} \right)_{cell} \quad (2.7)$$

dengan,

n_{ads}^{Gibbs} = jumlah gas yang teradsorpsi,

n_{inj} = jumlah gas yang diinjeksikan ke dalam *dozing cylinder*,

n_{unads}^{Gibbs} = jumlah gas yang tidak teradsorpsi,

V_{void} = volum

n_{sol} = jumlah mol gas yang larut dalam air,

P = tekanan adsorpsi,

T = temperatur adsorpsi,

Z = faktor kompresibilitas,

R = konstanta gas yang nilainya bergantung pada tekanan, temperatur, dan volum.

Sedangkan hubungan antara jumlah mol yang teradsorpsi per gram adsorben pada adsorpsi Gibbs dan jumlah mol yang teradsorpsi per gram adsorben absolut adalah sebagai berikut:

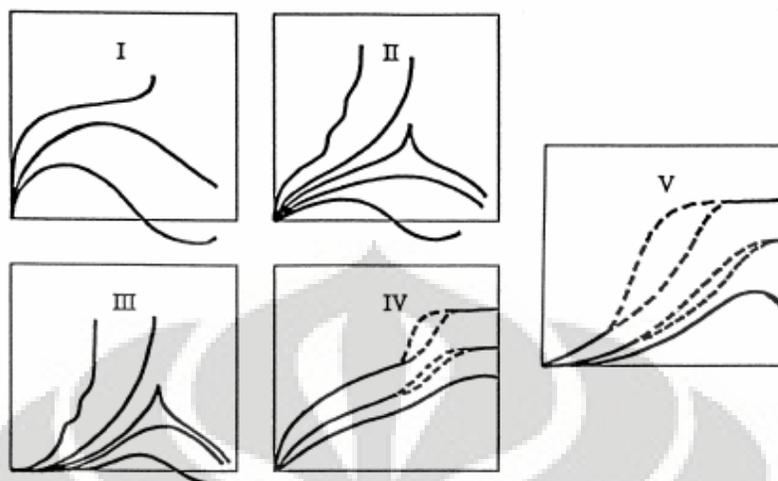
$$n_{Gibbs} = n_{absolute} \times \left(1 - \frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads}} \right) \quad (2.8)$$

dengan

$$n_{ads}^{abs} = n_{max} \frac{bP}{1 + bP} \quad (2.9)$$

Pada tekanan rendah, densitas gas sangat kecil (jauh lebih kecil daripada densitas adsorpsi) sehingga $\frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads}}$ bisa dianggap nol dan n_{Gibbs} sama dengan $n_{absolute}$ sehingga n_{Gibbs} terus mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan tekanan. Namun, pada tekanan tinggi, $\frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads}}$ tidak bisa dianggap nol sehingga nilai n_{Gibbs} akan menurun seiring dengan kenaikan tekanan walaupun harga $n_{absolute}$ naik.

Adsorpsi Gibbs juga terdiri dari 5 tipe (sama seperti adsorpsi Langmuir atau BET). Gambar 2.4 berikut ini adalah tipe-tipe adsorpsi isothermis Gibbs secara kualitatif (Donohue dan Aranovich, 1999) :



Gambar 2.4 Kurva Adsorpsi Isotermis Gibbs

Pada gambar di atas, tekanan merupakan absis dan jumlah zat yang teradsorp merupakan ordinatnya. Pada klasifikasi ini, Tipe I menunjukkan adsorpsi isotermis pada adsorben mikropori untuk kondisi subkritis, dekat dengan titik kritis, dan superkritis. Pada kondisi superkritis, adsorpsi isotermis tidak monoton. Tipe II dan III menunjukkan adsorpsi isotermis pada adsorben makropori dengan afinitas kuat dan lemah. Pada temperatur rendah, Tipe II dan Tipe III mempunyai *steps*, tetapi dengan temperatur yang lebih tinggi kurva tersebut menjadi monoton (seperti pada tipe II dan tipe III adsorpsi isotermis BET). Tetapi, di dekat temperatur kritis, adsorpsi isotermis tipe II dan tipe III ini berubah secara signifikan menjadi tidak monoton yang menunjukkan adanya titik maksimum yang tajam dan pada temperatur yang lebih tinggi menunjukkan adanya titik maksimum yang *smooth*. Tipe IV dan V menunjukkan adsorpsi isotermis pada adsorben mesopori dengan afinitas yang kuat dan lemah (Donohue dan Aranovich, 1999).

2.3 Jenis-Jenis Adsorben

Adsorben dapat diartikan sebagai zat padat yang dapat menyerap komponen tertentu dari suatu fase fluida. Secara umum, adsorben merupakan bahan-bahan yang sangat berpori, dan adsorpsi berlangsung terutama pada dinding pori-pori atau pada letak-letak tertentu di dalam partikel itu. Oleh karena

pori-pori itu biasanya sangat kecil, luas permukaan dalam menjadi beberapa orde besaran lebih besar daripada permukaan luar, dan bisa sampai 2000 m²/g. Pemisahan terjadi karena perbedaan bobot molekul atau karena perbedaan polaritas yang menyebabkan sebagian molekul melekat pada permukaan tersebut lebih erat daripada molekul lainnya.

Dalam beberapa hal, adsorbat melekat sedemikian kuat sehingga memungkinkan pemisahan komponen itu secara menyeluruh dari fluida tanpa terlalu banyak adsorpsi dari komponen lain. Regenerasi adsorben dapat dilaksanakan kemudian untuk mendapatkan adsorbat dalam bentuk terkonsentrasi atau hamper murni (Mc Cabe et al., 1999).

Terdapat banyak sekali zat yang biasa digunakan sebagai adsorben. Adsorben yang paling sering dipakai adalah karbon aktif karena memiliki luas permukaan area yang besar sehingga daya adsorpsinya lebih besar dibandingkan adsorben yang lain. Berdasarkan struktur dan unsur pembangunnya, adsorben dapat digolongkan menjadi dua yaitu adsorben tidak berpori (non porous adsorbents) dan adsorben berpori (porous adsorbents) (Mulyati, 2006).

2.3.1 Adsorben Tak Berpori

Adsorben tak berpori dapat diperoleh dengan cara presipitasi deposit kristalin seperti BaSO₄ atau penghalusan padatan kristal. Luas permukaan spesifiknya kecil, tidak lebih dari 10 m²/g, umumnya antara 0,1 sampai dengan 1 m²/g. Bahan tak berpori seperti filter karet (rubber fillers) dan karbon hitam bergrafit (graphitized carbon blacks) adalah jenis adsorben tak berpori yang telah mengalami perlakuan khusus sehingga luas permukaannya dapat mencapai ratusan m²/g.

2.3.2 Adsorben Berpori

Luas permukaan spesifik adsorben berpori berkisar antara 100 s.d. 1000 m²/g. Biasanya dipergunakan sebagai penyangga katalis, dehidrator, dan penyeleksi komponen. Adsorben ini umumnya berbentuk granular.

Klasifikasi pori yang sering digunakan:

- Mikropori : diameter < 2 nm
- Mesopori : diameter 2 – 200 nm

- Makropori : diameter > 200 nm

Beberapa jenis adsorben berpori yang terkenal adalah: silikagel, alumina, karbon aktif, zeolit, *molecular sieve*, dan *porous glasses*.

Untuk dapat menjadi adsorben komersial, menurut zat padat tersebut harus memenuhi beberapa kriteria sebagai berikut (Mulyati, 2006) :

- Memiliki permukaan yang besar per unit massa sehingga kapasitas adsorpsinya tinggi
- Secara alamiah dapat berinteraksi dengan adsorbat
- Ketahanan struktur fisik yang tinggi
- Mudah diperoleh, harga tidak mahal, tidak korosif, tidak beracun
- Tidak ada perubahan volume yang berarti selama adsorpsi, regenerasi
- Mudah dan ekonomis untuk diregenerasi

Tabel di bawah ini menginformasikan tentang karakteristik adsorben beserta kegunaan dan kerugian adsorben:

Tabel 2.2 Tipe, Karakteristik, Kegunaan, dan Kerugian Adsorben

Tipe	Karakteristik	Kegunaan	Kerugian
Karbon aktif	Hidrofobik	Pemisahan polutan organik	Sulit untuk diregenerasi
Zeolite	Hidrofilik, polar	Pemisahan udara, dehidrasi	Kapasitas total rendah
Silika gel	Kapasitas tinggi, hidrofilik	Pengeringan aliran gas	Pemisahan tidak efektif
Alumina aktif	Kapasitas tinggi, hidrofilik	Pengeringan aliran gas	Pemisahan tidak efektif

2.4 Nano Karbon

Nano karbon didefinisikan sebagai material karbon yang bukan hanya ukuran partikelnya saja yang berukuran nanometer akan tetapi struktur dan teksturnya pun berukuran nanometer (Michio, 2004). Karbon *nanotube* ditemukan oleh Ijima dengan *transmission electron microscopy* (TEM) pada tahun 1991 (Ijima, 2002). Sejak itu banyak penelitian tentang nanokarbon dilakukan terhadap struktur, sifat, dan metode preparasinya. Karbon *nanotube* telah menarik perhatian para peneliti sebagai komponen yang penting untuk mewujudkan nanoteknologi di masa yang akan datang.

Dua bentuk susunan unsur karbon yang paling dikenal adalah intan dan grafit. Pada intan, masing-masing atomnya tersusun secara rapat dan secara simetris terkoordinasi memenuhi ruang tiga dimensi, sedangkan grafit tersusun dari karbon heksagonal yang membentuk lembar atom dua dimensi, dimana diantara keduanya tersebut terdapat jarak yang cukup panjang. Selain kedua bentuk tersebut, ada beberapa bentuk susunan unsur karbon lainnya yaitu (Pettersen, 1999):

1. *Fullerenes* dan *nanotubes* adalah lembaran grafit yang terbungkus baik satu lapis maupun lebih yang membentuk bola yang stabil, disebut *fullerenes*, atau membentuk tabung molekul, disebut *nanotube*. *Nanoropes* adalah fiber yang sangat kuat yang tersusun dari ikatan *nanotubes*.
2. Nanofibers adalah susunan dari berlapis-lapis grafit yang membentuk fiber yang berdiameter kurang dari satu mikrometer.
3. Karbon aktif biasanya berarti granula atau partikel kecil grafit yang dimurnikan.
4. Carbon fibers yaitu polimer karbon berantai dengan kandungan karbon yang tinggi.

Salah satu proses pembentukan nanokarbon adalah reaksi dekomposisi metana, umumnya dalam reaksi dekomposisi metana dihasilkan dua jenis nanokarbon yaitu karbon nanotube (CNT) dan karbon nanofiber/filament (CNF). CNT menunjukkan kapasitas elektrokimia empat kali lebih tinggi daripada CNF (Chen, 2004). Hal ini mengindikasikan potensial besar CNT sebagai *hydrogen storage* di masa yang akan datang. Selain itu, CNT yang lebih ringan dengan ketahanan terhadap panas yang lebih tinggi menjadikannya pilihan yang lebih menyakinkan daripada CNF.

Karbon nanotube merupakan ikatan kontinyu dari benzene yang terdiri atas 6 atom C sehingga membentuk spiral, dengan diameter 1 hingga 100 nanometer. Berdasarkan jumlah dinding penyusunnya, carbon nanotube terbagi atas dua, yaitu SWCNT (*Single-Walled Carbon Nanotubes*) yang tersusun hanya satu dinding dan MWCNT (*Multi-Walled Carbon Nanotubes*) yang tersusun lebih dari satu dinding.

Properties nanotube yang lebih baik dalam kapasitas penyimpanan adalah nanotube dengan bentuk *single wall*, panjang, dan *uniform* (Ermakova, 1999).

Karbon nanotube memiliki kombinasi sifat struktur yang sempurna, yakni ukuran yang kecil, densitas yang rendah, kekuatan yang tinggi (kekuatan tensil dari MWCNT sekitar 100 kali lebih kuat daripada aluminium), dan sifat elektronik yang bagus (Qian, 2002).

Sampai saat ini karbon nanotube telah digunakan untuk beberapa aplikasi dan sedang dilakukan penelitian untuk perkembangan yang lebih lanjut, antara lain:

1. NASA menggunakan nanotube untuk peralatan luar angkasanya karena kekakuan dan kekuatannya dimana rasio kekuatan terhadap beratnya melebihi semua material yang tersedia saat ini (Qian, 2002).
2. Nanotube digunakan sebagai field emission display oleh beberapa perusahaan elektronik raksasa karena menghasilkan kualitas bagus dengan stabilitas yang tinggi.
3. SWCNT (Single-Walled Carbon Nanotubes) memiliki sifat yang kuat dan sifat konduktansi listrik yang besar, bahkan menghantarkan panas yang lebih baik daripada intan sehingga sangat baik untuk komponen nonelektrik.
4. SWCNT (Single-Walled Carbon Nanotubes) menunjukkan sifat memiliki daya simpan yang tinggi, sehingga sangat baik untuk ion alkali storage untuk sumber listrik maupun hidrogen storage untuk aplikasi fuel cell.
5. Kekuatan, ukuran yang kecil, dan ketahanan terhadap kondisi keasaman tubuh telah menjadikan nanokarbon menjadi penelitian yang menarik untuk diaplikasikan di bidang kedokteran.

2.4.1 Multi-Walled Nanotube Carbon (MWNTC) Produksi Lokal

Adsorben yang akan digunakan pada penelitian kali ini adalah NTC yang dihasilkan dari penelitian di Laboratorium Teknologi Energi Berkelanjutan Departemen Teknik Kimia (Ira Yulianty, 2008). Namun potensi produk belum pernah diuji kapasitasnya sebagai adsorben, dengan melakukan penelitian ini diharapkan kapasitas NTC lokal sebagai adsorben dapat diketahui.

Hasil karakterisasi dengan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) yang didapat dari penelitian di Laboratorium Teknologi Energi

Universitas Indonesia

Berkelanjutan Departemen Teknik Kimia (Ira Yulianty, 2008), menunjukkan bahwa nanotube carbon yang dihasilkan adalah Multi-Walled Nanotube Carbon (MWNTC) dengan diameter dinding karbon nanotube yang terbentuk kurang lebih sama, yaitu antara 50 – 100 nm.

Karakteristik karbon yang dihasilkan oleh penelitian tersebut, yaitu:

1. Untuk reaksi selama 8.4 jam, produk karbon memiliki yield 28.45 gr karbon/gr katalis.
2. Untuk suhu 650°C, dan 32.85 gr karbon/ gr katalis.
3. Untuk suhu 700°C. Untuk reaksi selama 33 jam pada suhu 650°C, yield karbon mencapai 201 gr karbon/ gr katalis.

2.4.2 Multi-Walled Nanotube Carbon (MWNTC) Produk Komersial

Adsorben alternatif yang akan digunakan pada penelitian adalah NTC komersial yang dihasilkan dari *Chinese Academy of Sciences*. Diharapkan NTC komersial ini dapat dijadikan acuan untuk kapasitas NTC produk lokal.

Beberapa spesifikasi yang ada pada NTC komersial, adalah:

1. Kemurnian nanotube karbon mencapai >95%.
2. Ukuran diameter luar lebih kecil dari 8 nm dan diameter dalamnya sekitar 2-5 nm, dengan panjang 10 -30 um.
3. Dengan nilai Spesial Surface Area (SSA) lebih kecil dari 500 m²/g.
4. Berwarna hitam

2.5 Penyimpanan Hidrogen

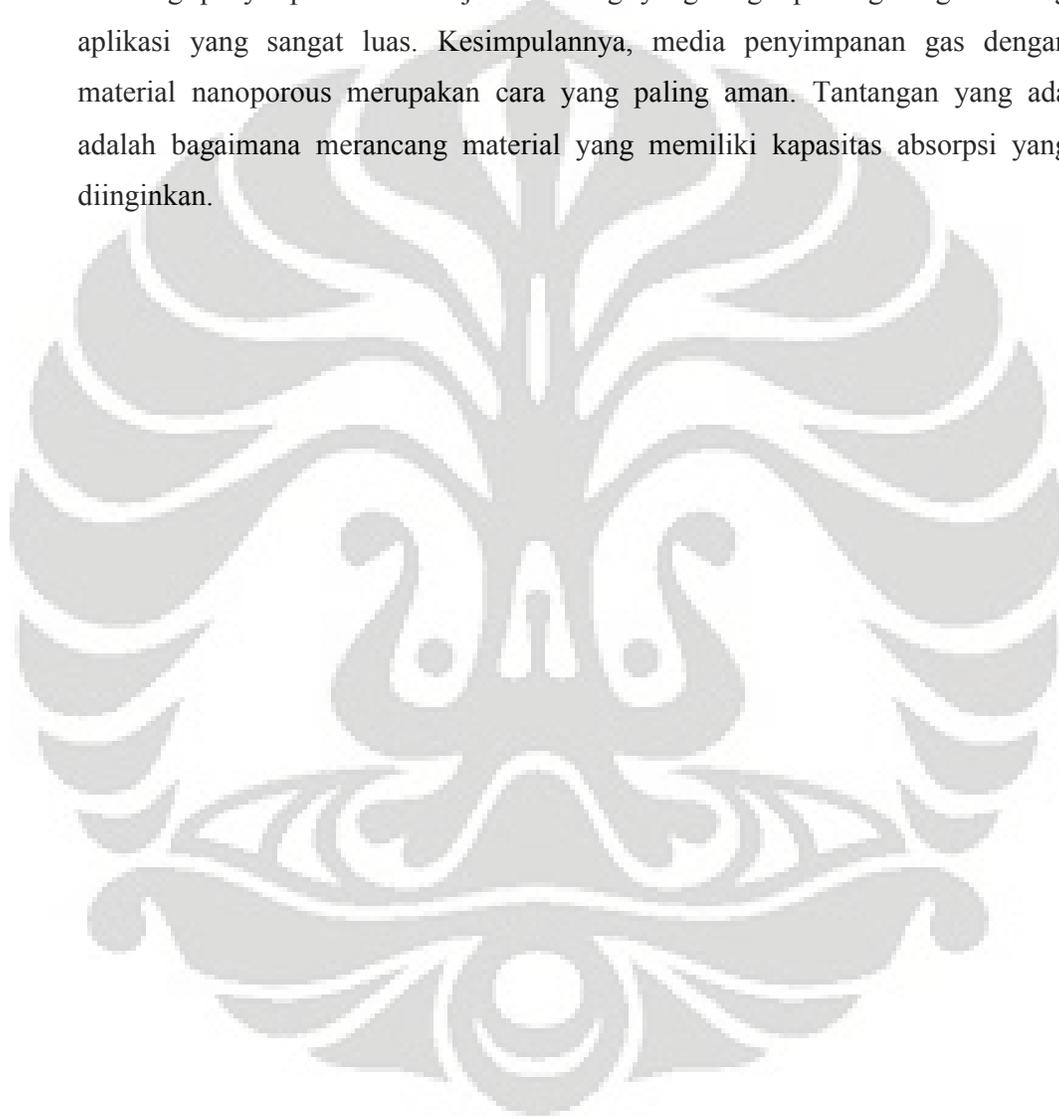
Teknik penyimpanan hidrogen sebagai bahan bakar yang dibutuhkan kendaraan masih menjadi bahasan yang menarik.

Sedikitnya dibutuhkan 5 kg hidrogen untuk memiliki kemampuan jarak tempuh yang sama dengan mobil konvensional, dikarenakan berat jenis hidrogen hanya 0,1 g/L pada temperatur ruang. Artinya kita harus bisa mengemas 50.000 liter hidrogen ke dalam tangki mobil. Ada 3 cara untuk melakukan hal ini: sebagai gas bertekanan tinggi, cairan cryogenic, atau sebagai padatan.

Bila dibandingkan dengan mengkompresi gas dengan tekanan ratusan atm kedalam tangki hidrogen; atau mendinginkan gas hidrogen hingga suhu minus 252 °C untuk mencairkannya; hidrogen yang disimpan dalam bentuk padatan menjadi

alternatif penyimpanan terbaik dan aman. Penelitian di bidang ini telah mengarahkan pada penyimpanan berdasarkan penyerapan fisis, dimana hidrogen diadsorbsi kedalam permukaan interior dari pori-pori material.

Penyimpanan gas dalam bentuk padat bukan hanya alternatif untuk gas hidrogen, namun juga dapat digunakan untuk gas-gas penting lainnya. Karenanya teknologi penyimpanan ini menjadi teknologi yang sangat penting dengan bidang aplikasi yang sangat luas. Kesimpulannya, media penyimpanan gas dengan material nanoporous merupakan cara yang paling aman. Tantangan yang ada adalah bagaimana merancang material yang memiliki kapasitas absorpsi yang diinginkan.

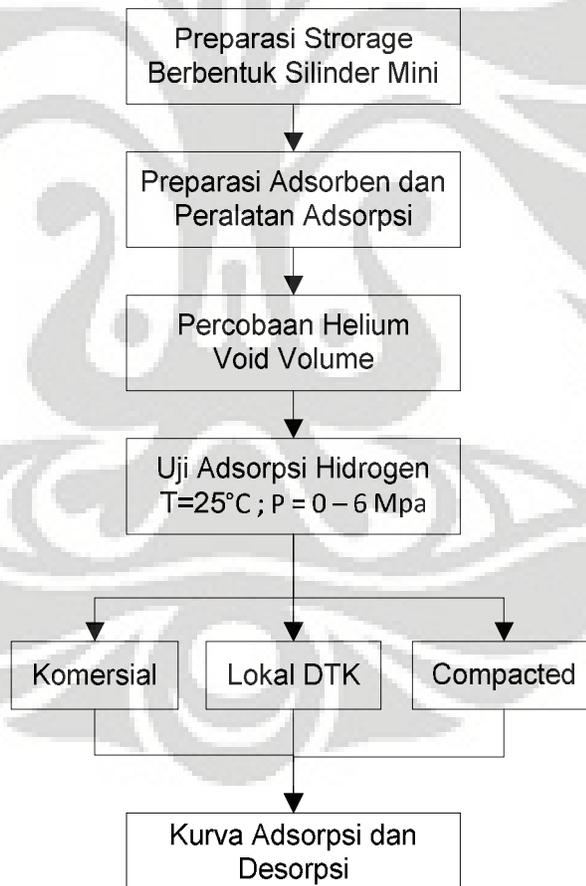


BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini akan dibahas diagram alir proses penelitian, peralatan dan bahan yang digunakan, variabel penelitian, dan prosedur penelitian. Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA), Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan seperti diagram alir proses yang dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Untuk langkah-langkah yang lebih jelas dan lebih detail dapat dilihat pada bagian prosedur penelitian.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terdiri dari beberapa tahap yaitu persiapan storage hidrogen, bahan dasar dan data aquisisi , serta uji adsorpsi hidrogen.

3.2.1 Persiapan Alat dan Bahan

3.2.1.1 Alat

1. Dozing cylinder.
2. Pressure transducer.
3. Oven.
4. Hydrogen storage.
5. Termometer.
6. Timbangan.
7. Spatula.

3.2.1.2 Bahan

1. MWNTC produksi lokal dan komersial
2. Silica Woll
3. Gas Helium
4. Gas Hidrogen murni

3.2.2 Persiapan *Hydrogen Storage*

Storage yang akan dibuat adalah storage dalam ukuran mini, yaitu untuk kapasitas nanotube karbon sebanyak 10 gram dan dapat menahan tekanan sampai dengan 6 Mpa.



Gambar 3.2 *Storage* Hidrogen

Storage didesain berbentuk silinder dengan diameter sekitar 1 cm dan panjang sekitar 15 cm. Ini dapat dibuat dari pipa komersial yang ada, dengan

menambahkan penutup di satu ujungnya dan koneksi fitting di ujung yang lain untuk dihubungkan dengan tube stainlesssteel ukuran 1/8".

3.2.3 Persiapan Nanotube Karbon

Bahan nanotube karbon yang digunakan adalah produk dari penelitian sebelumnya yang dilakukan di Departemen Teknik Kimia. Bahan ini dibagi dua, bagian pertama dibiarkan apa adanya, dan bagian yang lain dibuat pelet berbentuk pil dengan diameter sekitar 0,8 cm dan ketebalan sekitar 0,4 cm. Dengan kondisi bahan yang berbeda ini, masing-masing akan dimasukkan ke storage penguji untuk kemudian diuji kemampuan adsorpsi gas hidrogennya serta diamati perilaku dinamis adsorpsi dan desorpsinya. Sebelum dimasukkan ke storage, bahan-bahan tersebut dikeringkan didalam oven pada temperatur 120°C selama 24 jam untuk menghilangkan uap air kesetimbangan yang mungkin terperangkap dalam bahan.

Adapun alat uji adsorpsi yang akan dipakai dalam penelitian ini merupakan modifikasi dari peralatan uji adsorpsi yang ada di Laboratorium Teknologi Energi Berkelanjutan Departemen Teknik Kimia, dengan mengganti alat sampling cylinder pada alat tersebut dengan storage hidrogen yang dibuat. Selain itu, sinyal keluaran transducer juga akan dihubungkan dengan data aquisisi, sehingga dapat diamati perubahan tekanan adsorpsi dan desorpsi setiap waktu.

3.2.4 Pengujian Adsorpsi Hidrogen

Pada analisis ini adsorbat yang dipakai adalah gas hidrogen. Prosedur penelitiannya adalah sebagai berikut (Goodman et al. 2004) :

1. Kalibrasi volume void Sampling Cylinder

Pada sampling cylinder terdapat nanotube karbon sebagai adsorben dengan massa karbon yang dimasukan sekitar 50 gram. Volume void dari Sampling Cylinder adalah volume total dari ruang kosong yang terdapat pada Sampling Cylinder.

$$V_{Void} = V_{SC} - V_{ruang\ yang\ terisi\ karbon\ aktif} + V_{pori-pori\ karbon\ aktif} \quad (3.1)$$

Prosedur pencarian volume void dari Sampling Cylinder adalah sebagai berikut ini:

- a) Mengisi dozing cylinder dengan gas He sampai penuh dengan cara membuka valve V-1 dan mengalirkannya gas He ke dalam alat tersebut. Sementara itu,

valve V-2 dalam keadaan tertutup dan semua pompa vakum dalam keadaan mati. Valve V-1 ditutup ketika dozing cylinder terisi penuh. Setelah itu, mencatat temperatur (T_i) dan tekanan (P_i) H_2 di dozing cylinder. Dengan data ini, maka kita bisa mengetahui jumlah mol He yang terdapat pada dozing cylinder menurut persamaan berikut ini:

$$n = \frac{P_i V_{\text{dozing cylinder}}}{Z_{\text{He}i} RT_i} \quad (3.2)$$

Pada prosedur ini $V_{\text{dozing cylinder}} = V_{\text{He}}$

- b) Membuka valve V-2 dan mengalirkan gas He tersebut ke dalam Sampling Cylinder. Ketika semua gas He telah masuk ke dalam Sampling Cylinder, valve V-2 ditutup serta mencatat mencatat temperatur (T_f) dan tekanan (P_f) dari Dozing Cylinder, dengan data ini, maka kita akan dapat mengetahui jumlah mol (n_i) dari gas He yang dimasukkan ke Sampling Cylinder dengan persamaan:

$$n = \left(\frac{P_i}{Z_{\text{He}i} RT_i} - \frac{P_f}{Z_{\text{He}f} RT_f} \right) V_{\text{dozing cylinder}} \quad (3.3)$$

- c) mencari volume void dari Sampling cylinder. Data yang sudah diketahui adalah n_i , temperatur Sampling Cylinder (T_f), tekanan Sampling Cylinder (P_f)

$$V_{\text{void}} = \frac{n_i Z_{\text{He}} RT_f}{P_f} \quad (3.4)$$

- d) Mengeluarkan gas He dari Sampling cylinder dengan menyalakan vacuum pump 2.

2. Adsorpsi Gas Hidrogen

- a) Mengisi dozing cylinder dengan gas hidrogen dengan membuka valve V-1 dan mengalirkannya ke dozing cylinder sampai penuh. Setelah penuh, valve V-1 ditutup dan mencatat temperatur (T_i) dan tekanan (P_i) H_2 di dozing cylinder, semua pompa dalam keadaan mati.
- b) mengalirkan gas hidrogen ke sampling cylinder dengan membuka valve V-2. Ketika semua gas H_2 telah masuk ke dalam sampling cylinder, menutup valve V-2 serta mencatat temperatur (T_f) dan tekanan (P_f) H_2 pada sampling cylinder.

- c) Mencari jumlah mol zat yang teradsorp dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$n_{H_2 \text{ teradsorp}} = n_{H_2, i} - n_{H_2 \text{ tidak teradsorp}}$$

$$n_{H_2 \text{ teradsorp}} = \left[\left(\frac{P_i}{Z_{H_2, i} RT_i} - \frac{P_f}{Z_{H_2, f} RT_f} \right) V_{\text{dozing cylinder}} \right] - \left[\frac{P_f V_{\text{void}}}{Z_{H_2, f} RT_f} \right] \quad (3.5)$$

Prosedur diatas dilakukan untuk setiap produk kondisi nanotube karbon (curah dan pelet) sampai diperoleh kurva adsorpsi isothermal dengan kenaikan tekanan 1 Mpa sampai pada tekanan 6 Mpa.

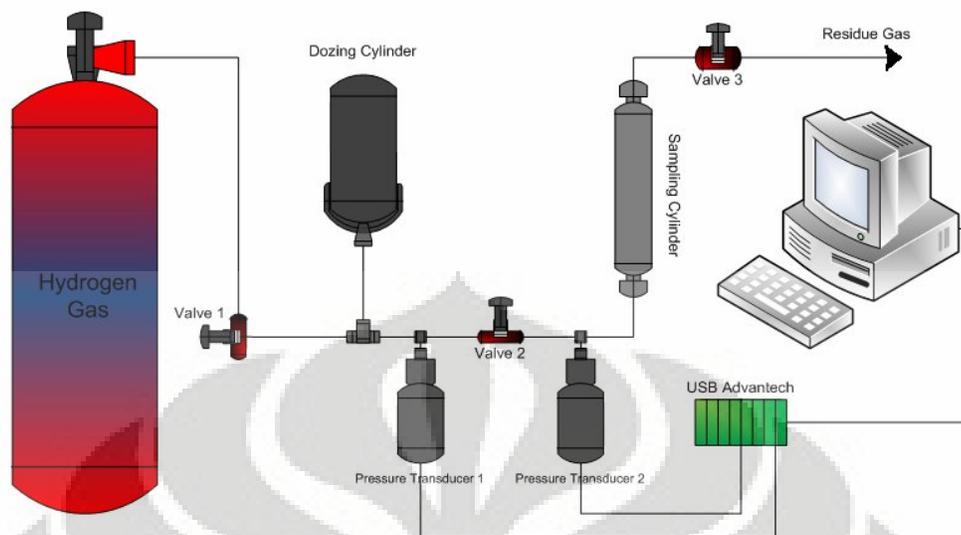
3.2.4 Pengujian Desorpsi Hidrogen

Pada analisis ini tekanan adsorpsi tertinggi pada *sampling cylinder* merupakan tekanan awal proses desorpsi gas hidrogen. Prosedur penelitiannya adalah sebagai berikut:

- Menurunkan tekanan dozing cylinder dengan membuka valve V-1 dan mengalirkannya ke *residue* gas. Setelah tekanan pada dozing sekitar 1 Mpa, valve V-1 ditutup dan mencatat tekanan H₂ di dozing cylinder.
- Mengalirkan gas hidrogen dari *sampling cylinder* ke dozing cylinder dengan membuka valve V-2. Ketika semua gas H₂ telah masuk ke dalam dozing cylinder, menutup valve V-2 serta mencatat temperatur dan tekanan H₂ pada dozing dan *sampling cylinder*.

Prosedur diatas dilakukan untuk setiap produk kondisi nanotube karbon (curah dan pelet) sampai diperoleh kurva adsorpsi isothermal dengan penurunan tekanan 6 Mpa sampai pada tekanan 1 Mpa.

Peralatan adsorpsi gas pada tekanan tinggi ini menggunakan peralatan yang dimiliki Departemen Teknik Kimia – FTUI. Skema alat untuk uji adsorpsi hidrogen adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3 Skema Alat untuk Uji Adsorpsi Hidrogen

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

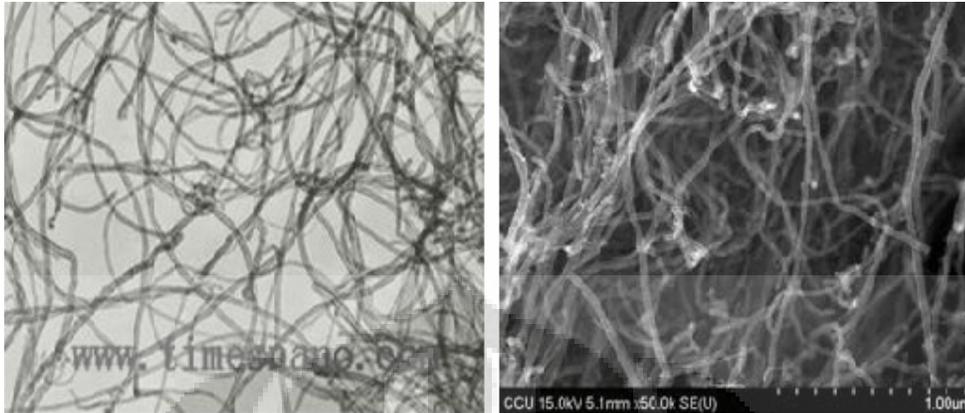
4.1 Hasil Preparasi Adsorben

Adsorben yang digunakan pada penelitian adalah multiwall carbon nanotube yang didapatkan dari *Chinese Academy of Sciences (CAS) Chengdu Organic Chemicals*, dengan kategori nomor M1 dan NTC yang diperoleh dari Laboratorium Energi Berkelanjutan (Departemen Teknik Kimia – UI). **Tabel 4.1** menunjukkan spesifikasi dari NTC yang berasal dari CAS. NTC ini berjenis *mutiwall*, dengan kemurnian diatas 95%, diameter luar kurang dari 8 nm dan diameter dalam antara 2-5 nm serta luas permukaan lebih dari 500 m²/g.

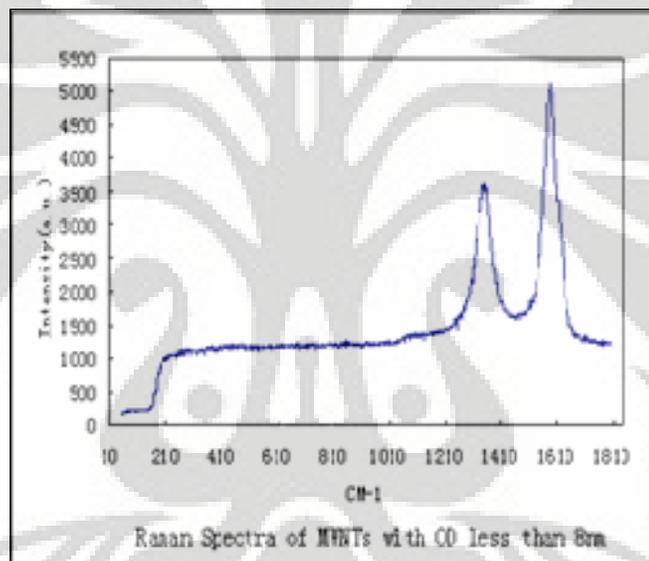
Tabel 4.1 Spesifikasi NTC dari CAS

Spesifikasi	Keterangan
Purity	>95%
OD (Outer Diameter)	<8 nm
ID (Inner Diameter)	2-5 nm
Length	10-30um
SSA (Special Surface Area)	>500 m ² /g
Color	Black
Bulk Density	0.27 g/cm ³
True Density	~2.1 g/cm ³
EC (Electric Conductivity)	>100s/cm
Making Method	CVD

Gambar 4.1 menunjukkan hasil Transmission Electron Microscopy (TEM) dan Scanning Electron Microscopy (SEM) dari NTC yang berasal dari CAS., sedangkan **Gambar 4.2** menunjukkan hasil Raman Spectra yang menggambarkan ukuran diameter NTC.



Gambar 4.1 *Transmission Electron Microscopy (TEM) & Scanning Electron Microscopy (SEM)*

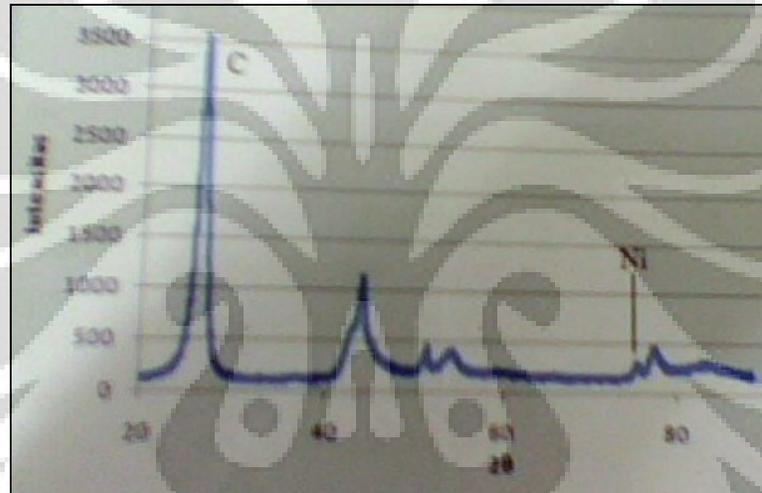


Gambar 4.2 Raman Spectra

Gambar 4.3 menunjukkan hasil SEM yang berasal dari nanotube carbon yang diperoleh dari Laboratorium Energi Berkelanjutan (DTK – UI). Hasil yang ditunjukkan pada gambar tersebut dapat terlihat bahwa ukuran nanotube carbon yang berasal dari Laboratorium tersebut masih cukup besar, yaitu diatas 20-100 nm. Pada **Gambar 4.3** nanotube karbon yang terbentuk terlihat menggumpal dan masih terdapat karbon amorf (Shantya, 2009).



Gambar 4.3 *Scanning Electron Microscopy (SEM)* NTC DTK



Gambar 4.4 X-Ray Diffraction (XRD) NTC DTK

Dapat terlihat pada Gambar 4.4 Hasil X-Ray Diffraction (XRD) menunjukkan bahwa masih terdapat kristal logam nikel.

4.2. Hasil Preparasi Peralatan Adsorpsi

Proses adsorpsi ini menggunakan 1 buah *dozing cylinder*, 1 buah *sampling cylinder*, 3 buah valve, pipa-pipa rangkaian peralatan, *transducer* yang digunakan untuk membaca tekanan pada *dozing* dan *sampling cylinder*, termokopel yang digunakan untuk membaca suhu pada sistem, *device Advantech* dan *software Adam view* sehingga tekanan dan temperatur dapat diamati secara visual pada komputer.

Gambar 4.5 menunjukkan storage dalam ukuran mini yang telah dibuat, yaitu untuk kapasitas nanotube karbon sebanyak 10 gram dan dapat menahan tekanan sampai 6 Mpa. *Storage* berbentuk silinder dengan diameter sekitar 1 cm dan panjang sekitar 20 cm. *Storage* hidrogen dibuat dari pipa komersial yang ada, dengan menambahkan penutup di satu ujungnya dan koneksi fitting di ujung yang lain untuk dihubungkan dengan tube stainlesssteel ukuran 1/8”.



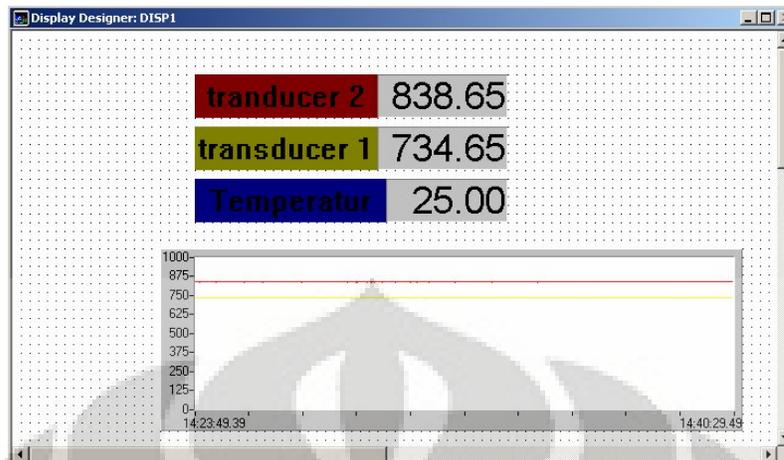
Gambar 4.5 *Hydrogen Storage*

Peralatan adsorpsi yang ada juga telah dilengkapi dengan pencatat data otomatis yang dihubungkan dengan satu unit komputer. Gambar 4.6 merupakan rangkaian peralatan adsorpsi yang digunakan selama penelitian.



Gambar 4.6 Rangkaian Peralatan Uji Adsorpsi.

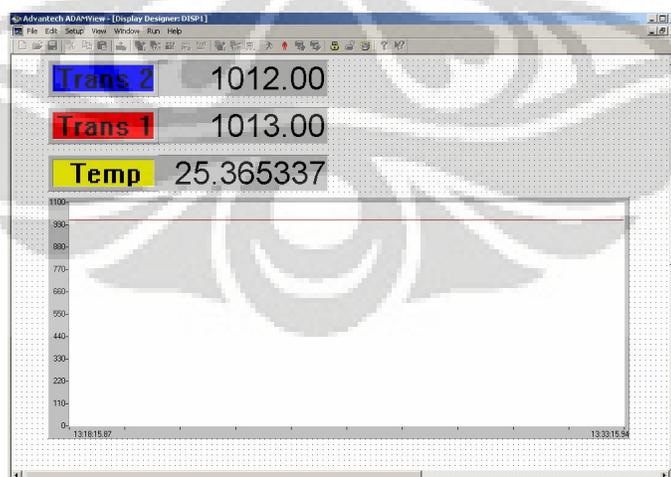
Gambar 4.7 menunjukkan tampilan software pencatat data tersebut yang menampilkan data tekanan yang dapat terlihat pada transducer 1 (sampling cylinder) dan transducer 2 (dosing cylinder), serta temperatur termokopel yang menunjukkan temperatur sistem.



Gambar 4.7 Tampilan *Software* Pencatat Data

Sebelum alat digunakan, maka dilakukan tes kebocoran terlebih dahulu dengan menggunakan gelembung sabun untuk mendeteksi kebocoran sehingga jika terjadi kebocoran, maka gelembung sabun akan terlihat dan kebocoran dapat langsung diatasi. Selain itu, kebocoran juga dapat membahayakan lingkungan sekitar serta peneliti dan orang-orang yang berada di laboratorium karena pada adsorpsi ini menggunakan gas bertekanan tinggi, yaitu helium dan hidrogen.

Gambar 4.8 menunjukkan hasil uji kebocoran alat dengan gas helium pada tekanan sekitar 1000 psia, dapat terlihat bahwa alat uji adsorpsi yang digunakan tidak menunjukkan kebocoran, sehingga alat uji adsorpsi siap untuk digunakan.



Gambar 4.8 Uji Kebocoran dengan Gas Helium pada Tekanan Tinggi

4.3. Hasil Kalibrasi Pada *Volume Dozing Cylinder*

Volum *dozing cylinder* diukur dengan memasukkan air ke *dozing cylinder* hingga penuh. Setelah penuh, air dari *dozing cylinder* dimasukkan ke dalam gelas ukur untuk mengetahui volume total yang masuk ke *dozing cylinder* (Ramadhania, 2007).

Tabel 4.2 Perhitungan *Volume Dozing Cylinder*

Volume total area dozing cylinder		
Volume dozing cylinder		448, 0 ml
Tube fitting		1,9 ml
Volume transducer	$3.14 \times (0,2175 \text{ cm}^2) \times 2,7 \text{ cm}$	0, 401 ml
Total		450, 301 ml

Sebagaimana yang terlihat pada **Tabel 4.2** volum total *dozing cylinder* yang didapat adalah 450,301 mL. Volum tersebut termasuk volum pipa-pipa yang berada dalam 1 set *dozing cylinder* ini, pengukuran volume pipa menggunakan metoda yang sama dengan pengukuran volume *dozing cylinder*. Volume transducer dihitung secara manual dengan mengukur diameter dalam yaitu 0,435 cm, dengan panjang daerah transducer 2,7 cm, didapatkan volume area transducer adalah 0,401 ml.

4.4. Hasil Kalibrasi Void Volume

Pada *sampling cylinder*, untuk mengetahui *void volume* perlu dialirkan gas helium yang bersifat inert ke dalam *sampling cylinder* pada variasi tekanan rendah pada kondisi isothermal, hal ini bertujuan untuk menghindari kesalahan pembacaan display akibat ketidakstabilan sistem pada tekanan tinggi. Untuk kalibrasi ini, diambil 3 data kemudian dihitung berdasarkan persamaan:

$$n = \left(\frac{P_i}{Z_{He_i} RT_i} - \frac{P_f}{Z_{He_f} RT_f} \right) V_{dozing\ cylinder} \quad (3.3)$$

dengan

$$V_{void} = \frac{n_i Z_{He} RT}{P_{sf}} \quad (3.4)$$

dimana,

n = jumlah mol gas He yang diinjeksikan ke *sampling cylinder*

P_i = Tekanan awal *dozing cylinder*

P_f = Tekanan akhir *dozing cylinder*

T = Temperatur

Z_{Hei} = faktor kompresibilitas pada kondisi P_i dan T

Z_{Hef} = faktor kompresibilitas pada kondisi P_f dan T

Jumlah adsorben yang ada pada *sampling cylinder* harus diketahui beratnya, karena berpengaruh terhadap helium void volume yang ditunjukkan.

Tabel 4.3 dibawah ini menunjukkan berat adsorben yang digunakan.

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Berat Adsorben

Menghitung Berat Adsorben (nanotube carbon)	
Nanotube karbon komersial curah	
Berat <i>sampling storage</i> + Nanotube Carbon (NTC) + Glasswool	105, 52 gr
Berat <i>sampling storage</i> + Glasswool	103,60 gr
Berat bersih Nanotube karbon	1,92 gr
Nanotube karbon lokal curah	
Berat <i>sampling storage</i> + Nanotube Carbon (NTC) + Glasswool	105, 35 gr
Berat <i>sampling storage</i> + Glasswool	103,64 gr
Berat bersih Nanotube karbon	1,71 gr
Nanotube karbon komersial compacted	
Berat <i>sampling storage</i> + Nanotube Carbon (NTC) + Glasswool	106, 04 gr
Berat <i>sampling storage</i> + Glasswool	103,73 gr
Berat bersih Nanotube karbon	2,31 gr

Dapat terlihat dari **Tabel 4.3** bahwa jumlah adsorben nanotube karbon komersil *compacted* lebih besar daripada nanotube karbon komersil curah. Hal ini karena jumlah nanotube karbon *compacted* yang dapat ditampung *sampling storage* lebih banyak untuk volume yang sama akibat gaya tekan sebesar 2 *US metric tone*, dibandingkan dengan nanotube karbon komersil yang tercurah. Sedangkan jumlah nanotube karbon lokal yang lebih kecil dikarenakan jumlahnya yang terbatas pada produksi sebelumnya.

Pengukuran helium void volume dilakukan pada beberapa variasi tekanan rendah, sehingga didapatkan helium void volume rata-rata pada sistem rangkaian

alat adsorpsi. **Tabel 4.4, 4.5** dan **4.6** dibawah ini menunjukkan hasil perhitungan helium void volume untuk setiap adsorben.

Tabel 4.4 Void Volume Nanotube Karbon Komersil Curah

Helium void volume nanotube karbon komersil curah						
Pressure initial sampling (psia)	14,7	95,48	182	259,98	304,14	382,35
Pressure final sampling (psia)	95,48	182	259,98	304,14	382,35	404,25
Pressure Dozing initial (psia)	417,59	417,59	417,59	417,59	417,59	417,59
Pressure Dozing final (psia)	414,59	411,93	409,47	408,27	405,51	404,81
He void volume (ml)	13,81	13,72	13,82	13,58	14,04	14,06
He void volume rata-rata	13,84					
Standar Deviasi	0,05					

Tabel 4.5 Void Volume Nanotube Karbon Lokal Curah

Helium void volume nanotube karbon lokal (curah)						
Pressure initial sampling (psia)	14,7	170,66	258,17	438,38	534,44	668,03
Pressure final sampling (psia)	170,66	258,17	438,38	534,44	668,03	790,87
Pressure Dozing initial (psia)	949,2	949,2	949,2	949,2	949,2	949,2
Pressure Dozing final (psia)	943,62	940,73	934,96	932,45	927,98	923,44
He void volume (ml)	13,91	14,04	13,98	13,53	13,78	14,18
He void volume rata-rata	13,9					
Standar Deviasi	0,23					

Tabel 4.6 Void Volume Nanotube Karbon Komersial *Compacted*

Helium void volume nanotube karbon komersil (compact)				
Pressure initial sampling (psia)	14,7	132,93	216,46	304,33
Pressure final sampling (psia)	132,93	216,46	304,33	390,35
Pressure Dozing initial (psia)	423,84	423,84	423,84	409,42
Pressure Dozing final (psia)	419,83	417,46	414,78	406,83
He void volume (ml)	13,29	13,03	13,19	13,39
He void volume rata-rata	13,23			
Standar Deviasi	0,13			

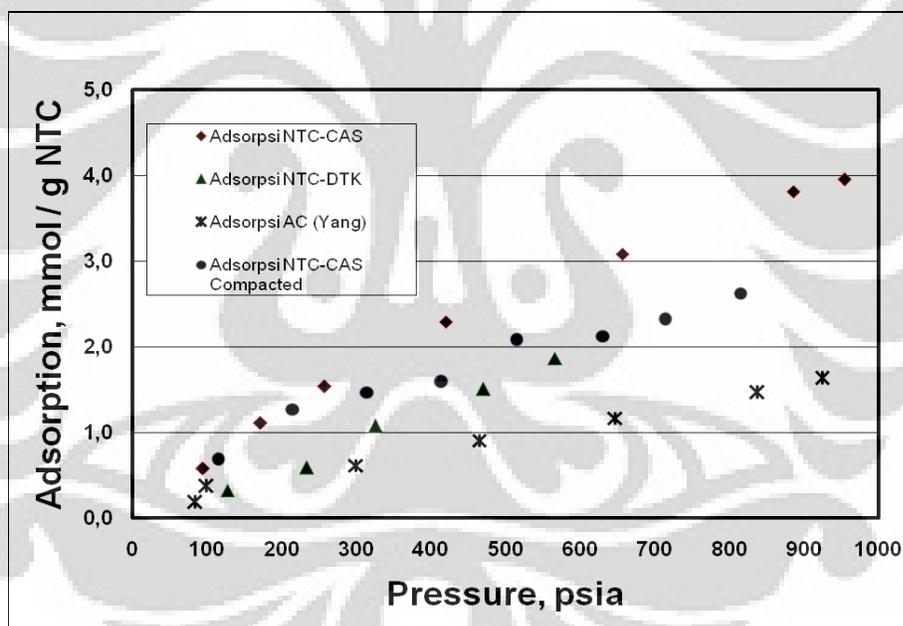
Sebagaimana terlihat dari data yang ditampilkan pada tabel diatas, jumlah adsorben dapat mempengaruhi void volume, semakin besar jumlah adsorben dalam sampling storage menyebabkan void volume yang semakin kecil. Hal ini dapat terlihat dari void volume nanotube karbon *compact* yang lebih kecil

karena jumlah adsorben yang lebih besar, dibandingkan dengan void volume nanotube karbon curah.

4.5. Hasil Uji Adsorpsi Tekanan Tinggi

Pengujian adsorpsi hidrogen dengan menggunakan adsorben dari nanotube karbon komersial dan nanotube karbon lokal, akan memberikan profil yang berbeda. Pada penelitian ini, uji daya adsorpsi dilakukan dengan kondisi temperatur yang dijaga agar mendekati isotermaal.

Pada Gambar, dapat dilihat data hasil adsorpsi yang terjadi pada NTC komersial curah, NTC lokal curah dan NTC komersial *compacted* pada kondisi isotermaal (25°C). Sebagai perbandingan, pada **Gambar 4.9** juga dapat terlihat adsorpsi gas hidrogen dengan arang aktif sebagai adsorben (Ritter, J.A and R.T. Yang, 1987).



Gambar 4.9 Kurva Adsorpsi Gas Hidrogen

Sebagaimana terlihat pada **Gambar 4.9** perbedaan profil yang ditunjukkan pada adsorpsi NTC *compacted* dan NTC curah disebabkan oleh perbedaan preparasi adsorben NTC *compacted* yang diberikan tekanan sebesar 2 *US metric tone*. Proses pengambilan data dilakukan setiap 2 jam setelah data akuisisi pada komputer stabil, waktu pengambilan data yang singkat kemungkinan menyebabkan data yang dicatat adalah data adsorpsi NTC *compacted* belum

mencapai kesetimbangan adsorpsi sehingga profil adsorpsi yang ditunjukkan pada NTC *compacted* tidak stabil.

Dapat terlihat juga pada **Gambar 4.9** bahwa adsorpsi yang paling tinggi diperoleh pada adsorpsi dengan menggunakan NTC komersial curah. Jumlah mmol hidrogen/gr NTC sekitar 4 mmol, berarti hanya 0,8 % gas hidrogen yang dapat teradsorpsi kedalam 1 gram NTC komersial curah. Pada kurva diatas dapat terlihat juga bahwa NTC lokal curah lebih rendah kapasitas adsorpsinya, pada tekanan 600 psia, jumlah mmol hidrogen/gr NTC sekitar 1,9 mmol, atau bisa dikatakan 0,38 % gas hidrogen yang dapat teradsorpsi, sedangkan NTC komersial curah pada tekanan yang sama kapasitas adsorpsinya sekitar 0,6 %. Hal ini dikarenakan NTC lokal masih mengandung karbon amorf dan kristalnya masih banyak mengandung Ni, dan senyawa pengotor, hal inilah kemungkinan yang menyebabkan kapasitas adsorpsinya rendah.

Teknologi penyimpanan hidrogen yang telah ada saat ini mampu menampung 1,65 % gas hidrogen dalam metal hidrida pada $T = 25^{\circ}\text{C}$; $P = 900$ psia (H Bank Teknologi inc). Daya adsorpsi storage metal hidrida dua kali lebih besar daripada adsorpsi NTC komersial curah pada tekanan yang sama, akan tetapi pada proses adsorpsi dan desorpsinya terjadi proses eksoterm dan endoterm sehingga membutuhkan panas. Sedangkan *storage* hidrogen dengan menggunakan nanotube karbon proses desorpsinya mudah dan tidak membutuhkan energi yang besar, hal inilah yang menjadikan *storage* dengan nanotube karbon sebagai menjadi pilihan alternatif *storage* hidrogen

4.6. Kelebihan NTC Sebagai Storage Hidrogen

Keuntungan menggunakan nanotube karbon sebagai storage hidrogen terutama pada kemampuan untuk menyimpan gas hidrogen yang lebih besar dibandingkan didalam tangki storage gas tanpa adsorben. Dari perhitungan volumetrik untuk storage hidrogen dapat terlihat pada volume yang sama, yaitu sekitar 16 ml, kapasitas storage hidrogen dengan menggunakan nanotube karbon 23 % lebih besar kapasitas penyimpanan gas hidrogen daripada storage yang tidak menggunakan nanotube karbon, pada kondisi yang sama ($P= 1000$ Psia , dan $V= 16$ ml), jumlah mmol gas hidrogen yang dapat teradsorpsi pada storage dengan

nanotube karbon adalah 59,48 mmol lebih besar dibandingkan dengan storage hidrogen tanpa nanotube karbon yaitu 48,31 mmol. Perhitungan yang lebih rinci dapat dilihat pada Lampiran.

4.7. Representasi Data Adsorpsi Dengan Model Langmuir

Untuk model Langmuir, digunakan parameter-parameter, yaitu konstanta adsorpsi Langmuir (b), dan kapasitas adsorpsi maksimum (n_{maks}). Parameter-parameter tersebut bergantung pada temperatur, tekanan, dan jenis adsorbat, dan jenis adsorben. Persamaan model Langmuir yang digunakan terdapat di bawah ini:

$$n_{gibbs} = n_{maks} \frac{bP}{1 + bP} \quad (2.9)$$

dengan

$$b = b_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.2)$$

dan

$$b_0 = \frac{\alpha}{k_d \sqrt{2\pi MRT}} \quad (2.3)$$

dimana n_{maks} merupakan kapasitas adsorpsi maksimum (mmol/g) dan P (psia) merupakan tekanan. Dari Persamaan (2.9) nilai n_{maks} dan tekanan berbanding lurus sehingga nilai kapasitas adsorpsi akan terus meningkat seiring dengan naiknya nilai tekanan. Selain itu, n_{maks} juga dipengaruhi oleh temperatur adsorpsi. Semakin tinggi temperatur adsorpsi, maka kapasitas adsorpsi pada adsorben semakin menurun. Hal ini terjadi karena peningkatan temperatur mempengaruhi nilai kalor adsorpsi, dimana ketika temperatur naik, nilai kalor adsorpsi akan menurun.

Parameter yang kedua adalah konstanta adsorpsi Langmuir (b) yang besarnya bergantung pada pada temperatur pada sistem. Arti lain dari nilai b ini adalah energi interaksi antara molekul gas dengan inti aktif adsorben. Konstanta b dapat ditunjukkan dengan persamaan $b = \left(\frac{\alpha}{k_d \sqrt{2\pi MRT}}\right) \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$. Oleh karena itu, nilai

b akan berbanding terbalik dengan nilai temperatur, dimana semakin tinggi temperatur, maka ikatan antara molekul gas dan inti aktif adsorben akan semakin rendah. Penurunan nilai b ini disebabkan karena peningkatan temperatur akan menyebabkan difusivitas molekul adsorbat ke permukaan menjadi lebih rendah,

sehingga kemungkinan adsorbat untuk berikatan dengan adsorben menjadi semakin rendah pula.

Tabel 4.7, 4.8, 4.9 dan **4.10** menunjukkan perbandingan data adsorpsi hidrogen NTC komersial curah, NTC lokal curah, dan NTC komersial *compacted* juga adsorpsi gas hidrogen dengan arang aktif sebagai adsorben, terhadap hasil permodelan Langmuir.

Tabel 4.7 Adsorpsi Hidrogen dengan Arang Aktif

Arang aktif (Ritter, J.A and R.T. Yang, 1987)							
P (psia)	85	100	300	465	648	838	925
n(mmol/g)	0,18	0,37	0,61	0,91	1,16	1,46	1,63
nLangmuir	0,18	0,21	0,61	0,90	1,19	1,46	1,58
% AbsDev	0,01	41,47	0,001	0,43	2,31	0,17	3,21

Tabel 4.8 Adsorpsi Hidrogen Nanotube Karbon Komersial Curah

Nanotube karbon komersial (curah)							
P (psia)	94	171	257	420	656	886	954
n(mmol/g)	0,57	1,11	1,53	2,29	3,08	3,81	3,95
nLangmuir	0,64	1,09	1,55	2,29	3,14	3,78	3,95
% AbsDev	10,71	1,36	1,13	0,004	1,75	0,65	0,003

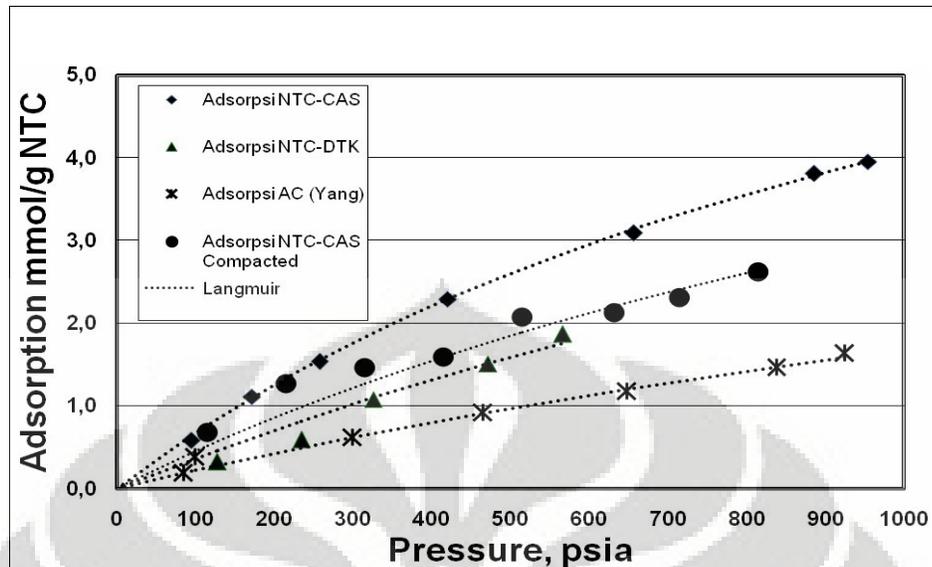
Tabel 4.9 Adsorpsi Hidrogen Nanotube Karbon Lokal Curah

Nanotube karbon lokal (curah)					
P (psia)	127	234	325	471	566
n(mmol/g)	0,32	0,58	1,07	1,50	1,86
nLangmuir	0,46	0,81	1,09	1,50	1,75
%AbsDev	42,67	38,70	1,66	6,87E-06	5,82

Tabel 4.10 Adsorpsi Hidrogen Nanotube Karbon Komersial *Compacted*

Nanotube karbon komersil (<i>compacted</i>)								
P (psia)	115	215	315	415	514	631	714	814
n(mmol/g)	0,68	1,27	1,47	1,59	2,07	2,12	2,31	2,62
nLangmuir	0,51	0,91	1,26	1,59	1,88	2,20	2,40	2,64
%AbsDev	25,23	28,46	13,77	0,004	9,12	3,57	3,84	0,60

Hasil perbandingan antara data adsorpsi hasil penelitian terhadap permodelan Langmuir sederhana juga dapat terlihat pada **Gambar 4.10** di bawah ini.



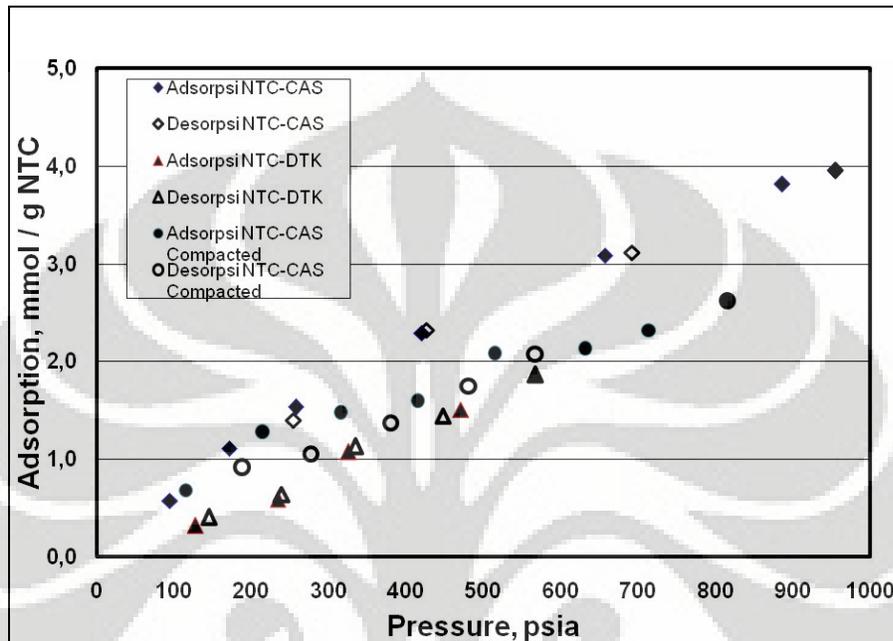
Gambar 4.10 Perbandingan Adsorpsi Hidrogen dengan Permodelan Langmuir

Sebagaimana terlihat pada **Tabel 4.7, 4.8, 4.9, 4.10** dan **Gambar 4.10** secara umum data adsorpsi dapat direpresentasikan dengan baik oleh permodelan Langmuir, dengan % Deviasi 0,004 – 5 %. Untuk % deviasi NTC komersial *compacted* agak besar sekitar 9 – 13 %, sebagaimana telah dibahas sebelumnya bahwa pengambilan data untuk NTC komersial *compacted* sebelum terjadinya kesetimbangan adsorpsi, hal inilah yang mengakibatkan % deviasi NTC komersial *compacted* agak besar.

4.8. Hasil Uji Adsorpsi Dan Desorpsi

Adsorpsi fisis adalah adsorpsi yang terjadi karena adanya gaya Van Der Waals (gaya tarik-menarik yang relatif lemah) antara adsorbat (hidrogen) dengan permukaan adsorben. Adsorpsi ini terjadi apabila suatu adsorbat dialirkan pada permukaan adsorben yang bersih. Pada adsorpsi fisis, adsorbat tidak terikat 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. Adsorpsi fisis adalah suatu peristiwa yang reversibel, sehingga jika kondisi operasinya diubah akan membentuk kesetimbangan baru.

Sebagaimana yang terlihat pada **Gambar 4.11**, adsorpsi hidrogen NTC komersial curah, NTC komersial *compacted* dan NTC lokal curah menggambarkan profil adsorpsi dan desorpsi yang hampir sama, berarti adsorpsi yang terjadi adalah adsorpsi fisik.



Gambar 4.11 Perbandingan Adsorpsi dan Desorpsi Hidrogen dengan Variasi Adsorben

Pada pembahasan sebelumnya, efek yang ditimbulkan oleh gaya tekan sebesar 2 *US metric tone* menyebabkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kesetimbangan adsorpsi jauh lebih besar daripada NTC komersial curah. Proses pengambilan data yang terlalu singkat (2 jam), menyebabkan data adsorpsi NTC komersial *compacted* cenderung tidak stabil. Apabila waktu adsorpsi NTC komersial *compacted* diperpanjang (sekitar 10 jam), maka profil adsorpsi yang ditunjukkan oleh NTC komersial *compacted* diperkirakan akan mendekati adsorpsi NTC komersial curah. Hal inilah yang semakin menegaskan bahwa adsorpsi yang terjadi pada NTC komersial *compacted* adalah adsorpsi fisika, profil adsorpsi dan desorpsi yang tidak stabil kemungkinan disebabkan data diambil pada saat kesetimbangan adsorpsi belum tercapai.

BAB V

KESIMPULAN

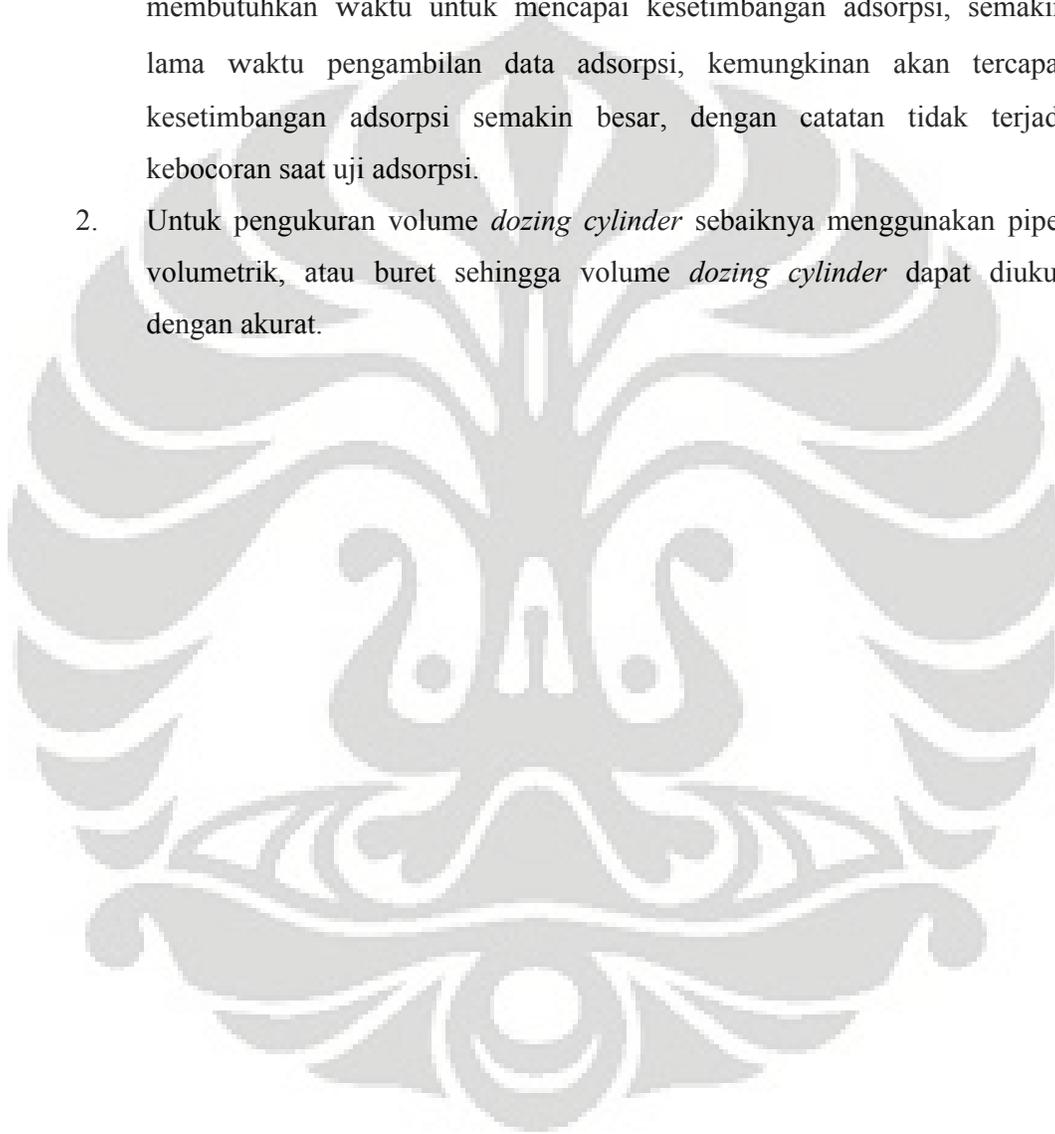
5.1 Kesimpulan

1. Pada penelitian uji adsorpsi gas hidrogen pada tekanan tinggi, dapat ditarik kesimpulan bahwa pada adsorpsi hidrogen kondisi isotermal (25 °C) dengan menggunakan variasi tiga adsorben, kapasitas adsorpsi akan meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan.
 - Pada adsorpsi NTC komersial curah, adsorpsi gas hidrogen meningkat dari 0,6 mmol/g pada 94 psia menjadi 3,95 mmol/g pada 954 psia.
 - Pada adsorpsi NTC lokal curah, adsorpsi gas hidrogen meningkat dari 0,32 mmol/g pada 128 psia menjadi 1,86 mmol/g pada 567 psia.
 - Pada adsorpsi NTC komersial *compacted*, adsorpsi gas hidrogen meningkat dari 0,68 mmol/g pada 115 psia menjadi 2,6 mmol/g pada 815 psia.
2. Kapasitas adsorpsi nanotube karbon lokal curah lebih rendah dibandingkan dengan kapasitas adsorpsi nanotube karbon komersial. Pada tekanan 600 psia, jumlah mmol H₂/g NTC lokal sekitar 1,9 mmol, atau bisa dikatakan 0,38 % gas hidrogen yang dapat teradsorpsi, sedangkan NTC komersil (curah) pada tekanan yang sama kapasitas adsorpsinya sekitar 0,6 %. Hal ini dikarenakan nanotube karbon lokal masih terdapat karbon amorf dan kristalnya banyak mengandung Ni, dan senyawa pengotor, hal inilah yang menyebabkan kapasitas adsorpsinya rendah.
3. Kapasitas storage hidrogen dengan menggunakan nanotube karbon 23 % lebih besar kapasitas penyimpanan gas hidrogen daripada storage yang tidak menggunakan nanotube karbon. Pada kondisi operasi sama, jumlah mmol gas hidrogen yang dapat teradsorpsi pada storage dengan nanotube karbon adalah 59,48 mmol lebih besar dibandingkan dengan storage hidrogen tanpa nanotube karbon yaitu 48,31 mmol.
4. Secara umum data adsorpsi hidrogen dengan menggunakan variasi tiga adsorben, dapat direpresentasikan dengan baik oleh permodelan Langmuir, dengan % deviasi NTC lokal curah sebesar 5 – 6 %, dan 0,004 – 5 % deviasi

5. pada NTC komersial curah. Untuk % deviasi NTC komersial *compacted* agak besar sekitar 9 – 13 %.

5.2 Saran

1. Adsorpsi hidrogen dengan menggunakan nanotube karbon sebagai adsorben membutuhkan waktu untuk mencapai kesetimbangan adsorpsi, semakin lama waktu pengambilan data adsorpsi, kemungkinan akan tercapai kesetimbangan adsorpsi semakin besar, dengan catatan tidak terjadi kebocoran saat uji adsorpsi.
2. Untuk pengukuran volume *dozing cylinder* sebaiknya menggunakan pipet volumetrik, atau buret sehingga volume *dozing cylinder* dapat diukur dengan akurat.



DAFTAR PUSTAKA

- Atmayudha, Ardhana, "Pembuatan Karbon Aktif Dari Tempurung Kelapa Dengan Perlakuan Aktivasi Terkontrol", Seminar, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik UI, Depok, 2006.
- Chen. X., et al. (2004). "Electrochemical Hydrogen Storage of Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibers". *International Journal of Hydrogen Energy*, 29, 743-748.
- Chengdu Organic Chemicals Co. Ltd., Chinese Academy of Sciences. *Nanotube Carbon: Multi-Walled Nanotube Carbon*. Diakses tanggal 11 juni 2009. <http://Chengdu Organic Chemicals Co Ltd, Chinese Academy of Sciences>.
- Criscone, J. M. (1993). *Activated Carbon*. UCAR Carbon Company Inc.
- Dillon, A.C.; Jones, K.M.; Bekkedahl, T.A.; Kiang, C. H.; Bethune, D.S.; and Heben, M.J., *Nature*, 386, 377 (1997).
- Do, D.D. (1998). *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*. Imperial College Press, London.
- Ermakova, M.A., D. Yu Ermakova. *Ni/SiO₂ and Fe/SiO₂ Catalysts for Production of Hydrogen and Filamentous Carbon via Methane Decomposition*. *Catalysis Today*, Vol. 77, 225-235. Elsevier, 2002.
- Fan, Y.Y.; Liao, B.; Wei, Y.L.; Lu, M.Q.; and Cheng, H.M., *Carbon*, 37, 1649 (1999)
- Fujishima, K. Honda, Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode, *Nature*, 1972, 238 (5358) 37-38.
- Kinshuk. Dasgupta¹. and Ramani. *Nanoparticle Research: Novel catalytic route to bulk production of high purity carbon nanotube*. Diakses tanggal 8 juni 2009. <http://springerlink>.
- Lihertinah, dkk., "Desain Prototipe Reaktor Steam Reforming Menggunakan Ultrasonik Nebulizer", Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB, Bandung, 2008.
- Maron, S. H., dan Lando, J. *Fundamentals of Physical Chemistry*. (New York: Macmillan Publishing Co. Inc., 1974).
- Mc. Cabe, W. L., Smith, J. C., dan Harriot, P. *Operasi Teknik Kimia*. (Jakarta: Penerbit Erlangga, 1999).
- Ning, G. Q., *Hydrogen Storage in Multi-Wall Carbon Nanotubes using Samples up to 85 g*, (China : Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing, 2003).
- Pabhassaro, Doni. (2007). *Pemodelan Adsorpsi Tekanan Tinggi Terhadap Gas Metana untuk Prediksi Potensi "Coalbed Methane" Indonesia Sebagai Sumber Energi Baru*. Skripsi, Depok, Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Petterson, Joakim, Ove Hjortsberg. (1999). *Hydrogen Storage Alternatives – A Technological and Economics Assessment*. KFB Reports vol 27.

- Purwanto W. W., M. Nasikin, E. Saputra, L. Song (2005). *Decomposition of Methane to Produce Nanocarbon and Hydrogen with Ni-Cu-Al-Si as the Catalyst*, Prosiding Seminar Nasional Rekamaya Kimia dan Proses, UNDIP Semarang.
- Qian, Dong et al. (2002). "Mechanics of Carbon Nanotubes". *Applied Mechanics Rev.*, vol. 55 no. 6.
- Ramadhania. (2007). *Pengembangan Model Adsorpsi Co₂ untuk Prediksi Potensi Coalbed Indonesia Sebagai Media Penyimpan Gas Rumah Kaca*. Skripsi, Depok, Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Richard, M. A. (2007). "Gas Adsorption Process in Activated Carbon Over a Wide Temperature Range Above the Critical Point". *Adsorption Journal*, 2007.
- Rizky Romadhona. (2008). *Evaluasi Persamaan Langmuir Dalam Mererpresentasikan Data Adsorpsi Gas Pada Tekanan 0-17 MPa*. Skripsi, Depok, Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Ruthven, D. M. (1993). "Adsorption, Encyclopedia of Chemical Technology". Wiley Inter Science, vol. 1, 4th edition.
- Vidya, N, Eris, "Adsorpsi Tekanan Tinggi Gas Metana dan Nitrogen pada Karbon Aktif serta Pemodelannya Menggunakan Ono-Kondo dan Langmuir Modifikasi", Skripsi, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik UI, Depok, 2009.
- Yang, R.T. (1987). *Gas Separation by Adsorption Process*. Butterworth Publishers: Stoneham.
- Yulianti, Ira, "Perancangan Reaktor Katalitik Terstruktur untuk Produksi Karbon Nanotube dan Hidrogen Melalui Proses Dekomposisi Katalitik Metana", Skripsi, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik UI, Depok, 2007.
- Zhou, L. and Zhou Yaping, *Linearization of adsorption Isotherms for High Pressure Applications*, Chemical Engineering Science, 53 (14), 2531-2536 (1998).

LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Kapasitas Storage Gas Hidrogen Tanpa Menggunakan Nanotube Carbon

Pada tekanan 1 atm dan kondisi temperatur 25 °C, 1 mol = 22,4 L

$$\begin{aligned} \text{Volume storage} &= \frac{\pi}{4} \times 1 \text{ cm}^2 \times 20 \text{ cm} \\ &= 15.5 \text{ cm}^3 \approx 16 \text{ mL} \end{aligned}$$

Untuk storage tanpa nanotube karbon :

$$P.V = z.n.R.T$$

Menjadi :

$$n_{\text{Hidrogen}} = \frac{P.V}{z.R.T}$$

Pada tekanan 1 atm dan kondisi temperatur 25 °C, 1 mol = 22,4 L

Pada tekanan 1 atm dan volume silinder storage 16 ml, jumlah gas hidrogen yang dapat disimpan adalah :

$$16 \text{ L} / 22400 \text{ mL} \times 1000 \text{ mmol} = 0,71 \text{ mmol}$$

Untuk 68,046 atm (1000 Psia/ 6 Mpa) jumlah gas hidrogen yang dapat disimpan adalah :

$$0,71 \text{ mmol} \times 68,046 = 48,31 \text{ mmol}$$

Lampiran 2. Perhitungan Kapasitas Storage Gas Hidrogen dengan Menggunakan *Nanotube Carbon*

Jumlah hidrogen yang teradsorpsi didalam nanotube karbon :

Bulk density nanotube karbon adalah 0,27 g/ml, jadi jumlah nanotube karbon yang dapat diisikan ke dalam silinder storage tersebut adalah sebesar :

$$16 \times 0,27 = 4,32 \text{ gram}$$

Dari hasil uji adsorpsi gas hidrogen pada 1000 Psia (68,046 atm) didapatkan jumlah gas hidrogen yang teradsorpsi dalam nanotube karbon adalah 4 mmol/g NTC. Dengan demikian pada 4,32 g NTC akan terserap gas hidrogen sebesar :

$$4 \text{ mmol/g NTC} \times 4,32 \text{ g} = 17,28 \text{ mmol}$$

Jumlah Hidrogen yang tidak teradsorpsi didalam nanotube karbon :

True density nanotube karbon adalah 2,1 gr/ml, jadi NTC akan menempati ruang sebesar :

$$(4,32 \text{ gram}) / (2,1 \text{ g/ml}) = 2,06 \text{ ml}$$

Sehingga dapat diketahui ruang yang tersisa untuk gas hidrogen yang tidak teradsorpsi adalah sebesar :

$$16 \text{ ml} - 2,06 \text{ ml} = 13,94 \text{ ml}$$

Pada tekanan 1 atm dan kondisi temperatur 25 °C, 1 mol = 22,4 L

Pada tekanan 1 atm dan volume silinder storage 13,94 ml, jumlah gas hidrogen yang dapat disimpan adalah :

$$(13,94 \text{ ml}) / 22400 \text{ mL} \times 1000 \text{ mmol} = 0,62 \text{ mmol}$$

Untuk 68,046 atm (1000 Psia/ 6 Mpa) jumlah gas hidrogen yang dapat disimpan adalah :

$$0,62 \text{ mmol} \times 68,046 = 42,2 \text{ mmol}$$

Jadi jumlah gas hidrogen total yang dapat disimpan pada silinder 16 ml yang diisikan oleh NTC adalah sebesar :

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Hidrogen} &= n_{\text{Hidrogen teradsorpsi}} + n_{\text{Hidrogen tidak teradsorpsi}} \\ &= 42,2 \text{ mmol} + 17,28 \text{ mmol} \\ &= 59,48 \text{ mmol} \end{aligned}$$