



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH LAJU ALIRAN MASSA GAS METAN
TERHADAP PROSES ADSORPSI-DESORPSI PADA SISTEM
ANG BERTEKANAN 40 MPa**

SKRIPSI

IQBAL ANZIFA

0606073266

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JANUARI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH LAJU ALIRAN MASSA GAS METAN
TERHADAP PROSES ADSORPSI-DESORPSI PADA SISTEM
ANG BERTEKANAN 40 MPa**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

IQBAL ANZIFA

0606073266


**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JANUARI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tugas akhir dengan judul:

**PENGARUH LAJU ALIRAN MASSA GAS METAN
TERHADAP PROSES ADSORPSI-DESORPSI PADA SISTEM
ANG BERTEKANAN 40 MPa**

Yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan tiruan atau duplikasi dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Nama : Iqbal Anzifa
NPM : 0606073266
Tanda Tangan : 
Tanggal : 3 Januari 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Iqbal Anzifa

NPM : 0606073266

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : Pengaruh Laju Aliran Massa Gas Metan Terhadap Proses Adsorpsi-Desorpsi Pada Sistem ANG Bertekanan 4 Mpa

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

DEWAN PENGUJI

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

Penguji : Dr. Ir. M. Idrus Alhamid

Penguji : Dr. Ir. Awaludin Martin, MT.

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 3 Januari 2011

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

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

Nama : Iqbal Anzifa
NPM : 0606073266
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

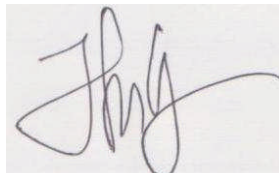
**PENGARUH LAJU ALIRAN MASSA GAS METAN
TERHADAP PROSES ADSORPSI-DESORPSI PADA SISTEM
ANG BERTEKANAN 40 MPa**

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 sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 3 Januari 2011

Yang menyatakan



(Iqbal Anzifa)

KATA PENGANTAR

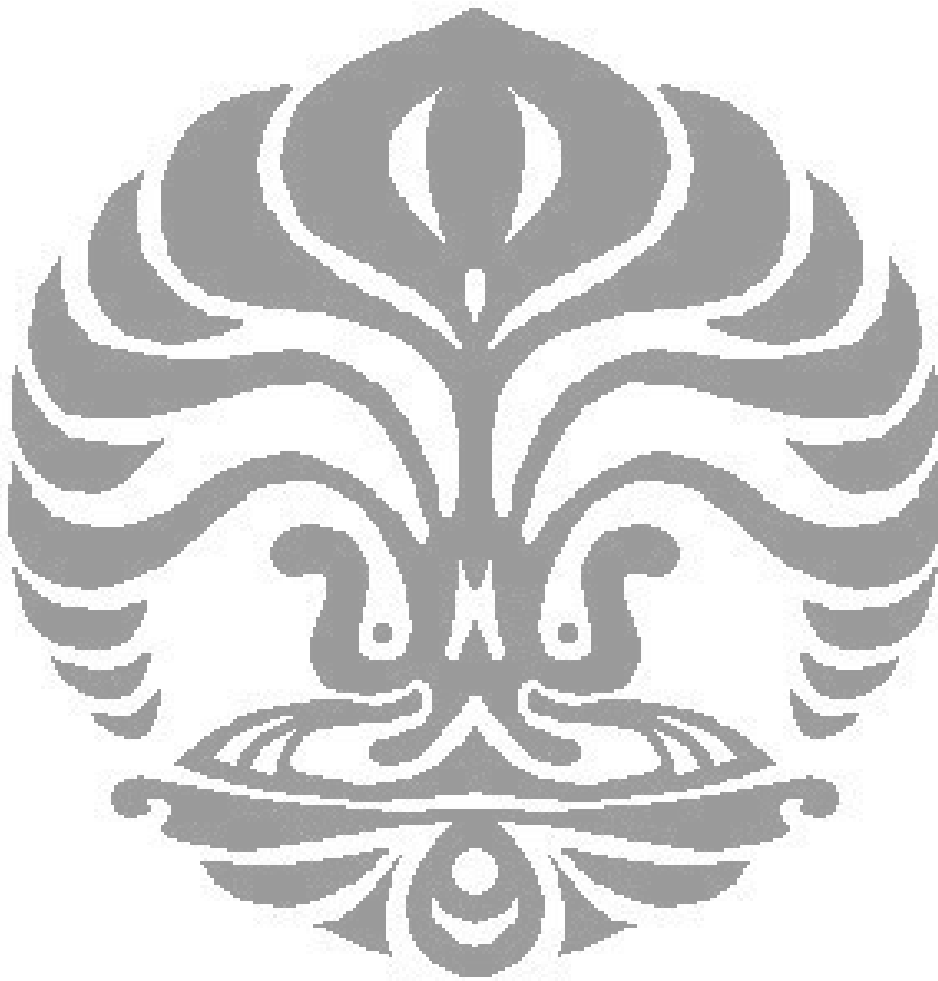
Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr.-Ing. Ir. Nasruddin M.Eng. dan Dr. Ir. Muhamad Idrus Alhamid selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Ayah Ardi dan ibu Sustris Zarnetty, Uni Ika, Afi, Nola, Alm. Cimeng, Gelan serta dd dias selaku keluarga penulis yang telah banyak memberikan bantuan dukungan doa, materi dan moral;
3. Pak Seno, Pak Endang Wijaya, Pak Darwin, Pak Yulianto, dan mahasiswa S3 lainnya yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang penulis perlukan;
4. Partner kerja saya Dedy, Bang Firman dan Bayu yang telah membantu dan menemani saya hingga pengambilan data;
5. Rekan-rekan Laboratorium Teknik Pendingin, Arnas (Pertamax gan!), Luki, Hilman, Mas Miko, Kuncoro, Taufik, Ikbar, Lutfi, Gangka, Insan, Vitra, dan Deni, Laboratorium Mekanika Fluida, Panji dan Rizky, dan Laboratorium Manufaktur dan Perancangan, Jedil dan Teguh.
6. Teman-teman Kepodang, Ilham, Arya, Arga, Wiko, Jihan, Aldoy, Gunawan, Denis, Mba Wiwi, Niken, Om Bambang dan Bob yang telah membantu dan memberikan dukungan kepada penulis;
7. Teman-teman seperjuangan Mesin 2006, yang telah memberi semangat dan bantuan untuk menyelesaikan skripsi ini.
8. Para karyawan Departemen Teknik Mesin yang telah banyak membantu mempersiapkan jalannya penelitian ini.

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di masa yang akan datang.

Depok, Januari 2011

Penulis



ABSTRAK

Nama : Iqbal Anzifa
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Pengaruh Laju Aliran Massa Gas Metan Terhadap Proses Adsorpsi-Desorpsi Pada Sistem ANG Bertekanan 4 Mpa

Gas alam merupakan bahan bakar yang lebih menjanjikan untuk berbagai aplikasi di kendaraan bermotor. Harganya yang lebih murah dari bensin atau solar, dan berpengaruh sedikit merugikan ke lingkungan tetapi memberikan keuntungan dalam hal kebersihan dan keamanan. Kendaraan berbahan bakar gas alam mengeluarkan sedikit karbon dioksida (penyebab efek rumah kaca) dan polutan lainnya ke udara bila dibandingkan dengan kendaraan berbahan bakar bensin. Namun, energi yang rendah membuat gas alam kurang aplikasinya sebagai bahan bakar mobil. Satu liter minyak bumi pada pembakaran menghasilkan sekitar $3,5 \times 10^4$ kJ energi, tapi satu liter gas alam hanya menghasilkan energi 40 kJ pada pembakaran, sekitar 0,1% dari minyak bumi. Dengan demikian, masalah utama menggunakan gas alam sebagai bahan bakar kendaraan adalah penyimpanannya untuk mendapatkan kepadatan energi yang tinggi. Sebuah alternatif sistem penyimpanan NG bertekanan rendah (3,5-4 MPa) adalah dengan adsorpsi (Adsorbed Natural Gas / ANG), merupakan pilihan yang seimbang dari segi biaya kompresi dan kapasitas penyimpanan. Adsorpsi merupakan fenomena fisik yang terjadi antara molekul-molekul gas atau cair dikontakkan dengan suatu permukaan padatan. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai pengaruh keadaan temperature terhadap proses adsorpsi selama masuknya gas, serta pengaruh laju aliran massa terhadap proses keluarnya gas pada sistem penyimpanan ANG.

Kata kunci: adsorbed natural gas, adsorpsi, desorpsi

ABSTRACT

Name : Iqbal Anzifa
Field of Study : Mechanical Engineering
Judul : Massflow Rate Effect to Adsorption-Desorption Process of ANG
System Section Up to 4 MPa

Natural gas is a fuel with rather promising application in all automotive vehicles. It costs less than gasoline or diesel, and has less adverse effect on the environment which provides benefits as cleanliness and safety. Vehicles fuelled with natural gas emit less carbon dioxide (chiefly greenhouse gas) and other pollutants into the air when compared to gasoline-fed vehicles. However, the low energy density of natural gas retards its wide application as automobile fuel. One liter of petroleum on combustion produces about 3.5×10^4 kJ energy, but one liter of natural gas produces only 40 kJ energy on combustion, which is approximately 0.1% of petroleum. Thus, the major problem for using natural gas as a vehicle fuel is its storage to obtain high-energy density. An alternative low-pressure (3.5–4 MPa) system for storing NG is the storage by adsorption (Adsorbed Natural Gas / ANG), which constitutes a good conciliatory choice between compression costs and storage capacity. Adsorption is a physical phenomenon that occurs between the molecules of gas or liquid contacted with a solid surface. In this work, comparative experiments were carried out to study the thermal effect of the adsorption heat during charge and massflow rate effect on the discharge performance of an adsorbed natural gas (ANG) storage system.

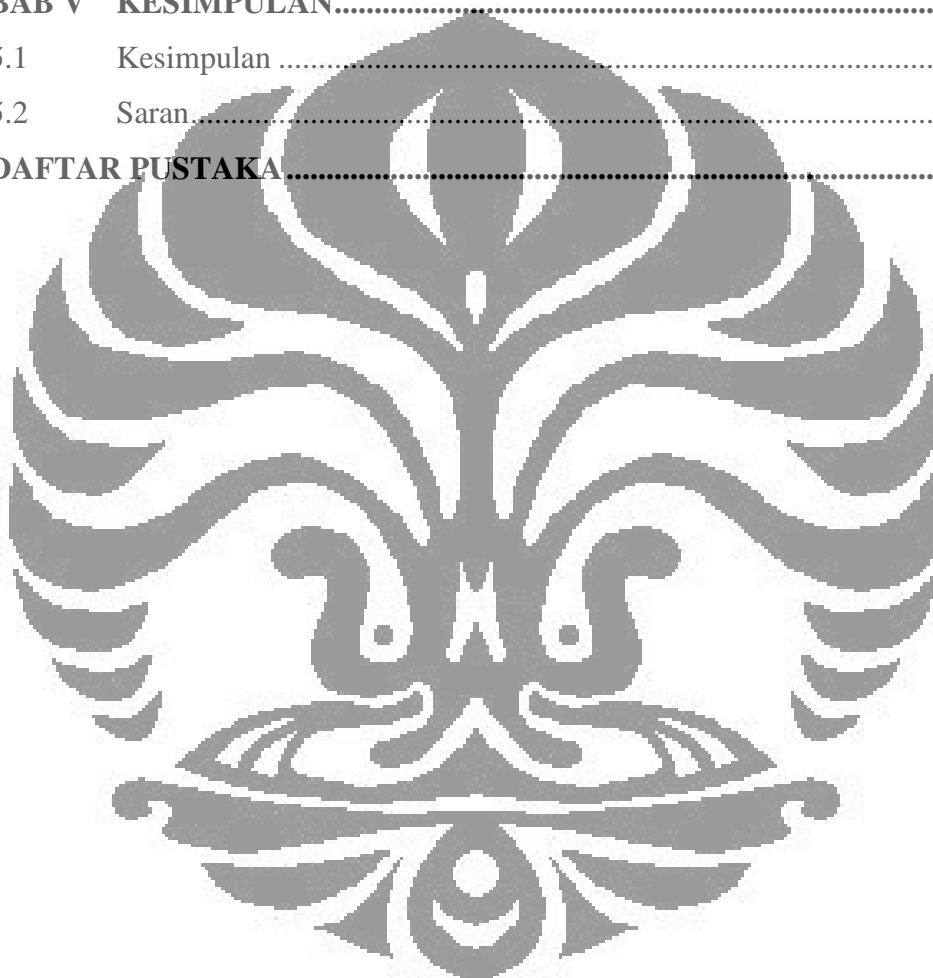
Key word: adsorbed natural gas, adsorption, desorption

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN.....	v
KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	viii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 Karbon Aktif	5
2.2 Adsorpsi	8
2.2.1 Adsorpsi Isoterm.....	10
2.2.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi.....	12
2.2.3 Adsorben.....	13
2.2.3.1 Karbon Aktif	14
2.2.4 Adsorbat.....	15
2.2.4.1 Metana (CH ₄).....	15
2.3 Sistem Adsorpsi	15
2.3.1 Metode pengukuran Adsorpsi.....	16
2.3.1.1 Metode <i>Carrier Gas</i>	16
2.3.1.2 Metode Volumetrik	17
2.3.1.3 Metode Gravimetrik.....	18
2.4 Skematik Sistem Adsorpsi	19
BAB III METODE PENELITIAN	21

3.1	Tahapan Penelitian Alat Uji Adsorpsi-Desorpsi Metana	21
3.2	Alat Uji Adsorpsi-Desorpsi Metana	22
	3.2.1 <i>Pressure Vessel</i>	22
	3.2.2 Pipa dan Insulasi	23
	3.2.3 <i>Pressure Transmitter</i>	23
	3.2.4 Termokopel.....	24
	3.2.5 <i>Massflow Controller</i>	25
	3.2.6 Pompa Vakum	25
	3.2.7 <i>Needle Valve</i>	26
	3.2.8 <i>Tube Flaring</i>	27
	3.2.9 Sambungan Tee	28
	3.2.10 <i>Male Connector</i>	28
	3.2.11 <i>Solenoid Valve</i>	29
	3.2.12 Drum.....	30
	3.2.13 <i>Circulating Thermal Bath</i>	30
	3.2.14 <i>Exhaust Fan</i>	31
	3.2.15 <i>Regulator</i>	32
	3.2.16 Data Akuisisi	33
	3.2.17 <i>Power Supply</i>	34
	3.2.18 <i>Heater</i>	35
	3.2.19 Pemipaan	36
	3.2.20 Instrumentasi	38
	3.2.21 Karbon Aktif.....	39
3.3	Verifikasi Alat ukur.....	40
	3.3.1 Verifikasi <i>Pressure Transmitter</i>	40
	3.3.2 Verifikasi Termokopel	41
3.4	Preparasi Sampel.....	47
	3.4.1 <i>Dry Sorbent</i>	47
	3.4.2 Proses <i>Degassing</i>	48
3.5	Proses Adsorpsi.....	50
3.6	Proses Desorpsi	51
BAB IV	ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	53

4.1	Variasi Pengambilan Data.....	53
4.1.1	Pengaruh Adsorpsi-Desorpsi Terhadap Temperatur <i>Storage Tank</i>	54
4.1.2	Pengaruh Laju Aliran Massa pada saat Desorpsi	58
4.1.3	Massa adsorpsi dan Volume gas metana saat <i>charge, discharge</i> dan residunya(sisa)	60
4.1.3.1	Massa Adsorpsi	61
4.1.3.2	Volume gas metana saat <i>charge, discharge</i> dan residu (sisa) ...	62
BAB V	KESIMPULAN.....	65
5.1	Kesimpulan	65
5.2	Saran.....	66
	DAFTAR PUSTAKA.....	67

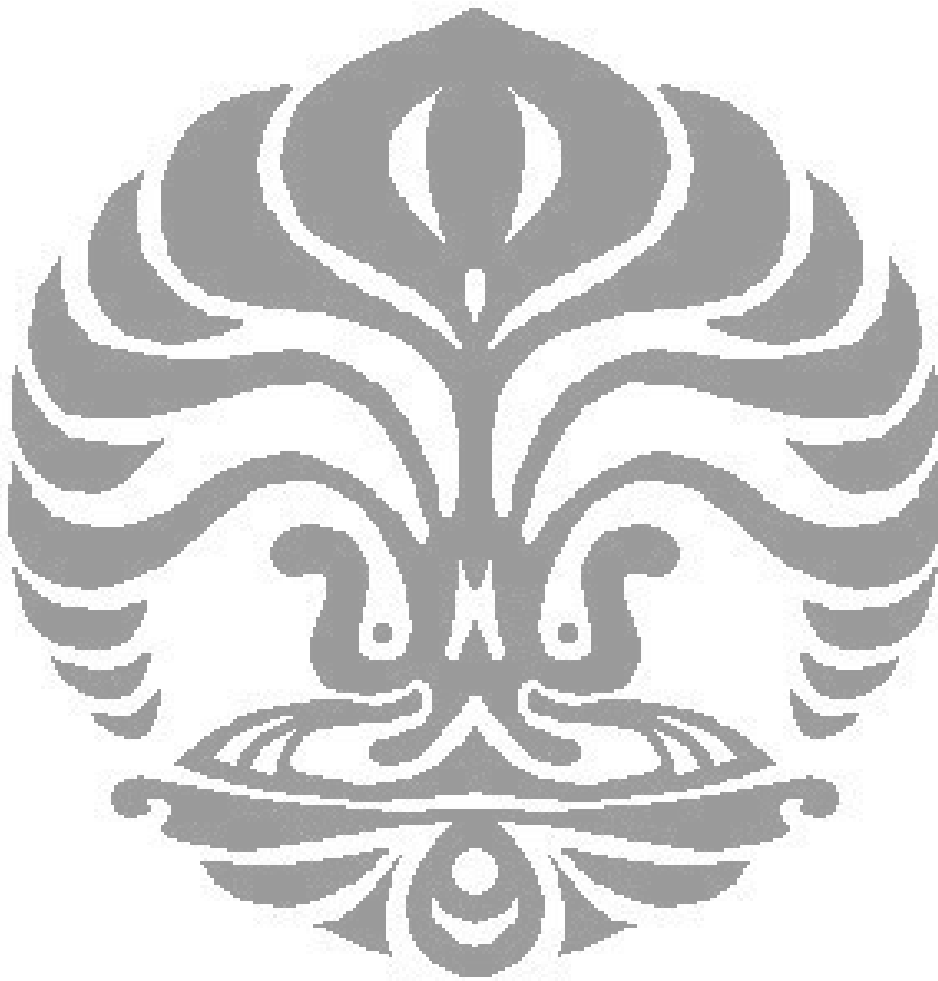


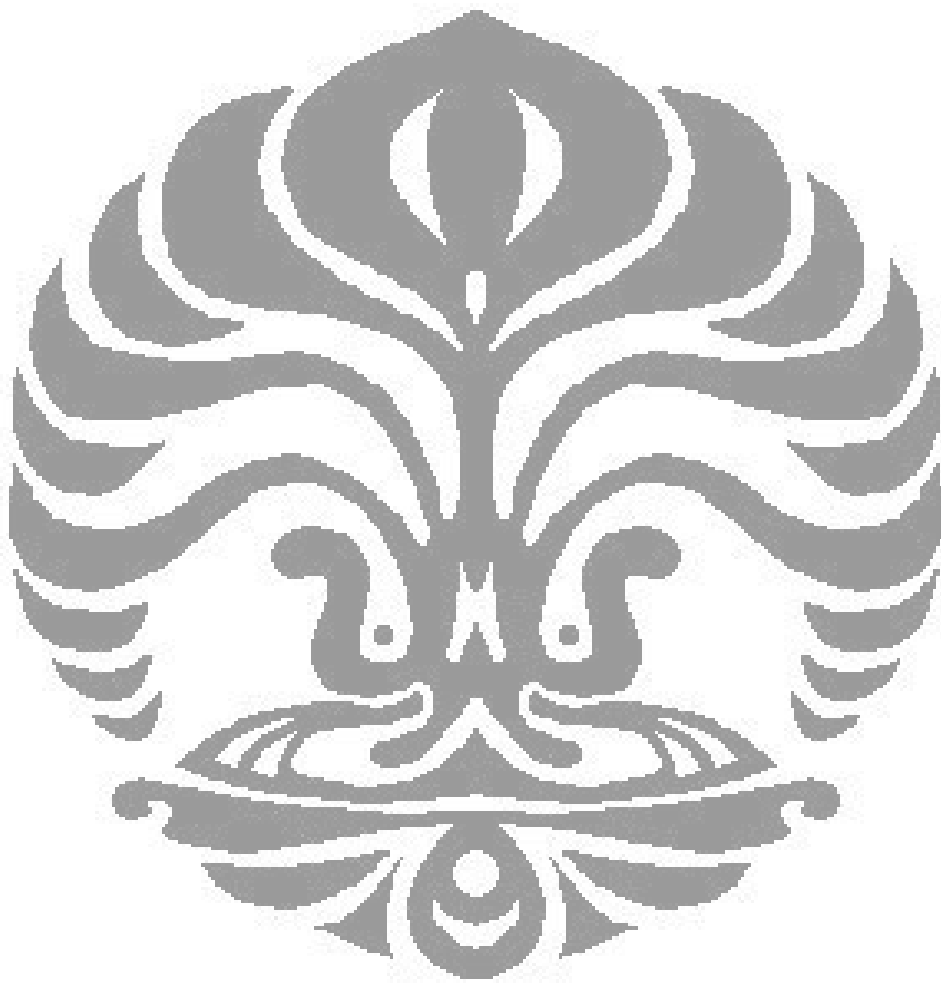
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema diagram Pemurnian Gula Sirup Dua Langkah	6
Gambar 2.2 Pemurnian emas dengan karbon aktif.....	7
Gambar 2.3 Fenomena Adsorpsi dan Desorpsi	9
Gambar 2.4 Kurva adsorpsi isothermis	11
Gambar 2.5 Struktur Karbon Aktif : (a)granul, (b) fiber	14
Gambar 2.6 Skema metode carrier gas	16
Gambar 2.7 Skema Pengukuran Volumetrik	17
Gambar 2.8 Skema Thermograph Microbalance Aparatus	18
Gambar 2.9 Skematik Penelitian Untuk Operasi Siklus	19
Gambar 3.1 Flowchart metode penelitian alat uji adsorpsi-desorpsi Metana	21
Gambar 3.2 Pressure Vessel	22
Gambar 3.3 Pressure Transmitter	23
Gambar 3.4 Modifikasi Termokopel	24
Gambar 3.5 Posisi termokopel; axial (kiri) dan radial (kanan)	24
Gambar 3.6 Massflow Controller	25
Gambar 3.7 Pompa Vakum	26
Gambar 3.8 Needle valve	27
Gambar 3.9 Tube Flaring	27
Gambar 3.10 Sambungan tee atau T	28
Gambar 3.11 Male connector	29
Gambar 3.12 Solenoid Valve	29
Gambar 3.13 Drum	30
Gambar 3.14 Circulating thermal bath	31
Gambar 3.15 Exhaust fan	32
Gambar 3.16 Regulator	32
Gambar 3.17 Data Akuisisi (DAQ)	34
Gambar 3.18 Power Supply 1	35
Gambar 3.19 Power supply 2	35
Gambar 3.20 Heater	36
Gambar 3.21 Pemipaan alat uji Adsorpsi-Desorpsi Metana	36

Gambar 3.22 Diagram Instrumentasi dan Pemipaan	37
Gambar 3.23 Display Labview 8.6.....	39
Gambar 3.24 Activated carbon	40
Gambar 3.25 Grafik kalibrasi pressure transmitter di measuring cell.....	41
Gambar 3.26 Skematik proses verifikasi termokopel	41
Gambar 3.27 Grafik Kalibrasi Termokopel 3.1	42
Gambar 3.28 Grafik Kalibrasi Termokopel 3.2	43
Gambar 3.29 Grafik Kalibrasi Termokopel 3.3	43
Gambar 3.30 Grafik Kalibrasi Termokopel 4.1	44
Gambar 3.31 Grafik Kalibrasi Termokopel 4.2	44
Gambar 3.32 Grafik Kalibrasi Termokopel 4.3	45
Gambar 3.33 Grafik Kalibrasi Termokopel A.....	45
Gambar 3.34 Grafik Kalibrasi Termokopel B.....	46
Gambar 3.35 Grafik Kalibrasi Termokopel C.....	46
Gambar 3.36 Grafik Kalibrasi Termokopel D.....	47
Gambar 3.37-Tinggi Karbon dalam Tabung.....	48
Gambar 3.38 Skema Proses Degassing.....	49
Gambar 3.39 Skema Proses Adsorpsi	51
Gambar 3.40 Skema Proses Desorpsi.....	52
Gambar 4.1 Adsorpsi-desorpsi gas metan dengan massflow rate discharge 25 slpm... 53	53
Gambar 4.2 Pengujian tanpa Adsorben dengan menggunakan gas nitrogen.....	54
Gambar 4.3-Temperatur vs Time pada proses adsorpsi-desorpsi.....	55
Gambar 4.4 Posisi Termokopel pada Storage Tank, (Kiri) Axial Termokopel,(Kanan) Radial Termokopel	56
Gambar 4.5 Temperatur vs Time, Termokopel Tercelup karbon Aktif	57
Gambar 4.6 Ilustrasi distribusi panas adsorpsi	57
Gambar 4.7 Temperature vs Time, Termokopel tidak tercelup karbon aktif	58
Gambar 4.8 Temperatur adsorben dengan variasi laju aliran massa	59
Gambar 4.9 Temperatur ruang storage tank pada variasi laju aliran massa	59
Gambar 4.10 Perbandingan massa adsorpsi pada kedua temperatur isothermal.....	61
Gambar 4.11 Volume gas metan saat charge, discharge dan residu(sisa) pada temperatur 30°C	62

Gambar 4.10 *Volume gas metan saat charge, discharge dan residu(sisa) pada temperatur 25°C* 63





BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketersediaan bahan bakar minyak (BBM) di alam saat ini sudah memasuki angka yang kritis. Diperkirakan BBM akan habis dalam beberapa puluh tahun lagi. Penggunaan BBM yang terus menerus, ditambah dengan meningkatnya jumlah konsumen menjadi alasan utama pencarian alternatif baru pengganti BBM yang lebih sehat. Bahan bakar gas atau *compressed natural gas (CNG)* dengan komposisi utama gas metana (CH_4) adalah calon utama yang direkomendasikan untuk menjadi bahan bakar alternatif pengganti BBM. Akan tetapi kendala dalam pemakaian CNG adalah tempat penyimpanannya yang bertekanan tinggi sekitar 20 MPa, sehingga dibutuhkan konstruksi dan perawatan yang sangat serius.

Salah satu cara untuk mengatasi kendala tersebut adalah dengan menggunakan *adsorbed natural gas (ANG)*. ANG merupakan natural gas bertekanan rendah, antara 3,5 – 4 MPa (Pupier, O, et al, 2004). ANG bertekanan rendah karena didalam tabung penyimpanannya terdapat adsorben yang dapat mengikat dan mempertahankan cairan atau gas didalamnya (Suryawan, Bambang, 2004). Sehingga jelas ANG lebih aman dibandingkan CNG.

Berbagai aspek yang mempengaruhi kinerja ANG diantaranya, karakteristik mikroporous, struktur karbon aktif, perbandingan tempat penyimpanan adsorben, disain tangki ANG, komposisi natural gas setelah sebuah siklus adsorpsi-desorpsi selesai (V. Goetz, 2004). Sementara, proses adsorpsi sangat dipengaruhi oleh pasangan adsorben dan adsorbatnya. Jenis adsorben yang sering digunakan yaitu zeolite, silica gel dan karbon aktif, akan tetapi karbon aktif paling banyak digunakan karena aplikasinya dan volume penyerapan yang lebih besar.

Karakteristik adsorpsi dapat diketahui dengan beberapa metode pengukuran. Salah satu metode pengukuran adalah volumetrik, dimana menghitung kapasitas dan laju penyerapan dilakukan dengan menggunakan perubahan tekanan per satuan waktu pada temperatur konstan atau dikenal dengan adsorpsi isothermal (Dawoud dan Aristov, 2003). Pengukuran menggunakan metode volumetrik dapat digunakan menghitung kapasitas adsorpsi untuk semua ukuran dan jenis pasangan adsorben-adsorbat, selain itu dapat juga menghitung laju penyerapan adsorpsi (Keller, Jurgen et al, 2002).

Dari uraian tersebut, karakteristik adsorpsi-desorpsi merupakan salah satu parameter yang menentukan kinerja sistem adsorpsi-desorpsi dimana adsorben menyerap adsorbat dan melepaskannya kembali. Di dalam penelitian ini karbon aktif digunakan sebagai adsorben dan gas CH_4 menjadi adsorbatnya. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengujian kapasitas penyerapan karbon aktif dan pelepasan gas CH_4 tersebut untuk mendapatkan informasi karakteristik adsorpsinya serta desorpsinya terhadap gas CH_4 .

1.2 Perumusan Masalah

Dari beberapa literatur mengenai sistem Adsorption Natural Gas (ANG), kita dapat melihat bahwa kebanyakan studi penelitian maupun teoritis tersebut pendekatannya kepada kinerja pada saat proses adsorpsi (*charging*). Penelitian ini akan membahas mengenai kinerja *discharging* dari suatu sistem ANG dengan menggunakan metode volumetrik. Pengaruh dari besarnya bukaan laju aliran massa *discharging* serta variasi pada suhu isothermal akan menjadi parameter pembanding.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian bertujuan untuk melakukan pengujian terhadap sistem penyimpanan gas bertekanan rendah (3.5–4 MPa) dengan menggunakan proses adsorpsi (Adsorbed Natural Gas / ANG), yang merupakan salah satu pilihan yang menjanjikan terhadap aspek biaya kompresi gas dan kapasitas

penyimpanannya. Pada penelitian ini digunakan karbon aktif sebagai adsorben karena di antara beberapa pilihan adsorben microporous carbon adsorbents adalah yang cukup besar kemampuannya untuk penyimpanan gas alam.

Tujuan khusus penelitian ini adalah mendapatkan data karakteristik adsorpsi-desorpsi isothermal, dengan variasi parameter laju aliran massa pada saat *discharging*, serta variasi suhu isothermal. Variasi-variasi tersebut diharapkan dapat menjadi parameter acuan seberapa besar pengaruh laju aliran massa pada saat *discharging* terhadap kinerja sebuah sistem ANG.

1.4 Pembatasan Masalah

Agar bahasan penelitian ini tidak menjadi luas, maka perlu diberikan batasan. Adapun batasan-batasannya adalah sebagai berikut:

1. Adsorben yang digunakan adalah karbon aktif batubara lokal dan adsorbatnya adalah gas CH_4 .
2. Membahas kondisi proses adsorpsi-desorpsi dengan skema yang telah dirancang sebelumnya.
3. Penelitian sebatas pada pengaruh variasi laju aliran massa *discharge* terhadap proses desorpsi, serta pengaruh variasi suhu isothermal terhadap proses adsorpsi.

1.5 Sistematika Penulisan

Penyusunan laporan tugas akhir agar memiliki struktur yang baik dan tujuan penulisan dapat tercapai dengan baik maka penulisan tugas akhir akan mengikuti sistematika sebagai berikut :

- BAB 1 PENDAHULUAN

Berisi latar belakang sebagai dasar penelitian dilakukan, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

- BAB 2 DASAR TEORI

Berisi landasan teori umum yang digunakan untuk menjelaskan masalah yang dibahas.

- **BAB 3 METODE PENELITIAN**

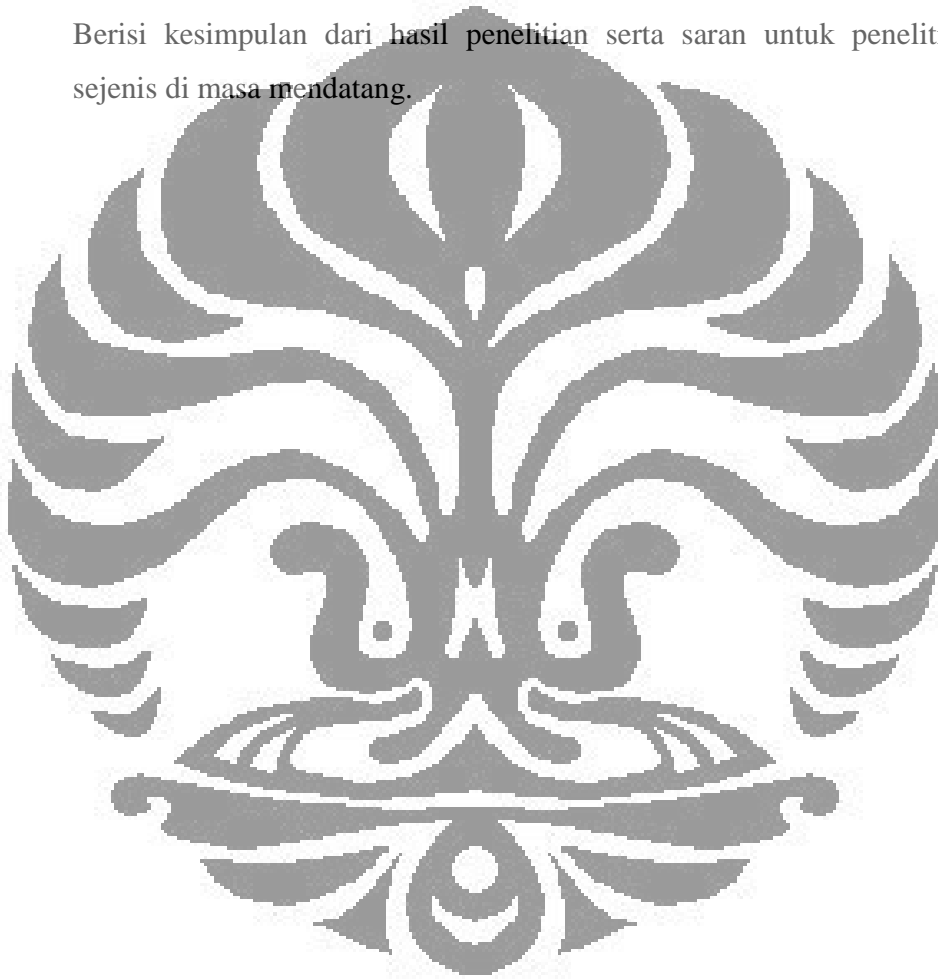
Berisi tentang metode penelitian serta langkah-langkah yang dilakukan dalam menjalankan penelitian untuk mencapai tujuan.

- **BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berisi hasil penelitian serta pembahasan dari hasil penelitian tersebut.

- **BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN**

Berisi kesimpulan dari hasil penelitian serta saran untuk penelitian yang sejenis di masa mendatang.



UNIVERSITAS INDONESIA

BAB II

DASAR TEORI

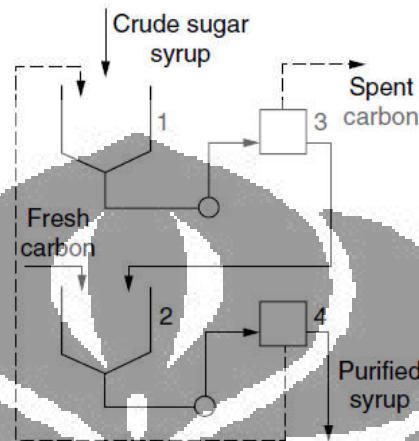
2.1 Karbon Aktif

Pengertian umum karbon aktif adalah zat yang sebagian besar mengandung material karbon amorf yang mempunyai kemampuan menyerap tingkat tinggi (Bansal C. Roop, 2005). Karbon aktif dalam penggunaannya secara umum memiliki beberapa macam bentuk, yaitu bentuk bubuk (*powder form*), granul (*granular form*), dan serat (*fiber form*). Saat ini juga sedang dikembangkan dalam bentuk bola (*spherical form*) dan pakaian (*cloth form*) untuk aplikasi tertentu. Bentuk granul (*granular form*) memiliki *internal surface area* yang luas namun pori-pori yang kecil. Sementara bentuk bubuk (*powder form*) memiliki pori-pori lebih besar namun dengan *internal surface area* yang sempit. Karbon berbentuk pakaian (*cloth form*) dan serat (*fiber form*) memiliki *surface area* yang luas serta mengandung persentase pori-pori besar yang lebih tinggi.

Karbon aktif yang berasal dari karbonisasi batubara telah dipakai sejak lama. Orang-orang Mesir telah menggunakan batubara ini pada sekitar tahun 1500 Masehi sebagai adsorben untuk keperluan pengobatan dan juga sebagai media pembersih. Orang Hindu kuno di India memurnikan air minum dengan penyaringan melalui batubara. Industri pertama yang menggunakan karbon aktif dimulai pada tahun 1900-an yaitu pada industri penyulingan gula. Karbon aktif dibentuk dengan karbonisasi campuran sayuran dan klorida metal (*metal chlorides*) atau dengan aktivasi menggunakan gas CO₂ atau uap air. Kualitas adsorben karbon aktif yang lebih baik digunakan ketika Perang Dunia I, yang dipakai pada masker gas untuk perlindungan dari gas dan asap yang berbahaya.

Karbon aktif merupakan adsorben yang unik dan serbaguna. Digunakan secara ekstensif untuk penghilangan bau, warna, dan rasa yang tidak diinginkan serta zat-zat organik-anorganik yang tidak murni pada industri pemurnian dan pemulihan limbah pada air, pemurnian udara pada area pemukiman, tempat

makan, pembuatan makanan, dan industry kimia; untuk penghilangan warna dari produk-produk farmasi; untuk mengontrol polusi udara pada pembuangan industri dan kendaraan bermotor; dan pada berbagai macam aplikasi fase gas.

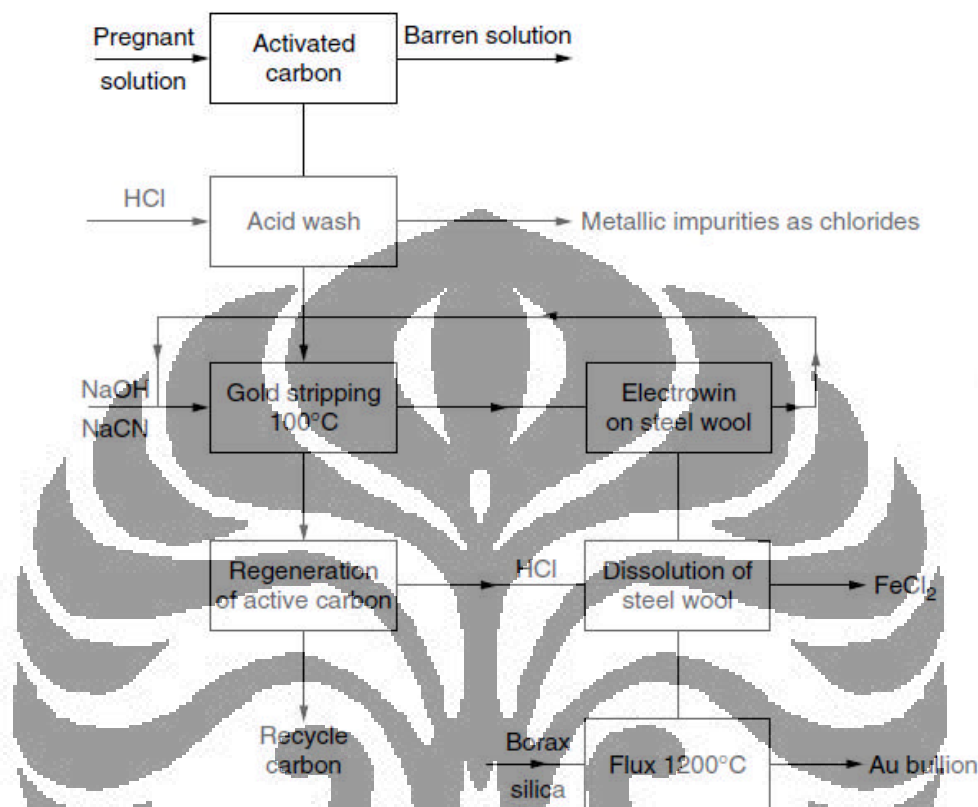


Gambar 2.1 Skema diagram Pemurnian Gula Sirup Dua (Jankowska, H., Swiatkowski, A., dan Choma, J., in *Active Carbon*, Ellis Howard, Ltd. England, 1991.)

Karbon aktif juga semakin banyak digunakan pada proses *hydrometallurgy* untuk pemurnian emas, perak, dan metal lain, dan juga sebagai katalis. Karbon aktif juga dikenal untuk aplikasi pada pengobatan untuk menghilangkan racun dan infeksi bakteri pada penyakit. Hampir 80% (300.000 ton/tahun) dari total konsumsi karbon aktif digunakan untuk aplikasi-aplikasi fase cair, sedangkan untuk aplikasi fase gas hanya dikonsumsi sekitar 20% dari total produksi.

Karbon merupakan kandungan utama dari karbon aktif, sekitar 85-95%. Selain itu juga terdapat elemen-elemen lain seperti hidrogen, nitrogen, sulfur, dan oksigen. Heteroatom ini berasal dari bahan baku yang menjadi satu dengan karbon selama proses aktivasi dan prosedur persiapan lain. Komposisi elemen-elemen pada karbon aktif diantaranya, 88% C, 0,5% H, 0,5% N, 1% S, dan 6-7% O. Kandungan oksigen pada karbon aktif dapat mencapai hingga 20%, tergantung dari penanganan pada saat aktivasi dan proses berikutnya. Karbon aktif sebagai adsorben yang paling banyak digunakan memiliki luas *surface area* 800-1500 m²/g dan volume pori 0,20-0,60 cm³/g. Pada banyak kasus juga

ditemukan volume pori hingga mencapai $1 \text{ cm}^3/\text{g}$. *Surface area* pada karbon aktif memiliki micropores yang berdiameter efektif lebih kecil dari 2nm.



Gambar 2.2 Pemurnitan emas dengan karbon aktif

Sebagian besar karbon aktif dibuat dengan cara pirolisis bahan baku yang mengandung zat arang pada temperatur dibawah 1000°C . Pada prosesnya meliputi dua langkah; karbonisasi bahan baku pada temperature dibawah 800°C pada tekanan atmosfer, dan aktivasi produk karbonisasi tadi pada temperatur antara $950-1000^{\circ}\text{C}$. Dengan prosedur demikian, semua material zat arang dapat diubah menjadi karbon aktif, meskipun sifat-sifat yang dihasilkan berbeda-beda, tergantung dari sifat dasar bahan baku, sifat dasar material aktivasi, dan kondisi pada saat proses aktivasi. Selama proses karbonisasi kebanyakan elemen-elemen nonkarbon seperti oksigen, hidrogen, nitrogen, dan sulfur lenyap sebagai gas yang menguap, karena perlakuan dekomposisi pirolisis pada bahan baku.

2.2 Adsorpsi

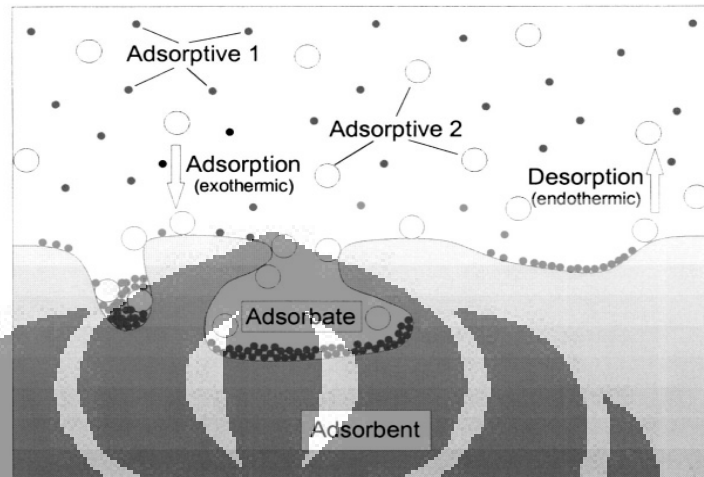
Adsorpsi adalah fenomena fisik yang terjadi antara molekul-molekul fluida (gas atau cair) yang dikontakkan dengan suatu permukaan padatan. Adsorpsi adalah proses dimana molekul-molekul fluida menyentuh dan melekat pada permukaan padatan (Nasruddin, 2005). Ketika permukaan padatan bereaksi dengan molekul gas atau cair, konsentrasi dari gas atau cairan tersebut di permukaan lebih tinggi daripada fase gas atau cair, disebut dengan adsorpsi (Bansal, R.C dan Meenakshi Goyal, 2005). Molekul tersebut akan terlepas dan berubah fase kembali menjadi gas, disebut fenomena desorpsi (Keller, J.U et al, 2005).

Adsorpsi timbul sebagai akibat dari gaya-gaya molekul yang tak jenuh dan tak stabil. Jadi, ketika sebuah permukaan solid bersentuhan dengan gas atau liquid, terjadi interaksi antara gaya-gaya pada permukaan solid dengan gaya-gaya pada permukaan gas atau liquid. Permukaan molekul solid cenderung menarik dan menahan permukaan molekul, atom atau ion dari gas atau liquid tersebut. Proses interaksi pada permukaan ini dinamakan adsorpsi (Goyal, M, 2005). Pada adsorpsi terdapat dua macam gaya;

- Gaya fisika seperti momen dipole, gaya polarisasi, gaya disperse, atau gaya tolak-menolak jarak pendek, dan
- Gaya kimia yaitu gaya valensi yang timbul pada redistribusi elektron antara permukaan solid dan atom adsorbs

Sementara itu menurut Metcalf, E. proses adsorpsi dapat dibagi menjadi tiga langkah,,diantaranya:

- Macro transport, adalah pergerakan dari substansi masuk kedalam sistem macro-pore karbon aktif (macro-pore >50nm),
- Micro transport, adalah pergerakan substansi masuk kedalam sistem meso-pore dan micro-pore karbon aktif (micro-pore <2nm; meso-pore 2-50nm),
- Sorption, adalah pengikatan fisika substansi dengan permukaan karbon aktif pada ukuran pori meso-pores dan micro-pores.



Gambar 2.3 Fenomena Adsorpsi dan Desorpsi (Keller, J.U et al, 2005)

Adsorpsi ditunjukkan oleh Gambar 2.3, ketika adsorpsi, terjadi proses pengeluaran kalor (exoterm) dan sebaliknya ketika desorpsi terjadi proses pengambilan kalor dari lingkungan (endoterm). Entalpi adsorpsi berkisar antara 10 – 20 kJ/mol, dan terjadi dibawah titik didih adsorbat (Bansal, R.C dan Meenakshi Goyal, 2005).

Substansi yang terikat pada permukaan padatan disebut dengan adsorbat dan material tempat terserapnya adsorbat disebut adsorben. *Adsorptive* merupakan fluida yang akan berinteraksi dengan adsorbat.

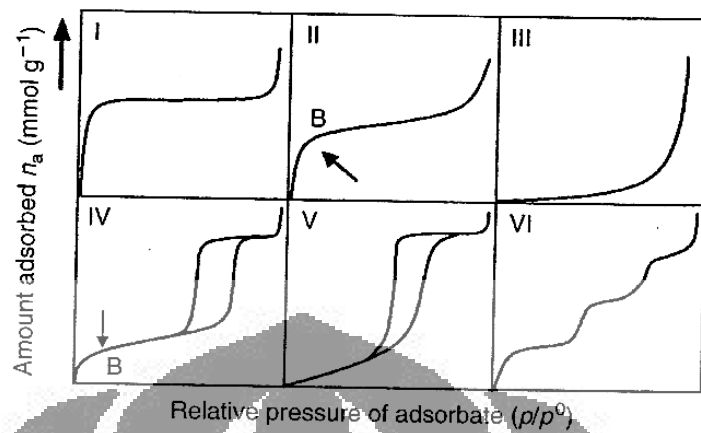
Adsorpsi terjadi karena adanya gaya *Van DerWaals* yaitu gaya tarik-menarik yang relatif lemah antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Adsorbat tidak terikat secara kuat pada permukaan adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan ke bagian permukaan lainnya. Dan pada permukaan yang ditinggalkan oleh adsorbat yang satu dapat digantikan oleh adsorbat lainnya. Adsorpsi merupakan suatu peristiwa yang reversibel. Bila dalam keadaan kesetimbangan kondisinya diubah misalnya tekanan diturunkan atau temperatur dinaikkan maka sebagian adsorbat akan terlepas dan akan membentuk kesetimbangan baru.

2.2.1 Adsorpsi Isoterm

Jika sejumlah gas atau vapor, q , teradsorpsi oleh padatan berpori-pori saat temperatur konstan dan dalam kesetimbangan tekanan partial, p , (atau konsentrasi, c) maka fungsi $q(p)$ merupakan adsorpsi isoterm (Thomas, W.J dan Barry Crittenden, 1998).

Adsorpsi isoterm merupakan metode yang sering digunakan untuk mewakili keadaan setimbang dari sebuah sistem adsorpsi. Adsorpsi isoterm berguna untuk memberikan informasi mengenai adsorbat, adsorben dan proses adsorpsi. Membantu dalam penentuan luas permukaan adsorben, volume dari pori-pori dan distribusi ukuran (Bansal, R.C dan Meenakshi Goyal, 2005).

Peristiwa adsorpsi disertai dengan pengeluaran panas yang disebut dengan panas adsorpsi (eksoterm). Umumnya panas adsorpsi relatif rendah berkisar (5 – 10) kkal/g.mol dan terjadi pada temperatur rendah yaitu di bawah temperatur didih adsorbat. Hal ini yang menyebabkan kesetimbangan dari proses adsorpsi adalah reversibel dan berlangsung sangat cepat (Herawaty, 2003). Proses adsorpsi terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi, sehingga pada proses tersebut akan membentuk lapisan multilayer pada permukaan adsorben. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi dapat diputuskan dengan mudah, yaitu dengan cara pemanasan pada temperatur 150 - 200°C selama 2 - 3 jam (Suryawan, Bambang, 2004). Penggambaran kurva antara jumlah gas yang teradsorpsi terhadap tekanan (p/p_0) pada keadaan isothermal dapat dibagi menjadi enam jenis, seperti gambar berikut : (Hines, A.L dan Robert N. Maddox, 1985 , Marsh H. dan F. Reinoso, 2006).



Gambar 2.4 Kurva adsorpsi isoterms (Mars H. dan F. Reinoso, 2006)

- Type I, disebut langmuir isoterm menggambarkan adsorpsi (*monolayer*). Langmuir isoterm sesuai dengan adsorpsi fisik pada padatan, biasanya diperoleh dari adsorben berpori kecil (*micropore*) kurang dari 2 nm dan luas area eksternal sangat sedikit, seperti pada karbon aktif, silika gel, zeolit dan bentofit.
- Type II, diperoleh dari percobaan Brauner, Emmett dan Teller (1938). Kurva jenis ini ditemukan pada adsorben berpori (*porous*) atau padatan berpori besar (*macro-porous*).
- Type III, menunjukkan kuantitas adsorben semakin tinggi saat tekanan bertambah. Tipe ini jarang terlihat dalam eksperimen adsorpsi, dimana gaya tarik molekul gas lebih besar dibandingkan gaya ikat serapan.
- Type IV, sering terlihat pada padatan berpori, seperti pada katalis industri. Relatif tekanan rendah sampai menengah, dimana volume terbesar adsorbat yang teradsorpsi dapat dihitung dari *capillary condensation* yang telah sempurna mengisi pori. Kurva jenis ini dihasilkan padatan adsorben berukuran *mesopore* (2-50 nm).
- Type V, jenis ini hampir sama dengan tipe III, dihasilkan dari interaksi yang rendah antara adsorben dengan adsorbat.

- f. Tipe VI, menunjukkan interaksi adsorbat dengan permukaannya yang terlalu homogen (*pyrolytic graphite*) yang berinteraksi dengan adsorben seperti argon dan metan.

2.2.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi

Daya adsorpsi dipengaruhi lima faktor (Bahl et al, 1997 dan Suryawan, Bambang 2004), yaitu :

1. Jenis adsorbat
 - a. Ukuran molekul adsorbat
Ukuran molekul yang sesuai merupakan hal penting agar proses adsorpsi dapat terjadi, karena molekul-molekul yang dapat diadsorpsi adalah molekul-molekul yang diameternya lebih kecil atau sama dengan diameter pori adsorben.
 - b. Kepolaran zat
Apabila berdiameter sama, molekul-molekul polar lebih kuat diadsorpsi daripada molekul-molekul tidak polar. Molekul-molekul yang lebih polar dapat menggantikan molekul-molekul yang kurang polar yang terlebih dahulu teradsorpsi.
2. Karakteristik adsorben
 - a. Kemurnian adsorben
Sebagai zat untuk mengadsorpsi, maka adsorben yang lebih murni lebih diinginkan karena kemampuan adsorpsi lebih baik.
 - b. Luas permukaan dan volume pori adsorben
Jumlah molekul adsorbat yang teradsorpsi meningkat dengan bertambahnya luas permukaan dan volume pori adsorben.
3. Temperatur absolut (T), temperatur yang dimaksud adalah temperatur adsorbat. Pada saat molekul-molekul gas atau adsorbat melekat pada permukaan adsorben akan terjadi pembebasan sejumlah energi yang dinamakan peristiwa eksotermis. Berkurangnya temperatur akan

menambah jumlah adsorbat yang teradsorpsi demikian juga untuk peristiwa sebaliknya.

4. Tekanan (P), tekanan yang dimaksud adalah tekanan adsorbat. Kenaikkan tekanan adsorbat dapat menaikkan jumlah yang diadsorpsi.
5. Interaksi potensial (E), interaksi potensial antara adsorbat dengan dinding adsorben sangat bervariasi, tergantung dari sifat adsorbat-adsorben.

2.2.3 Adsorben

Material penyerap atau adsorben adalah zat atau material yang mempunyai kemampuan untuk mengikat dan mempertahankan cairan atau gas didalamnya (Suryawan, Bambang, 2004). Menurut Suzuki. M (1990) adsorben memiliki dua tipe yaitu polar dan non-polar. Adsorben polar disebut juga dengan *hydrophilic*, adsorben yang mengikat molekul polar, seperti air. Jenis adsorben ini adalah silica gel, porous alumina, dan zeolites. Adsorben non-polar lebih dapat mengikat oli atau gas dibandingkan air, disebut dengan *hydrophobic*, contohnya karbon aktif dan adsorben polimer.

Karakteristik adsorben menentukan proses adsorpsi. Luas permukaan adsorben mempengaruhi kapasitas adsorpsi, semakin luas permukaannya, maka semakin tinggi kapasitas adsorpsi. Selain itu, adsorben memiliki ukuran pori-pori yang bervariasi. Distribusi ukuran tersebut juga karakteristik penting dari adsorben, karena ukuran tersebut mempengaruhi kemampuan adsorben dalam menyerap adsorbat.

Dari segi sifat material adsorben, diharapkan memiliki sifat kinetik yang baik karena mempengaruhi laju adsorpsi, dan sifat mekanikal yang mempengaruhi ketahanan adsorben dalam melakukan proses adsorpsi dan desorpsi.

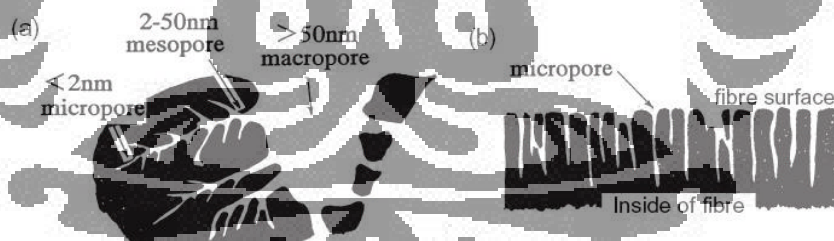
2.2.3.1 Karbon Aktif

Karbon aktif telah digunakan sejak berabad-abad yang lalu, sekitar tahun 1600BC di kawasan Mesir. Hingga sekarang, karbon aktif paling banyak digunakan di industri, sebagai contoh untuk memurnikan air, penyerap gas karbon dioksida.

Bahan dasar karbon aktif mudah ditemukan karena dapat dibuat dari bahan-bahan yang mengandung senyawa karbon, seperti tumbuhan, batok kelapa, sekam padi, jenis kayu ataupun barang tambang, batu bara

Penggunaan karbon aktif paling banyak digunakan karena distribusi ukuran pori-pori pada karbon aktif mempunyai diameter pori yang lebih besar dibandingkan dengan adsorben lainnya (Yang, Ralph.T, 2003). Kapasitas daya serap yang tinggi, sekitar $0,6 - 0,8 \text{ cm}^3/\text{gm}$, terjadi hampir di seluruh rongga molekular biasa disebut dengan *micropores* (Manocha, Satish M, 2003).

Karbon aktif termasuk ke dalam benda solid, namun berbeda karena pada atom permukaannya memiliki gaya yang tidak seimbang sehingga mudah untuk molekul lain masuk dan membentuk permukaan yang baru.



Gambar 2.5 Struktur Karbon Aktif: (a) granula, (b) fiber
(Manocha, Satish M, 2003)

Beberapa bentuk karbon aktif (Manocha, Satish M, 2003) yaitu bubuk, granula, *spherical*, *impregnated*, dan *polymers coated carbon*. Setiap jenis bentuk karbon memiliki kegunaan yang berbeda.

2.2.4 Adsorbat

Adsorbat adalah substansi yang terkonsentrasi di permukaan adsorben. Pada penelitian ini digunakan gas metana sebagai adsorbat. Metana termasuk ke dalam ikatan hidrokarbon, menurut M Suzuki (1990), hidrokarbon termasuk kelompok substansi non-polar. Berbeda dengan air yang termasuk ke dalam substansi polar.

2.2.4.1 Metana (CH₄)

Metana merupakan komponen utama dari gas alam dan termasuk ikatan hidrokarbon. Pada tekanan dan temperatur atmosfer, metana dalam bentuk gas, tidak berwarna dan tidak berbau namun mudah terbakar.

Metana banyak digunakan sebagai bahan bakar kendaraan, karena termasuk bahan bakar fosil dan ditemukan di tambang minyak bumi, gas alam, ataupun di tambang batu bara. Selain itu, gas yang mengandung metana dapat ditemukan dari tumpukan bahan organik akibat pembusukan anaerobik.

Sifat-sifat lain dari gas metana (www.gasencyclopedia.com), sebagai berikut:

- Titik leleh : -182,5 °C
- Titik didih : -161,6 °C
- Densitas (gas) : 1,819 kg/m³
- Faktor Kompresi (Z) : 0,998
- Temperatur Autoignition : 595 °C

2.3 Sistem Adsorpsi

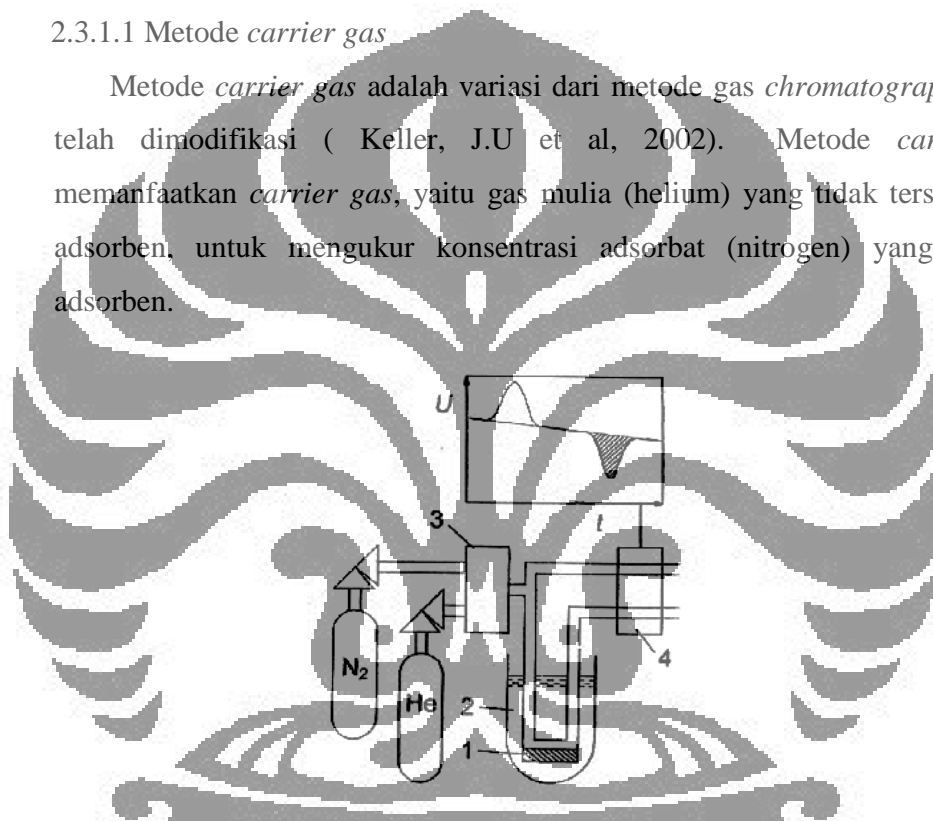
Adsorpsi merupakan proses penyerapan adsorben ke permukaan adsorbat. Dibutuhkan sistem adsorpsi agar proses berjalan sesuai dengan tujuan akhir yang diinginkan, seperti mengetahui karakteristik dari adsorben, kemampuan daya serap adsorbe. Dalam pencapaian tujuan tersebut terdapat metode pengukuran proses adsorpsi yang biasa digunakan. Metode pengukuran tersebut memiliki skematik sistem adsorpsi masing-masing.

2.3.1 Metode Pengukuran Adsorpsi

Keadaan setimbang dari proses adsorpsi dapat diukur dengan menggunakan beberapa metode dasar. Pengukuran yang telah lama digunakan yaitu secara volumetrik dan gravimetrik.

2.3.1.1 Metode *carrier gas*

Metode *carrier gas* adalah variasi dari metode *gas chromatography* yang telah dimodifikasi (Keller, J.U et al, 2002). Metode *carrier gas* memanfaatkan *carrier gas*, yaitu gas mulia (helium) yang tidak terserap oleh adsorben, untuk mengukur konsentrasi adsorbat (nitrogen) yang terserap adsorben.



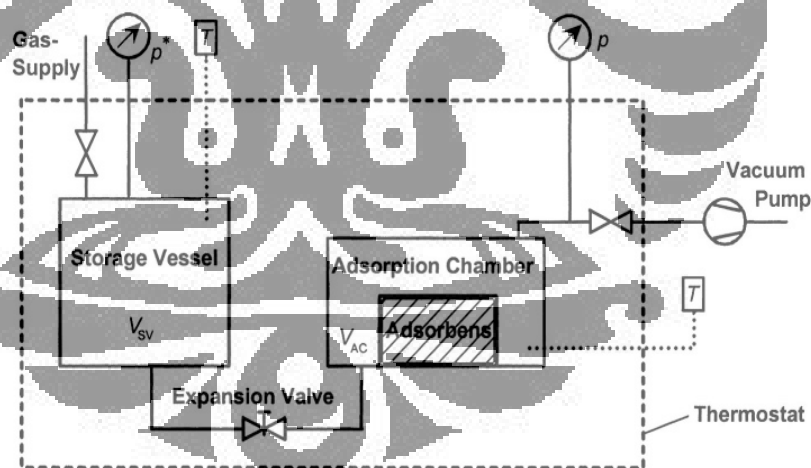
Gambar 2.6 Skema metode *carrier gas*. (Keller, J.U et al, 2002)

Pengukuran dengan metode ini dilakukan dengan mengalirkan helium dan nitrogen, nitrogen yang terserap oleh sampel diindikasikan dengan berkurangnya konsentrasi gas helium pada satu waktu. Titik jenuh pengukuran menggunakan metode *carrier gas* ditandai dengan bertambahnya konsentrasi nitrogen. Metode *carrier gas* sangat mudah dibuat, murah, dan mudah digunakan. Alat uji *carrier gas* tidak memiliki akurasi tinggi dalam pengukuran

penyerapan. Biasanya penggunaan metode ini digunakan hanya untuk mencari satu parameter, yaitu luas permukaan. Pengujian untuk dua parameter seperti kapasitas dan laju penyerapan sangat sulit digunakan (Keller, J.U et al, 2002).

2.3.1.2 Metode Volumetrik

Dalam metode volumetrik, pengukuran dilakukan untuk mendapatkan temperatur dan tekanan di dalam *vessel*. Pada skematik terdapat dua *vessel* yaitu *storage vessel* dan *adsorption chamber* dihubungkan oleh sebuah katup. *Storage vessel* berguna untuk penyimpanan gas sementara yang tekanan dan temperaturnya dapat diatur. Kemudian *adsorption chamber* terdapat adsorben untuk adsorpsi gas. Katup dibuka gas mengalir dari *storage vessel* ke *adsorption chamber*, terjadi penurunan tekanan dan kenaikan temperatur menandakan terjadinya adsorpsi. Setelah kesetimbangan tercapai, didapatkan temperatur dan tekanan stabil, massa gas teradsorpsi dapat dihitung.



Gambar 2.7 Skema Pengukuran Volumetrik (Keller, J.U et al, 2005)

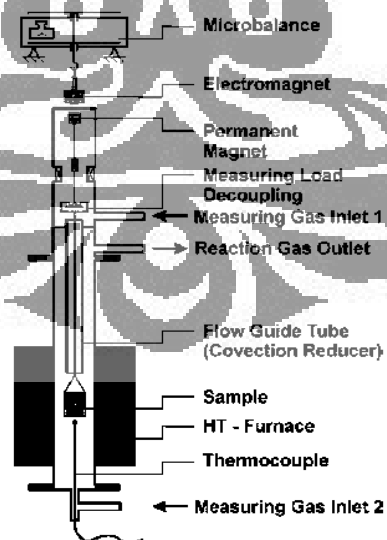
Hal yang terpenting dalam pengukuran adsorpsi isothermal menggunakan alat uji adsorpsi metode volumetrik sebagai berikut (Keller, J.U et al, 2002):

- a. Volume efektif alat uji harus diketahui,

- b. Alat uji harus dapat mengukur temperatur dari gas yang menjadi adsorbat,
- c. Keakuratan alat uji untuk mengukur perubahan tekanan pada metode volumetrik adalah hal yang utama,
- d. Kesetimbangan adsorpsi terjadi apabila tekanan relative mencapai $p/p_0 = 1$, maka pengukuran berakhir,
- e. Perhitungan adsorbat yang terserap dapat diukur menggunakan persamaan gas ideal.

2.3.1.3 Metode Gravimetrik

Metode gravimetrik digunakan untuk karakteristik pori-pori adsorben, mengukur persamaan adsorpsi gas, dan adsorpsi kinetik (Keller, J.U et al, 2005). Pengukuran adsorpsi isothermal yang dapat dilakukan menggunakan metode gravimetrik, antara lain: massa yang terserap pada adsorben, tekanan gas dan temperatur. Alat yang digunakan untuk mengukur adsorpsi isothermal adalah *Thermograph Microbalance Aparatus* (TGA) (Rouquerol, J et al, 1998).

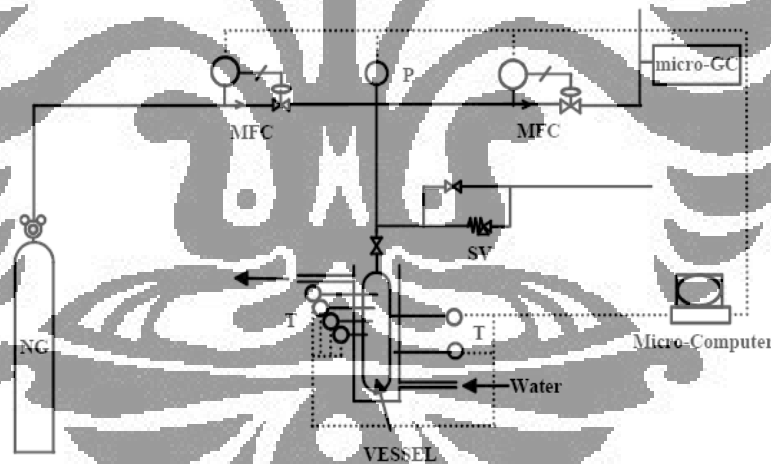


Gambar 2.8 Skema Thermograph Microbalance Aparatus
(Keller, J.U et al, 2002)

Preparasi sampel pengujian menggunakan metode gravimetrik mutlak dilakukan untuk mendapatkan pengujian yang optimum. Preparasi sampel dilakukan dengan *degassing* sampel untuk mendapatkan massa kering sampel serta temperatur, tekanan, dan waktu untuk mendapatkan data pengujian yang valid (Keller, J.U et al, 2002). Pengujian menggunakan metode gravimetrik sangat kompleks, dikarenakan diperlukan pengukuran efek *bouyancy* pada pengolahan datanya. Alat uji adsorpsi menggunakan metode gravimetrik membutuhkan investasi yang cukup besar, karena untuk memiliki TGA dengan keakurasian tinggi harus menyediakan jutaan dollar (Rouquerol, J et al, 1998).

2.4 Skematik Sistem Adsorpsi

Pada adsorpsi-desorpsi metana, digunakan sistem skematik seperti pada Gambar 2.7, berdasarkan Jurnal Internasional “*Effect of cycling operations on an adsorbed natural gas storage*” oleh Pupier, O. et al, 2004.

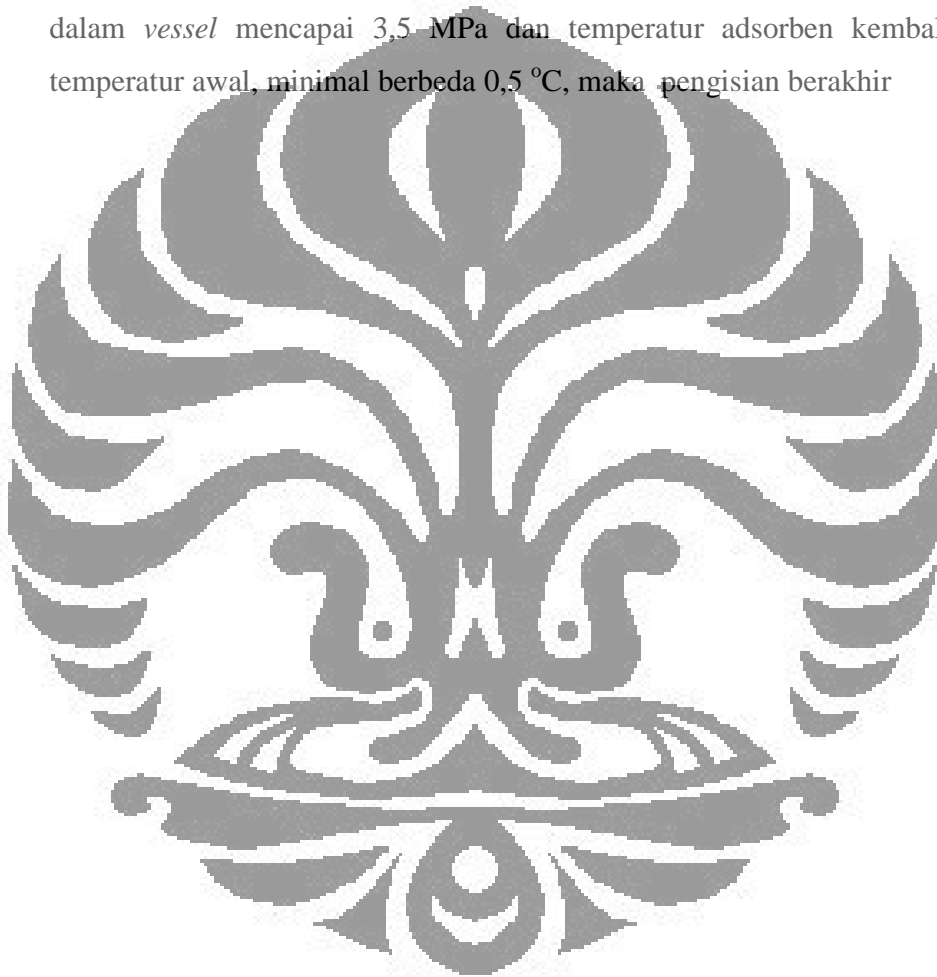


Gambar 2.9 Skematik Penelitian Untuk Operasi Siklus
(Pupier, O. et al, 2004)

Gambar 2.9, menjelaskan aliran masuk adsorbat menuju tangki penyimpanan (*vessel*) dan keluar ke lingkungan. Terdapat komponen mengontrol aliran massa (MFC) untuk mengatur aliran massa adsorbat yang masuk dan keluar. Pemasangan *micro-gas chromatograph* ditujukan untuk

mengetahui kandungan adsorbat yang keluar dan dilihat pengaruhnya setelah beberapa siklus dilakukan.

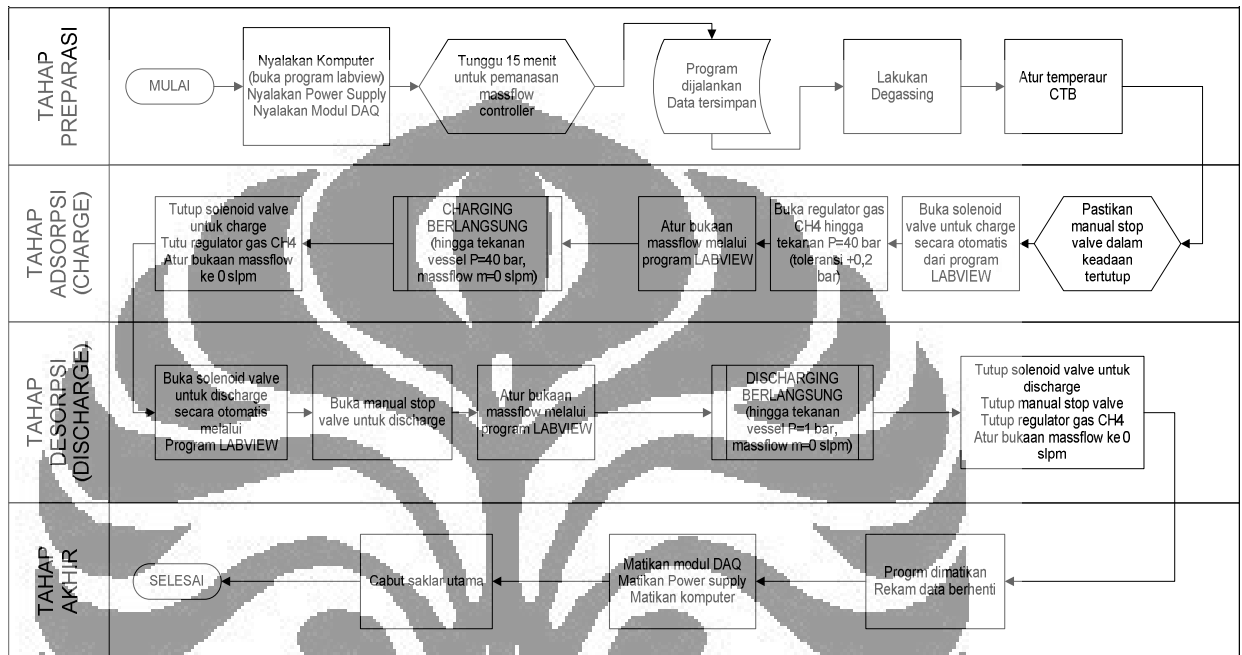
Data yang diambil yaitu tekanan, temperatur dan aliran massa. Proses adsorpsi-desorpsi dilakukan pada temperatur konstan, 298 K oleh sebab itu *vessel* dimasukan ke dalam air yang dapat diatur temperaturnya. Air digunakan karena lebih stabil terhadap keadaan lingkungan yang kurang stabil. Tekanan dalam *vessel* mencapai 3,5 MPa dan temperatur adsorben kembali seperti temperatur awal, minimal berbeda 0,5 °C, maka pengisian berakhir



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian Alat Uji Adsorpsi-Desorpsi Metana



Gambar 3.1 Flowchart metode penelitian alat uji adsorpsi-desorpsi Metana

Penelitian alat uji adsorpsi-desorpsi metana ini dalam prosesnya melakukan satu siklus (adsorpsi-desorpsi) bisa dibagi menjadi empat tahap, diantaranya

1. Tahap preparasi, atau tahap persiapan. Pada tahap ini juga dilakukan proses degassing terhadap karbon aktif yang terdapat didalam *pressure vessel*.
2. Tahap adsorpsi, atau tahap *charging*. Pada tahap ini gas metana (CH_4) sebagai adsorbat, dimasukkan ke dalam *pressure vessel* sampai pada tekanan 42 bar. Tekanan akan menurun hingga 40 bar, karena proses adsorpsi terjadi didalam sistem. Selama proses adsorpsi terjadi temperatur didalam *pressure vessel* meningkat hingga pada suhu 70°C . Tahap ini *vessel* mencapai 40 bar, aliran massa kembali 0 slpm, dan temperatur

pada *pressure vessel* kembali ke keadaan semula sesuai dengan temperatur pada CTB (isotermal).

3. Tahap desorpsi , atau tahap *discharging*. Pada tahap ini gas metana yang ditekan 40 bar didalam *pressure vessel* dibuang ke lingkungan. Selama proses terjadi temperatur akan mengalami penurunan hingga mencapai -10°C . Tahap ini berakhir ketika tekanan pada *pressure vessel* kembali ke tekanan awal, $P_0 = 1$ bar, aliran massa kembali 0 slpm, dan temperatur pada *pressure vessel* kembali ke keadaan semula sesuai dengan temperatur pada CTB (isotermal).
4. Tahap akhir. Jika siklus dilakukan terus menerus secara kontinyu, setelah tahap desorpsi selesai kembali ke tahap awal, langsung dilakukan proses degassing.

3.2 Alat Uji Adsorpsi-desorpsi Metana

3.2.1 Pressure Vessel

Pressure vessel dirancang sebagai tempat untuk merubah fasa adsorbat menjadi *vapour*. Namun pada penelitian ini digunakan untuk menyimpan CH_4 bertekanan tinggi. *Pressure vessel* dirancang agar mampu tahan pada tekanan maksimum, karena akan berpengaruh pada ketebalan *vessel*. Tekanan yang dibutuhkan yaitu 40 bar.



Gambar 3.2 Pressure Vessel

3.2.2 Pipa dan Insulasi

Pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana, dari sumber gas CH₄ menuju *pressure vessel* dihubungkan dengan pipa *stainless steel* dengan ukuran 1/4 inci. Pipa ini memiliki diameter luar (\varnothing_o) 6.35 mm dan diameter dalam (\varnothing_i) 3 mm. Panjang keseluruhan pipa yang digunakan pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana 7225 mm, sehingga volumenya 51070.52 mm³.

Insulasi pipa pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana yang digunakan terbuat dari asbestos. Diameter (\varnothing) 6 mm dan tebal insulasi 9 mm. *Thermal conductivity* adalah 0,04 W/m°C.

3.2.3 Pressure Transmitter

Pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan satu buah *pressure transmitter* yang digunakan untuk mengukur tekanan di *measuring cell* (bejana bertekanan). *Pressure transmitter* yang digunakan pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana memiliki spesifikasi, sebagai berikut :

Pabrikan	: General electric
Tipe	: Druck PTX 1400
<i>Pressure range</i>	: 0 – 40 bar absolut
Supply input	: 9 – 28 VDC
Analog Output	: 4 – 20 mA
<i>Accuracy</i>	: 0,15 %



Gambar 3.3 Pressure Transmitter

3.2.4 Termokopel

Pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan sepuluh buah termokopel yang digunakan untuk mengukur temperatur di *measuring cell*. Termokopel yang digunakan pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana memiliki spesifikasi, sebagai berikut :

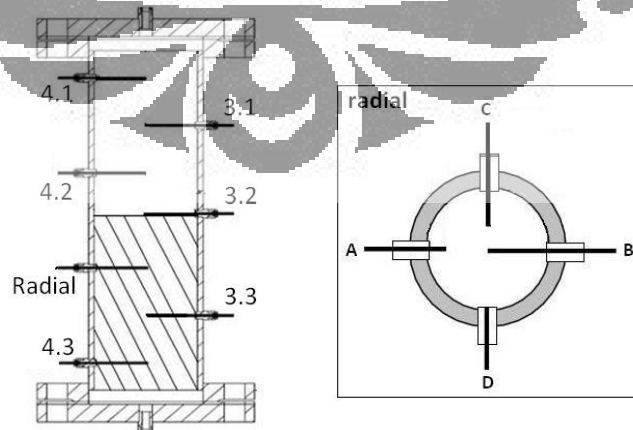
Jenis	: Kabel
Tipe termokopel	: K
Temperatur <i>range</i>	: - 200 - 1250°C
<i>Accuracy</i>	: Class I → 95 %



Gambar 3.4 Modifikasi Termokopel

Termokopel yang digunakan dimodifikasi untuk mencegah kebocoran yang terjadi melalui kabel termokopel yaitu ujung dari termokopel dimasukkan ke dalam tubing 1/8 inci sebagai selubung yang dilas menempel dengan sisi selubung tersebut.

Posisi termokopel pada *pressure vessel* :



Gambar 3.5 Posisi termokopel; axial (kiri) dan radial (kanan)

3.2.5 *Massflow Controller*

Massflow controller pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan sebagai alat yang dapat mengatur besar bukaan laju aliran yang melewatinya. *Massflow Controller* yang digunakan pada alat uji adsorpsi memiliki spesifikasi, sebagai berikut:

Pabrikan	: Brooks
Tipe	: FD1600-001
Gas	: CH ₄
Flowrate	: 0 – 25 slpm
Process Ambient Temperature	: 5 – 65°C



Gambar 3.6 Massflow Controller

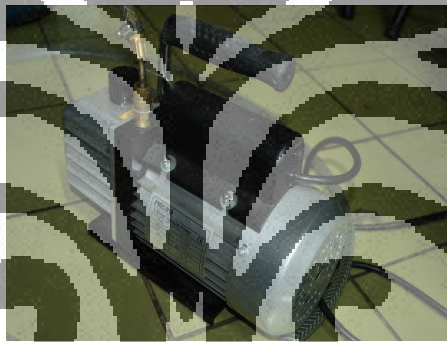
3.2.6 **Pompa Vakum**

Pada pengujian alat uji adsorpsi-desorpsi metana perlu dievakuasi unsur-unsur selain adsorbat dan adsorben. Oleh karena itu pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana diperlukan pompa vakum. Selain digunakan sebagai alat evakuasi, pompa vakum dapat digunakan untuk penelitian sistem adsorpsi-desorpsi yang membutuhkan tekanan dibawah tekanan atmosfer, seperti pada sistem pendingin.

Pompa vakum yang digunakan pada alat uji, memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Pabrikan	: Aruki
Tipe	: VP-1C-2
Jenis	: <i>1 Stage Vacuum Pump</i>
Vakum maksimal	: 10 Pa
Laju pemvakuman	: 1.5 CFM (50/60 Hz)
Konsumsi energi	: 220 V

Gambar pompa vakum yang digunakan dalam pengujian alat uji adsorpsi-desorpsi metana, sebagai berikut :



Gambar 3.7. Pompa Vakum

3.2.7 *Needle valve*

Pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan dua buah *needle valve* yang digunakan sebagai alat pembuka dan penutup serta sebagai pengontrol banyaknya aliran fluida yang mengalir. *Needle valve* merupakan salah satu jenis dari *valve*. *Needle valve* yang digunakan pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana memiliki spesifikasi, sebagai berikut:

Pabrikan	: WHITEY
Tipe	: SS-20VF4
Orifice	: 0.125 in or 3.2 mm
Stem type	: VEE

Connection size : *inlet* 1/4" female NPT and *outlet* 1/4" female NPT
 Tekanan : max 6000 PSI (41300 kPa)
 Temperatur : 1000°F



Gambar 3.8 Needle valve

3.2.8 Tube Flaring

Tube flaring atau sambungan pipa pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan untuk menyambungkan seluruh aliran pipa dalam sistem, yaitu menghubungkan antara tabung gas CH₄ menuju *measuring cell* (bejana bertekanan). *Tube flaring* yang digunakan pada alat uji memiliki spesifikasi, sebagai berikut :

Pabrikan : Swagelok
 Diameter luar (Ø) : 1/4 inchi

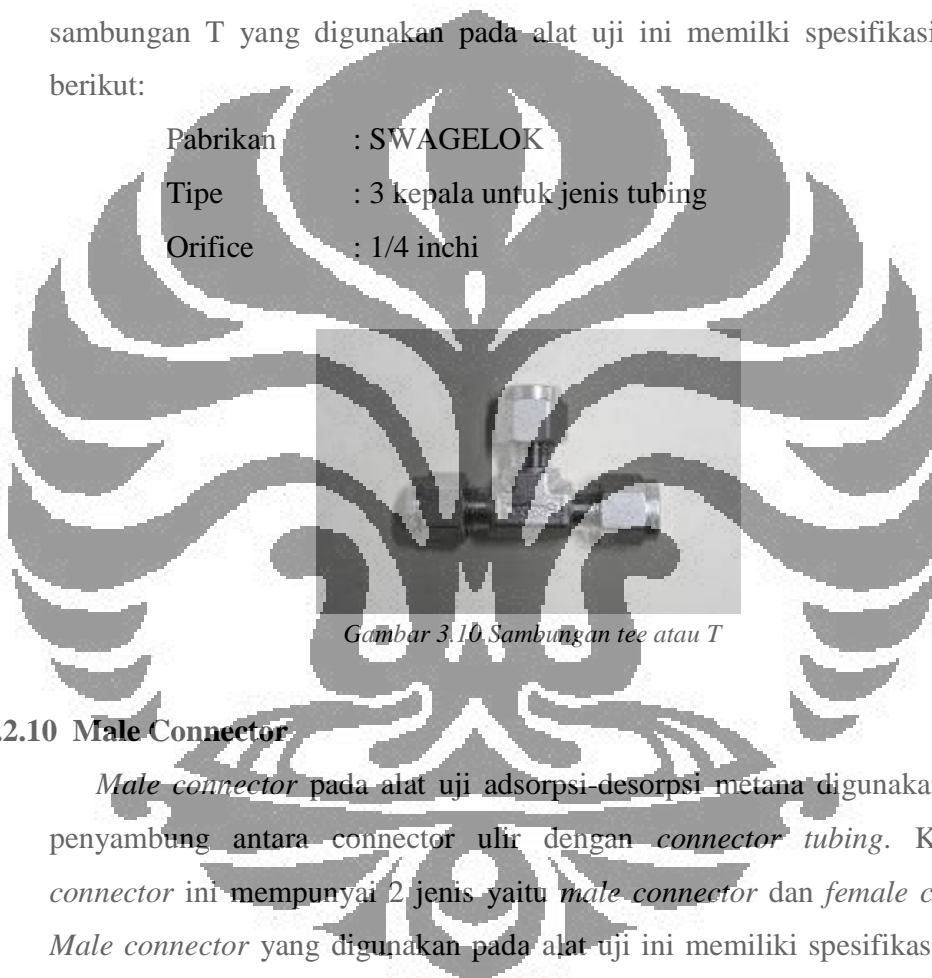


Gambar 3.9 Tube Flaring

3.2.9 Sambungan Tee

Sambungan *tee* atau sambungan T pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan sebagai terminal rangkaian pipa. Dalam suatu rangkaian pipa yang dimana input pipa yang bercabang dapat diubah output pipa menjadi single dan juga sebaliknya. Jenis dari sambungan *tee* ada banyak jenisnya, salah satunya adalah sambungan *tee* dengan 3 kepala untuk jenis tubing. Sambungan *tee* atau sambungan T yang digunakan pada alat uji ini memiliki spesifikasi, sebagai berikut:

Pabrikan	: SWAGELOK
Tipe	: 3 kepala untuk jenis tubing
Orifice	: 1/4 inchi



Gambar 3.10. Sambungan tee atau T

3.2.10 Male Connector

Male connector pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan sebagai penyambung antara connector ulir dengan *connector tubing*. Komponen *connector* ini mempunyai 2 jenis yaitu *male connector* dan *female connector*. *Male connector* yang digunakan pada alat uji ini memiliki spesifikasi, sebagai berikut:

Pabrikan	: SWAGELOK
Tipe	: male connector
Orifice	: 1/4"



Gambar 3.11 Male connector

3.2.11 Solenoid valve

Solenoid valve pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan untuk mengontrol buka atau tutup *valve* secara otomatis dengan bantuan suatu program untuk menjalankannya seperti program *labview*. *Solenoid valve* yang digunakan pada alat uji ini memiliki spesifikasi, sebagai berikut:

Pabrikan : JIOYOUNG PNEUMATIC CO LTD
 Tipe : SLG 5404-25 dan SLG 5404-15
 Pressure : 0-7.5 MPa
 PT : 1"(SLG 5404-25) dan 1/2"(SLG 5404-15)
 Volt : 220 AC DC 24 Volt $\pm 10\%$, 320 mA 7.6 Watt
 Orifice : 26(SLG 5404-25) dan 15(SLG 5404-15)
 Temperatur : 0⁰C-150⁰C



Gambar 3.12 Solenoid Valve

3.2.12 Drum

Drum pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan sebagai tempat untuk mengkondisikan temperatur menjadi *isothermal* dengan media air. Drum yang digunakan pada alat uji ini memiliki spesifikasi Volume hingga 100 liter

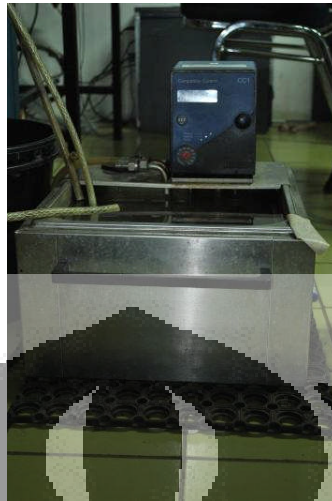


Gambar 3.13 Drum

3.2.13 Circulating Thermal Bath (CTB)

Circulating thermal bath (CTB) pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan untuk membuat air dalam keadaan *isothermal* sesuai dengan kondisi temperatur yang diinginkan. *Circulating thermal bath* ini juga dilengkapi dengan *pump* untuk mensirkulasi air sehingga tercapai temperatur yang sesuai dengan temperatur yang diinginkan. *Circulating thermal bath* yang digunakan pada alat uji ini memiliki spesifikasi, sebagai berikut:

Pabrikan	: HUBER
Tipe	: CC1
Operating temperatur	: -20 ⁰ C to 200 ⁰ C
Max operating temp. of refrigerator	: 50 ⁰ C
Heating power	: 2 kW
Cooling power	: 0.18 kW
Max delivery (pressure)	: 10 l/m
Bath volume	: 12 liters
Bath depth and height	: 150 mm and 215 mm



Gambar 3.14 Circulating thermal bath

3.2.14 Exhaust Fan

Exhaust fan pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan sebagai alat untuk membantu proses pembuangan gas baik didalam ruangan atau dari *out tubing gas*. Dengan adanya *exhaust fan* dapat mengurangi tingkat bahaya dari gas *flammable* dan dari gas beracun yang ada didalam ruangan. *Exhaust fan* yang digunakan pada alat uji ini memiliki spesifikasi, sebagai berikut:

Pabrikan	: PANASONIC
Tipe	: 25RUN3
Sumber tegangan	: 220 Volt 50Hz
Hembusan udara(m^3/mnt)	: 15.6(keluar) dan 10.7(masuk)
Arus(ampere)	: 0.131-0.167(keluar) dan 0.078-0.1(masuk)
Daya	: 27.46-39.94(keluar) dan 17.21-21.91(masuk)
Putaran per menit(RPM)	: 1046-1240(keluar) dan 899-1067(masuk)



Gambar 3.15 Exhaust fan

3.2.15 Regulator

Regulator pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan sebagai *valve* dan sekaligus mengontrol tekanan yang diinginkan secara manual. Di *regulator* terdapat 2 *pressure gauge* untuk membaca *pressure* di tabung dan *pressure* yang dikeluarkan. *Regulator* yang digunakan pada alat uji ini memiliki spesifikasi, sebagai berikut:

Pabrikan	: GENTEC
Max pressure di tabung	: 280 bar
Max pressure output	: 200 bar



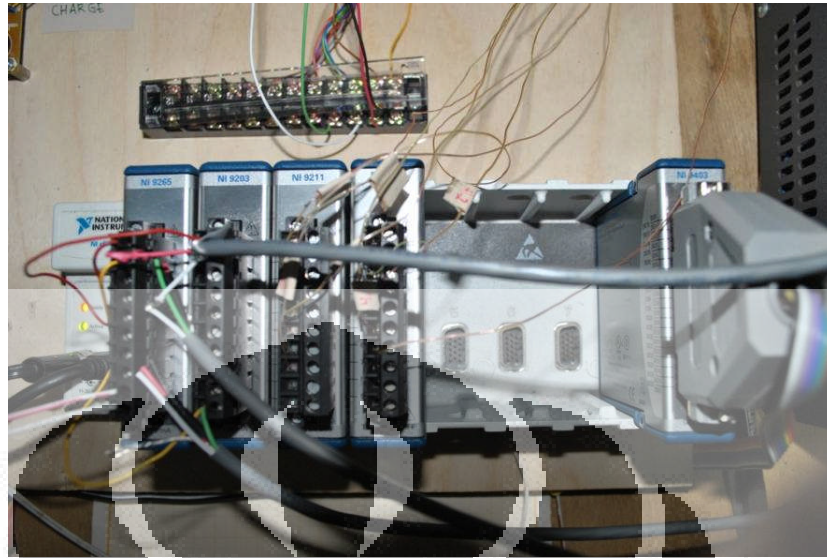
Gambar3.16 Regulator

3.2.16 Data Akusisi (DAQ)

Data akusisi digunakan untuk menerima sinyal atau *analog output* dari alat ukur, yaitu *pressure transmitter* dan termokopel serta kendali terhadap *solenoid valve* dan *coriolis flow meter*. Data *analog* yang diterima data akusisi dari alat ukur diubah menjadi data digital, sehingga mampu dibaca dan disimpan komputer.

Data akusisi terdiri dari dua bagian yaitu *analog input module* dan *converter*. *Analog input module* merupakan alat yang menangkap sinyal dari alat ukur, sedangkan *converter* merupakan alat yang menerima, mengubah sinyal dan menguatkan keluaran *analog input module* agar dapat diterima komputer melalui *communication port*. Pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana terdapat empat data akusisi, yaitu data akusisi untuk menerima keluaran termokopel, *pressure transmitter*, *solenoid valve* serta *coriolis flow meter* berupa mA. Perbedaan keluaran sinyal alat ukur tersebut mengakibatkan harus digunakan empat data akusisi. Data akusisi yang digunakan pada alat uji memiliki spesifikasi, sebagai berikut:

Pabrikan	: National Instrument
Tipe	: NI cDAQ 9174
Komponen	: modul NI9221, modul NI9203, modul NI9265, modul NI9403 dan slot kaki modul
Input accepted	: termokopel: J,K,T,E,R,S dan B current: ± 20 mA, 4- 20 mA
Jumlah channel	: 8
Accuracy	: $\pm 0,1\%$
Supply voltage	: 9-30 V dan 15 W max



Gambar 3.17 Data Akuisisi (DAQ)

3.2.17 Power Supply

Power supply digunakan untuk memberikan *supply* tegangan pada instrumen dan alat ukur serta pada *solenoid valve*. Pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana, *supply* tegangan diperlukan untuk memberikan tegangan untuk data akuisisi, *solenoid valve* dan *pressure transmitter*. Besar tegangan *supply* untuk kedua komponen tersebut tidak boleh melebihi tegangan maksimal komponen. *Power supply* yang digunakan pada alat uji memiliki spesifikasi, sebagai berikut :

Pabrikan	: Farnell
Tipe	: D30 2T
Jenis	: <i>Digital dual output power supply</i>
Output	: arus (A) dan tegangan (V)



Gambar 3.18 Power Supply 1

Tipe : GZT-H300S24
 Jenis : AC-DC
 Input : 176V-264V/3.8A max 50/60 Hz
 Output : +24.0V===12.5A



Gambar 3.19 Power supply 2

3.2.18 Heater

Heater pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana ini digunakan sebagai alat pemanas *measuring cell* (bejana bertekanan) saat akan melakukan proses *degassing* sehingga substansi yang masih tersisa di dalam karbon aktif dapat dilepas. Pemanasan dilakukan dengan menjaga temperatur konstan sehingga digunakan temperatur *controller*.

Berikut adalah spesifikasi untuk *heater* :

Jumlah : 3 buah

Daya : 500 W

Voltase : 220 V



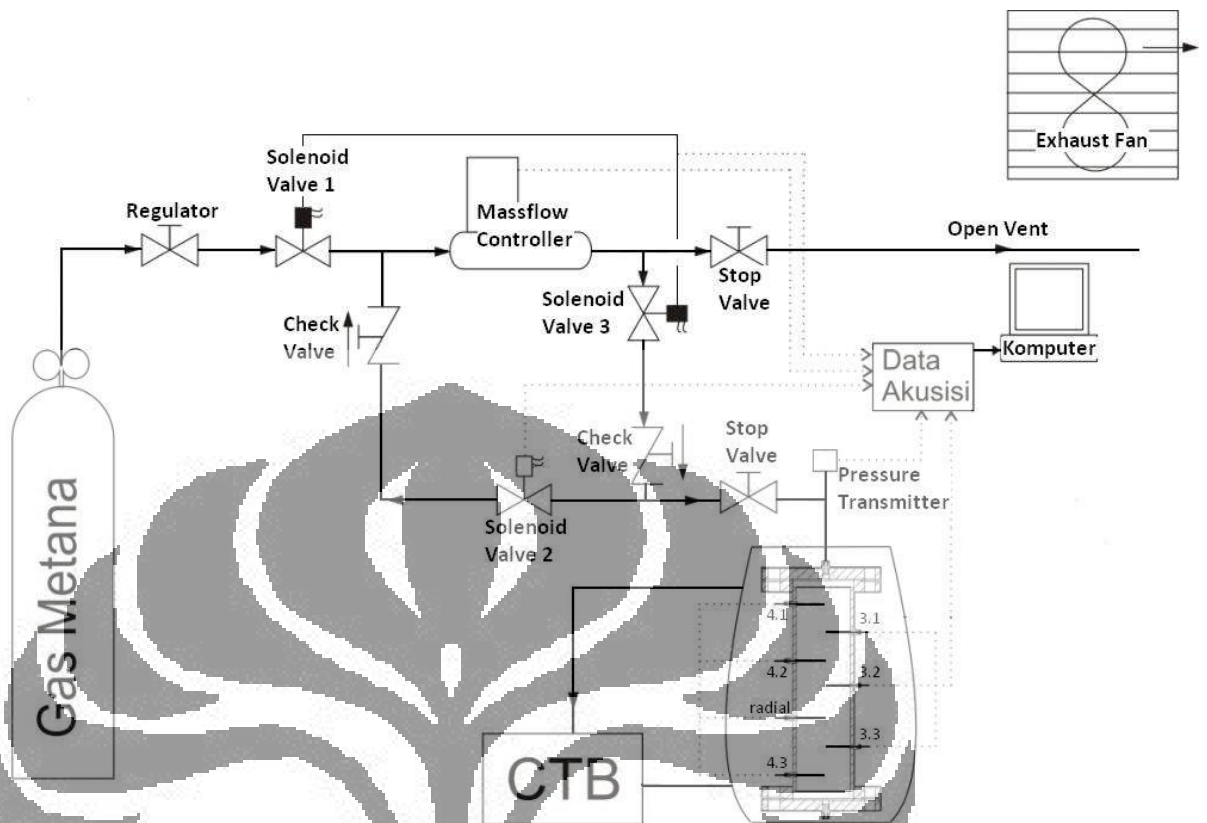
Gambar 3.20 Heater

3.2.19 Pemipaan

Skematik yang digunakan untuk penelitian adsorpsi metana ini berdasarkan referensi dari jurnal, akan tetapi terdapat perbedaannya karena menyesuaikan dengan kondisi lingkungan di laboratorium dan tujuan utama dari penelitian ini.



Gambar 3.21 Pemipaan alat uji Adsorpsi-Desorpsi Metana



Gambar 3.22 Diagram Instrumentasi dan Pemipaan

Tabel 3.1 Buka-tutup Solenoid Valve

Mode	SV ₁	SV ₂	SV ₃	Stop Valve
Charging	ON	OFF	ON	OFF
Discharging	OFF	ON	OFF	ON
Normal	OFF	OFF	OFF	OFF

Gambar 3.2 merupakan sistem secara umum untuk sistem pemipaan. Dalam sistem tersebut dibagi menjadi dua sistem yaitu adsorpsi ketika terjadi pengisian (inlet) gas metana ke dalam bejana bertekanan dan desorpsi ketika pembuangan (outlet) gas metana dari bejana bertekanan ke luar lingkungan.

Jalur inlet dan outlet melewati Massflow controller agar dapat dilihat laju aliran massa yang lewat, sehingga dapat diketahui volume gas yang masuk ke dalam tabung dan ke luar dan dapat diketahui terjadi perbedaan antara gas yang masuk dan keluar. Digunakan *check valve*, untuk memastikan bahwa aliran tidak berbalik arah.

Storage tank dimasukkan ke dalam bak berisi air dan digunakan *circulating thermal bath* (CTB) agar terjadi sirkulasi air di dalam bak, sehingga temperatur dalam bak dapat dikontrol dan dijaga kestabilannya, karena proses adsorpsi yang digunakan yaitu proses adsorpsi isoterm.

3.2.20 Instrumentasi

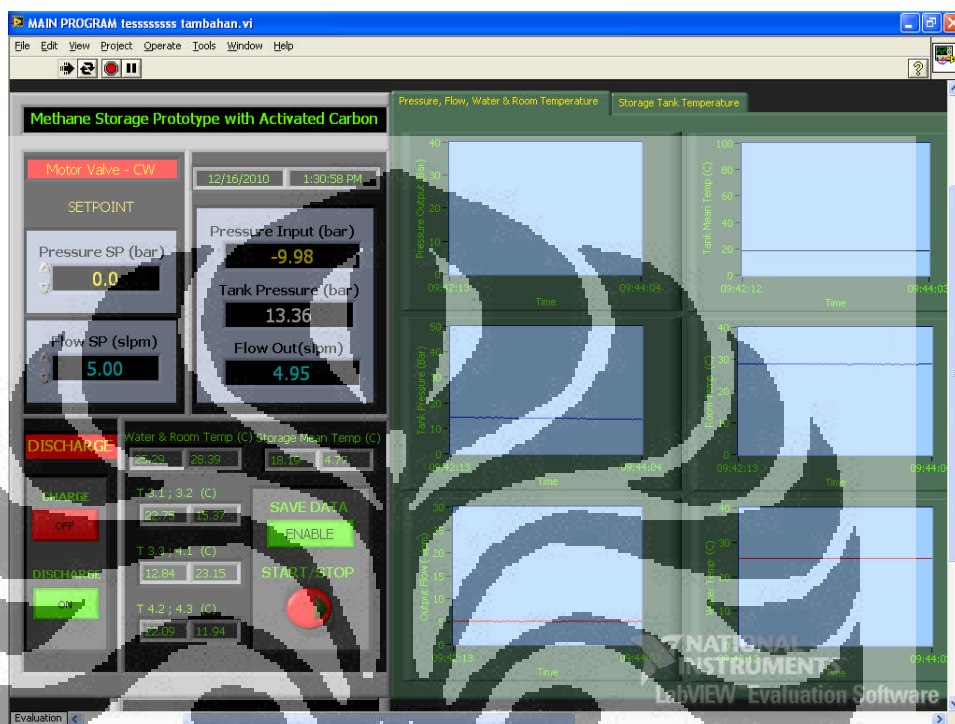
Pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan teknik instrumentasi pada alat ukur yang dilakukan untuk mengukur tekanan dan temperatur serta kendali buka-tutup *solenoid valve*. Instrumentasi dapat diartikan sebagai alat atau piranti (device) yang dipakai dalam pengukuran dan pengendalian suatu sistem. Secara umum instrumentasi mempunyai 3 fungsi utama:

- a. sebagai alat ukur
- b. sebagai alat analisa data
- c. alat kendali

Pada perancangan alat uji adsorpsi-desorpsi metana, teknik instrumentasi digunakan sebagai alat ukur, sebagai alat analisa data, dan juga sebagai alat kendali. Olehkarena itu, teknik instrumentasi digunakan karena pengambilan data tekanan, mass flow dan temperatur dilakukan per detik yang tidak mungkin dilakukan secara manual, analisis yang dilakukan berdasarkan perubahan tekanan dan temperatur per detik, dan juga komponen *solenoid valve* yang dikendalikan dengan alat instrumentasi.

Pengukuran menggunakan *pressure transmitter*, *massflow controller* dan termokopel serta kendali *solenoid valve* memerlukan perangkat lunak (software) untuk membaca, mengendalikan dan menyimpan hasil pengukuran. Perangkat lunak ini mudah untuk dibuat dan dioperasikan (user friendly), hal ini memungkinkan orang dapat menggunakannya. Pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan perangkat lunak *labview 8.6* sebagai pembaca, kendali dan penyimpanan data hasil pengujian. Program pembacaan dan penyimpanan menggunakan perangkat lunak *labview 8.6* mudah dibuat dan dioperasikan.

Adapun program pembacaan, kontrol dan penyimpanan data hasil pengujian alat uji adsorpsi-desorpsi metana menggunakan *labview* 8.6, sebagai berikut:



Gambar 3.23 Display Labview 8.6

3.2.21 Karbon Aktif

Karbon aktif yang digunakan adalah karbon aktif berbentuk granul dengan diameter 1-2 mm yang diproduksi lokal di Tangerang, terbuat dari batu bara. Berikut ini merupakan tabel *properties data* karbon aktif lokal yang digunakan:

Tabel 3.2 Data *properties* karbon aktif

<i>Surface Area</i>	m ² /gr	752.01
<i>Total Pore Volume</i>	cc/gr	4.030 ^e -01
<i>Jari Pori</i>	Å	2.14345e+01 Å



Gambar.3.24 Activated carbon

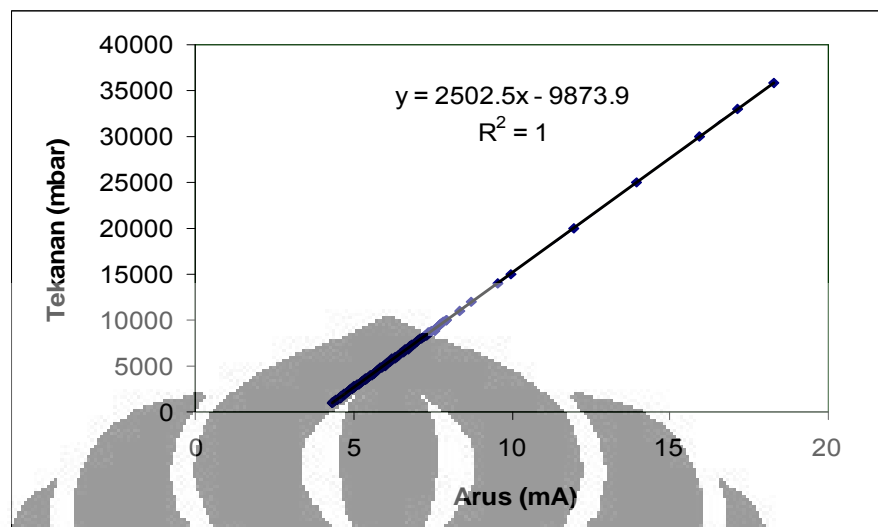
3.3 Verifikasi Alat Ukur

Verifikasi alat dilakukan untuk mengetahui kesalahan (*error*) pembacaan alat ukur. Verifikasi alat ukur, yaitu membandingkan alat ukur yang digunakan pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana dengan alat ukur standar. Bertujuan untuk mendapatkan hasil pengukuran yang valid, alat ukur yang diverifikasi adalah *pressure transmitter*, dan termokopel.

3.3.1 Verifikasi *Pressure Transmitter*

Pada verifikasi alat ukur tekanan dengan menggunakan *pressure transmitter* dilakukan konversi arus menjadi skala tekanan. Verifikasi *pressure transmitter* dilakukan dengan menggunakan alat Druck DPI 104-K0394.

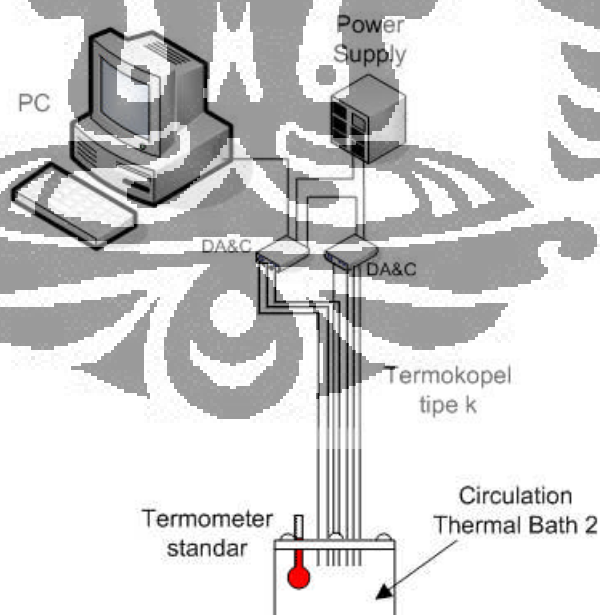
Data kalibrasi yang telah dilakukan dibuat persamaan garis melalui microsoft excel, antara tekanan yang diberikan dengan arus yang ditunjukkan oleh *pressure transmitter*. Grafik yang terbentuk adalah garis linier yang didapatkan dari perbandingan tekanan dan arus *pressure transmitter*. Gambar grafik verifikasi *pressure transmitter*, sebagai berikut :



Gambar 3.25 Grafik kalibrasi pressure transmitter di measuring cell (bejana bertekanan)

3.3.2 Verifikasi Termokopel

Pada verifikasi alat ukur temperatur dengan menggunakan termokopel dilakukan verifikasi temperatur pembacaan termokopel dengan skala temperatur standar. Gambar skematik verifikasi termokopel, sebagai berikut :

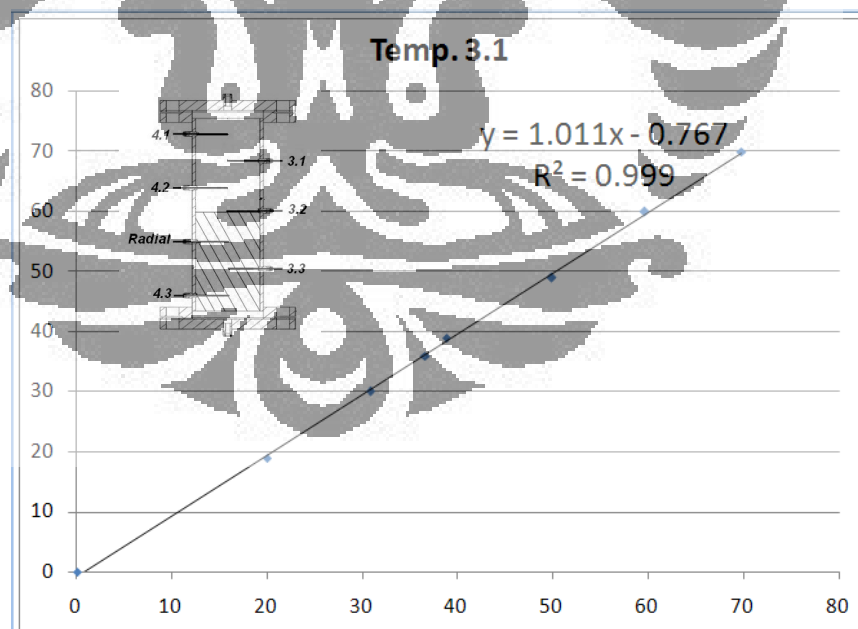


Gambar 3.26 Skematik proses verifikasi termokopel

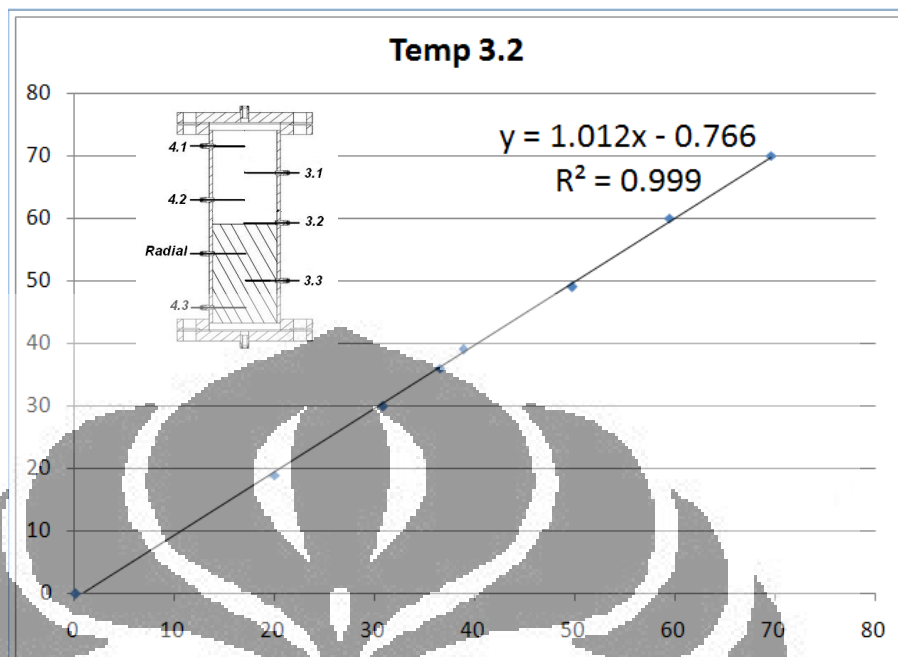
Kalibrasi dilakukan dengan mengambil data pembacaan temperatur termokopel terhadap pembacaan skala temperatur air raksa (termometer standar). Proses verifikasi dilakukan dengan mengatur temperatur *circulating thermal bath* (CTB) pada temperatur tertentu dimana termometer air raksa terbaca dan dalam keadaan stabil, kemudian data temperatur dari pembacaan termokopel 1 sampai dengan 10, yang terbaca komputer dicatat.

Data perbedaan termometer air raksa dan termokopel digambar dalam grafik. Grafik yang terbentuk adalah garis linier yang didapatkan dari perbandingan pembacaan termokopel dan pembacaan termometer air raksa, maka didapatkan persamaan matematis garis linier. Persamaan matematis tersebut yang digunakan untuk verifikasi pembacaan termokopel.

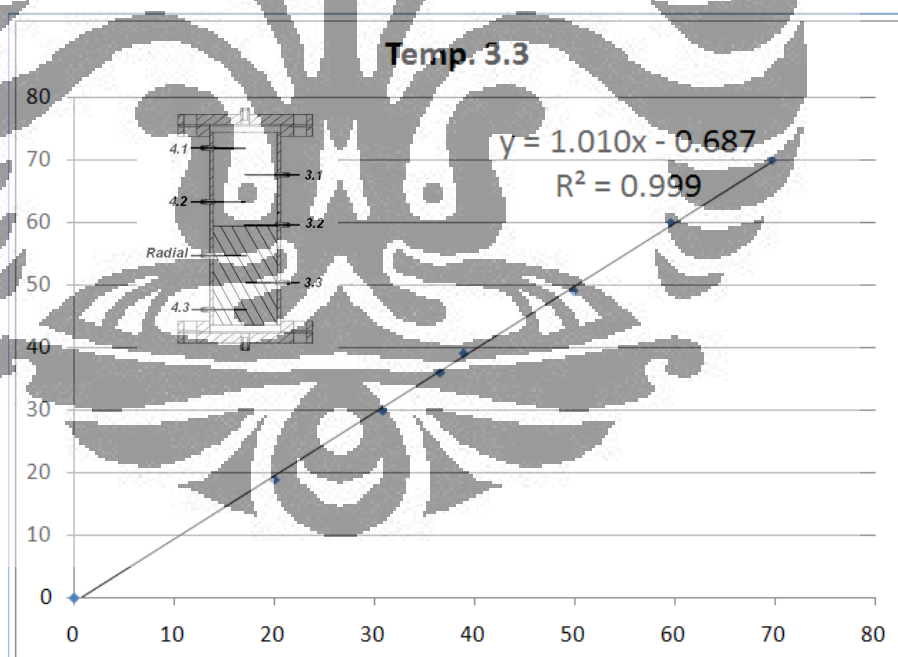
Semua termokopel diletakkan ke dalam pressure vessel untuk mengukur temperatur di dalam tabung secara random. Digunakan dua buah modul untuk membaca tujuh termokopel, berikut adalah grafik verifikasi termokopel berdasarkan penempatan termokopel di dalam tabung dan diberi nama berdasarkan peletakan termokopel di data akusisi.



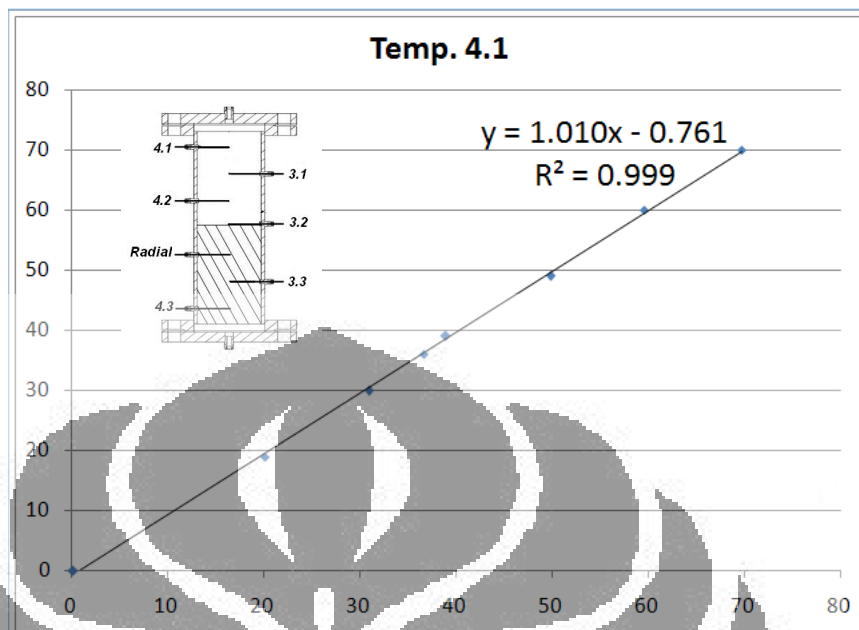
Gambar 3.27 Grafik Kalibrasi Termokopel 3.1



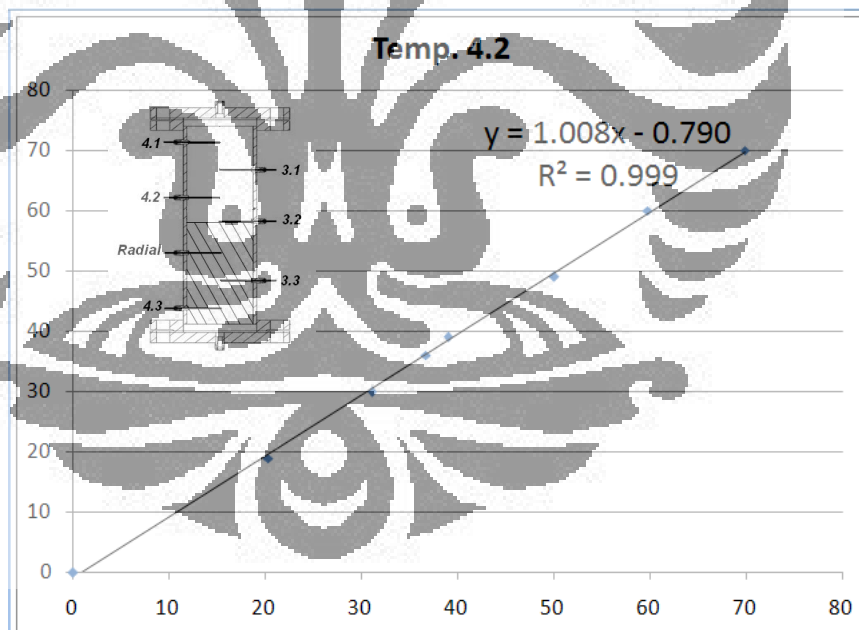
Gambar 3.28 Grafik Kalibrasi Termokopel 3.2



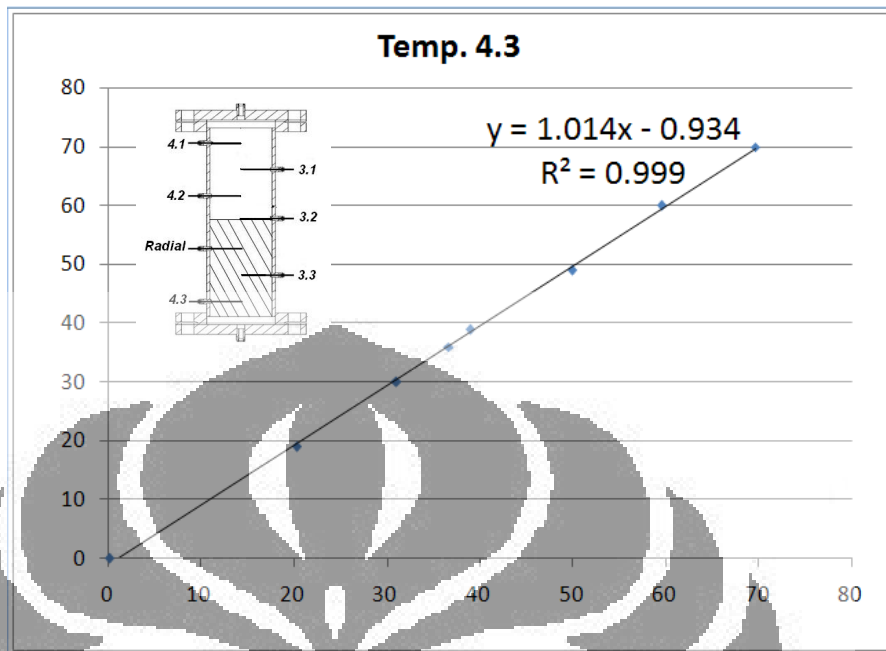
Gambar 3.29 Grafik Kalibrasi Termokopel 3.3



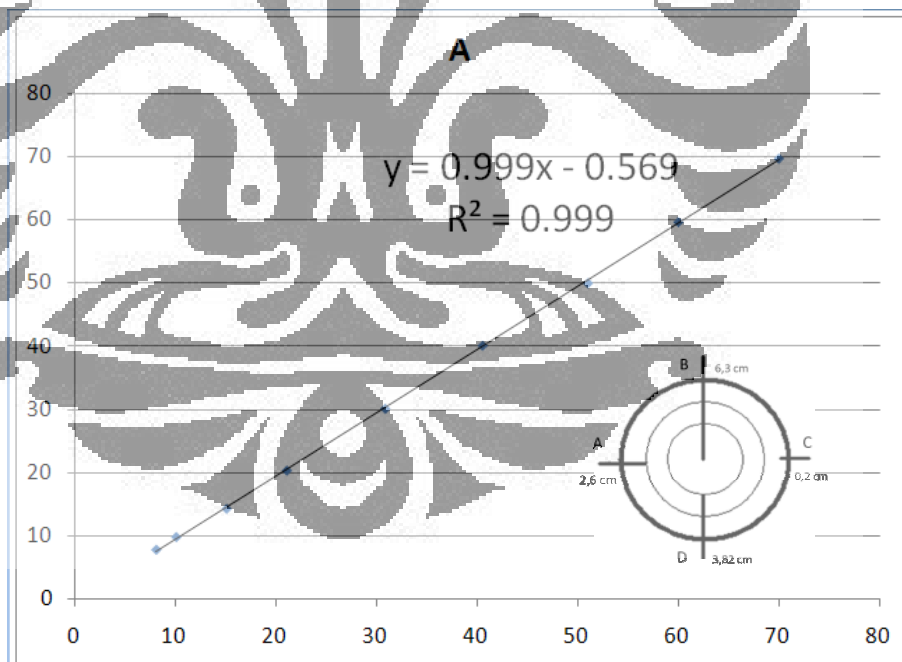
Gambar 3.30 Grafik Kalibrasi Termokopel 4.1



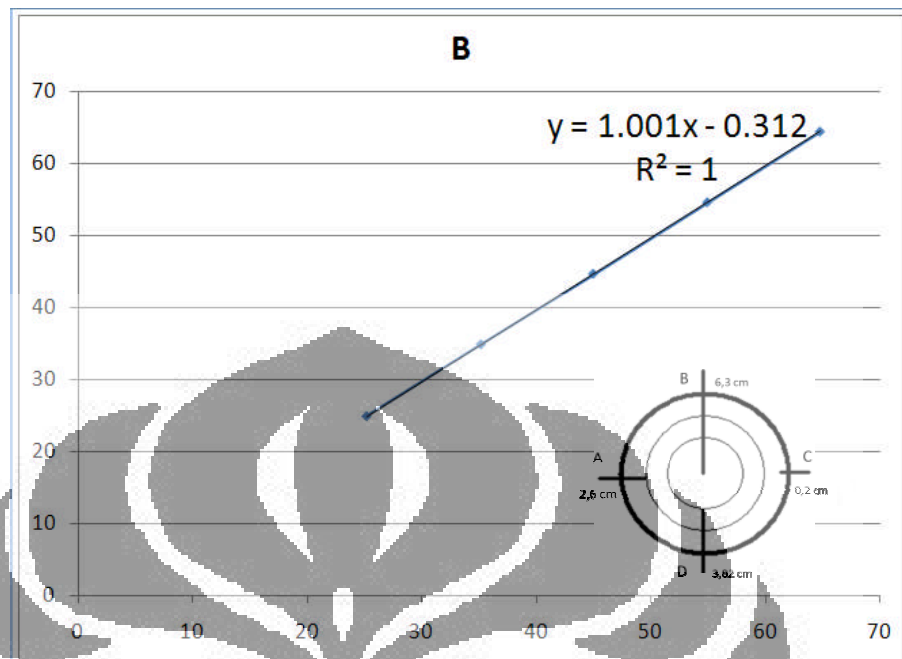
Gambar 3.31 Grafik Kalibrasi Termokopel 4.2



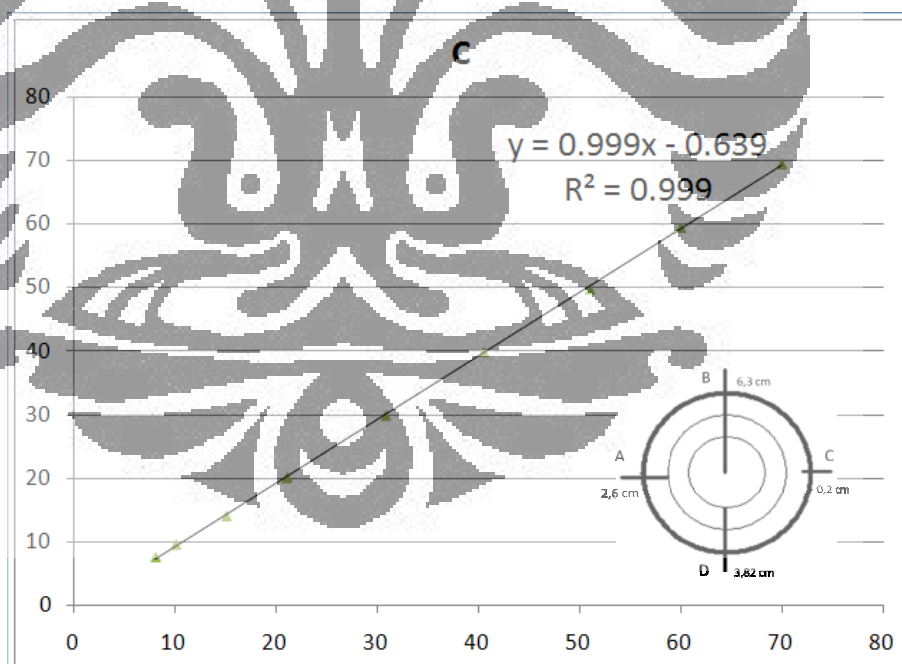
Gambar 3.32 Grafik Kalibrasi Termokopel 4.3



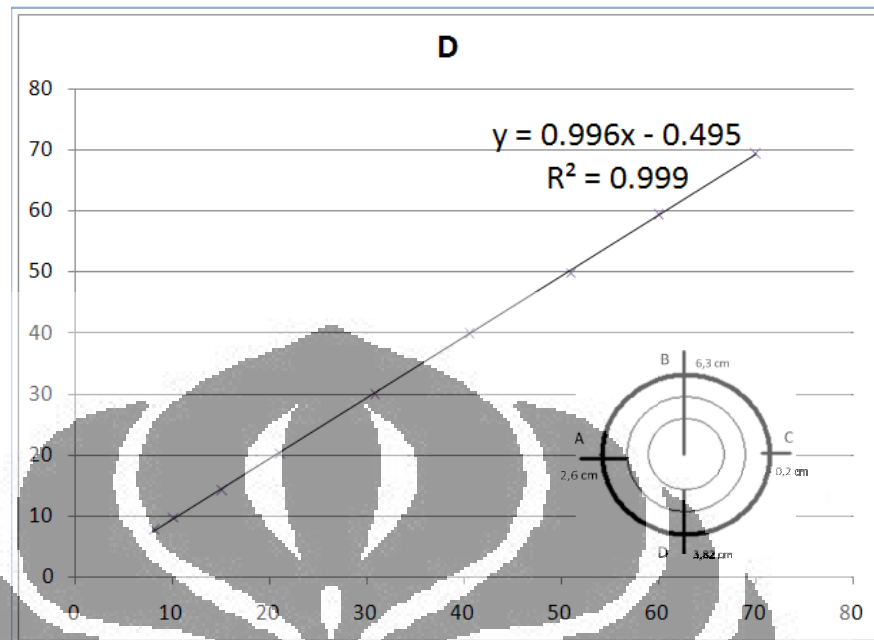
Gambar 3.33 Grafik Kalibrasi Termokopel A



Gambar 3.34 Grafik Kalibrasi Termokopel B



Gambar 3.35 Grafik Kalibrasi Termokopel C



Gambar 3.36 Grafik kalibrasi termokopel D

3.4 Preparasi Sampel

3.4.1 Dry Sorbent

Adsorben adalah zat atau material yang mempunyai kemampuan untuk mengikat dan mempertahankan cairan atau gas didalamnya dan adsorbat adalah substansi dalam bentuk cair atau gas yang terkonsentrasi pada permukaan adsorben (Suryawan, Bambang, 2004). Dibutuhkan proses pembuatan dry sorbent berarti mengeringkan adsorben, yaitu karbon aktif yang akan digunakan untuk menghilangkan substansi tersebut dalam hal ini yaitu uap air serta mengetahui berat adsorben yang akan digunakan dalam penelitian.

Berikut metode yang digunakan untuk dalam proses dry sorbent:

- Timbang karbon aktif yang akan dipanaskan dengan timbangan dengan tingkat kepresisian tinggi untuk mendapatkan berat awal sampel.
- Gunakan heater dan temperatur controller untuk memanaskannya agar temperatur dapat terjaga konstan, yaitu sekitar 200°C, selama dua jam.

Lamanya pemanasan tergantung dari tempat yang digunakan dan massa dari karbon aktif.

- Selama pemanasan dilakukan pengadukan secara perlahan agar panas merata ke seluruh karbon aktif dan mempercepat pemanasan.
- Diharapkan temperatur di permukaan karbon aktif berkisar antara 95 – 100 °C, karena air yang terkandung sudah menguap.
- Segera timbang kembali massa karbon aktif yang telah dipanaskan
- Karbon aktif yang telah dipanaskan dimasukkan ke dalam pressure vessel.

Massa karbon aktif yang diharapkan adalah 1.833 g, sesuai dengan massa karbon aktif pada penelitian sebelumnya. Dengan demikian dapat dibandingkan mana karbon aktif yang memiliki daya adsorpsi lebih baik, antara karbon aktif komersil Carbotech dengan karbon aktif batu bara lokal.



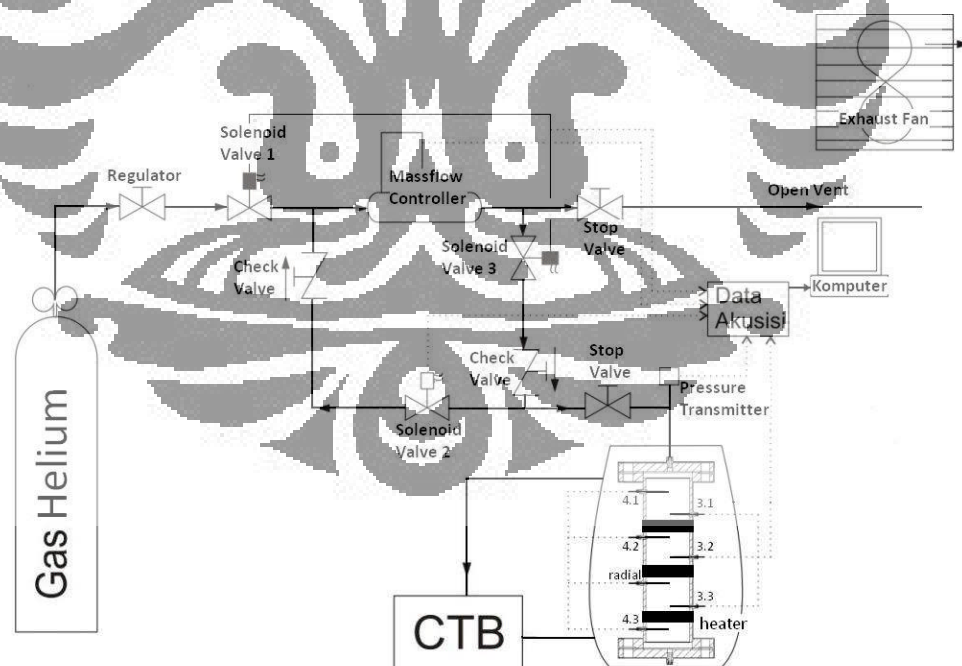
Gambar 3:37 Tinggi Karbon dalam Tabung

3.4.2 Proses Degassing

Proses degassing adalah suatu proses pengeluaran zat kotor atau zat yang tidak diinginkan sehingga tidak ada zat yang tersimpan didalam karbon aktif (Saha, Bidyut Baran et al, 2006).

Tahapan proses degassing:

1. Panaskan *Pressure vessel* dengan menggunakan heater dengan temperatur sekitar 150°C selama 1 jam (Dawoud dan Aristov, 2003)
2. Vakum tabung dengan menggunakan pompa vakum selama 1,5-2 jam.
3. Setelah itu isi tabung menggunakan gas Helium sebanyak 3-4 bar selama 1-1,5 jam. Gas Helium tersebut berfungsi sebagai pengangkut zat kotor yang tidak diinginkan yang berada didalam dan disekitar rongga-rongga karbon aktif.
4. Lalu vacuum kembali tabung dengan menggunakan pompa vacuum selama $\frac{1}{2}$ jam. Dalam proses pengvakuman ini semua zat pengotor yang tidak diinginkan termasuk gas Helium akan terbuang ke lingkungan sehingga kondisi didalam tabung dan karbon aktif tidak ada lagi sisa-sisa zat pengotor yang tidak diinginkan.
5. Lakukan semua proses tersebut sebanyak 4 kali agar pemurnian karbon aktif dan didalam tabung tidak ada lagi sisa zat pengotor yang tidak diinginkan.



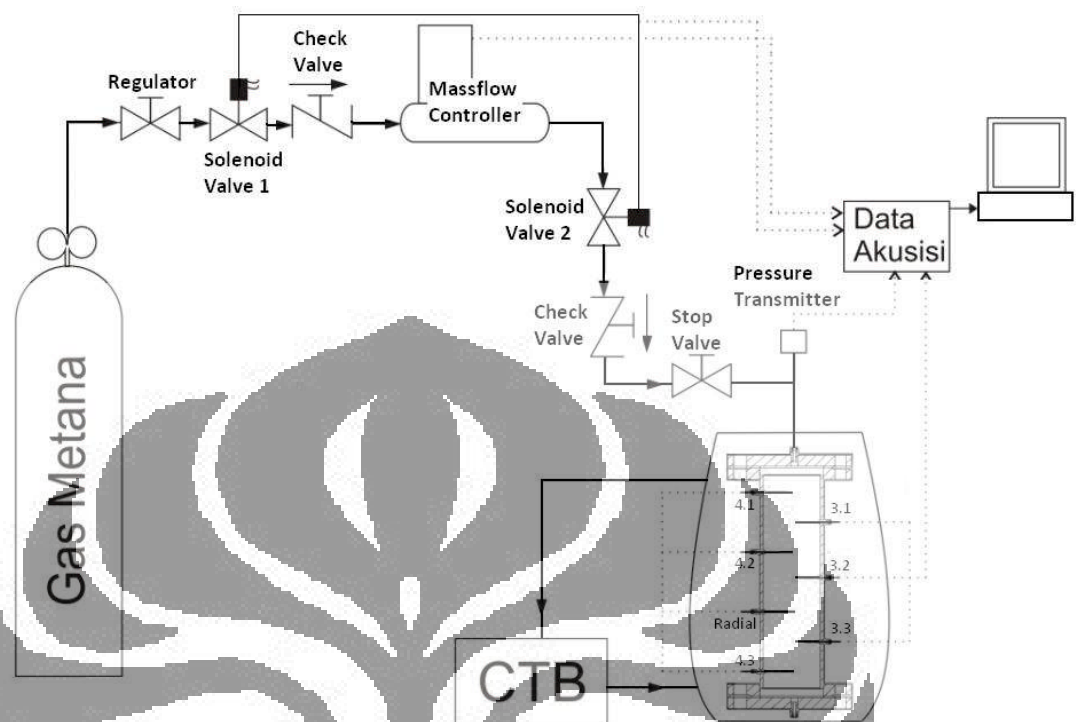
Gambar 3.38 Skema Proses Degassing

3.5 Proses Adsorpsi

Berikut ini adalah prosedur pengujian karakteristik adsorpsi isothermal:

1. Pengujian dimulai dengan melakukan proses degassing.
2. Circulating thermal bath (CTB) dioperasikan untuk menaikkan dan kemudian menjaga temperatur pada *measuring cell* (bejana bertekanan) konstan $30 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$.
3. Setelah temperatur pada *measuring cell* (bejana bertekanan) mencapai 30°C dan konstan pada temperatur tersebut, *solenoid valve* charge dibuka dengan menggunakan kendali data akuisisi dari komputer sehingga adsorbat (CH_4) masuk menuju *measuring cell* (bejana bertekanan) sampai pada tekanan adsorpsi 4 MPa dan bila melebihi batas tersebut maka secara otomatis *solenoid valve* akan tertutup sendirinya.
4. Pengambilan data penyerapan dimulai ketika tekanan dan temperatur pada *measuring cell* (bejana bertekanan) dalam keadaan tidak stabil karena terjadi kenaikan tekanan disertai dengan kenaikan temperatur. Dan apabila tekanan dan temperatur stabil berarti proses adsorpsi sudah berakhir.

Setelah proses selesai dilakukan, data tekanan, temperatur dan *flow rate* ketika pengujian akan tercatat pada komputer. Data tersebut dianalisis dengan menggunakan persamaan kesetimbangan massa.



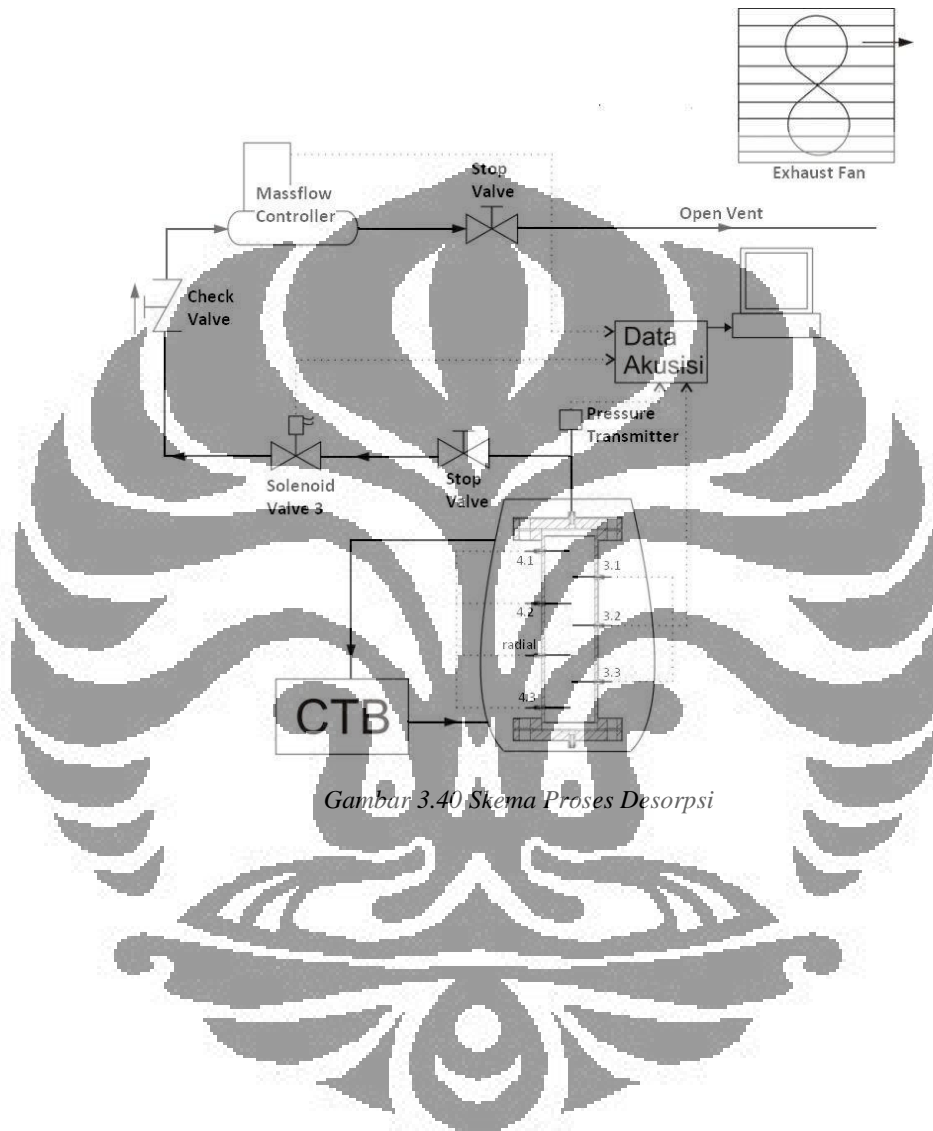
Gambar 3.39 Skema Proses Adsorpsi

3.6 Proses Desorpsi

Berikut ini adalah prosedur pengujian karakteristik desorpsi isotermal:

1. Membuka katup *solenoid valve* discharging melalui data akusisi yang telah diprogram kerjanya dan akan mengalir melewati *coriolis flow meter* sehingga dapat diketahui aliran massanya.
2. Gas Metana (CH_4) yang tidak terserap oleh karbon aktif akan terbuang melalui jalur *outlet* pipa keluar ke lingkungan dan exhaust fan yang telah dinyalakan akan membantu proses keluaran gas Metana (CH_4) baik didalam ruangan penelitian atau jalur *outlet* pipa.
3. Tunggu hingga tekanan yang berada di *measuring cell* (bejana bertekanan) turun dan stabil.

Proses pembuangan disertai dengan penurunan temperatur yang berarti proses endoterm dan penurunan tekanan, hingga keadaan stabil, maka proses berakhir.



Gambar 3.40 Skema Proses Desorpsi

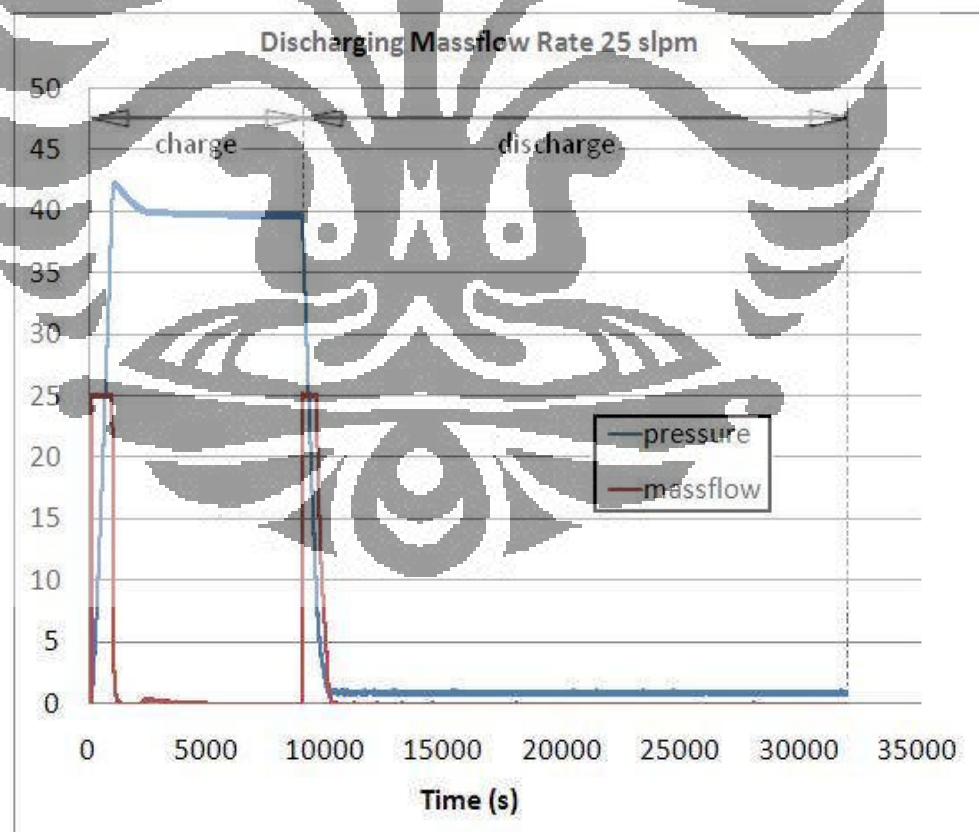
BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Variasi Pengambilan Data

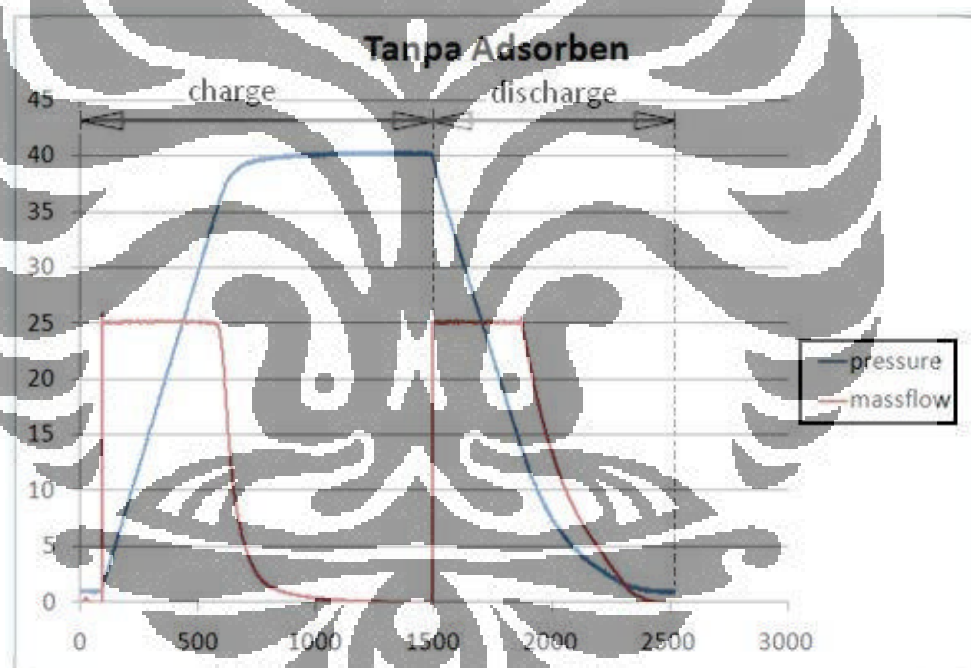
Penelitian ini merupakan penelitian yang bertujuan untuk mendapatkan karakteristik proses desorpsi akibat pengaruh dari bukaan laju aliran massa yang berbeda-beda, juga pengaruh proses adsorpsi terhadap temperatur ruang storage tank dan karbon aktif. Oleh karena itu, dengan melakukan berbagai variasi pengambilan data diharapkan dapat mengetahui karakteristik keduanya, dalam berbagai macam kondisi.

Percobaan dimulai dengan proses *charge* gas metan sebanyak 42 bar, dengan laju aliran massa *charging* 25 slpm, pada suhu isothermal 30 °C.



Gambar 4.1 Adsorpsi-desorpsi gas metan dengan laju aliran massa discharge 25 slpm

Dapat dilihat, tekanan pada saat *charging* mencapai 42 bar, namun selang beberapa waktu kemudian tekanan menuju angka 40 bar dan stabil sampai keadaan setimbang (suhu *storage tank* kembali isothermal), sebelum desorpsi. Pada saat itu gas metan sedang diadsorpsi oleh adsorben karbon aktif, sehingga terjadi penurunan tekanan. Penurunan berlangsung beberapa lama hingga molekul-molekul gas metan mengisi seluruh pori-pori karbon. Pada gambar 4.2, grafik percobaan dengan menggunakan gas nitrogen, tekanan stabil di angka 40 bar dari mulai awal *charging* sampai keadaan setimbang (suhu didalam *storage tank* sama dengan suhu isothermal) sebelum desorpsi. Tidak adanya penurunan tekanan disini, dikarenakan tidak adanya adsorben didalam *storage tank* pada percobaan tersebut, sehingga tidak terdapat penyerapan seperti pada *storage tank* dengan adsorben.

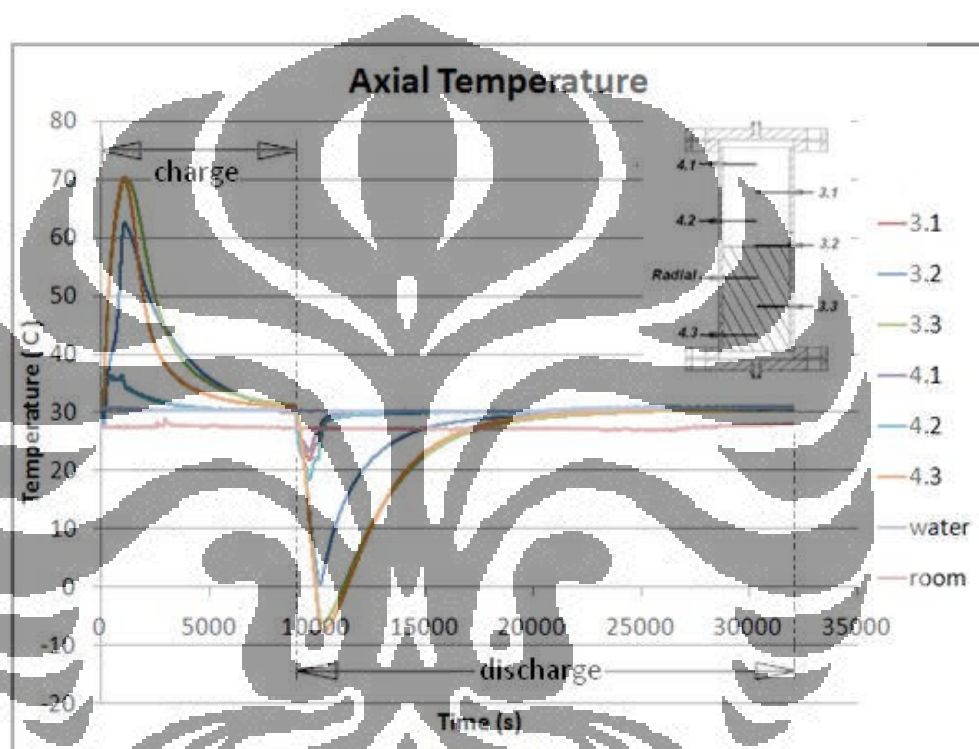


Gambar 4.2 Pengujian tanpa Adsorben dengan menggunakan gas nitrogen

4.1.1 Pengaruh adsorpsi-desorpsi terhadap temperatur dalam *Storage Tank*

Proses adsorpsi-desorpsi gas metan pada karbon aktif, atau pada sebuah sistem ANG mengakibatkan naik-turunnya temperatur pada ruang *storage tank*. Pada saat *charging*, temperatur dengan cepat naik sampai ke titik maksimum, dalam waktu singkat setelah *charging* gas metan kedalam *storage tank*. Proses sampai nilai maksimum ini hanya merupakan 1% dari

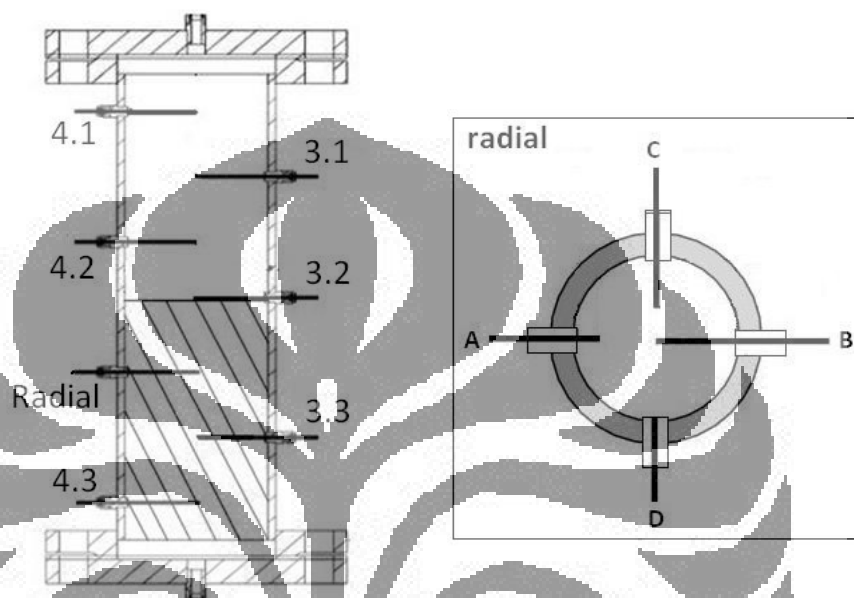
keseluruhan proses *charging*. Temperatur ruang *storage tank* naik hingga mencapai suhu 70 °C, kenaikannya sampai 40 °C dari suhu awal sebelum *charge*. Kemudian secara perlahan-lahan temperatur turun sampai pada suhu isothermal. Sedangkan pada saat *discharging* temperatur ruang *storage tank* turun hingga mencapai angka -8 °C, penurunannya sampai 38 °C dari suhu awal sebelum *discharge*. Lalu kembali secara perlahan-lahan ke suhu isothermal., seperti terlihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Temperatur vs Time pada proses adsorpsi-desorpsi

Pada gambar 4.3 juga bisa dilihat temperatur ruang *storage tank* memiliki nilai yang berbeda-beda pada setiap titik. Penelitian ini menggunakan sepuluh buah termokopel sebagai pembaca temperatur yang disebar pada titik-titik tertentu. Tata letak termokopel terbagi menjadi 2 bagian, axial dan radial. Enam buah termokopel untuk bacaan temperatur diposisikan axial, dimana semua titik termokopel berada pada pusat (*core*) ruang *storage tank*, dan sisanya empat buah termokopel diposisikan acak pada sumbu radial. Pada gambar 4.4 terlihat beberapa termokopel yang tercelup kedalam karbon aktif, diantaranya termokopel 3.2, 3.3, dan 4.3,

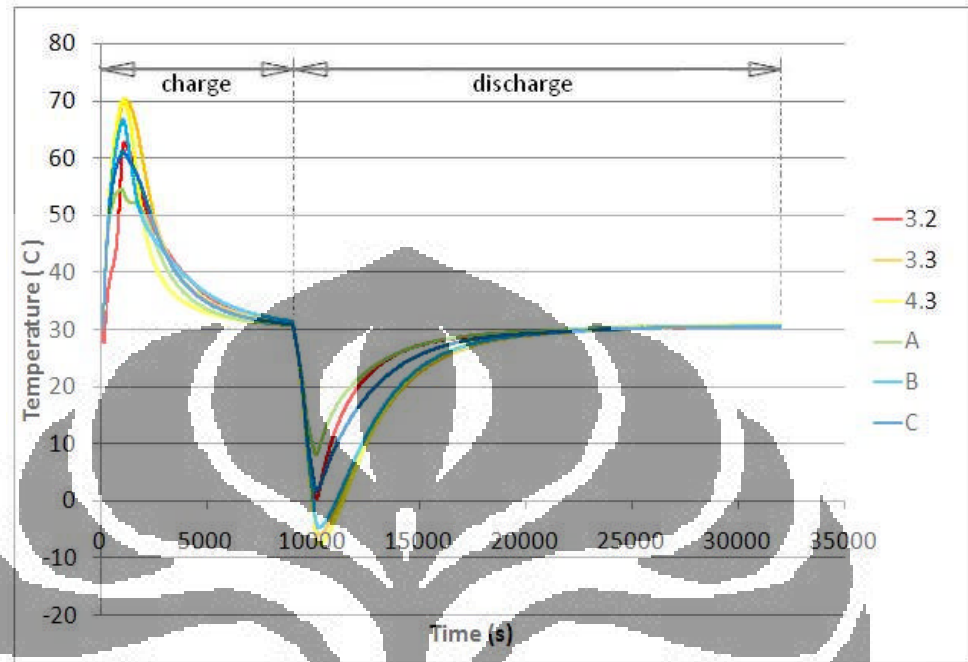
serta termokopel pada posisi radial, A, B dan C (termokopel D tidak tercelup karena posisinya yang sejajar dengan dinding *storage tank*). Termokopel 3.1, 4.1 dan 4.3 mewakili pembacaan temperatur ruang pada *storage tank*. Sedangkan termokopel D pada sumbu radial mewakili pembacaan temperatur pada dinding *storage tank*.



Gambar 4.4 Posisi Termokopel pada Storage Tank, (Kiri) Axial Termokopel, (Kanan) Radial Termokopel

Kenaikkan dan penurunan temperatur saat proses adsorpsi-desorpsi berbeda-beda di setiap titik. Kenaikkan dan penurunan paling tinggi dicapai oleh temperatur yang tercelup karbon aktif, yaitu termokopel 3.2, 3.3, 4.3, A, B, dan C. Kenaikkan hingga mencapai titik tertinggi tersebut terjadi karena proses adsorpsi disertai dengan pengeluaran panas adsorpsi (eksoterm), sedangkan penurunan hingga mencapai titik terendah tersebut terjadi karena peristiwa desorpsi merupakan proses endoterm. Grafik temperatur pada termokopel tercelup karbon aktif bisa dilihat pada gambar 4.5. Terlihat bahwa titik dengan simpangan perbedaan temperatur terbesar adalah termokopel 3.3, dan terkecil adalah Termokopel A dengan simpangan masing-masing $\pm 40^{\circ}\text{C}$ dan $\pm 25^{\circ}\text{C}$. Jika dilihat dari posisinya, dimana termokopel 3.3 terletak pada titik tengah karbon aktif sedangkan termokopel A yang terletak jauh dari titik pusat jari jari tabung (*core*) dan

titik tengah karbon, dapat diambil kesimpulan bahwa distribusi pengeluaran panas adsorpsi semakin ke pusat akan semakin panas (gambar 4.6).



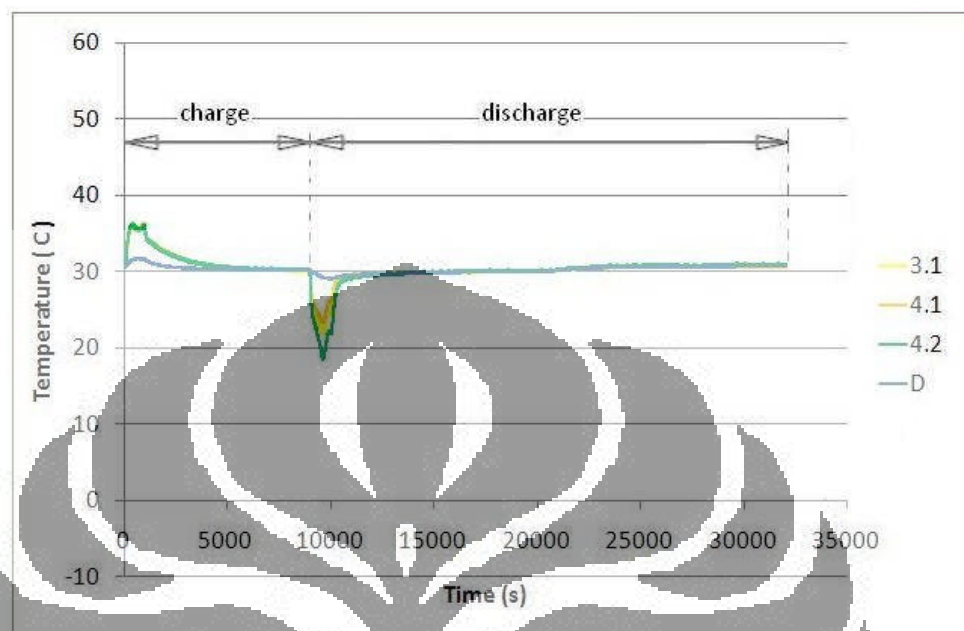
Gambar 4.5 Temperature vs Time, Termokopel tercelup karbon aktif



Gambar 4.6 Ilustrasi distribusi panas adsorpsi

Sedangkan grafik temperatur termokopel yang tidak tercelup karbon aktif bisa dilihat pada gambar 4.7. Simpangan perbedaan temperatur terbesar terjadi pada termokopel 4.2, yaitu sebesar 5-12°C. Terlihat dari posisinya yang berada tidak jauh dari karbon namun masih berada pada titik pusat jari-jari tabung (*core*). Sedangkan simpangan terkecil terjadi

pada termokopel D yang mewakili temperature pada dinding tabung, yaitu sebesar 2°C.



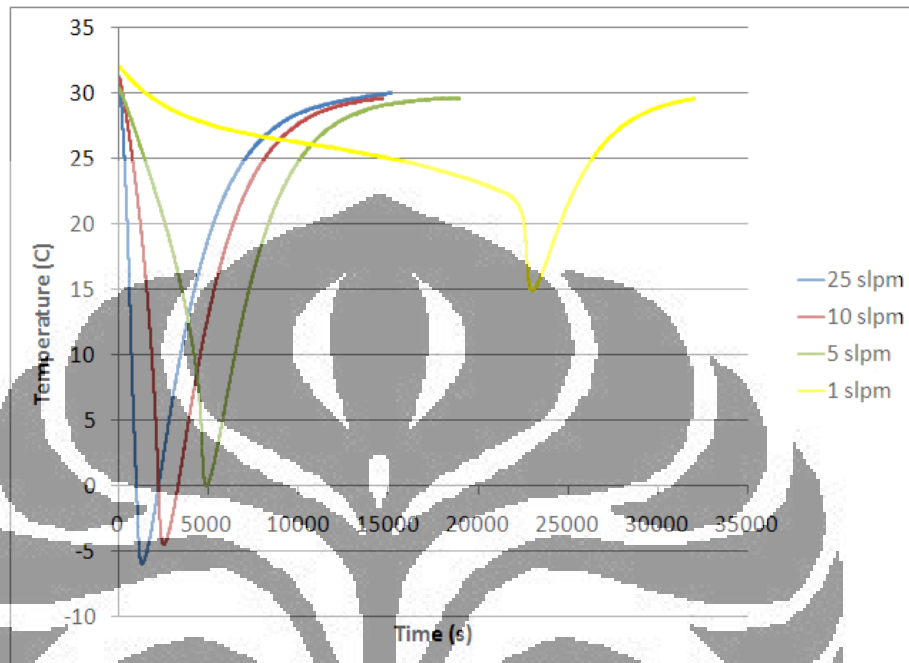
Gambar 4.7 Temperature vs Time, Termokopel tidak tercelup karbon aktif

4.1.2 Pengaruh Laju Aliran Massa pada saat Desorpsi

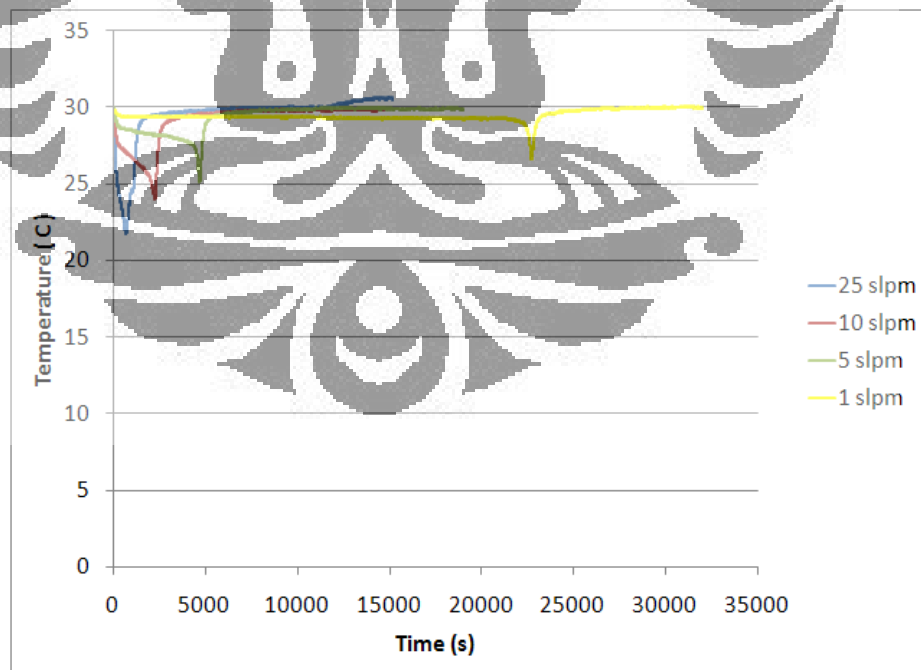
Beberapa variasi bukaan laju aliran massa pada proses *discharging* (desorpsi) dilakukan pada penelitian ini untuk mengetahui karakteristik-karakteristik desorpsi sebuah sistem berbasis adsorpsi-desorpsi. Penelitian ini menggunakan *massflow controller "brooks"* yang dapat mengatur besarnya laju aliran massagas metan yang mengalir (masuk atau keluar) didalam sistem. Variasi bukaan laju aliran massa diantaranya; 25 slpm, 10 slpm, 5 slpm, 1 slpm.

Desorpsi merupakan sebuah proses endotermik, sehingga adsorben akan mengalami penurunan suhu sampai kepada temperatur terendahnya. Variasi pada bukaan laju aliran massa juga mempengaruhi temperatur pada adsorben. Pada gambar 4.9, dapat dilihat suhu penurunan terendah dicapai oleh percobaan dengan besar bukaan laju aliran massa 25 slpm. Penurunannya hingga mencapai suhu -6 °C, berturut-turut kemudian -4 °C, 0 °C, 15 °C, untuk laju aliran massa 10 slpm, 5 slpm, dan 1 slpm. Sehingga semakin besar bukaan laju aliran massa maka semakin rendah suhu yang

akan dicapai pada proses desorpsi (*discharging*). Begitu juga untuk parameter waktu, semakin besar bukaan laju aliran massanya, semakin cepat waktu adsorben untuk mencapai suhu terendahnya. Kedua kesimpulan ini juga berlaku untuk temperatur pada ruang storage tank.



Gambar 4.8 Temperatur adsorben pada variasi laju aliran massa 25, 10, 5, dan 1 slpm



Gambar 4.9 Temperatur ruang storage tank pada variasi laju aliran massa 25, 10, 5, dan 1 slpm.

4.1.3 Massa adsorpsi dan Volume gas metana saat *charge*, *discharge* dan residunya(sisa)

SLPM merupakan sebuah satuan dimana *gas flow meter* terbaca pada keadaan standar (STP), dimana temperatur 0°C atau 273.15K dan tekanan 1 bar. Namun meskipun untuk bacaan volume, pada kenyataannya SLPM merupakan bacaan *mass flow rate* (Joe Galliera, www.solidworks-apac.com).

Berikut merupakan rumus untuk mengubah SLPM menjadi satuan untuk *mass flow rate* (kg/s) dan *volume flow rate* (m³/s);

- *Massflow rate* (kg s⁻¹)

$$= \frac{\text{Massflow rate (SLPM)} \times \text{Mole Mass (g mol}^{-1}\text{)}}{0.082059 \times \text{Temperature(K)} \times 60000}$$

- *Volume flow rate* (m³s⁻¹)

$$= \frac{\text{Massflow rate (kg s}^{-1}\text{)} \times 0.082059 \times \text{Temperature(K)}}{\text{Mole Mass (g mol}^{-1}\text{)} \times \text{Pressure(atm)}}$$

Dengan merubah satuan *mass flow rate* SLPM menjadi kg/s kita bisa mengetahui berapa banyak massa gas metana yang masuk ke dalam *storage tank* pada kondisi temperatur dan pressure yang berubah-ubah setiap detiknya. Sementara *Volume flow rate* (m³/s) dicari untuk mengetahui jumlah gas metana yang masuk pada saat *charging*, gas yang keluar pada saat *discharging*, dan gas yang masih tersisa (residu) setelah satu siklus adsorpsi-desorpsi selesai.

Tabel 4.1 Massa adsorpsi dan Volume gas charge, discharge dan residu pada temperatur 25°C.

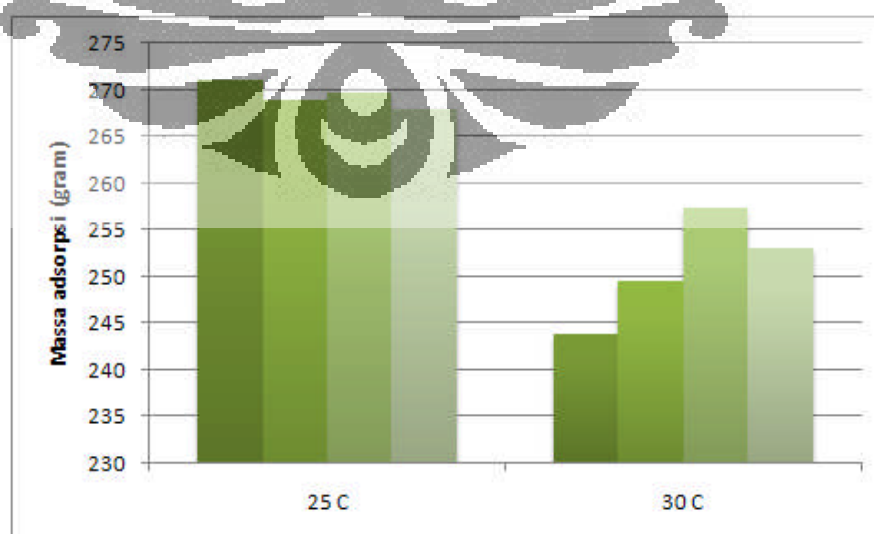
Discharge rate (slpm)	Massa adsorpsi (gram)	Volume (m3)		
		Charge	Discharge	Residu
25	271.086292	0.072368526	0.039224923	0.033143603
10	268.97478	0.087872711	0.040602264	0.047270447
5	269.753794	0.119900124	0.041216604	0.078683519
1	267.933669	0.123954066	0.03643122	0.087522847

Tabel 4.2 Massa adsorpsi dan Volume gas charge, discharge dan residu pada temperatur 30°C.

Discharge rate (slpm)	Massa adsorpsi (gram)	Volume (m3)		
		Charge	Discharge	Residu
25	243.835461	0.084842393	0.038144725	0.046697668
10	249.501447	0.110902048	0.038748411	0.072153637
5	257.304581	0.100394756	0.040859845	0.059534912
1	253.062665	0.107345868	0.034940637	0.07240523

4.1.3.1 Massa adsorpsi

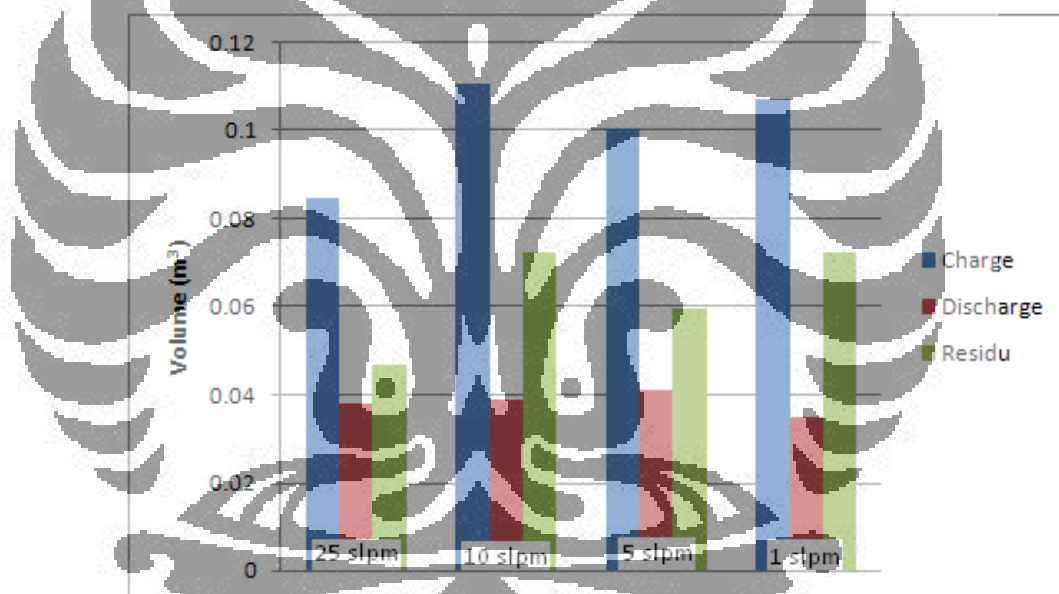
Massa adsorpsi pada kedua temperatur isothermal 25°C dan 30°C berada pada angka yang relatif sama, berkisar pada angka 240 – 270 gram. Hal ini disebabkan karena bukaan massflow diatur pada angka yang sama untuk setiap kali pengambilan data, meskipun dengan variasi yang berbeda-beda, yaitu 25 slpm. Pada keadaan temperatur isothermal 30°C angka-angkanya berada pada kisaran 243 - 257 gram, sedangkan pada keadaan temperatur isothermal 25°C angka-angkanya berada pada kisaran yang lebih tinggi, yaitu 267 – 271 gram. Perbedaan kisaran besar nilai massa adsorpsi ini disebabkan karena perbedaan keadaan, dalam hal ini temperatur isothermal. Temperatur yang lebih rendah menyebabkan penyerapan yang lebih banyak. Sehingga dengan demikian proses adsorpsi lebih baik dilakukan pada suhu yang rendah.



Gambar 4.10 Perbandingan massa adsorpsi pada kedua temperatur isothermal

4.1.3.2 Volume gas metana saat *charge*, *discharge* dan residunya(sisa)

Pada temperatur isothermal 30°C untuk *charge*, dapat dilihat bahwa volume gas metana yang masuk mengalami hasil yang bervariasi, berkisar pada angka 0,08 – 0,11 m³. Sementara untuk volume charge pada temperatur isothermal 25°C berkisar antara 0,07 – 0,12 m³. Nilai capaian 0,12 m³ pada temperatur isothermal 25°C, yang merupakan nilai tertinggi untuk volume pada saat *charging* (adsorpsi), menandakan bahwa adsorpsi yang dilakukan pada temperatur rendah dapat mencapai nilai yang lebih tinggi (volume yang lebih banyak). Lebih lanjut volume yang lebih banyak masuk menandakan penyerapan terjadi lebih banyak.

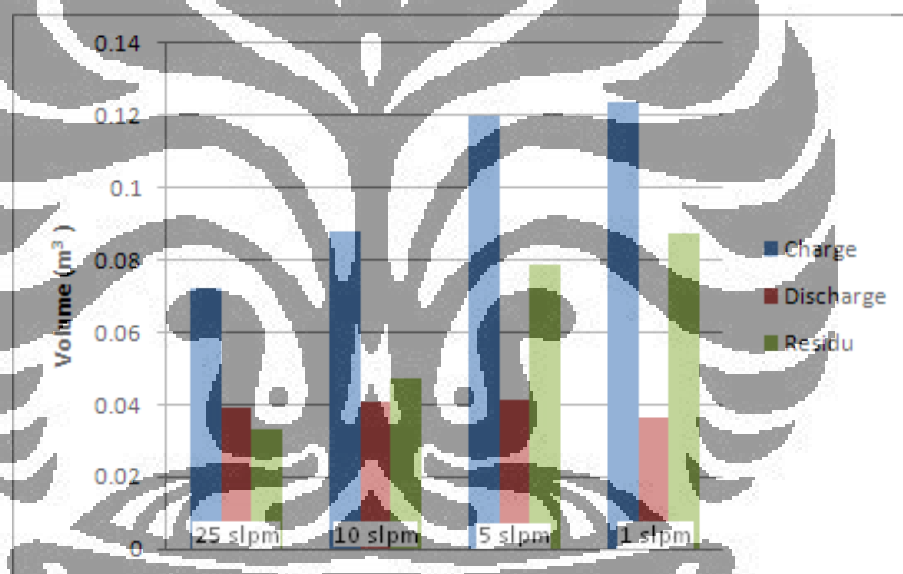


Gambar 4.11 Volume gas metana saat *charge*, *discharge* dan residu(sisa) pada temperatur 30°C

Hasil yang bervariasi ini disebabkan karena perbedaan total waktu gas masuk pada saat *charge*. Dengan tekanan, laju aliran, dan temperatur yang sama pada setiap percobaan, untuk mendapatkan jumlah volume yang sama seharusnya juga dilakukan selama jangka waktu yang sama pula. Sedangkan pada penelitian ini proses *charging* dikatakan selesai bila tekanan sudah stabil, tidak ada kenaikan tekanan lagi, tidak ada laju aliran lagi, terbaca 0 slpm pada Labview, dan temperatur pada semua termokopel

kembali ke temperatur Isotermal. Tidak ada penyamaan dalam hal total waktu *charging*. Hal inilah yang menyebabkan perbedaan jumlah volume total pada saat *charge*.

Sedangkan untuk volume gas yang keluar pada saat *discharging* berkisar pada angka yang relatif sama, 0,03 – 0,04 m³. Perbedaan bukaan laju aliran massa (massflow) yang bervariasi tidak menimbulkan pengaruh yang besar. Perbedaan keadaan temperatur isotermal yang bervariasi juga tidak menyebabkan perbedaan yang mencolok. Berbeda dengan pada saat *charging* (adsorpsi), temperatur yang rendah tidak memberikan pengaruh pada proses *discharge* gas metan (desorpsi). Proses desorpsi lebih baik dilakukan pada temperatur tinggi.



Gambar 4.12 Volume gas metan saat *charge*, *discharge* dan residu(sisa) pada temperatur 25°C

Temperatur yang lebih rendah justru berpengaruh pada volume gas residu yang terikat didalam karbon aktif. Dikarenakan temperatur yang rendah penyerapan lebih banyak terjadi, sehingga volume gas yang masuk (*charge*) juga akan lebih banyak, namun temperatur yang rendah akan menyulitkan pada saat pembuangan gas keluar (*discharge*). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa semakin rendah temperatur, gas yang tersisa didalam *storage tank* akan semakin banyak.

Dari nilai-nilai volume gas tadi (charge, discharge, dan residu), kita bisa mengambil kesimpulan mengenai kondisi yang terbaik jika akan melakukan sebuah siklus adsorpsi-desorpsi. Ketika proses adsorpsi dilakukan pada temperature rendah, sehingga penyerapan gas metana menjadi lebih banyak. Ketika proses desorpsi kita tidak dapat menaikkan temperatur untuk pembuangan yang lebih baik. Karena adsorpsi yang digunakan adalah adsorpsi isothermal, dimana temperatur dikondisikan pada keadaan yang sama, dari awal proses adsorpsi hingga proses desorpsi selesai. Oleh karena itu untuk mendapatkan pembuangan yang baik dibutuhkan proses degassing, sehingga gas-gas yang masih tersisa tersebut dapat dikeluarkan dan kembali pada kondisi semula.



BAB V

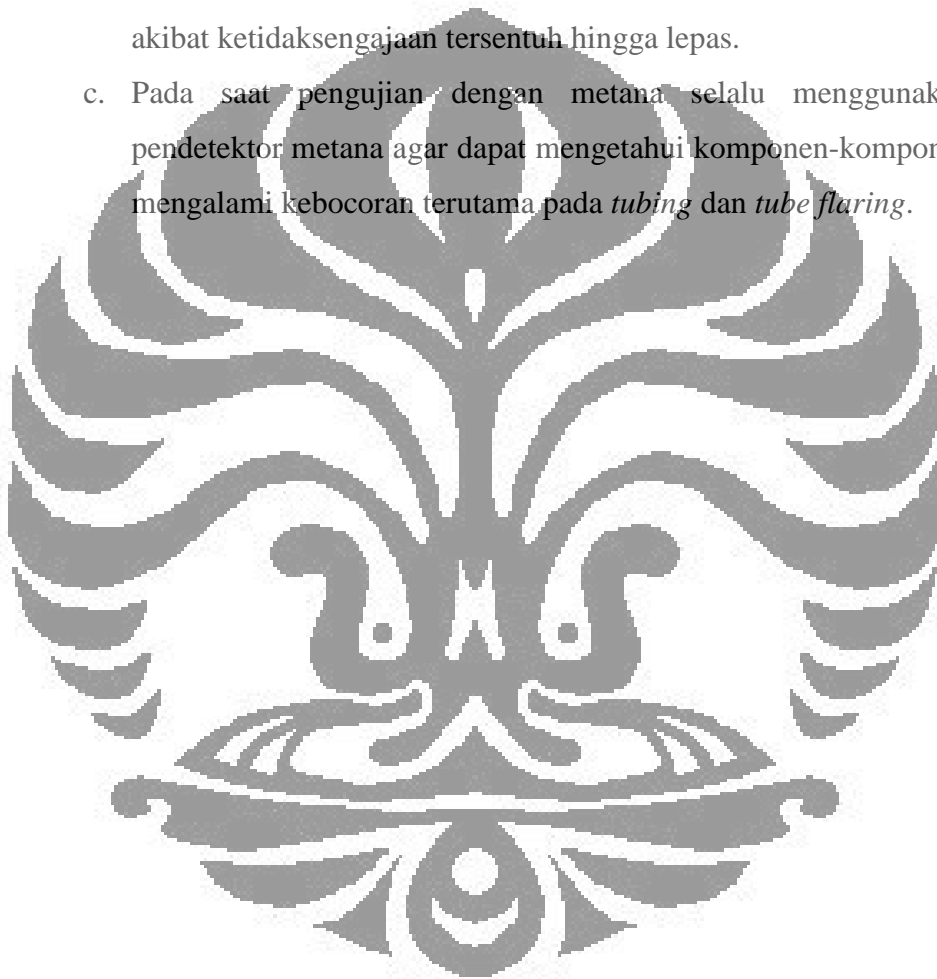
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- a. Proses adsorpsi-desorpsi gas metan pada karbon aktif, atau pada sebuah sistem ANG mengakibatkan naik-turunnya temperatur adsorben.
- b. Proses adsorpsi lebih baik dilakukan pada temperature rendah.
- c. Pada saat *charging*, temperatur dengan cepat naik sampai ke titik maksimum, sedangkan pada saat *discharging* temperatur akan turun hingga ke titik minimumnya.
- d. Kenaikkan dan penurunan temperatur saat proses adsorpsi-desorpsi berbeda-beda di setiap titik, kenaikan dan penurunan paling tinggi dicapai oleh termokopel yang tercelup karbon aktif.
- e. Cycling operation pada ANG akan berpengaruh sekali pada kapasitas dan laju penyerapan karena adsorben lama kelamaan akan mencapai titik jenuh.
- f. Kesetimbangan adsorpsi akan berubah jika temperatur naik maka sebagian adsorbat yang menempel pada permukaan adsorben akan terlepas (desorpsi) dan akan membentuk kesetimbangan baru.

5.2 Saran

- a. Setiap melakukan pengambilan data diwajibkan selalu mengikuti standar prosedur dan operasi yang telah tercantum, agar menghindari tidak berfungsinya alat akibat kesalahan prosedur kerja
- b. Instrumentasi pada alat ukur yaitu termokopel harus selalu diperhatikan, karena biasanya terjadi error yang disebabkan kabel termokopel tidak tersambung pada DAQ dengan benar dan terlepas akibat ketidaksengajaan tersentuh hingga lepas.
- c. Pada saat pengujian dengan metana selalu menggunakan alat pendetektor metana agar dapat mengetahui komponen-komponen yang mengalami kebocoran terutama pada *tubing* dan *tube flaring*.



DAFTAR PUSTAKA

- Advantica. *Low Pressure Adsorbed Natural Gas for Vehicle*.
- ASME Boiler and Pressure Vessel code, Section VIII-Division 1
- Bahl, B.S, G.D Tuli, and A. Bahl, 1997, *Essential of Physical Chemistry*, S. Chand and Company, Ltd, New Delhi
- Belmabkhout, Y, G. D Weireld, and M. Frere, 2004, *High Pressure Adsorption Isotherms Of N₂, CH₄, O₂, and Ar On Different Carbonaceous Adsorbent*, Journal of Chemical and Engineering Data, Vol. 49, No. 5, 2004
- Dawoud, Belal, Yuri Aristov, 2008, *A new methodology of studying the dynamics of water sorption/desorption under real operating conditions of adsorption heat pumps: Experiment*, International Journal of Heat and Mass Transfer 51 (2008) 4966-4972
- Hardy, J.T. 2003. *Climate Change: Causes, Effects, and Solutions*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England
- Hamamoto, Y., K.C.A. Alam, B.B. Saha, S. Koyama, A. Akisawa, T. Kashiwagi, 2006, *Study on Adsorption Refrigeration Cycle Utilizing Activated Carbon Fiber. Part 1., Adsorption Characteristics*, International Journal of Refrigeration, 29(2006)305-314
- Hines, A. L and R. Madrox, 1985, *Mass Transfer Fundamental and Applications*, Prentice-Hall, New Jersey
- Keller, Jürgen U, Erich Robens, Cedric du Fresne von Hohenesche, 2002 *Thermo gravimetric and Sorption Measurement Techniques/Instruments*, Journal of Universität Siegen GH, D- 57068 Siegen, Germany
- Marsh, Harry and Francisco Rodriguez-Reinoso, 2006, *Activated Carbon*, Elsevier Ltd, Oxford UK
- Nasruddin, 2005, *Dynamic Modeling and Simulation of a two Bed Silica gel-Water Adsorption Chille*, Disertasi, Rheinisch - Westfälische Technische Hochschule, Aachen
- O. Pupier, V.Goetz, R. Fiscal, 2004, *Effect of Cycling Operations on an Adsorbed Natural Gas*, journal

- Rouquerol, Jean, François Rouquerol and Kenneth Sing, 1998, *Adsorption By Powders And Porous Solids*, Academic Press, UK
- S. Biloe, V. Goetz, A. Guillot, 2001, *Optimal Design of an Activated Carbon for an Adsorbed Natural Gas Storage System*, journal
- Saha, Bidyut Baran, Ibrahim I. El-Sharkawy, Anutosh Chakraborty, Shigeru Koyama, Seong-Ho Yoon, and Kim Choon Ng, Adsorption Rate of Ethanol on Activated Carbon Fiber *J. Chem. Eng. Data* 2006, 51, 1587-1592
- Suryawan, Bambang, 2004, *Karakteristik Zeolit Indonesia sebagai Adsorben Uap Air*, Disertasi, FTUI, Depok
- Suzuki Motoyuki, *Adsorption Engineering*, 1990, Kodansha Ltd, Tokyo
- Thomas, W.J. dan Crittenden, Barry. 1998. *Adsorption Technology and Design*. Elsevier, Science & Technology Books
- Taufani, Imam. 2009. *Adsorpsi Isotermal Karbondioksida pada Karbon Aktif Komersial dengan Tekanan 5 dan 7 Bar Absolut*. Skripsi Sarjana FTUI
- Yang, Ralph T. 2003. *Adsorbents : Fundamentals and Applications*. New Jersey : John Wiley & Sons
- Yang, X.D, Q.R. Zheng, A.Z. Gu, dan X.S. Lu. 2004. *Experimental Studies of the Performance of Adsorbed Natural Gas Storage System During Discharge*. Elsevier
- www.solidworks-apac.com