



UNIVERSITAS INDONESIA

**OPTIMASI KARAKTERISTIK KARBON AKTIF
PADA SISTEM *ADSORBED NATURAL GAS* DALAM
KONDISI DINAMIS**

TESIS

DEDY DARMAWAN SAMID

0906579424

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM MAGISTER**

DEPOK

JUNI 2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**OPTIMASI KARAKTERISTIK KARBON AKTIF
PADA SISTEM *ADSORBED NATURAL GAS* DALAM
KONDISI DINAMIS**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat mendapatkan gelar Magister Teknik

DEDY DARMAWAN SAMID

0906579424

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
KEKHUSUSAN KONVERSI ENERGI
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

NAMA : DEDY DARMAWAN SAMID

NPM : 0906579424

Tanda Tangan :







Tanggal : 27 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : DEDY DARMAWAN SAMID
NPM : 0906579424
Departemen : Teknik Mesin
Judul Tesis : **OPTIMASI KARAKTERISTIK KARBON
AKTIF PADA SISTEM ADSORBED
NATURAL GAS DALAM KONDISI DINAMIS**

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.-Ing. Ir. Nasruddin, M.Eng ()
Dr. Ir. Awaludin Martin, M.T ()
Penguji : Dr.Ir. M. Idrus Alhamid ()
Ir. Mahmud Sudibandriyo, M.Sc, PhD ()

Ditetapkan di : Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Kampus Baru UI - Depok

Tanggal : 27 Juni 2011

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : DEDY DARMAWAN SAMID
NPM : 0906579424
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tesis

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

**“OPTIMASI KARAKTERISTIK KARBON AKTIF PADA SISTEM
ADSORBED NATURAL GAS DALAM KONDISI DINAMIS”**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksekutif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok
Pada Tanggal : 27 Juni 2011
Yang menyatakan,



DEDY DARMAWAN SAMID

KATA PENGANTAR

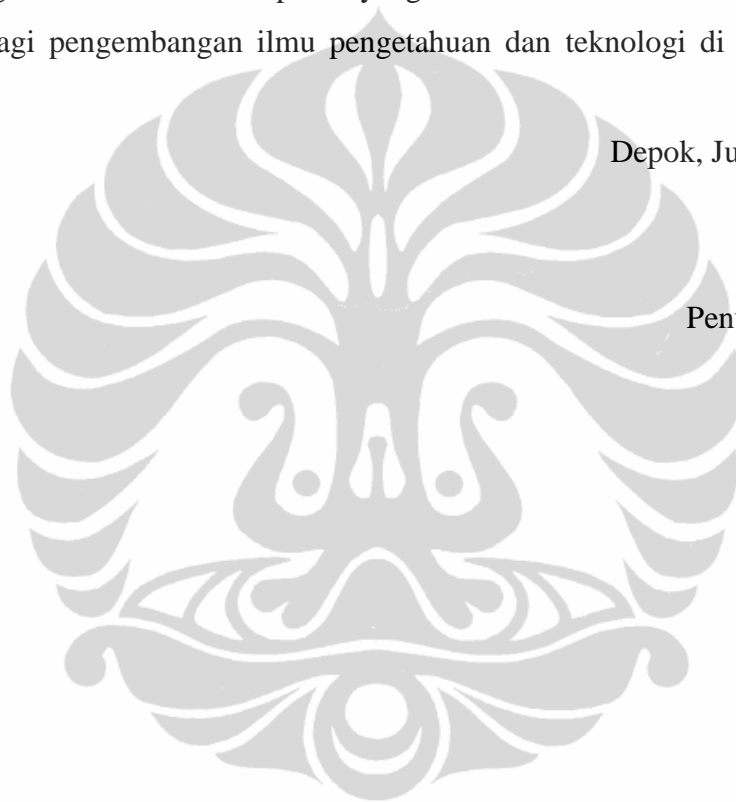
Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan proposal seminar tesis ini. Penulisan proposal ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mengikuti sidang seminar tesis pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik 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. selaku dosen pembimbing pertama yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
2. Dr. Ir. Awaludin Martin M.T. selaku dosen pembimbing kedua yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
3. Anggota panitia penguji yang terdiri dari Dr. Ir. Muhammad Idrus Alhamid dan Ir. Mahmud Sudibandriyo, M.Sc, PhD.
4. Ketua Departemen dan seluruh staf pengajar Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan hingga menyelesaikan tesis ini.
5. Pak Seno, yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang penulis perlukan dari tahap desain hingga dibuat alat ini;
6. Partner kerja saya Bayu dan Firman yang telah membantu;
7. Sahabat, rekan-rekan laboratorium teknik pendingin, laboratorium mekanika fluida, laboratorium perpindahan panas dan teman-teman satu angkatan program magister Teknik Mesin 2009 yang telah membantu dan memberikan dukungan kepada penulis;
8. Para karyawan Departemen Teknik Mesin yang telah banyak membantu mempersiapkan jalannya penelitian ini.

Akhir kata, saya sampaikan terima kasih kepada orang tua tercinta yang telah membesarkan, mendidik, dan membimbing saya selama ini dan juga kepada seluruh keluarga saya. Rasa terima kasih saya sampaikan pula kepada teman terdekat saya Fazriani Cahyadita dan juga sahabat-sahabat saya Parid, Tedi, Koko. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di masa yang akan datang.

Depok, Juni 2011

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR NOTASI.....	xiii
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1.Latar Belakang	1
1.2.Perumusan Masalah	2
1.3.Tujuan Penelitian	4
1.4.Pembatasan Masalah	4
1.5.Sistematika Penulisan	5
II. DASAR TEORI	6
2.1.Adsorpsi	6
2.1.1. Adsorpsi Fisik	6
2.1.2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi.....	7
2.1.3. Adsorben dan Adsorbat.....	8
2.1.3.1.Adsorben	8
2.1.3.2.Adsorbat	11
2.2.Proses Adsorpsi.....	12
2.2.1. Adsorpsi Equilibrium.....	14
2.2.2. Persamaan Adsorpsi Isotermal.....	16
2.2.3. Persamaan Isotermal Dubinin-Astakov.....	17
2.2.4. Panas Adsorpsi Isosterik	18
2.2.5. Metode Pengujian Adsorpsi	18
2.2.5.1. Metode Gravimetrik.....	19
2.2.5.2. Metode Volumetrik	20
2.3.Kapasitas dan Laju Penyerapan dengan Metode Volumetrik	22
III.METODE PENELITIAN	23
3.1.Pendekatan Teoritis.....	24
3.2.Persamaan Model Dubinin-Astakhov	24
3.3.Karakteristik Adsorben Optimal	26
3.3.1. Kondisi Statis	26
3.3.2. Kondisi Dinamis	27
3.4.Adsorpsi Isotermal	27
3.4.1. Adsorpsi Karbon Aktif Komersil.....	27
3.4.2. Alat Uji Adsorpsi Isotermal	28
3.4.2.1. <i>Pressure Vessel</i>	28

3.4.2.2. Pemipaan	29
3.4.2.3. Instrumentasi	30
3.4.3. Verifikasi Alat Ukur	31
3.4.4. Pengukuran Volume	31
3.5. Preparasi Sampel	32
3.5.1. Dry Sorbent	32
3.5.2. Proses Degassing	33
3.6. Pengukuran volume void (V_{void})	34
3.7. Proses Adsorpsi	36
3.8. Proses Desorpsi	37
3.9. Adsorpsi Isotermal Pada Keadaan Dinamis	37
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1. Karakteristik Adsorben Optimal	39
4.1.1. Kondisi Statis	39
4.1.2. Kondisi Dinamis	42
4.2. Adsorpsi Karbon Aktif Komersil	44
4.2.1. Kapasitas Metana Tersimpan (Q_{ds}) Dalam Kondisi Dinamis	46
4.2.2. Perbandingan Kapasitas Metana Terserap (q) Eksperimen Dengan Teoritis	49
4.2.3. Kapasitas Metana Terkirim (Q_{dd}) Dalam Kondisi Dinamis	50
4.3. Adsorpsi Isosterik	54
V. KESIMPULAN DAN SARAN	56
5.1. Kesimpulan	56
5.2. Saran	57
DAFTAR REFERENSI	58

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 1.1	Grafik Pengaruh Kenaikan Temperatur Terhadap Adsorbat yang Disimpan (a) dan yang Dilepaskan (b)	3
GAMBAR 2.1	(a) Karbon aktif granul (b) karbon aktif serat.....	10
GAMBAR 2.2	Nomenklatur Adsorpsi.....	13
GAMBAR 2.3	Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isotermal.....	14
GAMBAR 2.4	Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isobar.....	15
GAMBAR 2.5	Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isostere.....	15
GAMBAR 2.6	Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan <i>Two Beam</i> .	19
GAMBAR 2.7	Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan <i>Magnetic</i> .	20
GAMBAR 2.8	Skema Metode Volumetrik.....	21
GAMBAR 3.1	Diagram Alir.....	23
GAMBAR 3.2	<i>Pressure Vessel</i>	28
GAMBAR 3.3	Pemipaan Alat Uji Adsorpsi-Desorpsi Metana.....	29
GAMBAR 3.4	Diagram Pemipaan dan Instrumentasi.....	29
GAMBAR 3.5	Display Program <i>Labview</i> 8.6.....	31
GAMBAR 3.6	Timbangan AND FX 4000.....	32
GAMBAR 3.7	Proses Dry Sorbent dan Control Panel Untuk Menjaga Temperatur.....	33
GAMBAR 3.8	Skematik Proses Degassing.....	34
GAMBAR 3.9	Skematik pengukuran volume kosong.....	35
GAMBAR 3.10	Proses pengukuran volume kosong.....	35
GAMBAR 3.11	Skematik Proses Adsorpsi.....	36
GAMBAR 3.12	Skematik proses Desorpsi.....	37
GAMBAR 4.1	Kapasitas Metana Tersedia (Q_{av}) Terhadap Lebar Mikropori (L_o) dengan Variasi Nilai Penyebaran Ukuran Pori (n).....	40
GAMBAR 4.2	Kapasitas Metana Tersedia (Q_{sv}) Terhadap Volume Mikropori (W_o) dengan Variasi Nilai Penyebaran Ukuran Pori (n).....	41
GAMBAR 4.3	Kapasitas Metana Tersimpan (Q_{ds}) Terhadap Perubahan Temperatur (ΔT).....	42
GAMBAR 4.4	Kapasitas Metana Terkirim (Q_{dd}) Terhadap Perubahan Temperatur (ΔT).....	43
GAMBAR 4.5	Posisi Termokopel pada Vessel.....	45
GAMBAR 4.6	Kapasitas Tersimpan (Q_{ds}) Terhadap Laju Aliran Volume.....	47
GAMBAR 4.7	Kapasitas Tersimpan (Q_{ds}) Terhadap Perubahan Tekanan.....	47
GAMBAR 4.8	Perubahan temperatur (ΔT) Terhadap Laju Aliran Volume.....	48
GAMBAR 4.9	Waktu Terhadap Laju Aliran Volume.....	48
GAMBAR 4.10	Kapasitas Tersimpan (Q_{ds}) Terhadap Perubahan Temperatur (ΔT).....	50
GAMBAR 4.11	Kapasitas Metana Terkirim (Q_{dd}) Terhadap Laju Aliran Volume.....	51
GAMBAR 4.12	Kapasitas Tersangkut Terhadap Laju Aliran Volume.....	52
GAMBAR 4.13	Kapasitas Terkirim (Q_{dd}) Terhadap Perubahan Tekanan.....	52
GAMBAR 4.14	Perubahan Temperatur (ΔT) Terhadap Laju Aliran Volume.....	53
GAMBAR 4.15	Waktu Terhadap Laju Aliran Volume.....	53
GAMBAR 4.16	Gambar Grafik Isosterik.....	55

DAFTAR TABEL

TABEL 3.1	Data properties karbon aktif komersial (Carbotech)	28
TABEL 3.2	Volume kosong (V_{void}) vessel	36
TABEL 4.1	Data properties karbon aktif komersial (Carbotech)	42
TABEL 4.2	Kapasitas masuk, kapasitas tersimpan, perubahan temperatur, dan waktu pengisian terhadap variasi laju aliran volume.	46
TABEL 4.3	Parameter adsorpsi untuk model persamaan Dubinin-Astakhov.	49
TABEL 4.4	Perbandingan eksperimen dengan teoritis 1 dan teoritis 2	49
TABEL 4.5	Kapasitas masuk, kapasitas terkirim, perubahan temperatur, dan waktu pengosongan terhadap variasi laju aliran volume..	50



DAFTAR NOTASI

L_o	Lebar pori (nm)
n	Penyebaran ukuran pori
W_o	volume total mikropori (m^3/kg)
W	volume teradsorpsi (m^3/kg)
A	potensial adsorpsi Polanyi's (J/mol)
E_o	karakteristik energi dari adsorpsi (J/mol)
P_o	tekanan uap jenuh (Pa)
ρ_{ads}	kerapatan gas teradsorpsi (kg/m)
ρ_c	kerapatan karbon aktif (kg/m^3)
α	faktor pengisian karbon aktif pada vesel (0-1)
f_{va}	fraksi volumetrik metana pada fasa adsorpsi
f_{vg}	fraksi volumetrik metana pada fasa gas
f_c	fraksi volumetrik karbon aktif
ρ_{gas}	kerapatan gas (kg/m^3)
V_{mg}	Volume molar pada keadaan STP ($M^3/kmol$)
M_g	massa molekul ($kg/kmol$)
$Q_s (T,P)$	volume gas tersimpan per unit adsorben pada keadaan STP (V/V)
ΔT	perubahan temperatur (K)

ABSTRAK

Nama : Dedy Darmawan Samid
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Optimasi Karakteristik Karbon Aktif Pada Sistem *Adsorbed Natural Gas* Dalam Kondisi Dinamis

Persamaan model Dubinin-Astakhov digunakan untuk mencari pengaruh karakteristik karbon aktif yang digunakan sebagai adsorben terhadap unjuk kerja pada proses adsorpsi dan proses desorpsi dari sistem ANG (*Adsorbed Natural Gas*) dalam keadaan dinamis. Keadaan dinamis adalah keadaan kerja sebenarnya dimana pada tahapan adsorpsi terjadi kenaikan temperatur dan pada tahapan desorpsi terjadi penurunan temperatur. Dari hasil pendekatan teoritis menggunakan persamaan Dubinin-Astakhov akan didapatkan karakteristik karbon aktif optimal yang menghasilkan unjuk kerja paling maksimal terhadap perubahan temperatur yang terjadi (ΔT). Untuk mendapatkan kapasitas adsorpsi dan desorpsi yang baik dalam keadaan dinamis maka dibutuhkan karbon aktif yang memiliki volume mikropori (W_o) dan nilai penyebaran pori (n) yang besar. Sedangkan lebar pori (L_o) yang akan menghasilkan kapasitas tersimpan (Q_{ds}) terbaik adalah lebar pori (L_o) dengan nilai 1,5 nm dan untuk menghasilkan kapasitas terkirim (Q_{dd}) terbaik adalah lebar pori (L_o) dengan nilai 2,3 nm.

Keywords: Karbon Aktif, Adsorpsi, Dubinin-Astakhov, Optimal.

ABSTRACT

Name : Dedy Darmawan Samid
Departement : Mechanical Engineering
Topic : Characteristics Activated Carbon Optimization On Adsorbed
Natural Gas System under Dynamic Conditions

Dubinin-Astakhov equation is use to find the influence from the characteristics of activated carbon that is use as adsorbent to the performance on adsorption process and desorption process under dynamic condition. Dynamic condition is the real work condition where in that condition an adsorption process there is an increase in temperature and a desorption process there is an decrease in temperature. From the theoretical study using Dubinin-Astakhov equation we can get the optimal characteristics of activated carbon that produce the greater performance do to the temperatur change that happen (ΔT). To get the greater adsorption dan desorption capacity under dynamic condition we must use activated carbon that have bigger mikropore volume (W_o) and pore size distribution (n). For the micropore width (L_o) that can produce the greater stored capacity is the micropore width (L_o) with the value around 1,5 nm and greater delivered capacity is the micropore width (L_o) with the value around 2,3 nm

Keywords: Activated Carbon, Adsorption, Dubinin-Astakhov, Optimal.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini pemanasan global akibat efek rumah kaca dan berkurangnya cadangan minyak bumi adalah masalah penting yang sedang dihadapi. Emisi gas karbon dioksida (CO₂) dari hasil pembakaran bahan bakar fosil pada kendaraan, industri, pembangkit listrik, dan lain-lain, yang terakumulasi di atmosfer adalah salah satu penyebab terjadinya pemanasan global (Lee, Jong-Seok dkk., 2002). Sedangkan yang menyebabkan berkurangnya cadangan minyak bumi adalah karena tingginya permintaan akibat penggunaan bahan bakar minyak pada mesin baik untuk kendaraan maupun industri.

Salah satu cara untuk mengurangi jumlah emisi gas karbon dioksida dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar minyak adalah dengan melakukan program konversi penggunaan bahan bakar minyak ke bahan bakar gas. Dengan penggunaan bahan bakar gas diharapkan dapat mengurangi emisi gas buang dan mengurangi penggunaan bahan bakar minyak yang berlebihan.

Namun bahan bakar gas mempunyai kekurangan yaitu pada keadaan standar (STP) kerapatan energinya sebesar 0,038 MJ/L (0,11% bensin). Sehingga untuk mendistribusikannya, gas alam perlu dikompresi hingga 20 MPa (kerapatan energinya sebesar 8,8 MJ/L) atau dicairkan (LNG) hingga dibawah titik didihnya agar dapat meningkatkan kerapatan energinya. Metode distribusi seperti ini menyebabkan peningkatan harga jual gas alam, karena gas alam harus diangkut dengan menggunakan truk atau trailer dengan tabung baja yang tebal sehingga menambah beban angkutan pada truk atau trailer tersebut. (Prauchner, Marcos. J. Et al., 2008). Dari penjelasan diatas maka diperlukan sistem yang relatif lebih hemat energi, murah, dan aman untuk mempermudah distribusi dan penyimpanan bahan bakar gas tersebut.

Sistem adsorpsi adalah salah satu cara atau metode yang dapat digunakan untuk mendistribusikan dan menyimpan gas alam yang biasa disebut sebagai sistem penyimpanan adsorbed natural gas (ANG). Pada sistem penyimpanan ANG, dengan kemampuan $Q_{delivered}$ sebesar 150 V/V Pada tekanan 3,5 Mpa dan temperatur 20°C Kerapatan energinya adalah sebesar 6,5 MJ/L (18,5%). Pada sistem penyimpanan ANG, gas alam dapat terserap pada tekanan penyimpanan yang lebih rendah pada temperatur ruang (Himeno, Shuji et al., 2005 dan Pupier, O., et al., 2005).

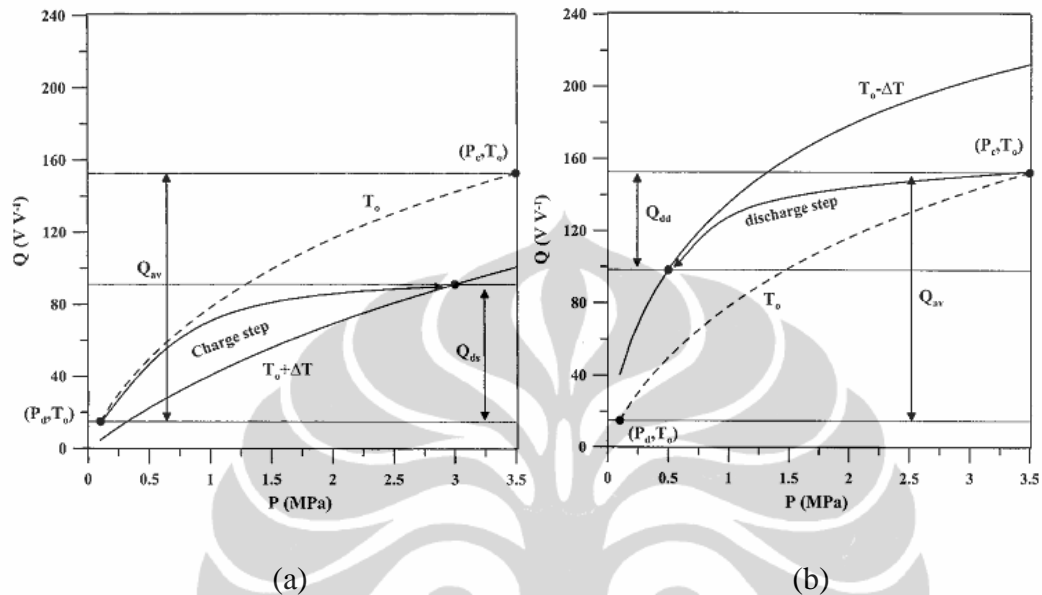
Proses adsorpsi sangat dipengaruhi oleh pasangan adsorben dan adsorbatnya. Adsorben adalah zat atau material yang mempunyai kemampuan untuk mengikat dan mempertahankan cairan atau gas didalamnya dan adsorbat adalah substansi dalam bentuk cair atau gas yang terkonsentrasi pada permukaan adsorben (Suryawan, Bambang, 2004). Jenis adsorben yang sering digunakan yaitu zeolite, silica gel dan karbon aktif.

Karbon aktif adalah jenis adsorben yang paling banyak digunakan pada sistem adsorpsi gas alam, hal tersebut dikarenakan karbon aktif memiliki volume mikropori dan mesopori yang relatif besar sehingga memiliki luas permukaan yang besar, dengan demikian sangat memungkinkan untuk dapat menyerap adsorbat dalam jumlah yang cukup besar (Yang, Ralph. T, 2003).

1.2. Perumusan Masalah

Namun terdapat beberapa masalah yang mempengaruhi unjuk kerja dari sistem ANG. Unjuk kerja dan kemampuan dari sistem ANG dipengaruhi oleh karakteristik mikropori adsorben yang digunakan dan juga nilai perpindahan panas dan perpindahan massa (Biloe, S. Et al., 2002). Pada saat adsorpsi terjadi proses eksotermis pada karbon aktif yaitu naiknya suhu karbon aktif adsorpsi. Hal ini menyebabkan menurunnya kadar CH₄ yang terserap oleh adsorben, begitu juga sebaliknya. Pada saat desorpsi terjadi proses endotermis pada karbon aktif yaitu turunnya suhu karbon aktif, hal ini menyebabkan menurunnya kadar CH₄ yang dilepaskan kembali oleh adsorben. Masalah tersebut diatas menyebabkan performa dari sistem ANG menurun pada keadaan kerja sebenarnya. Untuk

menjadi sistem yang cukup untuk komersil, diperlukan kapasitas metana terkirim sebesar 150 V V^{-1} . Yaitu volume metana terkirim per volume adsorben yang digunakan.



Gambar 1.1. Grafik pengaruh kenaikan temperatur terhadap adsorbat yang disimpan (a) dan yang dilepaskan (b)
(Biloe, S. Et al., 2002)

Gambar diatas adalah gambar grafik antara kapasitas penyimpanan dan pelepasan dengan tekanan pengisian. Pada gambar tersebut dijelaskan bahwa jika proses adsorpsi dan desorpsi tidak dipengaruhi oleh kenaikan atau penurunan temperatur (temperatur isothermal) maka kapasitas penyimpanan adsorbat yang tersedia adalah sebesar 150 V V^{-1} . Akan tetapi pada keadaan dinamis, proses adsorpsi dan desorpsi menyebabkan kenaikan atau penurunan temperatur pada karbon aktif. Hal tersebut menghasilkan penurunan kapasitas penyimpanan maupun pelepasan adsorbat pada adsorben. Pada proses adsorpsi, kenaikan temperatur menyebabkan kapasitas penyimpanan adsorbat menurun saat tahap pengisian. Pada proses desorpsi penurunan temperatur menyebabkan kapasitas pelepasan adsorbat menurun karena meningkatnya kapasitas adsorben yang tersangkut pada adsorben.

Pencarian jenis adsorben yang sesuai untuk digunakan pada sistem ANG adalah bagian yang penting pada penelitian ilmiah dibidang ANG. Untuk itu perlu dicari karakteristik adsorben yang paling optimal untuk menghasilkan unjuk kerja yang maksimal pada tahap adsorpsi dan tahap desorpsi dari sistem ANG.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- a) Mencari karakteristik optimal dari karbon aktif terhadap performa adsorpsi dan desorpsi dalam keadaan dinamis pada sistem ANG. Keadaan dinamis yang dimaksud adalah kondisi kerja sebenarnya yang terjadi saat proses adsorpsi dan desorpsi dimana terjadi perubahan temperatur yang menunjukkan adanya perpindahan panas yang terjadi pada sistem.
- b) Menghitung kinerja adsorpsi dan desorpsi dari karbon aktif komersil pada sistem ANG yang dipengaruhi perpindahan panas yang terjadi dalam sistem.

Penelitian ini dilakukan dengan dua macam pendekatan, yaitu pendekatan teoritis dan pendekatan eksperimen untuk kemudian dibandingkan hasilnya.

1.4. Pembatasan Masalah

Agar bahasan penelitian ini tidak menjadi luas, maka perlu diberikan batasan. Berikut adalah batasan masalah dari penelitian yang dilakukan:

- a) Parameter karakteristik karbon aktif yang akan divariasikan untuk mengetahui karakteristik optimal adalah total volume mikropori dan diameter pori.
- b) Pendekatan teoritis akan dilakukan menggunakan persamaan model Dubinin-Astakhov untuk mengetahui kapasitas tersimpan (Q_{ds}) dan kapasitas terkirim (Q_{dd}) terhadap pengaruh perubahan temperatur saat adsorpsi dan desorpsi.

- c) Pendekatan eksperimen akan dilakukan dengan uji eksperimen adsorpsi isothermal menggunakan karbon aktif komersil carbotech sebagai adsorben dan gas metana (CH_4) sebagai adsorbat.
- d) Adsorpsi isothermal dilakukan pada kondisi lingkungan laboratorium pendingin Fakultas Teknik Universitas Indonesia dengan tekanan adsorpsi sampai dengan 3.5 MPa pada temperature isothermal 25 °C.
- e) Laju aliran volume metana akan divariasikan dari 1 slpm sampai dengan 20 slpm untuk mendapatkan variasi perubahan temperatur (ΔT) pada saat adsorpsi dan desorpsi.

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.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Adsorpsi

Adsorpsi adalah fenomena fisik yang terjadi saat molekul-molekul gas atau cair dikontakkan dengan suatu permukaan padatan dan sebagian dari molekul-molekul tadi mengembun pada permukaan padatan tersebut (Suryawan, Bambang 2004). Adsorpsi adalah proses dimana molekul-molekul fluida menyentuh dan melekat pada permukaan padatan

Interaksi antara padatan dan molekul yang mengembun tadi relatif lemah, maka proses ini disebut adsorpsi fisik. Walaupun adsorpsi biasanya dikaitkan dengan perpindahan dari suatu gas atau cairan ke suatu permukaan padatan, perpindahan dari suatu gas ke suatu permukaan cairan juga terjadi. Substansi yang terkonsentrasi pada permukaan didefinisikan sebagai adsorbat dan material dimana adsorbat terakumulasi didefinisikan sebagai adsorben (Hines, A.L dan Robert N. Maddox, 1985).

2.1.1 Adsorpsi Fisik

Adsorpsi fisik adalah fenomena fisik yang terjadi saat molekul-molekul gas atau cair dikontakkan dengan suatu permukaan padatan dan sebagian dari molekul-molekul tadi mengembun pada permukaan padatan tersebut (Suryawan, Bambang 2004). Adsorpsi fisik yang terjadi karena adanya gaya *Van Der Waals* 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 fisik 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.

Peristiwa adsorpsi disertai dengan pengeluaran panas yang disebut dengan panas adsorpsi (eksoterm). Umumnya panas adsorpsi fisik 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 fisik adalah reversibel dan berlangsung sangat cepat (Herawaty, 2003).

Proses adsorpsi fisik terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi, sehingga pada proses tersebut akan membentuk lapisan multilayer pada permukaan adsorben. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi fisika dapat diputuskan dengan mudah, yaitu dengan cara pemanasan pada temperatur 150 - 200°C selama 2 - 3 jam (Suryawan, Bambang, 2004).

2.1.2 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.

2.1.3 Adsorben dan Adsorbat

Pasangan adsorben-adsorbat untuk adsorpsi fisik adalah silika gel-air, zeolit-air, karbon aktif-ammonia, karbon aktif-metanol (Hamamoto, Y, 2002). Pasangan adsorben dan adsorbat, pada umumnya dapat dibedakan menjadi dua, yaitu:

1. Non-polar adsorben atau *Hydrophobic*, meliputi karbon aktif dan adsorben polimer. Dengan oli atau gas sebagai adsorbatnya.
2. Polar adsorben atau *Hydrophilic*, meliputi silika gel, zeolit, *active alumina*. Dengan air sebagai adsorbatnya.

2.1.3.1 Adsorben

Material penyerap atau adsorben adalah zat atau material yang mempunyai kemampuan untuk mengikat dan mempertahankan cairan atau gas didalamnya (Suryawan, Bambang, 2004). Adapun beberapa adsorben yang digunakan secara komersial adalah kelompok polar adsorben atau disebut juga *hydrophilic* seperti silika gel, alumina aktif, dan zeolit.

Kelompok lainnya adalah kelompok non polar adsorben atau *hydrophobic* seperti polimer adsorben dan karbon aktif. Karakter fisik adsorben yang utama adalah karakter permukaannya, yaitu luas permukaan dan pori-porinya (Suzuki, M, 1990).

Karakteristik adsorben dapat dilihat dari permukaannya seperti luas permukaan dan polaritas. Semakin luas permukaan spesifik, maka kemampuan adsorpsi juga semakin meningkat (Suzuki, M, 1990). Karakteristik adsorben yang dibutuhkan untuk adsorpsi (Suryawan, Bambang, 2004), adalah :

- a. Luas permukaan besar sehingga kapasitas adsorpsinya tinggi
- b. Memiliki aktifitas terhadap komponen yang diadsorpsi
- c. Memiliki daya tahan yang baik
- d. Tidak ada perubahan volume yang berarti selama peristiwa adsorpsi dan desorpsi.

Adsorben yang memiliki kemampuan menyerap air disebut *hydrophilic* yaitu silika gel, zeolit dan aktif alumina, sedangkan adsorben yang memiliki kemampuan menyerap oli dan gas disebut *hydrophobic* yaitu karbon aktif dan adsorben yang polimer (Suzuki, M, 2005).

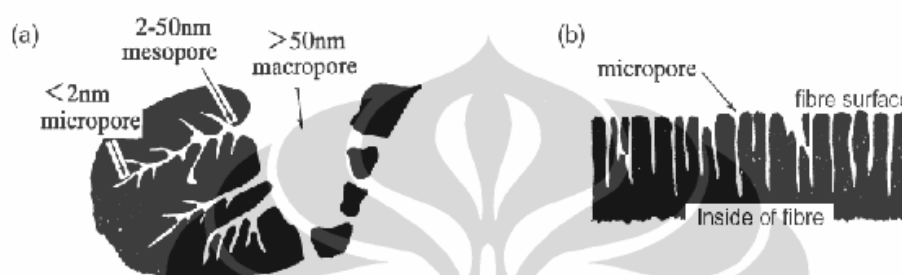
1. Silika gel

Energi yang dibutuhkan untuk pengikatan adsorbat pada silika gel relatif kecil dibanding dengan energi yang dibutuhkan untuk mengikat adsorbat pada karbon aktif atau zeolit sehingga temperatur untuk desorpsinya rendah. Laju desorpsi silika gel terhadap kenaikan temperatur sangat tinggi. Silika gel dibuat dari silika murni dan secara kimia diikat dengan air. Jika silika gel diberi panas yang berlebih sampai kehilangan kadar air maka daya adsorpsinya akan hilang sehingga umumnya silika gel digunakan pada temperatur dibawah 200°C. Silika gel memiliki kapasitas menyerap air yang besar terutama pada saat tekanan uap air tinggi.

2. Karbon aktif

Karbon aktif adalah suatu bahan berupa karbon amorf yang sebagian besar terdiri dari atas karbon bebas serta memiliki “permukaan dalam” (*internal surface*) sehingga mempunyai kemampuan daya serap yang baik. Daya serap

dari karbon aktif umumnya bergantung pada senyawa karbon berkisar 85% sampai 95% karbon bebas. Pada dasarnya karbon aktif dapat dibuat dari bahan yang mengandung karbon, baik berasal dari tumbuhan, hewan maupun barang tambang. Bahan yang dapat dibuat menjadi karbon aktif diantaranya jenis kayu, sekam padi, tulang hewan, batubara, tempurung kelapa, kulit biji kopi dan lain-lain.



Gambar 2.1 (a) Karbon aktif granul (b) karbon aktif serat
(Manocha, Satish. M, 2003)

Karbon aktif banyak digunakan karena memiliki luas permukaan yang sangat besar $1,95 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{kg}$, dengan pori-pori volumenya $10,28 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ dan diameter pori $2,16 \text{ \AA}$ (El-Sharkawy I.I., et.al, 2006), sehingga sangat memungkinkan dapat menyerap adsorbat dalam jumlah yang banyak.

Jika dibandingkan dengan adsorben lainnya karbon aktif merupakan adsorben yang paling banyak digunakan hal ini karena distribusi ukuran pori-pori pada karbon aktif mempunyai diameter pori yang lebih besar dibandingkan dengan adsorben lainnya (Yang, Ralph.T, 2003)

3. Zeolit

Zeolit digunakan untuk pengeringan dan pemisahan campuran hidrokarbon, zeolit memiliki kemampuan adsorpsi tinggi karena zeolit memiliki porositas yang tinggi. Zeolit mengandung kristal zeolit yaitu mineral *aluminosilicate* yang disebut sebagai penyaring molekul. Mineral *aluminosilicate* ini terbentuk secara alami. Zeolit buatan dibuat dan dikembangkan untuk tujuan khusus, diantaranya 4A, 5A, 10X, dan 13X yang memiliki volume rongga antara 0,05

sampai $0,30 \text{ cm}^3/\text{gram}$ dan dapat dipanaskan sampai 500°C tanpa harus kehilangan mampu adsorpsi dan regenerasinya. Zeolit 4A (NaA) digunakan untuk mengeringkan dan memisahkan campuran *hydrocarbon*. Zeolit 5A (CaA) digunakan untuk memisahkan *paraffins* dan beberapa *Cyclic hydrocarbon*. Zeolit 10X (CaX) dan 13X (NaX) memiliki diameter pori yang lebih besar sehingga dapat mengadsorpsi adsorbat pada umumnya

2.1.3.2 Adsorbat

Adsorbat adalah substansi dalam bentuk cair atau gas yang terkonsentrasi pada permukaan adsorben. Adsorbat yang biasa digunakan pada sistem pendingin adalah air (*polar substances*) dan kelompok *non-polar substances* seperti methanol, ethanol dan kelompok hidrokarbon (Suzuki, M, 1990).

1. Air

Merupakan adsorbat yang ideal karena memiliki kalor laten spesifik terbesar, mudah didapat, murah, dan tidak beracun. Air dapat dijadikan pasangan zeolit, dan silika gel. Tekanan penguapan air yang rendah merupakan keterbatasan air sebagai adsorbat, sehingga menyebabkan :

- Temperatur penguapan rendah (100°C), sehingga penggunaan air terbatas hanya untuk air-conditioning dan chilling.
- Tekanan sistem selalu dibawah tekanan normal (1 atm). Sistem harus memiliki instalasi yang tidak bocor agar udara tidak masuk.
- Rendahnya tekanan penguapan air menyebabkan rendahnya tekanan proses adsorpsi dibatasi oleh transfer massa.

2. Amonia

Besarnya panas laten spesifik ammonia adalah setengah lebih rendah dari panas laten spesifik air, pada temperatur 0°C dan memiliki tekanan penguapan yang tinggi. Amonia memiliki keuntungan yang ramah lingkungan dan dapat digunakan sebagai adsorbat sampai -40°C , dan dapat dipanaskan sampai 200°C . Kerugian dari amonia :

- Beracun, sehingga penggunaannya dibatasi.

- Tidak dapat ditampung pada instalasi yang terbuat dari tembaga atau campurannya.

3. Metanol

Di banyak hal kemampuan atau performa metanol berada diantara air dan ammonia. Metanol memiliki tekanan penguapan yang lebih tinggi dibandingkan dengan air (meskipun pada tekanan 1 atm), sehingga sangat cocok untuk sistem pendingin. Karbon aktif, silika gel, dan zeolit merupakan adsorben yang menjadi pasangan dari metanol.

4. Karbondioksida (CO₂)

Karbondioksida merupakan persenyawaan antara karbon (27,3 wt%) dengan oksigen (72,7 wt%). Pada kondisi tekanan dan temperatur atmosfer, karbondioksida merupakan gas yang tidak berwarna dan tidak berbau. Karbondioksida juga merupakan gas tidak reaktif dan tidak beracun. Gas tersebut tidak mudah terbakar (*nonflammable*) dan tidak dapat memicu terjadinya pembakaran.

5. Metana (CH₄)

Metana merupakan ikatan senyawa kimia yang sangat sederhana terdiri dari satu atom karbon dan empat atom hydrogen. Gas metana ini diproduksi oleh mikrobia dalam keadaan anaerob. Secara alamiah lahan gambut, rawa dan sedimen di daerah pantai merupakan sumber utama dari gas metan di atmosfer (Hardy,2003). Pada kondisi tekanan dan temperature atmosfer, gas metana merupakan gas yang sangat ringan, tidak berwarna, dan juga tidak berbau (gas metana murni). Gas metana juga merupakan gas reaktif dan beracun. Gas tersebut mudah terbakar (*flammable*) sehingga dapat memicu ledakan.

2.2. Proses Adsorpsi

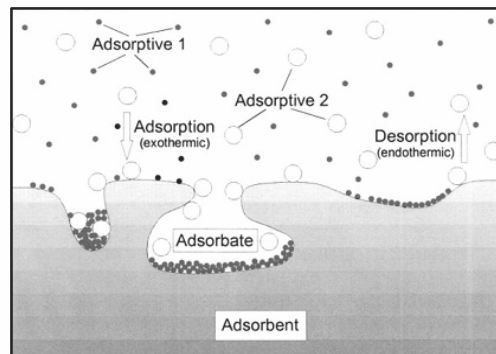
Adsorpsi adalah fenomena fisik yang terjadi saat molekul-molekul gas atau cair yang dikontakkan dengan suatu permukaan padatan dan sebagian dari molekul-molekul tersebut mengembun pada permukaan padatan tersebut

(Suryawan, Bambang, 2004). Pada proses adsorpsi terdapat dua jenis adsorpsi yaitu adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia.

Pada adsorpsi fisika adsorbat atau molekul yang terserap pada adsorben memiliki ikatan yang sangat lemah, dimana interaksi antara molekul adsorbat dengan atom adsorben hanya dikarenakan oleh adanya gaya Van der Waals (Keller, Jurgen., 2005). Adsorpsi fisika bersifat *reversible* sehingga mudah untuk memisahkan antara molekul yang terserap dengan adsorben.

Pada adsorpsi kimia molekul adsorbat terikat sangat kuat dengan atom atau molekul permukaan adsorben dan kedua molekul tersebut bereaksi secara kimia dan adsorpsi jenis ini bersifat *irreversible*, sehingga sulit untuk memisahkan antara molekul yang terserap dengan adsorben.

Jika interaksi antara padatan dan molekul yang mengembun tadi relatif lemah, maka proses ini disebut adsorpsi fisik. Walaupun adsorpsi biasanya dikaitkan dengan perpindahan dari suatu gas atau cairan kesuatu permukaan padatan, perpindahan dari suatu gas kesuatu permukaan cairan juga terjadi. Substansi yang terkonsentrasi pada permukaan didefinisikan sebagai adsorbat dan material dimana adsorbat terakumulasi didefinisikan sebagai adsorben. Proses lepasnya adsorbat dari permukaan adsorben disebut sebagai proses desorpsi, Gambar 2.6 dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai definisi-definisi adsorpsi, desorpsi, adsorben, adsorbat, dan adsorptif. Pada Gambar 2.6 terlihat bahwa adsorbat didefinisikan sebagai gas atau molekul yang terserap oleh adsorben, adsorptif adalah adsorbat yang akan diserap oleh adsorben, adsorpsi adalah proses penyerapan adsorbat pada adsorben dan desorpsi adalah proses pelepasan adsobat dari adsorben.



Gambar 2.2 Nomenklatur Adsorpsi
(Keller, Jurgen., 2005)

2.2.1 Adsorpsi Equilibrium

Ketika permukaan padatan dilalui oleh gas sehingga molekul gas menabrak permukaan padatan tersebut dan menumpuk pada permukaan padatan sehingga kemudian gas tersebut diserap dan membentuk ikatan lain.

Pada sistem adsorbat-adsorben, jumlah adsorbat yang terserap pada kondisi equilibrium adalah merupakan fungsi dari tekanan dan temperatur;

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

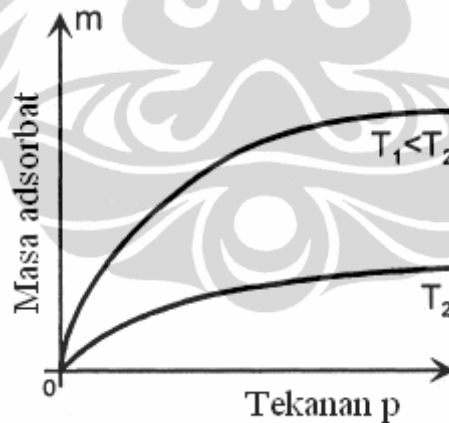
Dimana, x/m adalah jumlah adsorbat yang terserap per unit massa adsorben pada tekanan equilibrium dan pada temperatur adsorpsi.

Adsorpsi equilibrium dapat didekati dalam tiga cara, yaitu:

1. Adsorpsi Isotermal

Pada adsorpsi isotermal, temperatur adsorpsi dijaga konstan dengan demikian x/m tergantung pada tekanan equilibrium sehingga jumlah adsorbat yang terserap adalah:

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

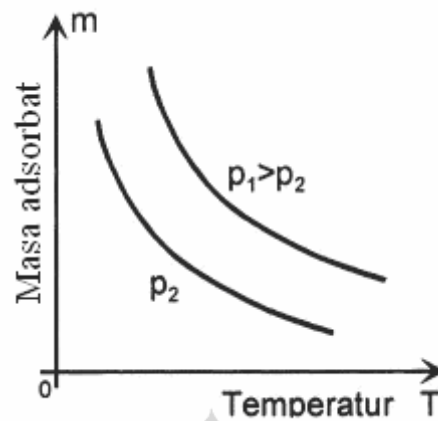


Gambar 2.3 Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isotermal
(Keller, Jurgens., 2005)

2. Adsorpsi Isobar

Pada adsorpsi isobar, tekanan adsorpsi dijaga konstan dan temperatur adsorpsi divariasikan dengan demikian x/m adalah:

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

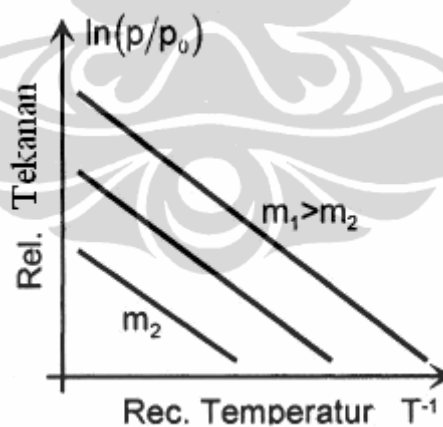


Gambar 2.4 Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isobar
(Keller, Jorgen., 2005)

3. Adsorpsi Isosterik

Pada adsorpsi isosterik dimana jumlah adsorbat yang terserap per unit massa adsorben adalah konstan dan temperatur divariasikan sehingga tekanan menjadi fungsi yang sangat esensial untuk menjaga x/m tetap konstan.

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



Gambar 2.5. Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi *Isostere*
(Keller, Jorgen., 2005)

Data eksperimen adsorpsi yang berupa jumlah adsorbat yang terserap pada adsorben biasanya dihasilkan dari proses adsorpsi isothermal, hal tersebut dikarenakan investigasi proses adsorpsi pada temperatur konstan adalah cara atau metode yang paling mudah. Selain itu, analisis teoritis data adsorpsi

untuk asumsi pada pemodelan biasanya juga menggunakan data adsorpsi isothermal.

Dikarenakan ketiga tipe adsorpsi equilibrium tersebut di atas adalah merupakan fungsi equilibrium sehingga dimungkinkan untuk menghasilkan atau mendapatkan satu parameter dengan menggunakan parameter dari salah satunya.

2.2.2 Persamaan Adsorpsi Isotermal

Adsorpsi isothermal adalah metode yang paling luas digunakan untuk menggambarkan kondisi equilibrium pada proses adsorpsi, kondisi ini dapat memberikan informasi tentang adsorbat, adsorben, dan proses adsorpsi. Adsorpsi isothermal dapat membantu dalam menentukan luas permukaan adsorben, volume pori dan distribusi ukuran pori, panas adsorpsi, dan penyerapan relatif gas atau uap pada adsorben (Bansal, R.C., 2005 dan Do, Duong D., 2008).

Beberapa persamaan adsorpsi isothermal telah banyak dihasilkan dan yang biasa digunakan adalah persamaan Langmuir, Freundlich, Temkin, Brunauer-Emmett-Teller (BET) dan Dubinin. Persamaan Langmuir, Freundlich, Temkin adalah persamaan yang sangat penting digunakan pada proses adsorpsi kimia, persamaan Langmuir, Freundlich juga sangat penting digunakan pada proses adsorpsi fisika. Persamaan BET dan Dubinin adalah persamaan yang sangat penting digunakan pada analisis proses adsorpsi fisika suatu gas pada karbon berpori (Bansal, R.C., 2005).

Pada adsorpsi isothermal terdapat tiga pendekatan teoritis;

1. Pendekatan Kinetik
2. Pendekatan Statistik
3. Pendekatan Termodinamik

Pada pendekatan kinetik, kondisi equilibrium adalah ketika laju adsorpsi sama dengan laju desorpsi pada saat equilibrium. Perhitungan dua laju tersebut dapat diperoleh pada persamaan isothermal.

Pada pendekatan statistik, konstanta equilibrium ditunjukkan oleh rasio dari fungsi pemisah suatu bagian yang kosong, molekul yang diadsorb, dan molekul fase gas. Persamaan isothermal dapat diperoleh dengan menghitung rasio tersebut terhadap rasio konsentrasi yang berkaitan; pendekatan ini mempunyai

keuntungan yaitu dapat memberikan nilai numerik terhadap konstanta yang tidak dapat dinilai oleh pendekatan kinetik.

Equilibrium dapat juga ditentukan dengan pendekatan termodinamika, yaitu pada kondisi dimana adsorpsi terjadi ketika energi pada fase gas dalam jumlah yang kecil ditransfer dari ke lingkungan pada temperatur konstan.

2.2.3. Persamaan Isotermal Dubinin-Astakhov (D-A)

Persamaan isotermal Dubinin-Astakhov (D-A) digunakan pada proses adsorpsi dimana permukaan adsorben yang memiliki derajat heterogenitas yang tinggi yang disebabkan besarnya nilai *burn-off* pada proses pembuatan karbon aktif. Peningkatan tingkat heterogenitas disebabkan oleh melebarnya distribusi ukuran pori adsorben. Persamaan Dubinin-Astakhov adalah sebagai berikut:

$$W = W_o \exp \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^n \right] \quad (2.5)$$

$$\ln W = \ln W_o \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^n \right] \quad (2.6)$$

dimana A adalah potensi adsorpsi and W adalah jumlah adsorbat yang diserap. W_o adalah kapasitas penyerapan maksimum adsorben, E adalah energi karakteristik pada sistem adsorpsi, dan n adalah parameter heterogenitas .

Potensi adsorpsi adalah:

$$A = RT \ln \left(\frac{P_s}{P} \right) \quad (2.7)$$

dimana R adalah konstanta gas, T adalah temperatur equilibrium, dan P_s adalah tekanan saturasi.

$$P_s = P_c \cdot \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \quad (2.8)$$

Dimana P_c dan T_c adalah tekanan dan temperatur kritis.

2.2.4. Panas Adsorpsi Isosterik

Panas adsorpsi adalah salah satu nilai yang merupakan fungsi termodinamika yang sangat penting yang dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik permukaan suatu padatan berpori. Proses adsorpsi adalah proses eksotermal, sehingga besarnya panas adsorpsi adalah salah satu yang menjadi pertimbangan dalam hal teoritis maupun praktis (Bansal, R.C., 2005).

Panas adsorpsi isosterik merupakan perbandingan antara perubahan entalpi adsorbat dan perubahan entalpi jumlah adsorbat yang terserap. Informasi pelepasan panas atau kalor sangat dibutuhkan pada kajian kinetik dikarenakan ketika panas dilepaskan pada saat proses adsorpsi sebagian panas diserap oleh adsorben dan sebagian lagi dilepaskan ke lingkungan sekitar. Bagian yang diserap oleh adsorben akan meningkatkan temperatur partikel atau molekul adsorbat dan hal tersebut akan memperlambat kinetik adsorpsi (gerak adsorpsi) karena penyerapan massa adsorbat dikendalikan oleh jumlah penurunan temperatur partikel atau molekul yang kemudian terserap (Do, Duong D., 2008).

Terdapat dua cara untuk menggambarkan panas adsorpsi, pertama adalah integrasi panas adsorpsi yang didefinisikan sebagai total jumlah panas (Q) yang diberikan ketika satu gram adsorben menyerap satu gram adsorbat (J/g adsorben). Cara kedua dalam menggambarkan panas adsorpsi adalah perbedaan panas adsorpsi ($-\Delta H$) dimana digambarkan sebagai Joule per gram mol adsorben (Bansal, R.C., 2005),

$$-\Delta H = M \frac{\Delta Q}{\Delta x} \quad (2.9)$$

Dimana Δx adalah perbedaan jumlah masa adsorbat yang terserap adsorben, M adalah massa molekul adsorbat, sehingga satuan $-\Delta H$ adalah J/mol adsorbat.

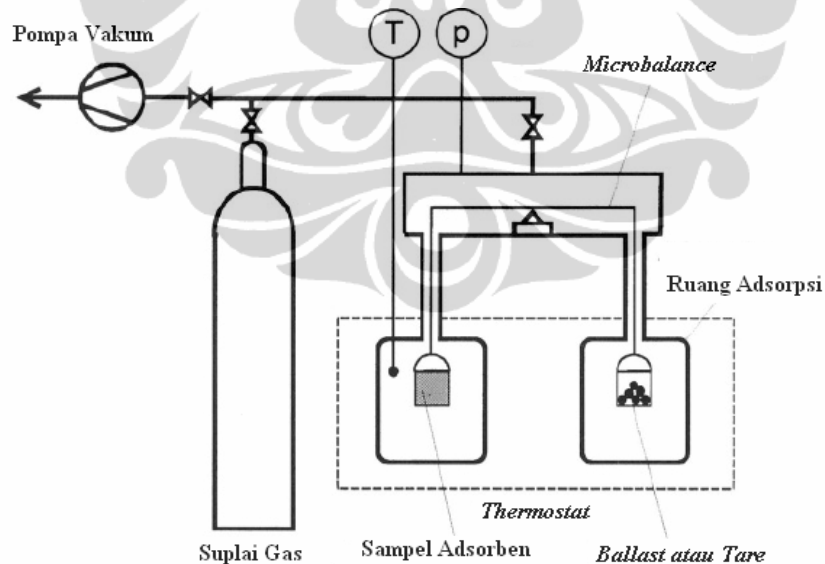
2.2.5. Metode Pengujian Adsorpsi

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

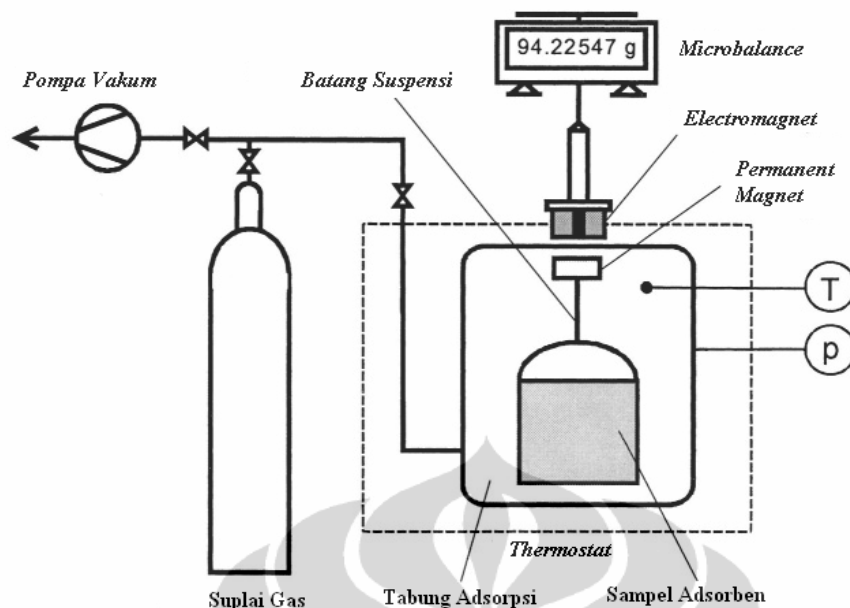
2.2.5.1. Metode Gravimetrik

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

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



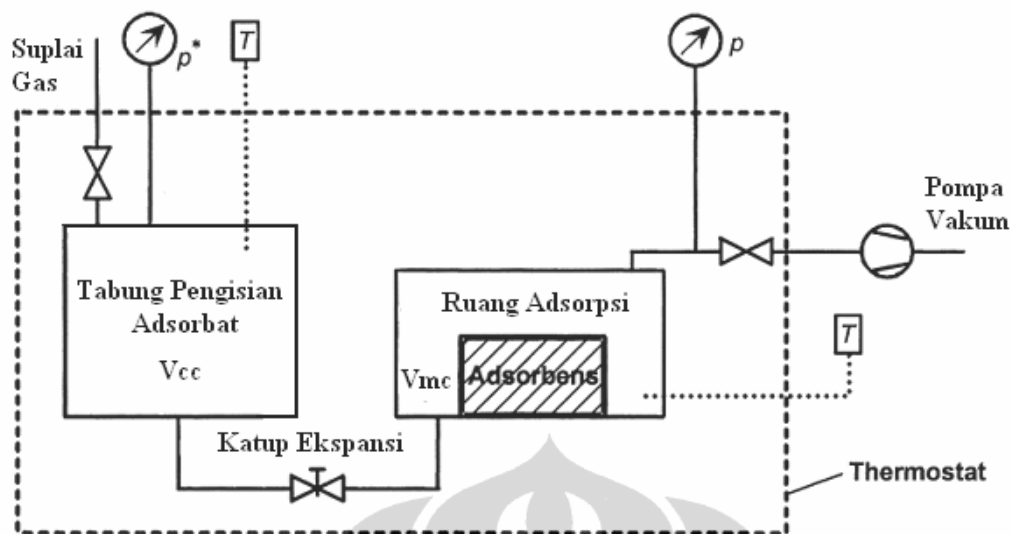
Gambar 2.6 Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Two Beam Balance*
(Keller, Jurgens., 2005)



Gambar 2.7 Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Magnetic Suspension Balance* (Keller, Jurgens., 2005)

2.2.5.2. Metode Volumetrik

Dasar pengukuran metode volumetrik adalah tekanan, volume dan temperatur. Teknik pengukuran adsorpsi dengan metode volumetrik sekarang ini lebih sering digunakan, karena sederhana dan efektif selama alat ukur tekanan dan temperatur dapat memberikan informasi yang dibutuhkan pada proses adsorpsi (Rouquerol, J et al, 1998). Skematik metode volumetrik terlihat pada gambar 2.13. Data pengukuran pada metode volumetrik adalah tekanan dan temperatur, dimana data diukur saat adsorbat masuk ke tempat diletakkannya adsorben (adsorption bulb). Setelah keseimbangan adsorpsi terjadi, jumlah adsorbat yang terserap dihitung dari perubahan tekanan yang terjadi.



Gambar 2.8 Skema Metode Volumetrik

(Keller, Jurgen., 2005)

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

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

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

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

2.3. Kapasitas dan Laju Penyerapan dengan Metode Volumetrik

Instalasi alat uji adsorpsi metana menggunakan metode volumetrik sebagai salah satu metode pengukuran penyerapan adsorpsi karena metode volumetrik ini merupakan metode yang sangat mendekati terhadap parameter-parameter dengan alat uji adsorpsi metana. Pengukuran kapasitas dan laju penyerapan dapat dilakukan menggunakan persamaan hukum kesetimbangan gas ideal (STP). Perubahan massa adsorpsi diukur dari perubahan tekanan yang terjadi antara adsorbat dan adsorben pada temperatur konstan (Rouquerol, J et al, 1998). Kesetimbangan massa uap adsorbat dalam *measuring cell* menurut Dawoud dan Aristov, 2003, dapat diasumsikan sebagai berikut :

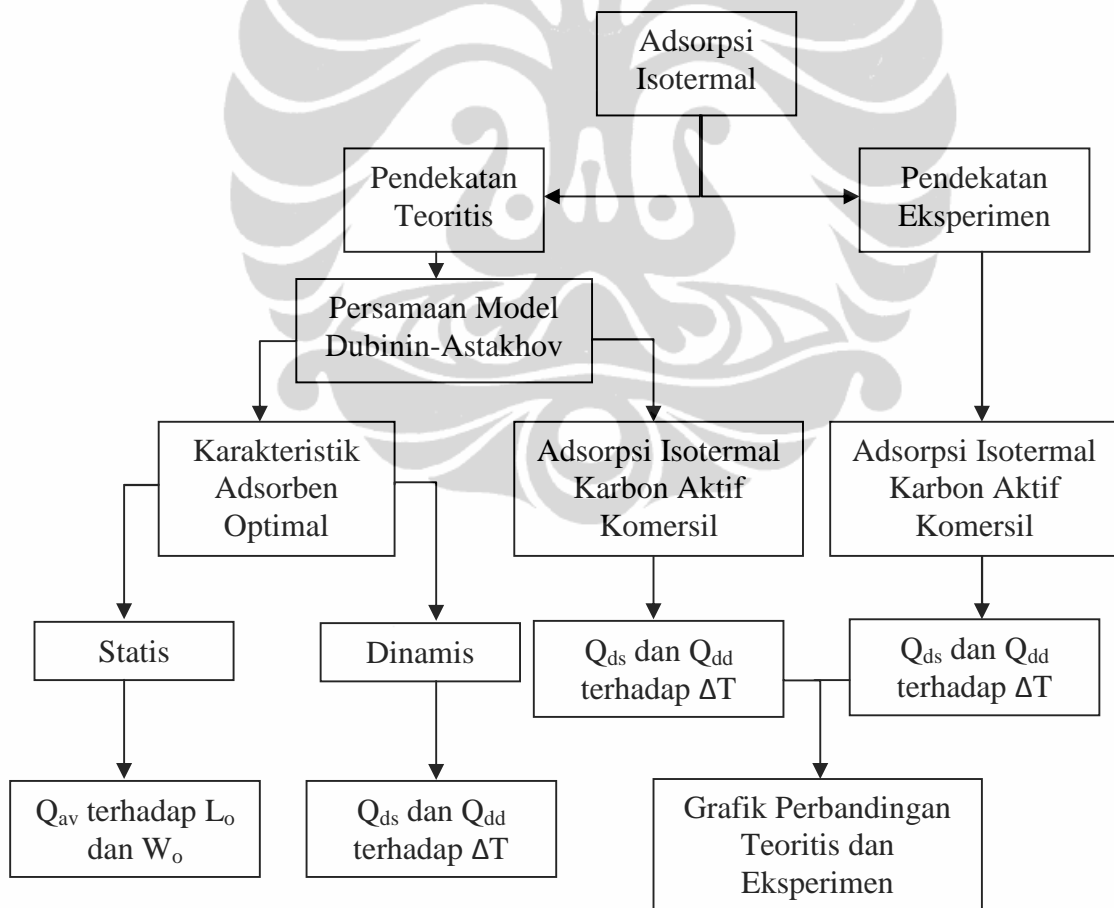
$$m_{ads} = |\dot{m}_{fc} \times t| - (\rho(P, T) \times V_{void}) \quad (2.10)$$

Dimana: V_{void} : volume kosong pada tabung(L)
 t : waktu (detik)
 $\rho(P, T)$: nilai density pada kondisi temperature dan tekanan tertentu(g/L)
 \dot{m}_{fc} : laju aliran massa adsorbat di *flow controller* (g/min)
 m_{ads} : massa adsorbat yang diserap oleh adsorben (g)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian menggunakan dua pendekatan yaitu pendekatan teoritis dan pendekatan eksperimen. Untuk pendekatan teoritis digunakan persamaan Dubinin-Astakhov, dan untuk pendekatan eksperimen digunakan eksperimen adsorpsi isothermal. Penelitian yang akan dilakukan menggunakan CH_4 sebagai adsorbat dan karbon aktif komersil (Carbotech) sebagai adsorben. Pada penelitian ini tekanan pengisian (P_c), tekanan pengosongan (P_d), dan temperatur ruang (T_o) ditentukan sebesar 3,5 MPa, 0,1 MPa, dan 298,15 K.



Gambar 3.1. Diagram alir

3.1. Pendekatan Teoritis

Pada pendekatan teoritis, persamaan yang akan digunakan adalah persamaan Dubinin-Astakhov. Persamaan ini akan digunakan untuk mencari karakteristik optimal dari karbon aktif dan untuk menghitung performa dari karbon aktif komersil (Carbotech). Hasil perhitungan performa dari karbon aktif Carbotech akan dibandingkan dengan hasil eksperimen menggunakan karbon aktif yang sama untuk memvalidasi persamaan yang digunakan.

3.2. Persamaan Model Dubinin Astakov

Persamaan Dubinin-Astakhov digunakan untuk menghitung jumlah metana yang diadsorpsi oleh karbon aktif. Persamaan Dubinin-Astakhov adalah sebagai berikut:

$$W = W_o \exp \left[- \left(\frac{A}{\beta E_o} \right)^n \right] \quad (3.1)$$

Dimana W adalah volume teradsorpsi pada tekanan relatif P_o/P dan W_o adalah volume total teradsorpsi dari mikropori. E_o adalah karakteristik energi dari adsorpsi. β adalah koefisien afinitas yang berhubungan dengan interaksi adsorben-adsorbat. Dan n adalah eksponen DA yang berhubungan dengan penyebaran ukuran pori. A adalah potensial adsorpsi Polanyi's yang didefinisikan sebagai berikut:

$$A = RT \ln \left(\frac{P_o}{P} \right) \quad (3.2)$$

Dimana R adalah konstanta gas, T adalah temperatur equilibrium, dan P_o adalah tekanan saturasi. Lalu massa gas yang teradsorpsi diekspresikan seperti berikut :

$$q(T, P) = W_o \rho_{ads}(T) \exp \left[- \left(\frac{A}{\beta E_o} \right)^n \right] \quad (3.3)$$

Dimana $\rho_{ads}(T)$ adalah kerapatan gas teradsorpsi pada temperatur T .

$$\rho_{ads}(T) = \frac{\rho_{boil}}{\exp(2,5 \times 10^{-3}(T - T_{boil}))} \quad (3.4)$$

Interaksi yang kuat dari adsorben dan adsorbat membuat interaksi adsorbat dan adsorben lebih meningkat dan gas pada keadaan kritis berubah menjadi uap (Kaneko et al, 1992). maka dapat mungkin, seperti dinyatakan oleh ekspresi Dubinin untuk menggunakan estimasi dari P_o untuk gas pada keadaan kritis menggunakan rumus berikut :

$$P_o = P_{cr} \left(\frac{T}{T_{cr}} \right)^2 \quad (3.5)$$

Dimana P_{cr} adalah tekanan kritis dan T_{cr} temperatur kritis adsorbat. Persamaan Dubinin-Stoeckli digunakan untuk menghubungkan karakteristik energi (E_o) dengan lebar rata-rata mikropori (L_o)

$$L_o = \frac{10,8}{E_o - 11,4} \quad (3.6)$$

Kapasitas penyimpanan metana pada tekanan P dan temperatur T yaitu volume metana dalam kondisi standar per unit volume adsorben, tergantung pada besar metana yang tersimpan pada fase adsorpsi dan fase gas.

$$Q_s(T, P) = \frac{V_{mg}}{M_g} [f_a(T, P)\rho_{ads}(T) + f_{vg}(T, P)\rho_g(T, P)] \quad (3.7)$$

Dimana V_{mg} adalah volume gas pada keadaan standar (STP) dan M_g adalah massa molekul dari gas. Volume fraksi dari metana pada fase adsorpsi (f_{va}) dan volume fraksi dari metana pada fase gas (f_{vg}) ditentukan oleh :

$$f_{vg}(T, P) = 1 - f_{va}(T, P) - f_{vc} \quad (3.8)$$

$$f_{va}(T, P) = q(T, P) \frac{\rho_a}{\rho_{ads}(T)} \quad (3.9)$$

Volume fraksi dari karbon (f_{vc}) adalah :

$$f_{vc} = \frac{\rho_a}{\rho_c} \quad (3.10)$$

Dimana ρ_c adalah kerapatan karbon aktif dan ρ_a adalah kerapatan penyimpanan.

$$\rho_{max}(W_o) = \frac{\rho_c}{\rho_c W_o + 1} \quad (3.11)$$

$$\rho_A = \alpha \rho_{max}(W_o) \quad (3.12)$$

α adalah banyaknya karbon aktif yang digunakan pada vessel, nilainya dari 0-1 dan ρ_{max} kerapatan karbon aktif maksimal dengan asumsi volume pori kosong dihilangkan.

Pada penelitian ini perpindahan panas yang terjadi ditentukan dari perubahan temperatur (ΔT). Kapasitas metana yang tersimpan pada kondisi dinamis adalah kapasitas tersimpan metana pada temperatur ruang ditambah perubahan temperatur ($T_o + \Delta T$) dan tekanan pengisian (P_c) dikurangi kapasitas metana tersimpan pada tekanan pengosongan (P_d) dan temperatur ruang (T_o).

$$Q_{ds} = Q_s(T_o + \Delta T, P_c) - Q_s(T_o, P_d) \quad (3.13)$$

Kapasitas metana yang terkirim pada kondisi dinamis adalah kapasitas terkirim metana pada tekanan pengisian (P_c) dan temperatur ruang (T_o) dikurangi kapasitas metana tersimpan pada tekanan P_d dan temperatur ruang dikurangi perubahan temperatur ($T_o - \Delta T$).

$$Q_{dd} = Q_s(T_o, P_c) - Q_s(T_o - \Delta T, P_d) \quad (3.14)$$

3.3. Karakteristik Adsorben Optimal

Pada penelitian ini tekanan pengisian P_c , tekanan pengosongan P_d , dan temperatur ruang T_o ditentukan sebesar 3,5 MPa, 0,1 MPa, dan 298,15 K. Variasi karakteristik karbon aktif yang digunakan adalah :

$$0,00047 < W_o (\text{m}^3 \text{kg}^{-1}) < 0,0018$$

$$0,5 < L_o (\text{nm}) < 2,3$$

$$1 < n < 2$$

3.3.1. Kondisi Statis

Kondisi statis adalah kondisi kerja dimana proses adsorpsi dan desorpsi tidak dipengaruhi adanya perpindahan panas dan perpindahan massa. Sehingga diasumsikan perubahan temperatur (ΔT) = 0 dan perubahan tekanan (ΔP) = 0. Grafik yang akan dihasilkan adalah grafik kapasitas metana tersedia (Q_{av})

terhadap lebar pori rata-rata (L_o) dan grafik kapasitas metana tersedia terhadap volume mikropori (W_o).

3.3.2. Kondisi Dinamis

Kondisi dinamis adalah kondisi kerja dimana proses adsorpsi dan desorpsi dipengaruhi adanya perpindahan panas. Untuk proses adsorpsi akan ditunjukkan oleh kapasitas metana tersimpan pada kondisi dinamis ($Q_{ds} = \text{stored methane capacity under dynamic conditions}$) dan untuk desorpsi akan ditunjukkan oleh kapasitas metana terkirim pada kondisi dinamis ($Q_{dd} = \text{delivered methane capacity under dynamic conditions}$).

a) Proses Pengisian (*Charge*)

Pada proses pengisian (*charge*), kapasitas metana tersimpan (Q_{ds}) akan dipengaruhi oleh perubahan temperatur (ΔT). Grafik yang akan dihasilkan adalah, grafik kapasitas metana tersimpan (Q_{ds}) terhadap perubahan temperatur ($0 < \Delta T < 60^\circ\text{C}$).

b) Proses Pengosongan (*Discharge*)

Pada proses pengosongan (*discharge*), kapasitas metana terkirim (Q_{dd}) akan dipengaruhi oleh perubahan temperatur (ΔT). Grafik yang akan dihasilkan adalah, grafik kapasitas metana terkirim (Q_{dd}) terhadap perubahan temperatur ($0 < \Delta T < 60^\circ\text{C}$).

3.4. Adsorpsi Isotermal

Adsorpsi isotermal gas CH₄ pada karbon aktif menggunakan pendekatan eksperimen dan dilakukan untuk memperoleh data kapasitas penyerapan gas tersebut pada tekanan yang telah ditentukan. Adsorpsi isotermal yang dilakukan menggunakan metode volumetrik.

3.4.1. Adsorpsi Karbon Aktif Komersil

Perhitungan yang akan dilakukan berikutnya adalah perhitungan performa adsorpsi isotermal karbon aktif komersil (Carbotech) pada kondisi dinamis. Pada penelitian ini digunakan pendekatan teoritis dan hasilnya nanti akan dibandingkan

dengan hasil eksperimen. Karbon aktif yang akan digunakan adalah karbon aktif Carbotech dengan karakteristik karbon aktif sebagai berikut (Awaludin., 2010) :

Tabel 3.1 Data properties karbon aktif komersial (Carbotech)

<i>Bulk density</i>	kg/m ³	450 ± 30
<i>Moisture (as packed)</i>	wt-%	< 2,0
<i>Surface area (BET)</i>	m ² /g	1050 ± 50
<i>Ash content</i>	wt-%	< 8,0
<i>Iodine number</i>	mg/g	> 1000
<i>Mikropore volume</i>	Cc/g	0.514
<i>Lower confidence</i>	Å	3.070
<i>Fitting error</i>	%	0.254
<i>Half pore width (mode)</i>	Å	3.070

3.4.2. Alat Uji Adsorpsi Isotermal

3.4.2.1. Pressure Vessel

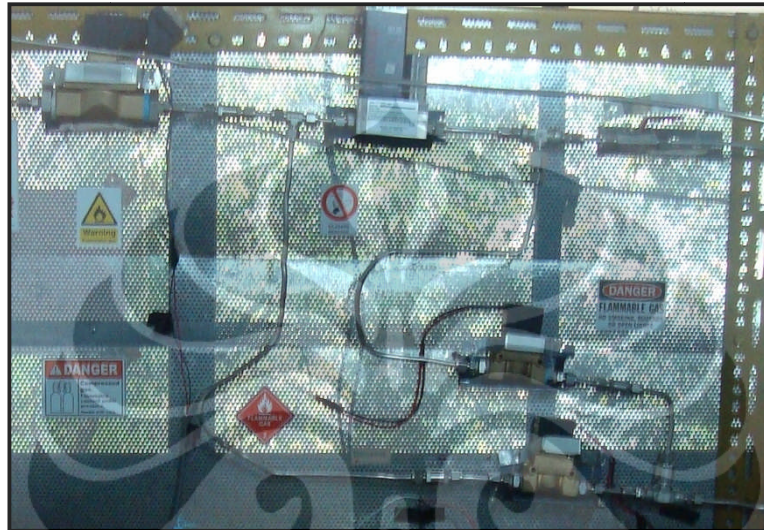
Pressure vessel dirancang sebagai tempat untuk merubah fasa adsorbat menjadi *vapour* dan juga digunakan untuk menyimpan CH₄ bertekanan tinggi. *Vessel* yang digunakan memiliki volume sebesar 6,5 liter.



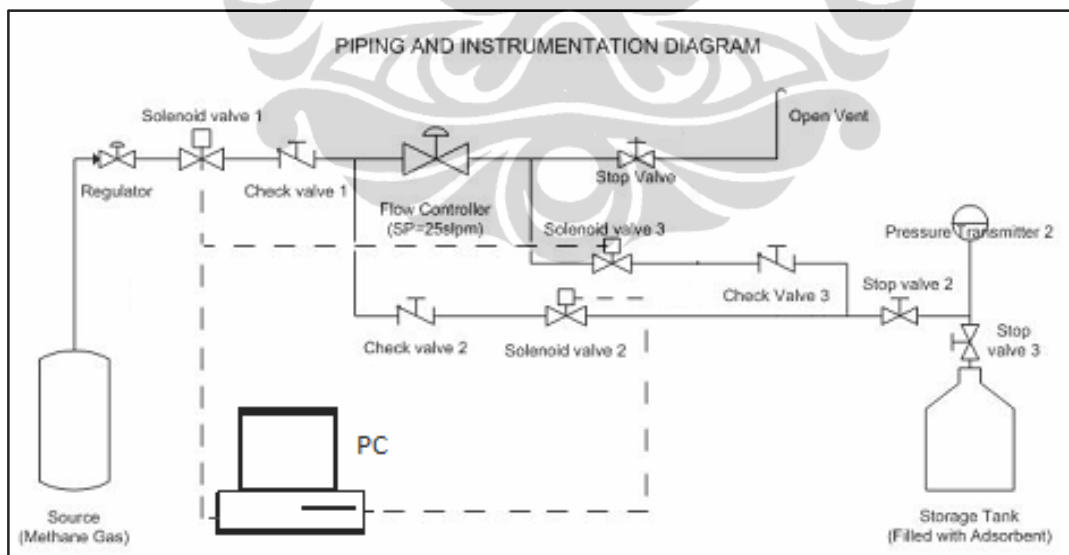
Gambar 3.2. *Pressure vessel*

3.4.2.2. 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 3.3. Pemipaan alat uji Adsorpsi-Desorpsi Metana



Gambar 3.4. Diagram pemipaan dan instrumentasi

Gambar 3.4. 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 Mass flow controller agar dapat diatur laju aliran volume yang lewat, sehingga dapat diketahui massa gas yang masuk ke dalam tabung dan yang keluar. sehingga dapat diketahui perbedaan antara gas yang masuk dan keluar. Digunakan *check valve*, untuk memastikan bahwa aliran tidak berbalik arah.

Storage tank dimasukan ke dalam bak berisi air dan digunakan *circulating thermal bath* (CTB) agar terjadi sirkulasi air di dalam bak, sehingga temperatur lingkungan dapat dikontrol dan dijaga agar suhunya tetap.

3.4.2.3. Instrumentasi

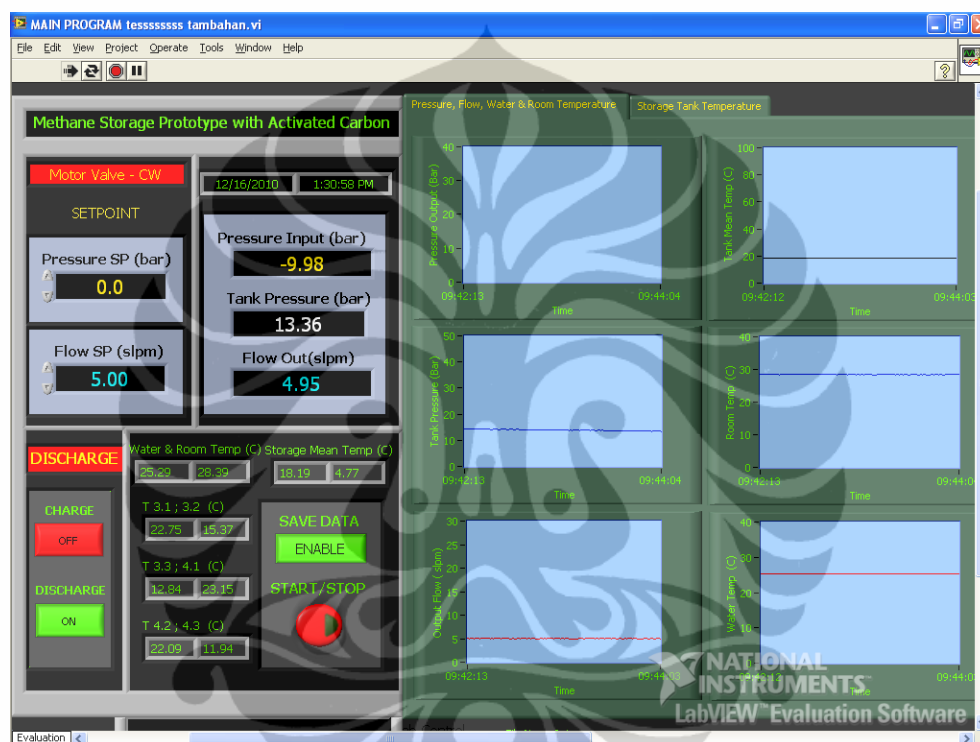
Pada alat uji adsorpsi-desorpsi metana digunakan teknik instrumentasi pada alat ukur yang dilakukan untuk mengukur tekanan dan temperatur serta kendali buka-tutup *solenoid valve*. Instrumentasi dapat diartikan sebagai alat atau piranti (device) yang dipakai dalam pengukuran dan pengendalian suatu sistem. 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. Oleh karena 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, *mass flow 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 *labview8.6* sebagai pembaca, kendali dan penyimpanan data hasil pengujian. Program pembacaan dan penyimpanan menggunakan perangkat lunak *labview* mudah dibuat dan dioperasikan.



Gambar 3.5. Display program *labview 8.6*

3.4.3. 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*.

3.4.4. Pengukuran volume

Volume merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam pengukuran adsorpsi volumetrik. Ketidakpastian kalibrasi volume gas,

pengukuran tekanan, dan kebocoran merupakan sumber kesalahan dari pengukuran dengan metode volumetrik, yang mungkin mengakibatkan data adsorpsi tidak realistis (Belmabkhout, et.al, 2004).

3.5. Preparasi Sampel

3.5.1. 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:

- a) Timbang karbon aktif yang akan dipanaskan dengan timbangan dengan tingkat kepresisian tinggi untuk mendapatkan berat awal sampel. Timbangan yang digunakan adalah timbangan dengan merk AND tipe FX 4000 dengan ketelitian 0.01 dan maksimum beban 4100. Gambar timbangan, sebagai berikut:



Gambar 3.6. Timbangan AND FX 4000

- b) 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.

- c) Selama pemanasan dilakukan pengadukan secara perlahan agar panas merata ke seluruh karbon aktif dan mempercepat pemanasan.
- d) Diharapkan temperatur di permukaan karbon aktif berkisar antara 95 – 100 °C, karena air yang terkandung sudah menguap.
- e) Segera timbang kembali massa karbon aktif yang telah dipanaskan
- f) Terjadi pengurangan dari massa awal, dan massa akhirlah yang digunakan untuk penelitian.



Gambar 3.7. Proses *dry sorbent* dan *control panel* untuk menjaga temperatur

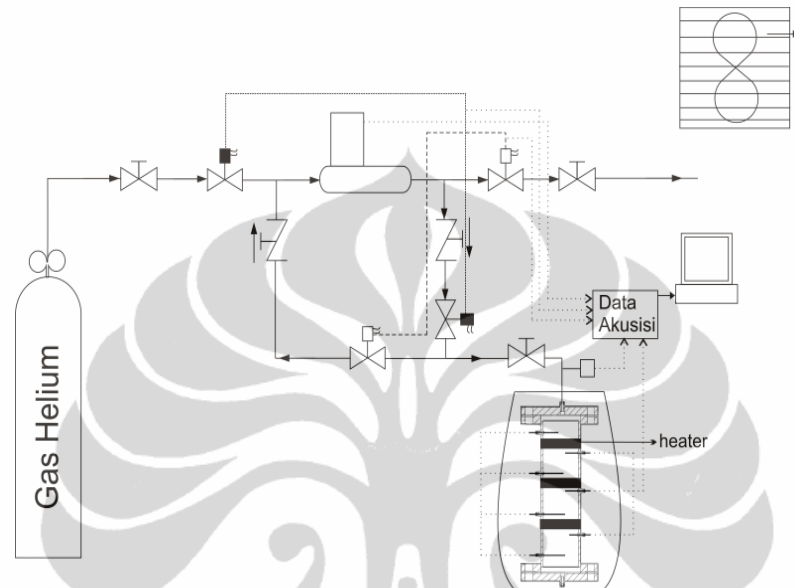
3.5.2. Proses Degassing

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:

- a) Panaskan tabung dengan menggunakan heater dengan temperatur sekitar 150°C selama 1 jam (Dawoud dan Aristov, 2003)
- b) Vakumkan tabung dengan menggunakan pompa vakum selama 1,5-2 jam.
- c) Setelah itu isi tabung menggunakan gas Helium sebanyak 6-7 bar selama 1 jam. Gas Helium tersebut berfungsi sebagai pengangkut zat kotor yang tidak diinginkan yang berada didalam dan disekitar rongga-rongga karbon aktif.
- d) Lalu vacuum kembali tabung dengan menggunakan pompa vacuum selama 1 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.

- e) Lakukan semua proses tersebut sebanyak 4 kali sehingga didalam tabung tidak ada lagi sisa zat pengotor yang tidak diinginkan.



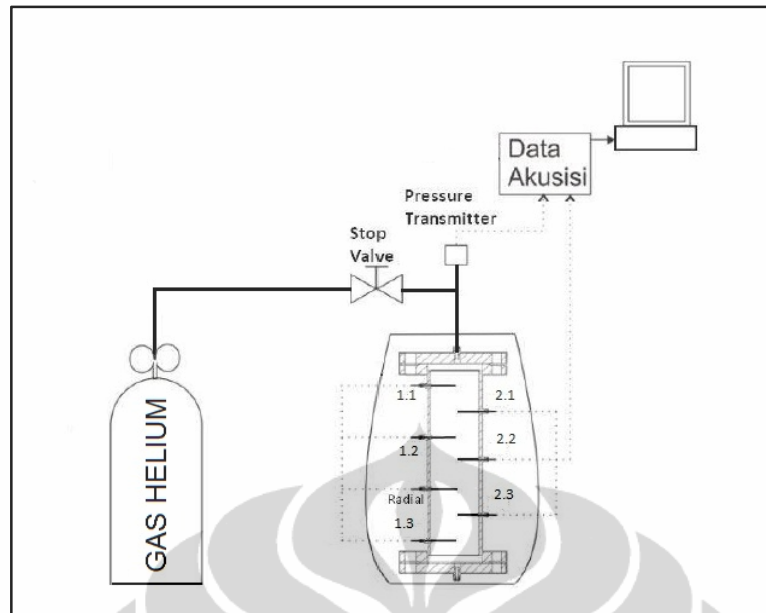
Gambar 3.8 Skematik proses *Degassing*

3.6. Pengukuran Volume Kosong (V_{void})

Volume kosong (V_{void}) yang akan diukur adalah volume ruangan yang kosong di dalam vessel yang sudah diisi dengan karbon aktif. Volume kosong (V_{void}) diperlukan untuk mengetahui berapa jumlah gas metana yang tersimpan dalam fasa gas dan fasa teradsorpsi dalam vessel. Untuk mencari volume kosong (V_{void}) digunakan pendekatan massa dengan memanfaatkan gas helium. Dalam proses ini gas helium digunakan karena sifatnya yang tidak teradsorpsi pada karbon aktif, ini disebabkan karena ukuran molekul helium yang kecil. Rumus yang digunakan untuk mencari volume kosong tabung (V_{void}) adalah.

$$V_{void} = \frac{m_{helium}}{\rho_{helium}(P,T)} \quad (3.15)$$

Dimana V_{void} adalah volume kosong di dalam vessel, m_{helium} adalah massa helium yang masuk ke dalam vessel, dan ρ_{helium} adalah massa jenis helium pada tekanan dan temperatur pada vessel yang didapat dari REFPROP.



Gambar 3.9. Skematik pengukuran volume kosong



Gambar 3.10. Proses pengukuran volume kosong

Berikut adalah prosedu pengukuran volume kosong pada vessel yang telah diisi dengan karbon aktif :

- a) Pengukuran dimulai dengan menimbang massa gas helium yang ada dalam tabung helium.
- b) Setelah ditimbang lalu gas helium dalam tabung dialirkan ke vessel sampai tekanan mencapai kesetimbangan didalam vessel. Lalu besarnya tekanan dan temperatur dari vessel dicatat untuk kemudian dimasukkan ke dalam program REFPROP untuk mengetahui massa jenis helium yang masuk kedalam vessel.

- c) Mengukur besarnya massa yang masuk kedalam vessel dengan cara menimbang kembali tabung helium untuk mengetahui selisih berat dari tabung sebelum dan sesudah proses pengisian vessel.

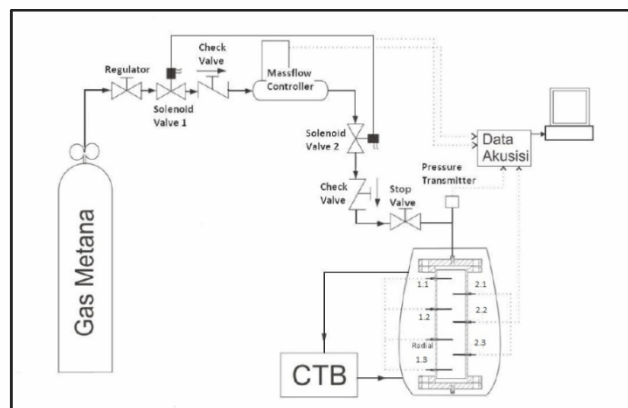
Tabel 3.2 Volume kosong (V_{void}) vessel.

m_{helium} (gram)	P (Bar)	T (K)	ρ_{helium} (gram/liter)	V_{void}
6	6,495	304	1,0250	5,85
6	6,3	302	1,0009	5,9
5,4	6,1	305	0,95973	5,62
Vvoid rata-rata				5,79

3.7. Proses Adsorpsi

Berikut ini adalah prosedur pengujian karakteristik adsorpsi isothermal:

- Pengujian dimulai dengan melakukan proses degassing.
- Circulating thermal bath (CTB) dioperasikan untuk menaikkan dan kemudian menjaga temperatur pada *vessel* konstan $25 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$.
- Setelah temperatur pada *vessel* mencapai 25°C dan konstan pada temperatur tersebut, *solenoid valve* charge dibuka dengan menggunakan kendali data akusisi dari komputer sehingga adsorbat (CH_4) masuk menuju *vessel* sampai pada tekanan adsorpsi 3.5 MPa .
- Proses adsorpsi berhenti setelah tekanan telah stabil di 3,5 MPa, bacaan *flow controller* sebesar 0 slpm, dan temperatur karbon aktif telah stabil disuhu 25°C . Setelah proses selesai dilakukan, data tekanan, temperatur dan *flow rate* ketika pengujian akan tercatat pada komputer.

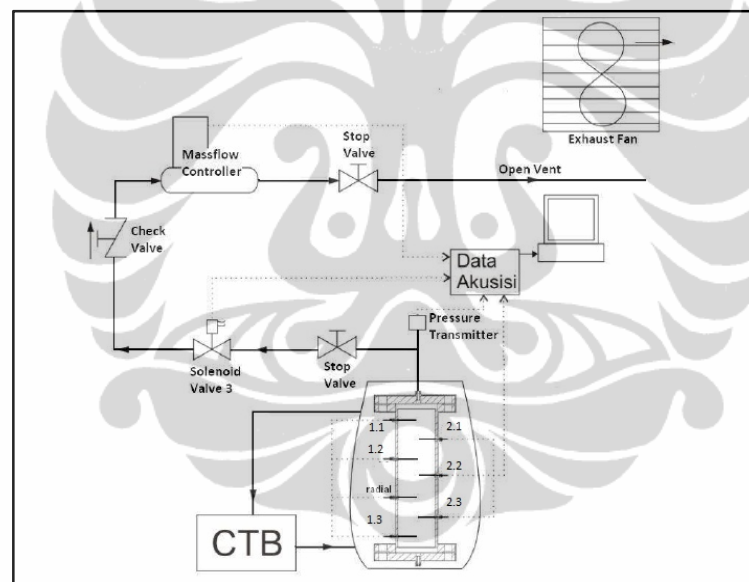


Gambar 3.11. Skematik proses adsorpsi

3.8. Proses Desorpsi

Berikut ini adalah prosedur pengujian karakteristik desorpsi isothermal:

- Membuka katup *solenoid valve* discharging melalui data akusisi yang telah diprogram kerjanya dan akan mengalir melewati *flow controller* sehingga dapat diketahui aliran massanya.
- Gas Metana (CH_4) yang telah terserap oleh karbon aktif akan terbuang melalui jalur *outlet* pipa keluar ke lingkungan.
- Tunggu hingga tekanan yang berada di *measuring cell* (bejana bertekanan) turun ke tekanan atmosfer, bacaan *mass flow controller* sebesar 0 slpm, dan temperatur karbon aktif telah stabil disuhu 25°C . Setelah proses selesai dilakukan, data tekanan, temperatur dan *flow rate* ketika pengujian akan tercatat pada komputer.



Gambar 3.12. Skematik proses desorpsi

3.9. Adsorpsi Isotermal pada Keadaan Dinamis

Data yang akan dihasilkan dari eksperimen adsorpsi isothermal karbon aktif komersil pada keadaan dinamis adalah kapasitas tersimpan (Q_{ds}) dan kapasitas terkirim (Q_{dd}). Data yang didapat dari hasil eksperimen akan dibandingkan dengan kapasitas tersimpan (Q_{ds}) adsorpsi isothermal karbon aktif komersil yang didapat dari hasil perhitungan teoritis untuk melihat besarnya simpangan antara

kedua pendekatan yang dilakukan. Hasil unjuk kerja adsorpsi isothermal yang akan diteliti baik pendekatan teoritis maupun eksperimen akan dipengaruhi oleh ΔT .

Pada pendekatan eksperimen untuk mendapatkan variasi ΔT dilakukan dengan mengatur besar *flow controller* pada saat pengisian maupun pengosongan. Besarnya bukaan *flow controller* adalah 1 slpm, 5slpm, 10 slpm, 15 slpm, dan 20 slpm.



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Karakteristik Adsorben Optimal

Untuk mendapatkan karakteristik optimal dari adsorben dilakukan dengan cara menghitung kapasitas tersedia (Q_{av}) dengan menggunakan pendekatan teoritis dengan variasi karakteristik adsorben sehingga akan didapat kapasitas tersedia (Q_{av}) yang paling maksimal. Pada penelitian ini tekanan pengisian P_c , tekanan pengosongan P_d , dan temperatur ruang T_o ditentukan sebesar 3,5 MPa, 0,1 MPa, dan 298,15 K. Variasi karakteristik karbon aktif yang digunakan adalah :

- $0,00047 < W_o (\text{m}^3 \text{kg}^{-1}) < 0,0018$
- $0,5 < L_o (\text{nm}) < 2,3$
- $1 < n < 2$

Perhitungan kapasitas tersedia (Q_{av}) dengan menggunakan pendekatan teoritis akan dilakukan pada kondisi statis dan kondisi dinamis.

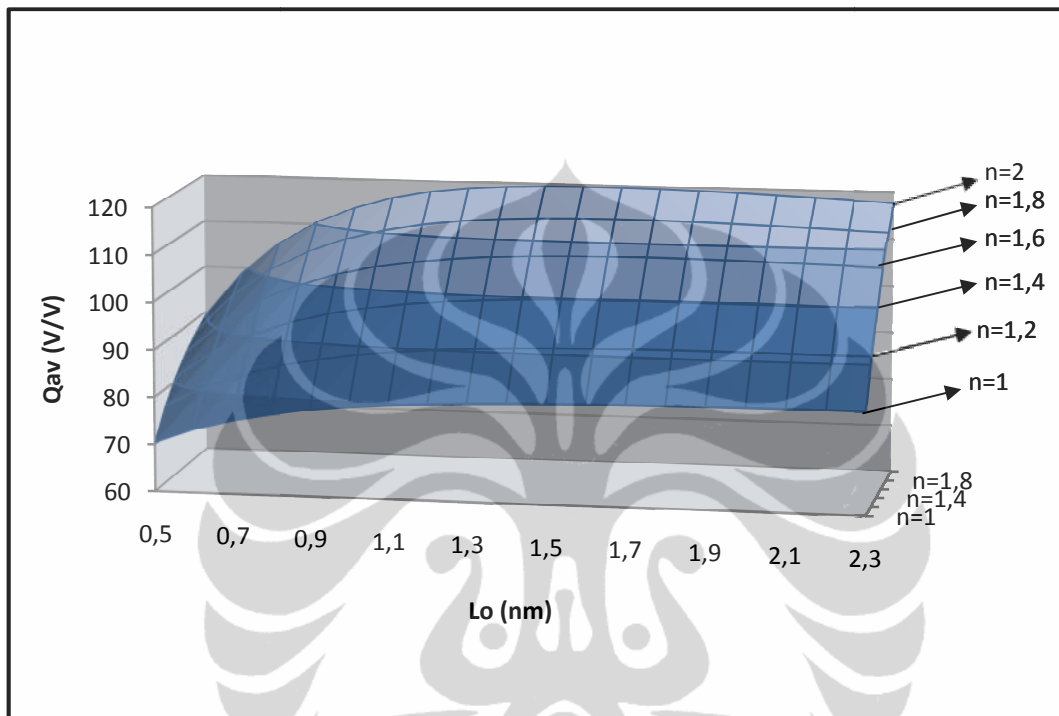
4.1.1. Kondisi Statis

Kondisi statis adalah kondisi kerja dimana proses adsorpsi dan desorpsi tidak dipengaruhi adanya perpindahan panas. Sehingga diasumsikan perubahan temperatur (ΔT) = 0. Pada kondisi statis nilai kapasitas tersimpan (Q_{ds}) memiliki nilai yang dengan nilai kapasitas terkirim (Q_{dd}), yaitu sama dengan nilai dari kapasitas tersedia (Q_{av}) sebab tidak adanya penurunan unjuk kerja selama proses pengisian maupun pada proses pengosongan CH_4 dari dalam *vessel*. Grafik yang akan dihasilkan adalah grafik kapasitas metana tersedia (Q_{av}) terhadap lebar pori rata-rata (L_o) dan grafik kapasitas metana tersedia terhadap volume mikropori (W_o).

a) Kapasitas tersedia (Q_{av}) terhadap lebar pori (L_o)

Grafik kapasitas tersedia (Q_{av}) terhadap lebar pori (L_o) didapat dengan cara menggunakan persamaan Dubinin-Stoeckli (DS) untuk melihat hubungan lebar pori terhadap karakteristik energi dari adsorpsi (E_o). Dimana nilai dari

karakteristik energi dari adsorpsi (E_o) yang dimasukkan dalam persamaan model Dubinin-Astakhov (DA) akan mempengaruhi besar kapasitas tersedia (Q_{av}). Gambar grafik dibawah diperoleh dengan nilai volume mikropori yang tetap yaitu sebesar $0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ dan dengan variasi nilai penyebaran ukuran pori (n).

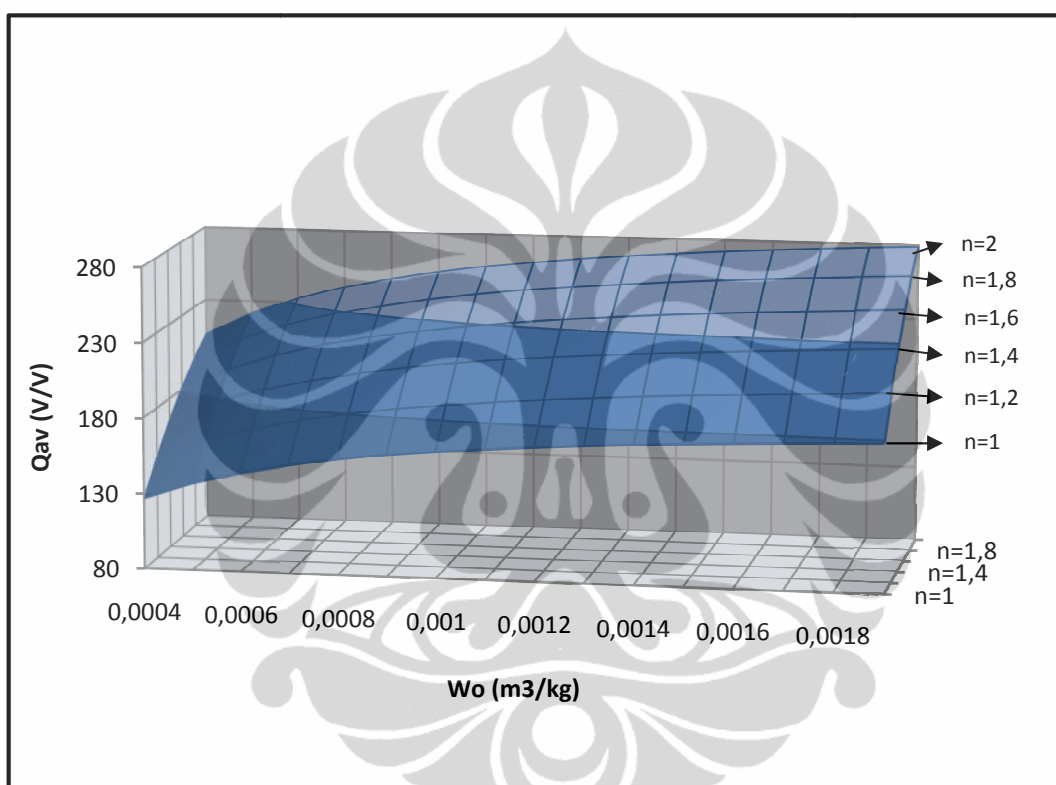


Gambar 4.1. Kapasitas Metana Tersedia (Q_{av}) Terhadap Lebar Mikropori (L_o) dengan Variasi Nilai Penyebaran Ukuran Pori (n).

Dari gambar grafik diatas terlihat bahwa untuk lebar pori yang tetap, kenaikan nilai penyebaran ukuran pori (n) akan menyebabkan meningkatnya nilai kapasitas metana tersedia (Q_{av}). Untuk nilai penyebaran ukuran pori (n) yang tetap terdapat nilai lebar mikropori (L_o) yang paling optimum dimana nilai kapasitas metana tersedia (Q_{av}) memiliki nilai paling besar, namun setelah melewati titik optimum tersebut ada kecenderungan penurunan nilai kapasitas metana tersedia (Q_{av}).

b) Kapasitas tersedia (Q_{av}) terhadap volume mikropori (W_o)

Grafik kapasitas metana tersedia (Q_{av}) terhadap volume mikropori (W_o) didapat dengan menggunakan persamaan Dubinin-Astakhov (DA) untuk melihat pengaruh volume mikropori (W_o) terhadap kapasitas metana tersedia (Q_{av}). Gambar grafik dibawah diperoleh dengan nilai lebar mikropori (L_o) yang tetap yaitu sebesar 1,5 nm yang diambil dari perhitungan sebelumnya dan dengan variasi nilai penyebaran ukuran pori (n).



Gambar 4.2. Kapasitas Metana Tersedia (Q_{sv}) Terhadap Volume Mikropori (W_o) dengan Variasi Nilai Penyebaran Ukuran Pori (n).

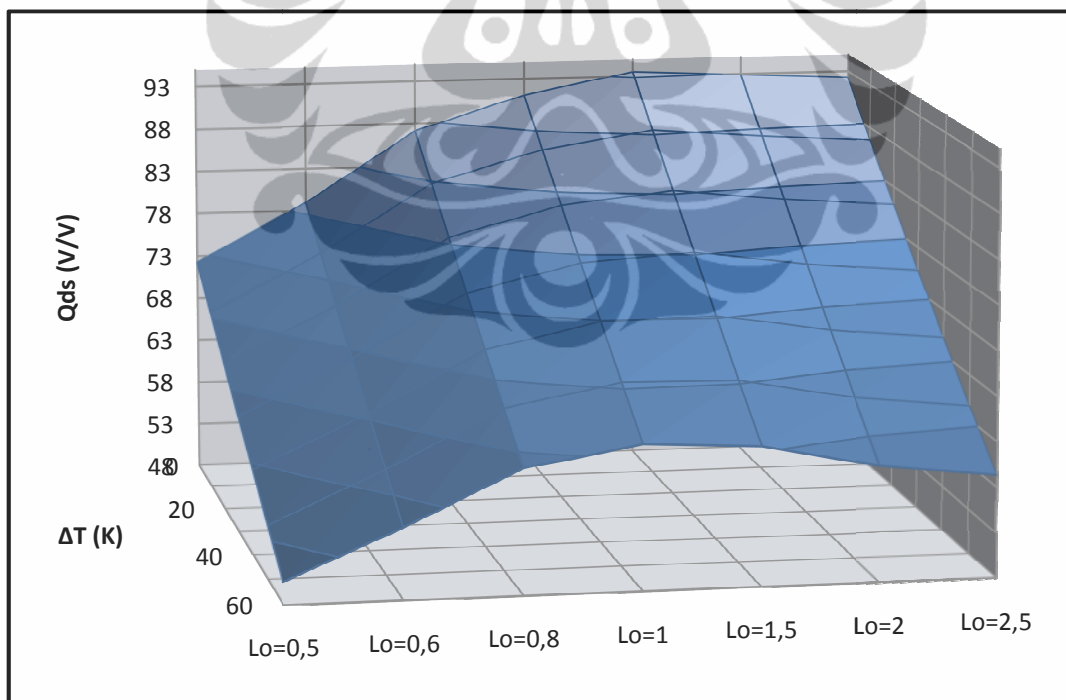
Dari gambar grafik diatas terlihat bahwa untuk lebar pori yang tetap, kenaikan nilai penyebaran ukuran pori (n) akan menyebabkan meningkatnya nilai kapasitas metana tersedia (Q_{av}). Untuk nilai penyebaran ukuran pori yang tetap, semakin besar nilai volume mikropori (W_o) maka semakin besar nilai kapasitas metana yang tersedia (Q_{av}), hal ini menunjukkan bahwa untuk mendapatkan kapasitas metana tersedia (Q_{av}) maka perlu digunakan adsorben yang memiliki nilai volume mikropori (W_o) yang besar.

4.1.2. Kondisi Dinamis

Kondisi dinamis adalah kondisi kerja dimana proses adsorpsi dan desorpsi dipengaruhi adanya perpindahan panas. Untuk proses adsorpsi akan ditunjukkan oleh kapasitas metana tersimpan pada kondisi dinamis ($Q_{ds} = \text{stored methane capacity under dynamic conditions}$) dan untuk desorpsi akan ditunjukkan oleh kapasitas metana terkirim pada kondisi dinamis ($Q_{dd} = \text{delivered methane capacity under dynamic conditions}$). Dari penelitian yang dilakukan sebelumnya didapat bahwa untuk proses pengisian dengan *flow rate* sebesar 25 slpm didapat ΔT sebesar 40°C , maka untuk penelitian ini besar ΔT dibatasi sampai dengan 60°C .

a) Proses Pengisian (*Charge*)

Pada proses pengisian (*charge*), kapasitas metana tersimpan (Q_{ds}) akan dipengaruhi oleh perubahan temperatur (ΔT). Dengan menggunakan variasi kenaikan temperatur 0 sampai dengan 60°C pada perhitungan kapasitas tersimpan (Q_{ds}) menggunakan persamaan Dubinin-Astakhov maka akan didapat grafik antara kapasitas metana tersimpan (Q_{ds}) terhadap perubahan temperatur ($0 < \Delta T < 60^{\circ}\text{C}$).



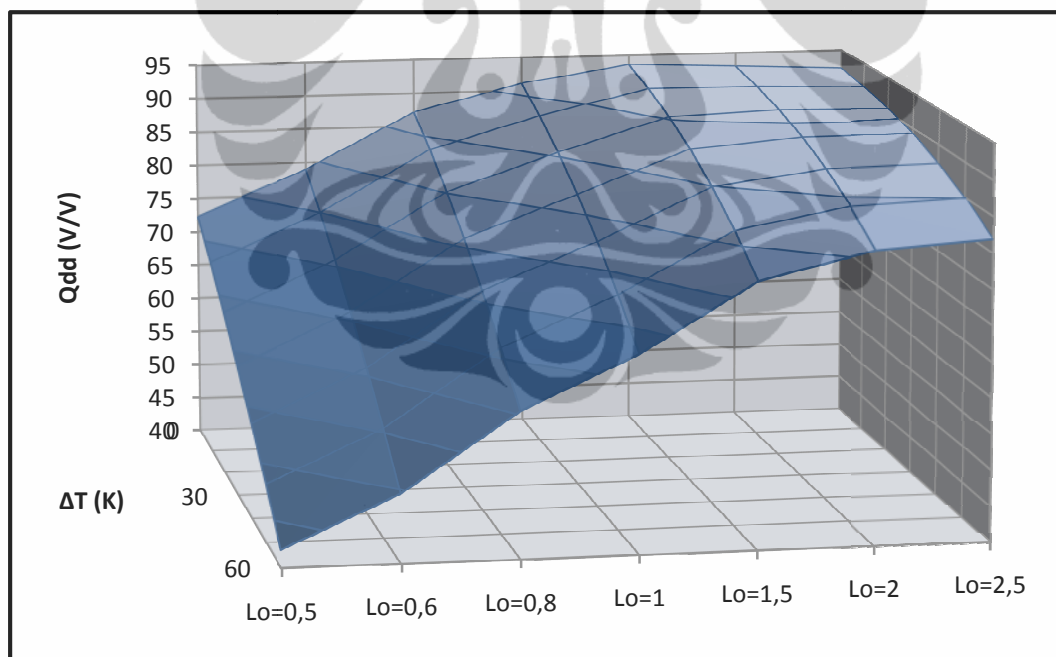
Gambar 4.3. Kapasitas Metana Tersimpan (Q_{ds}) Terhadap Perubahan Temperatur (ΔT).

Dari gambar grafik diatas terlihat untuk lebar pori (L_o) yang tetap, nilai kapasitas metana tersimpan akan menurun terhadap kenaikan temperatur yang

terjadi saat proses pengisian atau proses adsorpsi. Penurunan kapasitas yang terjadi sebesar 6,3 V/V sampai dengan 10,3 V/V setiap kenaikan 10 °C tergantung dari lebar pori (L_o) yang dimiliki. Lebar pori (L_o) yang memiliki kapasitas metana tersimpan paling besar yang dipengaruhi perubahan temperatur adalah lebar pori dengan ukuran 1,5 nm. Kecenderungan kenaikan kapasitas tersimpan (Q_{ds}) dimulai dari ukuran lebar pori 0,5 nm sampai dengan titik maksimal pada lebar pori 1,5 nm, setelah melewati titik maksimal nilai kapasitas tersimpan (Q_{ds}) menurun.

b) Proses Pengosongan (Discharge)

Pada proses pengosongan (*discharge*), kapasitas metana terkirim (Q_{dd}) akan dipengaruhi oleh perubahan temperatur (ΔT). Dengan menggunakan variasi penurunan temperatur 0 sampai dengan 60°C pada perhitungan kapasitas terkirim (Q_{dd}) menggunakan persamaan Dubinin-Astakhov maka akan didapat grafik antara kapasitas metana terkirim (Q_{dd}) terhadap perubahan temperatur ($0 < \Delta T < 60^\circ\text{C}$).



Gambar 4.4. Kapasitas Metana Terkirim (Q_{dd}) Terhadap Perubahan Temperatur (ΔT).

Dari gambar grafik diatas untuk lebar pori yang tetap, nilai kapasitas metana terkirim (Q_{dd}) akan menurun terhadap penurunan temperatur yang terjadi saat proses pengosongan atau desorpsi. Grafik penurunan kapasitas terkirim

memiliki bentuk polynomial terhadap perubahan temperatur dimana semakin besar perubahan temperatur yang terjadi maka penurunan kapasitas terkirim semakin besar. Untuk penurunan temperatur sebesar 10 °C penurunan kapasitas terkirim sebesar 8,2 V/V sampai dengan 1,2 V/V tergantung lebar pori (L_o) yang dimiliki. Dan untuk penurunan temperatur sebesar 60 °C penurunan kapasitas terkirim adalah sebesar 57,7 V/V sampai dengan 18 V/V tergantung lebar pori (L_o) yang dimiliki. Lebar pori (L_o) yang memiliki kapasitas metana terkirim (Q_{dd}) paling besar yang dipengaruhi perubahan temperatur adalah lebar pori dengan ukuran 2,5 nm. Kecenderungan kenaikan kapasitas tersimpan (Q_{ds}) dimulai dari ukuran lebar pori 0,5 nm sampai dengan titik maksimal pada lebar pori 2,5 nm.

4.2. Adsorpsi Karbon Aktif Komersil

Perhitungan yang akan dilakukan berikutnya adalah perhitungan performa adsorpsi isothermal karbon aktif komersil (Carbotech) pada kondisi dinamis. Pada penelitian ini digunakan pendekatan teoritis dan hasilnya nanti akan dibandingkan dengan hasil eksperimen. Karbon aktif yang akan digunakan adalah karbon aktif Carbotech dengan karakteristik karbon aktif sebagai berikut (Awaludin, 2010) :

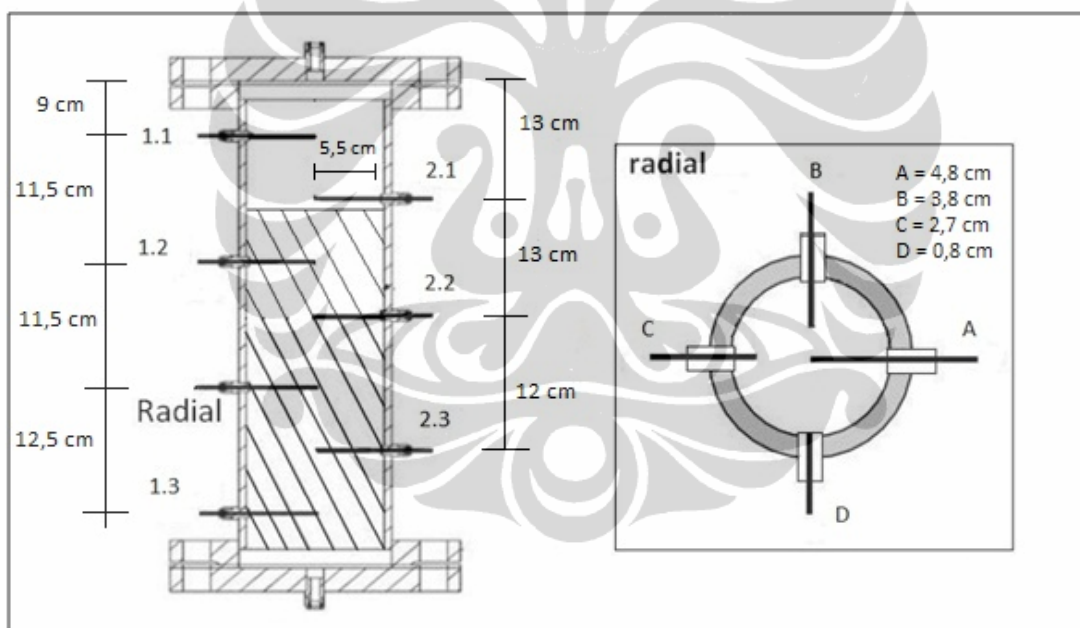
Tabel 4.1. Data properties karbon aktif komersial (Carbotech).

<i>Bulk density</i>	kg/m ³	450 ± 30
<i>Moisture (as packed)</i>	wt-%	< 2,0
<i>Surface area (BET)</i>	m ² /g	1050 ± 50
<i>Ash content</i>	wt-%	< 8,0
<i>Iodine number</i>	mg/g	> 1000
<i>Mikropore volume</i>	Cc/g	0.514
<i>Lower confidence</i>	Å	3.070
<i>Fitting error</i>	%	0.254
<i>Half pore width (mode)</i>	Å	3.070

Penelitian dengan pendekatan eksperimen akan dilakukan dengan menggunakan *vessel* ukuran 6,5 liter dengan tekanan pengisian (P_c) sebesar 3,5

MPa dan suhu isothermal sebesar 25 °C. Untuk mendapatkan variasi perubahan temperatur yang terjadi pada karbon aktif yang digunakan sebagai adsorben dalam *vessel* maka besar *flow rate* aliran CH₄ yang masuk ke dalam *vessel* divariasikan. Besarnya laju aliran volume CH₄ adalah sebesar 1 slpm sampai dengan 20 slpm. Jumlah volume karbon aktif yang digunakan adalah 70 % dari volume total *vessel* ($\alpha = 0,7$) atau sebesar 4,6 liter.

Sensor yang digunakan untuk mengukur besarnya perubahan temperatur yang terjadi (ΔT) adalah dengan menggunakan 10 termokopel yang dipasang pada *vessel*. Termokopel tersebut dihubungkan dengan data akuisisi yang akan menyimpan data hasil perhitungan kenaikan temperatur setiap detik selama proses pengambilan data.



Gambar 4.5. Posisi Termokopel Pada *Vessel*.

Perubahan temperatur (ΔT) pada *vessel* didapat dengan cara mencari perubahan temperatur rata-rata volumetrik yaitu dengan mencari perubahan temperatur pada termokopel dikalikan volume disekitar termokopel tersebut. Yang ditentukan oleh :

$$\Delta T = |T_o - T_m| = \left| T_o - \frac{\sum_i T_i V_i}{\sum_i V_i} \right| \quad (4.1)$$

4.2.1. Kapasitas Metana Tersimpan (Q_{ds}) Dalam Kondisi Dinamis

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas metana tersimpan (Q_{ds}) yang dipengaruhi perbedaan laju aliran volume CH_4 yang masuk kedalam *vessel*. Dengan melakukan variasi tersebut diharapkan dapat diketahui pengaruh perbedaan laju aliran volume terhadap kapasitas tersimpan (Q_{ds}) dan perubahan temperatur (ΔT) yang terjadi.

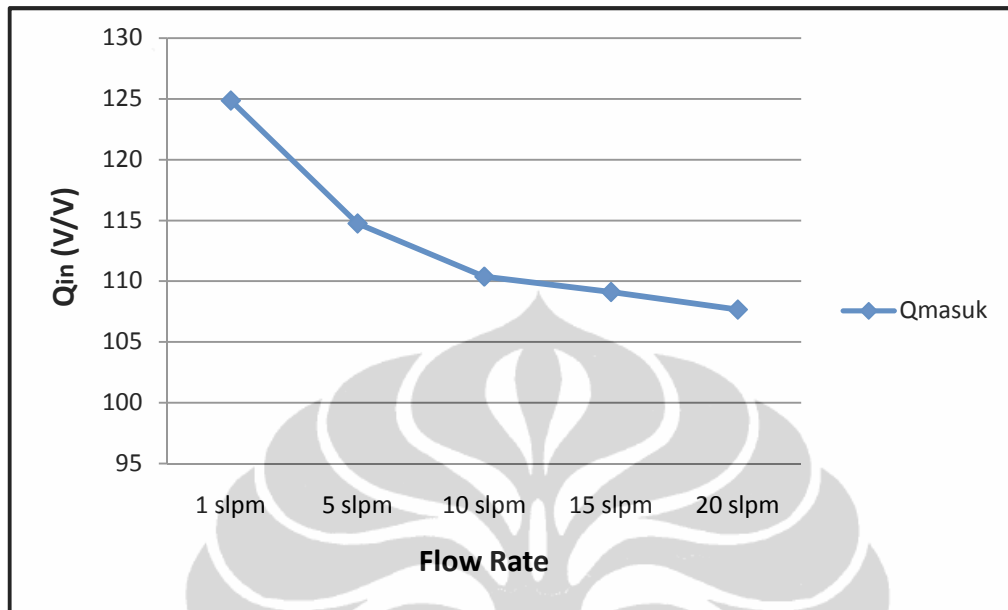
Percobaan dilakukan dengan cara mengalirkan gas metana dengan variasi laju aliran sebesar 1 slpm, 5 slpm, 10 slpm, 15 slpm, dan 20 slpm ke dalam *vessel* sampai dengan tekanan *vessel* mencapai 3,5 MPa. Dan hasil yang didapat adalah:

Tabel 4.2. Kapasitas masuk, kapasitas tersimpan, perubahan temperatur, dan waktu pengisian terhadap variasi laju aliran volume.

Laju Aliran	Q_{in} (liter)	Q_{ds} (V/V)	ΔT (K)	Waktu (jam)
1 slpm	573,4	124,8	3,2	9
5 slpm	527,01	114,7	11,6	1,7
10 slpm	506,9	110,4	14,6	0,8
15 slpm	501,09	109,1	15,1	0,5
20 slpm	494,48	107,7	15,6	0,4

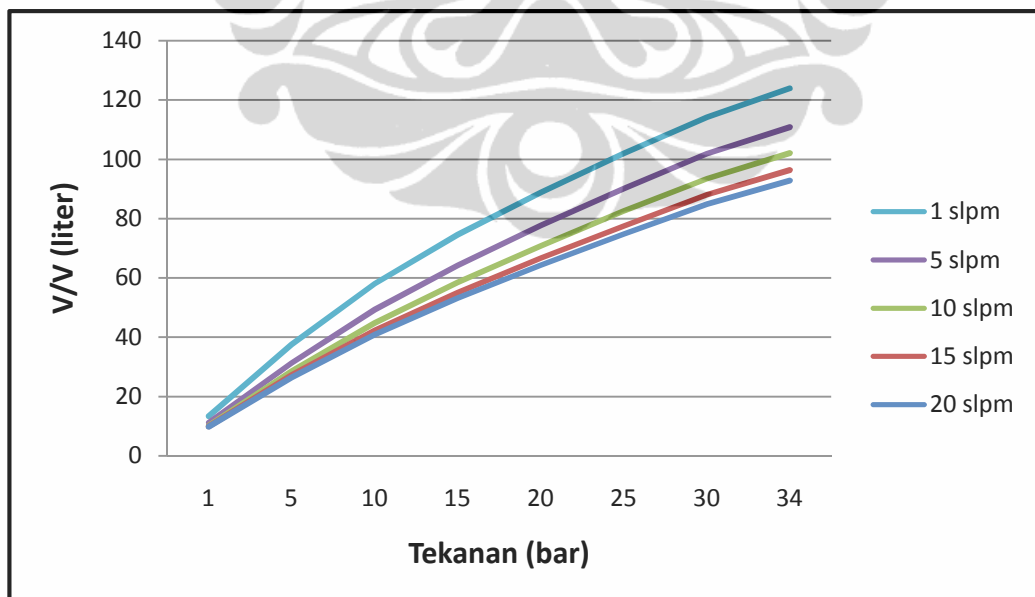
Dari hasil percobaan, kapasitas metana tersimpan (Q_{ds}) terbesar didapat pada laju aliran volume sebesar 1 slpm, dengan perubahan temperatur rata-rata *vessel* (ΔT) sebesar 3,2 K, dan waktu pengisian sebesar 9 jam. Kapasitas metana tersimpan (Q_{ds}) terendah didapat pada laju aliran volume sebesar 20 slpm, dengan perubahan temperatur rata-rata *vessel* (ΔT) sebesar 15,6 K, dan waktu pengisian sebesar 0,4 jam.

Grafik hubungan antara kapasitas tersimpan (Q_{ds}) terhadap laju aliran volume adalah :



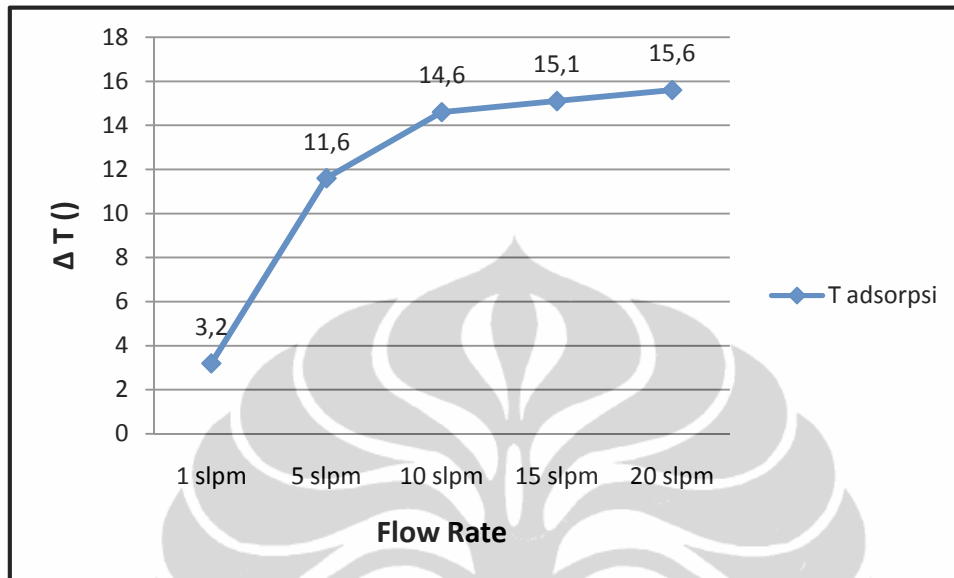
Gambar 4.6. Kapasitas Tersimpan (Q_{ds}) Terhadap Laju Aliran Volume.

Grafik hubungan antara kapasitas tersimpan (Q_{ds}) terhadap perubahan tekanan adalah :



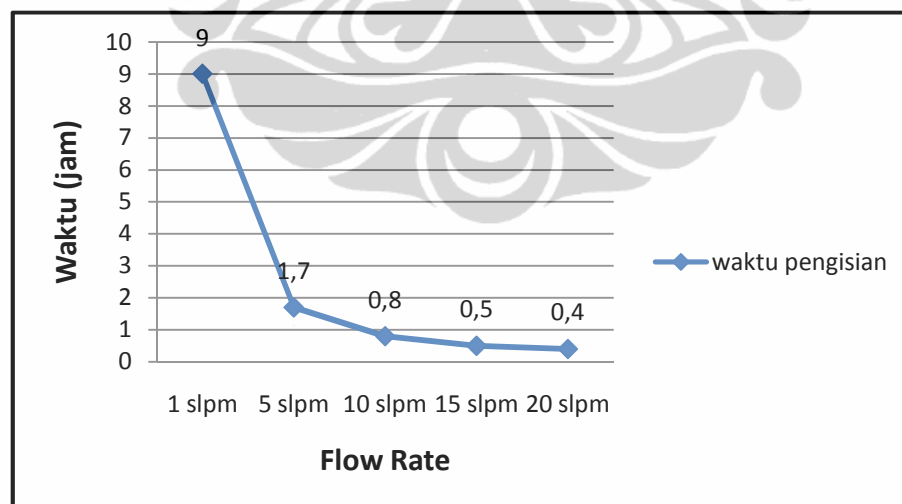
Gambar 4.7. Kapasitas Tersimpan (Q_{ds}) Terhadap Perubahan Tekanan.

Dari hasil percobaan, diketahui bahwa semakin besar laju aliran volume gas CH_4 maka semakin besar perubahan temperatur. Grafik hubungan antara perubahan temperatur terhadap laju aliran volume adalah:



Gambar 4.8. Perubahan Temperatur (ΔT) Terhadap Laju Aliran Volume.

Semakin besar laju aliran volume maka semakin cepat waktu pengisian. Grafik hubungan antara waktu terhadap laju aliran volume adalah:



Gambar 4.9. Waktu Terhadap Laju Aliran Volume.

4.2.2. Perbandingan Kapasitas Metana Terserap (q) Eksperimen Dengan Teoritis

Dari hasil percobaan yang dilakukan, parameter yang akan dimasukkan dalam pendekatan teoritis adalah kenaikan temperatur dari masing-masing laju aliran volume metana. Hasil pendekatan teoritis dari kapasitas terserap (q) dengan kenaikan temperatur (ΔT) yang didapat dari hasil eksperimen akan dikorelasi dengan kapasitas terserap (q) yang didapat dari hasil eksperimen.

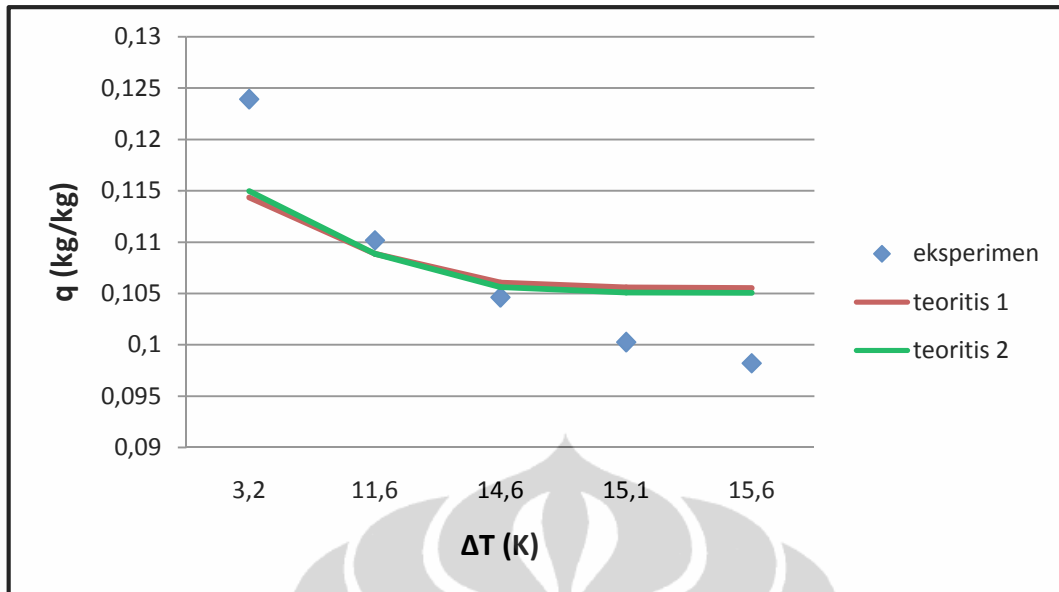
Tabel 4.3. Parameter adsorpsi untuk model persamaan Dubinin-Astakhov.

Parameter	Teoritis 1	Teoritis 2
Wo (m ³ /kg)	0,000514	0,000514
Lo (nm)	0,614	-
E (joule/mol)	-	8258,3
N	1,37	1,66
β	0,35	-

Hasil pendekatan teoritis dari kapasitas tersimpan (Q_{ds}) dengan kenaikan temperatur (ΔT) yang didapat dari hasil eksperimen adalah:

Tabel 4.4. Perbandingan eksperimen dengan teoritis 1 dan teoritis 2.

ΔT	$q_{\text{eksperimen}}$ (kg/kg)	$q_{\text{teoritis 1}}$ (kg/kg)	$q_{\text{teoritis 2}}$ (kg/kg)
3,2	123,9 x 10 ⁻³	114,3 x 10 ⁻³	114,9 x 10 ⁻³
11,6	110,2 x 10 ⁻³	108,8 x 10 ⁻³	109,0 x 10 ⁻³
14,6	104,6 x 10 ⁻³	106 x 10 ⁻³	105,7 x 10 ⁻³
15,1	100,2 x 10 ⁻³	105,6 x 10 ⁻³	105,1 x 10 ⁻³
15,6	98,2 x 10 ⁻³	105,5 x 10 ⁻³	105 x 10 ⁻³
Deviasi (%)		5,5	5,2



Gambar 4.10. Kapasitas Tersimpan (Q_{ds}) Terhadap Perubahan Temperatur (ΔT).

4.2.3. Kapasitas Metana Terkirim (Q_{dd}) Dalam Kondisi Dinamis

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas metana terkirim (Q_{dd}) yang dipengaruhi perbedaan laju aliran volume CH_4 yang keluar dari dalam *vessel*. Dengan melakukan variasi tersebut diharapkan dapat diketahui pengaruh perbedaan laju aliran volume terhadap kapasitas terkirim (Q_{dd}) dan perubahan temperatur (ΔT) yang terjadi.

Percobaan dilakukan dengan cara mengalirkan gas metana dengan variasi laju aliran sebesar 1 slpm, 5 slpm, 10 slpm, 15 slpm, dan 20 slpm keluar dari dalam *vessel* sampai dengan tekanan *vessel* mencapai 0,101325 MPa. Dan hasil yang didapat adalah:

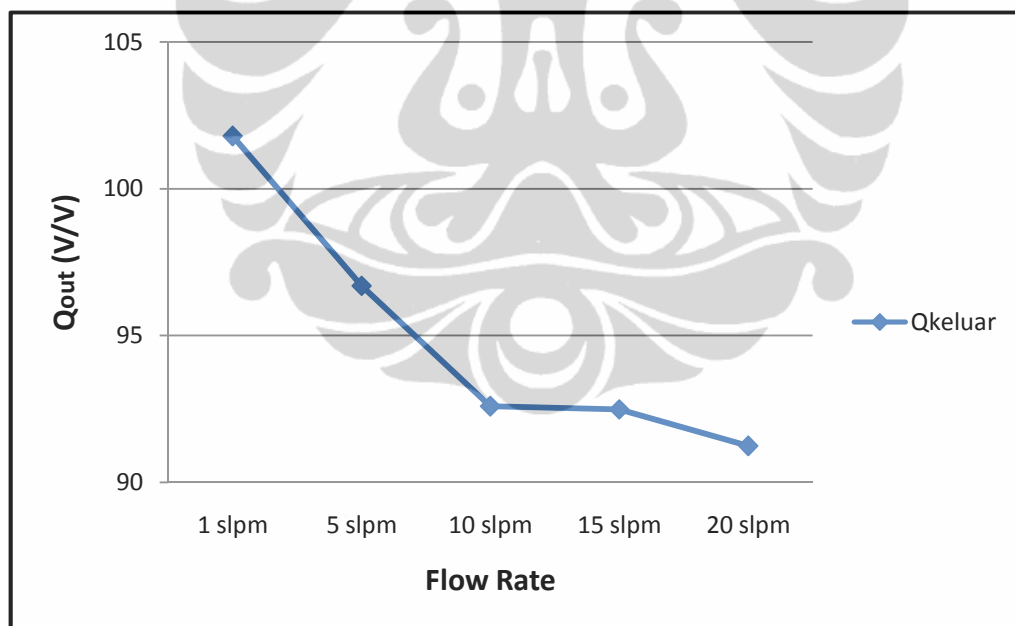
Tabel 4.5. Kapasitas masuk, kapasitas terkirim, perubahan temperatur, dan waktu pengosongan terhadap variasi laju aliran volume.

Laju Aliran	Q_{in} (liter)	Q_{out} (liter)	Q_{dd} (V/V)	$Q_{tersangkut}$ (V/V)	ΔT (K)	Waktu (jam)
1 slpm	573,4	467,5	101,8	23,1	3,1	8,6
5 slpm	527,01	444,1	96,7	18	10,2	3,5

10 slpm	506,9	425,25	92,6	17,8	11,4	2,6
15 slpm	501,09	424,79	92,5	16,6	11,5	2,5
20 slpm	494,48	419,05	91,3	16,4	11,6	2,3

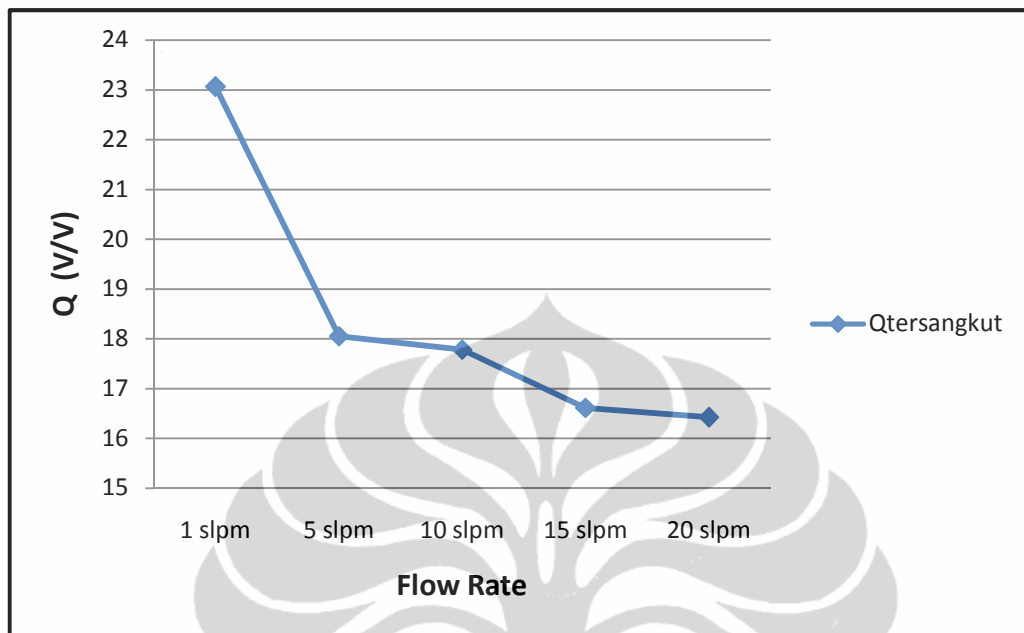
Dari hasil percobaan, kapasitas metana terkirim (Q_{dd}) terbesar didapat pada laju aliran volume sebesar 1 slpm, dengan perubahan temperatur rata-rata vessel (ΔT) sebesar 3,1 K, dan waktu pengosongan sebesar 8,6 jam. Kapasitas metana terkirim (Q_{dd}) terendah didapat pada laju aliran volume sebesar 20 slpm, dengan perubahan temperatur rata-rata vessel (ΔT) sebesar 10,6 K, dan waktu pengosongan sebesar 2,3 jam.

Grafik hubungan antara kapasitas terkirim (Q_{dd}) terhadap laju aliran volume adalah :



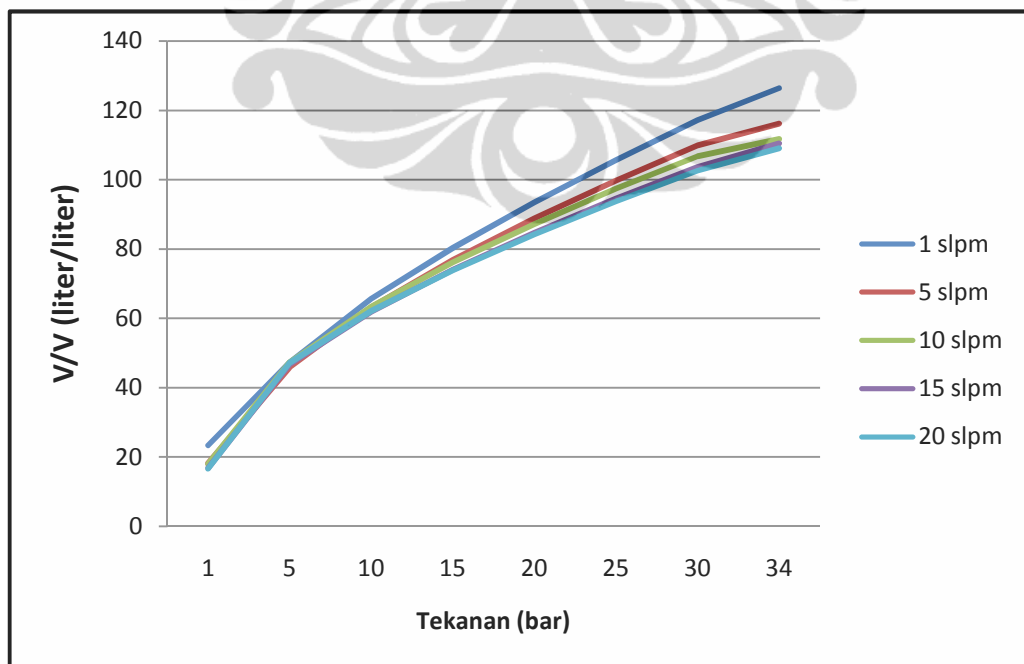
Gambar 4.11. Kapasitas Metana Terkirim (Q_{dd}) Terhadap Laju Aliran Volume

Grafik hubungan antara kapasitas tersangkut terhadap laju aliran volume adalah :



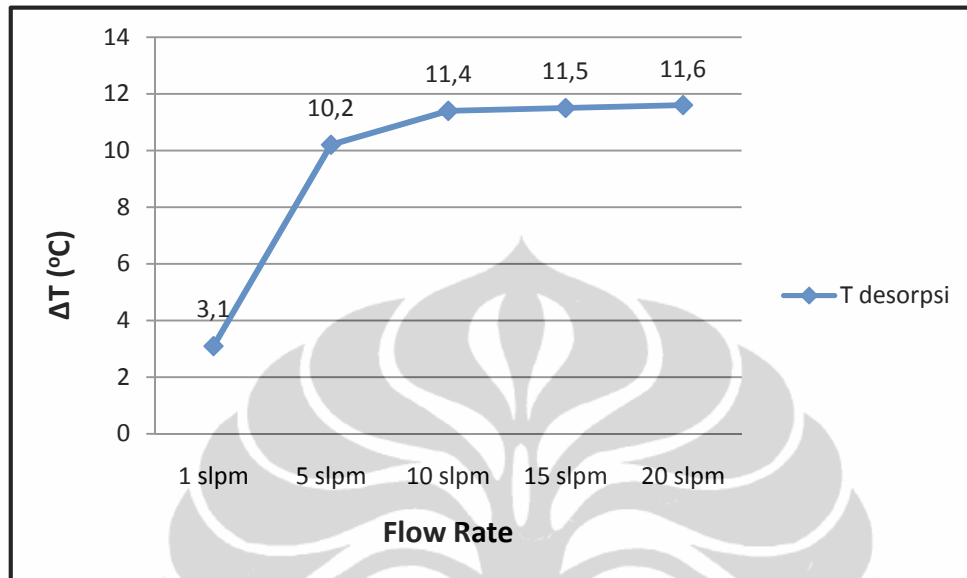
Gambar 4.12. Kapasitas Tersangkut Terhadap Laju Aliran Volume

Grafik hubungan antara kapasitas terkirim (Q_{dd}) terhadap perubahan tekanan adalah :



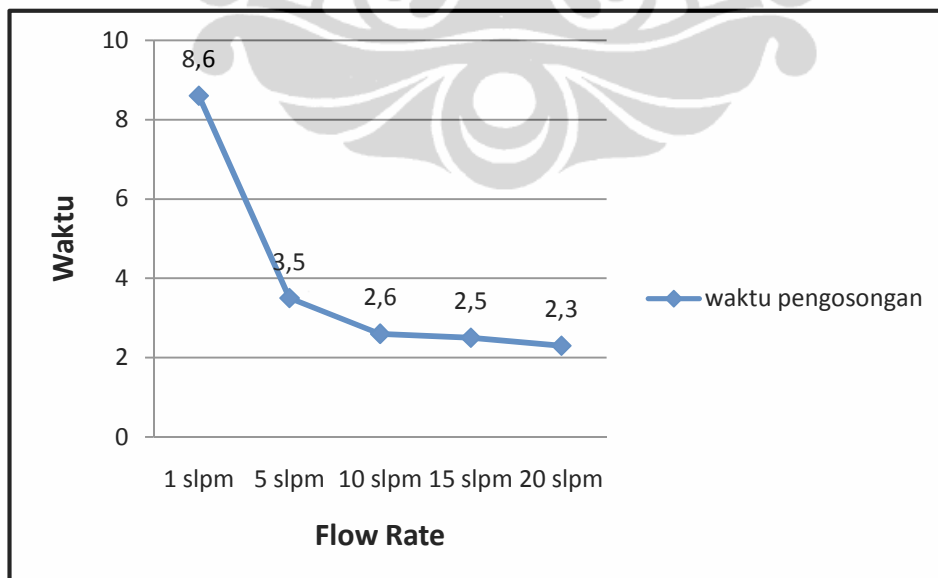
Gambar 4.13. Kapasitas Terkirim (Q_{dd}) Terhadap Perubahan Tekanan

Dari hasil percobaan, diketahui bahwa semakin besar laju aliran volume gas CH_4 maka semakin besar perubahan temperatur. Grafik hubungan antara perubahan temperatur terhadap laju aliran volume adalah:



Gambar 4.14. Perubahan Temperatur (ΔT) Terhadap Laju Aliran Volume.

Semakin besar laju aliran volume maka semakin cepat waktu pengosongan. Grafik hubungan antara waktu terhadap laju aliran volume adalah:



Gambar 4.15. Waktu Terhadap Laju Aliran Volume.

4.3. Adsorpsi Isosterik

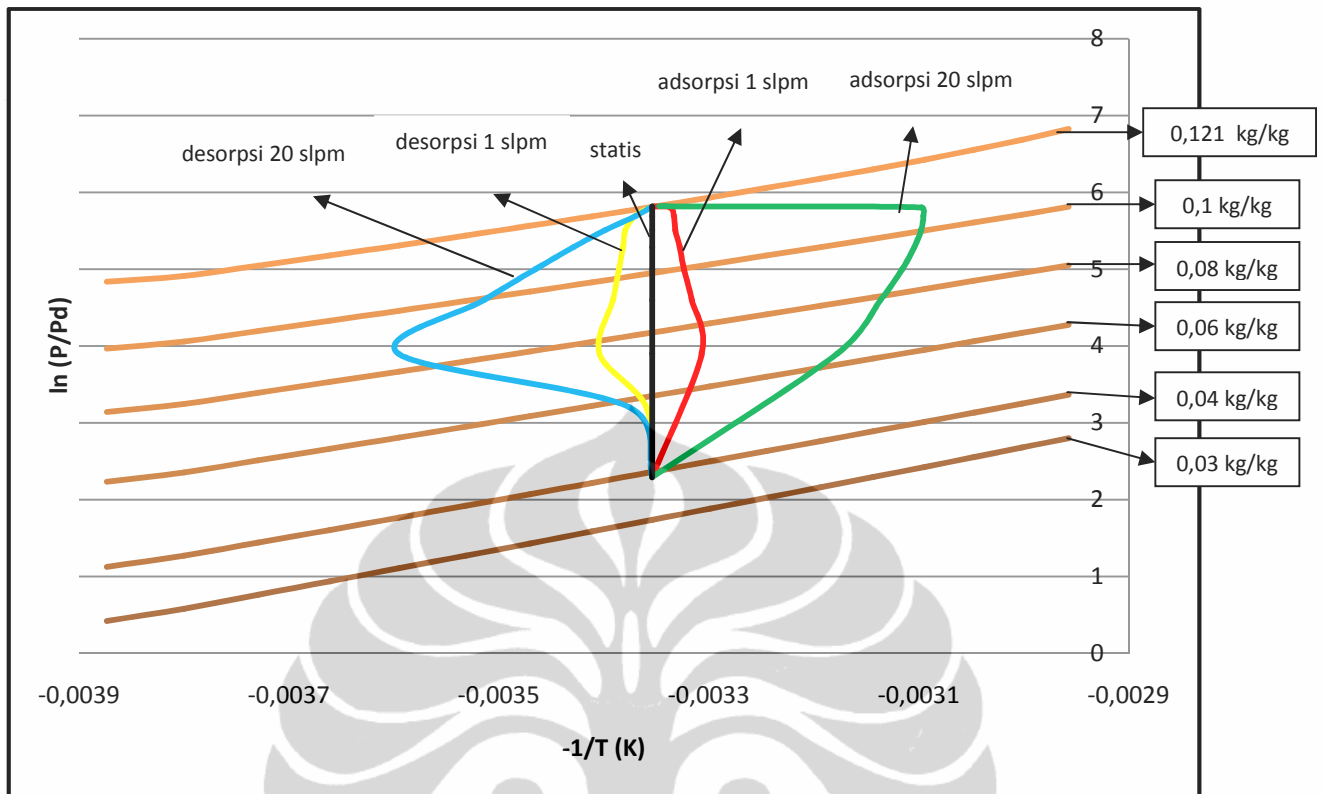
Data adsorpsi isosterik diperlukan untuk dapat memprediksi besar tekanan yang dibutuhkan dan temperatur isotermal yang harus dikondisikan untuk dapat menyerap massa adsorbat dalam jumlah yang telah ditentukan. Data adsorpsi isosterik diperoleh dengan menyelesaikan persamaan model Dubinin-Astakhov. Seperti telah diuraikan sebelumnya pada persamaan 3.3 bahwa persamaan Dubinin-Astakhov adalah:

$$q(T, P) = W_o \rho_{ads}(T) \exp \left[- \left(\frac{A}{\beta E_o} \right)^n \right]$$

Pada adsorpsi isosterik jumlah massa adsorbat yang terserap adalah konstan, sehingga tekanan menjadi parameter yang sangat penting. Sehingga persamaan model Dubinin-Astakhov diselesaikan dengan tujuan mendapatkan besar tekanan pada jumlah massa adsorbat tertentu.

$$P = \frac{P_{cr} \left(\frac{T}{T_{cr}} \right)^2}{\exp \left(\left(\left(\left(\left(\frac{q(T, P)}{\rho_{ads}} \right) \frac{W_o}{\beta \times E_o} \right)^n \right) \right) \right) \times R \times T} \quad (4.2)$$

Gambar berikut adalah gambar grafik isosterik. Dengan grafik tersebut dapat diprediksi tekanan penyerapan yang dibutuhkan dan temperatur yang harus dikondisikan untuk menyerap CH₄ pada jumlah tertentu.



Gambar 4.16. Gambar Grafik Isosterik.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

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

- a) Unjuk kerja dari sebuah sistem ANG (Adsorbed Natural Gas) dipengaruhi oleh karakteristik dari karbon aktif yang digunakan sebagai adsorben dan juga oleh perpindahan panas yang terjadi saat adsorpsi dan desorpsi.
- b) Semakin besar nilai volume mikropori (W_o) dan nilai penyebaran ukuran pori (n) maka semakin besar kapasitas metana tersimpan (Q_{ds}) dan kapasitas terkirim (Q_{dd}), baik dalam keadaan statis maupun keadaan dinamis.
- c) Lebar mikropori (L_o) paling optimal dalam keadaan statis adalah sebesar 1,5 nm untuk nilai penyebaran ukuran pori (n) sebesar 2. Semakin rendah nilai penyebaran ukuran pori (n) maka lebar mikropori (L_o) paling optimal semakin besar yaitu sebesar 2 nm untuk nilai penyebaran ukuran pori (n) sebesar 1.
- d) Lebar mikropori (L_o) paling optimal dalam keadaan dinamis memiliki nilai berbeda untuk kapasitas metana tersimpan (Q_{ds}) dan kapasitas terkirim (Q_{dd}). Untuk kapasitas metana tersimpan (Q_{ds}) Lebar mikropori (L_o) paling optimal adalah sebesar 1,5 nm. Untuk kapasitas terkirim (Q_{dd}) Lebar mikropori (L_o) paling optimal adalah sebesar 2,3 nm.
- e) Dari hasil eksperimen dapat disimpulkan bahwa laju aliran volume CH_4 yang masuk saat proses pengisian, dimana terjadi proses adsorpsi mempengaruhi perubahan temperatur (ΔT) yang terjadi. Semakin cepat laju aliran maka semakin tinggi perubahan temperatur yang terjadi sehingga kapasitas tersimpan (Q_{ds}) semakin menurun. Untuk laju aliran sebesar 1 slpm, 5 slpm, 10 slpm, 15 slpm, dan 20 slpm, perubahan temperatur yang terjadi adalah sebesar 3,2 K, 11,6 K, 14,6 K, 15,1 K,

dan 15,6 K. Dengan kapasitas tersimpan (Q_{ds}) sebesar 124,8 V/V, 114,7 V/V, 110,4 V/V, 109,1 V/V, dan 107,7 V/V.

- f) Untuk proses pengosongan. laju aliran volume CH_4 yang keluar saat proses pengosongan, dimana terjadi proses desorpsi, mempengaruhi perubahan temperatur (ΔT) yang terjadi. Semakin cepat laju aliran maka semakin tinggi perubahan temperatur yang terjadi sehingga kapasitas terkirim (Q_{dd}) semakin menurun. Untuk laju aliran sebesar 1 slpm, 5 slpm, 10 slpm, 15 slpm, dan 20 slpm, perubahan temperatur yang terjadi adalah sebesar 3,1 K, 10,2 k, 11,4 K, 11,5 K, dan 11,6 K. Dengan kapasitas terkirim (Q_{dd}) sebesar 101,8 V/V, 96,7 V/V, 92,6 V/V, 92,5 V/V, dan 91,3 V/V.
- g) Hasil pendekatan teoritis dari kapasitas tersimpan (Q_{ds}) dengan kenaikan temperatur (ΔT) yang didapat dari hasil eksperimen akan dikorelasi dengan kapasitas tersimpan (Q_{ds}) yang didapat dari hasil eksperimen. Dari hasil korelasi kapasitas tersimpan (Q_{ds}) hasil eksperimen dengan hasil pendekatan teoritis didapatkan deviasi sebesar 5,5 % terhadap hasil pendekatan teoritis 1 dan deviasi sebesar 5,2 % terhadap hasil pendekatan teoritis 2.

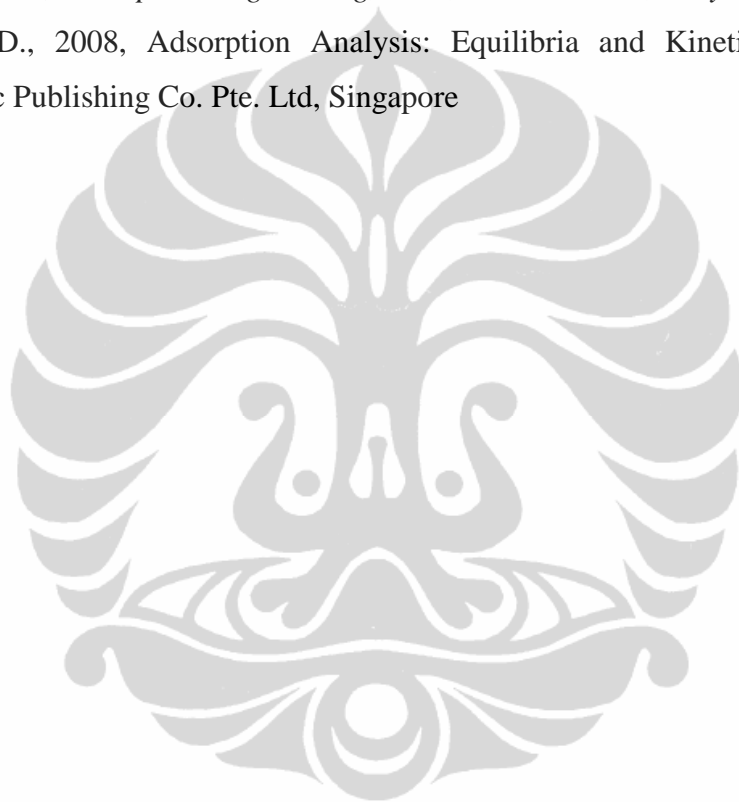
5.2. Saran

- a) Untuk mendapatkan hasil perbandingan antara kapasitas terkirim (Q_{dd}) terhadap laju aliran volume yang lebih baik maka, prosedur pada tahap eksperimen untuk setiap pengambilan data desorpsi dimulai dari kondisi yang sama yaitu dengan nilai kapasitas tersimpan yang sama besar. Hal ini dapat dilakukan dengan cara mengatur besar laju aliran volume CH_4 yang masuk sama besar untuk setiap variasi laju aliran pengosongan sehingga kapasitas metana yang tersimpan sebelum tahap desorpsi sama besar.

DAFTAR REFERENSI

- 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
- Do, Duong D., 2008, *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore





Activated Carbon DGF 8 x 30 AW

Granulated activated Carbon with a main grain diameter of 1 to 2 mm

Product-Description

G A C from Type DGF are produced by steam activation from de-ashed hard coal. The raw material hard-coal and a special manufacturing process will allow a thermal reactivation of the spent activated carbon with minor mass losses. The reactivated carbon will obtain the full adsorption capacity of the original activated carbon.

Typical Properties

Bulk density	[kg/m ³]	450 ± 30
Moisture (as packed)	[wt-%]	< 2,0
Surface area (BET)	[m ² /g]	1050 ± 50
Ash content	[wt-%]	< 8,0
Iodine No.	[mgJ ₂ /g]	>1000
Hardness/ abrasion no.	[ASTM]	>95
Pore volume	[ml/g]	0.8
M.B. value	[mg/g]	>240
Mesh size	[US]	8 x 30
CTC	[wt-%]	63 ± 3
Benzene capacity at 20°C	[wt-%]	
p/p _S =0,9*		39± 2
p/p _S =0,1		34 ± 2
p/p _S =0,01		24 ± 2
p/p _S =0,001		16 ± 2

(*p/p_S = relative saturation/at 20°C = 324 g/m³)

The typical properties are the average of analysis !

Quantachrome AS1Win™ - Automated Gas Sorption Data Acquisition and Reduction
©1994-2008, Quantachrome Instruments version 2.01



Analysis

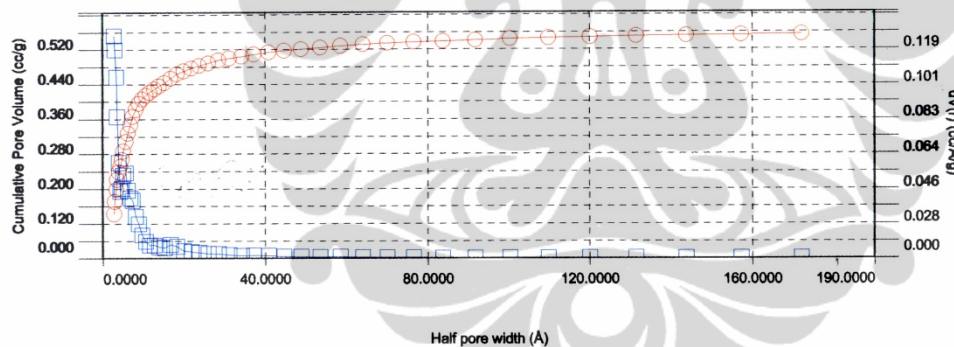
Report

Operator:001 Date:Thu Jan 28 22:29:06 2010 Operator:Kyaw Thu Date:2/27/2010
 Sample ID: : Active Carbob (CarboTech) Filename: C:\Users\impekt\Desktop\Activated carbon\Data\ACTIVE CARBON (CARBOTECH)_20
 Sample Desc: Active Carbob (CarboTech) Comment:
 Outgas Time: 8.0 hrs Outgas Temp: 250.0 °C Sample Weight: 0.0492 g
 Analysis gas: Nitrogen Molec. Wt: 28.0134 g Non-Ideality: 6.58e-05 1/mmHg
 Analysis Time: 3503.6 min Instrument: Autosorb Station 1 Bath temp.: 77.4 K

DFT * dV(r)

Data Reduction Parameters

DFT method	Thermal Transpiration: off	Eff. mol. diameter (D): 0.0000 Å	Eff. cell stem diam. (d): 0.0000 mm
	Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slit pore, QSDFT equilibrium model)	Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000	
Adsorbate	Moving pt. avg: off		
	Nitrogen	Temperature 77.350 K	
	Molec. Wt.: 28.013 g	Cross Section: 16.200 Å²	Liquid Density: 0.808 g/cc



DFT method summary

Pore volume = 0.514 cc/g
 Lower confidence limit = 3.070 Å
 Fitting error = 0.254 %
 Half pore width (Mode) = 3.070 Å
 Moving point average : off