



UNIVERSITAS INDONESIA

**KAPASITAS ADSORPSI TEKANAN TINGGI GAS
METANA PADA *CARBON NANOTUBE* UNTUK APLIKASI
*ADSORPTIVE STORAGE***

SKRIPSI

**R. MENNER ZAGLULSYAH NOVIYANTO
0706163810**

**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA**

**DEPOK
JANUARI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**KAPASITAS ADSORPSI TEKANAN TINGGI GAS
METANA PADA *CARBON NANOTUBE* UNTUK APLIKASI
*ADSORPTIVE STORAGE***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**R. MENNER ZAGLULSYAH NOVIYANTO
0706163810**

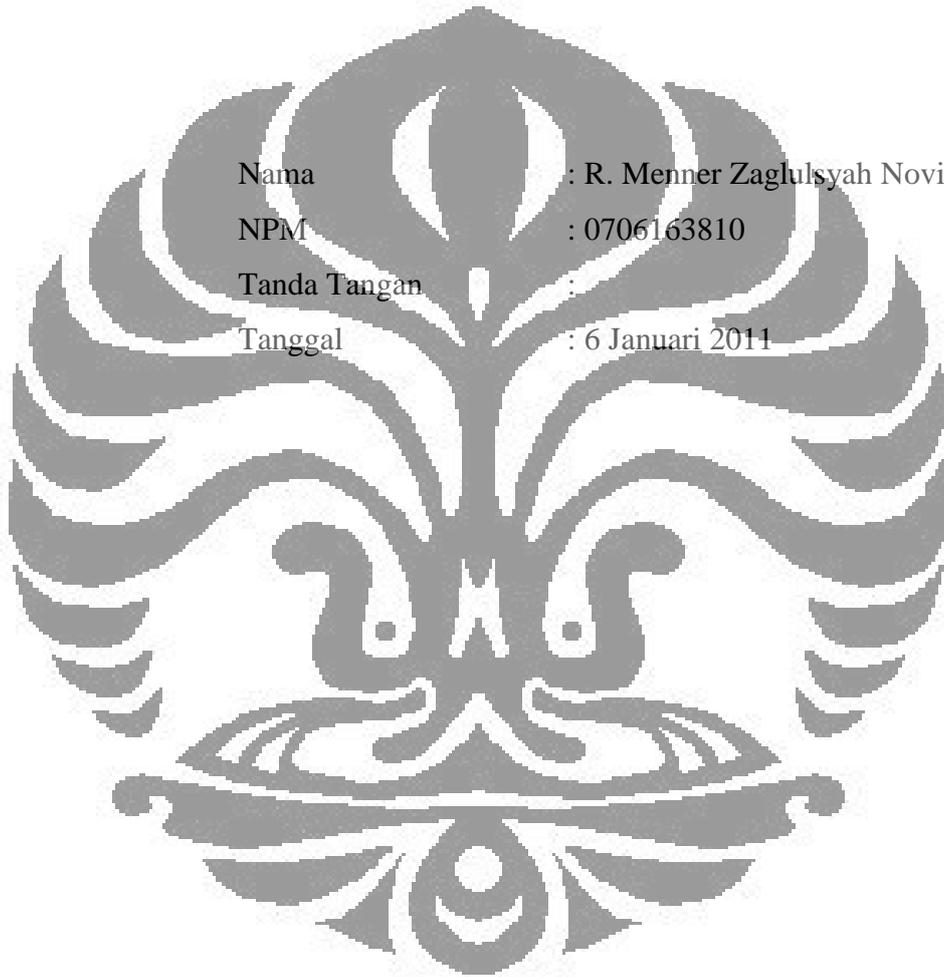
**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA**

**DEPOK
JANUARI 20110**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Makalah Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
Dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : R. Menner Zaglulsyah Noviyanto
NPM : 0706163810
Tanda Tangan :
Tanggal : 6 Januari 2011



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : R. Menner. Z. Noviyanto

NPM : 0706163810

Program Studi : Teknik Kimia

Judul Skripsi : Kapasitas Adsorpsi Tekanan Tinggi Gas Metana Pada
Carbon Nanotube Untuk Aplikasi *Adsorptive Storage*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian 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, Ph. D ()

Penguji : Prof. Dr. Ir. Widodo. W. P, DEA ()

Penguji : Dr. rer.nat. Ir. Yuswan Muharam, MT ()

Penguji : Dr. Eny Kusriini ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Januari 2011

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan makalah skripsi ini. Penulisan makalah skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan hingga penyusunan makalah ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan makalah skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
2. Bapak Ir. Mahmud Sudibandriyo, M.Sc, Ph.D, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan makalah skripsi ini.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. M. Nasikin, M,Eng selaku ketua lab RPKA atas pengarahan, perhatian, dan himbauan *safety* selama masa penelitian.
4. Seluruh dosen Departemen Teknik Kimia UI yang telah mengajar dan memberi saya wawasan sebagai mahasiswa teknik kimia.
5. Kedua orang tua saya, Tuti Sugiati dan R. Agustino Budi dan adik saya, Susun dan Roro atas kasih sayang, perhatian, bantuan, doa, dan dukungan yang selalu diberikan selama ini.
6. Rahayu Agus (Almh), nenek yang selalu memberikan perhatian, doa, dan dukungan tiada henti terhadap tugas akhir ini walaupun sampai akhir hayatnya.
7. Sahabat serta rekan-rekan yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan makalah skripsi ini: Suci Ayunda, Rahmawati Lestari, dan Kang Andri “Kuda” sebagai teman seperjuangan Penelitian Adsorpsi Gas Bertekanan Tinggi Pak Mahmud.
8. Prolessara Prasodjo, MT, yang telah memberikan banyak ilmu teknik adsorpsi dan saran-saran berharga dalam penelitian ini

9. Sukma Pamungkas, yang telah memberikan pengarahan pada saat preparasi penelitian.
10. Teman-teman Lab. RPKA : Angela J, Riyandi, Anggi, Gondang, Karin, dan Friska atas persahabatan, pemberian semangat, bantuan dan dukungannya selama ini dan selalu menemani di laboratorium RPKA
11. Kang Jajat dan “Prof” Ijal atas bantuan teknis dan kerjasamanya selama melakukan penelitian.
12. Mas Taufik, atas bantuannya dalam mencari literatur di perpustakaan serta Mas Sriyono dan Mas Mugeni yang membantu dalam administrasi.

Akhir kata, saya berharap semoga Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan kedepannya.

Depok, 27 Desember 2010

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : R. Menner Zaglulsyah Noviyanto

NPM : 0706163810

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 Tekanan Tinggi Gas Metana Pada *Carbon Nanotube* Untuk Aplikasi *Adsorptive Storage*

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 memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagaipenulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 6 Januari 2011

Yang menyatakan

(R. Menner Zaglulsyah Noviyanto)

ABSTRAK

Nama : R. Menner. Z. Noviyanto
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Kapasitas Adsorpsi Tekanan Tinggi Gas Metana pada *Carbon Nanotube* untuk Aplikasi *Adsorptive Storage*

Methane Adsorptive Storage merupakan metode peningkatan kapasitas dalam teknologi penyimpanan gas Metana. Dalam penelitian ini, *Multi-walled CNT (MWCNT)* komersial dari *Chinese Academic of Science* dan MWCNT lokal produksi Departemen Teknik Kimia UI diuji kemampuan adsorpsi gas Metana-nya dalam proses adsorpsi isotermis pada temperatur ruangan (25°C) dari 0 psia -1006 psia dengan interval 100 psi. Uji adsorpsi dan desorpsi gas Metana menggunakan metode volumetrik dengan temperatur konstan sehingga dapat dilakukan perhitungan adsorpsi isothermal Gibbs. Kapasitas adsorpsi maksimum MWCNT komersial mencapai 5,36 mmol/g pada tekanan 1006 psia, sedangkan MWCNT lokal hanya mencapai 0,48 mmol/g pada tekanan 986,16 psia. *Adsorptive Storage MWCNT* komersial memiliki *excess capacity* sebesar 33,2% dari storage biasa pada tekanan 1006 psia (69,36 bar), dengan kapasitas adsorpsi setara dengan 152,56 v(STP)/v pada 35 bar, hal ini masih lebih rendah dari target DOE yang menetapkan 180 v(STP)/v untuk kandidat adsorbèn pada *Methane Adsorptive Storage*.

Kata kunci : *Carbon Nanotube*, kapasitas adsorpsi Metana, desorpsi, *adsorptive storage*

ABSTRACT

Name : R. Menner. Z. Noviyanto
Majoring : Chemical Engineering
Judul : High Pressure Methane Adsorption Capacity on Carbon Nanotubes for Adsorptive Storage Applications

Methane Adsorptive Storage is a method of increasing the capacity of methane in storage technology. On this research, methane adsorption capability of commercial Multi-Walled CNT (MWCNT) from Chinese Academic of Science and local MWCNT from Department of Chemical Engineering UI have been tested in the isotherm adsorption at ambient temperature (25°C) from 0 psia up to 1006 psia at intervals of 100 psi. Adsorption and desorption test using a volumetric method with the constant temperature so that it can be calculated isothermal Gibbs adsorption. The maximum adsorption capacity of commercial MWCNT reaches 5,36 mmol/g at a pressure of 1006 psia, while the local MWCNT only reached 0,48 mmol / g at a pressure of 986,16 psia. Adsorptive Storage of commercial MWCNT have excess capacity amounting to 33,2% of the regular storage at 1006 psia (69,36 bar), with the adsorption capacity is equivalent to 152,56 v(STP)/v at 35 bar, its still lower than the DOE target which sets 180 v(STP)/v for the candidate adsorbents on Adsorptive Methane Storage.

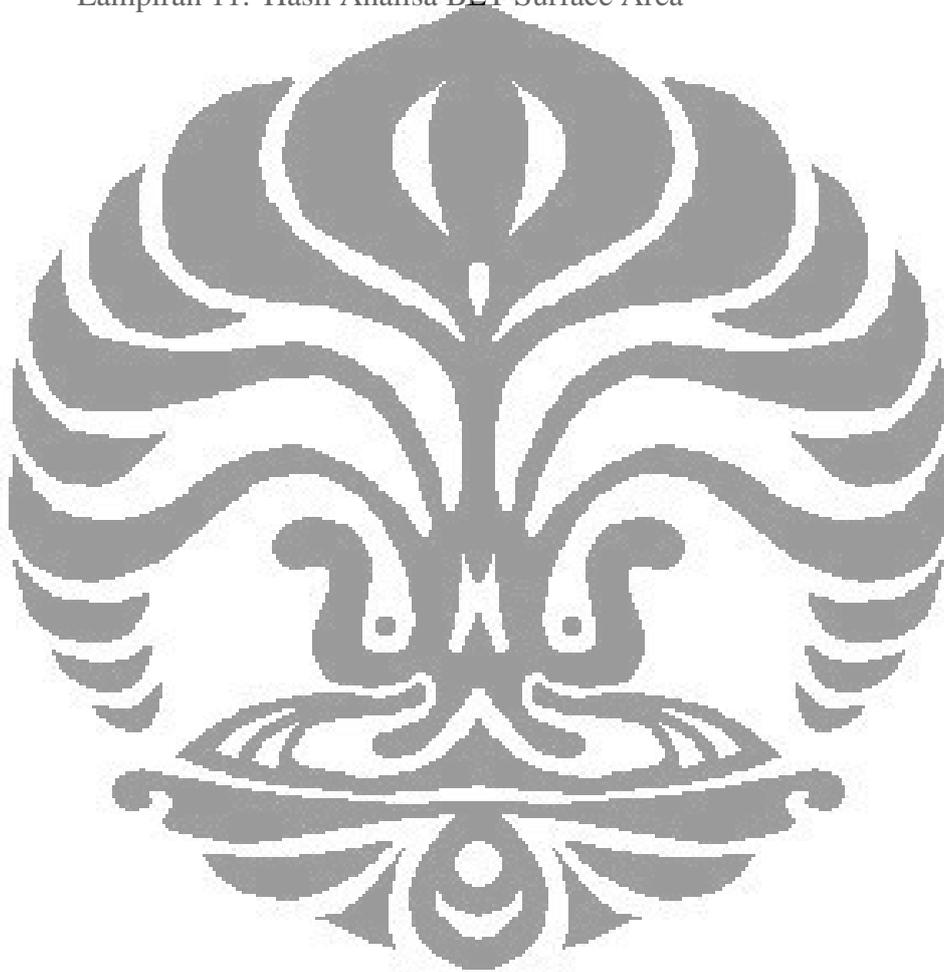
Keyword : Carbon Nanotube, Methane adsorption capacity, desorption, adsorptive storage

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Adsorpsi	6
2.1.1 Klasifikasi Fenomena Adsorpsi.....	7
2.1.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi	10
2.2 Keseimbangan Adsorpsi	11
2.2.1 Adsorpsi Monolayer dan Multilayer	13
2.2.2 Permodelan Keseimbangan Adsorpsi.....	16
2.3 Adsorben	27
2.3.1 Adsorben Tak Berpori	28
2.3.2 Adsorben Berpori	28
2.4 Nano Karbon/Nanotube Karbon (CNT).....	30
2.4.1 <i>Multi-Walled Caron Nanotube (MWCNT)</i> Produksi Lokal DTK-FTUI (Yulianty, 2008)	33

2.4.2 Multi-Walled Carbon Nanotube (MWCNT) Produk Komersial	35
2.5.1 State of The Art Penelitian Adsorptive Storage Metana	36
BAB 3 METODE PENELITIAN	38
3.1 Lokasi Penelitian	38
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	38
3.3 Rancangan Penelitian	38
3.4 Prosedur Penelitian	40
3.4.1. Persiapan Alat Uji dan Bahan	40
3.4.2 Pengujian Adsorpsi Metana	40
3.4.4 Pengujian Desorpsi Metana	43
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	45
4.1 Preparasi Adsorben <i>Carbon Nanotube</i>	45
4.1.1 Spesifikasi Adsorben	45
4.1.2 Hasil Preparasi Adsorben	49
4.2 Hasil Preparasi Peralatan Uji Adsorpsi	50
4.3 Hasil Tes Kebocoran	52
4.4 Hasil Pengukuran Volume <i>Void Area Sampling</i>	54
4.5 Hasil Uji Kapasitas Adsorpsi Tekanan Tinggi Gas Metana	57
4.6 Hasil Uji Desorpsi Gas Metana Pada <i>Carbon Nanotube</i>	60
4.7 Representasi Data Adsorpsi Dengan Permodelan Langmuir	62
4.8 Aplikasi CNT Sebagai Adsorben <i>Adsorptive Storage</i> Metana	65
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	70
5.1 Kesimpulan	70
5.2 Saran	71
DAFTAR PUSTAKA	72
LAMPIRAN	76
Lampiran 1. Tabulasi Pengujian He Volume Void Pada Sampel CNT Komersial	
Lampiran 2. Tabulasi Pengujian He Volume Void Pada Sampel CNT Lokal	
Lampiran 3. Tabulasi Hasil Uji Adsorpsi Pada Sampel CNT Komersial	
Lampiran 4. Tabulasi Hasil Uji Adsorpsi Pada Sampel CNT Lokal	

- Lampiran 5. Tabulasi Hasil Uji Desorpsi Pada Sampel CNT Komersial
- Lampiran 6. Tabulasi Hasil Uji Desorpsi Pada Sampel CNT Lokal
- Lampiran 7. Representasi Permodelan Langmuir
- Lampiran 8. *Fitting* Parameter Permodelan Langmuir
- Lampiran 9. Perhitungan Komparasi Kapasitas Methane *Adsorptive Storage CNT* Dengan *Storage* Biasa
- Lampiran 10. Faktor Kompresibilitas Metana (z)
- Lampiran 11. Hasil Analisa BET Surface Area



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Adsorpsi gas pada material berpori pada kondisi kesetimbangan (Sudibandriyo, 2003)	12
Gambar 2. 2 Profil kurva pengaruh tekanan terhadap jumlah zat yang diadsorpsi dalam temperatur berbeda (Ruthven, 1984)	12
Gambar 2. 3 Profil kurva adsorpsi isostere(Ruthven, 1984).....	13
Gambar 2. 4 Profil tipe-tipe adsorpsi isothermal	14
Gambar 2. 5 Kurva energi potensial pada permukaan adsorben (Ruthven, 1984.p.70)	17
Gambar 2. 6 Profil model isothermis Langmuir dan turunannya (Ruthven, 1984.p.70)	20
Gambar 2. 7 Plot kurva fitting variable BET ($b=KB$) (Ruthven, 1984.p.41)	22
Gambar 2. 8 Ilustrasi keadaan fasa teradsorpsi pada suatu pori adsorben	23
Gambar 2. 9 Grafik adsorpsi isothermis Gibbs CO_2	25
Gambar 2. 10 Metode Regresi kurva adsorpsi untuk menentukan densitas gas fasa teradsorpsi: Adsorpsi CO_2 pada karbon aktif pada temperatur 318.2K (Sudibandriyo, <i>et al</i> , 2003)	26
Gambar 2. 11 Profil tipe-tipe kurva isotherm Gibbs.....	26
Gambar 2. 12 Bentuk-bentuk pori pada adsorben.....	28
Gambar 2. 13 Skema struktur <i>Carbon Nanotube</i>	30
Gambar 2. 14 Citra SWCNT melalui SEM (a), <i>Inner Diameter</i> dari pori-pori SWCNT (b).....	32
Gambar 2. 15 Ukuran dari SWCNT (a), Penampang MWCNT (b).....	33
Gambar 2. 16 Pencitraan SEM dari MWCNT produksi DTK (Yulianty, 2008) ..	34
Gambar 2. 17 Skema <i>Adsorptive Storage</i> Metana	35
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	39
Gambar 3. 2 Skema Alat Uji Adsorpsi.....	43
Gambar 4. 1 Pencitraan TEM MWCNT – CAS M1090617	46
Gambar 4. 2 Pencitraan SEM MWCNT - CAS M1090617.....	47
Gambar 4. 3 Kurva Raman Spectra MWCNT - CAS M1090617	47

Gambar 4. 4 Citra SEM CNT Lokal Produksi DTK.....	48
Gambar 4. 5 Adsorben CNT CNT lokal DTK (kiri) CNT Komersial – CAS (kanan)	49
Gambar 4. 6 Pembagian Daerah Alat Uji Adsorpsi	50
Gambar 4. 7 Rangkaian Peralatan Uji Adsorpsi	51
Gambar 4. 8 Hasil Tes Kebocoran	53
Gambar 4. 9 Kurva Tes Kebocoran Percobaan 1 pada 6 Oktober 2010	53
Gambar 4. 10 Kurva Tes Kebocoran Percobaan 2 pada 20 Oktober 2010	54
Gambar 4. 11 Grafik Jumlah Metana Yang Teradsorpsi Pada CNT.....	58
Gambar 4. 12 Perbandingan Adsorpsi dan Desorpsi Gas Metana Pada CNT	61
Gambar 4. 13 Fitting Permodelan Langmuir Pada Hasil Adsorpsi Gas Metana Pada CNT.....	63
Gambar 4. 14 Perbandingan Kapasitas Penyimpanan <i>Adsorptive Storage</i> dan Storage Kosong ($V=8,85$ mL) Pada Tekanan Percobaan	66
Gambar 4. 15 Simulasi Perbandingan Kapasitas Penyimpanan <i>Adsorptive Storage</i> dan Storage Kosong ($V=8,85$ mL) Pada Tekanan Diatas Tekanan Percobaan.....	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tabel karakteristik Adsorpsi Fisika	9
Tabel 2. 2 <i>Tabel perbedaan Adsorpsi Fisika dan Kimia</i>	10
Tabel 2. 3 <i>Karakteristik, kekurangan dan kelebihan adsorben (Ramadhania, 2007)</i>	29
Tabel 2. 4 <i>Karakteristik Carbon Nanotube (Shantya, 2009)</i>	33
Tabel 2. 5 <i>Karakteristik Multi-walled Carbon Nanotube Komersial</i>	35
Tabel 2. 6 <i>State of The Art Penelitian Adsorptive Storage Metana</i>	37
Tabel 4. 1 Spesifikasi MWCNT Chinese Academic of Science	46
Tabel 4. 2 Hasil Karakterisasi BET <i>Specific Surface Area</i>	48
Tabel 4. 3 Tabulasi Massa Adsorben Aktual pada Sampling Cylinder	49
Tabel 4. 4 Diameter Molekul Gas Penguji Volume Void	55
Tabel 4. 5 Tabulasi Hasil Uji Volume Void Menggunakan Gas Helium	56
Tabel 4. 6 Estimasi Densitas Gas Dalam Fasa Teradsorpsi Dengan Metode Yang Berbeda (Sudibandriyo, et al, 2003)	59
Tabel 4. 7 Parameter Permodelan Langmuir	63

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Isu-isu tentang penggunaan energi bersih pada kehidupan manusia diabad ini telah lama dipublikasikan untuk mengurangi polusi yang terjadi di atmosfer bumi. Hal ini menyebabkan pemerintah beberapa negara maju, seperti Amerika dan Jepang, melakukan riset tentang “*Clean Energi*” untuk kehidupan manusia di masa depan (Dell, et.al, 2004). Tak dapat dipungkiri, Gas Hidrogen dan gas alam memiliki kemampuan untuk menghasilkan energi tanpa menghasilkan polusi, sehingga dapat di aplikasikan sebagai pengganti energi fosil di masa depan. Namun secara kenyataannya, terdapat banyak sekali masalah teknologi dan ekonomi dalam proses produksi gas Metana, sistem penyimpanan, dan sistem transportasinya. Semua permasalahan ini menjadi penghambat bagi efisiensi penggunaan Metana sebagai gas “*Clean Energi*”.

Salah satu masalah yang menjadi perhatian dalam pengaplikasian Metana adalah sistem penyimpanan dan distribusi gas tersebut terutama dalam bentuk gas alam. Secara umum, terdapat tiga metode untuk meningkatkan efisiensi *storage* dalam distribusi Metana, yaitu : pencairan, kompresi, dan adsorpsi pada material tertentu. Pada kondisi superkritis, Gas Metana tidak mungkin dicairkan dalam temperatur ruangan. Pada kondisi seperti ini dilakukan proses pencairan gas alam (Metana) untuk dapat mengurangi volume fisik gas, hal ini dilakukan dengan memakai biaya yang sangat besar. Pada metode kedua, dimana melibatkan proses kompresi dari *bulk fluid*. Menurut Dell, et.al (2004), Kompresi Metana (*Compressed Natural Gas*) dilakukan pada kondisi yang sangat ekstrim, yaitu pada tekanan sekitar 20-30 MPa. Kondisi seperti ini diperlukan suatu tempat yang tahan tekanan tinggi, *vessel* berdinding tebal dan berat, dan *multi-stage compression*. Metode penyimpanan seperti ini berharga sangat mahal dan memiliki keterbatasan instalasi pada kendaraan transportasi. Secara umum, metode kompresi kurang efisien secara biaya dan faktor keamanan.

Metode Adsorpsi merupakan metode generasi baru yang cukup menjanjikan dalam peningkatan efisiensi *storage* dan distribusi gas Metana, terutama dalam

penggunaan tekanan *storage* yang moderat dan suhu yang dapat mendekati suhu ruangan, sehingga efisiensi faktor keamanan dan biaya dapat terpenuhi. Adsorpsi gas Metana dapat menggunakan media berpori seperti fiber karbon, *carbon nanotubes* (CNT), *carbon nanohorn*, karbon aktif, dan zeolit (Rasoolzadeh, et.al, 2008).

Penemuan CNT sangat berkontribusi dalam pengembangan riset kimia karbon terutama sebagai absorber gas terbaru dengan kemampuan yang luar biasa. CNT terdiri dari ikatan-ikatan melingkar antar atom karbon yang tersusun secara tumpuk menumpuk sehingga menghasilkan suatu bentuk tabung berpori, hal inilah yang menyebabkan CNT memiliki kemampuan menyerap dan menyimpan gas. CNT dibagi menjadi *Multiple-walled Carbon Nanotubes* (MWCNTs) dan *Single-walled Carbon Nanotubes* (SWCNTs).

Secara studi pustaka, penelitian tentang daya adsorbansi terhadap Metana telah lama dilakukan, baik secara simulasi ataupun secara teoritis. Satuan daya adsorpsi dinyatakan dengan perbandingan volum adsorbat per volum adsorben (v/v), perbandingan massa adsorbat per massa adsorben (% wt), dan perbandingan jumlah zat adsorbat per massa adsorben (mmol/g). Lee et.al (2006) memproduksi MWCNTs dengan metode CVD untuk mendapatkan tingkat kemurnian CNT diatas 95%. Dari penelitian ini didapat kapasitas adsorpsi Metana sebesar 1,886 mmol/g pada 303,15 K dan tekanan 2,745 MPa. Bekyrova et.al (2003) menginvestigasi sifat adsorbansi dari *carbon nanohorn*. Mereka melaporkan jumlah Metana yang terserap sebanyak 160 v/v pada 303 K dan tekanan 3,5 MPa. Yulong et.al (2008) mempelajari penyimpanan Metana menggunakan MWCNTs pada temperatur ambien dan tekanan bervariasi dari 0 – 10,5 MPa dengan jumlah sampel sebanyak 80 g, dan pada penelitian ini didapat adsorpsi Metana sebanyak 11,7% wt pada 298 K dan 10,5 MPa.

Tanaka et al (2002) meneliti adsorpsi Metana pada SWCNT dengan cara permodelan *Density Functional Theory* (DFT) dan memprediksi bahwa kapasitas adsorpsinya mencapai 12,3 mmol/g pada temperatur ruangan. Cao et al (2003) meneliti adsorpsi Metana pada SWCNT yang disusun membentuk segitiga menggunakan *software Grand Canonical Monte Carlo* (GCMC) simulation. Nilai dari adsorpsi maksimal didapat sekitar 13,4 mmol/g.

Zhang et al (2002) pernah mensimulasikan adsorpsi Metana dengan SWCNT menggunakan GCMC bermetode DFT pada tekanan 300 K dan 6 MPa. Walaupun semuanya terfokus pada salah satu jenis dari CNT, hal ini tetap dapat menggambarkan bahwa CNT merupakan bahan adsorbent yang dapat direkomendasikan untuk diintegrasikan dalam sistem *Adsorbed Natural Gas* (ANG) (Lee et al, 2006). CNT berjenis SWCNTs sangat sulit diproduksi secara mandiri dan berharga mahal, oleh karena itu dalam penelitian lebih sering digunakan MWCNT sebagai adsorben Metana karena memiliki luas permukaan yang lebih besar dan harga yang relatif lebih murah (Sudibandiyo, 2009). Selain itu, MWCNT juga sudah diproduksi secara mandiri di Lab. Teknologi Energi Berkelanjutan, Departemen Teknik Kimia UI, tetapi belum pernah diuji kemampuannya sebagai adsorben Metana.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan adsorpsi Metana dari CNT yang diproduksi DTK dan kemampuan CNT komersial yang diimpor dari China (CNT- *Chinese Academic Science*) serta mengetahui variasi karakteristik kondisi (variasi tekanan) untuk meningkatkan daya adsorpsi CNT terhadap Gas Metana. Proyek pembuatan sistem *Adsorptive storage* atau ANG (dalam skala besar) sampai saat ini masih belum efisien untuk dilakukan. Oleh karena itu luaran yang diharapkan dari penelitian ini ialah dapat menghasilkan suatu sistem *adsorptive storage* Metana dengan kondisi tertentu dan dengan kandidat adsorben MWCNT yang memiliki kapasitas adsorpsi cukup besar dibanding karbon aktif sehingga dapat meningkatkan efisiensi/kapasitas *storage* sampai dengan 180 v(STP)/v yang merupakan nilai standard target daya adsorpsi adsorben yang cocok untuk storage Metana dan proses ANG (pada skala besar), sehingga proses efisiensi distribusi gas alam dapat meningkat.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang menjadi permasalahan utama ialah bagaimana karakteristik adsorpsi MWCNT DTK (produksi lokal) dan MWCNT CAS (impor dari China) terhadap Gas Metana sehingga dapat diaplikasikan sebagai kandidat adsorben dalam ANG atau *methane storage*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini ialah:

1. Mendapatkan kapasitas proses adsorpsi Metana oleh *Multi-walled Carbon Nanotubes* DTK dan *Multi-walled Carbon Nanotubes* CAS.
2. Mendapatkan kondisi optimum secara fisik (tekanan dan temperatur) sehingga didapatkan sifat daya adsorpsi Metana maksimal dari CNT.
3. Mendapatkan prototipe *Methane adsorptive Storage* yang dapat dikembangkan.

1.4 Batasan Masalah

Ruang lingkup penelitian ini ialah:

1. Gas adsorbat yang akan digunakan ialah gas Metana
2. Adsorbent yang digunakan MWCNT DTK dan MWCNT-CAS.
3. Metode adsorpsi yang digunakan pada penelitian ini adalah metode adsorpsi isotermis
4. Prototipe storage dan alat analisis adsorpsi merupakan modifikasi dari mini-storage dan alat adsorpsi hidrogen
5. Software pengalibrasi tekanan dan temperatur uji adsorpsi dan desorpsi adalah Adam View dengan Perangkat Data Acquisition *Advantech USB 4718*.
6. Karakterisasi Adsorbent CNT yang akan dilakukan berasal dari data vendor atau data penelitian Produksi CNT di Lab. Teknologi Energi Berkelanjutan DTK.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam makalah skripsi ini dilakukan dengan membagi tulisan menjadi tiga bab, yaitu:

BAB 1 : PENDAHULUAN

Meliputi latar belakang penelitian dan penulisan, perumusan masalah yang dibahas, tujuan dilakukannya penelitian, ruang lingkup penelitian, serta sistematika penulisan skripsi ini.

BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan pustaka yang menjadi dasar penelitian yang meliputi pengertian proses Adsorpsi Isotermis, persamaan-persamaan kimia fisik adsorpsi, mekanisme dasar adsorpsi-desorpsi, pengaruh tekanan terhadap adsorpsi gas, kesetimbangan adsorpsi-desorpsi, karakterisasi calon adsorbent.

BAB 3 : METODE PENELITIAN

Berisi diagram alir penelitian, peralatan percobaan, bahan percobaan dan prosedur yang dilakukan dalam penelitian.

BAB 4 : HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi data-data karakterisasi adsorben, data yang diperoleh dari penelitian, hasil dan hasil pengolahannya, serta analisa dari hasil adsorpsi dan perhitungan kapasitas yang didapatkan.

BAB 5 : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan yang berhasil ditarik dari analisa yang dilakukan serta saran yang diperoleh dari analisa penelitian dan hasil percobaan.

DAFTAR PUSTAKA

Bagian yang berisi rujukan dan referensi yang digunakan dalam analisa data dan pendukung teori penelitian

LAMPIRAN

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan peristiwa terikatnya molekul atau partikel pada suatu permukaan zat penyerap yang disebut adsorben. Molekul terikat dengan cara mengisi pori-pori dari permukaan solid adsorben. Ikatan yang terjadi biasanya bersifat lemah dan *reversible*. Secara molekuler, adsorpsi merupakan proses dimana komponen-komponen tertentu dari permukaan 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 hamparan tetap (*fixed bed*) dan fluida dialirkan melalui hamparan tersebut sampai adsorben itu mendekati jenuh dan penyerapan yang diinginkan tidak dapat berlangsung (Mc Cabe, *et al*, 1999). Adsorpsi biasanya dilakukan pada *fixed bed* dari granular yang berpori (Walas, 1990).

Molekul-molekul pada zat padat mempunyai gaya dalam keadaan tidak seimbang. Ketidakseimbangan gaya-gaya tersebut menyebabkan zat pada tersebut cenderung menarik zat-zat lain atau gas yang bersentuhan dengan permukaannya. Fenomena konsentrasi zat/fluida pada permukaan padatan disebut fasa teradsorpsi atau zat yang teradsorpsi disebut juga adsorbat.

Ding dan Bhatia (2003) mengamati bahwa proses adsorpsi pada adsorbent terjadi pada pori-pori kecilnya (*micropore*), sementara itu, *macropore* hanya berperan sebagai tempat transfer adsorbat dari permukaan luar ke *micropore*. Daya serap adsorben terhadap gas tergantung pada jenis adsorbat, karakteristik adsorben, temperatur, dan tekanan. Adsorpsi pada permukaan zat padat menyebabkan terjadinya kesetimbangan antara gas yang terserap dengan gas sisa yang tidak terserap. Oleh karena itu, daya serap adsorben dipengaruhi oleh besarnya tekanan dan temperatur. Semakin besar tekanan, semakin banyak pula gas yang diserap dan sebaliknya, apabila temperatur tinggi maka akan semakin sulit gas itu terserap. Kemampuan adsorpsi gas pada permukaan adsorben akan meningkat seiring dengan pertambahan tekanan sistem karena secara faktanya

penambahan tekanan meningkatkan gaya tarik van der Waals antara molekul gas dan molekul adsorben dan penurunan suhu juga dapat meningkatkan daya adsorpsi gas dari adsorben karena penurunan temperatur meningkatkan pelepasan panas dari sistem sehingga dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi dari adsorben (Rasoolzadeh, *et al*, 2008).

2.1.1 Klasifikasi Fenomena Adsorpsi

Adsorpsi dapat dibagi menjadi dua bagian berdasarkan sifat interaksi antara permukaan adsorben dengan adsorbat (Treybal, 1980; Herawaty, 1993), yaitu :

a. Adsorpsi fisik (*Physisorption*)

Proses adsorpsi ini sangat bersifat dinamik dimana terdapat suatu keadaan setimbang antara molekul dan adanya kesetimbangan antara interaksi antara adsorbat dan adsorben. Dalam proses adsorpsi fisik, tidak terdapat suatu ikatan kimia yang terbentuk antara molekul adsorban dan molekul adsorbat. Ikatan antara molekul adsorbat dan adsorben terjadi karena adanya gaya elektrostatis, seperti gaya London, atau gaya Van der Waals yang berasal dari induksi dipol-dipol. Ikatan ini juga bisa juga dipengaruhi oleh karakteristik fisik dari adsorben seperti porositas adsorben. Penyebaran gaya antar molekul-molekul itu merupakan dampak dari fluktuasi induksi yang sangat cepat pada muatan elektron dari molekul adsorben dan adsorbat (Gregg, 1982).

Adsorpsi fisik adalah suatu peristiwa yang *reversible*, sehingga jika kondisi operasinya diubah akan membentuk suatu kesetimbangan baru. Peristiwa adsorpsi gas terjadi sangat cepat dan mekanismenya tergantung dari ukuran molekul adsorbat yang dibandingkan dengan lebar pori adsorben, hal ini berhubungan dengan interaksi antara adsorbat dan pori-pori. Mula-mula molekul adsorbat terserap pada pori-pori adsorben dengan energi sangat besar, dengan mengabaikan efek aktivasi difusi, proses adsorpsi dilanjutkan dengan pengisian pori-pori adsorben sehingga energi adsorpsi yang digunakan menurun. Beberapa macam pori adsorben dapat menampung antara dua sampai tiga molekul adsorbat. Dengan adanya proses adsorpsi fisik, volume elemen adsorbat akan berkurang dengan cara meningkatkan potensi adsorptif pada pori.

Semua proses adsorpsi fisik bersifat eksotermik yang dikarenakan penarikan molekul adsorbat kedalam pori adsorben. Hal ini juga menyebabkan entropi berkurang sesuai dengan persamaan :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.1)$$

Dikarenakan adsorpsi fisik bersifat isotermis, maka bila temperatur dinaikkan maka jumlah gas yang terserap akan berkurang, hal ini sesuai dengan prinsip Le Chatelier. Untuk kasus adsorpsi fisik yang disertai aktivasi difusi, hipotesa ini tidak berlaku. Lamond dan Mars melaporkan bahwa data interpretasi dari adsorpsi fisik Nitrogen pada permukaan yang polar ataupun yang nonpolar menunjukkan bahwa adsorpsi fisik tidak tergantung dari sifat kimia dari permukaan adsorben

Panas yang dikeluarkan pada peristiwa adsorpsi disebut panas adsorpsi. Panas adsorpsi fisik pada umumnya rendah (5-10 kkal/gmol gas) dan terjadi pada temperatur rendah yaitu dibawah temperatur didih adsorbat. Hal ini menyebabkan adsorpsi fisik bersifat *reversible* dan berlangsung sangat cepat. Proses adsorpsi fisik dapat terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi, sehingga proses tersebut akan membentuk lapisan multilayer pada permukaan adsorban. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi fisika dapat diputus dengan mudah, yaitu dengan cara pemanasan pada temperatur 150-200°C selama 2-3 jam.

b. Adsorpsi Kimia (*Chemisorption*)

Adsorpsi kimia adalah adsorpsi yang terjadi karena terbentuknya ikatan kovalen dan ion antara molekul-molekul adsorbat dan adsorben. Adsorpsi jenis ini melibatkan transfer elektron antara adsorben dan adsorbat dengan membentuk ikatan kimia, sehingga menyebabkan adanya adhesi pada molekul adsorben. Ikatan yang terbentuk merupakan ikatan yang kuat sehingga lapisan yang terbentuk adalah lapisan monolayer.

Adsorpsi kimia lebih jarang terjadi bila dibandingkan dengan adsorpsi fisik dan ikatan kimia yang terbentuk menyebabkan adsorben sulit untuk diregenerasi bahkan tidak mungkin untuk digunakan lagi (Cheremisinoff, 1993). Adsorpsi ini bersifat *irreversible* dan pada umumnya terjadi pada temperatur tinggi diatas temperatur kritis adsorbat, sehingga panas adsorpsi yang dilepaskan juga tinggi, sekitar 10-100 kkal/gmol, sedangkan untuk dapat terjadinya desorpsi (pada proses regenerasi) dibutuhkan energi yang lebih tinggi lagi untuk

memutuskan ikatan yang terjadi antara adsorben dan adsorbat. Energi aktivasi yang dibutuhkan sekitar 10-60 kkal/gmol.

Adsorpsi kimia biasanya menyebabkan perubahan kimia dari adsorbat karena pada saat desorpsi fasa teradsorpsi, adsorbat mengalami proses pelepasan secara kimia. Ruthven (1984) menyelidiki beberapa karakteristik yang berhubungan dengan adsorpsi fisika dan kimia seperti apa yang dijelaskan pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2, yaitu :

Tabel 2. 1 Tabel karakteristik Adsorpsi Fisika

Parameter	Adsorpsi Fisik	Adsorpsi Kimia
Panas adsorpsi	Relatif rendah (kurang dari 2 atau 3 kali panas laten evaporasi)	Relatif tinggi (lebih dari 2 atau 3 kali panas laten evaporasi)
<i>Specificity</i>	<i>Non-specific</i>	<i>Very Specific</i>
Sifat lapisan fasa teradsorpsi	Mono atau multilayer tergantung kondisi	Monolayer
Disosiasi adsorbat	Tidak ada	Mungkin saja disertai disosiasi
Signifikasi	Hanya signifikan pada temperatur rendah	Terjadi pada rentang temperatur yang lebar
Efek yang dihasilkan dari penambahan suhu	Menurun	Naik
Laju adsorpsi (T=273K)	Cepat, tidak aktif, dan <i>reversible</i>	Lambat, aktif, dan <i>irreversible</i>
Desorpsi	Mudah- dengan cara menurunkan P dan menambah T	Sulit, diperlukan suhu tinggi untuk memutus ikatan
Transfer elektron	Tidak ada	Ada

Tabel 2. 2 Tabel perbedaan Adsorpsi Fisika dan 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	10-100 kkal/gmol
5	Energi aktivasi	< 1 kkal/gmol	10-60 kkal/gmol
6	Reversibilitas	<i>Reversible</i>	<i>Irreversible</i>
7	Lapisan fasa teradsorpsi	Mono atau multilayer	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
10	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 adsorbat 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

Bilamana molekul adsorben dan adsorbat memiliki ukuran yang sama, molekul-molekul polar yang lebih kuat diadsorpsi daripada molekul-molekul yang kurang polar. Molekul-molekul yang lebih polar dapat menggantikan molekul-molekul kurang polar yang telah lebih dahulu teradsorpsi

2. Karakteristik Adsorben

a. Kemurnian adsorben

Kemurnian adsorben dari zat pengotor dapat meningkatkan daya adsorpsi, hal ini menyangkut luas permukaan adsorben yang akan semakin

besar apabila kadar zat pengotor yang dapat menutupi pori-pori semakin kecil.

b. Luas Permukaan dan Volume Pori Adsorben

Jumlah molekul adsorbat yang teradsorpsi meningkat seiring dengan meningkatnya luas permukaan dan volum pori adsorben. Dalam proses adsorpsi seringkai adsorben diberikan perlakuan awal untuk meningkatkan luas permukaannya karena luas permukaan adsorben merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi proses adsorpsi

3. Tekanan Adsorbat

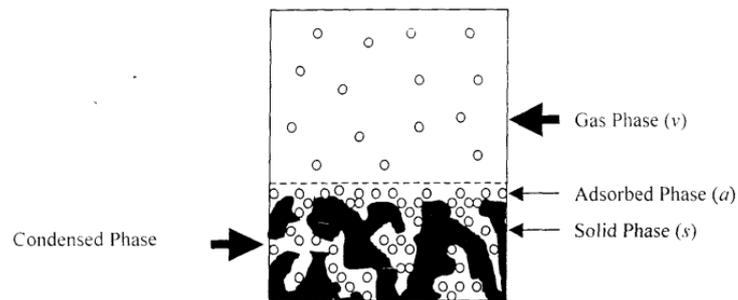
Pada adsorpsi fisika, jumlah zat yang diadsorpsi akan bertambah dengan menaikkan tekanan dari adsorbat (tekanan sistem) karena dapat memperkuat ikatan van der Waals antar molekul adsorben dan adsorbat, sebaliknya pada adsorpsi kimia, jumlah zat yang diadsorpsi akan berkurang dengan menaikkan tekanan adsorbat

4. Temperatur

Proses adsorpsi merupakan proses yang eksotermis, berarti peningkatan temperatur pada tekanan yang tetap akan mengurangi jumlah senyawa yang teradsorpsi, sesuai dengan prinsip Le Chaterlier

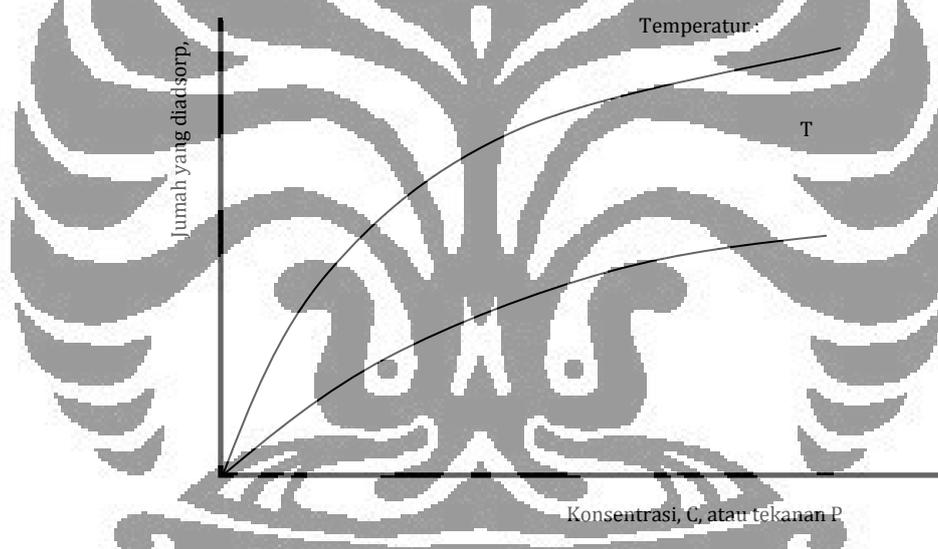
2.2 Kestimbangan Adsorpsi

Proses adsorpsi, kapasitas maksimum dari adsorben tidak pernah tercapai dikarenakan adanya efek dari proses perpindahan massa yang terjadi pada kontak zat padat dan gas. Untuk memperkirakan proses dinamika kapasitas adsorpsi diperlukan studi tentang kestimbangan yang terjadi pada proses adsorpsi. Gambar 2.1 mengilustrasikan keadaan pada proses adsorpsi terjadi. Kestimbangan adsorpsi meliputi aspek kemampuan/kapasitas adsorben untuk menyerap adsorbat pada kondisi tertentu (temperatur dan tekanan) dan bagaimana proses adsorpsi jika fluida yang digunakan berupa campuran dari beberapa komponen. Dalam studi ini, banyak sekali studi empirik dan teoritis yang dicapai, beberapa ilmuwan telah banyak meneliti tentang kestimbangan adsorpsi diantaranya Ross dan Oliver (1964), Ruthven (1984), dan Myers (1988)



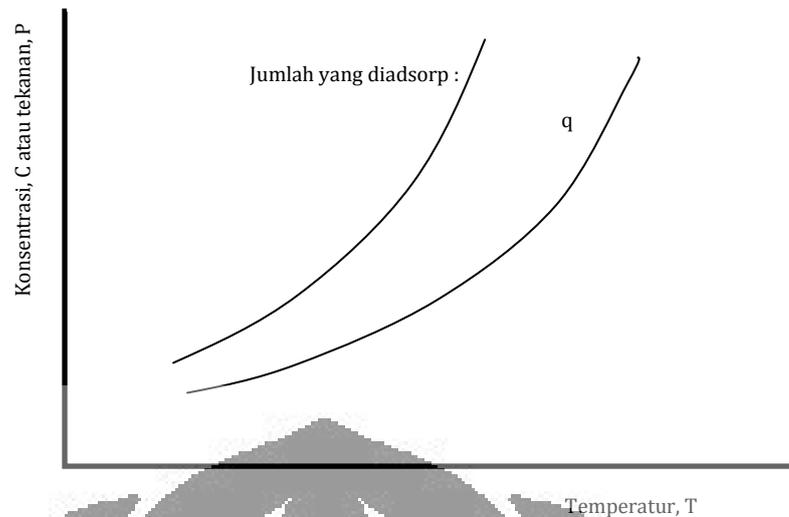
Gambar 2. 1 Adsorpsi gas pada material berpori pada kondisi kesetimbangan (Sudibandriyo, 2003)

Pada saat adsorben dikontakan pada fluida pada komposisi tertentu, adsorpsi terjadi. Adsorben dan fluida adsorbat mencapai kesetimbangan antara adsorpsi dan desorpsinya. Profil adsorpsi gas pada permukaan mikropori dapat dilihat dibawah ini



Gambar 2. 2 Profil kurva pengaruh tekanan terhadap jumlah zat yang diadsorp dalam temperatur berbeda (Ruthven, 1984)

Gambar 2.2 menunjukkan hubungan antara jumlah zat yang teradsorpsi, q , dan konsentrasi dari fluida, C , pada temperatur T disebut adsorpsi isoteris pada suhu T , sedangkan adsorpsi yang ditunjukkan oleh hubungan antara konsentrasi dan temperatur yang menghasilkan sejumlah zat yang teradsorpsi seperti pada Gambar 2.3 disebut adsorpsi isostere

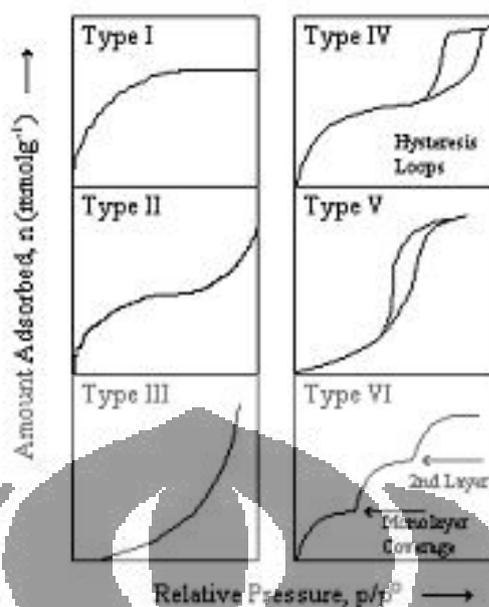


Gambar 2. 3 Profil kurva adsorpsi isostere (Ruthven, 1984)

Data kesetimbangan yang dihasilkan pada temperatur yang konstan, menunjukkan hubungan antara jumlah zat yang teradsorpsi per unit massa padatan dan tekanan sistemnya (tekanan adsorbat). Adsorpsi isoteremis dapat dihitung dengan mengukur tekanan adsorbat pada saat awal (sebelum terjadi kesetimbangan) dan pada saat terjadi kesetimbangan (Bahl, *et al.*, 1997; Ruthven, 1993; Sundstorm dan Herbert, 1979).

2.2.1 Adsorpsi Monolayer dan Multilayer

Brunauer mengklasifikasikan adsorpsi isothermal dengan klasifikasi adsorpsi fisik menjadi lima kelas (Ruthven, 1984; Maron dan Lando, 1974), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Profil tipe-tipe adsorpsi isothermal

Profil dari adsorpsi isothermis harus memiliki kesamaan profil sedikitnya dengan satu kurva diatas atau kombinasi dari dua atau lebih kurva adsorpsi diatas. Tipe adsorpsi isothermis yang keenam merupakan tipe terbaru yang diklasifikasikan oleh metode Brunauer, Deming, Deming dan Teller (sistem B.D.D.T). Beberapa informasi tentang tipe adsorpsi isothermis adalah sebagai berikut :

1. Isothermis tipe I

Tipe ini biasanya terjadi pada adsorben yang memiliki struktur dominan mikropori. Proses pengisian mikropori oleh adsorbat terjadi pada tekanan relatif dibawah 0,1. Proses adsorpsi ini juga biasanya terjadi secara sempurna pada tekanan parsial 0,5. Jenis adsorpsi ini disebut juga *Langmuir Isoterm* dan menggambarkan adsorpsi satu lapis (*monolayer*). Jumlah adsorbat mendekati harga pembatas saat P/P_0 mendekati satu. Contoh adsorpsi tipe ini antara lain adsorpsi Nitrogen pada karbon aktif di suhu 77 K dan adsorpsi Amonia pada *charcoal* pada suhu 273 K.

2. Isothermis tipe II

Jenis adsorpsi ini adalah jenis adsorpsi fisik dari gas pada media non-pori atau padatan berpori besar, yang menunjukkan sifat adsorpsi

monolayer-multilayer. Lapisan *monolayer* akan diikuti oleh pembentukan *multilayer* apabila tekanan sistem dinaikkan. Pada profil kurva tipe II terlihat ada kemiripan dengan tipe pertama, tetapi kurva kemudian naik kembali. Pada transisi dimana slope kurva bernilai 0 maka pada bagian ini mengindikasikan tekanan relatif pada saat pelapisan *monolayer* selesai. Adsorben campuran karbon mesopori dan mikropori menghasilkan adsorpsi tipe II.

3. Isotermis tipe III

Plot kurva yang dihasilkan berbentuk cembung berdasarkan perubahan tekanan relatif pada axis plot. Kelompok adsorpsi isotermis ini merupakan karakteristik khas dari interaksi adsorbat-adsorben yang lemah (Kiselev, 1968). Tipe ini sering terjadi pada adsorben yang memiliki ukuran pori yang cukup lebar, dan tipe ini juga biasanya diasosiasikan dengan adsorben mikropori dan tak-berpori. Interaksi yang lemah antara adsorben dan adsorbat menyebabkan penyerapan adsorbat yang sedikit pada tekanan rendah. Sekali molekul telah teradsorpsi pada tempat proses adsorpsi, maka interaksi adsorbat-adsorben akan semakin kuat, sehingga dapat menjadi *driving force* dari proses adsorpsi tipe ini. Hal ini menghasilkan daya adsorpsi yang tinggi pada tekanan relatif yang tinggi pula. Tipe adsorpsi yang terjadi pada tekanan relatif yang besar biasa dikenal dengan teori *cluster*. Contoh dari adsorpsi tipe ini misalnya adsorpsi molekul air pada karbon dimana sebenarnya yang teradsorpsi pertama kali adalah molekul oksigen yang terlarut pada air, hal ini memacu molekul air untuk teradsorpsi.

4. Isotermis tipe IV

Jenis ini hampir sama dengan tipe II pada rentang tekanan yang relatif rendah sampai menengah. Loop histerisis, yang keberadaannya sering diasosiasikan dengan pori berukuran mesopori (2-50 nm), sering terjadi pada tipe ini. Kondensasi kapiler (*capillary condensation*) meningkat sampai daerah histerisis. Volume terbesar adsorbat yang teradsorpsi dapat dihitung dari *capillary condensation* yang telah sempurna mengisi pori.

Profil adsorpsi isothermis tipe ini menunjukkan batasan kapasitas maksimum pada tekanan relatif yang tinggi.

5. Isothermis tipe V

Profil adsorpsi tipe ini berbentuk cembung terhadap tekanan relatif disumbu x, adsorpsi ini merupakan karakteristik interaksi yang lemah antara adsorbat dan adsorben. Adsorpsi ini mengindikasikan pemakaian adsorben mikropori atau mesopori, alasan kenapa bentuk profil seperti ini dapat dijelaskan oleh teori adsorpsi tipe III, perbedaan hanya terjadi pada besarnya pengaruh daya tarik intermolekul yang sangat besar pada adsorpsi tipe V.

6. Isothermis tipe VI

Pada awalnya adsorpsi tipe ini dikenalkan sebagai profil adsorpsi hipotetik. Bentuk kurva merupakan penggambaran dari pembentukan sempurna lapisan monomolekuler sebelum proses pembentukan lapisan selanjutnya.

Untuk Adsorpsi isothermis tipe II dan III, pada beberapa sistem, proses ini berupa proses yang kontinu, mulai dari pembentukan lapisan tunggal pada adsorben, kemudian pembentukan *multilayer*, dan jika tekanan ditambah maka akan terjadi suatu kondensasi kapiler pada pori-pori adsorben.

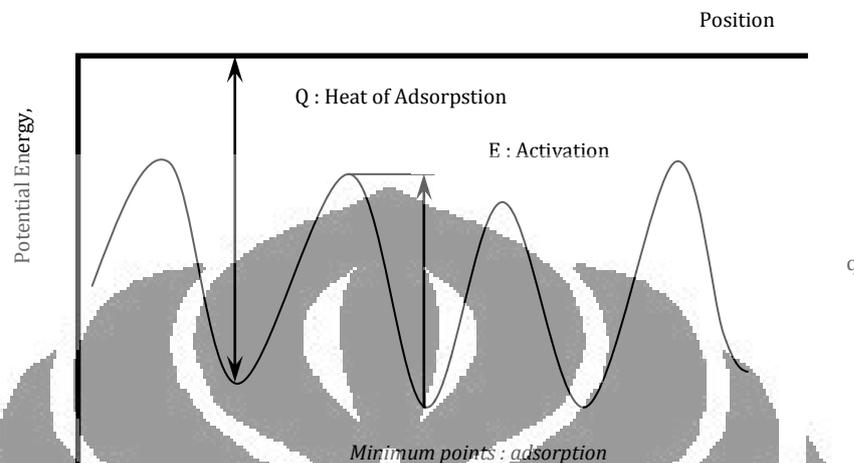
2.2.2 Permodelan Kesetimbangan Adsorpsi

2.2.2.1 Permodelan Adsorpsi Isothermis Absolut

1) Model Adsorpsi Isothermis Langmuir

Model teoritis yang paling sederhana untuk adsorpsi *monolayer* ditemukan oleh Irving Langmuir pada tahun 1918. Teori ini berangkat dari aplikasi permodelan untuk adsorpsi kimia (*chemisorption*) dimana adsorpsi ini menghasilkan lapisan tunggal adsorbat pada adsorben. Teori Langmuir menggambarkan adsorpsi *monolayer* pada permukaan ideal. Gambar 2.5 mengilustrasikan permukaan ideal yang dimaksud adalah dimana energi fluktuasi (energy aktivasi), E_s , yang berperan sebagai energi

“penghalang” yang berada diantara tempat adsorpsi terjadi, bernilai lebih kecil dari panas adsorpsi (*Heat of adsorption*), Q_{st} , sehingga molekul adsorbat dapat teradsorpsi dengan mudah dibanding proses desorpsinya.



Gambar 2. 5 Kurva energi potensial pada permukaan adsorben (Ruthven, 1984.p.70)

Beberapa asumsi dasar dari penggunaan model ini adalah :

1. Molekul teradsorpsi pada jumlah pori yang ada secara pasti dan membentuk satu lapisan
2. Posisi adsorpsi (*adsorption set*) hanya dapat menampung satu molekul adsorbat
3. Semua pori adsorben memiliki jumlah energi/entalpi yang sama
4. Tidak ada interaksi antara molekul-molekul yang teradsorpsi (tidak bergerak bebas di satu tempat dengan tempat yang lainnya)

Kesetimbangan adsorpsi terjadi karena adanya laju adsorpsi dan desorpsi, diasumsikan kesetimbangan ini berorde satu.

$$\text{Laju Adsorpsi} = k_a p(1 - \theta) \quad (2.2)$$

$$\text{Laju Desorpsi} = k_d \theta \quad (2.3)$$

$$\text{dimana } \theta = \frac{q}{q_s} \quad (2.4)$$

Sehingga pada saat terjadi kesetimbangan, maka nilai adsorpsi sama dengan desorpsi

$$k_a p(1 - \theta) = k_d \theta \quad (2.5)$$

$$\frac{\theta}{1 - \theta} = \left(\frac{k_a}{k_d} \right) p = bp \quad (2.6)$$

$$\theta = \frac{q}{q_s} = \frac{bp}{1 + bp} \quad (2.7)$$

dimana ;

k_a, k_b : konstanta laju adsorpsi dan desorpsi

p : tekanan sistem

q : jumlah gas teradsorpsi per satuan massa atau volum adsorben

q_s : jumlah kapasitas adsorpsi maksimum per satuan massa atau volum adsorben

θ : fraksi luas permukaan yang tertutup oleh lapisan monolayer

Besaran q_s menggambarkan kapasitas adsorpsi maksimum yang dimiliki adsorben yang tidak terikat oleh perubahan temperatur. Untuk konstanta yang memiliki keterkaitan dengan temperatur, maka variabel itu harus tunduk pada persamaan vant Hoff dimana ;

$$b = b_0 e^{\left(\frac{-\Delta H_0}{RT} \right)} = b_0 \exp\left(\frac{Q}{RT} \right) \quad (2.8)$$

b merupakan *fitting parameter* untuk persamaan Langmuir, sedangkan $-\Delta H_0$ biasa dikenal dengan Panas Adsorpsi (Q). Selama terjadi proses adsorpsi maka akan terjadi reaksi isotermik (ΔH negatif), maka nilai b akan menurun seiring dengan bertambahnya temperatur.

b_0 merupakan faktor pre-eksponensial yang dipengaruhi suhu dan dirumuskan dengan persamaan :

$$b_0 = \frac{\alpha}{k_{d\infty} \sqrt{2\pi MRT}} \quad (2.9)$$

dimana :

α : koefisien nonperfect sticking

$k_{d\infty}$: koefisien kecepatan adsorpsi pada temperatur tak berhingga

2) Model Adsorpsi Isotermis Freundlich

Metode ini dinyatakan dengan persamaan :

$$q = k_F C^{(1/n_F)} \quad (2.10)$$

Metode ini kurang cocok untuk kondisi-kondisi yang disebutkan pada konsentrasi cukup tinggi karena metode ini akan menghasilkan kapasitas adsorpsi yang tak terbatas, membuat jumlah adsorbat menjadi tak hingga ketika konsentrasi dinaikkan. Metode ini hanya digunakan pada kondisi konsentrasi dibawah konsentrasi jenuh dimana kondensasi dan kristalisasi terjadi dan fenomena adsorpsi tidak begitu signifikan (konsentrasi paa gas dapat dianalogikan dengan tekanan). Untuk konsentrasi yang sangat rendah, persamaan Henry sangat cocok untuk dipakai. Keterbatasan *range* konsentrasi membuat Radke dan Prausnitz (1972) mengembangkan kombinasi antara persamaan Henry dan Freundlich agar persamaan ini memiliki rentang tingkat konsentrasi yang cukup besar, persamaan dinyatakan dengan :

$$q = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_H p} + \frac{1}{k_F p^{1/n_F}} \right)} \quad (2.11)$$

3) Model Adsorpsi Modifikasi Isotermis Langmuir

Pada tekanan rendah dimana jumlah fluida yang adsorp, q , sangat kecil sekali bila dibandingkan kapasitas adsorpsi adsorben, maka persamaan Langmuir akan mendekati persamaan isotermis Henry :

$$\theta = bp \quad (2.12)$$

Ketika konsentrasi cukup tinggi, $p \gg 1/b$ dan pori-pori adsorpsi telah jenuh, maka $\theta = 1$

Persamaan diatas dimodifikasi ketika interaksi molekul pengadsorp diperhitungkan. Flower dan Guggenheim (1939) mengusulkan :

$$p = \frac{1}{b} \left(\frac{\theta}{1-\theta} \right) \exp(2u\theta / kT) \quad (2.13)$$

Dimana $2u$ menggambarkan energy interaksi (negatif untuk penolakan dan positif untuk pengikatan) dan k adalah konstanta Boltzmann.

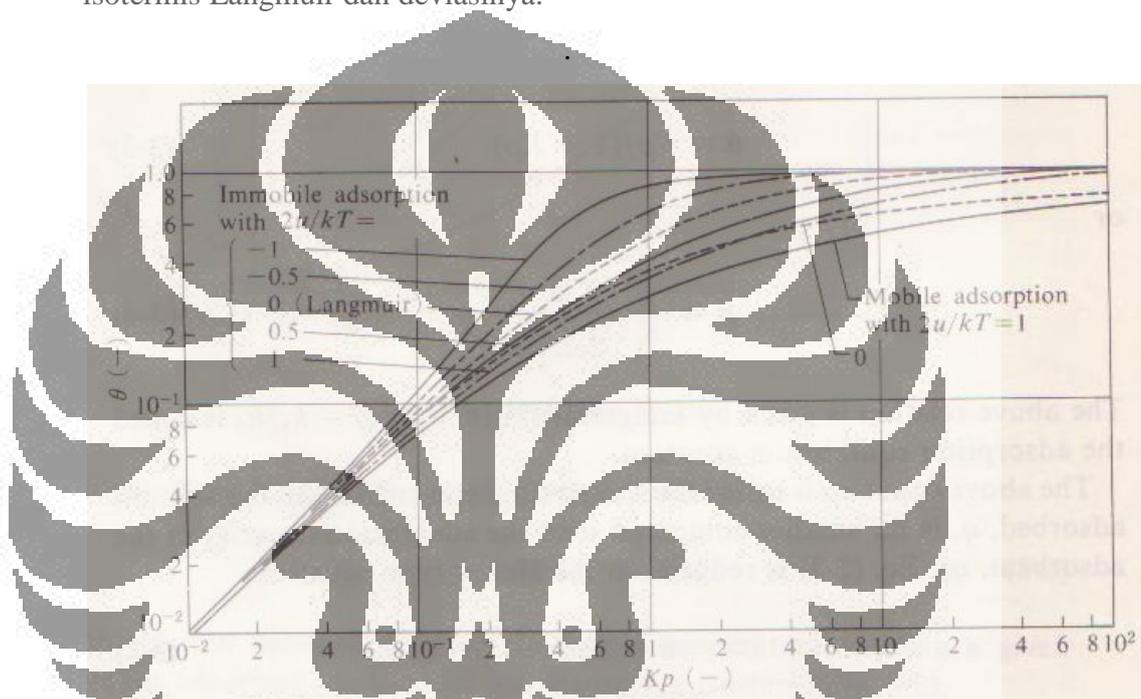
Ketika molekul yang diadsorp bergerak bebas pada permukaan adsorben (*mobile adsorption*), Persamaan Langmuir dimodifikasi menjadi :

$$p = \frac{1}{b} \left(\frac{\theta}{1-\theta} \right) \exp \left(\frac{\theta}{1-\theta} \right) \quad (2.14)$$

Jika perhitungan mempertimbangkan *mobile adsorption* dengan interaksi, maka Persamaan Langmuir dimodifikasi menjadi :

$$p = \frac{1}{b} \left(\frac{\theta}{1-\theta} \right) \exp \left(\frac{\theta}{1-\theta} \right) + \frac{2u\theta}{kT} \quad (2.15)$$

Gambar 2.6 mengilustrasikan kurva komparasi persamaan turunan isotermis Langmuir dan deviasinya.



Gambar 2. 6 Profil model istermis Langmuir dan turunannya (Ruthven, 1984,p.70)

4) Model Adsorpsi BET

Metode ini dikembangkan oleh Brunauer, Emmet, dan Teller pada tahun 1938. Metode ini mengacu pada teori kinetika Langmuir dan sering digunakan untuk studi-studi karakteristik dari katalis dengan berdasarkan teori adsorpsi gas, misalnya dalam penentuan total luas permukaan adsorben.

Spesifik area dari suatu padatan mikropori memiliki nilai yang sangat besar dibandingkan dengan massanya. Dalam penghitungan sifat dari adsorpsi fisik, semua dibatasi oleh lapisan monolayer, sedangkan penghitungan sifat dari adsorpsi kimia sangat sulit sekali karena dipengaruhi oleh tingkat kejenuhan adsorben dalam membentuk lapisan

tunggal adsorbat dan ikatan kimia yang terjadi untuk membentuk lapisan tunggal dan lapisan-lapisan berikutnya. Untuk membentuk lapisan-lapisan adsorbat dibutuhkan pembentukan monolayer terlebih dahulu, hal inilah yang menyulitkan perhitungan. Brunauer, Emmet, dan Teller (BET) menemukan metode untuk mengestimasi karakteristik dari adsorpsi *multilayer*. Metode ini “mengeksrak” lapisan monolayer dari lapisan multilayer, dengan cara seperti ini maka kita dapat dengan mudah mengasumsikan adsorpsi itu sebagai adsorpsi monolayer, dan menghitung luas permukaan dari adsorben dengan cara seperti metode Langmuir. Metode BET sangat tepat untuk diaplikasikan pada adsorben yang memiliki adsorpsi isoterms tipe II (pada klasifikasi Brunauer), karena pada jenis adsorpsi ini pembentukan monolayer dilanjutkan dengan pembentukan multilayer. Persamaan BET dinyatakan dengan

$$\frac{q}{q_m} = \frac{b \left(\frac{p}{p_s} \right)}{\left(1 - \frac{p}{p_s} \right) \left(1 - \frac{p}{p_s} + \frac{bp}{p_s} \right)} = \frac{bp}{(p_s - p) \left(1 + (b-1) \left(\frac{p}{p_s} \right) \right)}$$

$$\frac{q}{q_m} = \frac{bP_r}{(1 - P_r)(1 - P_r + bP_r)} \quad (2.16)$$

dimana :

q : Jumlah gas yang teradsorpsi/satuan massa atau volum adsorben

q_m : jumlah kapasitas adsorpsi maksimum secara monomolekuler

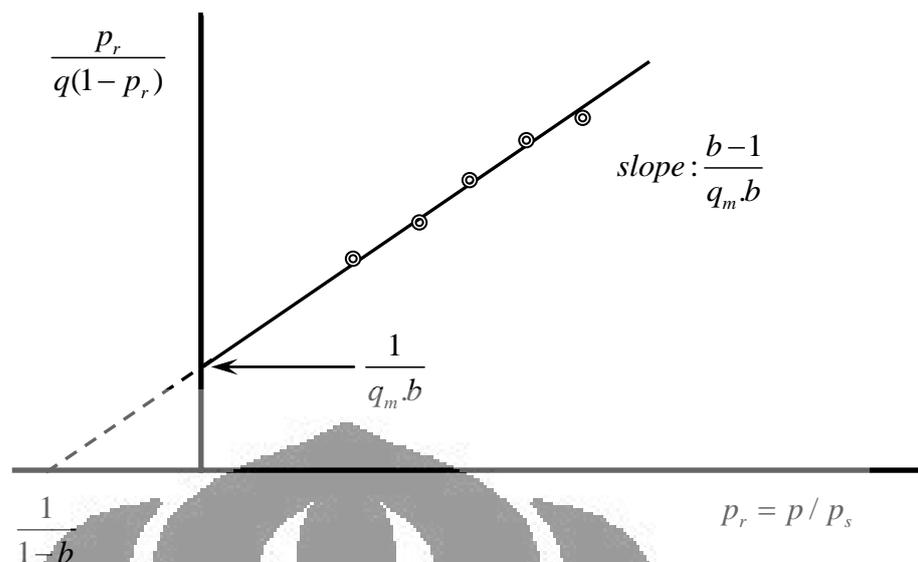
p : tekanan gas pada saat teradsorpsi

p_s : tekanan uap jenuh adsorbat hingga mencapai titik maksimum adsorpsi pada suhu tertentu

b : fitting parameter BET

P_r : tekanan relatif

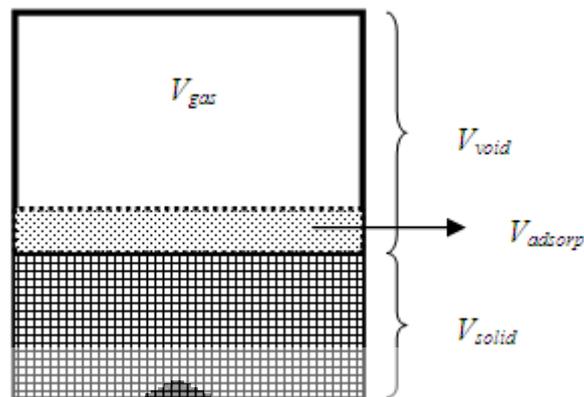
Metode ini menghasilkan hasil yang cukup memuaskan untuk rentang tekanan relatif $0,05 < p/p_s < 0,35$. Nilai dari *fitting parameter b* didapat dari plot $p/q(p_s - p)$ versus p/p_s sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.7. Untuk mendapatkan nilai dari luas spesifik adsorben maka harus diketahui ukuran spesifik dari molekul fluida yang teradsorpsi.



Gambar 2.7 Plot kurva fitting variable BET ($b=KB$) (Ruthven, 1984,p.41)

2.2.2.2 Model Adsorpsi Isotermis Gibbs

Adsorpsi isoterm Gibbs (dikenal juga sebagai *excess adsorption*) merupakan kurva adsorpsi yang diperoleh langsung dari data eksperimen yang didapat. Perbedaan mendasar antara adsorpsi Gibbs dan absolut terletak pada pendekatan perhitungan dari jumlah zat yang tidak teradsorpsi pada suatu adsorben, n_{unads} . Gambar 2.8 mengilustrasikan gas dalam keadaan teradsorpsi serta fasa yang tidak teradsorpsi yang digunakan dalam perhitungan jumlah zat teradsorpsi. Dalam eksperimen, n_{unads} dihitung dengan cara mengabaikan nilai dari volume gas fasa teradsorpsi pada permukaan adsorben (V_{adsorp}) karena sulitnya mengetahui volum gas dalam fasa teradsorpsi tersebut. Sehingga dalam perhitungannya, adsorpsi Gibbs (eksperimen) menggunakan keseluruhan V_{void} , sementara itu, untuk menghitung jumlah zat teradsorpsi yang sebenarnya (adsorpsi absolut) seharusnya menggunakan Volume *bulk gas*, V_{gas} , dalam menghitung jumlah zat yang tidak teradsorpsi.



Gambar 2. 8 Ilustrasi keadaan fasa teradsorpsi pada suatu pori adsorben

$$n_{injection} = \left(\frac{PV}{ZRT} \right)_{\text{dozing cylinder}} \quad (2.17)$$

$$n_{unads} = \left(\frac{PV_{void}}{ZRT} \right)_{\text{adsorption cell}} \quad (2.18)$$

$$n_{ads}^{Gibbs} = n_{injection} - n_{unads} - n_{solute} \quad (2.19)$$

$N_{soluble}$ merupakan jumlah zat yang terlarut pada pelarut yang ada pada adsorben, misalnya pada adsorben yang memiliki kandungan air atau zat pelarut lainnya, namun jika adsorben merupakan adsorben kering, maka $n_{soluble}$ dapat diabaikan. Z merupakan faktor kompresibilitas gas murni yang dihitung berdasarkan kondisi temperatur dan tekanan pada saat diambilnya data.

2.2.2.2 Hubungan Antara Adsorpsi Gibbs dan Adsorpsi Absolut pada Adsorpsi Gas Murni

Berdasarkan Gambar 2.8 dimana terdapat dua fasa homogen, yaitu fasa gas dan fasa teradsorpsi, maka total volume sistem adalah penjumlahan dari volume adsorben, gas, dan volume fasa teradsorpsi.

$$V_{total} = V_{solid} + V_{gas} + V_{ads} \quad (2.20)$$

Volume kosong (V_{void}) yang dihitung menggunakan kalibrasi Helium berhubungan dengan persamaan :

$$V_{void} = V_{gas} + V_{ads} = V_{total} - V_{solid} \quad (2.21)$$

$$n_{ads} = n_{injection} - n_{unads} \quad (2.22)$$

Dalam perhitungan Gibbs, dalam menentukan n_{unads} , mengabaikan volum yang ditempati fasa terkondensasi (teradsorpsi), sehingga dalam perhitungannya menggunakan V_{void} . Persamaan 2.22 menjadi :

$$n_{ads}^{Gibbs} = n_{injection} - \frac{V_{void} \cdot \rho_{gas}}{Mr_{gas}} \quad (2.23)$$

Sedangkan pada adsorpsi absolut, persamaan menjadi :

$$n_{ads}^{Abs} = n_{injection} - \frac{V_{gas} \cdot \rho_{gas}}{Mr_{gas}} \quad (2.24)$$

Persamaan 2.21, 2.23 dan 2.24 dikombinasikan untuk menghilangkan variabel $n_{injection}$ sehingga menghasilkan hubungan :

$$n_{ads}^{Gibbs} = n_{ads}^{abs} - \frac{V_{ads} \cdot \rho_{gas}}{Mr_{gas}} \quad (2.25)$$

$$V_{ads} = \frac{n_{ads}^{abs} \cdot Mr_{gas}}{\rho_{ads}} \Leftrightarrow n_{ads}^{abs} = \frac{V_{ads} \cdot \rho_{ads}}{Mr_{gas}} \quad (2.26)$$

ρ_{ads} merupakan desitas gas fasa teradsorpsi. Persamaan 2.25 dikombinasikan dengan persamaan 2.26, menjadi

$$n_{ads}^{Gibbs} = V_{ads} \left(\frac{\rho_{ads} - \rho_{gas}}{Mr_{gas}} \right) \quad (2.27)$$

Maka hubungan adsorpsi Gibbs dengan adsorpsi absolut dan densitas gas didapat dari kombinasi substitusi persamaan 2.26 terhadap persamaan 2.27, menjadi

$$n_{ads}^{Gibbs} = n_{ads}^{Absolute} \times \left(1 - \frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads}} \right) \quad (2.28)$$

n_{adsorp}^{Gibbs} : jumlah gas yang teradsorpsi

$n_{injection}$: jumlah gas yang diinjeksikan ke dalam dozing cylinder

$n_{unadsorp}^{Gibbs}$: jumlah gas yang tak teradsorpsi

V_{void} : volum kosong yang terdapat pada adsorption cell

n_{solute} : jumlah mol gas yang larut (bila ada)

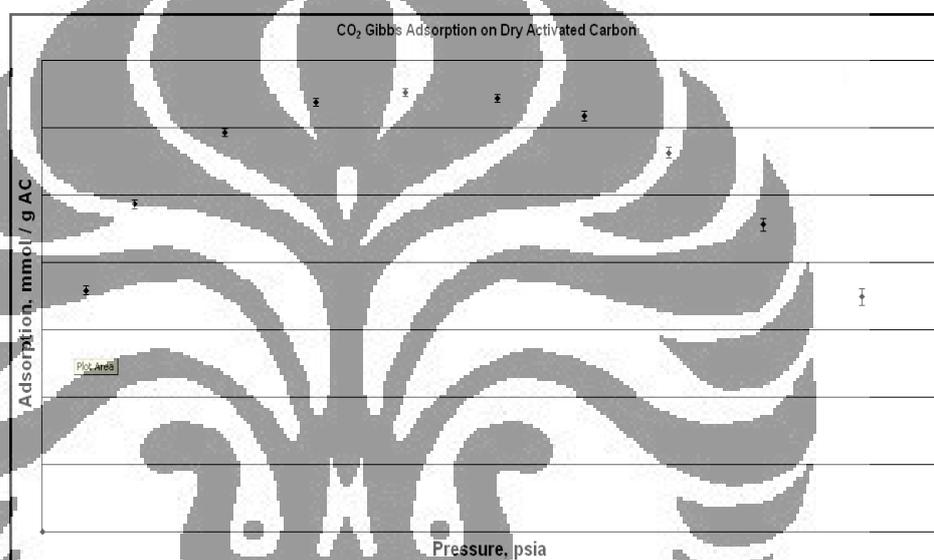
P : tekanan adsorpsi

T : temperatur adsorpsi/operasi

Z : faktor kompresibilitas

R : konstanta gas ideal

M_r : Molecular weight

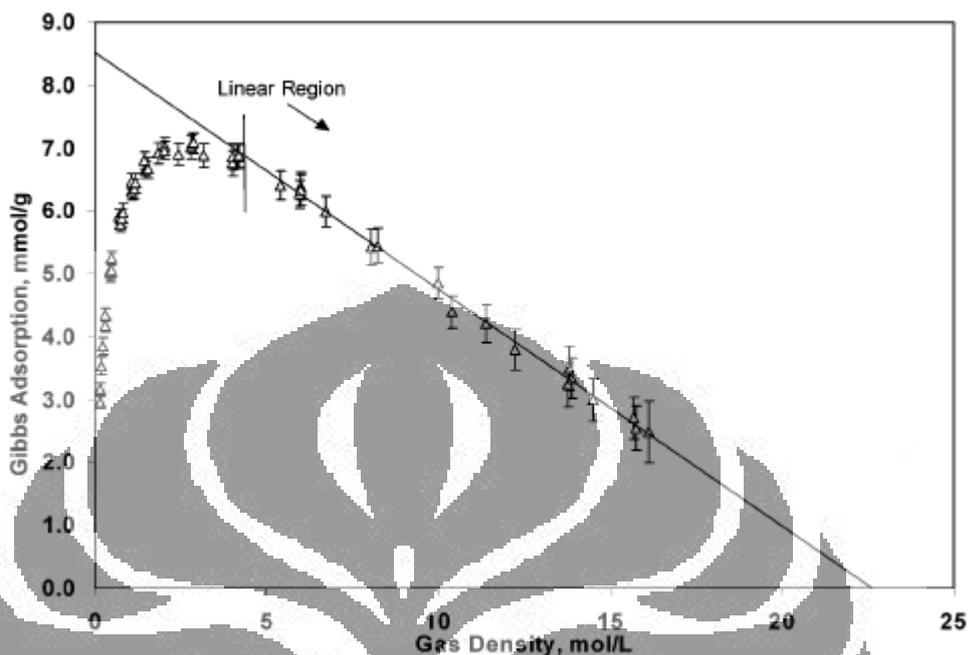


Gambar 2.9 Grafik adsorpsi isotermis Gibbs CO_2

Pada tekanan rendah, profil adsorpsi absolut akan mendekati/hampir identik dengan adsorpsi Gibbs karena densitas gas sangat kecil (jauh lebih kecil daripada densitas adsorpsi) sehingga $\frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads}}$ bisa dianggap 0 dan n_{Gibbs}

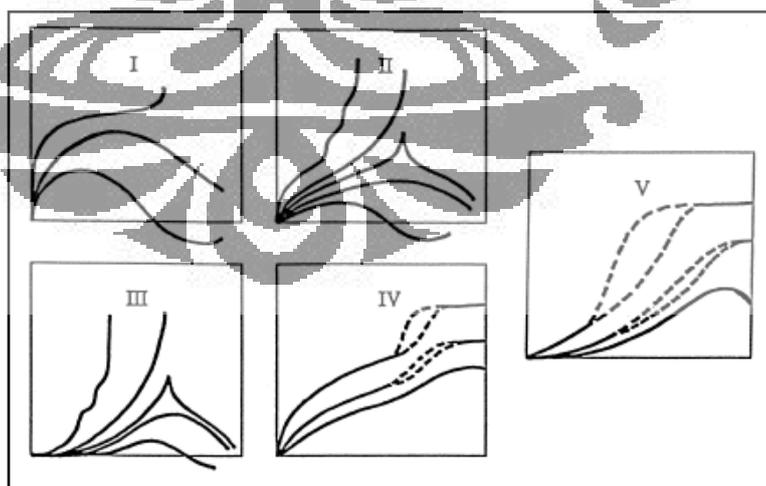
sama dengan $n_{absolut}$, sedangkan pada tekanan tinggi, densitas gas akan mendekati densitas gas fasa teradsorpsi/terkondensasi, sehingga n_{Gibbs} akan menurun seiring dengan kenaikan tekanan (walaupun harga $n_{absolut}$ naik) sampai menyentuh sumbu x, dan pada saat itulah proses regresi grafik dapat dilakukan untuk mencari nilai densitas gas dalam fasa teradsorpsi, ρ_{ads} seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.10. Untuk menghitung adsorpsi absolut

yang didapatkan dari data adsorpsi Gibbs, maka diperlukan suatu estimasi nilai dari densitas fasa teradsorpsi, ρ_{ads} .



Gambar 2. 10 Metode Regresi kurva adsorpsi untuk menentukan densitas gas fasa teradsorpsi: Adsorpsi CO₂ pada karbon aktif pada temperatur 318.2K (Sudibandriyo, *et al*, 2003)

Adsorpsi Gibbs juga terdiri dari 5 tipe (hampir sama seperti tipe adsorpsi Langmuir dan BET). Gambar berikut ini adalah tipe-tipe adsorpsi isoterms Gibbs secara kualitatif (Donohue dan Aranovic, 1999) :



Gambar 2. 11 Profil tipe-tipe kurva isotherm Gibbs

Pada gambar diatas, tekanan merupakan absis dan jumlah zat yang teradsorpsi merupakan ordinatnya, pada klasifikasi ini, tipe I menunjukkan

adsorpsi isotermis pada adsorben mikropori untuk kondisi subkritis, dekat dengan dengan titik kritis, dan super kritis. Pada kondisi superkritis, adsorpsi isotermis tidak monoton. Tipe II dan III menunjukkan adsorpsi isotermis pada adsorben makopori dengan afinitas kuat dan lemah. Pada temperature rendah, tipe II dan tipe III mempunyai *step*, tetapi dengan temperatur yang lebih tinggi, kurva tersebut menjadi monoton (seperti pada tipe II dan tipe III adsorpsi isotermis BET), tetapi didekat temperatur kritis, adsorpsi isotermis tipe II dan 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 Aranovic, 1999)

2.3 Adsorben

Adsorben dapat didefinisikan sebagai zat padat (*solid*) yang dapat menyerap komponen tertentu dari suatu fase fluida. Mayoritas adsorben merupakan bahan-bahan yang sangat berpori, dan adsorpsi berlangsung terutama pada dinding pori-pori atau pada letak-letak tertentu didalam partikel itu. Oleh karena pori-pori itu berukuran sangat kecil, luas permukaan dalam menjadi beberapa orde besaran lebih besar daripada permukaan luar, dan bisa mencapai $2000 \text{ m}^2/\text{g}$ adsorben. Pemisahan terjadi karena perbedaan bobot molekul atau karena perbedaan polaritas yang menyebabkan sebagian molekul melekat pada permukaan tersebut lebih erat daripada molekul lainnya.

Adsorbat melekat sedemikian rupa, sehingga memungkinkan pemisahan komponen itu dari fluida tanpa terlalu banyak adsorpsi pada komponen lain. Regenerasi adsorben dapat dilaksanakan kemudian untuk mendapatkan adsorbat dalam bentuk terkonsentrasi atau hampir murni (Mc Cabe, *et al*, 1999).

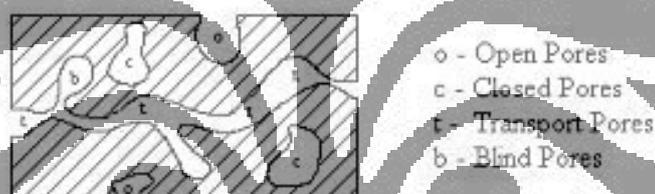
Terdapat banyak sekali zat yang biasa digunakan sebagai adsorben. Berdasarkan struktur dan unsur pembangunnya, adsorben dapat digolongkan menjadi dua, yaitu adsorben tidak berpori (*non-porous adsorbent*) dan adsorben berpori (*porous adsorbent*) (Gultom, 1998).

2.3.1 Adsorben Tak Berpori

Adsorban tak berpori dapat diperoleh dengan cara presipitasi deposit kristalin seperti BaSO_4 atau penghalusan padatan Kristal. Luas permukaan spesifiknya relatif kecil, tidak lebih dari $10 \text{ m}^2/\text{g}$, umumnya antara 0,1 sampai dengan $1 \text{ m}^2/\text{g}$. Bahan tak berpori seperti filler karet (*rubber filler*) dan karbon hitam bergrafit (*graphitized carbon black*) adalah jenis adsorben yang tak berpori yang telah mengalami perlakuan khusus sehingga luas permukaannya dapat mencapai ratusan m^2/g .

2.3.2 Adsorben Berpori

Luas permukaan spesifik adsorben berpori berkisar antara $100 - 1000 \text{ m}^2/\text{g}$. Adsorben ini biasanya digunakan sebagai penyangga katalis, dehydrator, dan penyeleksi komponen. Adsorben ini biasanya berbentuk granular.



Gambar 2. 12 Bentuk-bentuk pori pada adsorben

IUPAC mengklasifikasikan pori-pori adsorben berdasarkan ukurannya, yaitu :

<i>Mikropori</i>	<i>Diameter < 2 nm</i>
<i>Mesoporis</i>	<i>2 nm < Diameter < 50 nm</i>
<i>Macropori</i>	<i>Diameter > 50 nm</i>

Untuk adsorben mikropori, IUPAC mengklasifikasikan lebih dalam lagi, diantaranya :

<i>Ultramikropori</i>	<i>Diameter < 0.5 nm</i>
<i>Supermikropori</i>	<i>0.5 nm < Diameter < 1.4 nm</i>
<i>Mikropori</i>	<i>1.4 nm < Diameter < 2 nm</i>

Beberapa jenis adsorben berpori yang terkenal antara lain : *silica gel*, alumina, karbon aktif, zeolit *molecular sieve*, dan *poous glasses*.

Menurut Mulyati (2006), untuk menjadi adsorben komersial, zat padat tersebut harus memenuhi beberapa kriteria sebagai berikut :

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

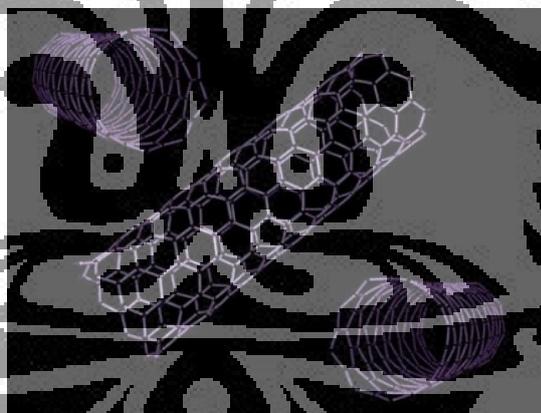
Beberapa karakteristik adsorben beserta kegunaan dan kerugiannya dijelaskan pada tabel 2.3 (Ramadhania, 2007)

Tabel 2. 3 Karakteristik, kekurangan dan kelebihan adsorben (Ramadhania, 2007)

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

2.4 Nano Karbon/Nanotube Karbon (CNT)

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). Nano karbon biasa dikenal dengan nama *carbon nanotube (CNT)*. Nanotube karbon pertamakali ditemukan oleh Iijima dengan menggunakan *transmission electron microscopy (TEM)* pada tahun 1991 (Iijima, 2002). Dalam hal ini, teknik yang menarik adalah pada bagian struktur, sifat, dan metode preparasinya. Nanotube Karbon diteiti karena material ini memiliki sifat luar biasa dalam aplikasi adsorpsi terhadap gas. Material ini dapat mengadsorp gas sampai 20 kali lipat berat adsorben, akan tetapi bila Nanotube Karbon diberi perlakuan khusus seperti *surface treatment*, maka kemampuan adsorpsinya bisa mencapai 180 kali berat CNT yang digunakan. CNT berbentuk serbuk secara makro, dan secara mikro, merupakan susunan atom karbon yang saling mengikat (seperti ikatan benzena) dan bebentuk tabung dengan panjang sekitar 10 nm sampai ratusan nanometer. CNT hampir 99% tubuhnya berpori dan bersifat hidrofobik.



Gambar 2. 13 Skema struktur *Carbon Nanotube*

Rangkaian atom karbon yang paling dikenal adalah intan dan grafit. Pada intan, masing-masing atom karbonnya tersusun secara rapat dan secara simetris terkoordinasi memnuhi 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, beberapa bentuk yang dilaporkan oleh Petterson (1999) antara lain :

1. *Fullernes* ditemukan oleh Smith pada tahun 1998. *Fullernes* dan *Nanotube* adalah lembaran grafit yang terbungkus baik satu lapis maupun lebih yang membentuk bola yang stabil yang disebut *fullernes* atau membentuk tabung molekul yang disebut *nanotubes*.), sedangkan *Nanoropes* adalah fiber yang sangat kuat karena tersusun dari ikatan *nanotubes*.
2. *Nanofiber* 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* adalah polimer karbon berantai dengan kandungan karbon yang tinggi.

Salah satu proses produksi nanokarbon adalah proses dekomposisi Metana, proses yang telah dilakukan di Laboratorium Energi Berkelanjutan DTK. Proses ini akan menghasilkan dua jenis nanokarbon, yaitu karbon nanotube (CNT) dan karbon nanofiber/filamen (CNF). CNT menunjukkan kapasitas elektrokimia empat kali lebih besa daripada CNF (Chen, 2004) dan CNT memiliki pori ditengah dan disetiap dindingnya sehingga meyediakan permukaan yang cukup untuk proses adsorpsi gas karena CNT memiliki kecenderungan mengubah sifat elektrik antar molekul (molekul adsorbat) walaupun pada temperatur ruangan (Xin, 2004). Oleh karena itu CNT merupakan kandidat kuat untuk menjadi penyimpan gas alam (gas Metana). Selain itu bobot CNT yang lebih ringan dibanding CNF mengakibatkan efesiensi adsorpsi lebih condong ke penggunaan CNT dalam *adsorptive storage*.

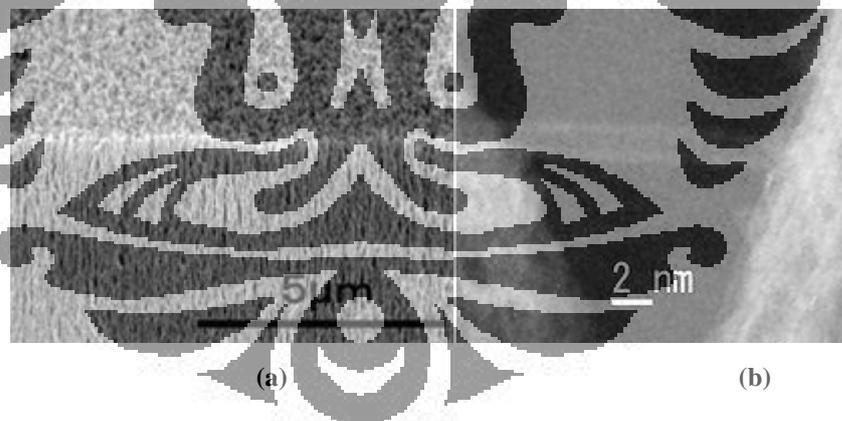
Karbon nanotube merupakan ikatan kontinyu dari benzena yang terdiri dari enam atom C sehingga membentuk spiral, dengan diameter 1 hingga 100 nm. Berdasarkan jumlah dinding penyusunnya, karbon nanotube terbagi menjadi 2, yaitu *Single Walled Carbon Nanotube (SWCNT)* dan *Multi-walled Carbon Nanotube (MWCNT)*. SWCNT tersusun dari satu dinding ikatan karbon, sedangkan MWCNT tersusun atas beberapa lapis dinding karbon.

Ermakova (1999) meyelidiki bahwa sifat karbon nanotube yang lebih baik untuk penyimpanan gas adalah nanotube karbon yang berbentuk dinding tunggal panjang, dan seragam (tingkat kecacatan sangat kecil). Karbon nanotube memiliki kombinasi sruktur yang sempurna, yakni ukuran pori yang kecil, densitas yang

rendah, kekuatan yang tinggi (kekuatan tensil dari MWCNT sekitar 100 kali lebih kuat daripada aluminium), dan sifat elektrik yang bagus (Qian, 2002).

Aplikasi dari penggunaan SWCNT pada saat ini sedang dikembangkan lebih lanjut (Ferriansyah, 2009), diantaranya :

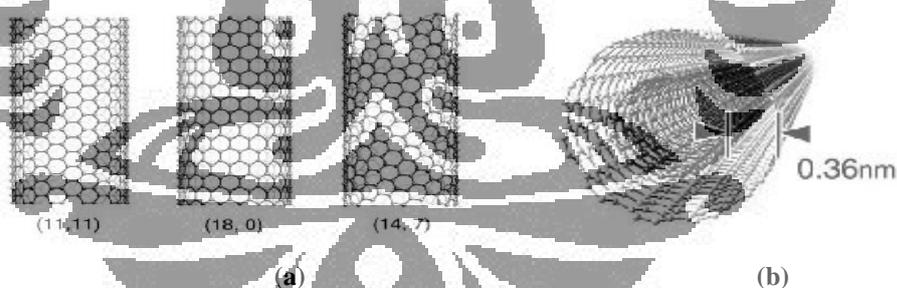
1. NASA menggunakan nanotube untuk peralatan ruang angkasanya karena kekakuan dan kekuatannya dimana rasio kekuatan terhadap beratnya sendiri melebihi sifat dari material yang tersedia saat ini.
2. Nanotube digunakan sebagai *Field Emission Display* oleh beberapa perusahaan elektronik raksasa karena menghasilkan kualitas bagus dengan stabilitas yang tinggi.
3. SWCNT 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 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. SWCNT dikembangkan sebagai pengadsorpsi gas Metana dan CO₂.



Gambar 2. 14 Citra SWCNT melalui SEM (a), *Inner Diameter* dari pori-pori SWCNT (b)

Tabel 2. 4 Karakteristik Carbon Nanotube (Shantya, 2009)

General properties	
Average dia of SWNT's	: 1.2–1.4 nm
Interlayer spacing	:
(n, n) Armchair	: 3.38 Å
(n, 0) Zig-zag	: 3.41 Å
(2n, n) Chiral	: 3.39 Å
Optical properties	
Fundamental gap	
For (n, m); n-m is divisible by 3 [metallic]	: 0 eV
For (n, m); n-m is not divisible by 3 [semiconducting]	: ~ 0.5 eV
Electrical transport	
Resistivity	: 10^{-4} Ω/cm
Maximum current density	: 10^{13} A/m ²
Thermal transport	
Thermal conductivity	: ~ 2000 W/m/K
Phonon mean free path	: ~ 100 nm
Relaxation time	: ~ 10^{-14} s
Elastic behaviour	
Young's modulus (SWNT)	: ~ 1 TPa
Young's modulus (MWNT)	: 1.28 TPa
Maximum tensile strength	: ~ 30 GPa



Gambar 2. 15 Ukuran dari SWCNT (a), Penampang MWCNT (b)

2.4.1 Multi-Walled Caron Nanotube (MWCNT) Produksi Lokal DTK-FTUI (Yulianty, 2008)

Adsorben yang digunakan pada pengaruh kondisi fisika terhadap *adsoptive storage* gas Metana adalah CNT yang diproduksi dari Laboratorium Teknologi Energi Berkelanjutan, Departemen Teknik Kimia UI, namun secara potensi dalam mengadsorp gas Metana belum pernah diujikan terhadap CNT lokal.

Hasil karakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy (SEM)* didapat langsung dari Laboratorium Energi Berkelanjutan. Yulianty (2008) memperoleh data bahwa karbon nanotube yang dihasilkan berupa *multi-walled carbon nanotube (MWCNT)* dengan diameter dinding yang terbentuk (dapat dikatakan homogen) sebesar 50 – 100 nm. Pencitraan SEM untuk karbon nanotube seperti dibawah ini :



Gambar 2. 16 Pencitraan SEM dari MWCNT produksi DTK
Karakteristik yang dihasilkan oleh penelitian tersebut, antara lain :

1. Untuk reaksi selama 8,4 jam, produk karbon memiliki *yield* 28,45 gram karbon/g katalis.
2. Untuk suhu 650°C menghasilkan 32,85 gr karbon/gr katalis.
3. Untuk suhu 700°C, reaksi selama 33 jam pada suhu 650°C, *yield* yang dihasilkan mencapai 201 gr karbon/gr katalis

2.4.2 Multi-Walled Carbon Nanotube (MWCNT) Produk Komersial

Adsorben alternatif yang akan digunakan pada penelitian adalah CNT yang dihasilkan oleh *Chinese Academic of Science*. Spesifikasi lengkap tertulis pada Tabel 2.3 dibawah ini :

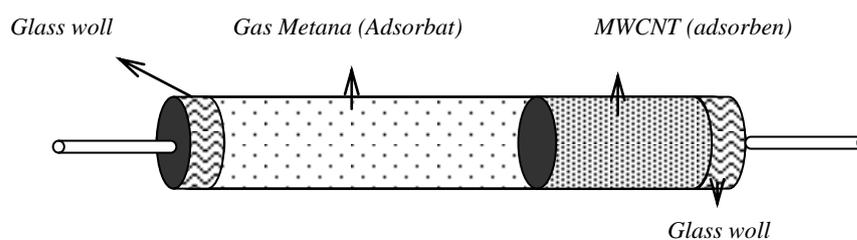
Tabel 2. 5 Karakteristik Multi-walled Carbon Nanotube Komersial

Karakteristik	Nilai
Jenis	<i>Multi wall</i>
Kemurnian	> 95%
<i>Outer diameter</i>	< 8 nm
<i>Inner diameter</i>	2 – 5 nm
Panjang	10 -30 nm
<i>Special Surface Area</i>	> 500 m ² /g
Warna	Hitam
<i>Bulk Density</i>	0,27 g/cm ³
<i>True Density</i>	2,1 g/cm ³
<i>Electric conductivity</i>	> 100 s/cm
Metode pembuatan	CVD

Kadar impuritis CNT – CAS cukup kecil. Komposisi CNT terdiri dari : C 97,46%, Al 0,19%, Cl 1,02%, Co 1,09%, dan S 0,24%

2.5 Teknik Penyimpanan Gas Metana dengan Metode Adsorptive Storage

Gas alam hampir 98% komposisinya berupa gas Metana (CH₄), gas ini ini sangat diperlukan untuk kebutuhan manusia, terutama sebagai pembangkit energi. Teknik penyimpanan gas Metana beranalogi dengan teknik penyimpanan gas hidrogen pada media *porous*.



Gambar 2. 17 Skema Adsorptive Storage Metana

Pada aplikasi storage Metana konvensional, terdapat dua cara yaitu pencairan dengan cara pendinginan dan pencairan dengan cara penekanan dengan tekanan sangat tinggi. Kedua cara ini sangat mahal, terutama metode penekanan. *Compressed Natural Gas (CNG)* membutuhkan tekanan sebesar 20-30 MPa untuk mencairkan Metana (Dell, 2004), hal ini sangat beresiko dalam segi keamanan dan sangat mahal dalam segi utilisasi karena membutuhkan tangki yang sangat tebal dan berat untuk menahan tekanan yang sangat tinggi tersebut. Efisiensi *Adsorbed Natural Gas (ANG)* dapat dikatakan melebihi metode CNG bilamana kemampuan adsorben mengadsorpsi gas Metana sebesar 120 v/v, sehingga adsorben itu cocok sebagai adsorben penyerap gas alam (Rasoolzadeh, *et al*, 2008) dan secara teoritis ANG dapat mereduksi kebutuhan tekanan tinggi menjadi hanya 4 MPa. Namun untuk *methane storage* dimana yang disimpan, 99,9% adalah gas Metana, U.S Department of Energy (DOE) memberikan standard sekitar 180v(STP)/v untuk daya adsorpsi adsorbennya., hal inilah yang akan menjadi aplikasi *Adsorptive Storage* dalam skala besar.

2.5.1 State of The Art Penelitian Adsorptive Storage Metana

Secara lokal, penelitian tentang kemampuan adsorpsi MWCNT DTK UI telah dilakukan untuk uji adsorpsi gas Hidrogen pada tekanan 1000psi oleh Ferriansyah (2008) dengan hasil adsorpsi 4mmol/gr adsorben, namun penelitian tentang daya adsorpsi MWCNT lokal terhadap gas Metana belum dilakukan.

Beberapa penelitian tentang fenomena adsorpsi Metana pada nanotube karbon sudah banyak dilakukan demi peningkatan efisiensi distribusi gas alam, penelitian dilakukan dengan berbagai jenis mulai dari senyawa logam berpori sampai adsorben karbon. *State of the art* dari penelitian menggunakan CNT diantaranya :

Tabel 2. 6 *State of The Art Penelitian Adsorptive Storage Metana*

No	Penulis	Tahun	Deskripsi	Hasil
1	Tanaka, et al	2002	- adsorpsi Metana pada SWCNT dengan cara permodelan <i>Density Functional Theory (DFT)</i>	- adsorpsi Metana mencapai 12,3 mmol/g pada temperatur ruangan
2	Bekyrova, et.al	2003	- Uji adsorpsi Metana menggunakan <i>carbon nanohorn</i>	- Adsorpsi mencapai 160 v/v pada 303 K dan tekanan 3,5 MPa
3	Cao, et al	2003	- meneliti adsorpsi Metana pada SWCNT yang disusun membentuk segitiga - menggunakan <i>software Grand Canonical Monte Carlo (GCMC) simulation</i>	- adsorpsi maksimal didapat sekitar 13,4 mmol/g pada temperatur ruangan
4	Lee, et al	2006	- Uji adsorpsi gas Metana pada MWCNT yang dihasilkan oleh metode CVD dan tingkat kemurnian > 95%	- 1,886 mmol/g pada 303,15 K dan 2,745 MPa
5	Yulong, et.al	2008	- Uji adsorpsi Metana pada MWCNTs pada temperatur ambien dan tekanan bervariasi dari 0 – 10,5 MPa - jumlah sampel sebanyak 80 g	- Adsorpsi Metana sebanyak 11,7% wt pada 298 K dan 10,5 MPa

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian akan dilakukan di Laboratorium Teknologi Energi Berkelanjutan serta Laboratorium Rekayasa Reaksi Kimia dan Konversi Gas Alam, Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Indonesia dengan alur sebagaimana dijelaskan pada Gambar 3.1.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

1. *Dozing Cylinder*
2. *Pressure Transducer (Omegadyne)*
3. Oven
4. Methane storage
5. Termometer/termokopel
6. Timbangan
7. Pengontrol suhu
8. *USB Data Acquisition (Advantech USB 4718)*
9. *Power Supply Regulator*
10. Perangkat komputer

3.2.2 Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

1. MWCNT produksi lokal dan komersial (Timesnano)
2. Gas Helium *High Purity (99,995%)*
3. Gas Metana (CH_4) *High Purity (99,995%)*
4. *Glass woll (Merck)*

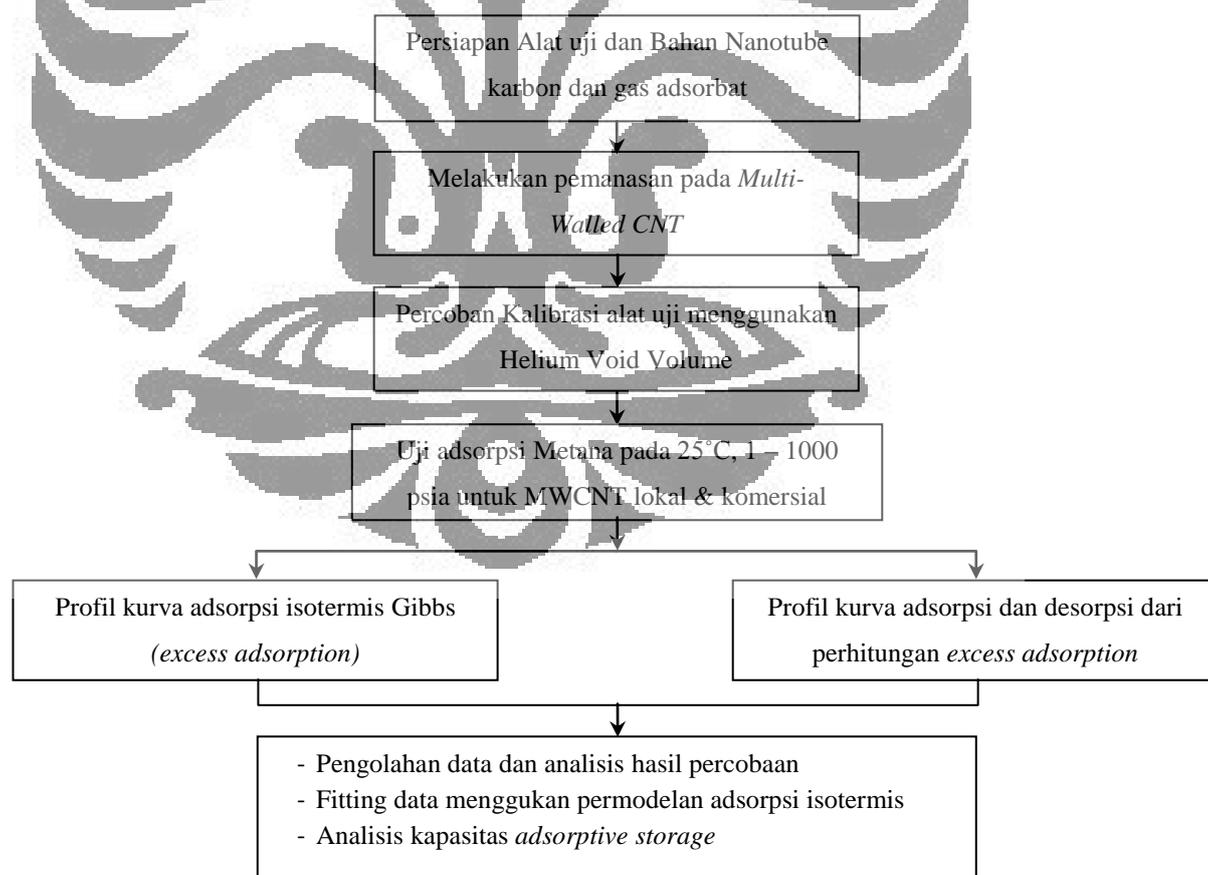
3.3 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui informasi kapasitas adsorpsi gas Metana pada *Multi-walled CNT* dengan kondisi tekanan tinggi dengan pendekatan Adsorpsi Gibbs (eksperimen). Prinsip yang digunakan adalah prinsip Adsorpsi Gibbs dengan menggunakan MWCNT lokal (produksi DTK) sebagai adsorben utama dan MWCNT komersial sebagai adsorben pembanding. Dalam

hal ini akan diuji kapasitas adsorpsi MWCNT dengan maksud untuk mengetahui kapasitas adsorpsi Metana oleh MWCNT dalam berbagai kondisi tekanan terutama dalam kondisi tekanan untuk distribusi gas alam.

Alat uji yang akan digunakan adalah alat uji adsorpsi gas tekanan tinggi yang ada di Lab. RPKA DTK UI. *Adsorption Storage* berbentuk silinder berdiameter 1 cm yang dilengkapi dengan *pressure transducer* pada pipa penyelurnya yang dihubungkan dengan komputer dengan *software* Adam View dan USB Data Acquisition. Pembacaan parameter tekanan dan temperatur merupakan suatu kalibrasi tegangan listrik yang dihasilkan dari *pressure transducers* dan diterjemahkan sebagai besaran tekanan dan temperatur oleh computer dengan bantuan USB Data Acquisition.

Penelitian akan dilakukan seperti yang diterangkan pada diagram alur dibawah ini. Untuk langkah yang lebih jelas dan detail, diterangkan pada prosedur penelitian.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1. Persiapan Alat Uji dan Bahan

Nanotube karbon yang digunakan merupakan produk lokal dari Departemen Teknik Kimia dan impor dari CAS. Carbon Nanotube ini dimasukkan kedalam *Sampling Cylinder* dan dipadatkan didalamnya, masing-masing akan dimasukkan kedalam storage pengujian untuk kemudian diuji kemampuan adsorpsi Metana-nya serta diamati perilaku dinamis adsorpsi dan desorpsinya. Sebelum dimasukkan ke storage, MWCNT selalu dikeringkan didalam oven. MWCNT telah melalui proses preparasi dan treatment terlebih dahulu oleh tim pembuat CNT atau vendor pembuat CNT komersial, *treatment* yang dilakukan antara lain, MWCNT direndam dalam larutan HCL 33%wt selama 24 jam kemudian dicuci dengan air destilasi untuk menghilangkan sisa katalis pada MWCNT, kemudian MWCNT direflux dengan HNO₃ 6M selama 3 jam, dibilas air destilasi dan dikeringkan dalam oven selama 24 jam, hal ini untuk menghilangkan katalis dan kandungan karbon yang cacat. Treatment terakhir adalah mengoksidasi MWCNT pada udara panas (420°C) untuk menghilangkan *residual coke* dan karbon yang cacat.

Modifikasi alat uji terletak pada penggantian *sampling cylinder* dengan *adsorptive-storage* Metana yang telah dipersiapkan. Selain itu, sinyal keluaran transducer dihubungkan pada komputer bersoftware Data Acquisition sehingga dapat mengamati perubahan tekanan, temperatur, adsorpsi, dan desorpsi setiap waktu

3.4.2 Pengujian Adsorpsi Metana

1) Kalibrasi Void Volume *Sampling Cylinder* Menggunakan Helium

Pada *sampling cylinder (adsorption cell)* terdapat nanotube karbon sebagai adsorben dengan massa karbon yang dimasukkan sekitar 2 gram. Volume void dari *sampling cylinder* adalah volume total dari ruang kosong yang terdapat pada *sampling cylinder*

$$V_{void} = V_{sc} - V_{\text{ruang yang terisi CNT}} + V_{\text{porous CNT}} \quad (3.1)$$

Prosedur perhitungan void volume sebagai berikut :

- a) *Dozing cylinder* diisi dengan gas He sampai penuh dengan cara membuka valve V1 dan mengalirkan gas He ke dalam alat tersebut. Valve V2 tertutup dan semua pompa vakum dalam keadaan mati. Valve V1 ditutup ketika *dozing cylinder* terisi penuh. temperatur (T_i) dan tekanan (P_i) *dozing cylinder* dicatat. Jumlah mol He pada *dozing cylinder* dihitung dengan persamaan :

$$n_{He} = \frac{P_i V_{dozing\ cylinder}}{Z_{He_i} RT_i} \quad (3.2)$$

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

- b) Valve V2 dibuka dan mengalirkan gas He tersebut ke *Sampling Cylinder*. Ketika semua gas He telah masuk semua, temperatur (T_f) dan tekanan (P_f) *dozing cylinder* dicatat. Dengan data ini dapat diketahui jumlah mol (n_i) dari He yang dimasukkan ke *Sampling silinder*

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

- c) Temperatur (T_{sf}) dan tekanan akhir *sampling cylinder* (P_{sf}) dicatat setelah 15 menit agar stabil. *Void Volume Sampling Cylinder* dihitung dengan persamaan :

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

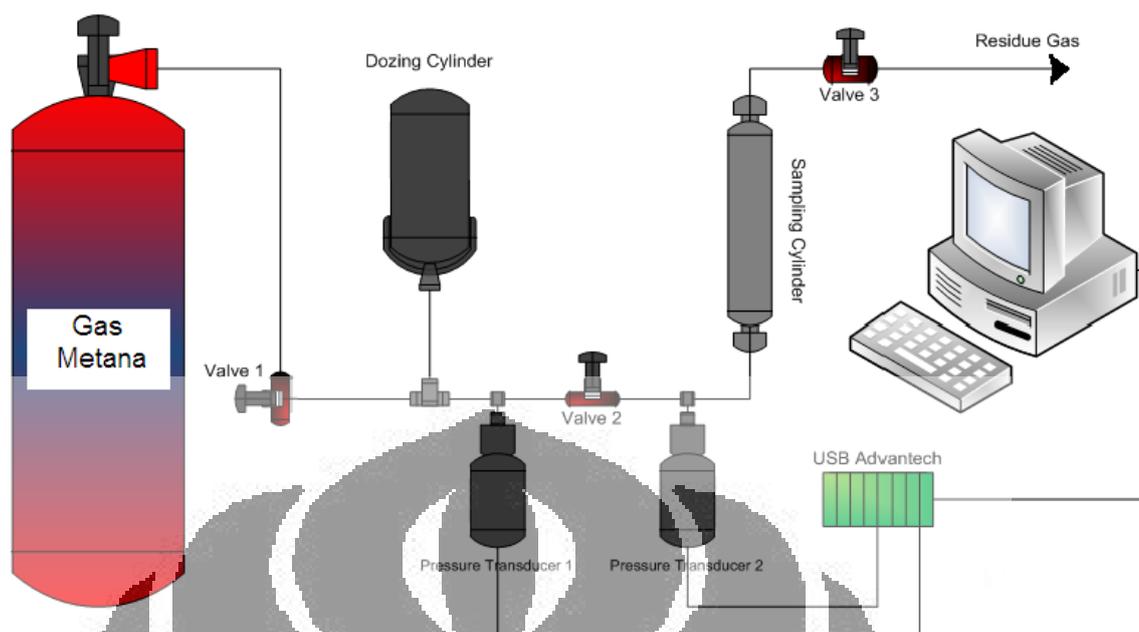
2) Adsorpsi gas Metana Oleh MWCNT

- a) *Dozing cylinder* diisi dengan gas Metana dengan membuka valve V1 dan mengalirkannya ke *dozing cylinder* sampai penuh. Setelah penuh, V1 ditutup. Temperatur (T_i) dan tekanan (P_i) CH_4 di *dozing cylinder* dicatat. Semua pompa dalam keadaan mati
- b) Gas CH_4 dialirkan ke *sampling cylinder* dengan membuka valve V2. Ketika gas CH_4 telah masuk ke dalam *sampling cylinder*, Temperatur (T_f) dan tekanan (P_f) gas CH_4 pada *dozing cylinder* dicatat.
- c) Tekanan akhir dari *sampling cylinder* (P_{sf}) dicatat setelah 30 menit agar besarnya stabil.
- d) Mol zat teradsorp dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$n_{CH_4 \text{ teradsorp}} = n_{CH_4} - n_{CH_4 \text{ tidak teradsorp}}$$

$$n_{CH_4 \text{ teradsorp}} = \left[\left(\frac{P_i}{Z_{CH_4 i} RT_i} - \frac{P_f}{Z_{CH_4 f} RT_f} \right) V_{\text{dozing cylinder}} \right] - \left(\frac{P_{sf} V_{\text{void}}}{Z_{CH_4 sf} RT_f} \right) \quad (3.5)$$

- 3) Prosedur diatas dilakukan untuk setiap produk nanotube karbon sampai diperoleh kurva adsorpsi isothermal untuk kenaikan tekanan 1 – 1000 psia dengan interval sebesar 100 psi.



Gambar 3. 2. Skema Alat Uji Adsorpsi

3.4.4 Pengujian Desorpsi Metana

Untuk analisis ini tekanan tinggi pada *Sampling Cylinder* merupakan tekanan awal proses desorpsi gas Metana dengan prosedur sebagai berikut :

- 1) Tekanan *Dozing Cylinder* diturunkan dengan membuka valve V1/residue valve dan mengalirkannya ke luar. Setelah tekanan pada *Dozing Cylinder* sekitar 200 psia, valve V1 ditutup dan tekanan serta temperatur di *Dozing Cylinder* dicatat.
- 2) Gas Metana dari *Sampling Cylinder* dialirkan ke *Dozing Cylinder* dengan membuka valve V2. Ketika semua gas Metana telah masuk ke dalam *Dozing Cylinder*. Tutup valve V2 serta catat temperatur dan tekanan pada *Dozing* dan *Sampling Cylinder*.

Prosedur diatas dilakukan untuk setiap sampel CNT dengan interval dan variasi yang sama dengan proses adsorpsi. Interval pengujian sekitar 100 psi sampai diperoleh kurva desorpsi isothermal dengan penurunan tekanan dari tekanan sekitar 1000 psia. Pengujian desorpsi merupakan percobaan kebalikan

dari adsorpsi. Pengujian adsorpsi dan desorpsi dilakukan dengan skema alat yang diilustrasikan pada Gambar 3.2.

Plot dari data eksperimen adsorpsi isotermaal dibandingkan dengan kapasitas adsorpsi yang didapat dari permodelan adsorpsi isotermais Langmuir dengan pertimbangan bahwa proses adsorpsi pada adsorben MWCNT tidak mengalami histerisis (Rasoolzadeh, 2008) dan proses adsorpsi fisik yang terjadi membentuk suatu lapisan *monolayer* adsorbat pada adsorben, sehingga permodelan Langmuir dinilai cukup relevan untuk memodelkan adsorpsi isotermais pada tekanan sampai 1000 psia. Pada permodelan Langmuir terdapat parameter berupa kapasitas adsorpsi maksimum untuk lapisan monolayer dan fitting parameter b yang menyatakan seberapa kuat interaksi yang terjadi antara adsorben dan adsorbat, sehingga dengan permodelan ini akan didapatkan suatu sifat atau karakteristik dari proses adsorpsi gas Metana pada MWCNT.



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Preparasi Adsorben *Carbon Nanotube*

Pengujian kapasitas adsorpsi gas Metana pada penelitian ini menggunakan *Carbon Nanotube* sebagai adsorben. Adsorben yang digunakan ada dua macam yaitu CNT komersial dan karbon yang diperkirakan karbon dengan spesifikasi CNT yang diproduksi oleh Riset Grup Energi Berkelanjutan, Departemen Teknik Kimia - UI. CNT lokal yang digunakan pada saat ini belum dipurifikasi oleh pihak peneliti CNT di Departemen Teknik Kimia UI (Siregar, 2010). Material yang merupakan CNT yang belum murni tersebut merupakan material karbon yang diambil dari kawat yang di-*coating* oleh katalis Ni-Cu-Al yang dihasilkan dari reaksi dekomposisi katalitik metana dengan metode *Chemical Vapor Deposition (CVD)*.

4.1.1 Spesifikasi Adsorben

Adsorben komersial yang digunakan merupakan CNT dengan spesifikasi fisik sebagai *Multiwall Carbon Nanotube (MWCNT)* yang didapatkan dari *Chengdu Organic Chemicals Co. Ltd., Chinese Academy of Science (CAS)* dengan kategori atau MFG number M1090617. Data spesifikasi MWCNT diperoleh dari vendor yang dipublish pada <http://timesnano.com/products/M1.asp>. Tabel 4.1 menunjukkan spesifikasi dari MWCNT yang berasal dari CAS. MWCNT ini memiliki kemurnian lebih dari 95% dan luas permukaan lebih dari 500 m²/g.

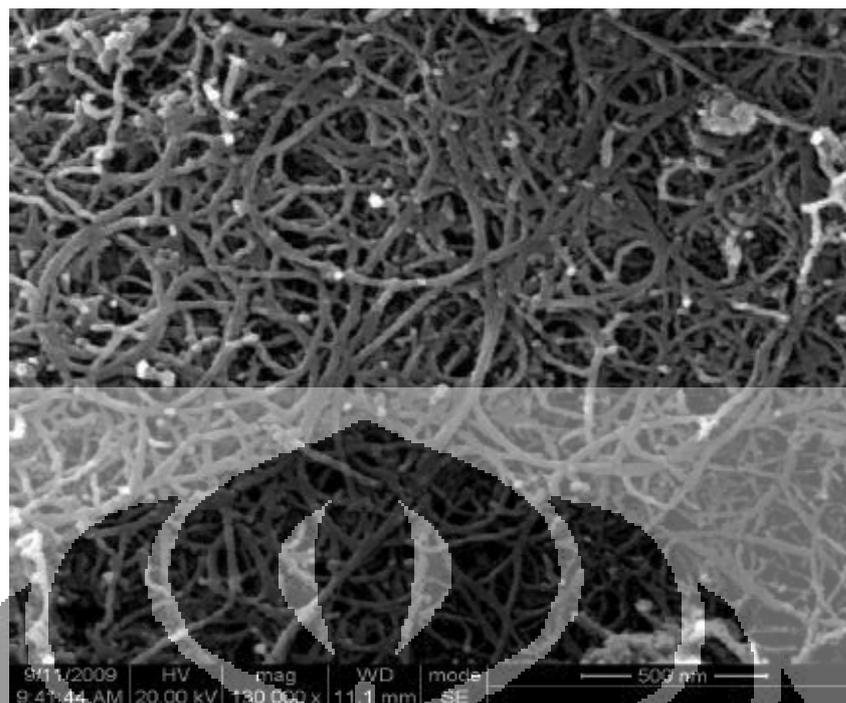
Tabel 4. 1 Spesifikasi MWCNT Chinese Academic of Science

Spesifikasi	Keterangan
Jenis	<i>Multi wall</i>
Kemurnian	> 95 wt%
Ash	< 1,5wt%
<i>Outer diameter</i>	< 8 nm
<i>Inner diameter</i>	2 – 5 nm
Panjang	10 -30 nm
<i>Special Surface Area</i>	> 500 m ² /g
Warna	Hitam
<i>Bulk Density</i>	0,27 g/cm ³
<i>True Density</i>	2,1 g/cm ³
<i>Electric conductivity</i>	> 100 s/cm
Metode pembuatan	CVD

Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 merupakan hasil pencitraan *Transmission Electron Microscopy (TEM)* dan pencitraan *Scanning Electron Microscopy (SEM)* dari MWCNT komersial dengan kode MFG M1.

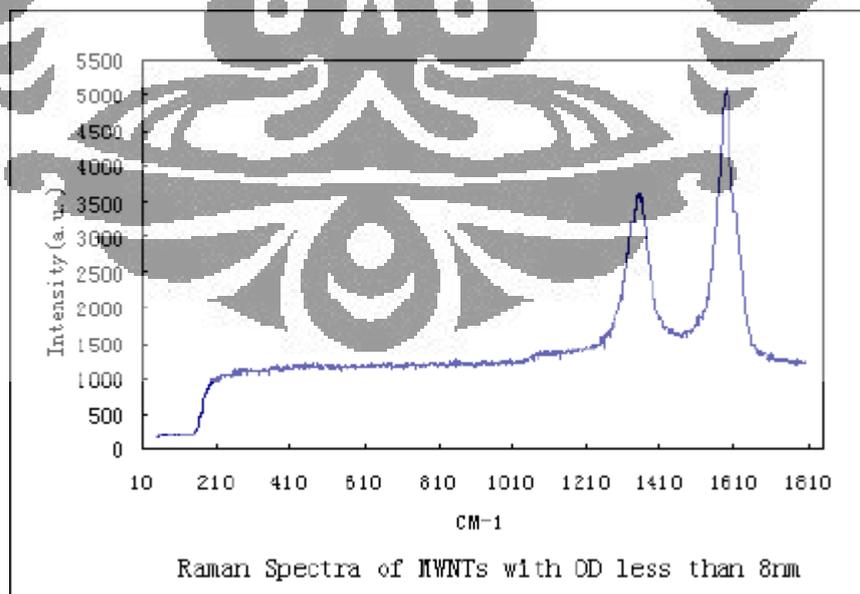


Gambar 4. 1 Pencitraan TEM MWCNT – CAS M1090617



Gambar 4. 2 Pencitraan SEM MWCNT - CAS M1090617

Data Raman Spectra menunjukkan kandungan dari struktur MWCNT pada sampel. Peak kurva yang terbentuk di daerah antara $1500 - 1600 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya MWCNT pada sampel tersebut (Rasoolzadeh, *et al*, 2008). Gambar 4.3 menunjukkan kurva Raman Spectra dari MWCNT - CAS.



Gambar 4. 3 Kurva Raman Spectra MWCNT - CAS M1090617

CNT lokal yang digunakan belum memiliki data kualitatif secara lengkap. Dalam karakterisasi luas permukaan BET menggunakan alat *Quantachrome Autosorb-6 Automated Gas Sorption*, dihasilkan luas permukaan spesifik dari adsorben yang digunakan sebagai berikut :

Tabel 4. 2 Hasil Karakterisasi BET *Specific Surface Area*

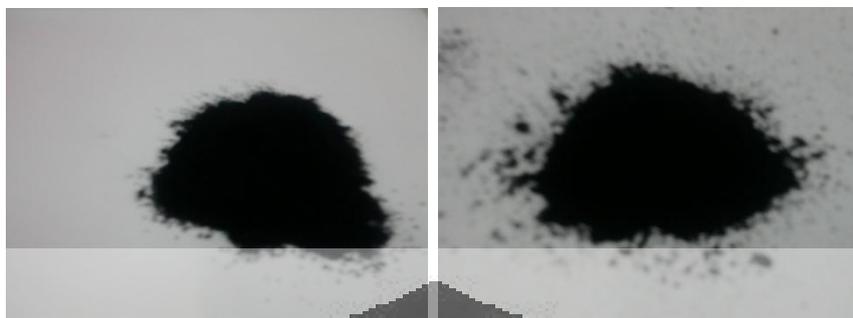
Sample	Luas Permukaan spesifik (m ² /g)
CNT komersial	500
CNT lokal	87,24

Secara fisik dapat terlihat bahwa ukuran karbon yang dihasilkan masih cukup besar dengan bentuk fisik menggumpal (granula) dan diperkirakan masih terdapat karbon amorf. CNT lokal ini diproduksi dengan cara yang sama dengan apa yang telah dilaporkan oleh Shantya pada tahun 2009. Secara morfologi yang direpresentasikan dengan citra SEM pada Gambar 4.4, adsorben lokal yang digunakan merupakan CNT dengan ukuran *outer diameter* tube sekitar 20 nm – 82 nm.



Gambar 4. 4 Citra SEM CNT Lokal Produksi DTK

Gambar 4.5 memperlihatkan gambar CNT lokal dan CNT komersial secara kasat mata.



Gambar 4.5 Adsorben CNT lokal DTK (kiri) CNT Komersial – CAS (kanan)

4.1.2 Hasil Preparasi Adsorben

Sebelum digunakan sebagai adsorben pada pengujian adsorpsi Metana, kedua adsorben dipanaskan didalam oven pada suhu 120°C selama 2,5 – 3 jam. Hal ini dilakukan untuk menghilangkan kandungan air pada MWCNT yang akan digunakan sehingga tidak terjadi pelarutan gas kedalam permukaan adsorben (Insoluble).

Massa MWCNT yang dipakai dalam uji adsorpsi ini sekitar 1,8 – 2 gram yang dimasukkan kedalam sampling silinder mini sesuai dengan kapasitas volume sampling silinder tersebut. Berikut ini tabulasi perhitungan dari massa CNT aktual yang dimasukkan kedalam *sampling cylinder*.

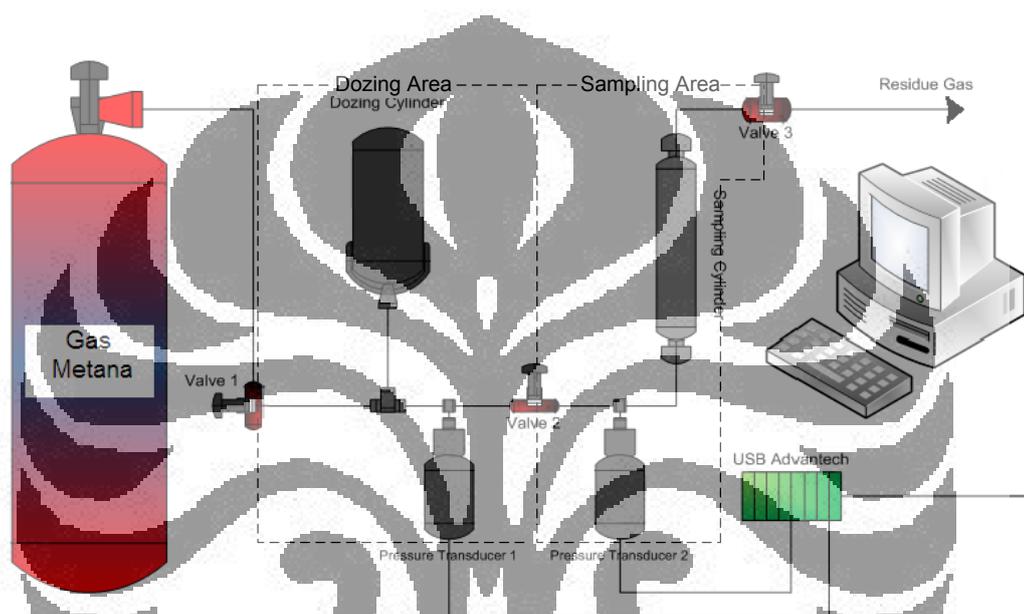
Tabel 4.3 Tabulasi Massa Adsorben Aktual pada Sampling Cylinder

Massa Adsorben Aktual pada Sampling Cylinder	
Carbon Nanotube Komersial	
Massa Sampling Cylinder + CNT Komersial + Glass woll	141,90 gram
Massa Sampling Cylinder + Glass woll	139,93 gram
Massa CNT aktual dalam Sampling Cylinder	1,97 gram
Carbon Nanotube Lokal	
Massa Sampling Cylinder + CNT Komersial + Glass woll	142,20 gram
Massa Sampling Cylinder + Glass woll	140,22 gram
Massa CNT aktual dalam Sampling Cylinder	1,98 gram

Massa CNT yang dimasukkan kedalam sampling cylinder akan menjadi basis massa dalam perhitungan kapasitas adsorpsi CH_4 pada CNT. Kapasitas Adsorpsi dinyatakan sebagai banyaknya mol CH_4 yang teradsorpsi per gram CNT, sehingga kapasitas dari adsorpsi ini dapat dibandingkan dengan baik.

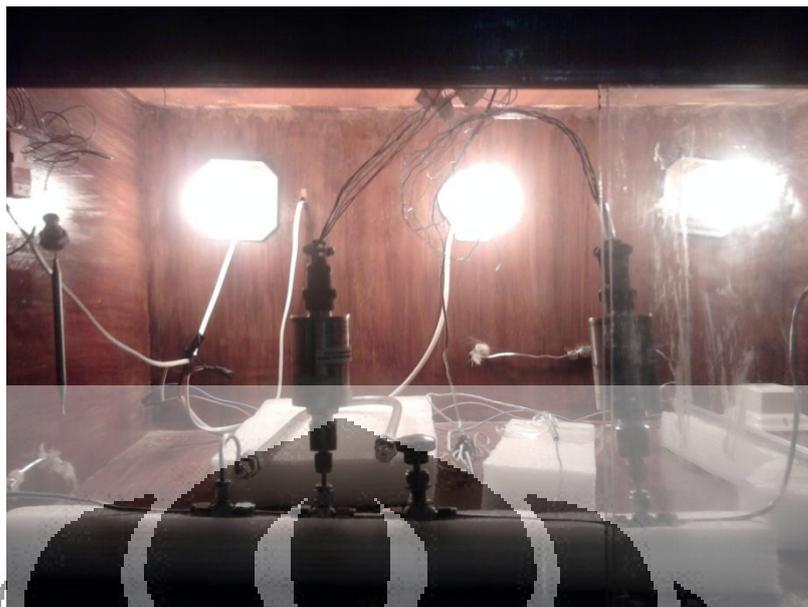
4.2 Hasil Preparasi Peralatan Uji Adsorpsi

Dalam pengujian adsorpsi pada penelitian ini, Alat adsorpsi terangkai seperti skema dibawah ini :



Gambar 4. 6 Pembagian Daerah Alat Uji Adsorpsi

Dengan rangkaian asli seperti yang digambarkan pada Gambar 4.7 dibawah ini.



Gambar 4.7 Rangkaian Peralatan Uji Adsorpsi

Alat uji adsorpsi ini terletak dalam boks kayu yang tertutup oleh kaca sehingga temperatur pada saat pengujian dapat terjaga dengan cukup baik walaupun kadang-kadang terjadi fluktuasi temperatur karena temperatur lingkungan. Di antara dozing dan sampling terdapat termokopel yang berfungsi sebagai indikator temperatur ruangan pada alat uji adsorpsi. Sumber panas pada alat uji didapat dari tiga buah lampu dengan daya 100 watt yang dipasang paralel, namun pada penelitian ini digunakan suhu ruangan/ambient yaitu suhu antara 25-26°C sehingga penggunaan lampu ini tidak diperlukan.

Indikator tekanan pada alat ini menggunakan *pressure transducer Omegadyne* dengan rentang tekanan optimum mulai dari 0-1000 psi. Prolessara (2010) telah mengkalibrasi *pressure transducer Omegadyne* dengan alat Duck DPI milik Departemen Teknik Mesin FTUI sehingga didapatkan suatu persamaan kalibrasi :

$$P_{dozing} = 34,22 \times \text{Voltase Pressure Transducer} + 61,33$$

$$P_{sampling} = 33,38 \times \text{Voltase Pressure Transducer} + 16,05$$

Prolessara mengatakan bahwa volume *Dozing cylinder* yang digunakan pada alat uji yang digunakan kira-kira dua kali lebih besar dari volume *sampling cylinder*, hal ini dimaksudkan agar perubahan tekanan pada area dozing setelah injeksi tidak terlalu kecil atau terlalu besar. Bila perubahan terlalu kecil, maka

kesalahan pembacaan tekanan yang kecil menghasilkan error yang besar sehingga akurasi hasil uji rendah, sedangkan bila terlalu besar, maka dibutuhkan tekanan awal area dozing yang jauh lebih tinggi untuk injeksi ke *Sampling Cylinder*.

Volume area *dozing cylinder* diukur menggunakan air yang dimasukkan, sehingga didapatkan volume area dozing sebesar 23 ml (Prolessara, 2010). Volume ini akan dipergunakan untuk menghitung jumlah *excess adsorption* (*Adsorpsi Gibbs*) yang diukur dengan metode volumetrik.

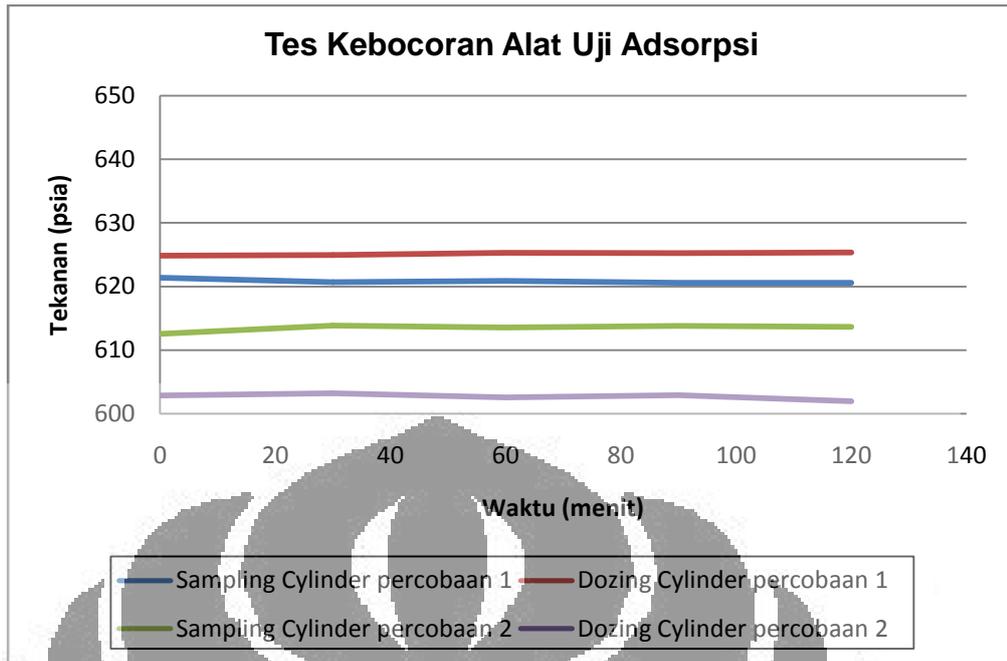
Sebelum alat uji dipakai, maka semua bagian harus terinstalasi dengan baik tanpa kebocoran dan dilakukan pemvakuman dan pemanasan selama 3-5 jam menggunakan 3 buah lampu 100 watt yang dapat meningkatkan temperatur ruangan alat uji sampai 50°C, hal ini untuk memastikan tidak ada partikel air pada ruangan di pipa, valve, dan silinder alat uji

4.3 Hasil Tes Kebocoran

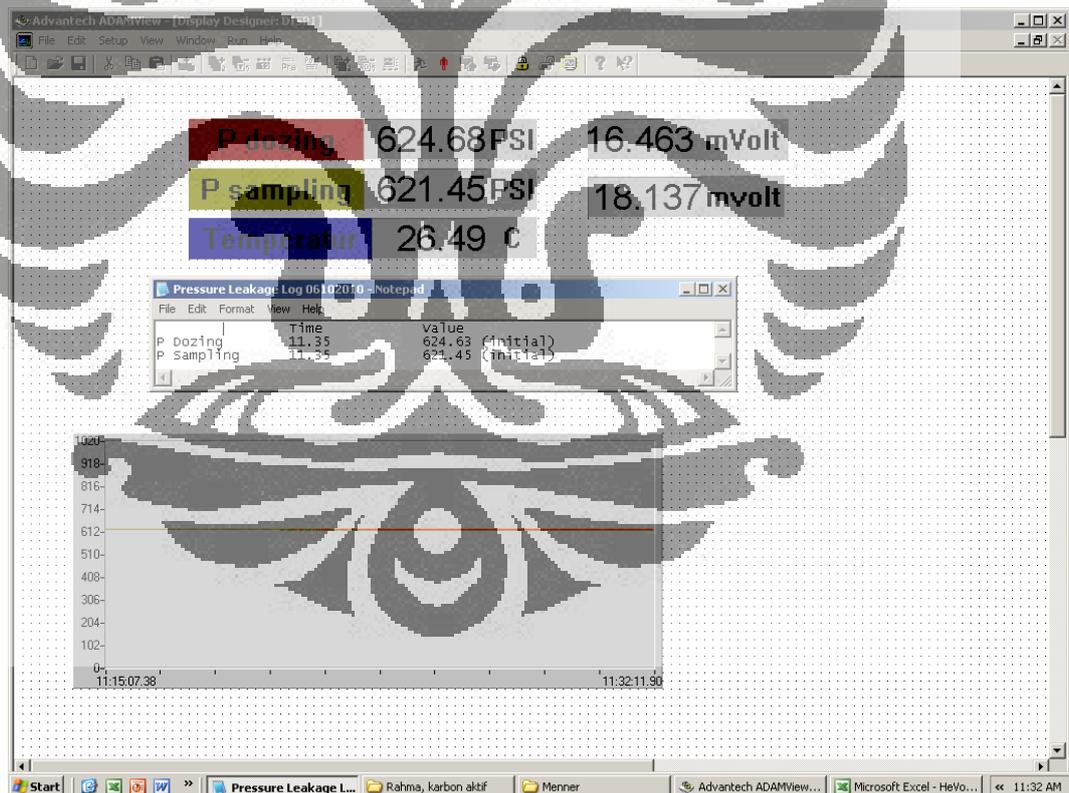
Tes kebocoran dilakukan sebelum rangkaian alat uji adsorpsi digunakan. Tes kebocoran atau pengecekan kebocoran gas dilakukan agar memastikan tidak ada massa gas yang keluar. Hal ini menjadi sangat penting karena perhitungan kapasitas adsorpsi pada penelitian ini menggunakan metode volumetrik.

Gelembung sabun digunakan sebagai indikator kebocoran gas. Cairan sabun dioleskan dipermukaan sambungan pipa, valve, dan sambungan silinder. Jika terjadi kebocoran, gelembung sabun akan bergerak atau terjadi *bubble* sehingga daerah yang bocor akan terlihat dan dapat diatasi dengan mudah. Selain itu, terjadinya kebocoran dapat terlihat dari trend pembacaan tekanan pada alat data acquisition yang cenderung menurun terus.

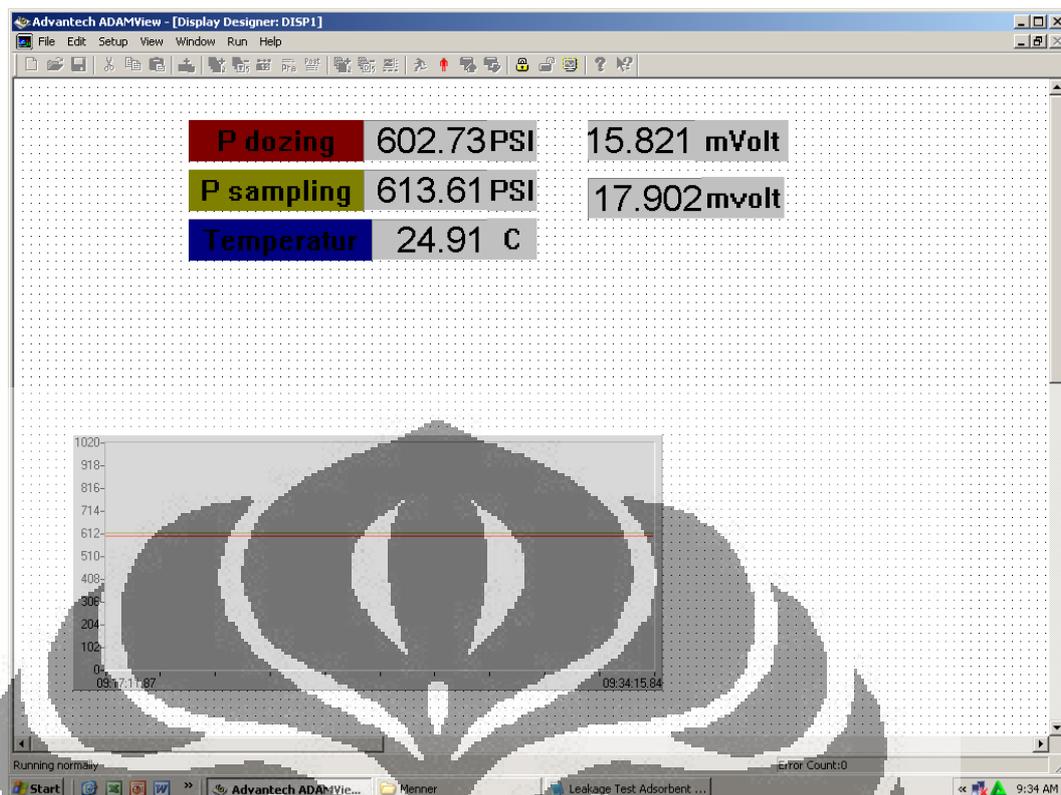
Tes kebocoran dilakukan sebelum melakukan *Helium Void Volume Test*. Prosedur adsorpsi dapat dilakukan jika tekanan dozing dan sampling cenderung konstan serta tidak terbentuk gelembung sabun yang berarti sudah tidak terjadi kebocoran pada alat uji adsorpsi. *Rule of thumb* toleransi kebocoran pada penelitian ini sebesar 0,5 psi setiap ½ jam. Berikut ini merupakan rangkuman dari tes kebocoran pada alat uji adsorpsi.



Gambar 4.8 Hasil Tes Kebocoran



Gambar 4.9 Kurva Tes Kebocoran Percobaan 1 pada 6 Oktober 2010



Gambar 4. 10 Kurva Tes Kebocoran Percobaan 2 pada 20 Oktober 2010

Kekonstanan tekanan sangat dipengaruhi oleh temperatur ruangan dan stabilitas listrik yang diterima *pressure transducer*, oleh karena itu pada Gambar 4.8 terlihat kurva tidak 100% lurus, terdapat deviasi yang sangat kecil, namun semuanya itu dapat ditoleransi, sehingga pada Gambar 4.9 dan 4.10 terlihat menunjukkan suatu garis lurus, hal ini menggambarkan kekonstanan nilai tekanan pada rentang waktu sebesar dua jam dan memastikan bahwa tidak ada lagi kebocoran yang terjadi, sehingga alat uji adsorpsi sudah siap untuk digunakan untuk prosedur selanjutnya

4.4 Hasil Pengukuran Volume *Void* Area Sampling

Secara pengukuran langsung, *sampling cylinder* yang dipakai memiliki ID = 0,63 cm (1/4 “), OD = 0,955 cm, panjang = 28,415 cm, sehingga diperoleh volume silinder yang dapat diisi gas sebesar 8,85 ml, sedangkan volume ruang kosong/volume *void* pada area *sampling cylinder* pada saat diisi adsorben perlu diketahui dengan cara mengalirkan gas yang bersifat inert kedalam *sampling cylinder* dengan memvariasikan tekanan pada temperatur tetap (isotermal). Pemvariasian tekanan dilakukan untuk memastikan volume kosong yang

terhitung, sehingga tidak ada kesalahan perhitungan volumetrik pada saat pengujian adsorpsi di tekanan tinggi. Berapapun tekanan yang diberikan, perhitungan volume *void* harus menghasilkan nilai yang sama atau memiliki deviasi yang sangat kecil pada setiap perhitungan volume *void* diberbagai tekanan.

Rodrigues, *et al* (2002) telah melakukan percobaan volume void dengan menggunakan beberapa gas untuk uji volume void, yaitu He, N₂, CH₄, dan CO₂, dengan diameter molekul sebagai berikut

Tabel 4. 4 Diameter Molekul Gas Penguji Volume Void

Gas Murni	Formula	Diameter Molekul (nm)
Helium	He	0,186
Nitrogen	N ₂	0,3 – 0,41
Metana	CH ₄	0,4
Karbon dioksida	CO ₂	0,51 – 0,35

Volume *void* pada *sampling cylinder* sangat tergantung oleh banyaknya adsorben dan *glass woll* yang dimasukkan. Sebaiknya pengukuran volume *void* harus menggunakan gas inert. Penggunaan nitrogen sebagai gas untuk pengujian ini tidak akurat perhitungannya karena nitrogen memiliki kemungkinan teradsorpsi pada pori-pori permukaan CNT (Yim, *et al*, 1999), sehingga perhitungan volume *void* secara volumetrik tidak akan akurat. Afinitas gas terhadap karbon untuk N₂<CH₄<CO₂ (Rodrigues, *et al*, 2002), sehingga volume *void* yang dihasilkan oleh ketiga gas itu akan tidak akurat.

Menurut Mayor, *et al* (1990) Helium dapat memberikan hasil yang sangat presisi untuk volume *void*, karena diameter molekul yang kecil dan tidak adanya reaksi dengan karbon. Oleh karena itu digunakankannya Helium sebagai gas untuk menghitung volume *void* karena gas Helium tidak teradsorpsi pada adsorben CNT dan tidak akan terjadi reaksi dengan CNT.

Tabel berikut ini menunjukkan hasil kalibrasi atau uji Helium Volume *Void* pada area *sampling cylinder* untuk adsorben CNT komersial dan CNT lokal.

Tabel 4. 5 Tabulasi Hasil Uji Volume Void Menggunakan Gas Helium

Pengujian	Volume Void Area Sampling(mL)	
	Percobaan CNT komersial	Percobaan CNT lokal
1	13,86	14,67
2	13,72	14,67
3	13,94	14,64
4	14,09	14,65
5	14,08	14,71
Volume Void Rata-rata	13,94	14,67
Standard Deviasi	0,156	0,027

Pengujian yang dilakukan lebih dari satu kali bertujuan untuk menghindari kesalahan pembacaan atau perhitungan pada tekanan tinggi. Perhitungan volume void diatas dihitung secara volumetrik dengan persamaan 3.3 dan 3.4.

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

dengan

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

Dimana n_i = Jumlah mol gas He yang diinjeksikan ke *sampling cylinder* (mol)

i = keadaan awal *dozing cylinder*

f = keadaan akhir *dozing cylinder*

sf = keadaan akhir *sampling cylinder*

T = temperatur (°R)

P = tekanan (psi)

Z_{He} = kompresibilitas gas He

R = 669,954 (psi cm³)/(mol.°R)

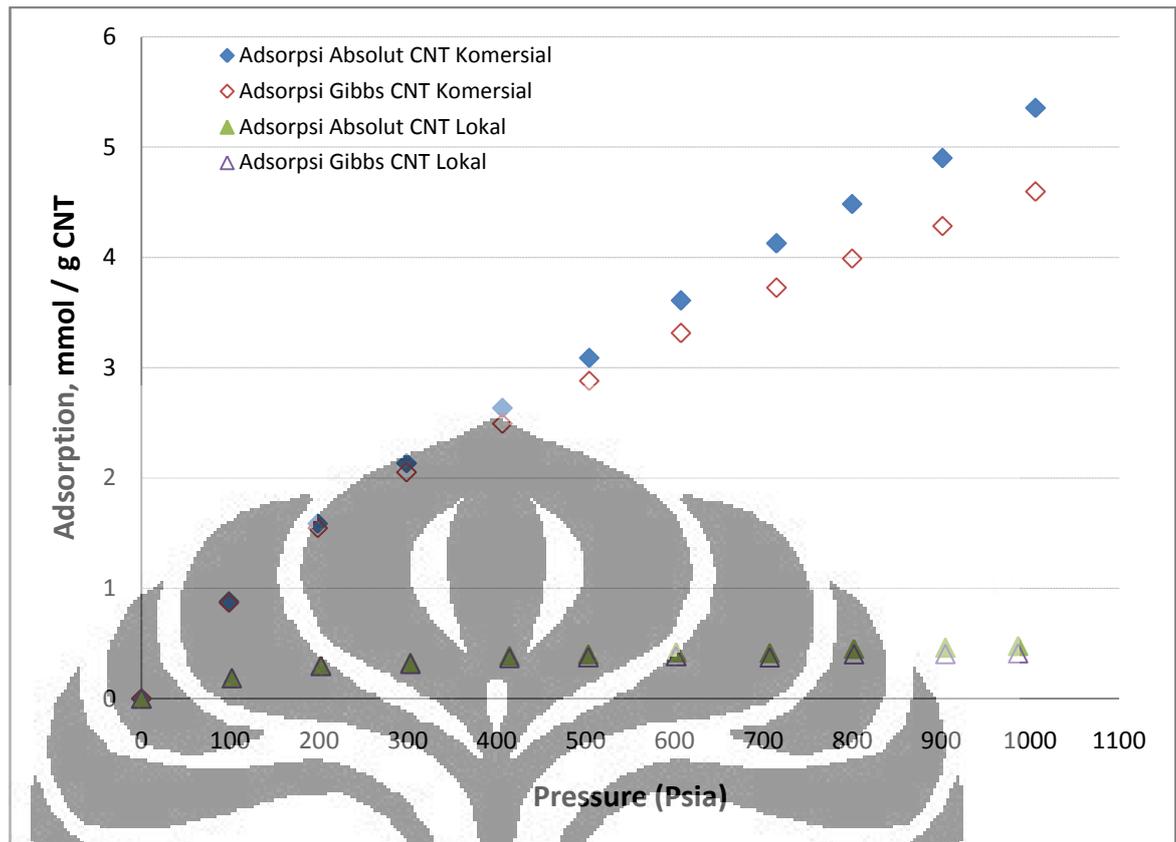
Tabulasi perhitungan uji Helium volume *void* secara detail dari masing-masing sampel adsorben dapat dilihat pada bagian Lampiran 1 dan 2.

Dari hasil uji Helium volume *void* diatas, terlihat volume *void sampling area* pada saat percobaan adsorpsi gas Metana pada CNT lokal lebih besar daripada volume *void* pada percobaan adsorpsi CNT komersial, hal ini dikarenakan bentuk fisik dari CNT yang lokal yang digunakan lebih berbentuk granula, sedangkan CNT komersial berbentuk bubuk halus, sehingga untuk massa yang relatif sama, volume yang ditempati CNT lokal lebih kecil daripada CNT komersial

4.5 Hasil Uji Kapasitas Adsorpsi Tekanan Tinggi Gas Metana

Pengujian kapasitas adsorpsi tekanan tinggi gas Metana pada *Carbon Nanotube (CNT)* yang menggunakan CNT komersial dan CNT lokal produksi Departemen Teknik Kimia, dilakukan dengan variasi tekanan mulai dari tekanan 0 sampai tekanan kisaran 1000 psia. Pada penelitian ini, pengujian adsorpsi dilakukan pada kondisi isothermal. Temperatur operasi dijaga konstan sekitar temperatur ambient, yaitu 25°C, hal ini karena salah satu tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan kandidat adsorben untuk prototipe *Adsorptive Storage* Metana.

Gambar 4.11 menunjukkan perbandingan data hasil adsorpsi tekanan tinggi gas Metana pada CNT komersial dan lokal pada kisaran suhu 25-26°C dengan interval tekanan sebesar 100 psi.



Gambar 4. 11 Grafik Jumlah Metana Yang Teradsorpsi Pada CNT

Data yang ditampilkan dengan bentuk kosong merupakan data Adsorpsi Isoterm Gibbs (*excess adsorption*) yang didapat dari eksperimen yang dihitung secara volumetrik sebagaimana dijelaskan pada Bab 3. Perhitungan secara adsorpsi Gibbs dilakukan karena sampai saat ini tidak ada metode yang dapat menentukan jumlah gas yang teradsorpsi secara langsung dan akurat, karena belum ada metode dapat menentukan secara pasti seberapa besar jumlah mol yang teradsorpsi pada permukaan adsorben, sehingga kita tidak dapat menentukan *volume bulk gas* yang tidak teradsorpsi, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.8.

Data adsorpsi yang sebenarnya dinyatakan dengan besaran adsorpsi absolut, hubungan antara adsorpsi Gibbs dan absolut dinyatakan dengan persamaan 2.28.

$$n_{ads}^{Gibbs} = n_{ads}^{Absolute} \times \left(1 - \frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads}} \right) \quad (2.28)$$

Detail perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 3 dan 4. Sudibandriyo (2003) mendapatkan densitas gas dalam fasa teradsorpsi untuk metana sekitar, $0,354 \text{ g/cm}^3$, nilai ini dihitung dengan permodelan Ono-Kondo.

Tabel 4. 6 Estimasi Densitas Gas Dalam Fasa Teradsorpsi Dengan Metode Yang Berbeda (Sudibandriyo, et al, 2003)

method	adsorbed-phase density (g/cm^3)		
	methane	nitrogen	CO ₂
Ono-Kondo model	0.354	0.701	0.996
ZGR EOS	0.345	0.839	0.982
liquid density estimate	0.421	0.808	
solid density estimate			1.18
VDW covolume	0.374	0.725	1.03
graphical estimate from the Gibbs adsorption isotherm			1.02

Sumber : Sudibandriyo, M.(2003).- *Adsorption of Methane, Nitrogen, Carbon Dioxide, and Their Binary Mixtures on Dry Activated Carbon at 318.2 K and Pressures up to 13.6 Mpa, Oklahoma, Langmuir. Tabel 6.*

Pada Gambar 4.11 dapat dilihat hasil adsorpsi tekanan tinggi gas Metana sesuai dengan pola kurva adsorpsi tipe I. Pola kurva seperti ini menggambarkan suatu adsorpsi satu lapis (*monolayer*). Secara teoritis, kurva adsorpsi isoteremis dapat di *fitting* dengan baik oleh permodelan Langmuir.

Berdasarkan Gambar 4.11, CNT lokal DTK memiliki kemampuan adsorpsi yang jauh lebih kecil daripada kemampuan CNT komersial dalam mengadsorpsi gas Metana. Kemampuan atau daya adsorpsi rata-rata CNT lokal hanya 13, 38% dari daya adsorpsi CNT komersial.

Pada penelitian ini, Adsorpsi maksimal pada CNT komersial mencapai 5,36 mmol/g pada tekanan 1006 psia, atau 8,57%wt yang setara dengan 251,95 v(STP)/v (perbandingan antara volum gas teradsorpsi dengan volume adsorben yang digunakan pada kondisi STP), sedangkan untuk CNT lokal hanya 0,48 mmol/g pada tekanan 986,16 psia atau 0,76%wt. Kedua pengujian itu dilakukan pada temperatur ambient sekitar 25°C dan konversi dilakukan berdasarkan perhitungan dengan menggunakan *molecul weight* adsorbat dan *true density* adsorben (Sun, *et.al*, 2009)

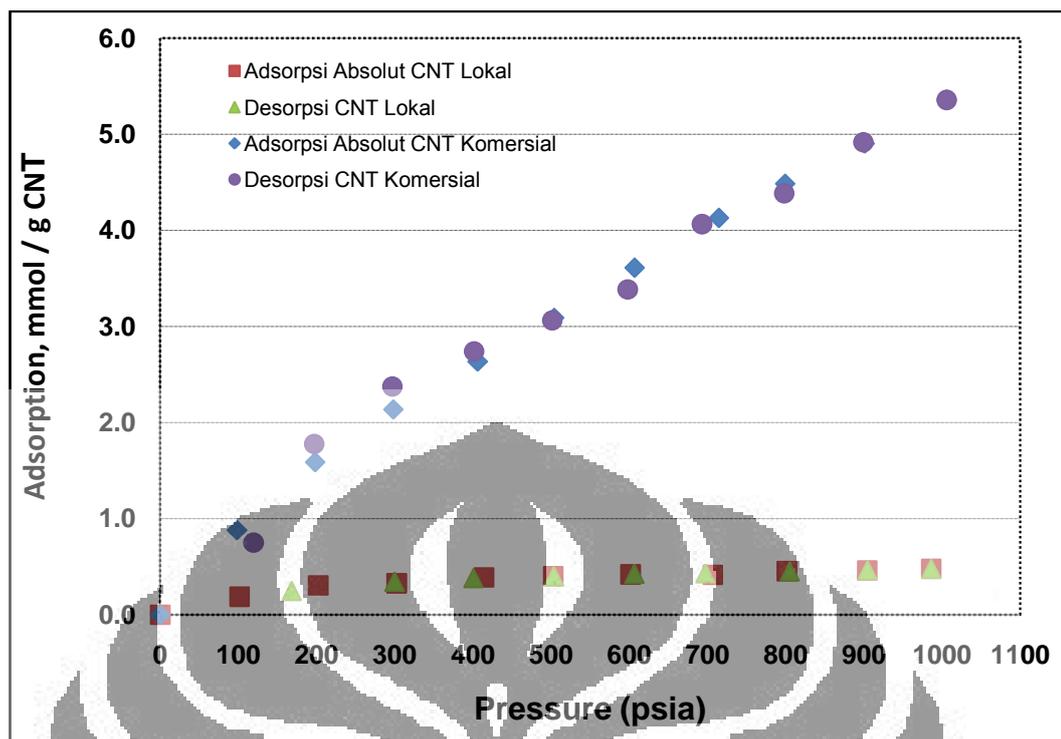
Pola kurva dari adsorpsi CNT komersial hampir sama dengan hasil percobaan *storage* Metana pada MWCNT yang dilakukan Rasoolzadeh dan kawan-kawan pada tahun 2008 yang mendapatkan hasil 3,99 mmol/g pada temperatur 298 K dan tekanan 1015 psia

Berdasarkan Gambar 4.11, kemampuan adsorpsi CNT lokal yang hanya mencapai 13,38% dari CNT komersial dikarenakan luas permukaan kontak spesifik CNT lokal yang hanya mencapai 87,24 m²/g atau 17,45% dari luas kontak spesifik CNT komersial sehingga adsorpsi terbukti sangat dipengaruhi oleh luas kontak spesifik adsorben. Kapasitas Adsorpsi berbanding lurus dengan luas permukaan kontak spesifik adsorben (Sun, *et.al*, 2009).

Luas permukaan kontak spesifik adsorben CNT lokal yang rendah pada hasil BET di Tabel 4.2, disebabkan oleh masih adanya impuritis yang terkandung dalam struktur CNT tersebut, sebagaimana disebutkan pada subbab 4.1 dimana CNT lokal belum pernah dipurifikasi. Material impuritis sangat mempengaruhi kemampuan adsorpsi adsorben, karena material impuritis dapat menutupi pori-pori dari CNT dan membuat luas permukaan spesifiknya kecil, sehingga proses adsorpsi tidak berlangsung secara sempurna. Berdasarkan data dari produsen CNT lokal, katalis yang digunakan adalah logam Ni-Cu-Al. Kemungkinan besar hal logam-logam inilah yang menyumbat pori-pori adsorben.

4.6 Hasil Uji Desorpsi Gas Metana Pada Carbon Nanotube

Desorpsi merupakan proses kebalikan dari proses adsorpsi. Desorpsi bersifat melepaskan molekul kembali molekul gas yang telah diadsorpsi. Gambar 4.12 menyatakan proses desorpsi yang dibandingkan dengan proses adsorpsi. Pada gambar tersebut terlihat kurva adsorpsi dan desorpsi pada CNT komersial dan CNT lokal DTK relatif berhimpit secara sempurna. Hal ini menandakan adsorpsi yang terjadi merupakan adsorpsi fisik (*physisorption*)



Gambar 4.12 Perbandingan Adsorpsi dan Desorpsi Gas Metana Pada CNT

Adsorpsi fisik merupakan adsorpsi yang disebabkan karena adanya gaya Van der Waals antara molekul adsorbat dan permukaan pori adsorben. Sesuai dengan Tabel 2.1 dan 2.2, adsorpsi fisik yang terjadi pada CNT bersifat *reversible*, dapat merupakan lapisan monolayer atau multilayer, dan terjadi dengan relatif cepat.

Pada adsorpsi fisik, gas 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 molekul adsorbat yang lainnya, sehingga desorpsi diperoleh dengan waktu sekitar 20 menit untuk memperoleh kesetimbangan dan perhitungan yang akurat.

Proses desorpsi pada penelitian ini dilakukan pada temperatur yang sama, tanpa penambahan kalor pada alat uji, sehingga dapat disimpulkan pelepasan molekul gas Metana yang teradsorpsi pada CNT (proses desorpsi) dapat dilakukan dengan cepat dan tidak memerlukan penambahan kalor pada *sampling cylinder* atau *adsorptive storage*. Dengan sifat seperti ini, CNT cocok untuk dijadikan

kandidat untuk adsorben pada *adsorptive storage* karena dapat dengan mudah melepaskan kembali gas yang telah diadsorpsi.

4.7 Representasi Data Adsorpsi Dengan Permodelan Langmuir

Berdasarkan data adsorpsi yang menunjukkan pula kurva adsorpsi gas Metana pada CNT komersial dan lokal berpola kurva adsorpsi isoterm tipe I sehingga diperkirakan membentuk lapisan monolayer, sedangkan menurut data desorpsi, menunjukkan bahwa adsorpsi yang terjadi merupakan adsorpsi fisik. Oleh karena itu kurva adsorpsi di-*fitting* dengan menggunakan permodelan Langmuir.

Pada permodelan Langmuir, digunakan parameter berupa kapasitas adsorpsi maksimum atau n_{maks} (q_s) dan konstanta Langmuir (b). Persamaan Permodelan Langmuir seperti yang dijelaskan pada persamaan 2.7, 2.8, dan 2.9 :

$$q = q_s \frac{bp}{1+bp} \quad (2.7)$$

dengan

$$b = b_0 e^{\left(\frac{-\Delta H_0}{RT}\right)} = b_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.8)$$

$$b_0 = \frac{\alpha}{k_{d\infty} \sqrt{2\pi MRT}} \quad (2.9)$$

Jumlah mol teradsorpsi maksimum, q_s , dipengaruhi oleh karakteristik adsorben berupa ukuran pori, jumlah pori atau luas permukaan, distribusi jumlah pori pada suatu adsorben dan temperatur operasi. Penurunan temperatur dapat meningkatkan besaran q_s , hal ini terjadi karena peningkatan temperatur akan menurunkan temperatur adsorpsi, sedangkan konstanta Langmuir, b , merupakan konstanta yang sangat tergantung pada temperatur dan dikenal dengan konstanta afinitas yang menggambarkan seberapa besar kekuatan molekul adsorbat beratraksi dengan permukaan adsorben

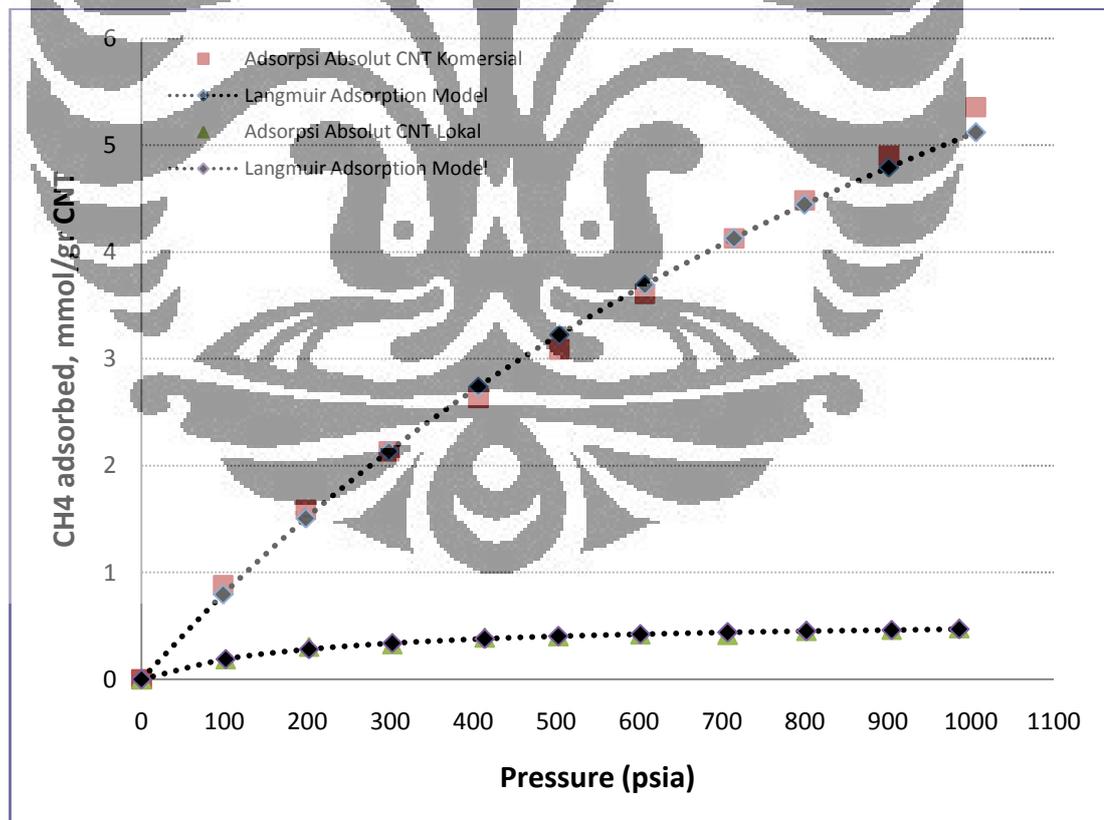
Persamaan 2.8 merupakan persamaan eksponensial dengan nilai pangkat yang berbandng terbalik dengan temperatur, oleh karena itu peningkatan temperatur

akan menurunkan kekuatan afinitas antara adsorbat dan permukaan adsorben. Menurut Hasan (2009) peningkatan temperatur akan menyebabkan difusivitas molekul adsorbat ke permukaan adsorben menjadi lebih rendah, sehingga nilai konstanta b akan menurun.

Berikut ini merupakan hasil *fitting* persamaan permodelan Langmuir terhadap hasil adsorpsi gas Metana pada CNT komersial dan lokal yang disimulasikan oleh solver Microsoft Excel 2007.

Tabel 4.7 Parameter Permodelan Langmuir

Parameter	CNT Komersial	CNT Lokal
q_s (mmol/g)	12,46	0,564
b	0,00069	0,0049
AAD (%)	2,99	2,09



Gambar 4. 13 Fitting Permodelan Langmuir Pada Hasil Adsorpsi Gas Metana Pada CNT

Pada Gambar 4.13 diatas, data adsorpsi isothermis pada CNT komersial dan CNT lokal dapat direpresentasikan dengan baik oleh permodelan adsorpsi isothermis Langmuir. Nilai % AAD (*Absolute Average Deviation*) menggambarkan deviasi yang terjadi antara nilai pada permodelan dan nilai pada eksperimen. Persamaan %AAD seperti dibawah ini.

$$\%AAD = \frac{100}{NPTS} \sum_i \left| \frac{\omega_i^{calc} - \omega_i^{expt}}{\omega_i^{expt}} \right| \quad (4.1)$$

dimana NPTS adalah jumlah data, ω_i^{calc} adalah nilai dari permodelan ke-*i*, dan ω_i^{expt} nilai yang didapat dari eksperimen ke-*i*

Hasil representasi Permodelan Langmuir yang cukup baik terhadap percobaan adsorpsi ini, terlihat dari %AAD yang didapat pada kedua sampel dibawah 5%. Untuk adsorpsi pada CNT lokal memiliki %AAD yang lebih kecil, hal ini terlihat kesesuaian nilai dari permodelan Langmuir dengan data adsorpsi yang hampir saling berhimpit, sedangkan untuk CNT komersial, persamaan permodelan Langmuir agak mengalami sedikit deviasi untuk tekanan diatas 800 psia, namun *fitting* persamaan Langmuir untuk kedua sample ini secara umum dinilai valid, sehingga dapat disimpulkan bahwa pengujian adsorpsi gas Metana pada CNT komersial dan lokal merupakan adsorpsi fisik dengan lapisan monolayer.

Nilai adsorpsi maksimum (q_s) pada CNT komersial jauh lebih besar daripada CNT lokal ($q_{sCNT\ komersial} \gg q_{sCNT\ lokal}$), hal ini merepresentasikan jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada permukaan CNT komersial lebih banyak daripada CNT lokal karena luas permukaan spesifik CNT komersial yang lebih besar daripada CNT lokal yang memang belum mengalami proses purifikasi seperti dijelaskan pada subbab 4.5.

Nilai konstanta Langmuir, b , $b_{CNT\ komersial} < b_{CNT\ lokal}$, menunjukkan kemampuan adsorpsi yang dipengaruhi oleh interaksi molekul adsorbat dan adsorben pada CNT komersial kurang kuat dibandingkan interaksi adsorbat-adsorben pada CNT lokal.

Nilai q_s dipengaruhi oleh sifat fisik (*physical properties*) adsorben seperti luas permukaan spesifik, ukuran pori, dan distribusi pori, sedangkan konstanta b , dipengaruhi oleh sifat kimia material adsorben.

Berdasarkan nilai konstanta Langmuir tersebut, dapat disimpulkan bahwa adsorpsi gas Metana pada CNT sangat dipengaruhi oleh faktor luas permukaan kontak adsorben daripada faktor interaksi adsorbat-adsorben yang ditentukan oleh sifat kimia material adsorben. Oleh karena itu, secara material, CNT lokal cukup bagus sebagai adsorben, namun untuk meningkatkan daya adsorpsi terhadap gas Metana, luas permukaan CNT lokal harus ditingkatkan melalui proses purifikasi dari material impuritis terutama katalis.

4.8 Aplikasi CNT Sebagai Adsorben *Adsorptive Storage* Metana

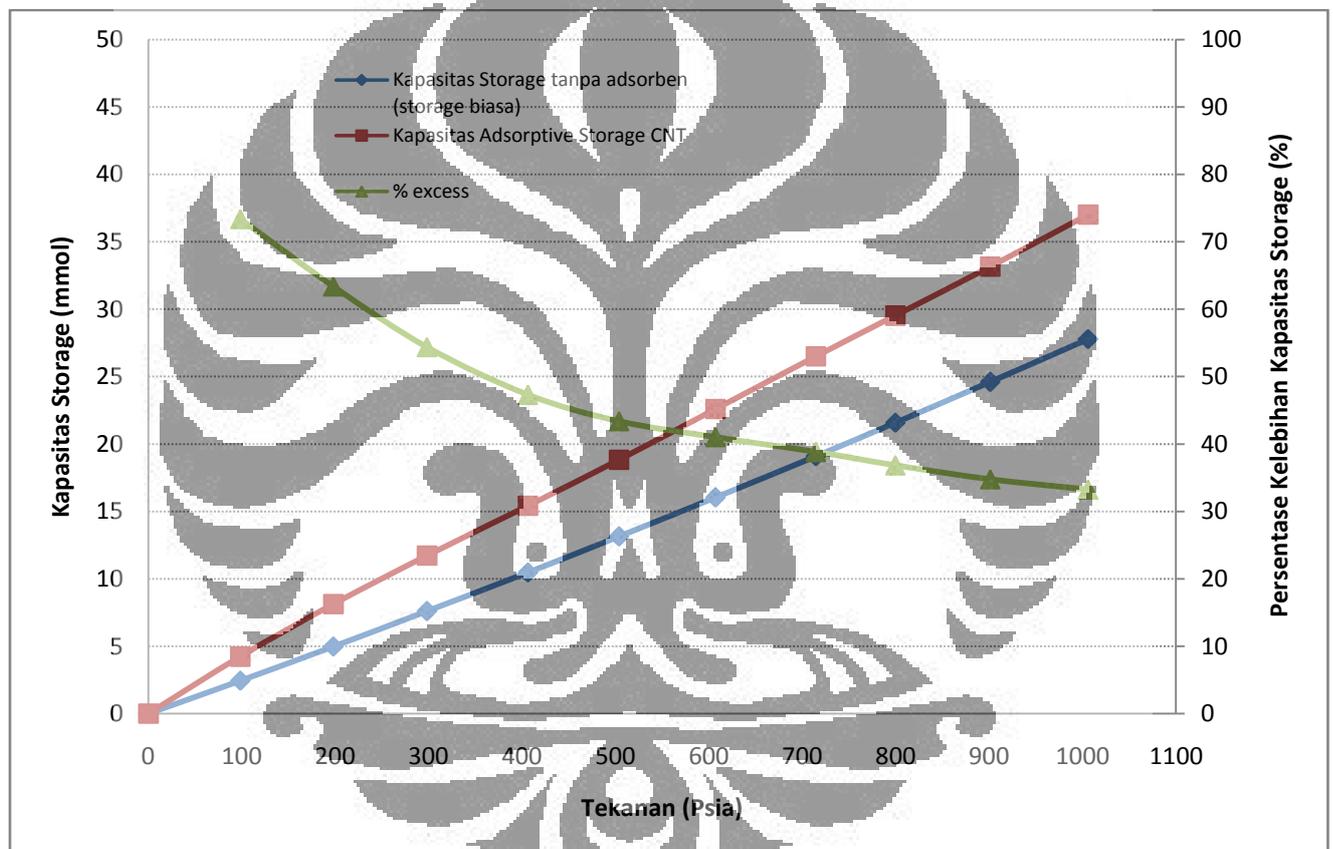
CNT merupakan susunan rantai karbon yang membentuk suatu tabung yang membentuk pori-pori berukuran nano. Pori-pori ini memiliki kemampuan mengadsorp molekul gas yang ada disekitarnya. CNT komersil yang bertipe MWCNT berdasarkan data adsorpsi dan desorpsinya, memiliki sifat adsorpsi fisik dengan lapisan monolayer dan desorpsi yang mudah dilakukan (*reversible*) tanpa memerlukan waktu yang terlalu lama dan tidak memerlukan pemanasan, oleh karena itu secara fisik, MWCNT cocok digunakan sebagai kandidat adsorben untuk *adsorptive storage*.

Dalam penelitian ini *sampling cylinder* dapat dianggap sebuah vessel dengan adsorben CNT didalamnya yang diisikan gas Metana, sehingga terbentuklah suatu prototipe *adsorptive storage* gas Metana dengan volume sebesar 8,85 mL. Berdasarkan data adsorpsi CNT komersil diperoleh kemampuan adsorpsi pada tekanan 1006 psia adalah 5,36 mmol/g atau 8,57% (setara dengan 251,95 v(STP)/v) dan untuk CNT lokal hanya 0,48 mmol/g pada tekanan 986,16 psia atau 0,76%wt. Keduanya dilakukan pada temperatur ambient sekitar 25°C.

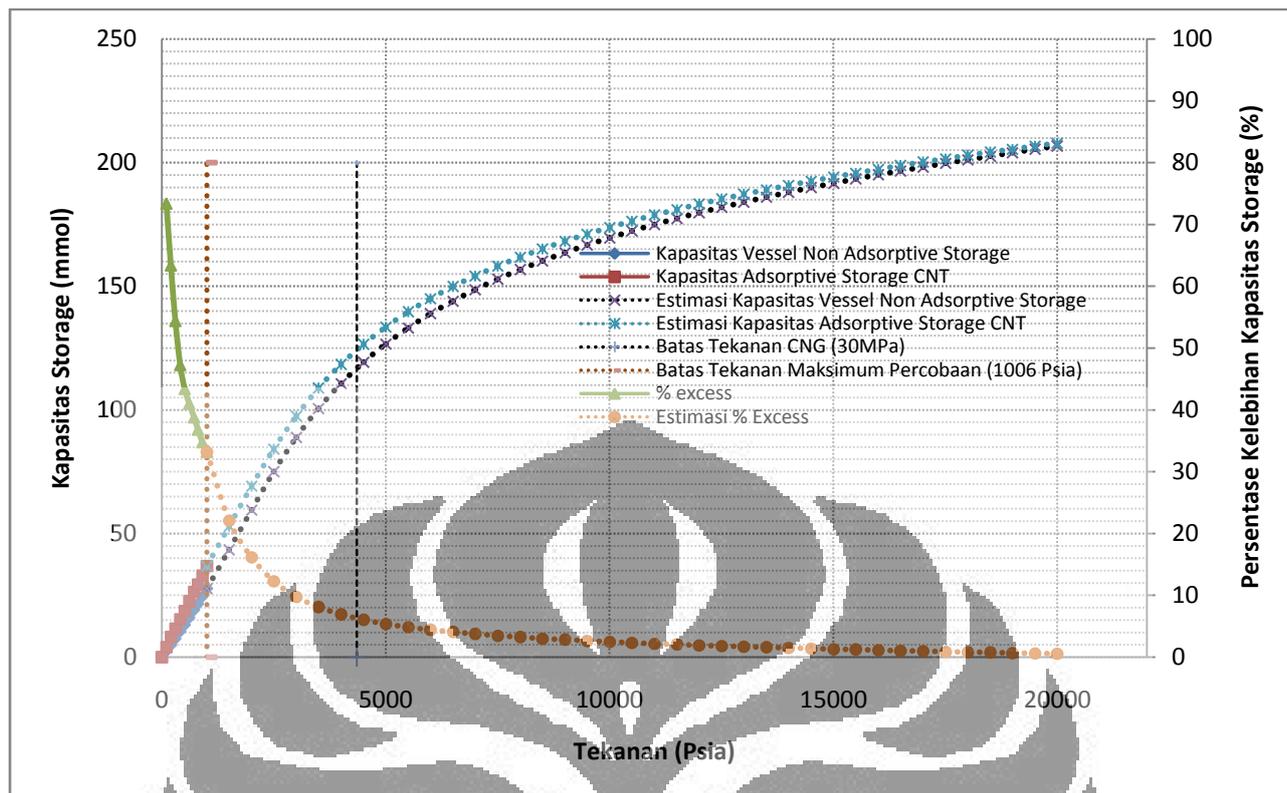
Pada perhitungan kapasitas total penyimpanan suatu *adsorptive storage* perlu diperlukan nilai *bulk* dan *true density* dari adsorben yang digunakan., sehingga yang bisa dilakukan simulasi perhitungan kapasitas hanya untuk CNT komersial yang telah memiliki data spesifikasi yang lengkap, sedangkan untuk

CNT lokal, perhitungan belum bisa dilakukan karena data spesifikasi adsorben yang belum lengkap.

Adsorptive storage diasumsikan diisi penuh oleh adsorben CNT komersial. Perhitungan n_{ads} pada range tekanan diatas tekanan percobaan disimulasikan dengan menggunakan persamaan Langmuir dan parameter Langmuir pada Tabel 4.7, sebagaimana dijelaskan pada subbab 4.7. Perhitungan detail tentang perbandingan kapasitas penyimpanan *adsorptive storage* CNT komersial dengan *storage* tanpa adsorben (*storage* biasa) dapat dilihat pada Lampiran 7.



Gambar 4. 14 Perbandingan Kapasitas Penyimpanan *Adsorptive Storage* dan *Storage* Kosong ($V=8,85$ mL) Pada Tekanan Percobaan



Gambar 4.15 Simulasi Perbandingan Kapasitas Penyimpanan *Adsorptive Storage* dan *Storage Kosong* ($V=8,85$ mL) Pada Tekanan Diatas Tekanan Percobaan

Gambar 4.14 menjelaskan perbandingan kapasitas total antara *adsorptive storage* dengan adsorben CNT komersial dan *storage* tanpa adsorben pada berbagai variasi tekanan dari 0 – 1006 psia dengan volume *storage* yang sama, yaitu 8,85 mL. Pada gambar tersebut, kapasitas *storage* tanpa adsorben CNT komersial memiliki yang cenderung linear terhadap tekanan. Kapasitas total dari *adsorptive storage* terlihat membentuk pola lengkungan dimana kurva berada diatas kurva kapasitas *storage* tanpa adsorben. Hal ini membuktikan bahwa pada tekanan, suhu, dan ukuran vessel/*storage* yang sama, *adsorptive storage* CNT (yang terisi penuh oleh adsorben) dapat menyimpan lebih banyak gas metana dari pada *storage* biasa yang tidak diisi adsorben CNT.

Menurut Lampiran 7, kelebihan kapasitas dari *adsorptive storage* dinyatakan dengan kurva berwarna hijau yang menunjukkan persentase kelebihan kapasitas dari *storage*. Persentase kelebihan kapasitas *adsorptive storage* CNT komersial pada tekanan 1006 psia mencapai 33,2% dibanding *storage* biasa (tanpa adsorben). Namun, dari kurva tersebut terbentuk pola dimana semakin tinggi

tekanannya, persentase *excess* tersebut akan semakin berkurang, atau dengan kata lain pada tekanan tinggi tertentu adsorptive storage akan tidak ekonomis lagi dibanding *storage* tanpa adsorben.

Gambar 4.15 menggambarkan simulasi kapasitas dari *adsorptive storage* CNT komersial dan *storage* tanpa adsorben CNT pada tekanan yang lebih tinggi dari 1006 psia. Estimasi kapasitas adsorpsi pada tekanan tinggi tersebut menggunakan persamaan Langmuir dengan parameter persamaan untuk CNT komersial yang telah dijelaskan pada Subbab. 4.7. Dalam kurva tersebut terlihat kurva kapasitas total adsorptive storage CNT komersial akan selalu di atas kurva kapasitas untuk *storage* tanpa adsorben sampai tekanan di atas 20.000 psia. Namun tekanan tersebut sangat tinggi sekali dan tidak ada vessel yang mampu menahan tekanan tersebut, serta tidak ada kompresor yang mampu mengakomodasi tekanan tersebut, jadi secara *real-nya*, bilamana tekanan CNG (± 30 MPa atau 4351,13 psi) yang menjadi acuan tekanan maksimal *storage* tanpa adsorben, maka *adsorptive storage* dengan CNT betipe MWCNT masih ekonomis untuk digunakan untuk menambah kapasitas *storage* gas Metana, yaitu sekitar 6% dari kapasitas *compressed storage*. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa *adsorptive storage* CNT dapat menyimpan gas Metana lebih banyak daripada *storage* biasa.

Untuk kapasitas adsorben pada *adsorptive storage* gas Metana U.S Department of Energy (DOE), menargetkan daya adsorpsi minimal setara 180 v(STP)/v (volume Metana pada Tekanan dan temperatur standard per volume adsorben) pada tekanan vessel dibawah 35 bar (507,6 psia). Berdasarkan Kurva adsorpsi absolute CNT komersial pada Gambar 4.11, untuk adsorben komersial pada tekanan 507,6 psia, adsorpsi mencapai 3,243 mmol/g, nilai ini setara dengan 152,563 v(STP)/v. Sehingga kelayakan CNT komersial bertipe MWCNT sebagai adsorben pada adsorptive storage untuk gas Metana masih belum memenuhi target untuk digunakan sebagai penyimpan gas Metana yang memuaskan.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa, CNT komersial yang bertipe MWCNT pada percobaan ini dapat digunakan sebagai adsorben pada *adsorptive storage* gas Metana, namun belum memenuhi standard target dalam hal kapasitas adsorpsinya.

Dalam penelitian ini didapatkan suatu keuntungan dari penggunaan *adsorptive storage* sebagai penyimpan gas Metana. Berdasarkan Gambar 4.15 *adsorptive storage* dapat mereduksi tekanan sampai dengan 13% untuk kapasitas yang sama pada tekanan sekitar 30 MPa (4351,13 psia) dimana tekanan ini digunakan untuk proses CNG, sehingga dengan adanya adsorben dapat mengurangi ketebalan vessel yang digunakan dan harga fabrikasi vessel dapat lebih ekonomis.

Adsorben CNT diharapkan dapat dikembangkan sebagai adsorben *adsorptive storage* sehingga mencapai target reduksi tekanan mencapai 30% sebagaimana target reduksi tekanan pada *Adsorbed Natural Gas (ANG)* yang mencapai 33,3% atau bahkan sampai tekanan ANG mencapai 1/6 dari tekanan CNG (Nour, *et.al*, 2000).



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil penelitian adsorpsi tekanan tinggi gas Metana dengan menggunakan *Carbon Nanotube* komersial dan lokal sebagai adsorben pada *adsorptive storage*, secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa :

1. Jumlah gas Metana yang teradsorpsi pada permukaan adsorben CNT bertambah seiring dengan penambahan tekanan operasi.
2. Kapasitas adsorpsi CNT lokal produksi DTK-UI jauh lebih rendah daripada CNT komersial bertipe MWCNT produksi *Chinese Academic of Science*, dengan daya adsorpsi rata-rata CNT lokal hanya 13,38% dari daya adsorpsi CNT komersial.
3. Kapasitas adsorpsi maksimum pada penelitian ini untuk CNT komersial mencapai 5,36 mmol/g pada atau 8,57%wt yang setara dengan 251,95 v(STP)/v pada tekanan 1006 psia, sedangkan untuk CNT lokal hanya mencapai 0,48 mmol/g atau 0,76%wt pada tekanan 986 psia
4. Kemampuan adsorpsi gas Metana pada CNT sangat dipengaruhi oleh luas permukaan dan kemurnian adsorben CNT.
5. Kurva adsorpsi isothermal gas Metana pada CNT komersial dan lokal berhimpitan dengan kurva desorpsinya, sehingga adsorpsi yang terjadi merupakan adsorpsi fisik (*physisorption*) yang reversibel tanpa perlu dilakukan pemanasan.
6. Data adsorpsi isothermal gas Metana pada CNT komersial dan lokal dapat direpresentasikan dengan sangat baik oleh permodelan adsorpsi isothermis Langmuir dengan %AAD masing-masing 2,99% dan 2,08%, sehingga adsorpsi gas Metana pada CNT mengikuti kurva adsorpsi isothermis tipe I pada klasifikasi Brunauer.
7. Karakteristik adsorpsi gas Metana pada adsorben CNT komersial dan lokal adalah adsorpsi fisik monolayer, reversibel, desorpsi relatif cepat tanpa pemanasan.

8. *Adsorptive storage* gas Metana dengan adsorben CNT komersial memiliki % *excess capacity* sebesar 33,2% pada tekanan maksimal penelitian dibanding dengan *compressed storage* konvensional, sedangkan untuk tekanan sebesar tekanan maksimal CNG (30 MPa), *adsorptive storage* gas Metana memiliki % *excess capacity* sebesar 6%.
9. Pada range tekanan rendah sampai tinggi yang masih bisa dicapai kompresor, *adsorptive storage* Metana ini akan selalu memiliki % *excess capacity*, karena batas % *excess capacity* sesuai perhitungan berada di tekanan sekitar 21.000 psia.
10. CNT komersial berjenis MWCNT dapat dijadikan adsorben pada *adsorptive storage* gas Metana, namun daya adsorpsinya belum mencapai target U.S DOE untuk *Methane adsorptive storage* yang ditargetkan sebesar 180v(STP)/v pada tekanan dibawah 3,5 MPa.

5.2 Saran

Dalam pengujian adsorpsi tekanan tinggi ini diperlukan suatu keakuratan data tekanan dan temperatur. Oleh karena tekanan di sampling dan dozing sangat sensitif sekali terhadap fluktuasi temperatur lingkungan, pada saat pengambilan data, alat uji harus terisolasi dengan baik dari pengaruh suhu ruangan laboratorium, serta pengambilan data harus memperhatikan waktu tercapainya kesetimbangan temperatur dan kesetimbangan adsorpsi-desorpsi pada permukaan adsorben. Selain itu, tidak diizinkan untuk mengambil data jika alat uji masih mengalami penurunan tekanan (kebocoran), karena data adsorpsi akan sangat tidak valid untuk dianalisis.

Untuk meningkatkan kualitas dan daya adsorpsi gas Metana pada CNT lokal diperlukan peningkatan luas permukaan kontak spesifik dari adsorbat tersebut, misalnya dengan cara purifikasi, karena secara sifat kimia material, CNT lokal sudah cukup bagus untuk adsorpsi gas metana terutama untuk dijadikan adsorben pada *adsorptive storage*. Hal ini terlihat pada hasil konstanta Langmuir pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Bekyarova, E., Murata, K., Yudasaka, M., Kasuya, D., Iijima, S., Tanaka, H., Kahoh, H. and Kaneko, K. (2003). *J. phys. Chem. B*, **107**, 4681.
- Cao, D., Zhang, X., Chen, J., Wang, W. and Yun. (2003). *J. Phys. Chem*, **107**, 13286.
- Dell, R. M. dan Rand, D. A. J. (2004). *Clean Energy*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- Duren, T., Sarkisov, L., Yaghi, O. M., Snurr, R. Q. (2003). Design of New Material for Methane Storage. *Langmuir Journal*. **20**, 2683-2689.
- Hasan, F. (2009). *Kapasitas Gas Hidrogen Menggunakan Nanotube Karbon Sebagai Adsorben*. Skripsi. Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok.
- Kowalczyk, P., Solarz, L., Do, D. D., Samborski, A., MacElroy, J. M. D. (2006). Nanoscale Tubular Vessel for Storage of Methane at Ambient Temperatures. *Langmuir Journal*. **22**, 9035-9040.
- Lee, J.W., Kang, H.C., Shim, W.G., Kim, C. and Moon, H. (2006)., *Chem. Eng. Data*, Vol.51, 963
- Ma, Shengqian., Sun, Daofeng., Simmons, Jason., Collier, Christopher., Yuan, Daqiang., Zhou, Hong-Cai. (2007). Metal-Organic Framework from an Anthracene Derivative Containing Nanoscopic Cage Exhibiting High Methane Uptake. *JACS Articles*. J. AM. CHEM. SOC. 9 VOL. 130, NO. 3, 2008
- Maron, S. H, dan Lando, J. (1974). *Fundamental of Physical Chemistry*. New York : MacMilan Publishing Co, Inc
- Mc. Cabe, W. L., Smith, J. C., dan Harriot, P.(1999). *Operasi Teknik Kimia*. Jakarta : Penerbit Erlangga
- Nour, Usama. M., Tayeb, Aghreed. M., Farag, Hasan A., Awad, Sherine. (2000). Enhanced Discharge of ANG Storage for Vehicle Use. *International Journal of Engineering & Technology IJET*. Vol: 9 No: 9
- Pabhassaro, Doni. (2007). *Pemodelan Adsorpsi Tekanan Tinggi Terhadap Gas Metana untuk Prediksi Potensi "Coalbed Methane" Indonesia Sebagai*

- Energi Baru*. Skripsi. Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok.
- Ramadhania. (2007). *Pengembangan Model Adsorpsi CO₂ Untuk Memprediksi Potensi Coalbed Indonesia Sebagai Media Penyimpanan Gas Rumah Kaca*. Skripsi. Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok.
- Rasoolzadeh, M., Fatemi, S., Gholamhosseini, M., Moosaviyan, M.A. (2008). Study of Methane Storage and Adsorption Equilibria in Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Iran Journal of Chemical Engineering*, Vol. 27, No. 3.
- Rawat, D. S., Taylor, N., Talapatra, S., Dhali, S. K., Ajayan, P. M., dan Migone, A. D., (2006). Effect of Surface Cleaning and Functionalization of Nanotubes on Gas Adsorption. *The American Physical Society*. Vol. 74, 113403.
- Ruthven, Douglas. M. (1984). *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. Canada : Wiley-Interscience Publication.
- Salvidge, Jeffrey. (2000) Compressibility of Natural Gas. **ISHM Lawrence Reid Award Recipient, 2000**
- Siregar, Riyandi. C. (2010). *Evaluasi dan Perbaikan Desain Reaktor Katalis Reaktor Terstruktur Gauze Skala Pilot untuk Produksi Hidrogen & Nanokarbon Melalui Reaksi Dekomposisi Katalitik Metana*. Skripsi. Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok.
- Sudibandriyo, M. (2009). Pembuatan Hydrogen Adsorptive Storage dengan Nanotube Carbon Sebagai Adsorben. Unpublish Research Report. Universitas Indonesia, Indonesia.
- Sun, Yan., Liu, Congmin., Su, Wei., Zhou, Yaping., Zhou, Li. (2009) Principles of Methane Adsorption and Natural Gas Storage. *Springer Science* (adsorption). DOI 10.1007/s10450-009-9157-x
- Suyetin, M. V., Vakhrushev, A. V. (2009). Temperature-sensitive Nanocapsules for Methane Storage. *Micro & Nano Letters*. Vol. 4, Iss. 3, pp. 172-176.
- Suzuki. M. (1990). *Adsorption Engineering*. Tokyo : Kodansha, Ltd.
- Yulong, W., Fei, W., Guohua, L., Guoqing, N. and Mingde, Y. (2008)., *Mat. Res. Bulltein*, 43, 1431

LAMPIRAN

**Lampiran 1. Tabulasi Pengujian He Volume Void Pada Sampel CNT
Komersial**

Volume Dozing	23	Calibrated	Helium Water, grams	0	
TempPmp	80	Calibrated	R	669.9542893	
	80	Readout @equilibrium	PumpDead Pressure	52.92	
Ini Press	99.22	98.54	200.33	250.63	300.08
Fin Press	203.16	200.33	250.63	300.08	353.56
Cal Ini Pre	99.22	98.54	200.33	250.63	300.08
Cal Fin Pre	203.16	200.33	250.63	300.08	353.56
P Dozing ini	729.92	712.95	712.95	712.95	712.95
Cal P Dozing ini	729.92	712.95	712.95	712.95	712.95
P Dozing fin	602.91	589.2	556.1	523.59	490.67
Cal P Dozing fin	602.91	589.2	556.1	523.59	490.67
Helium Sol	0	0	0	0	0
V (mL)	23	23	23	23	23
T dozing	80.366	79.106	79.106	79.106	79.106
T sampling ini	80.366	79.106	79.106	79.106	79.106
T sampling fin	80.258	79.682	79.592	79.592	79.772
Z dozing ini	1.0238438	1.02335165	1.02335165	1.02335165	1.02335165
Z dozing fin	1.0196949	1.019298397	1.018214255	1.017149436	1.016071189
Z sampling init	1.0032412	1.003227536	1.006561521	1.008209025	1.009828688
Z sampling final	1.006638	1.006553529	1.008200587	1.009818586	1.011564042
Vvoid	13.861494	13.72466474	13.93971069	14.09302781	14.08464697
Average	13.940709				
Std. Dev	0.1556199				
99% Confidence	0.2004252				

- Satuan tekanan menggunakan Psia
- Satuan temperatur menggunakan °F
- Satuan volume menggunakan mL

Lampiran 2. Tabulasi Pengujian He Volume Void Pada Sampel CNT Lokal

Volume Dozing	23	Calibrated	Helium Water, grams	0	
TempPmp	77.6	Calibrated	R	669.9542893	
	77.6	Readout @equilibrium	PumpDead	52.92	
			Pressure		
Ini Press	0	104.22	205.6	253.76	304.44
Fin Press	104.22	205.6	253.76	304.44	405.74
Cal Ini Pre	0	104.22	205.6	253.76	304.44
Cal Fin Pre	104.22	205.6	253.76	304.44	405.74
P Dozing ini	714.55	714.55	714.55	714.55	714.55
Cal P Dozing ini	714.55	714.55	714.55	714.55	714.55
P Dozing fin	645.34	578.73	547.67	514.85	448.48
Cal P Dozing fin	645.34	578.73	547.67	514.85	448.48
Helium Sol	0	0	0	0	0
V (mL)	23	23	23	23	23
T dozing	77.756	77.756	77.756	77.756	77.756
T sampling ini	77.756	77.864	77.918	77.972	77.936
T sampling fin	77.864	77.918	77.972	77.936	77.612
Z dozing ini	1.0234711	1.023471059	1.023471059	1.023471059	1.023471059
Z dozing fin	1.0211977	1.019009735	1.017989497	1.016911448	1.01473137
Z sampling init	1	1.003422565	1.006751093	1.008331525	1.009996228
Z sampling final	1.0034226	1.006751093	1.008331525	1.009996228	1.013331543
Vvoid	14.666664	14.67126477	14.64427776	14.64571809	14.71243126
Average	14.668071				
Std. Dev	0.0275943				
99% Confidence	0.0355391				

- Satuan tekanan menggunakan Psia
- Satuan temperatur menggunakan °F
- Satuan volume menggunakan mL

Lampiran 3. Tabulasi Hasil Uji Adsorpsi Pada Sampel CNT Komersial

Oct, 2010,MNR

	Uncalibrated*	Calibrated	CH4 Adsorption on Commercial CNT								
			MW	16	Ads.phase dens g/cm3						
					0.354						
			R, gas constant (psi cm3)/(mol °R)								
	669.9542893										
Final Sampling Press*	0	98.31	198.11	298.27	406.2	503.79	606.91	714.51	799.49	901.1	1006
Calibrated	-1.519767486	97.0112723	197.0147243	297.3577006	405.4610871	503.1866227	606.4279201	714.1304761	799.1741414	900.8401876	1005.775107
Initial P dozing	851.4	851.4	778.59	708.02	639.25	833.34	768.62	1047	975.94	1014.81	1108.36
Final P dozing	851.4	778.59	708.02	639.25	565.84	768.62	699.4	975.94	919.65	947.4	1038.26
Cal Final P dozing	852.2501795	779.4091151	708.7979269	639.9772965	566.501821	700.1721484	976.8164016	920.5187564	948.2733926	1039.136772	
Sampling Temp*	79.628	78.944	78.638	77.954	78.098	78.314	78.188	78.35	78.35	78.458	78.458
Calibrated	79.628	78.944	78.638	77.954	78.098	78.314	78.188	78.35	78.35	78.458	78.458
densitycell, (g/cm3)	0	0.00440861	0.008994055	0.013723533	0.018928521	0.023742956	0.028968234	0.034528919	0.039020375	0.044478339	0.050232111
Z dozing awal	0.905031854	0.905031854	0.912087206	0.919424282	0.926553127	0.905944896	0.912723985	0.884904751	0.891614149	0.888008497	0.879391216
Z dozing final	0.905031854	0.912087206	0.919424282	0.926553127	0.934824582	0.912723985	0.923363369	0.891614149	0.897166839	0.894497923	0.88574122
Zcell	1	0.9887653	0.977225654	0.965472302	0.953022351	0.941933431	0.930270925	0.918547703	0.909490124	0.899111703	0.888803523
ninj (mol)	0	0.005551976	0.010881454	0.015999296	0.021402179	0.026363093	0.031767348	0.037420956	0.041856754	0.047193428	0.052818913
nunads (mol)	-5.86362E-05	0.003841001	0.00783607	0.011956628	0.016491474	0.02068605	0.025238574	0.030083321	0.033996502	0.038751753	0.043764727
nsolub (mol)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nads (mol)	0	0.001710974	0.003045384	0.004042669	0.004910705	0.005677043	0.006528774	0.007337635	0.007860252	0.008441675	0.009054186
nadsgibbs (mmol/gr CNT)	0	0.868514949	1.54588032	2.052116043	2.492743701	2.881747806	3.314098653	3.724687861	3.989975808	4.285114396	4.596033498
nabsolute (mmol/gr CNT)	0	0.879467574	1.586180298	2.134878984	2.633561273	3.088923434	3.609465434	4.127257779	4.484262867	4.90088639	5.356049536

Universitas Indonesia

Lampiran 4. Tabulasi Hasil Uji Adsorpsi Pada Sampel CNT Lokal

Oct, 2010, MNR

	Uncalibrated*	Calibrated		MW	CH4	Adsorption on	Local CNT				
Vvoid	14.67				16						
V dozing	23				0.354						
Dozing Temp	75.65	86		Ads.phase dens							
Mass NTC	1.98			g/cm3							
%moisture sample, mol H2O	0	0									
R, gas constant	669.9542893	(psi cm3)/(mol °R)									
Final Sampling Press*	0.0000	101.5700	202.0300	302.5100	413.9500	502.7500	601.5900	706.8600	801.6800	904.3600	986.1600
Calibrated	-1.519767486	100.2782514	200.942285	301.6049776	413.2225878	502.1452846	601.1022133	706.4739944	801.3655799	904.1016237	985.9302901
Initial P dozing	848.43	848.43	789.5	731.15	672.51	841.9	791.86	1061	995.5	1092.38	1059.14
Final P dozing	848.43	789.5	731.15	672.51	605.44	791.86	732.89	995.5	937.37	1029.98	1008.34
Cal Final P dozing	849.2791395	790.3245094	731.9426283	673.2630767	606.1386069		733.6836868	996.3774337	938.2419115	1030.857213	1009.217656
Sampling Temp*	75.65	75.542	75.632	75.83	76.1	76.262	76.604	76.46	76.784	77.108	77.774
Calibrated	75.65	75.542	75.632	75.83	76.1	76.262	76.604	76.46	76.784	77.108	77.774
densitycell, (g/cm3)	0	0.00458677	0.009232488	0.013988662	0.019393911	0.023606535	0.0285209	0.034291506	0.039298086	0.044819917	0.049262194
Z dozing awal	0.902422342	0.902422342	0.908628008	0.915041997	0.920672815	0.903520092	0.908869451	0.881805016	0.88810804	0.879118389	0.88242318
Z dozing final	0.902422342	0.908628008	0.915041997	0.920672815	0.929354487	0.908869451	0.91546715	0.88810804	0.894144338	0.885336392	0.887401993
Zcell	1	0.988114853	0.976276997	0.964448193	0.951434534	0.949040969	0.939345713	0.918230146	0.908180088	0.897739636	0.889559949
ninj (mol)	0	0.004572007	0.009052238	0.013448839	0.018510434	0.022388613	0.026914255	0.032183743	0.036828489	0.041894442	0.045981332
nunads (mol)	-6.21654E-05	0.004205495	0.008465037	0.012825854	0.017781792	0.021644242	0.0261501	0.031441025	0.036031432	0.041094261	0.045167274
nsolub (mol)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nads (mol)	0	0.000366512	0.0005872	0.000622985	0.000728642	0.000744371	0.000764155	0.000742718	0.000797056	0.000800181	0.000814058
nadsgibbs (mmol/gr CNT)	0	0.185107118	0.296565821	0.314638714	0.368000895	0.37594501	0.385937077	0.375110129	0.402553639	0.404131647	0.411140291
nabsolute (mmol/gr CNT)	0	0.187537031	0.304507522	0.327593501	0.389330383	0.402806192	0.419755754	0.415343941	0.452822121	0.462716103	0.477602911

Universitas Indonesia

Lampiran 5. Tabulasi Hasil Uji Desorpsi Pada Sampel CNT Komersial

Desorption	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Final P Sampling	1006	899.47	798.14	692.94	597.94	501.53	401.44	297.05	196.81	119.42
	1005.775107	899.2094611	797.8232496	692.5418524	597.4482633	500.9237121	400.6939604	296.1355996	195.7122097	118.1660662
Final P dozing	1108.36	578	649.43	369.82	437.62	252.83	325.93	179.6	170.07	105.56
Initial P dozing	1038.26	501.95	578	291.73	369.82	180.88	252.83	100.73	93.23	14.7
	1039.136772	502.545231	578.6734322	292.0430297	370.2491567	181.0052519	253.0801986	100.7027164	93.1877231	14.49333581
Temp Sampling	78.458	77.99	77.63	77.648	77.558	77.954	78.152	77.846	78.224	77.828
Calibrated	78.458	77.99	77.63	77.648	77.558	77.954	78.152	77.846	78.224	77.828
densitycell, (g/cm3)	0.050232111	0.0444446169	0.039021687	0.033460209	0.028552646	0.023649639	0.018693744	0.013668485	0.008941147	0.005380156
Z dozing Final	0.879391216	0.933404839	0.925250236	0.957081959	0.949209797	0.970753755	0.96231463	0.979251313	0.980409432	0.987839715
Z dozing Awal	0.88574122	0.941829599	0.933404839	0.966211495	0.957081959	0.979086172	0.970753755	0.988410157	0.989284975	0.998319126
Zcell	0.888803523	0.898916673	0.909140498	0.920471616	0.93095226	0.94203831	0.95358759	0.965589607	0.977309333	0.986234347
ninj (mol)	0.052818913	0.047193428	0.041683874	0.036402432	0.031005296	0.02623603	0.021401888	0.016407179	0.011202207	0.006145501
nunads (mol)	0.043764727	0.038723724	0.033997645	0.029152207	0.024876493	0.020604748	0.016286925	0.011908668	0.007789974	0.004687461
nsolub (mol)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nads (mol)	0.009054186	0.008469704	0.007686229	0.007250225	0.006128803	0.005631282	0.005114963	0.004498512	0.003412233	0.001458039
nadsgibbs (mmol/gr CNT)	4.596033498	4.299341978	3.901638994	3.680317302	3.11106764	2.858518749	2.596427886	2.28350842	1.732097844	0.740121455
nabsolute (mmol/gr CNT)	5.356049536	4.916647465	4.385000959	4.064494837	3.384012598	3.063158866	2.741181998	2.375219295	1.776979872	0.75154355

Lampiran 6. Tabulasi Hasil Uji Desorpsi Pada Sampel CNT Lokal

Desorption	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Final P Sampling	986.1600	904.6000	805.2100	697.3400	606.5400	503.6600	400.6000	300.0000	168.0900
	985.9302901	904.3417285	804.8978773	696.9457553	606.0575252	503.0564556	399.8526977	299.0906743	166.935744
Final P dozing	1059.14	562.65	630.77	688.84	370.08	441.56	250.64	176.94	151.53
Initial P dozing	1008.34	491.28	562.65	630.77	300.4	370.08	193.07	88.09	61.33
	1009.217656	491.863239	563.3087082	631.4903359	300.7265819	370.5095211	193.2172185	88.03737657	61.22257546
Temp Sampling	77.774	77.234	76.82	77.27	77.432	77.504	78.152	77.306	77.306
Calibrated	77.774	77.234	76.82	77.27	77.432	77.504	78.152	77.306	77.306
densitycell, (g/cm3)	0.049262194	0.044817689	0.03948357	0.033722272	0.029002191	0.023780927	0.018319176	0.013824931	0.007624429
Z dozing Final	0.88242318	0.941452177	0.926884248	0.920697418	0.956984639	0.948734147	0.95368438	0.979483219	0.982446155
Z dozing Awal	0.887401993	0.942908593	0.941452177	0.926884248	0.965092234	0.956984639	0.978748656	0.98979877	0.992925516
Zcell	0.889559949	0.897811779	0.907832922	0.919764835	0.929922344	0.941604462	0.971049265	0.965113119	0.980515551
ninj (mol)	0.045981332	0.041894442	0.036995564	0.031691534	0.027366488	0.022543904	0.017513849	0.013329592	0.007470199
nunads (mol)	0.045167274	0.041092218	0.036201498	0.030919108	0.026591384	0.021804137	0.016796394	0.012675734	0.006990648
nsolub (mol)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nads (mol)	0.000814058	0.000802224	0.000794066	0.000772426	0.000775105	0.000739766	0.000717455	0.000653859	0.000479551
nadsgibbs (mmol/gr CNT)	0.411140291	0.405163506	0.401043279	0.390114158	0.391467	0.37361925	0.362350827	0.330231584	0.242197265
nabsolute (mmol/gr CNT)	0.477602911	0.4638942	0.451389203	0.431189558	0.426400776	0.400525667	0.38212547	0.343652406	0.247528518

Lampiran 7. Representasi Permodelan Langmuir

$$\theta = \frac{q}{q_s} = \frac{bp}{1+bp}$$

$$q = q_s \frac{bp}{1+bp}$$

q : Jumlah mol teradsorpsi (adsorpsi absolut)

q_s : Jumlah mol maksimal yang dapat teradsorpsi (n maks)

b : Konstanta Langmuir

P : tekanan sampling

CNT Komersial

n Absolute Ads	n Langmuir Model	P sampling	Relative Error
0	0	0	0
0.879467574	0.794948053	98.31	0.096103055
1.586180298	1.504523921	198.11	0.051479883
2.134878984	2.134878985	298.27	1.78778E-10
2.633561273	2.73769637	406.2	0.039541551
3.088923434	3.225219143	503.79	0.044124017
3.609465434	3.689927733	606.91	0.022292027
4.127257779	4.127465473	714.51	5.03225E-05
4.484262867	4.443346509	799.49	0.009124433
4.90088639	4.790978186	901.1	0.022426189
5.356049536	5.119602342	1006	0.044145819
		AAD (%)	2.993520876

Langmuir Constant	
b	0.00069
n maks	12.4629

CNT Lokal

n Absolute Ads	n Langmuir Model	P sampling	Relative Error
0	0	0	0
0.187537031	0.187537345	101.57	1.67265E-06
0.304507522	0.2807626	202.03	0.07797811
0.327583501	0.337025288	302.51	0.028822536
0.389330383	0.378030337	413.95	0.029024313
0.402806192	0.401449151	502.75	0.003368968
0.419755754	0.421445307	601.59	0.004025085
0.415343941	0.437970692	706.86	0.054477143
0.452822121	0.449894527	801.68	0.006465218
0.462716103	0.460506213	904.36	0.004775909
0.477602911	0.467649786	986.16	0.02083975
AAD (%)			2.088897318

Langmuir Constant	
b	0.0049
n maks	0.56445

Lampiran 8. Fitting Parameter Permodelan Langmuir**CNT Komersial**

n Absolute Ads (mmol)	n Langmuir Model (mmol)	P sampling (psia)	Relative Error
0	0	0	0
0.879467574	0.794948053	98.31	0.096103055
1.586180298	1.504523921	198.11	0.051479883
2.134878984	2.134878985	298.27	1.78778E-10
2.633561273	2.73769637	406.2	0.039541551
3.088923434	3.225219143	503.79	0.044124017
3.609465434	3.689927733	606.91	0.022292027
4.127257779	4.127465473	714.51	5.03225E-05
4.484262867	4.443346509	799.49	0.009124433
4.90088639	4.790978186	901.1	0.022426189
5.356049536	5.119602342	1006	0.044145819
AAD (%)			2.993520876

CNT Lokal

n Absolute Ads	n Langmuir Model	P sampling	Relative Error
0	0	0	0
0.187537031	0.187537345	101.57	1.67265E-06
0.304507522	0.2807626	202.03	0.07797811
0.327583501	0.337025288	302.51	0.028822536
0.389330383	0.378030337	413.95	0.029024313
0.402806192	0.401449151	502.75	0.003368968
0.419755754	0.421445307	601.59	0.004025085
0.415343941	0.437970692	706.86	0.054477143
0.452822121	0.449894527	801.68	0.006465218
0.462716103	0.460506213	904.36	0.004775909
0.477602911	0.467649786	986.16	0.02083975
		AAD (%)	2,088897318

**Lampiran 9: Perhitungan Komparasi Kapasitas Methane Adsorptive Storage
CNT Dengan Storage Biasa**

Dimensi *Sampling Cylinder* :

ID = 0,63 cm (1/4")

OD = 0,955 cm

Panjang (*l*) = 28,415 cm,

Volume *Sampling Cylinder* :

$$V_{\text{sampling cylinder}} = \frac{1}{4} \pi (ID)^2 l$$

$$V_{\text{sampling cylinder}} = \frac{1}{4} \pi (0,63)^2 (28,415)$$

$$V_{\text{sampling cylinder}} = 8,853 \text{ mL}$$

Perbandingan pada tekanan 1006 Psia dan Temperatur 78,458°F.

Vessel Biasa

$$n_{CH_4} = \frac{PV}{zRT}$$

$$n_{CH_4} = \frac{(1006 \text{ Psia})(8,853 \text{ mL})}{(0,8888)(669,954 \text{ Psia.cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{R}^{-1})(538,458 \text{ R})}$$

$$n_{CH_4} = 0,02777 \text{ mol} = 27,78 \text{ mmol}$$

Adsorptive Storage CNT

Berdasarkan data spesifikasi MWCNT komersial diperoleh data berupa :

$$\rho_{bulk} = 0,27 \text{ g/mL}$$

$$\rho_{true} = 2,1 \text{ g/mL}$$

Keterangan : Bulk density adalah densitas dimana CNT masih memiliki rongga sehingga volume spesifik CNT relatif besar, sedangkan true density adalah densitas dimana CNT termampatkan/dipadatkan sampai berbentuk pejal, sehingga volume spesifiknya relatif kecil.

Jumlah CH₄ yang teradsorpsi pada CNT :

$$\text{Jumlah CNT yang dapat dimasukkan} = V_{\text{sampling cylinder}} \times \rho_{bulk}$$

$$\text{Jumlah CNT yang dapat dimasukkan (full)} = 8,853 \text{ mL} \times 0,27 \text{ g/mL} = 2,39 \text{ gram}$$

$$q(P = 1006 \text{ psia}) = 5,336 \text{ mmol/g CNT}$$

$$n_{\text{teradsorpsi}} (P = 1006 \text{ psia}) = 5,356 \times 2,39 = 12,8 \text{ mmol}$$

Jumlah CH₄ yang tidak teradsorpsi pada CNT :

Ruang yang ditempati oleh CNT yang diisikan :

$$\frac{\text{Jumlah CNT yang dapat dimasukkan (full)}}{\text{True Density}} = \frac{2,39}{2,1} = 1,138 \text{ mL}$$

Volume Ruang Kosong pada *Sampling Cylinder* :

$$8,853 \text{ mL} - 1,138 \text{ mL} = 7,715 \text{ mL}$$

Maka jumlah gas Metana yang tidak teradsorpsi sekitar :

$$n_{CH_4} = \frac{PV}{zRT}$$
$$n_{CH_4} = \frac{(1006Psia)(7,715mL)}{(0,8888)(669,954Psia.cm^3.mol^{-1}.R^{-1})(538,458R)}$$
$$n_{CH_4} = 0,0242 \text{ mol} = 24,2 \text{ mmol}$$

Sehingga kapasitas total *Adsorptive Storage* CNT berukuran 8,853 mL pada kondisi P = 1006 psia, T = 78,458°F adalah :

$$n_{CH_4 \text{ total}} = n_{\text{adsorp}} + n_{\text{unadsorp}}$$
$$n_{CH_4 \text{ total}} = 12,8 \text{ mmol} + 24,2 \text{ mmol}$$
$$n_{CH_4 \text{ total}} = 37 \text{ mmol}$$

Perbandingan Kapasitas

$$\frac{\text{Kapasitas Adsorptive storage CNT}}{\text{Kapasitas vessel biasa}} = \frac{37 \text{ mmol}}{28 \text{ mmol}} = 1,332$$

$$\% \text{ excess} = \frac{\text{Kapasitas Adsorptive storage CNT} - \text{Kapasitas vessel biasa}}{\text{Kapasitas vessel biasa}}$$

$$\% \text{ excess} = \frac{(37 - 28)}{28} \times 100\% = 33,2\%$$

Jadi *adsorptive storage* CNT untuk gas metana dapat menyimpan 33,2% lebih banyak daripada vessel biasa atau storage tanpa adsorben CNT.

P Final Sampling (psia)	Zcell	T Sampling (degF)	N adsorpsi absolut (mmol/gr CNT)	n total vessel (non-adsorptive storage)	n ads total (mmol)	n unads (mmol)	n total Adsorptive storage (mmol)	Excess (mmol)	% excess (%)
0	1	79.628	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!
98.31	0.9887653	78.944	0.879467574	2.437846	2.1022	2.124409	4.226609	1.788763	73.37471
198.11	0.97722565	78.638	1.586180298	4.973476	3.791463	4.334029	8.125492	3.152016	63.37651
298.27	0.9654723	77.954	2.134878984	7.588747	5.103023	6.613051	11.71607	4.127326	54.38745
406.2	0.95302235	78.098	2.633561273	10.46697	6.295028	9.121216	15.41624	4.949275	47.2847
503.79	0.94193343	78.314	3.088923434	13.12923	7.383485	11.44118	18.82467	5.695441	43.37987
606.91	0.93027092	78.188	3.609465434	16.01866	8.627741	13.95912	22.58686	6.568199	41.00341
714.51	0.9185477	78.35	4.127257779	19.09358	9.865426	16.63869	26.50412	7.410537	38.81167
799.49	0.90949012	78.35	4.484262867	21.57724	10.71878	18.80302	29.5218	7.944562	36.81918
901.1	0.8991117	78.458	4.90088639	24.59535	11.71464	21.43309	33.14773	8.552379	34.77234
1006	0.88880352	78.458	5.356049536	27.77703	12.80262	24.2057	37.00832	9.231286	33.23352
1500	0.84840043	78.458	6.352239815	43.38944	15.18382	37.8108	52.99462	9.60518	22.13714
2000	0.82390519	78.458	7.239657777	59.57258	17.30503	51.91325	69.21827	9.645695	16.1915
2500	0.81788688	78.458	7.902011925	75.01367	18.88826	65.36906	84.25731	9.243643	12.32261
3000	0.82908839	78.458	8.415286649	88.80023	20.11514	77.38305	97.4982	8.697972	9.794989
3500	0.8534166	78.458	8.82472186	100.6469	21.09382	87.70662	108.8004	8.153499	8.10109
4000	0.8866538	78.458	9.158934196	110.7132	21.89269	96.47868	118.3714	7.658133	6.917089
4500	0.92568817	78.458	9.436909867	119.3003	22.55714	103.9617	126.5188	7.218533	6.050726
5000	0.96844493	78.458	9.671741455	126.7035	23.11846	110.4131	133.5315	6.828006	5.388963
5500	1.01357639	78.458	9.872750071	133.168	23.59893	116.0464	139.6453	6.477334	4.864032
6000	1.06021073	78.458	10.04675215	138.8842	24.01485	121.0276	145.0425	6.158318	4.43414
6500	1.10778132	78.458	10.19884778	143.9968	24.37841	125.483	149.8614	5.864528	4.072678
7000	1.15591636	78.458	10.33292892	148.6159	24.6989	129.5081	154.207	5.591145	3.762144
7500	1.20436903	78.458	10.45201714	152.8253	24.98356	133.1764	158.1599	5.334591	3.490646
8000	1.25297341	78.458	10.55849404	156.6902	25.23807	136.5443	161.7824	5.092194	3.249849
8500	1.3016167	78.458	10.65426217	160.2616	25.46699	139.6565	165.1235	4.861927	3.033744
9000	1.35022143	78.458	10.7408597	163.5804	25.67398	142.5486	168.2226	4.642224	2.837886
9500	1.39873398	78.458	10.8195437	166.6795	25.86206	145.2493	171.1113	4.431845	2.658903
10000	1.44711708	78.458	10.89135151	169.586	26.03371	147.7821	173.8158	4.229793	2.494188
10500	1.49534482	78.458	10.95714675	172.3223	26.19098	150.1666	176.3576	4.035248	2.341686
11000	1.54340	78.458	11.01765425	174.9073	26.33561	152.4193	178.7549	3.847523	2.199749
11500	1.59127	78.458	11.07348681	177.3569	26.46907	154.5539	181.0229	3.666036	2.067039
12000	1.63894	78.458	11.12516608	179.6846	26.5926	156.5823	183.1749	3.490289	1.942453
12500	1.68642	78.458	11.17313887	181.9021	26.70727	158.5147	185.222	3.319847	1.825073
13000	1.73370	78.458	11.21779013	184.0196	26.814	160.36	187.174	3.154327	1.714125
13500	1.78077	78.458	11.25945327	186.0459	26.91358	162.1257	189.0393	2.993395	1.608955
14000	1.82764	78.458	11.29841854	187.9887	27.00672	163.8187	190.8254	2.836749	1.509
14500	1.87430	78.458	11.33493977	189.8548	27.09402	165.4449	192.5389	2.684122	1.413776
15000	1.92077	78.458	11.36923991	191.6502	27.17601	167.0094	194.1854	2.535272	1.322865
15500	1.96704	78.458	11.40151561	193.3803	27.25316	168.5171	195.7702	2.389982	1.235898
16000	2.01311	78.458	11.43194095	195.0498	27.32588	169.972	197.2978	2.248053	1.152553
16500	2.05899	78.458	11.46067062	196.6631	27.39456	171.3778	198.7724	2.109305	1.072548

17000	2.10468	78.458	11.48784253	198.2239	27.4595	172.738	200.1975	1.973574	0.995628
17500	2.15018	78.458	11.51358003	199.7358	27.52103	174.0555	201.5765	1.840708	0.921571
18000	2.19550	78.458	11.53799379	201.2019	27.57938	175.3331	202.9124	1.71057	0.850176
18500	2.24064183	78.458	11.56118337	202.625	27.63481	176.5732	204.208	1.583032	0.781262
19000	2.28560	78.458	11.5832386	204.0077	27.68753	177.7781	205.4656	1.457976	0.714667
19500	2.33039	78.458	11.60424072	205.3523	27.73773	178.9499	206.6876	1.335292	0.650245
20000	2.37501	78.458	11.62426339	206.6611	27.78559	180.0904	207.876	1.214881	0.587861

*) untuk tekanan diatas 1006, n adsorpsi absolute didapat dengan menggunakan persamaan adsorpsi isothermis Langmuir



Sumber : Salvidge, Jeffrey L.(2000). *Compressibility of Natural Gas*. ISHM Lawrence Reid Award Recipient. Gambar 1.

Lampiran 11. Hasil Analisa BET Surface Area

