



UNIVERSITAS INDONESIA

**ADSORPSI ISOTERMAL KARBON DIOKSIDA DAN
METANA PADA KARBON AKTIF BERBAHAN DASAR
BATUBARA SUB BITUMINUS INDONESIA UNTUK
PEMURNIAN DAN PENYIMPANAN GAS ALAM**

DISERTASI

**AWALUDIN MARTIN
0606037550**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM DOKTORAL
DEPOK
JULI 2010**

Universitas Indonesia



UNIVERSITAS INDONESIA

Adsorpsi Isotermal Karbon Dioksida dan Metana pada Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Sub Bituminus Indonesia untuk Pemurnian dan Penyimpanan Gas Alam

DISERTASI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor

**AWALUDIN MARTIN
0606037550**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
KEKHUSUSAN KONVERSI ENERGI
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

NAMA : AWALUDIN MARTIN

NPM : 0606037550

Tanda Tangan :

Tanggal : 14 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :

Nama : AWALUDIN MARTIN
NPM : 0606037550
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Disertasi:

**Adsorpsi Isotermal Karbon Dioksida dan Metana pada Karbon Aktif
Berbahan Dasar Batubara Sub Bituminus Indonesia
untuk Pemurnian dan Penyimpanan Gas Alam**

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

DEWAN PENGUJI

Promotor : Prof. Dr. Ir. Bambang Suryawan, MT ()
Ko-promotor : Dr. Ir. Muhammad Idrus Alhamid ()
: Dr.-Ing Ir. Nasruddin, M.Eng. ()
Tim Penguji : Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc, PhD (Ketua) ()
: Dr. Ir. Harinaldi M.Eng. (Anggota) ()
: Dr. Ir. Herry Prijatama (Anggota) ()
: Dr. Ir. Miftahul Huda (Anggota) ()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 14 Juli 2010

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan mengucapkan syukur Alhamdulillah atas karunia dan izin-Nya yang diberikan kepada saya dan keluarga sehingga dapat menyelesaikan disertasi ini. Penulisan disertasi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Doktor pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Oleh karena itu, perkenankanlah saya menyampaikan rasa terima kasih dan hormat kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Bambang Suryawan, M.T. atas kesediaannya untuk menjadi promotor, yang dengan penuh keteladanannya memberikan bimbingan, pengarahan, masukan yang tidak ternilai sejak awal hingga selesainya penulisan disertasi ini.
2. Dr. Ir. Muhammad Idrus Alhamid dan Dr.-Ing Ir. Nasruddin, M.Eng. selaku ko-promotor yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing, mengoreksi, dan memberikan saran konstruktif dalam penyusunan disertasi ini.
3. Ketua Departemen dan seluruh staf pengajar Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan hingga menyelesaikan disertasi ini.
4. Prof. Kim Choon Ng, yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk melakukan penelitian di Mechanical Engineering Department, National University of Singapore.
5. Anggota panitia penguji yang terdiri dari Prof. Dr. Saito Kiyoshi, Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng., Ir. Mahmud Sudibandriyo, M.Sc, PhD., Dr. Herry Prijatama, dan Dr.Ir. Miftahul Huda.
6. Ir. Harun Alrasyid, M.M., M.T., selaku Direktur Utama PT Indopower International, yang telah memberikan dukungan dana.
7. Teman sejawat, mahasiswa S1, S2 dan S3 yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan disertasi ini.
8. Teman-teman Program doktor di Laboratorium Pendingin dan Pengkondisian Udara, Departemen Teknik Mesin, National University of

Singapore (NUS), khususnya Kyaw Thu, Loh Wai Soon, Kaji Afzalur Rahman atas diskusi-diskusinya selama di Singapore.

9. Seluruh teknisi di laboratorium Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
10. Kepada semua pihak yang telah berkenan membantu penyelesaian disertasi ini, yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Akhir kata, saya sampaikan terima kasih kepada orang tua tercinta yang telah membesarkan, mendidik, dan membimbing saya selama ini. Rasa terima kasih saya sampaikan pula kepada isteri tercinta serta putra dan putri yang sangat saya sayangi. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan disertasi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan disertasi ini. Saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu.

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

Depok, Juli 2010

Penulis

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

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

Nama : AWALUDIN MARTIN

NPM : 0606037550

Program Studi : Teknik Mesin

Kekhususan : Konversi Energi

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Disertasi

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

**Adsorpsi Isotermal Karbon Dioksida dan Metana pada Karbon Aktif
Berbahan Dasar Batubara Sub Bituminus Indonesia
untuk Pemurnian dan Penyimpanan Gas Alam**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal : 14 Juli 2010

Yang menyatakan

(Awaludin Martin)

ABSTRAK

Nama : Awaludin Martin
Program Studi : Teknik Mesin
Judul :

Adsorpsi Isotermal Karbon Dioksida dan Metana pada Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Sub Bituminus Indonesia untuk Pemurnian dan Penyimpanan Gas Alam

Penelitian ini terdiri atas dua bagian penelitian, yaitu proses produksi karbon aktif berbahan dasar batubara sub bituminus Indonesia yang berasal dari Kalimantan Timur dan Riau dan adsorpsi isotermal karbon dioksida dan metana pada karbon aktif hasil penelitian bagian pertama.

Karbon aktif diproduksi di laboratorium dengan menggunakan aktivasi fisika dimana gas CO₂ digunakan sebagai *activating agent* pada temperatur aktivasi sampai dengan 950°C. Karbon aktif yang diproduksi selanjutnya dilakukan pengujian untuk mengetahui kualitas karbon aktif berupa angka *Iodine* dan luas permukaan. Dari penelitian yang dilakukan didapat bahwa karbon aktif berbahan dasar batubara Kalimantan Timur lebih baik dibanding dengan karbon aktif berbahan dasar batubara Riau. Hal tersebut dikarenakan oleh perbandingan unsur oksigen dan karbon pada batubara Kalimantan Timur lebih tinggi daripada batubara Riau. Angka *Iodine* maksimum pada karbon aktif berbahan dasar batubara Riau adalah 589,1 ml/g, sementara karbon aktif berbahan dasar batubara Kalimantan sampai dengan 879 ml/g.

Adsorpsi isotermal karbon dioksida dan metana pada karbon aktif Kalimantan Timur dan Riau serta satu jenis karbon aktif komersial dilakukan di laboratorium Teknik Pendingin dan Pengkondisian Udara Teknik Mesin FTUI. Adsorpsi isotermal dilakukan dengan menggunakan metode volumetrik dengan variasi temperatur isotermal 27, 35, 45, dan 65°C serta tekanan sampai dengan 3,5 MPa. Data adsorpsi isotermal yang didapat adalah data kapasitas penyerapan karbon dioksida dan metana pada karbon aktif pada variasi tekanan dan temperatur isotermal yang kemudian di plot dalam grafik hubungan tekanan dan kapasitas penyerapan.

Universitas Indonesia

Dari hasil penelitian didapat bahwa kapasitas penyerapan karbon aktif komersial lebih baik dibandingkan dengan karbon aktif Kalimantan Timur dan Riau, hal tersebut dikarenakan luas permukaan dan volume pori karbon aktif komersial lebih tinggi dibanding yang lain. Kapasitas penyerapan CO₂ pada karbon aktif komersial (CB) maksimum adalah 0,349 kg/kg pada temperatur 27°C dan tekanan 3384,69 kPa, sementara untuk karbon aktif Kalimantan Timur (KT) adalah 0,227 kg/kg pada temperatur 27°C dan tekanan 3469,27 kPa dan untuk karbon aktif Riau (RU) adalah 0,115 kg/kg pada temperatur 27°C dan tekanan 3418,87 kPa.

Kapasitas penyerapan CH₄ pada karbon aktif CB maksimum adalah 0,0589 kg/kg pada temperatur isothermal 27°C dan tekanan 3457,2 kPa, sementara untuk karbon aktif KT adalah 0,0532 kg/kg pada temperatur 27°C dan tekanan 3495,75 kPa dan untuk karbon aktif RU adalah 0,0189 kg/kg pada temperatur 27°C dan tekanan 3439,96 kPa.

Data adsorpsi isothermal yang didapat selanjutnya dikorelasi dengan menggunakan persamaan model Langmuir, Toth, dan Dubinin-Astakhov. Dari hasil perhitungan korelasi persamaan didapat bahwa persamaan model Toth adalah persamaan model yang paling akurat, dimana nilai simpangan antara data eksperimen adsorpsi isothermal CO₂ dengan korelasi persamaan model Toth adalah 3,886% (CB), 3,008% (KT) dan 2,96% (RU). Sementara untuk adsorpsi isothermal CH₄ adalah 2,86% (CB), 2,817 (KT), dan 5,257% (RU).

Dikarenakan persamaan model Toth adalah persamaan yang paling akurat, maka perhitungan panas adsorpsi isosterik dan adsorpsi isosterik dilakukan dengan menyelesaikan persamaan model Toth tersebut. Data panas adsorpsi dibutuhkan untuk mengetahui berapa besar panas yang dilepaskan ketika adsorben menyerap karbon dioksida dan metana, sementara data adsorpsi isosterik diperlukan untuk dapat memprediksi berapa besar tekanan yang dibutuhkan dan temperatur isothermal yang harus dikondisikan untuk menyerap gas karbon dioksida dan metana dalam jumlah yang telah diketahui.

ABSTRACT

Name : Awaludin Martin
Department : Mechanical Engineering
Topic :

Adsorption Isotherms Carbon Dioxide and Methane on Activated Carbon of Sub Bituminous Coal Indonesian as Raw Material for Purification and Storage of Natural Gas

This research is consists of two main topics, first is production of activated carbon from Indonesian sub bituminous coal as raw material. The raw material is from East of Kalimantan and Riau sub bituminous coal. And secondly is adsorption isotherms carbon dioxide and methane on activated carbon.

Activated carbon was produced in laboratory with physical activation method by carbon dioxide as activating agent up to 950°C. Iodine number and surface area was used to characterize of activated carbon quality. From the research, the quality of activated carbon from East of Kalimantan sub bituminous coal is better than Riau sub bituminous coal. It caused the ratio of oxygen and carbon in from East of Kalimantan sub bituminous coal is higher than Riau sub bituminous coal. The maximum iodine number of activated carbon from Riau sub bituminous coal is 589.1 ml/g and activated carbon from East of Kalimantan sub bituminous coal is 879 ml/g.

Adsorption isotherms carbon dioxide and methane on activated carbon from East of Kalimantan and Riau sub bituminous coal and commercial activated carbon was done in Refrigeration and Air Conditioning Laboratory, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Indonesia. Adsorption isotherms were done by volumetric method with variation of temperature is 27, 35, 45, and 65°C and the pressure of adsorption up to 3.5 MPa. Data of adsorption isotherm is adsorption capacity of carbon dioxide and methane on activated carbon with pressure and isotherms temperature variation. Data of adsorption capacity was plotted on pressure and adsorption capacity.

From the research, adsorption capacity of commercial activated carbon is higher than Activated carbon from East of Kalimantan and Riau coal. It is caused; the

surface area and pore volume of commercial activated carbon is higher than East of Kalimantan and Riau coal. The maximum adsorption capacity of CO₂ on commercial activated carbon is 0.349 kg/kg at isotherm temperature 27°C and the pressure is 3384.69 kPa. For activated carbon from East of Kalimantan, the maximum adsorption capacity of CO₂ is 0.227 kg/kg at isotherm temperature 27°C and the pressure is 3469.27 kPa. For activated carbon from Riau, the maximum adsorption capacity of CO₂ is 0.115 kg/kg at isotherm temperature 27°C and the pressure is 3418.87 kPa.

The maximum adsorption capacity of CH₄ on commercial activated carbon is 0.0589 kg/kg at isotherm temperature 27°C and the pressure is 3457.2 kPa. For activated carbon from East of Kalimantan, the maximum adsorption capacity of CH₄ is 0.0532 kg/kg at isotherm temperature 27°C and the pressure is 3495.75 kPa. For activated carbon from Riau, the maximum adsorption capacity of CH₄ is 0.0189 kg/kg at isotherm temperature 27°C and the pressure is 3439.96 kPa.

Adsorption isotherms data was correlated with Langmuir, Toth, and Dubinin-Astakhov equation models. From the calculation, Toth equation model more accurate than Langmuir and Dubinin-Astakhov. The deviation between experiment data of adsorption isotherm CO₂ and calculation by using Toth equation model is 3.886% for commercial activated carbon data, 3.008% for East of Kalimantan activated carbon, and 2.96% for Riau activated carbon. The deviation between experiment data of adsorption isotherm CH₄ and calculation by using Toth equation model is 2.86% for commercial activated carbon data, 2.817% for East of Kalimantan activated carbon, and 5.257% for Riau activated carbon.

Isosteric heat of adsorption and adsorption isostere was calculated by using Toth equation model, caused the Toth equation model more accurate than Langmuir and Dubinin-Astakhov models. Isosteric heat of adsorption is needed to know the amount of heat of adsorption released when activated carbon adsorpt the adsorbate. The adsorption isostere data is needed to predict the pressure and isotherm temperature for adsorp the amount of adsorbate.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xx
DAFTAR NOTASI	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	10
1.4 Batasan Masalah	11
1.5 Sistematika Penulisan	12
BAB 2 LANDASAN TEORI	14
2.1 Adsorben	14
2.1.1 Adsorben Komersial	16
2.1.2 Karbon Aktif	16
2.1.2.1 Struktur Atom Karbon	17
2.1.2.2 Bahan Dasar dan Proses Pembuatan Karbon Aktif	18
2.1.3 Proses Pembuatan Karbon Aktif Skala Industri	18
2.1.3.1 Aktivasi Kimia	19
2.1.3.2 Aktivasi Fisika	20
2.1.4 Pengujian Standar untuk Karbon Aktif	21
2.2 Proses Adsorpsi	22
2.2.1 Adsorpsi Equilibrium	23
2.2.2 Persamaan Adsorpsi Isotermal	26
2.2.2.1 Persamaan Isotermal Langmuir	27
2.2.2.2 Persamaan Isotermal Toth	30
2.2.2.3 Persamaan Isotermal Dubinin-Astakhov (D-A)	30
2.2.3 Panas Adsorpsi Isosterik	31
2.2.4 Metode Pengujian Adsorpsi	32
2.2.4.1 Metode Gravimetrik	32
2.2.4.2 Metode Volumetrik	34
2.3 Aplikasi Adsorpsi Karbon Aktif	35
2.3.1 Purifikasi Gas Alam	36
2.3.2 Penyerapan Gas Alam (Adsorbed Natural Gas)	37
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	38
3.1 Produksi Karbon Aktif	38
3.1.1 Bahan	38

3.1.2	Alat	38
3.1.3	Posisi <i>Autoclave</i>	39
3.1.4	Prosedur Produksi Karbon Aktif	41
3.2	Adsorpsi Isotermal	42
3.2.1	Alat Uji Adsorpsi Isotermal	44
3.2.2	Pengukuran Volume <i>charging cell</i> dan Volume Kosong <i>measuring cell</i>	45
3.2.2.1	Pengukuran Volume <i>Charging Cell</i>	45
3.2.2.2	Pengukuran Volume Kosong <i>Measuring Cell</i> ..	46
3.2.2.3	Persiapan Penelitian	48
3.2.3	Prosedur Penelitian	48
3.2.4	<i>Error</i> Analisis pada Adsorpsi Isotermal	49
3.2.4.1	<i>Error</i> pada Volume <i>Charging Cell</i> (V_{cc}) dan Volume Kosong pada <i>Measuring Cell</i> (V_{vv})	50
3.2.4.2	<i>Error</i> pada Pengukuran Temperatur	50
3.2.4.3	<i>Error</i> pada Pengukuran Tekanan	50
3.2.4.4	<i>Error</i> pada Pengukuran Massa Sampel	50
3.2.5	Korelasi Adsorpsi Isotermal	50
3.2.6	Panas Adsorpsi	51
3.2.7	Adsorpsi Isosterik	51
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	52
4.1	Produksi Karbon Aktif	52
4.1.1	Pengaruh Proses Karbonisasi dengan Nitrogen Terhadap Kualitas Karbon Aktif	54
4.1.2	Pengaruh Proses Karbonisasi dengan Oksigen Terhadap Kualitas Karbon Aktif	57
4.1.3	Pengaruh Posisi <i>Autoclave</i> Terhadap Kualitas Karbon Aktif	60
4.1.4	Pengaruh Proses Aktivasi Terhadap Kualitas Karbon Aktif	65
4.1.5	Perhitungan Biaya Produksi Karbon Aktif	69
4.2	Adsorpsi Isotermal	70
4.2.1	Adsorpsi Isotermal Karbon Dioksida (CO_2) pada Karbon Aktif	71
4.2.2	Adsorpsi Isotermal Metana (CH_4) pada Karbon Aktif ..	75
4.3	Korelasi Adsorpsi Isotermal	79
4.3.1	Persamaan Model Langmuir	79
4.3.2	Persamaan Model Toth	84
4.3.3	Persamaan Model Dubinin-Astakhov (D-A)	89
4.4	Panas Adsorpsi	94
4.4.1	Panas Adsorpsi Isosterik (Isosteric Heat of Adsorption) Karbon Dioksida pada Karbon Aktif	96
4.4.2	Panas Adsorpsi Isosterik (Isosteric Heat of Adsorption) Metana pada Karbon Aktif	99
4.5	Adsorpsi Isosterik	102
4.5.1	Adsorpsi Isosterik Karbon Dioksida (CO_2) pada Karbon Aktif	103
4.5.2	Adsorpsi Isosterik Metana (CH_4) pada Karbon Aktif ...	105

4.6 Pemurnian Gas Alam	107
4.7 Penyimpanan Gas Alam (Adsorbed Natural Gas)	109
BAB 5 KESIMPULAN	112
DAFTAR REFERENSI	114
LAMPIRAN	118



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Distribusi Ukuran Pori pada Karbon Aktif, Silika Gel, <i>Activated Alumina</i> , 2 Jenis <i>Molecular Sieve Carbons</i> (MSC), dan Zeolit 5A	4
Gambar 1.2	Suplai dan Kebutuhan Karbon Aktif di Negara-negara Industri.....	5
Gambar 1.3	Komparasi Kapasitas Penyerapan Metana dengan Adsorben dan Tanpa Adsorben	9
Gambar 2.1	Karbon Aktif Granul (a) Karbon Aktif Serat (b)	16
Gambar 2.2	Struktur Atom Karbon Berbentuk Kristal	17
Gambar 2.3	Struktur Atom Karbon Berbentuk <i>Graphite</i>	17
Gambar 2.4	Struktur Atom Karbon Berbentuk Amorf	18
Gambar 2.5	Hubungan antara Waktu Aktivasi dengan Material yang Terbakar pada Proses Aktivasi	21
Gambar 2.6	Nomenklatur Adsorpsi	23
Gambar 2.7	Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isotermal	24
Gambar 2.8	Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isobar	25
Gambar 2.9	Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi <i>Isostere</i>	25
Gambar 2.10	Skema Mekanisme Penyerapan Langmuir pada Plat Rata ...	27
Gambar 2.11	Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan <i>Two Beam Balance</i>	33
Gambar 2.12	Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan <i>Magnetic Suspension Balance</i>	33
Gambar 2.13	Skema Metode Volumetrik	34
Gambar 2.14	Adsorpsi Karbon Dioksida dan Metana pada Karbon Aktif Maxorb; ●Karbon Dioksida pada 273 K; ▲ Karbon Dioksida pada 298 K; ■ Karbon Dioksida pada 323 K; ○ Metana pada 273 K; Δ Metana pada 298 K; □ Metana pada 323 K; Garis tebal adalah Data dengan Menggunakan Persamaan Model Toth	36
Gambar 3.1	<i>Vertical Autoclave</i> Gas Masuk dan Keluar dari Bagian Atas <i>Autoclave</i>	40
Gambar 3.2	<i>Vertical Autoclave</i> : Skema Proses Karbonisasi (a) dan Skema Proses Aktivasi (b)	40
Gambar 3.3	<i>Horizontal Autoclave</i> : Skema Proses Karbonisasi dan Proses Aktivasi	41
Gambar 3.4	Skema Keseimbangan Massa pada Proses Penyerapan	43
Gambar 3.5	Skema Alat Uji Adsorpsi Isotermal	44
Gambar 3.6	Skema Proses Pengukuran Volume <i>Charging Cell</i>	46
Gambar 3.7	Skema Proses Pengukuran Volume Kosong <i>Measuring Cell</i>	46
Gambar 4.1	Foto Hasil <i>Scanning Electron Micrograph</i> (SEM) Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau	53
Gambar 4.2	Foto Hasil <i>Scanning Electron Micrograph</i> (SEM) Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau; Proses aktivasi	

	selama 1 jam (a); Proses aktivasi selama 3 jam (b)	54
Gambar 4.3	Grafik Hubungan antara Waktu Proses Aktivasi dengan Persentasi <i>Burn Off</i> (%) dan Angka <i>Iodine</i> Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau; o <i>Burn off</i> ; x Angka <i>Iodine</i>	55
Gambar 4.4	Grafik Hubungan antara Waktu Proses Aktivasi dengan Angka <i>Iodine</i> dan Luas Permukaan Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau; ▲ Angka <i>Iodine</i> ; ■ Luas Permukaan	56
Gambar 4.5	Grafik Hubungan antara Waktu Proses Aktivasi dengan Luas Permukaan Karbon Aktif dengan Perbandingan Unsur Oksigen dengan Karbon Batubara yang Berbeda; ■ 0,367; ◇ 0,213	57
Gambar 4.6	Grafik Hubungan Laju Aliran Oksigen pada Proses Karbonisasi dengan Luas Permukaan yang Terbentuk	58
Gambar 4.7	Grafik Hubungan antara <i>Burn off</i> dengan Variasi Waktu Proses Oksidasi dengan Variasi Laju Aliran Oksigen dengan Bahan Dasar Batubara Riau; ◇ 20 ml/menit; * 50 ml/menit; □ 100 ml/menit	59
Gambar 4.8	Profil Temperatur Aliran Gas Karbon Dioksida pada Laju Aliran 200 ml/menit dengan Posisi <i>Autoclave</i> Horisontal Model 1	61
Gambar 4.9	Grafik Hubungan Antara <i>Burn-Off</i> , <i>Iodine Number</i> dan Laju Aliran Oksigen pada Proses Produksi Karbon Aktif dengan Posisi <i>Autoclave</i> seperti Gambar 4.8	62
Gambar 4.10	Profil Kecepatan Aliran Gas Karbon Dioksida pada Laju Aliran 200 ml/menit dengan Posisi <i>Autoclave</i> Vertikal	63
Gambar 4.11	Profil Kecepatan Aliran Gas Karbon Dioksida pada Laju Aliran 200 ml/menit melewati Batubara dengan Posisi <i>Autoclave</i> Vertikal	63
Gambar 4.12	Profil Kecepatan Aliran Gas Karbon Dioksida pada Laju Aliran 200 ml/menit dengan Posisi <i>Autoclave</i> Horisontal Model 2	64
Gambar 4.13	Profil Kecepatan Aliran Gas Karbon Dioksida pada Laju Aliran 200 ml/menit melewati Batubara dengan Posisi <i>Autoclave</i> Horisontal Model 2	65
Gambar 4.14	Grafik Hubungan antara Waktu Proses Aktivasi dengan Persentasi <i>Burn off</i> dan Angka <i>Iodine</i> Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau. ◇ <i>burn off</i> ; x angka <i>Iodine</i> ..	66
Gambar 4.15	Grafik hubungan antara laju aliran CO ₂ dengan Persentasi <i>Burn off</i> Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau; ◆ Posisi <i>Autoclave</i> Vertikal; □ Posisi <i>Autoclave</i> Horisontal Model 1	67
Gambar 4.16	Grafik Hubungan Antara Laju Aliran CO ₂ dengan Persentasi <i>Burn off</i> dan Angka <i>Iodine</i> Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau; ◇ <i>burn off</i> ; x angka <i>Iodine</i>	68
Gambar 4.17	Grafik Hubungan Antara Laju Aliran O ₂ dengan angka <i>Iodine</i> dengan Posisi <i>Autoclave</i> Horisontal Model 2.....	69

Gambar 4.18	Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Karbon Aktif Komersial; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C	72
Gambar 4.19	Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Karbon Aktif KT; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C	73
Gambar 4.20	Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Karbon Aktif Riau; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C	73
Gambar 4.21	Komparasi Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Temperatur 27°C; ♦ Karbon Aktif Komersial; □ Karbon Aktif KT; * Karbon Aktif RU	75
Gambar 4.22	Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Karbon Aktif Komersial; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C	76
Gambar 4.23	Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Karbon Aktif KT; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C	77
Gambar 4.24	Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Karbon Aktif Riau; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C	78
Gambar 4.25	Komparasi Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Temperatur 27°C; ♦ Karbon Aktif Komersial; □ Karbon Aktif KT; * Karbon Aktif RU	78
Gambar 4.26	Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Karbon Aktif RU; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Langmuir	80
Gambar 4.27	Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Karbon Aktif KT; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Langmuir	80
Gambar 4.28	Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Karbon Aktif RU; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Langmuir	81
Gambar 4.29	Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Karbon Aktif Komersial; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Langmuir	82
Gambar 4.30	Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Karbon Aktif KT; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Langmuir	83
Gambar 4.31	Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Karbon Aktif RU; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Langmuir.....	83
Gambar 4.32	Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Karbon Aktif Komersial; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Toth	85
Gambar 4.33	Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Karbon Aktif KT; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Toth	85
Gambar 4.34	Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Karbon Aktif RU; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Toth	86

Gambar 4.35	Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Karbon Aktif Komersial; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Toth	87
Gambar 4.36	Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Karbon Aktif KT; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Toth	88
Gambar 4.37	Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Karbon Aktif RU; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Toth	88
Gambar 4.38	Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Karbon Aktif Komersial; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan D-A	90
Gambar 4.39	Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Karbon Aktif KT; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan D-A	90
Gambar 4.40	Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Karbon Aktif RU; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan D-A.....	91
Gambar 4.41	Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Karbon Aktif Komersial; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan D-A	92
Gambar 4.42	Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Karbon Aktif KT; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan D-A.....	93
Gambar 4.43	Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Karbon Aktif RU; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan D-A.....	93
Gambar 4.44	Adsorpsi Isotermal CO ₂ pada Karbon Aktif Komersial pada Temperatur 27°C; _ Persamaan Model Toth (δ = 3,886%); --- Persamaan Model Langmuir (δ = 5,975%); Persamaan Model D-A (δ = 6,06%)	95
Gambar 4.45	Adsorpsi Isotermal CH ₄ pada Karbon Aktif Komersial pada Temperatur 27°C; _ Persamaan Model Toth (δ = 2,86%); ----- Persamaan Model Langmuir (δ=3,727%); Persamaan Model D-A (δ = 4,74%)	95
Gambar 4.46	Panas Adsorpsi Isosterik CO ₂ pada Karbon Aktif Komersial; ♦ 27°C; □35° C; * 45°C; ▲65°C	97
Gambar 4.47	Panas Adsorpsi Isosterik CO ₂ pada Karbon Aktif KT; ♦ 27°C; □35° C; * 45°C; ▲65°C	97
Gambar 4.48	Panas Adsorpsi Isosterik CO ₂ pada Karbon Aktif RU; ♦ 27°C; □35° C; * 45°C; ▲65°C	98
Gambar 4.49	Komparasi Panas Adsorpsi Isosterik CO ₂ pada Karbon Aktif pada Temperatur 27°C; ♦ Karbon Aktif RU;□ Karbon Aktif KT; ▲ Karbon Aktif Komersial	99
Gambar 4.50	Panas Adsorpsi Isosterik CH ₄ pada Karbon Aktif Komersial; ♦ 27°C; □35° C; * 45°C; ▲65°C	100
Gambar 4.51	Panas Adsorpsi Isosterik CH ₄ pada Karbon Aktif KT; ♦	

	27°C; □35° C; * 45°C; ▲65°C	100
Gambar 4.52	Panas Adsorpsi Isosterik CH ₄ pada Karbon Aktif RU; ◆ 27°C; □35° C; * 45°C; ▲65°C	101
Gambar 4.53	Komparasi Panas Adsorpsi Isosterik CO ₂ dan CH ₄ pada Karbon Aktif Komersial pada Temperatur 27°C; ▲ CO ₂ ; □ CH ₄	102
Gambar 4.54	Adsorpsi Isosterik CO ₂ pada Karbon Aktif Komersial	104
Gambar 4.55	Adsorpsi Isosterik CO ₂ pada Karbon Aktif KT	104
Gambar 4.56	Adsorpsi Isosterik CO ₂ pada Karbon Aktif RU	105
Gambar 4.57	Adsorpsi Isosterik CH ₄ pada Karbon Aktif Komersial	106
Gambar 4.58	Adsorpsi Isosterik CH ₄ pada Karbon Aktif KT	106
Gambar 4.59	Adsorpsi Isosterik CH ₄ pada Karbon Aktif RU	107
Gambar 4.60	Adsorpsi Isosterik CO ₂ dan CH ₄ pada Karbon Aktif Komersial; Garis lurus tebal adalah adsorpsi isosterik CO ₂ ;---*--- Adsorpsi Isosterik CH ₄ dengan Penyerapan 6%; ---□--- Adsorpsi Isosterik CH ₄ dengan Persentasi Penyerapan 4%; ---Δ--- Adsorpsi Isosterik CH ₄ dengan Persentasi Penyerapan 2%	108
Gambar 4.61	Adsorpsi Isosterik CO ₂ dan CH ₄ pada Karbon Aktif KT; Garis lurus tebal adalah adsorpsi isosterik CO ₂ ; ---*--- Adsorpsi Isosterik CH ₄ dengan Persentasi Penyerapan 5%; ---□--- Adsorpsi Isosterik CH ₄ dengan Persentasi Penyerapan 4%; ---Δ--- Adsorpsi Isosterik CH ₄ dengan Persentasi Penyerapan 2%	108
Gambar 4.62	Adsorpsi Isosterik CO ₂ dan CH ₄ pada Karbon Aktif RU; Garis lurus tebal adalah adsorpsi isosterik CO ₂ ;---□--- Adsorpsi Isosterik CH ₄ dengan Persentasi Penyerapan 2%; ---Δ--- Adsorpsi Isosterik CH ₄ dengan Persentasi Penyerapan 1%	109
Gambar 4.63	Komparasi penyimpanan gas Metana dengan Karbon Aktif dan Tanpa Karbon Aktif; Δ Karbon Aktif KT; ■ Karbon Aktif Komersial; * Penyimpanan Metana Tanpa Karbon Aktif	110
Gambar 4.64	Grafik Adsorpsi Isosterik Gas Alam pada Karbon Aktif	111

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Cadangan Minyak Bumi dan Gas Alam Indonesia	6
Tabel 1.2	Komposisi Gas Alam	7
Tabel 1.3	Tabel data Hasil Uji <i>Proximate</i> dan <i>Ultimate</i> Batubara	11
Tabel 2.1	Diameter dan Jenis Pori pada Adsorben	15
Tabel 3.1	Karakteristik Karbon Aktif	42
Tabel 4.1	Data Properti Termofisika Karbon Aktif	71
Tabel 4.2	Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Langmuir Untuk Adsorpsi Isotermal CO ₂	81
Tabel 4.3	Besaran yang digunakan pada Persamaan Model Langmuir Untuk Adsorpsi Isotermal CH ₄	84
Tabel 4.4	Besaran yang Digunakan pada Persamaan Model Toth Untuk Adsorpsi Isotermal CO ₂	86
Tabel 4.5	Besaran yang digunakan pada Persamaan Model Toth Untuk Adsorpsi Isotermal CH ₄	89
Tabel 4.6	Besaran yang digunakan pada Persamaan Model D-A Untuk Adsorpsi Isotermal CO ₂	91
Tabel 4.7	Besaran yang digunakan pada Persamaan Model D-A Untuk Adsorpsi Isotermal CH ₄	94

DAFTAR NOTASI

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

Universitas Indonesia

W	Jumlah adsorbat yang diserap [kg/kg adsorben]
W_o	Kapasitas penyerapan maksimum adsorben [kg/kg adsorben]
x/m	Jumlah adsorbat yang terserap per unit massa adsorben pada tekanan equilibrium dan pada temperatur adsorpsi [kg/kg adsorben]
Z	Faktor kompresibilitas
$-\Delta H$	Perbedaan panas adsorpsi [kJ/kg adsorben]
Δx	Perbedaan jumlah masa adsorbat yang terserap adsorben
$dm_{d,mc}$	Massa adsorbat di <i>measuring cell</i> [kg]
$ m_{cc} $	Massa adsorbat di <i>charging cell</i> [kg]
m_{ads}	Massa adsorbat yang diserap oleh adsorben [kg]
m_{air}	Massa air [kg]
m_{PV+air}	Massa <i>charging cell</i> yang berisi air [kg]
m_{PV}	Massa <i>charging cell</i> kosong [kg]
V_{PV}	Volume <i>charging cell</i> [m ³]
$V_{kosong} = V_{void}$	Volume <i>measuring cell</i> yang berisi adsorben [m ³]
V_{MC}	Volume <i>measuring cell</i> kosong [m ³]
Huruf Yunani	
$\rho_{air(T,P)}$	Massa jenis air pada tekanan dan temperatur saat pengukuran
π	3,14
θ	Bagian permukaan yang tertutupi oleh adsorbat
α	Koefisien perekatan
τ_a	Rata-rata waktu tunggu adsorpsi
ρ_{cc}	Massa jenis adsorbat pada tekanan dan temperatur di <i>charging cell</i> [kg/m ³]
$\tau_{d\infty}$	Rata-rata waktu tunggu desorpsi
ρ_{mc}	Massa jenis adsorbat pada tekanan dan temperatur di <i>measuring cell</i> [kg/m ³]
δ	Deviasi [%]

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Analisis <i>Proximate</i> dan <i>Ultimate</i> Batubara	118
Lampiran 2	Validasi <i>Pressure Transmitter</i>	121
Lampiran 3	Foto Alat Penelitian	122
Lampiran 4	Luas Permukaan Batubara Sebelum dan Sesudah Proses Karbonisasi.....	125
Lampiran 5	Luas Permukaan dan Volume Pori Karbon Aktif	134



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Emisi gas karbon dioksida (CO_2) 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). Mengurangi jumlah emisi gas karbon dioksida sebagai usaha mengontrol jumlah karbon dioksida di atmosfer telah menjadi prioritas utama dunia saat ini melalui Protokol Kyoto (Kyoto Protocol) (Krooss, B.M. dkk., 2002).

Program konversi penggunaan bahan bakar minyak ke bahan bakar gas adalah sebagai salah satu upaya pemerintah Republik Indonesia dalam mengurangi penggunaan bahan bakar minyak, hal tersebut selain untuk mengurangi besaran subsidi yang diberikan, jumlah cadangan bahan bakar minyak yang semakin terbatas juga karena bahan bakar minyak memiliki potensi melepaskan emisi gas karbon dioksida dalam jumlah yang besar.

Program konversi penggunaan bahan bakar minyak menjadi bahan bakar gas juga dikarenakan bahwa Indonesia memiliki potensi bahan bakar gas dalam jumlah yang sangat besar, namun gas alam yang dieksplorasi dan yang dihasilkan masih memiliki kandungan karbon dioksida dalam jumlah yang cukup besar.

Karbon dioksida yang masih terkandung dalam gas alam menyebabkan penurunan nilai kalor pembakaran, penyebab terjadinya karat pada peralatan proses dan pada peralatan distribusi (pipanisasi dan tangki bertekanan) dan membentuk kristal pada proses kriogenik gas alam (Ebenezer, Salako Abiodun et al., 2005). Sehingga dibutuhkan suatu proses pemisahan atau pemurnian (purifikasi) yang dapat mengurangi jumlah kandungan karbon dioksida pada bahan gas alam.

Saat ini proses pemurnian atau pemisahan gas alam dari karbon dioksida adalah dengan cara proses absorpsi (absorpsi kimia dan fisika), proses

pemisahan dengan cara fisika (membran dan kriogenik) dan proses pemisahan dengan campuran bahan kimia (*solvent*) serta proses adsorpsi yang disertai dengan *solvent* (Ebenezer, Salako Abiodun et al., 2005).

Teknologi yang saat ini digunakan untuk mengurangi kandungan karbon dioksida pada bahan bakar gas membutuhkan energi yang cukup besar dan mahal, sehingga perlu dicarikan metode alternatif yang dapat mengurangi kandungan karbon dioksida pada bahan bakar gas yang relatif tidak memerlukan energi yang besar dan murah (Siriwardane, Ranjani V. dkk., 2001).

Permasalahan lain dari program konversi bahan bakar minyak menjadi bahan bakar gas adalah distribusi dan penyimpanan bahan bakar gas. Sampai saat ini sistem distribusi bahan bakar gas masih menggunakan sistem pipanisasi dan menggunakan gas alam terkompresi sampai dengan tekanan 25 MPa (*compressed natural gas/CNG*). Metode distribusi seperti ini menyebabkan peningkatan harga jual gas alam karena distribusi dengan pipanisasi harus membebaskan tanah sampai ratusan kilometer dan sistem distribusi dengan CNG menyebabkan 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 uraian di atas diperlukan satu metode yang relatif lebih hemat energi, murah, dan aman dalam upaya mengurangi kandungan karbon dioksida pada bahan bakar gas serta mempermudah distribusi dan penyimpanan bahan bakar gas tersebut.

Sistem adsorpsi adalah salah satu cara atau metode yang paling efektif untuk memisahkan karbon dioksida (CO_2) dengan zat lainnya (Lee, Jong-Seok dkk., 2002). Sistem adsorpsi juga dapat digunakan untuk mendistribusikan dan menyimpan gas alam yang biasa disebut sebagai sistem penyimpanan *adsorbed natural gas* (ANG). Pada sistem penyimpanan ANG, gas alam dapat terserap pada tekanan penyimpanan

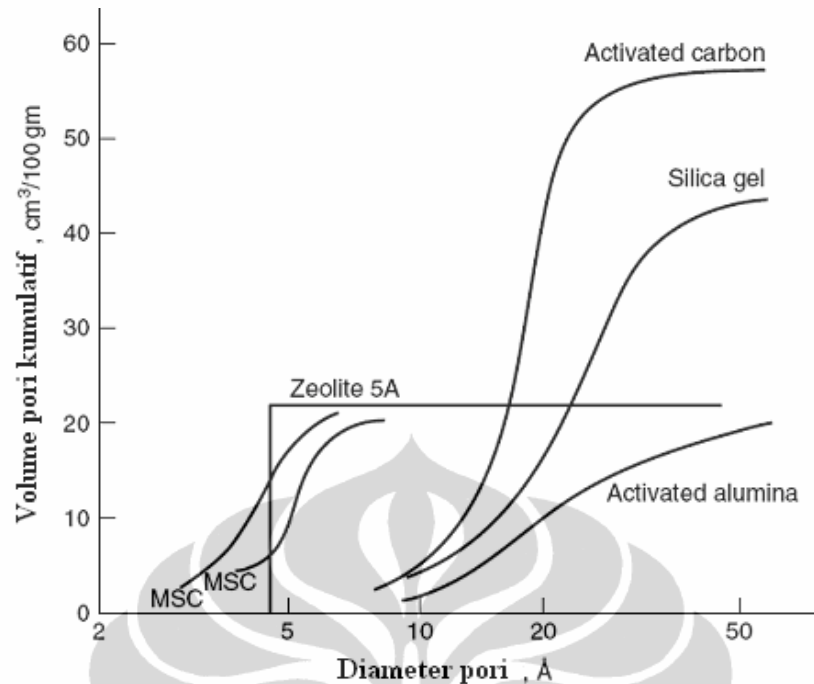
yang lebih rendah pada temperatur ruang (Himeno, Shuji et al., 2005 dan Pupier, O., et al., 2005).

Pada sistem adsorpsi, media penyerapnya biasa disebut sebagai adsorben dan zat yang terserap disebut sebagai adsorbat. Material penyerap atau adsorben adalah zat atau material yang mempunyai kemampuan untuk mengikat dan mempertahankan cairan atau gas di dalamnya (Suryawan, Bambang, 2004).

Beberapa adsorben yang digunakan pada aplikasi sistem adsorpsi secara komersial adalah kelompok polar adsorben yaitu kelompok adsorben yang mampu menyerap air sebagai adsorbat dengan baik, kelompok polar adsorben ini biasa disebut sebagai kelompok adsorben *hydrophilic* (menyukai air) seperti silika gel, alumina aktif, dan zeolit. Kelompok lainnya adalah kelompok non polar adsorben, yaitu kelompok adsorben yang mampu menyerap adsorbat selain air dengan baik, kelompok polar adsorben ini biasa juga disebut sebagai kelompok adsorben *hydrophobic* (tidak menyukai air) seperti polimer adsorben dan karbon aktif (Suzuki, M, 1990).

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

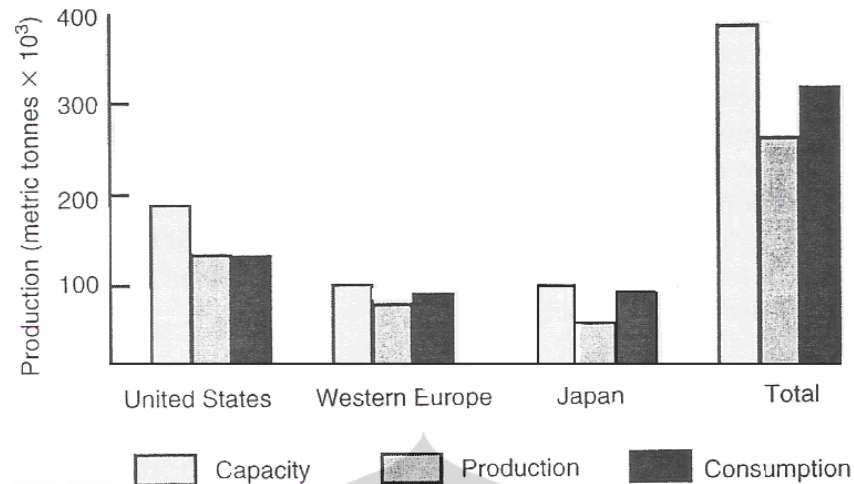
Gambar 1.1 memperlihatkan bahwa dibandingkan dengan jenis adsorben lainnya karbon aktif memiliki diameter pori sampai dengan 50 Å, diameter pori tersebut hampir sama dengan adsorben lainnya seperti alumina aktif (activated alumina) dan *silica gel*, namun akumulasi volume pori yang dimiliki karbon aktif masih jauh lebih besar dibanding dengan alumina aktif dan *silica gel* (Yang, Ralph. T, 2003).



Gambar 1.1 Distribusi Ukuran Pori pada Karbon Aktif, Silika Gel, *Activated Alumina*, 2 Jenis *Molecular-Sieve Carbons* (MSC), dan Zeolit 5A

(Yang, Ralph. T, 2003)

Gambar 1.2 mengindikasikan jumlah konsumsi karbon aktif yang demikian besarnya terutama di Eropa Barat, Amerika Serikat, dan Jepang. Pada gambar 1.2 juga terlihat bahwa terdapat selisih antara kebutuhan atau permintaan karbon aktif dengan jumlah karbon aktif yang diproduksi sebesar $\pm 50 \times 10^6$ kg per tahun, dengan ketersediaan bahan dasar yang cukup melimpah sehingga industri pembuatan karbon aktif di Indonesia juga menjadi salah satu industri yang cukup potensial.



Gambar 1.2 Suplai dan Kebutuhan Karbon Aktif di Negara-negara Industri

(Marsh, Harry dan Francisco Rodriguez-Reinoso, 2006)

Karbon aktif adalah adsorben yang dapat diproduksi dari seluruh material yang memiliki unsur karbon, seperti tempurung kelapa, kayu, batubara, dan lain-lain. Bahan dasar untuk membuat karbon aktif selain harus memiliki kandungan unsur karbon juga harus murah dan mudah didapat.

Batubara adalah salah satu bahan dasar pembuatan karbon aktif yang paling potensial, disamping memiliki kandungan unsur karbon, ketersediaannya yang melimpah, batubara juga memiliki harga yang relatif murah sehingga dengan membuat batubara menjadi karbon aktif maka nilai ekonomi batubara akan semakin meningkat.

Menurut Pengkajian Energi Universitas Indonesia, 2006 cadangan terbesar batubara Indonesia adalah dari jenis kalori rendah yaitu sebesar 56,059 miliar ton, untuk yang kalori menengah sebesar 2,443 miliar ton dan yang kalori tinggi sebesar 8,3369 miliar ton. Potensi batubara tersebut tersebar di beberapa pulau besar di Indonesia dan yang terbesar adalah di pulau Kalimantan dan Sumatera. Potensi batubara yang demikian besarnya memungkinkan untuk menjadikan batubara sebagai bahan dasar pembuatan karbon aktif sebagai adsorben.

Beberapa penelitian pembuatan karbon aktif berbahan dasar batubara telah dilakukan, namun batubara yang digunakan sebagai bahan dasar adalah

Universitas Indonesia

batubara bituminus dan antrasit seperti yang dilakukan oleh Illaín-Go´mez, M. J., et al., 1996, B. Serrano-Talavera, et al., 1997, Yong Zou dan Bu-Xing Han, 2001, dimana karbon aktif yang dibuat menggunakan metode aktivasi kimia dengan KOH dan NaOH sebagai *activating agent*, sedangkan Hsisheng Teng, et al., 1996, membuat karbon aktif menggunakan metode aktivasi fisika dengan CO₂ sebagai *activating agent* dengan bahan dasar batubara bituminus.

Dari uraian di atas didapat bahwa sistem adsorpsi adalah salah satu metode alternatif yang cukup potensial yang dapat mengurangi jumlah kandungan karbon dioksida pada bahan bakar gas dan juga dapat dijadikan sebagai media penyimpanan bahan bakar gas yang lebih murah dan aman. Untuk itu perlu dilakukan penelitian adsorpsi karbon dioksida dan metana pada karbon aktif dimana karbon aktif yang digunakan berbahan dasar batubara Indonesia.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Potensi bahan bakar gas yang terdapat di Indonesia adalah salah satu alasan program konversi penggunaan bahan bakar minyak menjadi bahan bakar gas. Selain potensinya yang cukup besar bahan bakar gas juga adalah salah satu jenis bahan bakar yang lebih ramah terhadap lingkungan dibanding dengan bahan bakar minyak maupun bahan bakar padat seperti batubara. Tabel 1.1 memperlihatkan cadangan bahan bakar minyak dan bahan bakar gas Indonesia sampai dengan tahun 2005.

Tabel 1.1. Cadangan Minyak Bumi dan Gas Alam Indonesia

Tahun	Minyak Bumi (Milliard Barrel)			Gas Alam (Triliun Cubic Feet)		
	Eksplorasi	Potensi	Total	Eksplorasi	Potensi	Total
2000	5,12	4,49	9,61	94,75	75,56	170,31
2001	5,1	4,66	9,75	92,1	76,05	168,15
2002	4,72	5,03	9,7	90,3	86,29	176,59
2003	4,73	4,4	9,13	91,17	86,96	178,13
2004	4,3	4,31	8,61	97,81	90,53	188,34
2005	4,19	4,44	8,63	97,26	88,54	185,8

(Indonesia Energy Outlook & Statistics, 2006)

Universitas Indonesia

Mengurangi jumlah emisi gas karbon dioksida dari hasil pembakaran bahan bakar fosil adalah salah satu upaya mengontrol jumlah karbon dioksida di atmosfer telah menjadi prioritas utama dunia saat ini melalui Protokol Kyoto (Kyoto Protocol) (Krooss, B.M. dkk., 2002).

Emisi gas yang dihasilkan dari hasil pembakaran khususnya gas karbon dioksida (CO_2) dari hasil pembakaran bahan bakar gas sangat tergantung dengan komposisi kandungan bahan bakar gas itu sendiri. Gas alam yang dieksplorasi dan dihasilkan di Indonesia masih memiliki kandungan unsur karbon dioksida yang cukup besar, sehingga hal tersebut menyebabkan emisi gas karbon dioksida yang dihasilkan juga besar. Karbon dioksida yang terkandung pada gas alam juga akan menjadikan harga jual gas murah, karena kandungan gas CO_2 yang terkandung pada gas alam akan mengakibatkan penurunan nilai kalor pembakaran, penyebab terjadinya karat pada peralatan proses dan pada peralatan distribusi (pipanisasi dan tangki bertekanan) serta membentuk kristal pada proses kriogenik gas alam (Ebenezer, Salako Abiodun et al., 2005).

Tabel 1.2 memperlihatkan komposisi rata-rata gas alam Indonesia, pada tabel tersebut terlihat bahwa komposisi gas alam didominasi oleh metana (CH_4), namun demikian karbon dioksida juga terdapat pada gas alam dalam persentasi yang cukup besar, sehingga dengan demikian potensi pelepasan gas karbon dioksida pada proses pembakaran bahan bakar gas cukup besar. Untuk itu pemurnian gas alam menjadi sangat perlu dilakukan untuk mengurangi jumlah kandungan karbon dioksida.

Tabel 1.2 Komposisi Gas Alam

Unsur	Gas Alam Volume (%)
C	45-100
C_2	0,01-10
C_3	0,01-16
C_4	10-16
CO_2	0-30
N_2	0,1-6

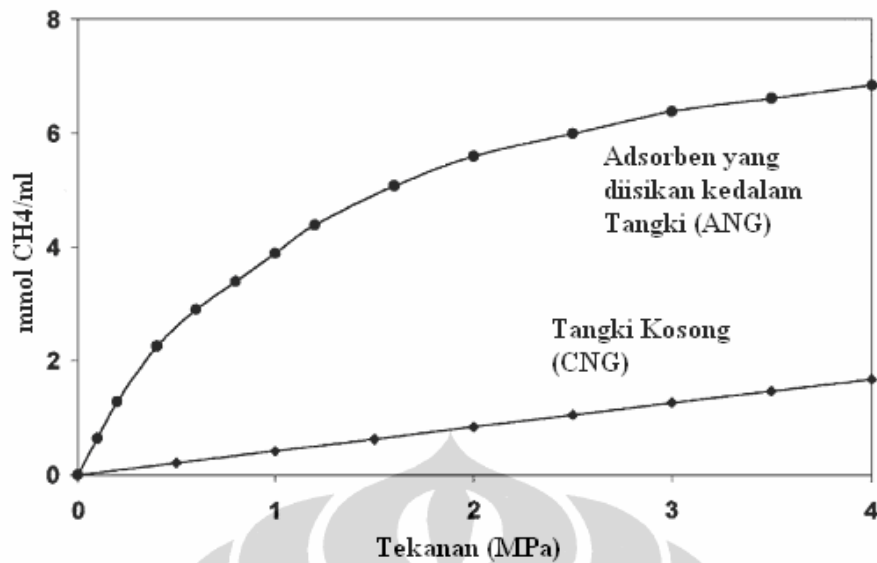
(www.pgn.co.id 10-2-2010)

Universitas Indonesia

Masalah lain dari program konversi bahan bakar minyak menjadi bahan bakar gas adalah distribusi bahan bakar gas, dimana sampai saat ini distribusi bahan bakar gas masih menggunakan sistem pipanisasi dan menggunakan gas alam terkompresi sampai dengan tekanan 25 MPa (compressed natural gas/CNG). 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).

Adsorbed natural gas adalah metode distribusi yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan *compressed natural gas*, hal tersebut dikarenakan sistem penyerapan (adsorption system) membutuhkan tekanan penyimpanan yang lebih rendah pada temperatur ruang (Himeno, Shuji et al., 2005 dan Pupier, O., et al., 2005). *Adsorbed Natural Gas* (ANG) membutuhkan tekanan penyimpanan hanya sekitar 3,5 - 4 MPa jika dibandingkan dengan *Compressed Natural Gas* (CNG) yang membutuhkan tekanan sekitar 25 MPa (Manocha, Satish. M, 2003, Pupier, O., et al., 2005, Yang, X.D. et al., 2005, dan Prauchner, Marcos. J. Et al., 2008), dengan demikian ANG lebih efisien dibandingkan dengan CNG.

Pada gambar 1.3 terlihat hubungan antara penyimpanan gas alam dengan variasi tekanan. Pada gambar tersebut terlihat perbandingan penyimpanan gas alam dengan metode gas alam terkompresi (CNG) dengan metode adsorpsi (ANG). Kapasitas penyimpanan dengan menggunakan metode *adsorbed natural gas* mampu menyimpan 3 kali lebih besar dibanding dengan CNG pada tekanan yang sama.



Gambar 1.3 Komparasi Kapasitas Penyerapan Metana dengan Adsorben dan Tanpa Adsorben

(Castello, D. Lozano, et al., 2002)

Pada rancangan untuk aplikasi sistem adsorpsi seperti pada proses pemisahan karbon dioksida dari gas alam dan penyimpanan gas alam, di samping data karakteristik adsorben seperti luas permukaan dan volume pori, data penyerapan (kinetik dan termodinamika) adsorbat pada adsorben juga dibutuhkan (Y, Belmabkhout dkk., 2004).

Beberapa penelitian adsorpsi isothermal karbon dioksida dan metana pada karbon aktif telah banyak dilakukan oleh para peneliti, khususnya dari luar Indonesia. Sebagian besar dari hasil penelitian tersebut hanya memberikan data kapasitas penyerapan karbon dioksida dan metana pada karbon aktif pada beberapa variasi tekanan dan temperatur, hanya sebagian kecil yang memberikan data panas adsorpsi isosterik dan sangat sulit didapat data adsorpsi isosterik karbon dioksida dan metana pada karbon aktif. Penelitian-penelitian yang telah dilakukan tersebut menggunakan beberapa jenis karbon aktif dengan berbagai jenis bahan dasar. Penelitian adsorpsi isothermal karbon dioksida dan metana pada karbon aktif khususnya karbon aktif berbahan dasar sumber daya alam Indonesia sangat sulit ditemukan. Untuk itu perlu dilakukan penelitian adsorpsi isothermal karbon dioksida

dan metana pada karbon aktif khususnya karbon aktif berbahan dasar sumber daya alam Indonesia.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan Umum Penelitian ini adalah meneliti karakteristik adsorpsi isothermal gas karbon dioksida (CO_2) dan metana (CH_4) pada karbon aktif berbahan dasar batubara sub bituminus Indonesia, sebagai salah satu metode alternatif pemurnian dan penyimpanan gas alam yang hemat energi dan murah. Karbon aktif di produksi dengan menggunakan metode aktivasi fisika, dimana proses aktivasi dilakukan pada temperatur tinggi (sampai dengan temperatur 950°C) dengan mengalirkan gas CO_2 sebagai *activating agent*, namun sebelumnya didahului dengan proses karbonisasi. Metode aktivasi yang digunakan pada proses pembuatan karbon aktif adalah metode aktivasi fisika, hal tersebut dilakukan karena diyakini bahwa metode aktivasi fisika adalah metode yang paling murah dibanding dengan metode aktivasi kimia. Karakteristik adsorpsi isothermal dilakukan dengan metode volumetrik pada variasi tekanan dan temperatur isothermal.

Tujuan Khusus dari penelitian ini adalah:

1. Memproduksi karbon aktif berbahan dasar batubara sub bituminus Indonesia dengan metode aktivasi fisika dimana gas CO_2 digunakan sebagai *activating agent*.
2. Mengganti gas nitrogen dengan oksigen pada proses karbonisasi untuk menghasilkan kualitas karbon aktif yang lebih baik.
3. Mendapatkan data kualitas karbon aktif seperti angka iodine (Iodine Number) dan luas permukaan.
4. Mengetahui pengaruh posisi *autoclave* vertikal dan horisontal pada proses produksi karbon aktif terhadap kualitas karbon aktif.
5. Membuat alat uji adsorpsi isothermal berbasis pada metode volumetrik.
6. Melakukan adsorpsi isothermal gas CO_2 dan CH_4 pada beberapa karbon aktif yang telah diproduksi sampai pada tekanan 3,5 MPa pada temperatur 27, 35, 45, dan 65°C (300, 308, 328, dan 338 K), sehingga didapat data kapasitas penyerapannya.

Universitas Indonesia

7. Melakukan regresi data adsorpsi isotermal dengan menggunakan model persamaan Langmuir, Toth, dan Dubinin-Astakhov.
8. Membuat grafik panas adsorpsi isosterik (isostere heat of adsorption).
9. Membuat grafik adsorpsi isosterik, dimana dengan grafik tersebut dapat dengan mudah diprediksi temperatur dan tekanan yang dibutuhkan untuk menyerap CO₂ dan CH₄ dengan jumlah tertentu.

1.4 BATASAN MASALAH

Bahan dasar pembuatan karbon aktif adalah batubara Indonesia yang berasal dari Riau dan Kalimantan Timur. Tabel 1.3 adalah analisis *proximate* dan *ultimate* batubara yang digunakan sebagai bahan dasar karbon aktif pada penelitian ini. Data analisis *proximate* dan *ultimate* batubara yang diperoleh mengindikasikan bahwa batubara tersebut adalah batubara sub bituminus (Speight, James G., 2005).

Tabel 1.3 Tabel Data Hasil Uji *Proximate* dan *Ultimate* Batubara

Proximate Analysis	Riau (%)	Kalimantan Timur (%)
Total Moisture	5,88	15,88
Moisture	3,56	12,11
Ash	18,2	4,03
Volatile Matter	34,81	43,22
Fixed Carbon	43,43	40,64
Calorific Value (kcal/kg)	6158	5545
Ultimate Analysis	Riau (%)	Kalimantan Timur (%)
Moisture	3,56	12,11
Ash	18,2	4,03
Carbon	58,79	56,7
Hydrogen	3,7	3,5
Nitrogen	1,39	0,93
Total Sulfur	1,82	1,9
Oxygen	12,54	20,83

(PT. Geoservices, 2010)

Karbon aktif akan diproduksi dengan menggunakan metode aktivasi fisika dengan mengalirkan gas CO₂ sebagai *activating agent*.

Berikut adalah batasan masalah dari penelitian yang dilakukan:

1. Parameter kualitas karbon aktif hanya meliputi angka *burn off*, angka *iodine* dan luas permukaan.
2. Adsorpsi isothermal dilakukan pada kondisi lingkungan Laboratorium Pendingin dan Pengkondisian Udara, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia dengan tekanan adsorpsi sampai dengan 3.5 MPa pada temperatur isothermal 27, 35, 45, dan 65°C (300, 308, 328, dan 338 K).
3. Adsorpsi isothermal CO₂ dan CH₄ pada karbon aktif dilakukan hanya pada dua jenis karbon aktif yang diproduksi yang berbahan dasar batubara Kalimantan Timur dan Riau, serta satu jenis karbon aktif komersial.
4. Adsorpsi isothermal dilakukan dengan menggunakan metode volumetrik.
5. Regresi dilakukan dengan menggunakan persamaan model Langmuir, Tóth, dan Dubinin-Astakhov.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan disertasi ini terdiri atas 5 bab, daftar pustaka dan lampiran, adapun kelima bab tersebut adalah sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan. Terdiri atas latar belakang, tujuan Penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

Bab 2 Landasan Teori. Terdiri atas teori dasar yang terdiri atas teori-teori yang mendasari penelitian ini. Teori dasar ini meliputi teori dasar karbon aktif dan teori dasar adsorpsi isothermal.

Bab 3 Metodologi Penelitian. Terdiri atas metode penelitian yang dilakukan. Penelitian yang dilakukan terdiri atas dua topik penelitian besar, yaitu produksi karbon aktif berbahan dasar batubara sub bituminus Indonesia dengan metode aktivasi fisika dimana gas CO₂ digunakan

Universitas Indonesia

sebagai *activating agent* dan adsorpsi isothermal gas CH₄ dan CO₂ pada karbon aktif dengan menggunakan metode volumetrik.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan. Berisi tentang data dan analisis data yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan. Data properti termofisika karbon aktif yang didapat dari hasil penelitian berupa angka *iodine* dan luas permukaan karbon aktif.

Data adsorpsi isothermal adalah data kapasitas penyerapan gas CO₂ dan CH₄ pada karbon aktif pada temperatur 27, 35, 45, dan 65°C dengan tekanan sampai dengan 3,5 MPa.

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

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

BAB 2 LANDASAN TEORI

Adsorpsi adalah fenomena fisik yang terjadi saat molekul gas atau cair 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.

Adsorpsi fisika pada karbon aktif dan adsorben lainnya saat ini banyak digunakan untuk proses separasi atau pemisahan dan pemurnian gas (Ruthven, D. M, 1984). Proses pemisahan atau separasi gas didefinisikan sebagai sebuah proses dimana sebuah campuran gas dipisahkan menjadi dua atau beberapa produk unsur atau zat yang berbeda.

Pada banyak proses pemisahan atau separasi, proses tersebut sangat bergantung pada kualitas material atau alat pemisahannya (*separating agent*). *Separating agent* pada proses separasi atau pemisahan dengan proses adsorpsi adalah adsorben atau sorben, sehingga unjuk kerja proses pemisahan atau pemurnian (purifikasi) gas secara langsung ditentukan oleh kualitas sorben.

2.1 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 yaitu kelompok adsorben yang mampu menyerap air sebagai adsorbat dengan baik, kelompok polar adsorben ini biasa disebut sebagai kelompok adsorben *hydrophilic* (menyukai air) seperti silika gel, alumina aktif, dan zeolit. Kelompok lainnya adalah kelompok non-polar adsorben, yaitu kelompok adsorben yang mampu menyerap adsorbat dengan baik selain air, kelompok non-polar adsorben ini biasa juga disebut sebagai kelompok

adsorben *hydrophobic* (tidak menyukai air) seperti polimer adsorben dan karbon aktif (Suzuki, M, 1990).

Karakter fisik adsorben yang utama adalah karakter porinya (Suzuki, M, 1990 dan Do, Duong D., 2008). Keberhasilan atau kegagalan proses adsorpsi sangat tergantung dengan unjuk kerja adsorben pada kondisi equilibria dan kinetik. Adsorben yang bagus adalah adsorben yang mempunyai kapasitas penyerapan yang tinggi dan cepat dalam proses penyerapannya (kinetik). Untuk itu adsorben yang baik tersebut harus memiliki kriteria sebagai berikut (Do, Duong D., 2008):

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

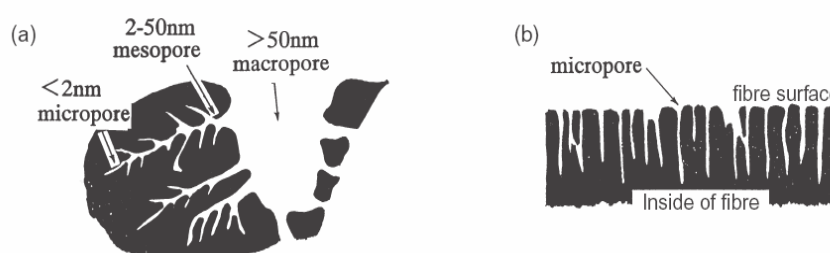
Untuk memenuhi kriteria yang pertama adsorben harus memiliki ukuran pori yang kecil. Dengan demikian adsorben yang bagus harus memiliki dua kombinasi ukuran pori, mesopori dan mikropori. Klasifikasi ukuran pori sebagaimana yang direkomendasikan oleh *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) adalah seperti terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Diameter dan Jenis Pori pada Adsorben

Diameter Pori (nm)	Jenis Pori
$d < 2$	Mikropori
$2 < d < 50$	Mesopori
$d > 50$	Makropori

(Do, Duong D., 2008)

Gambar 2.1 memberikan gambaran yang lebih jelas tentang distribusi ukuran pori pada adsorben.



Gambar 2.1 Karbon Aktif Granul (a) Karbon Aktif Serat (b)

(Manocha, Satish. M, 2003)

2.1.1 Adsorben Komersial

Adsorben komersial yang digunakan pada proses adsorpsi didominasi oleh empat jenis adsorben, yaitu karbon aktif, zeolit, *silica gel* dan alumina aktif (Yang, Ralph T., 2003). Karbon aktif adalah jenis adsorben yang paling banyak digunakan pada proses adsorpsi, 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).

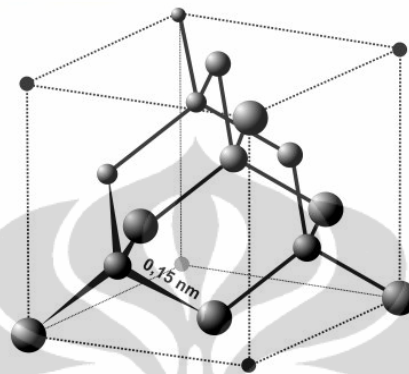
2.1.2 Karbon Aktif

Karbon aktif adalah salah satu jenis adsorben dimana struktur atom karbonnya adalah struktur atom karbon amorf, yang sebagian besar terdiri dari karbon bebas serta memiliki “permukaan dalam” (internal surface) sehingga memiliki kemampuan daya serap yang baik. Daya serap karbon aktif umumnya bergantung kepada jumlah senyawaan karbon yang berkisar antara 85% sampai 95% karbon bebas (Bansal R.C. et al., 2005).

Karbon aktif didefinisikan sebagai karbon aktif yang efektif jika memiliki luas permukaan paling tidak $5 \text{ m}^2/\text{gr}$, namun untuk karbon aktif yang digunakan pada dunia industri luas permukaan karbon aktif bisa di atas $2000 \text{ m}^2/\text{gr}$ (Rouquerol, Jean, dkk, 1998). Yang, Ralph. T, 2003 menyatakan bahwa karbon aktif memiliki luas permukaan dari $300 \text{ m}^2/\text{gr}$ sampai dengan $4000 \text{ m}^2/\text{gr}$.

2.1.2.1 Struktur Atom Karbon

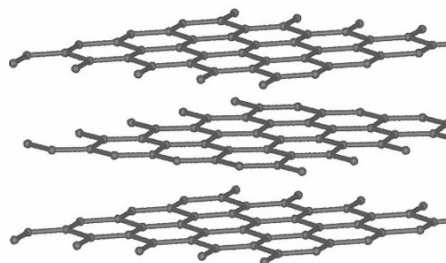
Unsur karbon adalah salah satu unsur yang memiliki beberapa bentuk struktur atom yang biasa disebut sebagai alotrop. Diantaranya adalah kristal (diamond), *graphite*, dan amorf.



Gambar 2.2 Struktur Atom Karbon Berbentuk Kristal
(Marsh, Harry, et al., 2006, www.wikipedia.com, 10-2-2010)

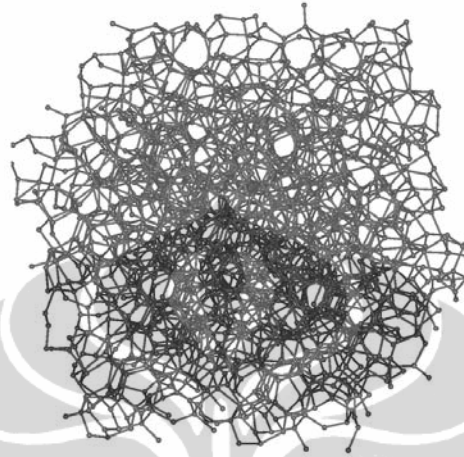
Struktur atom karbon berbentuk kristal seperti terlihat pada Gambar 2.2 merupakan alotrop karbon yang memiliki kekerasan paling tinggi dan cukup stabil sampai pada tekanan 6 GPa pada temperatur ruang (Marsh, Harry, et al., 2006).

Struktur atom karbon berbentuk *graphite* adalah struktur atom yang berbentuk lapisan-lapisan heksagonal, sehingga tidak memiliki kekerasan yang tinggi (Marsh, Harry, et al., 2006). Struktur atom karbon bentuk *graphite* terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Struktur Atom Karbon Berbentuk *Graphite*
(Marsh, Harry, et al., 2006, www.wikipedia.com, 10-2-2010)

Karbon aktif merupakan unsur karbon yang memiliki struktur atom amorf, dengan susunan atom karbon tidak beraturan seperti terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Struktur Atom Karbon Berbentuk Amorf

(www.wikipedia.com , 10-2-2010)

2.1.2.2 Bahan Dasar dan Proses Pembuatan Karbon Aktif

Bahan dasar karbon aktif adalah seluruh material yang memiliki unsur karbon, seperti kayu, kulit kacang, tulang, cangkang kelapa, cangkang kelapa sawit, batubara, dan lain-lain (Marsh, Harry and Francisco Rodriguez-Reinoso, 2006).

2.1.3 Proses Pembuatan Karbon Aktif Skala Industri

Pada prinsipnya pembuatan karbon aktif terdiri atas tiga proses sebagai berikut (Manocha, Satish. M, 2003 dan Yang, Ralph. T, 2003):

1. Pemilihan bahan dasar; Pada dasarnya karbon aktif dapat dibuat dari semua bahan yang mengandung karbon, baik yang berasal dari tumbuh-tumbuhan, binatang ataupun barang tambang seperti berbagai jenis kayu, sekam padi, tulang binatang, kulit biji kopi, tempurung kelapa, tempurung kelapa sawit, batu bara, dan lain-lain. Namun dalam membuat atau memproduksi karbon aktif seluruh bahan dasar yang disebutkan di atas harus memenuhi beberapa kriteria seperti, kemampuan bahan dasar tersebut untuk skala industri dan harganya

Universitas Indonesia

- tidak mahal, memiliki kandungan karbon yang tinggi serta memiliki unsur inorganik (seperti abu) yang rendah (Manocha, Satish. M, 2003).
2. Karbonisasi; Menurut Yang, Ralph. T, 2003 proses karbonisasi dilakukan pada temperatur 400 – 500°C sehingga material yang mudah menguap (*volatile matter*) yang terkandung pada bahan dasar akan hilang pada proses tersebut. Sedangkan menurut Manocha, Satish. M, 2003 proses karbonisasi dilakukan pada temperatur di bawah 800°C. Menurut Nugroho, Yulianto S., 2000, bahwa batubara dengan persentasi *volatile matter* 46,8%, *volatile matter* nya akan habis pada temperatur 900°C – 950°C dan batubara dengan persentasi *volatile matter* 39,7%, *volatile matter* akan habis pada kisaran temperatur 800°C.
 3. Aktivasi; Terdapat dua metode aktivasi yaitu aktivasi kimia dan aktivasi fisika yang bertujuan untuk memperbesar distribusi pori dan memperbesar pori terutama untuk meso pori dan mikro pori sehingga akan memperbesar luas permukaan karbon aktif dengan cara pembakaran yang tidak sempurna (*partial combustion*).

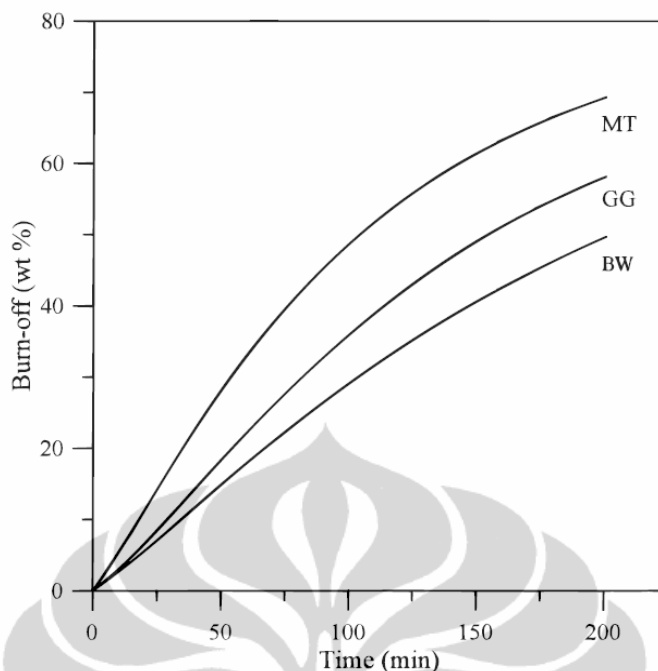
2.1.3.1 Aktivasi Kimia

Pada aktivasi kimia bahan dasar ditaburi atau dicampur dengan bahan kimia yang biasa disebut sebagai *activating agent* untuk selanjutnya dipirolisis pada temperatur 400 – 600°C. Produk hasil pirolisis kemudian didinginkan dan selanjutnya dicuci untuk menghilangkan atau membuang *activating agent* yang sebelumnya telah dicampur pada bahan dasar. *Activating agent* yang digunakan pada proses aktivasi kimia sangat bervariasi antara lain: *phosphoric acid*, *zinc chloride*, H_2SO_4 , K_2S , dan lain-lain (Manocha, Satish. M, 2003). Menurut Yang, Ralph T, 2003, proses aktivasi kimia pada temperatur 500 – 900°C dan *activating agent* yang digunakan juga bervariasi seperti *phosphoric acid*, *zinc chloride*, *potassium sulfide* serta NaOH. Produk yang biasa dihasilkan dengan menggunakan aktivasi kimia biasanya dalam bentuk *powder*. Illan-Gomez, M.J. et al (1996) telah melakukan penelitian karbon aktif dari batubara yang berasal dari Spanyol dengan menggunakan metode aktivasi kimia

dan KOH serta NaOH sebagai *activating agent*. Pada temperatur aktivasi 700°C dengan menggunakan KOH sebagai *activating agent* diperoleh luas permukaan sampai dengan 2500 m²/gr, dan dengan menggunakan NaOH sebagai *activating agent* diperoleh luas permukaan sampai dengan 2000 m²/gr. Penelitian lain juga dengan menggunakan aktivasi kimia dengan bahan dasar batubara jenis antrasit dari China dan dengan menggunakan KOH sebagai *activating agent* pada temperatur 810°C selama 2 jam diperoleh luas permukaan sampai dengan 2400 m²/gr (Zou, Yong et al, 2001).

2.1.3.2 Aktivasi Fisika

Aktivasi fisika adalah proses untuk mengembangkan struktur pori dan memperbesar luas permukaan karbon aktif dengan *heat treatment* pada temperatur 800 – 1000°C dengan mengalirkan *steam* atau CO₂ (Manocha, Satish. M, 2003). Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi hasil dari proses aktivasi antara lain: laju aliran kalor, laju aliran *innert gas*, temperatur proses, *activating agent*, lama proses aktivasi, dan alat yang digunakan pada penelitian tersebut (Marsh, Harry dan Francisco Rodriguez-Reinoso, 2006). Teng, Hsisheng, et al, 1996, dalam penelitiannya menggunakan batubara bituminus yang berasal dari Australia sebagai bahan dasar dan diaktivasi dengan menggunakan CO₂ sebagai *activating agent* pada temperatur aktivasi 900°C menghasilkan luas permukaan sampai dengan 1171 m²/gr pada presentasi *burn-off* sebesar 70%.



Gambar 2.5 Hubungan antara Waktu Aktivasi dengan Material yang Terbakar pada Proses Aktivasi

(Teng, Hsisheng, et al, 1996)

Teng, Hsisheng, et al, 1996 melakukan penelitian pembuatan karbon aktif dengan tiga jenis batubara antrasit dengan memvariasikan waktu sampai dengan 200 menit pada temperatur aktivasi 900°C dan menggunakan CO₂ sebagai *activating agent*, didapat bahwa semakin lama proses aktivasi dilakukan maka kandungan semakin banyak batubara yang terbakar dan menghasilkan luas permukaan yang semakin besar.

2.1.4 Pengujian Standar untuk Karbon Aktif

Kualitas karbon aktif ditentukan dengan beberapa parameter, diantaranya adalah angka iodine (iodine number) dan luas permukaan.

1. Angka Iodine (*Iodine Number*)

Iodine number didefinisikan sebagai jumlah *iodine* (dalam miligram) yang diadsorpsi oleh karbon aktif (per gram) dari 0,02 N larutan iodine (ASTM D4607-94) (Yang, R.T. 2003). *Iodine number* merupakan parameter pokok yang digunakan untuk mengetahui karakteristik dari karbon aktif. *Iodine number* diukur untuk mengetahui tingkatannya

(bilangan yang tinggi menunjukkan derajat aktivasi yang tinggi) dan dihasilkan dalam ml/g (biasanya pada kisaran 500-1200 ml/g).

2. Luas Permukaan

Luas permukaan karbon aktif atau adsorben lainnya biasanya didapat dengan menggunakan konsep adsorpsi isoterma B.E.T., dimana adsorbat yang digunakan adalah nitrogen cair. Luas permukaan diperoleh dengan menghitung luas permukaan molekul nitrogen yang terserap pada karbon aktif atau adsorben.

2.2 PROSES ADSORPSI

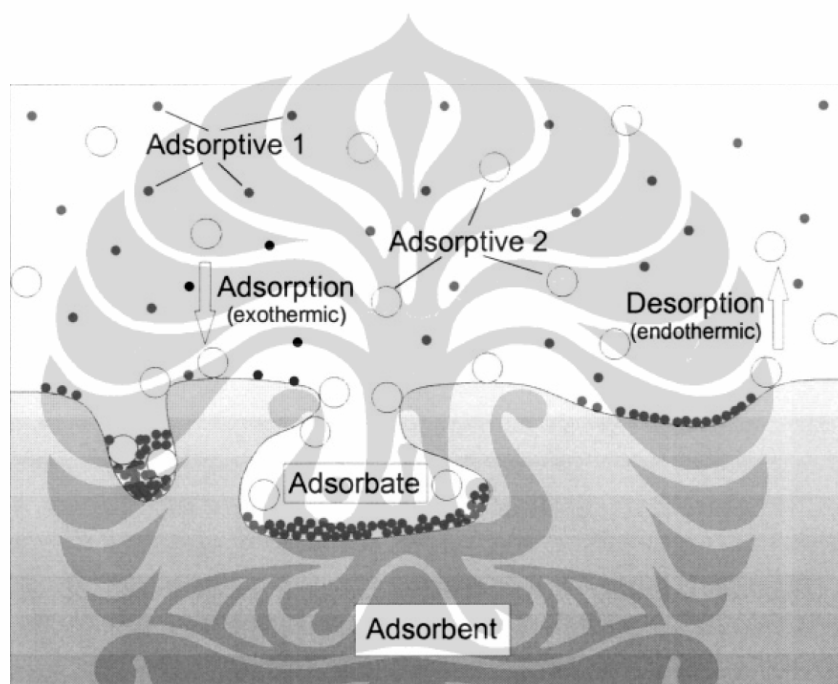
Adsorpsi adalah fenomena fisik yang terjadi saat molekul-molekul gas atau cair dikontakkan dengan suatu permukaan padatan dan sebagian dari molekul-molekul tersebut mengembun pada permukaan padatan tersebut (Suryawan, Bambang, 2004). Pada proses adsorpsi terdapat dua jenis adsorpsi yaitu adsorpsi fisika 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 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. Proses lepasnya adsorbat dari permukaan adsorben

disebut sebagai proses desorpsi. Gambar 2.6 memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai 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 adsorbat dari adsorben.



Gambar 2.6 Nomenklatur Adsorpsi
(Keller, Jurgen., 2005)

2.2.1 Adsorpsi Equilibrium

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

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

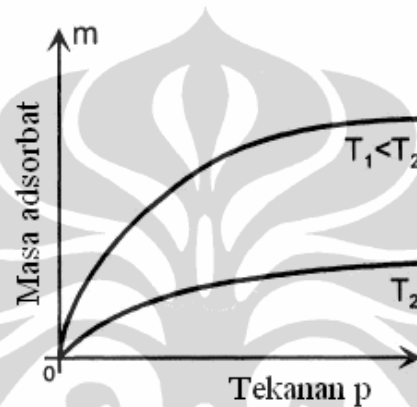
Dimana, x/m adalah jumlah adsorbat yang terserap per unit massa adsorben pada tekanan equilibrium dan pada temperatur adsorpsi.

Adsorpsi equilibrium dapat didekati dalam tiga cara, yaitu:

1. Adsorpsi Isotermal

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

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

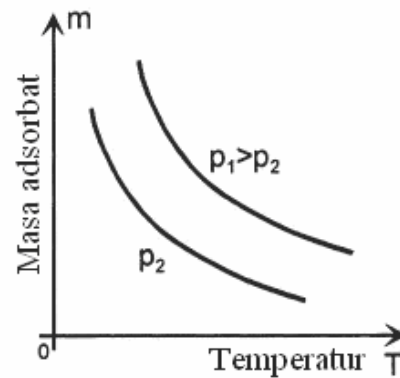


Gambar 2.7 Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isotermal
(Keller, Jurgen., 2005)

2. Adsorpsi Isobar

Pada adsorpsi isobar, tekanan adsorpsi dijaga konstan dan temperatur adsorpsi divariasikan dengan demikian x/m adalah (Bansal, R.C. dkk., 2005):

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

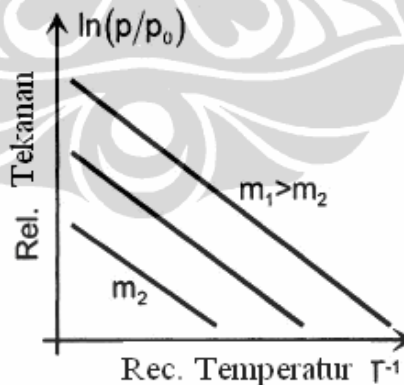


Gambar 2.8 Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isobar
(Keller, Jurgén., 2005)

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 (Bansal, R.C. dkk., 2005).

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



Gambar 2.9 Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi *Isostere*
(Keller, Jurgén., 2005)

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

adsorpsi untuk asumsi pada pemodelan biasanya juga menggunakan data adsorpsi isothermal (Bansal, R.C. dkk., 2005).

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

2.2.2 Persamaan Adsorpsi Isothermal

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).

Teori pertama yang memperkenalkan hubungan adsorpsi pada permukaan rata dengan tinjauan kinetik, dimana tumbukan atau serangan molekul terjadi terus menerus pada permukaan serta hubungannya dengan proses penguapan (pelepasan/desorpsi) molekul tersebut dari permukaan adalah teori Langmuir (1918) (Do, Duong D., 2008).

Pada adsorpsi isothermal terdapat tiga pendekatan teoritis (Bansal, R.C. dkk., 2005);

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 ke lingkungan pada temperatur konstan.

2.2.2.1 Persamaan Isotermal Langmuir

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

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

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

$$R_s = \frac{P}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot M \cdot R_g \cdot T}} \quad (2.5)$$

dengan,

R_s = Laju pergerakan molekul yang menuju permukaan

M = Massa molekul adsorbat

R_g = Konstanta gas adsorbat

T = Temperatur equilibrium ($^{\circ}\text{C}$)



Gambar 2.10 Skema Mekanisme Penyerapan Langmuir pada Plat Rata

(Do, Duong D., 2008)

Fraksi molekul gas yang menabrak permukaan akan terkondensasi dan menempel karena adanya gaya tarik pada permukaan sampai dengan molekul yang terserap tersebut lepas atau menguap. Langmuir menyatakan bahwa pada eksperimen yang baik didapati fakta bahwa fraksi gas tersebut merupakan suatu kesatuan, tetapi pada kondisi permukaan sesungguhnya dimana biasanya jauh dari kondisi ideal fraksi gas tersebut lebih kecil dari suatu kesatuan tersebut. Dengan menggunakan koefisien perekatan α , sehingga jumlah penyerapan atau adsorpsi dalam mol per unit permukaan yang kosong per unit waktu adalah (Do, Duong D., 2008):

$$R_a = \frac{\alpha \cdot P}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot M \cdot R_g \cdot T}} \quad (2.6)$$

dengan:

R_a = Laju penyerapan pada permukaan yang kosong

Pada permukaan yang ditempati oleh molekul gas atau adsorbat, ketika molekul tersebut menabrak kemudian menempel pada permukaan padatan proses penguapan molekul tersebut terjadi sangat cepat seperti sebuah molekul yang direfleksikan pada sebuah cermin. Sehingga dengan demikian jumlah molekul gas atau adsorbat yang terserap pada permukaan adalah sama dengan persamaan 2.6 dikalikan dengan bagian yang kosongnya (Do, Duong D., 2008):

$$R_a = \frac{\alpha \cdot P}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot M \cdot R_g \cdot T}} (1 - \theta) \quad (2.7)$$

Dimana θ adalah bagian permukaan yang tertutupi oleh adsorbat.

Jumlah adsorbat yang terlepas atau terdesorpsi dari permukaan adalah sama dengan jumlah adsorbat yang terserap, dimana dengan mencocokkannya pada permukaan yang tertutup secara total (k_d), sehingga:

$$R_d = k_d \cdot \theta = k_{d\infty} \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{R_g \cdot T}\right) \cdot \theta \quad (2.8)$$

dengan:

R_d = Laju adsorbat yang terlepas dari permukaan

E_d = Energi aktivasi untuk desorpsi yang besarnya sama dengan panas adsorpsi untuk molekul yang diserap secara fisika dimana tidak ada energi yang menghalangi adsorpsi fisika tersebut.

$k_{d\infty}$ = Konstanta untuk proses desorpsi pada temperatur tak terbatas

Kebalikan dari parameter tersebut ditulis,

$$\tau_{d\infty} = \frac{1}{k_{d\infty}} \quad (2.9)$$

Rata-rata waktu tunggu adsorpsi didefinisikan sebagai,

$$\tau_a = \tau_{d\infty} e^{E_d / RT} \quad (2.10)$$

Penyamaan jumlah adsorbat yang terserap dan terlepas pada persamaan 2.7 dan 2.8 didapatkan persamaan isotermal Langmuir,

$$\theta = \frac{bP}{1+bP} \quad (2.11)$$

dengan:

b = Konstanta daya tarik menarik antara adsorbat dengan adsorben/konstanta Langmuir. Parameter ini adalah parameter yang menyatakan kekuatan sebuah molekul gas atau adsorbat menempel pada permukaan.

P = Tekanan adsorpsi

$$b = \frac{\alpha \exp\left(\frac{Q}{R_g T}\right)}{K_{d\infty} \sqrt{2\pi m R_g T}} = b_{\infty} \exp\left(\frac{Q}{R_g T}\right) \quad (2.12)$$

dengan:

Q = Panas adsorpsi dan sama dengan energi aktivasi untuk desorpsi E_d dengan (Do, Duong D., 2008);

$$b_{\infty} = \frac{\alpha}{K_{d\infty} \sqrt{2\pi M R_g T}} \quad (2.13)$$

Pada persamaan 2.7 tidak dapat digunakan sepenuhnya untuk mengkorelasi data adsorpsi isotermal yang digambarkan dalam grafik jumlah adsorbat yang terserap dengan tekanan, hal tersebut karena pada persamaan tersebut tidak untuk menghitung jumlah adsorbat yang terserap.

C_{μ} adalah jumlah penyerapan dalam satuan mol per satuan massa atau

Universitas Indonesia

volume dan $C_{\mu s}$ adalah jumlah penyerapan maksimum dimana permukaan tertutup oleh lapisan monolayer adsorbat secara total, sehingga persamaan Langmuir menjadi (Do, Duong D., 2008),

$$C_{\mu} = C_{\mu s} \frac{b.P}{1 + b.P} \quad (2.14)$$

Pada persamaan isotermal Langmuir diasumsikan permukaan adsorben adalah homogen, dimana energi adsorpsi konstan pada seluruh permukaan adsorben. Adsorpsi dilokalisasi dan tiap lokasi hanya dapat mengakomodasi satu molekul atau atom.

2.2.2.2 Persamaan Isotermal Toth

Persamaan isotermal Toth adalah persamaan isotermal yang dapat digunakan pada tekanan rendah maupun tinggi serta asumsi bahwa permukaan adsorben adalah homogen tidak berlaku. Pada persamaan isotermal Toth terdapat parameter t yang merupakan parameter karakteristik heterogenitas permukaan adsorben (Do, Duong D., 2008).

Persamaan isotermal Toth adalah sebagai berikut:

$$C_{\mu} = C_{\mu s} \frac{b.P}{[1 + (b.P)^t]^{1/t}} \quad (2.15)$$

2.2.2.3 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 (Do, Duong D., 2008):

$$W = W_o \exp \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^n \right] \quad (2.16)$$

$$\ln W = \ln W_o \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^n \right] \quad (2.17)$$

dimana A adalah potensi adsorpsi dan 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:

$$A = RT \ln\left(\frac{P_s}{P}\right) \quad (2.18)$$

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

$$P_s = P_c \cdot \left(\frac{T}{T_c}\right)^2 \quad (2.19)$$

Dimana P_c dan T_c adalah tekanan dan temperatur kritis.

2.2.3 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. dkk., 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 dilepaskan 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 adsorben (Bansal, R.C. dkk., 2005),

$$-\Delta H = M \frac{\Delta Q}{\Delta x} \quad (2.20)$$

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

2.2.4 Metode Pengujian Adsorpsi

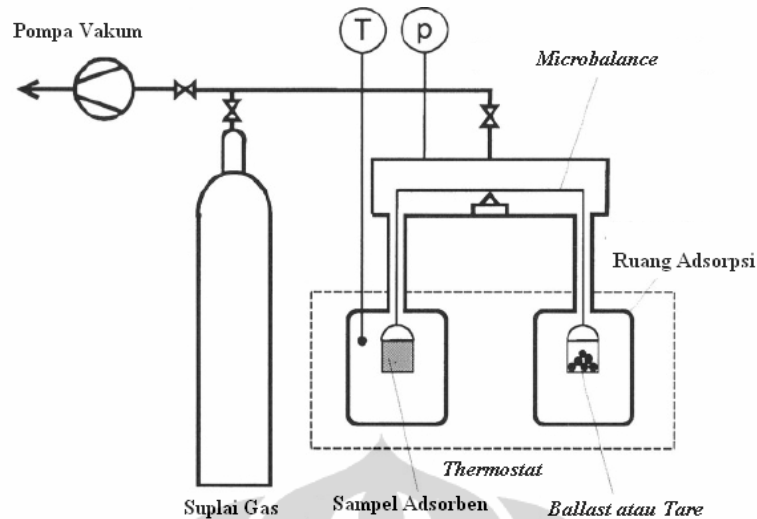
Terdapat empat metode pengukuran penyerapan adsorpsi, yaitu: metode *carrier gas*, metode volumetrik, metode gravimetrik dan metode kalorimetrik. Empat metode pengukuran penyerapan adsorpsi tersebut telah digunakan di berbagai negara dan telah diakui secara internasional (Keller, J.U et al, 2002). Dalam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

2.2.4.1 Metode Gravimetrik

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

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

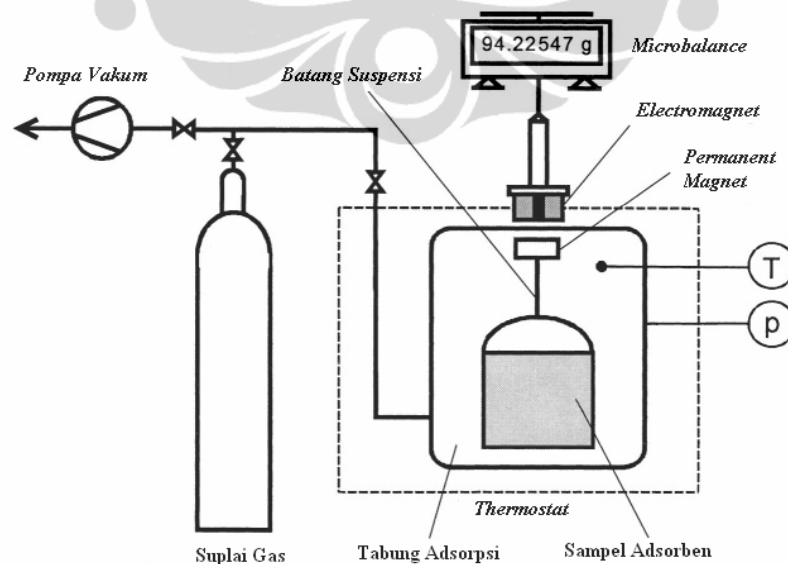
Universitas Indonesia



Gambar 2.11 Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Two Beam Balance*

(Keller, Jurgen., 2005)

Pada Gambar 2.11 terlihat skema metode gravimetrik dengan menggunakan *Two Beam Balance*, dimana sampel adsorben diletakkan di dalam tabung, dan selanjutnya ketika massa adsorben bertambah karena akibat terserapnya adsorbat, maka *microbalance* langsung membaca perubahan berat sampel adsorben tersebut.



Gambar 2.12 Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Magnetic Suspension Balance*

(Keller, Jurgen., 2005)

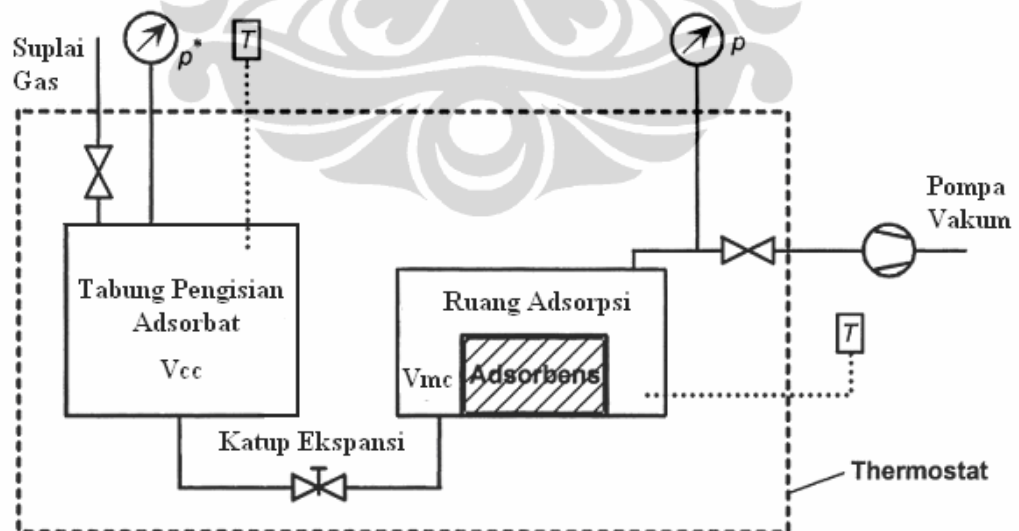
Universitas Indonesia

Pada Gambar 2.12 terlihat skema metode gravimetrik dengan menggunakan *Magnetic Suspension Balance*, dimana sampel adsorben diletakkan di dalam tabung dan selanjutnya ketika massa adsorben bertambah karena akibat terserapnya adsorbat, maka medan magnet juga akan berubah disebabkan karena adanya perubahan jarak antara *permanent magnet* dengan *electromagnet*.

2.2.4.2 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 2.13 Skema Metode Volumetrik

(Keller, Jurgen., 2005)

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

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

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

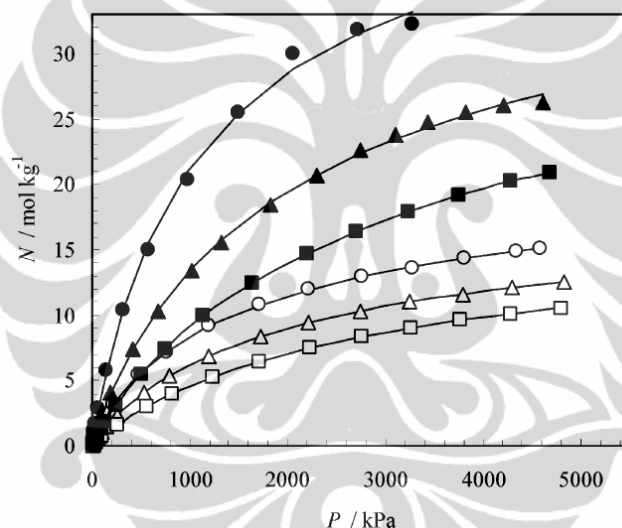
Kelebihan metode volumetrik adalah dapat mengukur beberapa jenis sampel, dan memiliki *sensitivity* yang tinggi. Biaya pembuatan alat ukur menggunakan metode volumetrik murah dan mudah dibuat karena komponennya ada di pasar dan relatif murah (Keller, J.U et al, 2002).

2.3 APLIKASI ADSORPSI KARBON AKTIF

Karbon aktif adalah salah satu adsorben yang paling baik, yang dapat digunakan dalam berbagai macam aplikasi, baik dalam aplikasi fase cair maupun dalam fase gas (Bansal, R.C. dkk., 2005). Contoh aplikasi adsorpsi karbon aktif adalah pemisahan atau pemurnian dan penyimpanan gas alam (adsorbed natural gas).

2.3.1 Purifikasi Gas Alam

Sistem adsorpsi adalah salah satu cara atau metode yang paling efektif untuk memisahkan karbon dioksida (CO_2) dengan zat lainnya (Lee, Jong-Seok dkk., 2002), dengan demikian sistem adsorpsi juga dapat digunakan sebagai metode yang paling efektif untuk memisahkan karbon dioksida dari gas alam. Hal tersebut dimungkinkan karena diameter molekul CO_2 (0,33 nm) lebih kecil dibanding dengan diameter molekul CH_4 (0,4 nm) sehingga dengan demikian molekul CO_2 akan lebih cepat terserap oleh adsorben (Marsh, Harry, et al., 2006).



Gambar 2.14 Adsorpsi Karbon Dioksida dan Metana pada Karbon Aktif Maxorb; ●Karbon Dioksida pada 273 K; ▲ Karbon Dioksida pada 298 K; ■ Karbon Dioksida pada 323 K; ○ Metana pada 273 K; △ Metana pada 298 K; □ Metana pada 323 K; Garis tebal adalah Data dengan Menggunakan Persamaan Model Toth

(Himeno, Shuji et al., 2005)

Pada Gambar 2.14 terlihat perbandingan data penyerapan karbon dioksida dan metana pada karbon aktif Maxorb. Pada Gambar 2.14 terlihat bahwa kapasitas penyerapan karbon dioksida jauh lebih besar dibanding dengan kapasitas penyerapan metana pada tekanan dan temperatur yang sama, hal

tersebut disebabkan oleh karena diameter molekul CO_2 yang lebih kecil dibanding diameter molekul CH_4 .

2.3.2 Penyerapan Gas Alam (Adsorbed Natural Gas)

Aplikasi lain dari sistem adsorpsi adalah pada sistem penyimpanan gas alam (adsorbed natural gas). *Adsorbed natural gas* adalah metode penyimpanan bahan bakar gas yang lebih murah dan aman dibandingkan dengan menggunakan *compressed natural gas*, hal tersebut dikarenakan sistem penyerapan (adsorption system) membutuhkan tekanan penyimpanan yang lebih rendah pada temperatur ruang (Himeno, Shuji et al., 2005 dan Pupier, O., et al., 2005).

Tekanan yang dibutuhkan pada sistem *Adsorbed Natural Gas* (ANG) hanya sekitar 3.5 - 4 MPa (Manocha, Satish. M, 2003, Pupier, O., et al., 2005, Lee, Jae-Wook ., et., al., 2007 dan Prauchner, Marcos. J. Et al., 2008), sehingga dengan demikian ANG lebih efisien jika dibandingkan dengan *Compressed Natural Gas* (CNG) yang membutuhkan tekanan sampai dengan 25 MPa.

Pada Gambar 1.3 menjelaskan perbandingan penyimpanan gas alam dengan metode gas alam terkompresi (CNG) dengan metode adsorpsi (ANG) bahwa dengan menggunakan metode *adsorbed natural gas* mampu menyimpan 3 kali lebih besar dibanding dengan CNG pada tekanan yang sama.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini terdiri atas dua bagian penelitian yaitu produksi karbon aktif berbahan dasar batubara sub bituminous Indonesia dan adsorpsi isotermal CO₂ dan CH₄ pada karbon aktif hasil penelitian sebelumnya.

3.1 PRODUKSI KARBON AKTIF

Prosedur pembuatan karbon aktif pada dasarnya terdiri atas: preparasi bahan dasar, karbonisasi dan aktivasi fisika atau aktivasi kimia (Yang, Ralph. T, 2003).

Pada penelitian ini karbon aktif diproduksi dengan bahan dasar batubara sub bituminus Indonesia dengan menggunakan aktivasi fisika dimana gas karbon dioksida digunakan sebagai *activating agent*, sebelum proses aktivasi dilakukan, terlebih dahulu dilakukan proses karbonisasi dengan mengalirkan gas nitrogen (N₂) atau oksigen (O₂).

3.1.1 Bahan

Bahan dasar batubara yang digunakan pada penelitian ini adalah batubara sub bituminus Indonesia seperti terlihat pada Tabel 1.3. Bahan dasar batubara sub bituminus Indonesia berasal dari Riau dan Kalimantan Timur, hal tersebut dikarenakan batubara Indonesia terbesar berada di pulau Sumatera dan Kalimantan. Potensi terbesar batubara di pulau Kalimantan berada di propinsi Kalimantan Timur, dan di pulau Sumatera berada di propinsi Riau yang memiliki potensi terbesar kedua setelah Sumatera Selatan (Tim Kajian Batubara Nasional, 2006).

3.1.2 Alat

Pada umumnya proses produksi karbon aktif dilakukan dengan metode *fix bed* dan *rotary bed*. Penelitian dilakukan menggunakan metode *fix bed*, peralatan yang digunakan pada proses produksi karbon aktif adalah sebagai berikut:

- *Autoclave*; wadah peletakan bahan dasar atau batubara sebelum dimasukkan ke dalam *furnace* pada proses karbonisasi dan aktivasi.
- Dapur (*furnace*); dibutuhkan untuk memberikan perlakuan panas pada batubara pada proses karbonisasi dan aktivasi.
- Timbangan digital; menimbang berat sampel sebelum dan sesudah proses dengan akurasi 0.01 g
- *Flow rate gas* merk *dwyer*; mengukur dan menjaga kestabilan laju aliran gas N₂ atau O₂ pada saat proses karbonisasi dan gas CO₂ sebagai *activating agent* pada saat proses aktivasi.
- *Bubble soap* dan *stopwatch*; Memvalidasi besarnya laju aliran gas N₂, O₂ dan CO₂.
- Saringan No. 10 dan 20 (mesh 10 x 20); Menyaring karbon aktif agar ukurannya seragam yaitu 0,85 – 2,3 mm.
- Gas nitrogen dan gas oksigen; dibutuhkan pada proses karbonisasi.
- Gas karbon dioksida *high purity* 99,9 – 99,99 %; dibutuhkan pada proses aktivasi.
- *Tube stainless steel*; laluan aliran gas masuk dan keluar *autoclave* pada proses karbonisasi dan aktivasi.
- Lumpang dan alu; Menggerus sampel sehingga diperoleh ukuran sampel yang lebih kecil.
- Peralatan bantu lainnya seperti regulator gas, kunci-kunci, botol plastik, kain lap, dan lain-lain.

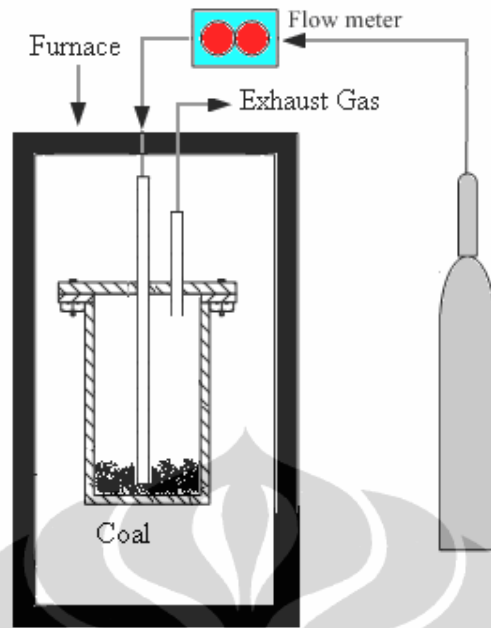
3.1.3 Posisi *Autoclave*

Autoclave yang digunakan untuk memproduksi karbon aktif diletakkan di dalam dapur (*furnace*) pada posisi vertikal dan horisontal.

1. *Vertical Autoclave*

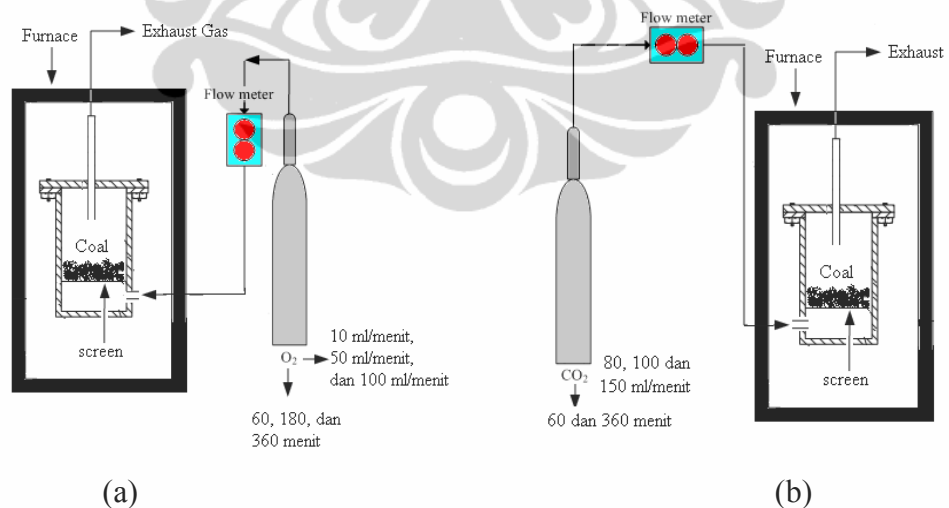
Pada produksi karbon aktif menggunakan *autoclave* vertikal terdapat 2 (dua) cara memasukan gas inert dan *activating agent* yaitu:

- a. Gas dimasukan melalui atas *autoclave* dan keluar juga melalui bagian atas *autoclave* seperti terlihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 *Vertical Autoclave* Gas Masuk dan Keluar dari Bagian Atas *Autoclave*

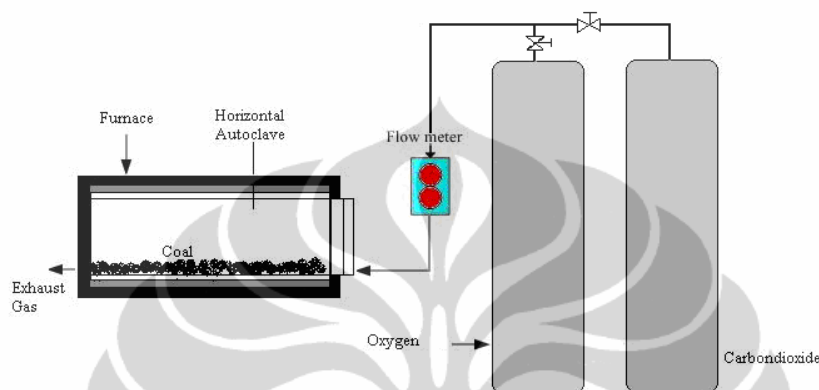
- b. Gas dimasukkan ke dalam *autoclave* dari bagian bawah dan keluar melalui bagian atas *autoclave* seperti terlihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 *Vertical Autoclave*; Skema Proses Karbonisasi (a) dan Skema Proses Aktivasi (b)

2. *Horizontal Autoclave*

Skema proses produksi karbon aktif dengan *horizontal autoclave* seperti terlihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 *Horizontal autoclave*; Skema Proses Karbonisasi dan Proses Aktivasi

3.1.4 Prosedur Produksi Karbon Aktif

Adapun prosedur produksi karbon aktif adalah sebagai berikut:

1. Batubara yang masih dalam ukuran besar dihancurkan sehingga berdiameter $\pm 1 - 2$ mm.
2. Kemudian batubara dikarbonisasi dengan mengalirkan gas nitrogen atau oksigen pada beberapa variasi temperatur sampai dengan temperatur 900°C selama 60, 180 dan 360 menit dengan laju aliran N_2 atau O_2 yang bervariasi.
3. Batubara yang telah dikarbonisasi selanjutnya diaktivasi pada temperatur 950°C , selama 60, 180 dan 360 menit dengan gas CO_2 sebagai *activating agent* dengan laju aliran yang bervariasi. Setelah proses aktivasi, batubara ditimbang untuk mengetahui kekurangan berat yang diakibatkan pada proses tersebut.
4. Selanjutnya karbon aktif digerus lalu diayak agar memiliki ukuran yang sama (mesh 10 x 20).

5. Batubara yang telah diaktivasi selanjutnya dianalisis dan diuji untuk mendapatkan *Iodine number* (angka Iodine) dan atau luas permukaan.

3.2 ADSORPSI ISOTERMAL

Adsorpsi isotermal gas CO₂ dan CH₄ pada karbon aktif dilakukan untuk memperoleh data kapasitas penyerapan gas tersebut pada temperatur dan tekanan yang telah ditentukan. Tiga macam karbon aktif yang berbeda disiapkan untuk penelitian adsorpsi isotermal. Ketiga macam karbon aktif tersebut adalah karbon aktif komersial, karbon aktif berbahan dasar batubara Kalimantan Timur, dan karbon aktif berbahan dasar batubara Riau. Karakteristik ketiga karbon aktif yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Karakteristik Karbon Aktif

Karbon Aktif	Luas Permukaan (m ² /g)	Volume Pori (m ³ /kg)
Komersial	885	0,514 x 10 ⁻⁴
KT	668	0,470 x 10 ⁻⁴
RU	60	0,040 x 10 ⁻⁴

Penelitian adsorpsi isotermal dilakukan dengan menggunakan metode volumetrik, skema keseimbangan massa adsorpsi isotermal terlihat pada Gambar 3.4. Dasar pengukuran metode volumetrik adalah tekanan, volume dan temperatur, dimana data diukur saat adsorbat masuk ke tempat diletakkannya adsorben (adsorption bulb). Setelah keseimbangan adsorpsi terjadi, jumlah adsorbat yang terserap dihitung dari perubahan tekanan yang terjadi dengan menggunakan persamaan gas ideal.

Kesetimbangan massa uap adsorbat dalam *charging cell* dan *measuring cell* dapat diasumsikan sebagai berikut (Belal, Dawoud, et al., 2003):

$$m_{d,mc} = |m_{cc}| - m_{ads} \quad (3.1)$$

dengan: $dm_{d,mc}$ = massa adsorbat di *measuring cell* (kg)

$|m_{cc}|$ = massa adsorbat di *charging cell* (kg)

m_{ads} = massa adsorbat yang diserap oleh adsorben (kg)

Selama proses dari mulai *charging cell* sampai pada *measuring cell* adsorbat tidak bersifat ideal sehingga dibutuhkan parameter Z , dimana Z adalah faktor kompresibilitas, sehingga:

$$|m_{cc}| = \Delta m_{cc} = m_{cc}(t) - m_{vcc}(t + \Delta t) = \frac{(p_{cc}(t) - p_{cc}(t + \Delta t)) \cdot V_{cc}}{Z \cdot R_{cc} \cdot T_{cc}} \quad (3.2)$$

$$dm_{d,mc} = m_{d,mc}(t + \Delta t) - m_{d,mc}(t) = \frac{(p_{mc}(t + \Delta t) - p_{mc}(t)) \cdot V_{mc}}{Z \cdot R_{mc} \cdot T_{mc}} \quad (3.3)$$

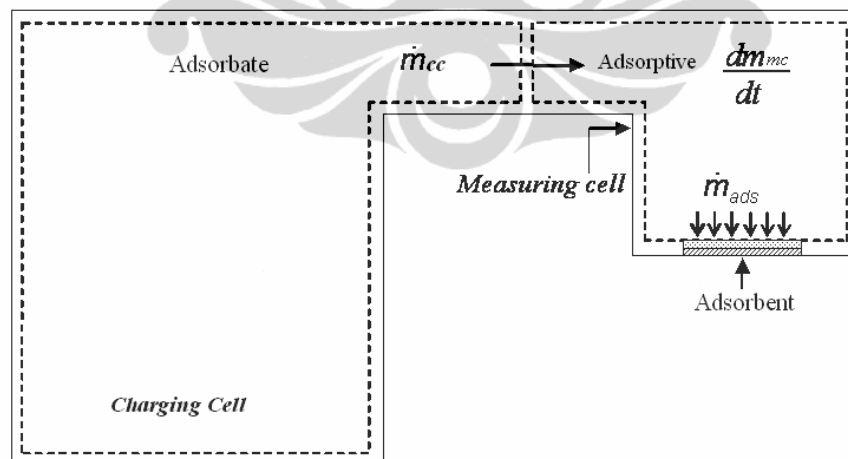
Dengan mensubstitusikan persamaan (2) dan (3) ke dalam pers (1), maka didapat:

$$m_{ads} = \Delta m_{ads}(t) = \frac{(p_{cc}(t) - p_{cc}(t + \Delta t)) \cdot V_{cc}}{Z \cdot R_{cc} \cdot T_{cc}} - \frac{(p_{mc}(t + \Delta t) - p_{mc}(t)) \cdot V_{mc}}{Z \cdot R_{mc} \cdot T_{mc}} \quad (3.4)$$

Atau

$$m_{ads} = \rho_{cc}(p, T) \cdot V_{cc} - \rho_{mc}(p, T) \cdot V_{mc} \quad (3.5)$$

Dimana ρ_{cc} dan ρ_{mc} adalah massa jenis adsorbat pada tekanan dan temperatur di *charging cell* dan *measuring cell*. Besaran ρ_{cc} dan ρ_{mc} didapat dengan menggunakan *software* REFPROP Versi 8.

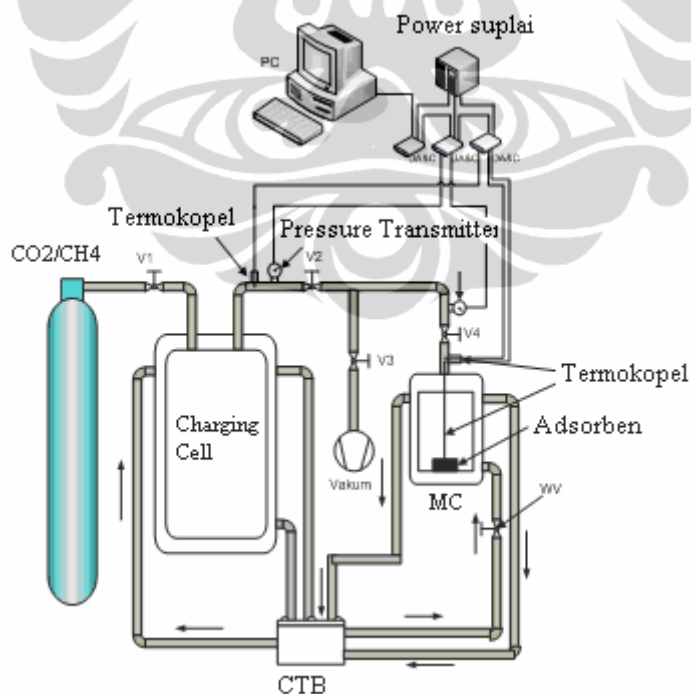


Gambar 3.4 Skema Keseimbangan Massa pada Proses Penyerapan

3.2.1 Alat Uji Adsorpsi Isotermal

Alat uji adsorpsi isotermal dibuat seperti pada Gambar 3.5, dimana alat uji adsorpsi isotermal pada prinsipnya terdiri atas dua buah silinder yaitu silinder pengisian (charging cell) dan silinder pengukuran (measuring cell) yang terbuat dari *stainless steel* 304 (SS 304). Kedua tabung tersebut dihubungkan dengan *tube stainless steel*, dimana keduanya terendam dalam fluida yang temperaturnya dikendalikan oleh *Circulating Thermal Bath* (merk HÜBER) dengan akurasi 0,2°C.

Tekanan pada kedua silinder diukur dengan menggunakan *pressure transmitter* dengan kisaran pengukuran 0-40 bar absolut (DRUCK PTX 1400) dengan akurasi 0,15%. *Thermocouple* kelas A tipe K digunakan untuk mengukur temperatur adsorbat (CO₂ dan CH₄) dan adsorben (karbon aktif). Data tekanan dan temperatur direkam melalui data akuisisi (merk National Instrument).



Gambar 3.5 Skema Alat Uji Adsorpsi Isotermal

3.2.2 Pengukuran Volume *Charging Cell* dan Volume Kosong *Measuring Cell*

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

3.2.2.1 Pengukuran Volume *Charging Cell*

Pengukuran volume *charging cell* dilakukan dengan cara menimbang massa kosong dan massa *charging cell* yang diisi dengan air, maka akan diperoleh massa air yang mengisi *charging cell*.

$$m_{air} = m_{PV+air} - m_{PV} \quad (3.6)$$

Setelah massa air yang mengisi *charging cell* diketahui maka akan didapat volume dari *charging cell*, dengan menggunakan persamaan:

$$V_{PV} = \frac{m_{air}}{\rho_{air(T,P)}} \quad (3.7)$$

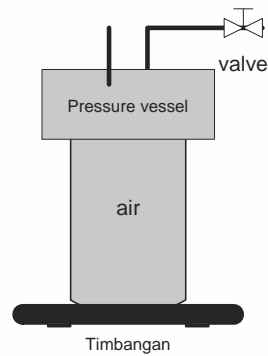
dengan : m_{air} : massa air (kg)

m_{PV+air} : massa *charging cell* yang berisi air (kg)

m_{PV} : massa *charging cell* kosong (kg)

V_{PV} : volume *charging cell* (m³)

$\rho_{air(T,P)}$: massa jenis air pada tekanan dan temperatur saat pengukuran



Gambar 3.6 Skema Proses Pengukuran Volume *Charging Cell*

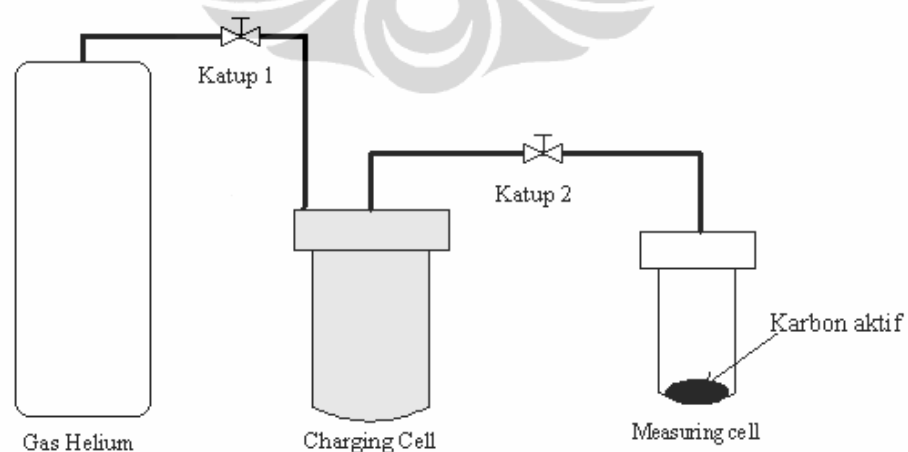
3.2.2.2 Pengukuran Volume Kosong *Measuring Cell*

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

$$V_{\text{kosong}} = V_{MC} - V_{\text{ruang yang terisi adsorben}} + V_{\text{pori-pori adsorben}} \quad (3.8)$$

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

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



Gambar 3.7 Skema Proses Pengukuran Volume Kosong *Measuring Cell*

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

- a. Temperatur di dalam *charging cell* dan *measuring cell* dikondisikan pada temperatur 30°C dengan menggunakan *circulating thermal bath*.
- b. Gas helium dimasukkan ke dalam *charging cell* dengan cara membuka katup 1. Katup ditutup kembali saat tekanan pada *charging cell* telah mencapai tekanan yang diinginkan.

Tekanan awal *charging cell* (P_{cci}) dicatat, dengan data tersebut akan diperoleh jumlah mol He yang terdapat pada *charging cell* berdasarkan persamaan:

$$n = \frac{P_{cci} \cdot V_{cc}}{Z_{He} \cdot R \cdot T} \quad (3.9)$$

Dimana n adalah jumlah mol helium pada *charging cell* dan pada prosedur ini $V_{charging\ cell} = V_{He}$

- c. Dengan membuka katup 2 maka gas He masuk ke dalam *measuring cell*, kemudian tekanan akhir pada *charging cell* (P_{ccf}) dicatat. Dengan data ini, maka akan diketahui jumlah mol (n_i) He yang masuk ke dalam *measuring cell*, dengan persamaan:

$$n_i = \left(\frac{P_{cci}}{Z_{He, P_{cci}} \cdot R \cdot T} - \frac{P_{ccf}}{Z_{He, P_{ccf}} \cdot R \cdot T} \right) \cdot V_{cc} \quad (3.10)$$

- d. Setelah tercapai kondisi equilibrium, dimana tekanan pada *charging cell* dan *measuring cell* konstan, kira-kira selama 15 menit, tekanan akhir *measuring cell* (P_{mcf}) dicatat. Sehingga dengan menggunakan persamaan 3.11 diketahui volume kosong *measuring cell*:

$$V_{void} = \frac{n_i \cdot Z_{He, P_{mcf}} \cdot R \cdot T}{P_{mcf}} \quad (3.11)$$

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

3.2.2.3 Persiapan Penelitian

Sebelum dilakukan pengujian adsorpsi isotermal, berat kering adsorben atau karbon aktif harus diketahui terlebih dahulu. Berikut adalah prosedur untuk mendapatkan berat kering karbon aktif.

1. Karbon aktif dimasukkan ke dalam *measuring cell* ± 5 g, kemudian ditimbang kembali bersama dengan *measuring cell* nya.
2. Karbon aktif yang telah dimasukkan ke dalam *measuring cell* kemudian dipanaskan dengan cara dililiti heater sampai pada temperatur 170°C .
3. Setelah ± 60 menit lilitan *heater* pada *measuring cell* dilepas, kemudian *measuring cell* kembali ditimbang.
4. Selisih antara berat *measuring cell* sebelum dipanaskan dengan berat *measuring cell* setelah dipanaskan adalah massa air atau zat lainnya yang terserap pada karbon aktif selama masa penyimpanan dan menguap pada proses nomor 2 di atas.
5. Massa kering karbon aktif adalah massa karbon aktif awal (± 5 g) dikurangi dengan selisih massa *measuring cell* seperti pada proses nomor 4 di atas.

3.2.3 Prosedur Penelitian

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

1. Karbon aktif dimasukkan ke dalam *measuring cell* dan antara *measuring cell* dan *charging cell* dihubungkan dengan sistem *tubing*.
2. Proses awal pengujian adalah proses *degassing*. Proses *degassing* dimaksudkan untuk mengeluarkan seluruh unsur atau zat pengotor (impurity) yang kemungkinan terserap oleh karbon aktif selama penyimpanan. Proses *degassing* berlangsung sampai dengan 8 jam dan selama proses sistem divakum dengan pompa vakum satu tingkat sampai dengan tekanan mendekati 0,01 mbar. Selama proses tersebut

measuring cell dipanaskan dengan cara dililiti pemanas (heater) untuk menjaga temperatur karbon aktif pada kisaran 130 – 140°C.

3. Gas helium (He) dimasukkan ke dalam sistem beberapa kali pada tekanan sampai dengan 7 bar untuk meningkatkan proses pengeluaran zat pengotor pada karbon aktif.
4. Setelah proses *degassing* selesai, *charging cell* dan *measuring cell* direndam dengan air yang disirkulasikan oleh *circulating thermal bath* untuk menjaga agar temperatur pada sistem terjaga konstan pada temperatur tertentu yang diinginkan.
5. Setelah temperatur pada sistem konstan (isotermal), gas CO₂ dimasukan ke dalam *charging cell*, dimana sebelumnya katup yang menghubungkan antara *charging cell* dan *measuring cell* ditutup.
6. Setelah temperatur pada *charging cell* kembali ke temperatur isotermal, katup penghubung tersebut dibuka dan proses ini adalah proses awal adsorpsi isotermal.
7. Gas CO₂ kembali dimasukkan pada tekanan berikutnya ke dalam *charging cell* setelah temperatur pada *charging cell* kembali pada temperatur semula. Proses tersebut berlangsung sampai dengan tekanan pengisian 3,5 MPa. Proses tersebut di atas dilakukan kembali untuk temperatur isotermal yang berbeda dan gas yang berbeda (CH₄).

3.2.4 Error Analisis pada Adsorpsi Isotermal

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

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

Volume *charging cell* (V_{cc}) diukur dengan mengisi air dan menimbang selisih berat *charging cell* (V_{cc}) sebelum dan setelah diisi air, dengan akurasi timbangan yang digunakan 1 g.

Pengukuran volume *charging cell* (V_{cc}) yang telah dilakukan adalah $1150,98 \pm 0,66$ ml atau dengan nilai ketidakpastian 0,058%.

Volume kosong pada *measuring cell* (V_{vv}) dihitung dengan menggunakan gas helium yang dimasukkan ke dalam *measuring cell*. Volume kosong pada *measuring cell* (V_{vv}), nilainya berbeda untuk tiap jenis karbon aktif yang digunakan. Untuk karbon aktif komersial $V_{vv} = 82,45 \pm 0,23$ ml atau dengan nilai ketidakpastian 0,28%. Untuk karbon aktif dari batubara Kalimantan Timur $V_{vv} = 83,262 \pm 0,904$ ml atau dengan nilai ketidakpastian 1,09%. Untuk karbon aktif dari batubara Riau $V_{vv} = 81,3485 \pm 0,364$ ml atau dengan nilai ketidakpastian 0,45%.

3.2.4.2 Error pada Pengukuran Temperatur

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

3.2.4.3 Error pada Pengukuran Tekanan

Pengukuran tekanan dilakukan dengan menggunakan *pressure transmitter* dengan rentang pengukuran 0 – 40 bar absolut dengan akurasi 0,15%, sehingga *error* maksimum pada pengukuran tekanan adalah 60×10^{-3} bar.

3.2.4.4 Error pada Pengukuran Massa Sampel

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

3.2.5 Korelasi Adsorpsi Isotermal

Model Langmuir dan Toth serta Dubinin-Astakhov digunakan untuk meregresi data keseimbangan adsorpsi, sehingga data hasil regresi tersebut dapat digunakan untuk memprediksi data keseimbangan adsorpsi pada

tekanan dan temperatur lain. Pada penelitian ini digunakan tiga model yang telah banyak digunakan pada penelitian sebelumnya, yaitu persamaan model Langmuir, Toth, dan Dubinin-Astakhov.

1. Persamaan Model Langmuir

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

2. Model persamaan Toth

Model persamaan Toth biasanya digunakan pada permukaan adsorben yang heterogen seperti pada karbon aktif dan juga persamaan tersebut dapat digunakan pada tekanan rendah dan tekanan tinggi.

3. Persamaan Model Dubinin-Astakhov (D-A)

Persamaan model Dubinin-Astakhov banyak digunakan sebagai persamaan terbaik dalam mempresentasikan data adsorpsi. Persamaan D-A adalah seperti yang telah dibahas pada Landasan Teori.

3.2.6 Panas Adsorpsi

Panas adsorpsi diperoleh dengan menggunakan persamaan model yang memiliki simpangan yang paling kecil. Data panas adsorpsi dibutuhkan untuk mengetahui atau memprediksi berapa besar panas adsorpsi yang harus diberikan pada proses adsorpsi. Sehingga dengan data tersebut dapat diprediksi berapa besar energi yang dibutuhkan untuk menyerap sejumlah gas CO₂ atau CH₄ pada tekanan dan temperatur tertentu.

3.2.7 Adsorpsi Isosterik

Data adsorpsi isosterik diperoleh dengan menggunakan persamaan model yang juga memiliki simpangan yang paling kecil, data adsorpsi isosterik digunakan untuk memprediksi tekanan dan temperatur yang dibutuhkan untuk menyerap adsorbat pada jumlah tertentu.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas hasil dan analisis hasil penelitian. Penelitian yang dilakukan terdiri atas dua bagian penelitian, yang pertama adalah penelitian produksi karbon aktif berbahan dasar batubara Indonesia kualitas rendah, dan yang kedua adalah penelitian adsorpsi isothermal karbon dioksida (CO₂) dan metana (CH₄) sebagai adsorbat pada beberapa karbon aktif yang dihasilkan dari penelitian bagian pertama dan dibandingkan dengan karbon aktif komersial.

4.1 PRODUKSI KARBON AKTIF

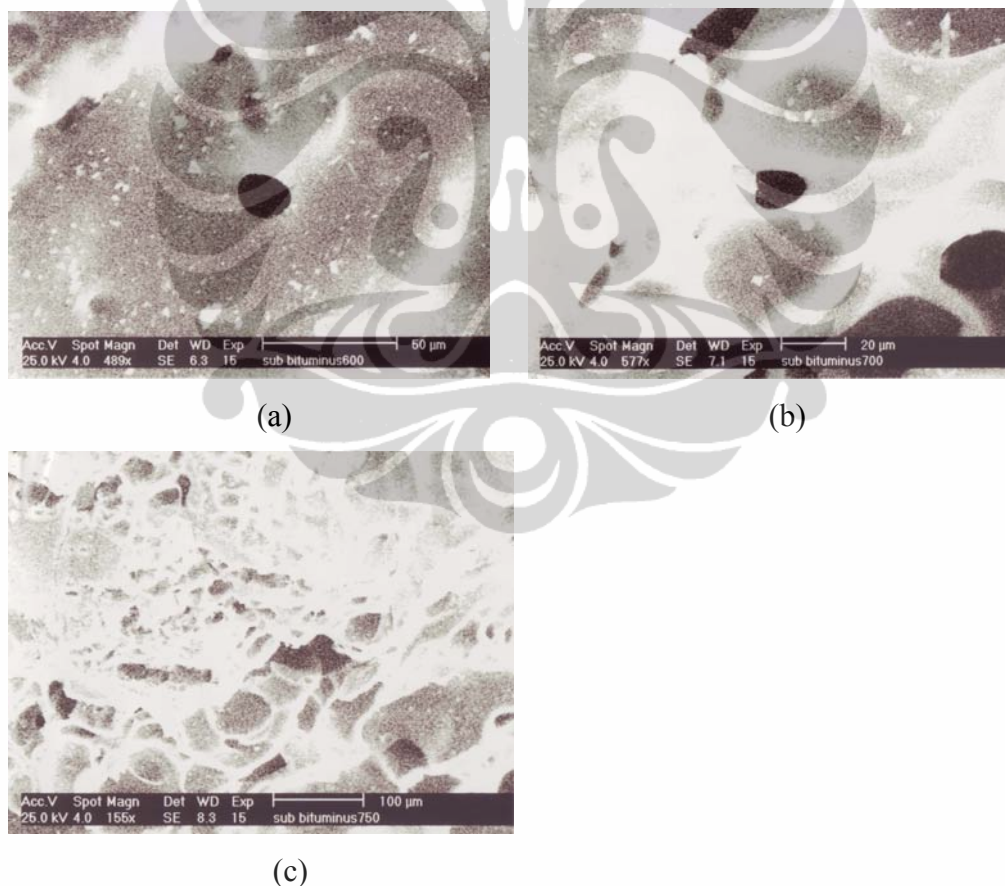
Pada prinsipnya pembuatan karbon aktif terdiri atas tiga proses utama, yaitu pemilihan bahan dasar, proses karbonisasi, dan proses aktivasi. Terdapat dua metode aktivasi dalam proses produksi karbon aktif, yaitu aktivasi kimia dan fisika (Manocha, Satish. M, 2003 dan Yang, Ralph. T, 2003).

Pada penelitian ini karbon aktif diproduksi dengan menggunakan metode aktivasi fisika dengan mengalirkan gas karbon dioksida (CO₂) sebagai *activating agent* dengan variasi laju aliran dan waktu proses, dimana sebelumnya dilakukan proses karbonisasi dengan mengalirkan gas nitrogen juga dengan variasi aliran dan waktu proses.

Pada awal produksi karbon aktif dilakukan melalui proses karbonisasi dengan mengalirkan gas nitrogen 40 ml/menit pada temperatur 600°C selama satu jam, dan dilanjutkan dengan proses aktivasi yaitu dengan mengalirkan gas karbon dioksida sebesar 40 ml/menit juga selama satu jam pada temperatur 600°C, 700°C, dan 750°C. Hasil penelitian awal didapat bahwa aktivasi fisika pada temperatur 600°C, 700°C, dan 750°C masih belum mampu memproduksi batubara menjadi karbon aktif, hal tersebut dikarenakan unsur karbon yang terkandung pada batubara hasil aktivasi maksimum adalah 48,53% (Martin, Awaludin, et al., 2009).

Menurut Do, Duong Do., 2008 unsur terbesar yang terkandung pada karbon aktif adalah unsur karbon yaitu sebesar 85-95% dan unsur lainnya adalah hidrogen, nitrogen, sulfur dan oksigen (Bansal R.C. et al., 2005).

Pada Gambar 4.1 terlihat makropori pada batubara yang masih ditutupi oleh beberapa unsur selain karbon. Pada Gambar 4.1 juga terlihat bahwa makropori yang terbentuk pada temperatur aktivasi 750°C lebih banyak dibandingkan pada temperatur 600°C dan 700°C. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pada produksi karbon aktif semakin besar temperatur aktivasi potensi pembentukan makropori yang akan diikuti oleh pembentukan mesopori dan mikropori akan semakin besar. Hal tersebut dikarenakan pada temperatur yang lebih tinggi dimungkinkan terjadi proses pembakaran sebagian (*partial combustion*) yang lebih baik dibanding pada temperatur yang lebih rendah.



Gambar 4.1 Foto Hasil *Scanning Electron Micrograph* (SEM) Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau

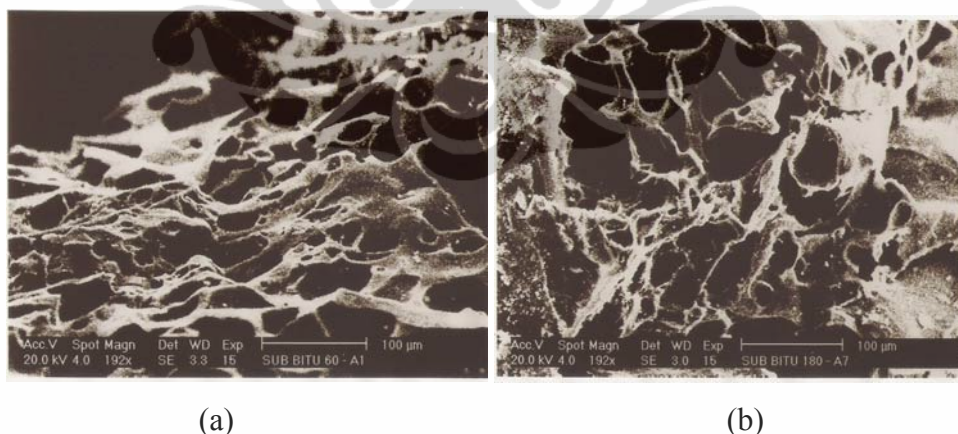
(Martin, Awaludin, et al., 2009)

4.1.1 Pengaruh Proses Karbonisasi dengan Nitrogen Terhadap Kualitas Karbon Aktif

Pada proses karbonisasi yang dilakukan dengan mengalirkan gas nitrogen pada temperatur 600°C dan proses aktivasi yang dilakukan dengan mengalirkan gas karbon dioksida pada temperatur 600°C, 700°C, dan 750°C masih belum menghasilkan karbon aktif.

Untuk itu pada proses produksi karbon aktif berikutnya temperatur proses karbonisasi dan aktivasi dinaikkan sampai dengan temperatur 900°C dan 950°C serta dengan meningkatkan laju aliran gas nitrogen dan karbon dioksida sebesar 80 ml/menit. Proses aktivasi divariasikan terhadap waktu proses yaitu selama 60, 90, 120, 150 dan 180 menit.

Pada proses produksi dengan menggunakan metode tersebut, batubara yang diproduksi sudah berubah menjadi karbon aktif, hal tersebut dapat diketahui dalam jumlah unsur karbon yang terbentuk yaitu sebesar 88,19% (Alhamid, M.I.dkk, 2008). Pada Gambar 4.2 terlihat bahwa makropori yang terbentuk tidak lagi ditutupi oleh unsur-unsur lain seperti pada Gambar 4.1.

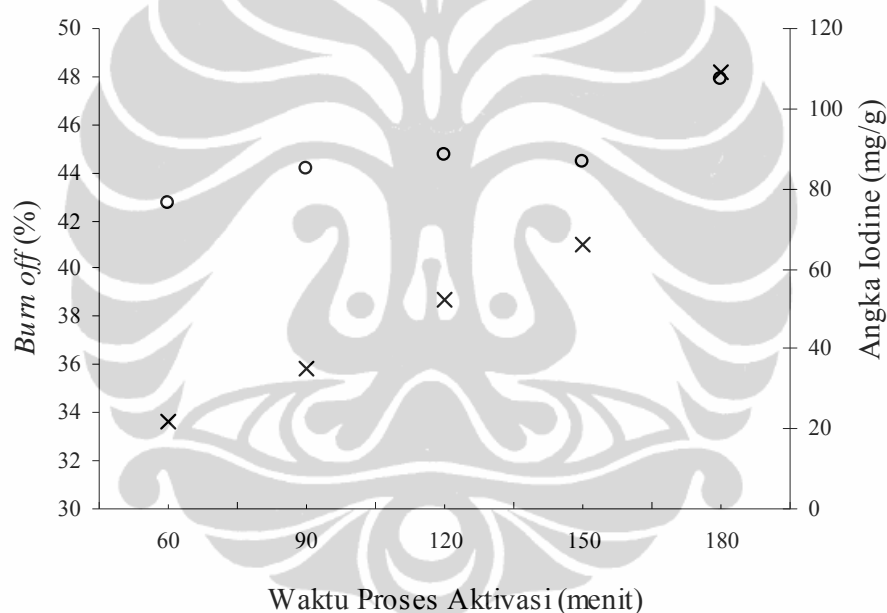


Gambar 4.2 Foto Hasil *Scanning Electron Micrograph* (SEM) Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau; Proses Aktivasi Selama 1 jam (a); Proses Aktivasi Selama 3 jam (b)

(Alhamid, M.I.dkk, 2008)

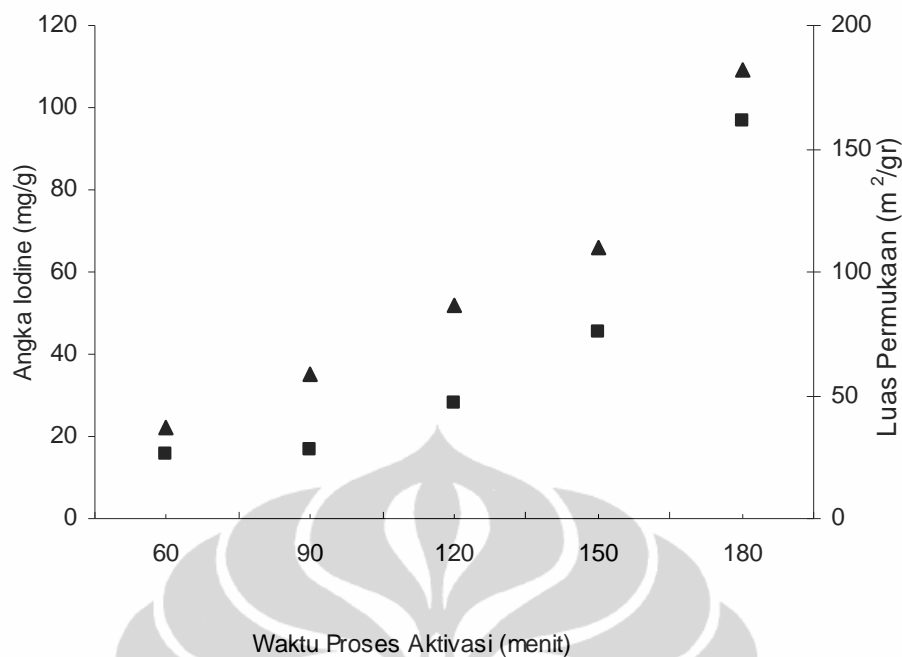
Selain unsur karbon yang terbentuk, parameter lain yang menunjukkan bahwa batubara sudah berubah menjadi karbon aktif adalah angka *Iodine* (*Iodine number*) dan luas permukaannya.

Pada Gambar 4.3 terlihat hubungan antara waktu proses aktivasi dengan persentasi *burn off* dan angka *Iodine*, dari Gambar 4.3 dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu proses aktivasi maka persentasi *burn off* semakin besar dan angka *Iodine* nya juga semakin besar. Pada proses produksi karbon aktif ini didapat angka *Iodine* terbesar adalah 109 ml/g pada proses aktivasi selama 180 menit.



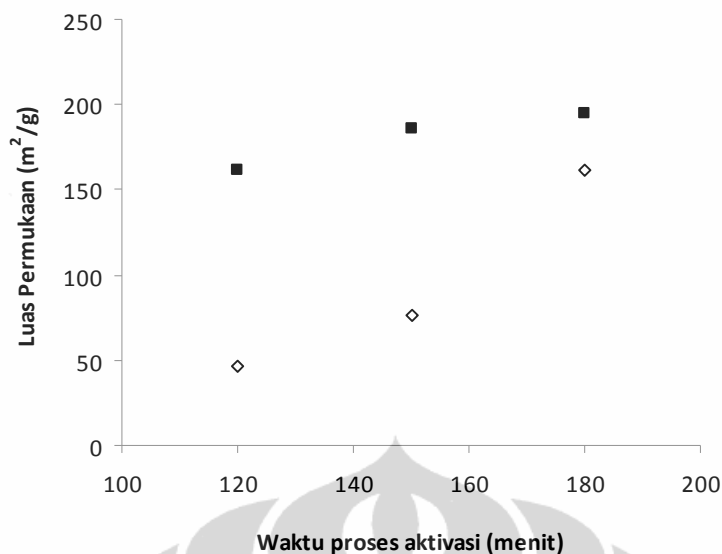
Gambar 4.3 Grafik Hubungan antara Waktu Proses Aktivasi dengan Persentasi *Burn Off* (%) dan Angka *Iodine* Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau; o *Burn off* ; x Angka *Iodine*

Gambar 4.4 memperlihatkan hubungan antara waktu proses aktivasi dengan angka *Iodine* dan luas permukaan, bahwa semakin lama waktu proses aktivasi, maka angka *Iodine* dan luas permukaan juga semakin besar. Pada proses produksi yang dilakukan dengan metode tersebut di atas didapat luas permukaan maksimum dengan menggunakan metode B.E.T. adalah 161 m²/g untuk karbon aktif berbahan dasar batubara Riau.



Gambar 4.4 Grafik Hubungan antara Waktu Proses Aktivasi dengan Angka *Iodine* dan Luas Permukaan Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau; ▲ Angka *Iodine*; ■ Luas Permukaan

Proses produksi karbon aktif selain dipengaruhi oleh temperatur dan lama proses juga dipengaruhi oleh perbandingan unsur oksigen dengan karbon pada bahan dasar (Teng, Hsisheng dkk.,1996) serta memiliki unsur inorganik (seperti abu) yang rendah (Manocha, Satish. M, 2003). Pada Gambar 4.5 terlihat grafik hubungan antara waktu proses aktivasi dengan luas permukaan pada bahan dasar batubara yang berbeda, menunjukkan bahwa semakin lama waktu proses aktivasi dilakukan maka luas permukaan karbon aktif yang terbentuk juga akan semakin besar, dan dari grafik juga terlihat bahwa semakin rendah kandungan abu pada bahan dasar maka luas permukaan karbon aktif yang terbentuk juga semakin besar, serta semakin besar perbandingan unsur oksigen dengan karbon pada bahan dasar maka luas permukaan karbon aktif yang terbentuk juga semakin besar, hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Teng, Hsisheng dkk.,1996.



Gambar 4.5 Grafik Hubungan antara Waktu Proses Aktivasi dengan Luas Permukaan Karbon Aktif dengan Perbandingan Unsur Oksigen dengan Karbon Batubara yang Berbeda; ■ 0,367; ◇ 0,213

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa proses produksi karbon aktif dipengaruhi oleh besarnya temperatur proses, lamanya waktu proses aktivasi, besarnya laju aliran gas CO₂ sebagai *activating agent*, dan perbandingan unsur oksigen dengan karbon pada bahan dasar, serta kandungan abu pada bahan dasar. Penelitian yang dilakukan menghasilkan luas permukaan maksimum untuk karbon aktif berbahan dasar batubara Riau adalah 161 m²/g (Martin, Awaludin et. al., 2008) dan berbahan dasar batubara Kalimantan Timur adalah 195 m²/g Suryawan, Bambang, et. al., 2008)

Perbandingan unsur oksigen dengan karbon pada bahan dasar yang relatif kecil adalah salah satu penyebab karbon aktif yang dihasilkan tidak memiliki luas permukaan yang besar. Oleh karenanya diperlukan proses yang dapat memperkaya kandungan oksigen pada bahan dasar.

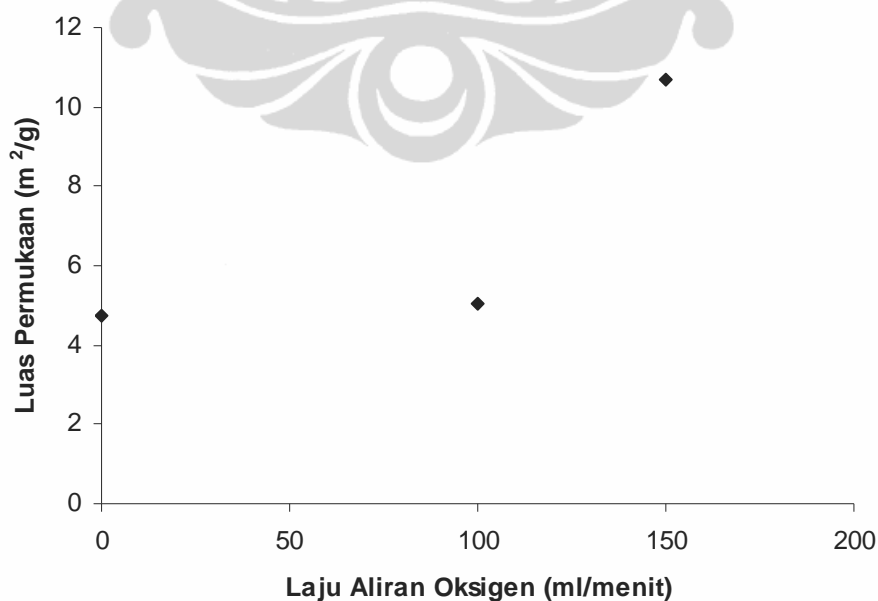
4.1.2 Pengaruh Proses Karbonisasi dengan Oksigen Terhadap Kualitas Karbon Aktif

Proses karbonisasi dilakukan pada temperatur 400-500°C, sehingga material yang mudah menguap (*volatile matter*) yang terkandung pada bahan dasar akan hilang (Yang, Ralph. T, 2003). Sedangkan menurut

Manocha, Satish. M, 2003 proses karbonisasi dilakukan pada temperatur di bawah 800°C. Menurut Nugroho, Yulianto S., 2000 batubara dari Prima Coal dan Tanjung Enim akan habis kandungan *volatile matter* nya (material yang mudah menguap) pada kisaran temperatur 800°C – 950°C. Pada penelitian ini gas yang digunakan pada proses karbonisasi biasanya adalah nitrogen, namun pada penelitian yang dilakukan sebelumnya disimpulkan bahwa kualitas karbon aktif yang diproduksi dipengaruhi oleh perbandingan unsur oksigen dan karbon.

Penelitian berikut yang dilakukan adalah dengan mengganti gas nitrogen dengan oksigen pada proses karbonisasi, hal tersebut disamping dapat memperkaya jumlah unsur oksigen pada bahan dasar, juga agar pada proses karbonisasi juga terjadi proses pembakaran yang sangat tidak sempurna.

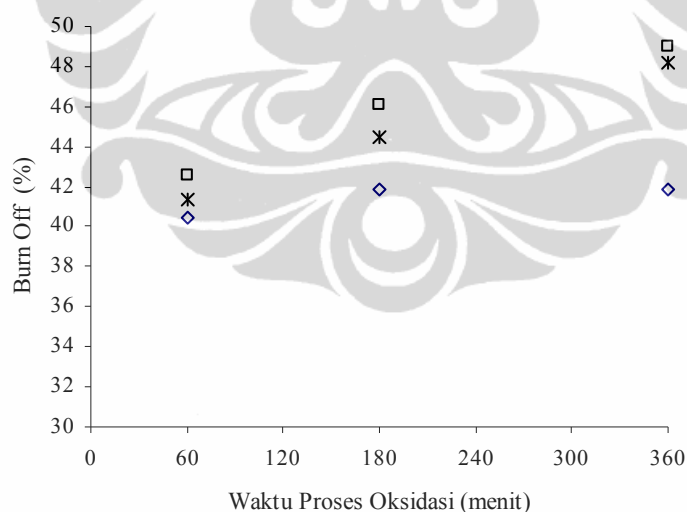
Menurut Teng, Hsisheng et al., 1996 luas permukaan karbon aktif juga tergantung kepada perbandingan unsur oksigen dan karbon pada bahan dasar, semakin besar perbandingan unsur oksigen dan karbon pada bahan dasar maka luas permukaan yang terbentuk juga akan semakin besar.



Gambar 4.6 Grafik Hubungan Laju Aliran Oksigen pada Proses Karbonisasi dengan Luas Permukaan yang Terbentuk

Pada Gambar 4.6 memperlihatkan pengaruh proses karbonisasi dengan menggunakan gas oksigen. Pada Gambar 4.6 terlihat bahwa pada awalnya luas permukaan batubara adalah sebesar $4,738 \text{ m}^2/\text{g}$, setelah dikarbonisasi dengan mengalirkan gas oksigen sebesar $100 \text{ ml}/\text{menit}$ dan $150 \text{ ml}/\text{menit}$ pada temperature 300°C luas permukaan batubara menjadi $5,03 \text{ m}^2/\text{g}$ dan $10,67 \text{ m}^2/\text{g}$.

Gambar 4.7 memperlihatkan hubungan antara *burn off* (%) dan waktu proses serta laju aliran gas oksigen pada proses oksidasi, dimana proses aktivasi dilakukan pada temperatur 950°C dengan mengalirkan gas CO_2 sebagai *activating agent* sebesar $80 \text{ ml}/\text{menit}$ selama satu jam, dimana batubara Riau yang dimasukkan ke dalam *autoclave* diletakkan dalam posisi vertikal di dalam *furnace*. Menurut Teng, Hsisheng dkk., 1996, bahwa semakin besar persentasi *burn-off* maka luas permukaan karbon aktif juga akan semakin besar.



Gambar 4.7 Grafik Hubungan antara *Burn off* dengan Variasi Waktu Proses Oksidasi dengan Variasi Laju Aliran Oksigen dengan Bahan Dasar Batubara Riau; ◇ $20 \text{ ml}/\text{menit}$; * $50 \text{ ml}/\text{menit}$; □ $100 \text{ ml}/\text{menit}$

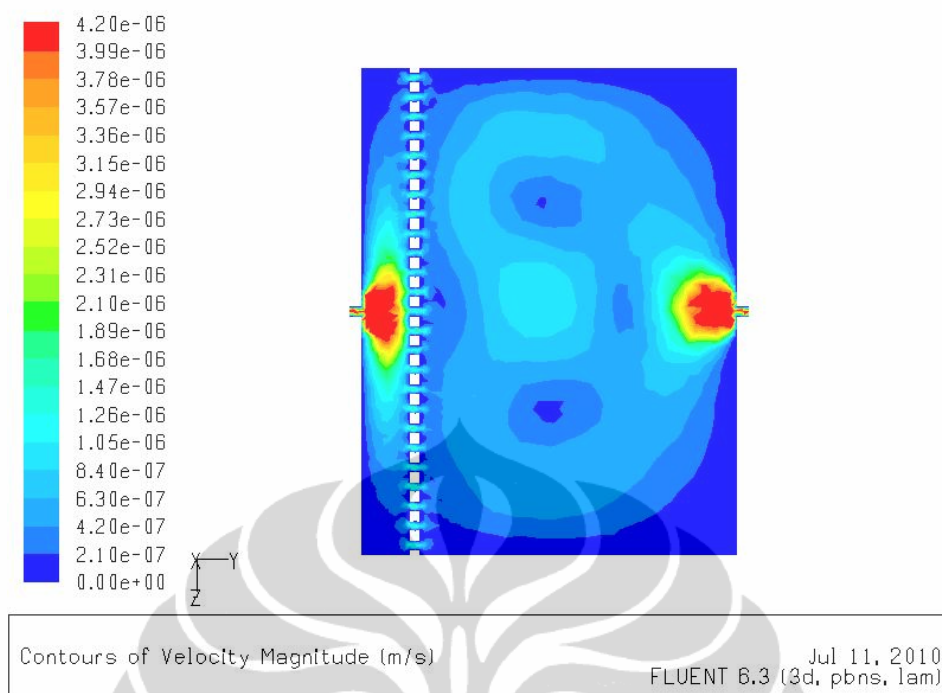
(Martin, Awaludin, dkk., 2009)

Pada Gambar 4.7 dapat dengan jelas dilihat bahwa semakin besar laju aliran oksigen pada proses karbonisasi maka persentasi *burn off* juga semakin besar, begitu juga dengan waktu proses karbonisasi, semakin lama proses karbonisasi dilakukan maka persentasi *burn off* juga semakin besar. Hal tersebut terjadi karena semakin besar laju aliran oksigen yang dialirkan dan semakin lama waktu proses karbonisasi, maka kandungan unsur oksigen pada bahan dasar juga akan semakin besar. Dengan demikian akan memperbesar perbandingan unsur oksigen dan karbon pada bahan dasar. Pada Gambar 4.7 juga terlihat bahwa *burn off* maksimum hanya mencapai 48,96%, dengan besaran *burn off* tersebut diprediksi kualitas karbon aktif yang dihasilkan masih belum cukup bagus. Seperti terlihat pada Gambar 4.3 sampai dengan Gambar 4.5 untuk karbon aktif berbahan dasar batubara Riau dengan *burn off* $\pm 48\%$, luas permukaan karbon aktif maksimumnya adalah $161 \text{ m}^2/\text{g}$.

4.1.3 Pengaruh Posisi *Autoclave* Terhadap Kualitas Karbon Aktif

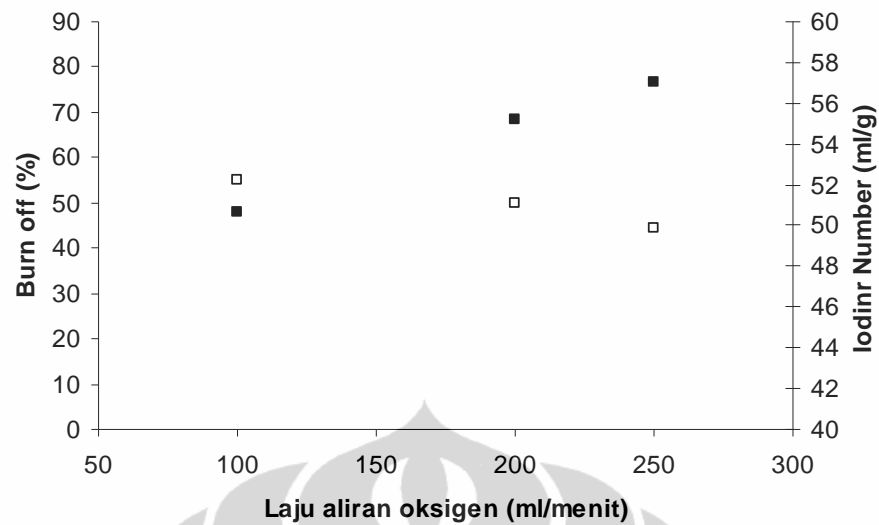
Pada penelitian ini *autoclave* diletakkan dalam dua posisi yaitu vertikal dan horisontal, dengan demikian distribusi aliran gas pada proses karbonisasi dan aktivasi menjadi berbeda.

Gambar 4.8 adalah gambar profil kecepatan aliran gas karbon dioksida pada proses aktivasi dengan laju aliran 200 ml/menit dengan posisi *autoclave* horisontal model 1 dimana aliran gas karbon dioksida pada proses aktivasi masuk melalui bagian tengah dan keluar juga melalui bagian tengah *autoclave*, sementara batubara diletakkan di bagian bawah *autoclave*. Profil kecepatan aliran gas memperlihatkan kecepatan gas terbesar pada sisi masuk dan keluar *autoclave*. Pada bagian dalam *autoclave* kecepatan aliran gas terakumulasi pada bagian tengah *autoclave*. Sehingga jika diletakkan batubara dengan posisi *autoclave* seperti model 1, maka aliran gas yang melewati atau masuk kedalam pori-pori batubara jumlahnya akan sangat sedikit. Dengan melihat profil kecepatan seperti terlihat pada Gambar 4.8, kualitas karbon aktif yang dihasilkan dengan posisi tersebut sangat rendah. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.8 Profil Temperatur Aliran Gas Karbon Dioksida pada Laju Aliran 200 ml/menit dengan Posisi *Autoclave* Horizontal Model 1

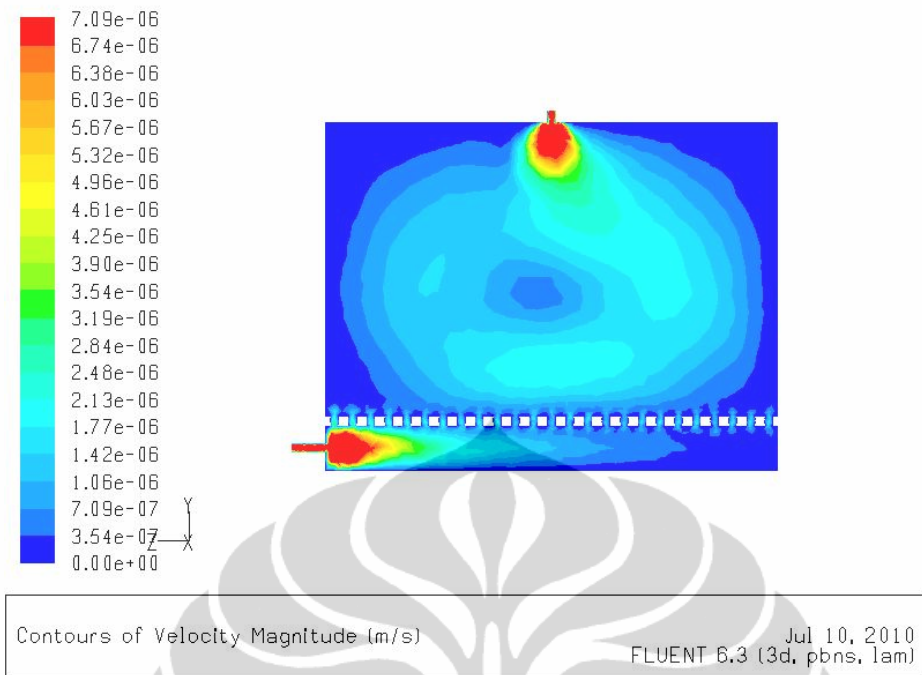
Pada Gambar 4.9 terlihat bahwa karbon aktif yang diproses dengan posisi *autoclave* seperti pada Gambar 4.8 (posisi *autoclave* horizontal model 1) menghasilkan angka *iodine* yang sangat rendah. Angka *iodine* yang rendah menunjukkan bahwa kualitas karbon aktif juga rendah.



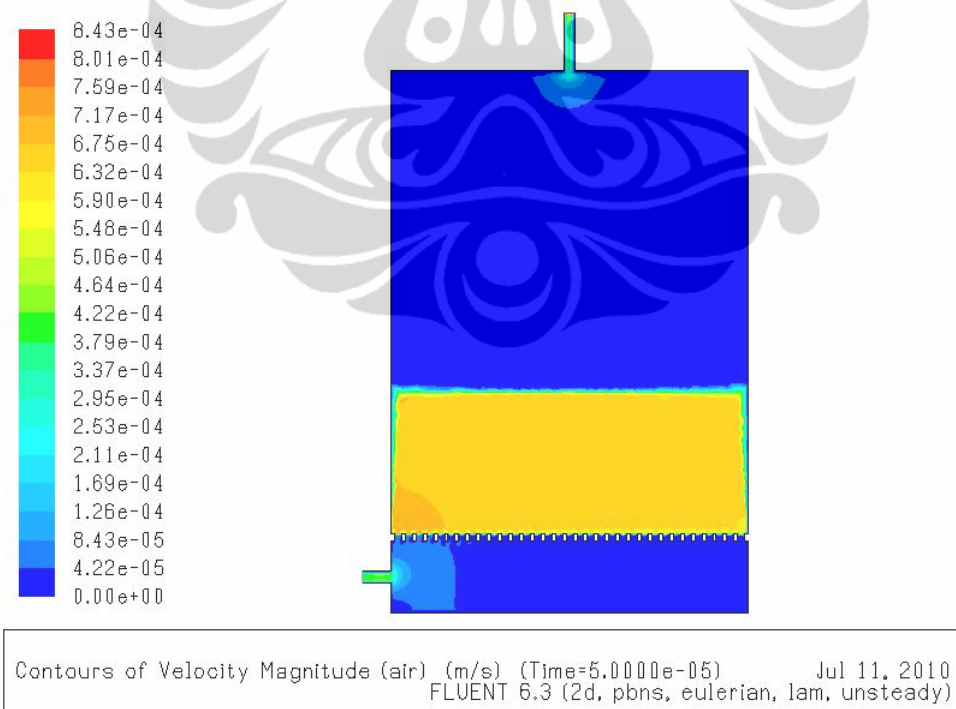
Gambar 4.9 Grafik Hubungan Antara *Burn-Off*, *Iodine Number* dan Laju Aliran Oksigen pada Proses Produksi Karbon Aktif dengan Posisi *Autoclave* seperti Gambar 4.8

Gambar 4.10 adalah gambar profil kecepatan aliran gas karbon dioksida pada proses aktivasi dengan laju aliran 200 ml/menit dengan posisi *autoclave* vertikal dengan arah aliran masuk gas dari bawah setelah melalui *screen* dan keluar pada bagian atas *autoclave*, sementara Gambar 4.11 menjelaskan bahwa batubara diletakkan di atas *screen*.

Pada Gambar 4.10 terlihat bahwa gas terdistribusi hampir merata di seluruh bagian dalam *autoclave*, dan pada Gambar 4.11 terlihat bahwa aliran gas tersebut terdistribusi secara merata masuk ke dalam pori-pori batubara dan keluar ditumpukan teratas batubara. Posisi *autoclave* vertikal memberikan sebaran gas yang lebih merata pada seluruh bagian batubara, sehingga dengan posisi *autoclave* tersebut didapat kualitas karbon aktif yang lebih baik dibanding dengan karbon aktif yang diproses dengan posisi *autoclave* horisontal model 1.



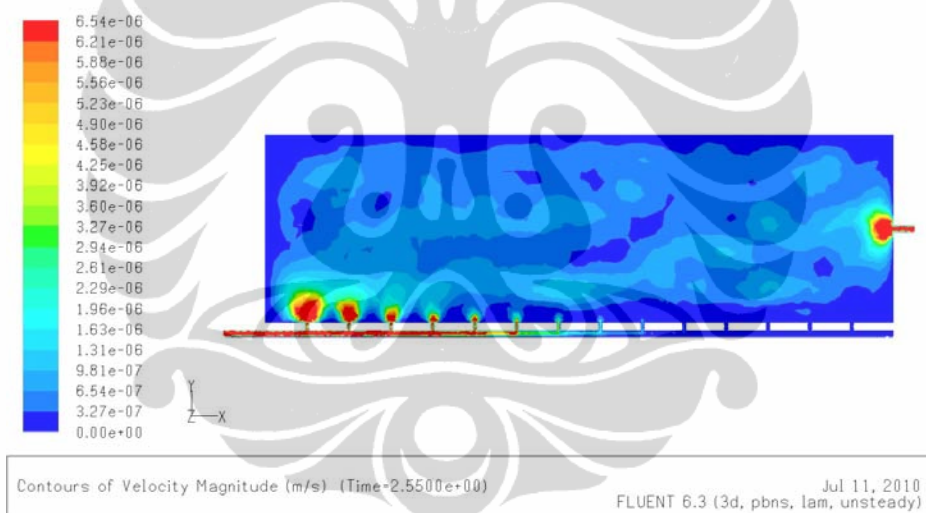
Gambar 4.10 Profil Kecepatan Aliran Gas Karbon Dioksida pada Laju Aliran 200 ml/menit dengan Posisi *Autoclave* Vertikal



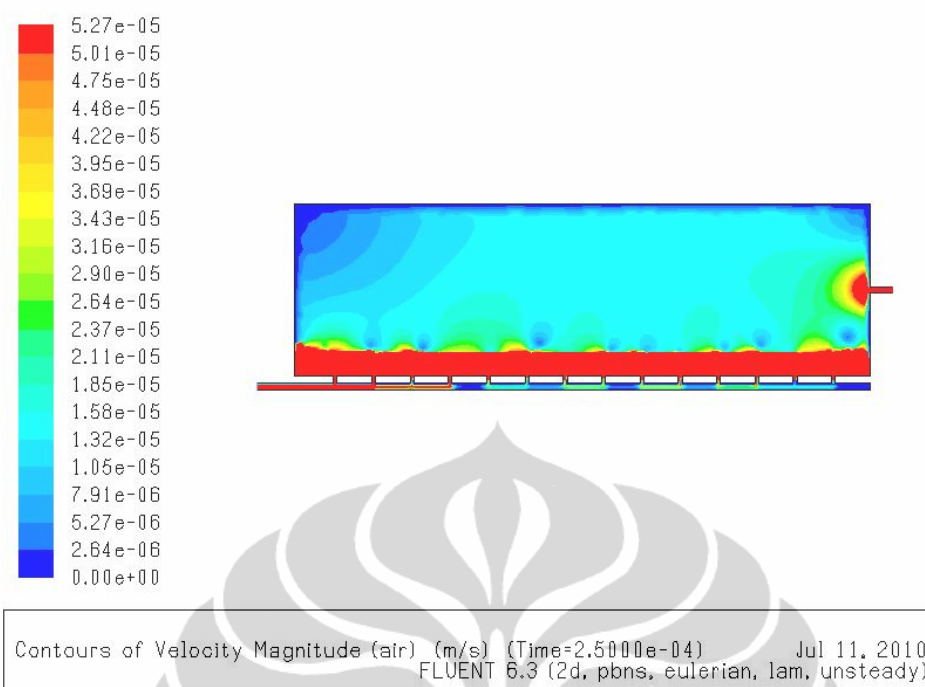
Gambar 4.11 Profil Kecepatan Aliran Gas Karbon Dioksida pada Laju Aliran 200 ml/menit melewati Batubara dengan Posisi *Autoclave* Vertikal

Gambar 4.12 adalah gambar profil kecepatan aliran gas karbon dioksida pada proses aktivasi dengan laju aliran 200 ml/menit dengan posisi *autoclave* horisontal dengan arah aliran masuk gas dari bawah melalui *tube* yang dilubangi dengan ukuran 2 x 2 mm dan keluar pada ujung *tube* tersebut.

Profil kecepatan aliran gas memperlihatkan bahwa gas karbon dioksida yang menyentuh batubara lebih merata, dibandingkan dengan model 1 seperti terlihat pada Gambar 4.8, namun hampir sama dengan model *autoclave* yang diletakkan secara vertikal. Oleh karena itu pada penelitian selanjutnya karbon aktif diproduksi dengan model *autoclave* secara vertikal dan horisontal model 2 seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.10 dan 4.11.



Gambar 4.12 Profil Kecepatan Aliran Gas Karbon Dioksida pada Laju Aliran 200 ml/menit dengan Posisi *Autoclave* Horisontal Model 2

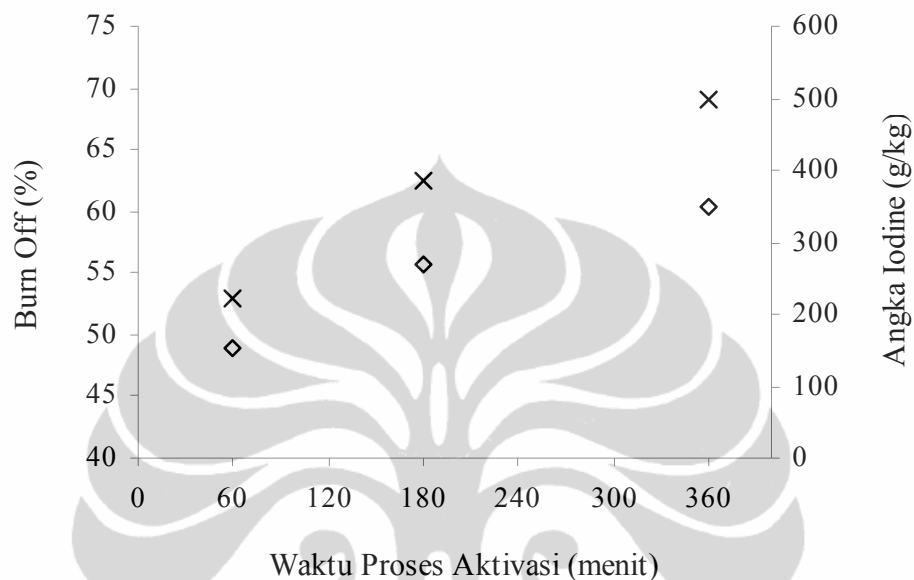


Gambar 4.13 Profil Kecepatan Aliran Gas Karbon Dioksida pada Laju Aliran 200 ml/menit melewati Batubara dengan Posisi *Autoclave* Horizontal Model 2

4.1.4 Pengaruh Proses Aktivasi Terhadap Kualitas Karbon Aktif

Terdapat dua metode aktivasi yaitu aktivasi fisika dan aktivasi kimia yang bertujuan untuk memperbesar pori terutama untuk mesopori dan mikropori, sehingga akan memperbesar luas permukaan karbon aktif dengan cara pembakaran yang tidak sempurna (*partial combustion*). Penelitian yang dilakukan menggunakan metode aktivasi fisika. Aktivasi fisika adalah proses untuk mengembangkan struktur pori dan memperbesar luas permukaan karbon aktif dengan *heat treatment* pada temperatur 800 – 1000°C dengan mengalirkan *steam* atau CO₂ (Manocha, Satish. M, 2003). Penelitian yang dilakukan menggunakan CO₂ sebagai *activating agent*. Selain dipengaruhi oleh proses karbonisasi, produksi karbon aktif juga dipengaruhi oleh proses aktivasi. Gambar 4.14 memperlihatkan hubungan antara waktu proses aktivasi dengan persentasi *burn off* dan angka *Iodine*. Persentasi *burn off* maksimum adalah 60,44 % dan angka *Iodine* nya adalah 497,9 g/kg, dimana batubara di aktivasi selama 360 menit pada temperatur 950°C dengan mengalirkan CO₂ sebanyak 80 ml/menit, dimana

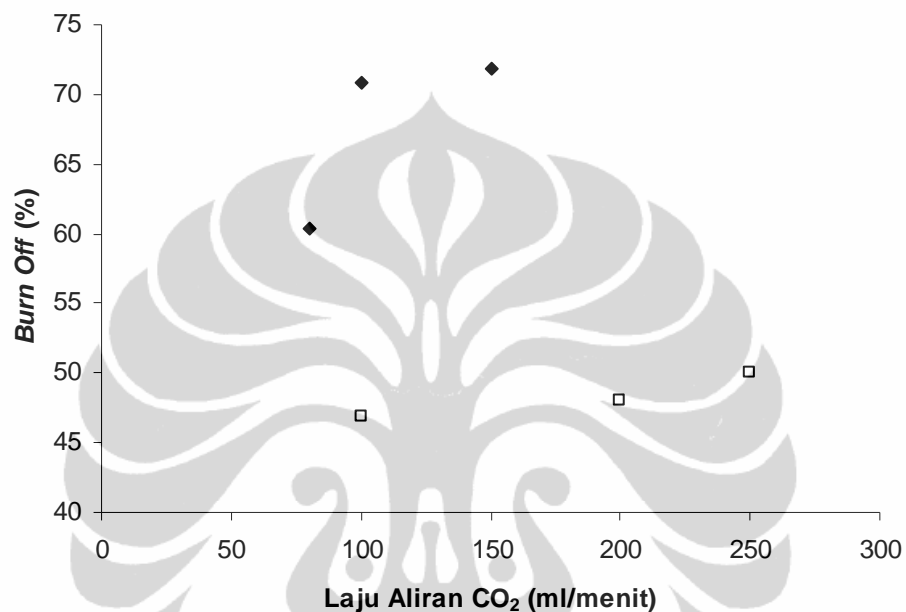
batubara sebagai bahan dasar dimasukkan ke dalam *autoclave* dan diletakkan di dalam *furnace* pada posisi vertikal. Namun sebelum proses aktivasi dilakukan, didahului dengan proses karbonisasi pada temperatur 300°C selama 360 menit dengan mengalirkan O₂ sebanyak 100 ml/menit.



Gambar 4.14 Grafik Hubungan antara Waktu Proses Aktivasi dengan Persentasi *Burn off* dan Angka *Iodine* Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau. ◇ *burn off*, x angka *Iodine*
(Martin, Awaludin, dkk., 2009)

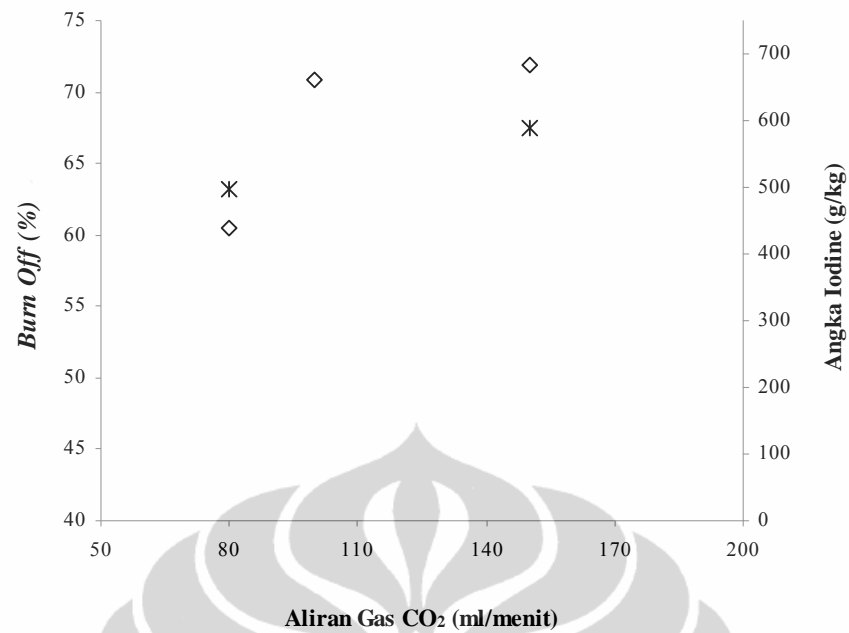
Gambar 4.15 menjelaskan pengaruh gas CO₂ yang dialirkan terhadap persentasi *burn off* dan angka *Iodine*. Pada Gambar 4.15 tersebut dapat dilihat bahwa secara umum semakin besar gas CO₂ yang dialirkan maka persentasi *burn off* dan angka *Iodine* juga akan semakin besar. Pada kasus tersebut proses produksi karbon aktif adalah bahwa batubara dikarbonisasi dengan mengalirkan O₂ sebanyak 100 ml/menit pada temperatur 300°C selama 360 menit, setelah itu batubara diaktivasi dengan mengalirkan gas CO₂ sampai dengan 250 ml/menit pada temperatur 950°C selama 360 menit dengan posisi *autoclave* di dalam *furnace* secara vertikal dan horisontal model 1. Dari proses produksi tersebut didapat persentasi *burn off* maksimum adalah 71,88% pada posisi vertikal dan 50% pada posisi horisontal model 1.

Posisi *autoclave* vertikal menghasilkan karbon aktif yang lebih baik dibanding dengan posisi horisontal, hal tersebut dikarenakan pada posisi vertikal gas CO₂ sebagai *activating agent* terdistribusi lebih merata di dalam *autoclave* sehingga proses aktivasi berjalan lebih sempurna.



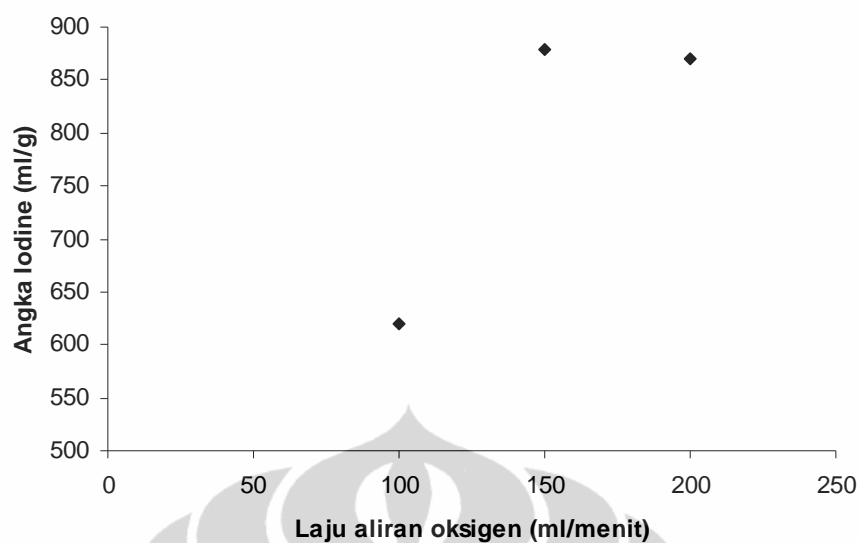
Gambar 4.15 Grafik Hubungan Antara Laju Aliran CO₂ dengan Persentasi *Burn off* Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau; ◆ Posisi *Autoclave* Vertikal; □ Posisi *Autoclave* Horisontal Model 1

Pada proses produksi tersebut di atas, dimana posisi *autoclave* adalah vertikal diperoleh persentasi *burn off* maksimum adalah 71,88% dan angka *Iodine* maksimum adalah 589,1 g/kg, seperti terlihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Grafik Hubungan Antara Laju Aliran CO₂ dengan Persentasi *Burn off* dan Angka *Iodine* Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Riau; \diamond *burn off*; \times angka *Iodine*
(Martin, Awaludin, dkk., 2009)

Gambar 4.17 adalah karbon aktif berbahan dasar batubara Kalimantan Timur yang diproduksi dengan memvariasikan laju aliran oksigen dengan CO₂ sebagai *activating agent* yang dialirkan sebesar 200 ml/menit. Posisi *autoclave* adalah horisontal model 2 dimana gas dimasukkan melalui tube yang berlubang seperti terlihat pada Gambar 4.12 dan 4.13. Angka iodine maksimum yang diperoleh dengan menggunakan model ini adalah sebesar 879,01 ml/g



Gambar 4.17 Grafik Hubungan Antara Laju Aliran O₂ dengan Angka Iodine dengan Posisi *Autoclave* Horisontal Model 2

4.1.5 Perhitungan Biaya Produksi Karbon Aktif

Perhitungan biaya produksi karbon aktif didasarkan atas beberapa asumsi sebagai berikut:

1. Kapasitas produksi karbon aktif yang dibutuhkan adalah 1 ton per hari.
2. Karbon aktif yang dihasilkan adalah 20% dari bahan dasar. Berdasarkan hasil penelitian untuk nilai *iodine number* di atas 600 ml/g, maka karbon aktif yang dihasilkan sekitar 20% dari bahan dasar yang digunakan.
3. Harga batubara sub bituminus Rp 700,-/kg.
4. Proses karbonisasi dengan mengalirkan udara sebagai pengganti oksigen.
5. Aktivasi fisika menggunakan gas CO₂ sebagai *activating agent*, harga CO₂ Rp 70.000,- per tabung.
6. Bahan bakar yang digunakan untuk proses karbonisasi dan aktivasi adalah batubara, dengan konsumsi 60 kg/jam.

Komponen yang digunakan dalam menghitung biaya produksi karbon aktif berbahan dasar batubara sub bituminus Indonesia adalah sebagai berikut:

1. Investasi Peralatan utama		
- <i>Kiln Drum</i> dan perlengkapannya 2 unit	Rp	1.500.000.000,-
- Peralatan tambahan (10 dari <i>kiln drum</i>)	Rp	150.000.000,-
- Sewa bangunan dan gudang per tahun	Rp	100.000.000,-
- Sub Total	Rp	1.750.000.000,-
2. Bahan Habis		
- Bahan dasar persediaan untuk 20 hari	Rp	70.000.000,-
- Gas CO ₂ , dengan asumsi 5 tabung/hari	Rp	7.000.000,-
- Bahan bakar <i>kiln drum</i>	Rp	241.920.000,-
- Sub Total	Rp	318.920.000,-
3. Biaya Langsung		
- Gaji operator 5 orang per tahun	Rp	54.000.000,-
- Gaji supervisor 1 orang per tahun	Rp	14.400.000,-
- Gaji staf administrasi	Rp	43.200.000,-
- Sub total	Rp	111.600.000,-
4. Biaya lain-lain (15% dari biaya 1,2 3)	Rp	300.909.000,-
5. Total Biaya	Rp	2.306.969.000,-

Total produksi karbon aktif 1 tahun adalah 240.000 kg, sehingga harga jual karbon aktif adalah Rp 10.448,-/kg.

4.2 ADSORPSI ISOTERMAL

Data adsorpsi isotermal karbon dioksida (CO₂) dan metana (CH₄) pada beberapa karbon aktif hasil produksi pada penelitian sebelumnya dan sebuah karbon aktif komersial telah dilakukan pada temperatur 27, 35, 45, dan 65°C (300, 308, 318 dan 338 K) sampai dengan tekanan 3,5 MPa dengan menggunakan metode volumetrik. Tabel 4.1 adalah spesifikasi data karbon aktif yang digunakan pada proses adsorpsi isotermal.

Tabel 4.1 Data Properti Termofisika Karbon Aktif

Karbon Aktif	Volume Mikropori $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	Luas Permukaan $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	Angka Iodine ml/mg
Komersial	$0,514 \times 10^{-4}$	$0,885 \times 10^6$	885
Karbon Aktif KT	$0,470 \times 10^{-4}$	$0,668 \times 10^6$	612
Karbon Aktif RU	$0,040 \times 10^{-4}$	$0,060 \times 10^6$	49,8

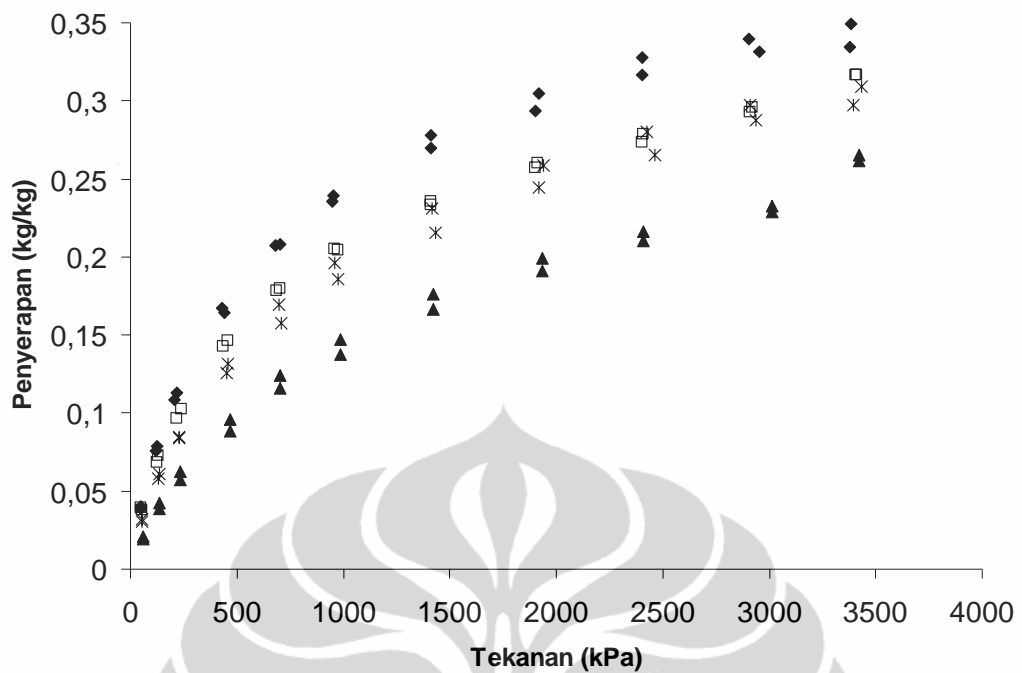
Data adsorpsi isothermal yang didapat kemudian diregresi dengan menggunakan beberapa persamaan yang biasa digunakan yaitu persamaan model Langmuir, Toth, dan Dubinin-Astakhov, untuk selanjutnya dengan menggunakan salah satu persamaan model tersebut akan diperoleh data panas adsorpsi isosterik dan adsorpsi isosterik karbon dioksida dan metana pada karbon aktif tersebut di atas.

4.2.1 Adsorpsi Isothermal Karbon Dioksida (CO_2) Pada Karbon Aktif

Gambar 4.18 sampai dengan Gambar 4.20 adalah grafik adsorpsi isothermal CO_2 pada karbon aktif, pada gambar tersebut terlihat bahwa adsorpsi isothermal CO_2 pada karbon aktif masuk dalam klasifikasi penyerapan IUPAC tipe I (Bansal, Roop Chand & Meenakshi Goyal, 2005).

Klasifikasi penyerapan IUPAC tipe I adalah bahwa adsorpsi yang terjadi biasanya adsorpsi kimia, namun beberapa adsorpsi fisika juga terjadi seperti pada karbon aktif dan *carbon molecular sieve* yang memiliki mikropori yang tinggi (Bansal, Roop Chand & Meenakshi Goyal, 2005).

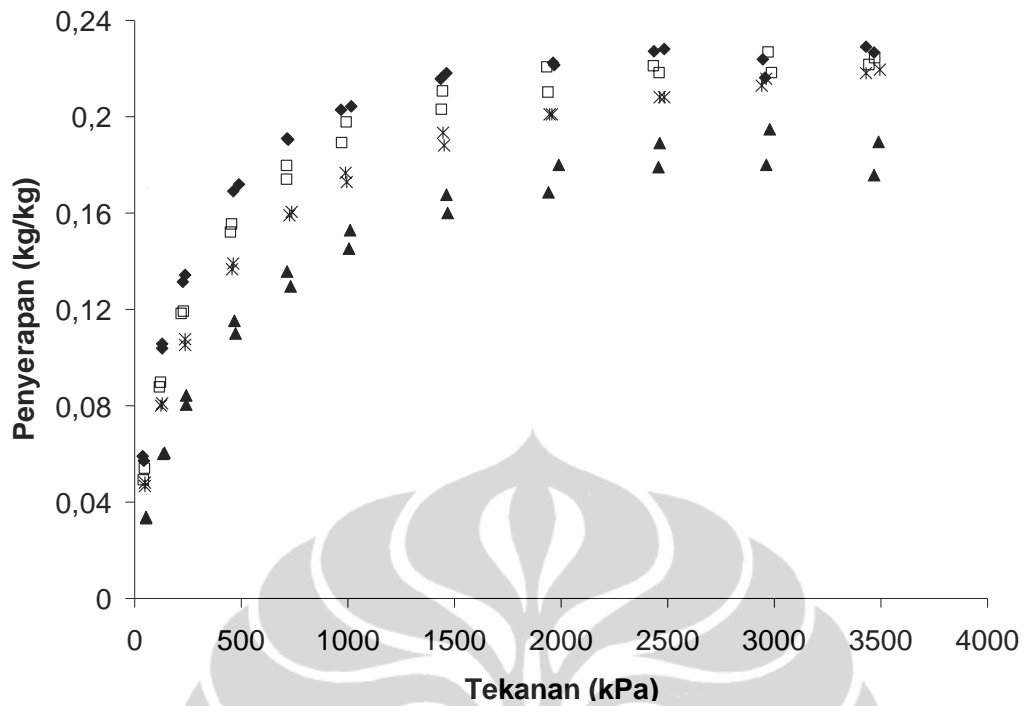
Pada Gambar 4.18 terlihat bahwa kapasitas penyerapan maksimum pada karbon aktif komersial adalah sebesar 0,349 kg/kg karbon aktif pada temperatur 27°C dan tekanan 3384,69 kPa. Dengan demikian pada karbon aktif komersial jumlah karbon dioksida yang mampu terserap pada temperatur dan tekanan tersebut adalah sebesar 34,9% dari massa karbon aktif.



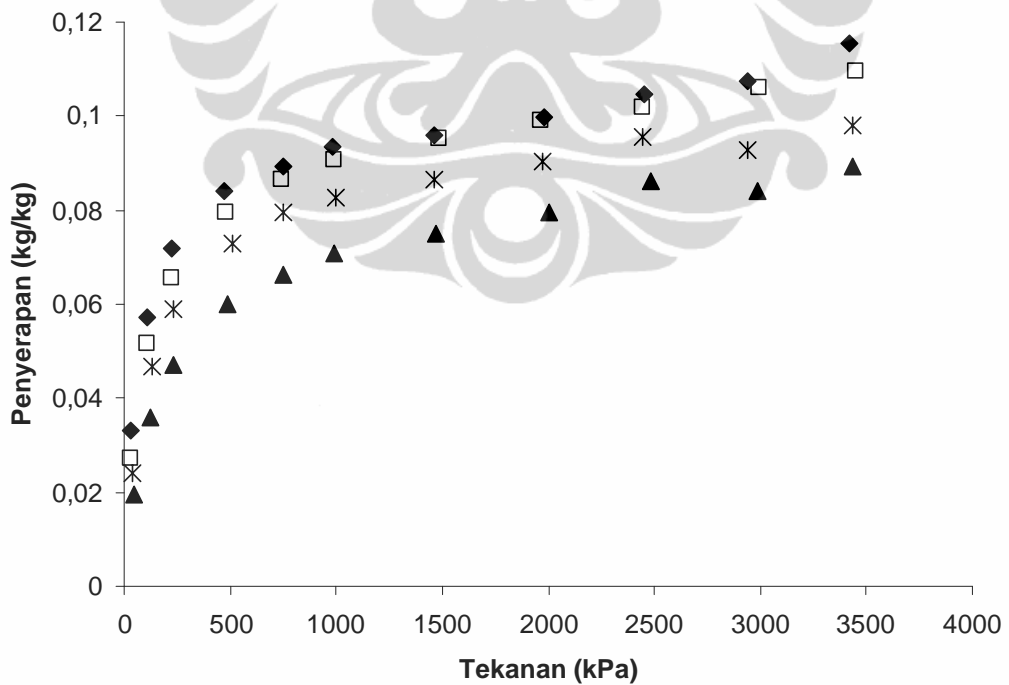
Gambar 4.18 Adsorpsi Isotermal CO₂ pada Karbon Aktif Komersial;
 ◆ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C

Gambar 4.19 adalah gambar grafik hubungan antara tekanan dan kapasitas penyerapan adsorpsi isotermal CO₂ pada karbon aktif KT. Pada gambar tersebut dapat diketahui bahwa kapasitas penyerapan maksimum karbon dioksida pada karbon aktif KT adalah 0,227 kg/kg pada temperatur 27°C dan tekanan 3469,27 kPa.

Pada Gambar 4.20 terlihat bahwa penyerapan maksimum pada karbon aktif RU adalah sebesar 0,115 kg/kg pada temperatur 27°C dan tekanan 3418,87 kPa.



Gambar 4.19 Adsorpsi Isotermal CO₂ pada Karbon Aktif KT;
 ◆ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲ 65°C

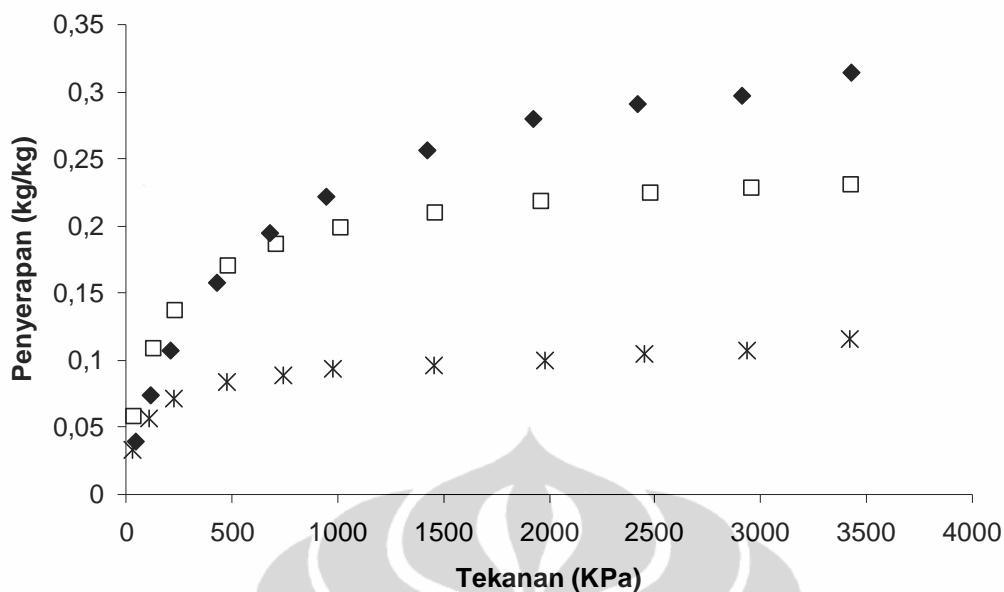


Gambar 4.20 Adsorpsi Isotermal CO₂ pada Karbon Aktif Riau;
 ◆ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲ 65°C

Pada Gambar 4.18 sampai dengan Gambar 4.20 juga menjelaskan bahwa kapasitas penyerapan sangat tergantung pada tekanan dan temperatur proses penyerapan. Semakin besar tekanan penyerapan maka kapasitas penyerapan karbon dioksida pada karbon aktif juga akan semakin besar. Hal tersebut terjadi dikarenakan bahwa pada proses adsorpsi, adsorbat yang dialirkan dan menumbuk permukaan karbon aktif sangat bergantung pada tekanan yang diberikan, semakin besar tekanan yang diberikan maka kecepatan atau laju aliran gas yang menumbuk karbon aktif akan semakin besar sehingga kemungkinan jumlah adsorbat yang menempel pada permukaan karbon aktif juga semakin besar. Hal tersebut sesuai dengan persamaan 2.5 sampai dengan persamaan 2.14.

Kapasitas penyerapan juga sangat dipengaruhi oleh temperatur isothermal proses adsorpsi, semakin rendah temperatur isothermal proses adsorpsi maka kapasitas penyerapan juga semakin besar. Hal tersebut terjadi karena pada proses adsorpsi, adsorbat yang dialirkan kepada permukaan karbon aktif akan menumbuk dan menempel pada permukaan karbon aktif kemudian terkondensasi pada permukaan padat berpori tersebut. Sehingga pada temperatur yang lebih rendah jumlah adsorbat yang terkondensasi pada permukaan karbon aktif akan semakin besar, dengan demikian adsorbat yang terserap pada karbon aktif juga semakin besar.

Kapasitas penyerapan CO_2 pada karbon aktif maksimum adalah pada karbon aktif komersial, hal tersebut dikarenakan karbon aktif komersial memiliki luas permukaan dan volume total pori yang lebih besar dibandingkan dengan karbon aktif KT dan RU seperti terlihat pada Gambar 4.21.



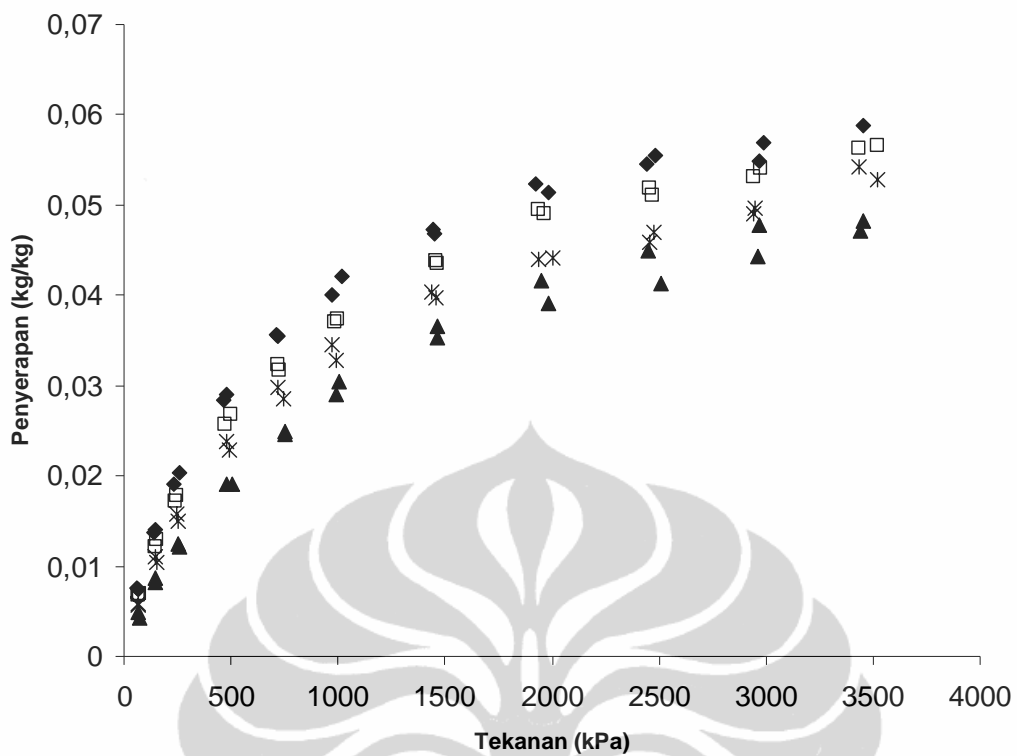
Gambar 4.21 Komparasi Adsorpsi Isotermal CO₂ pada Temperatur 27°C;
 ◆ Karbon Aktif Komersial; □ Karbon Aktif KT; * Karbon Aktif RU

Dengan demikian kapasitas penyerapan karbon dioksida pada karbon aktif di samping dipengaruhi oleh temperatur dan tekanan, juga dipengaruhi oleh kualitas karbon aktif. Semakin besar luas permukaan dan volume total pori karbon aktif, maka kapasitas penyerapan karbon dioksida pada karbon aktif juga semakin besar.

4.2.2 Adsorpsi Isotermal Metana (CH₄) Pada Karbon Aktif

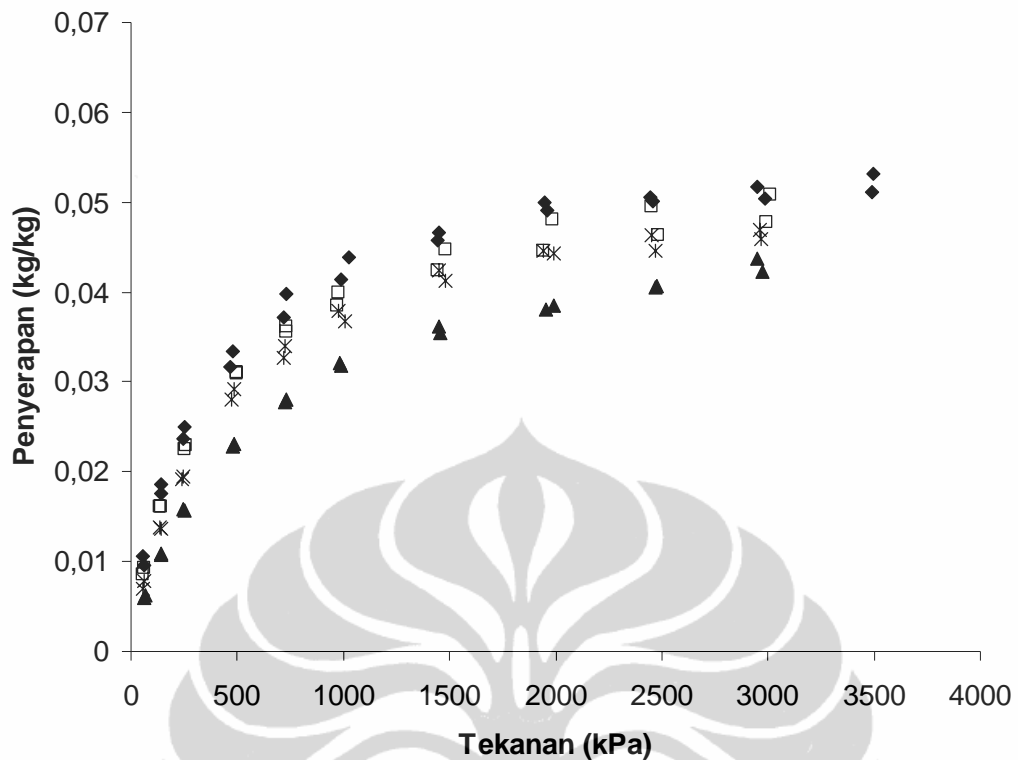
Gambar 4.22 sampai dengan Gambar 4.24 adalah grafik adsorpsi isotermal CH₄ pada karbon aktif, pada gambar tersebut terlihat bahwa adsorpsi isotermal CH₄ pada karbon aktif juga masuk dalam klasifikasi penyerapan IUPAC tipe I (Bansal, Roop Chand & Meenakshi Goyal, 2005).

Pada Gambar 4.22 terlihat bahwa kapasitas penyerapan maksimum pada karbon aktif komersial adalah sebesar 0,0589 kg/kg karbon aktif pada temperatur isotermal 27°C dan tekanan 3457,2 kPa.



Gambar 4.22 Adsorpsi Isotermal CH_4 pada Karbon Aktif Komersial;
 ◆ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C

Gambar 4.23 adalah gambar grafik hubungan antara tekanan dan kapasitas penyerapan adsorpsi isotermal CH_4 pada karbon aktif KT. Pada gambar tersebut dapat diketahui bahwa kapasitas penyerapan maksimum metana pada karbon aktif KT adalah 0,0532 kg/kg pada temperatur 27°C dan tekanan 3495,75 kPa.



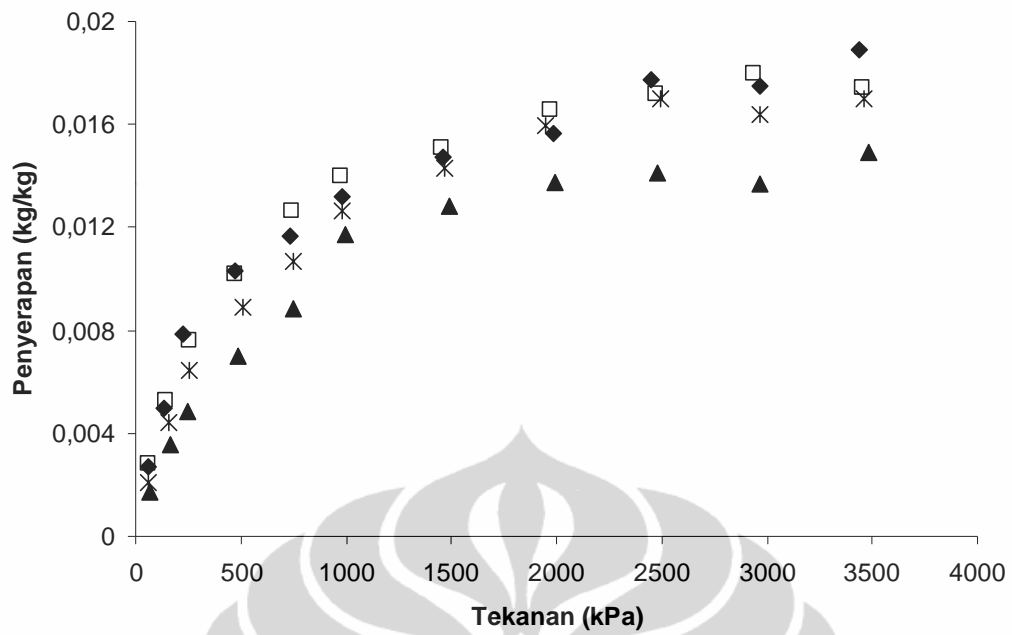
Gambar 4.23 Adsorpsi Isotermal CH_4 pada Karbon Aktif KT;
 ◆ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C

Pada Gambar 4.24 terlihat bahwa penyerapan maksimum pada karbon aktif RU adalah sebesar 0,0189 kg/kg pada temperatur 27°C dan tekanan 3439,96 kPa.

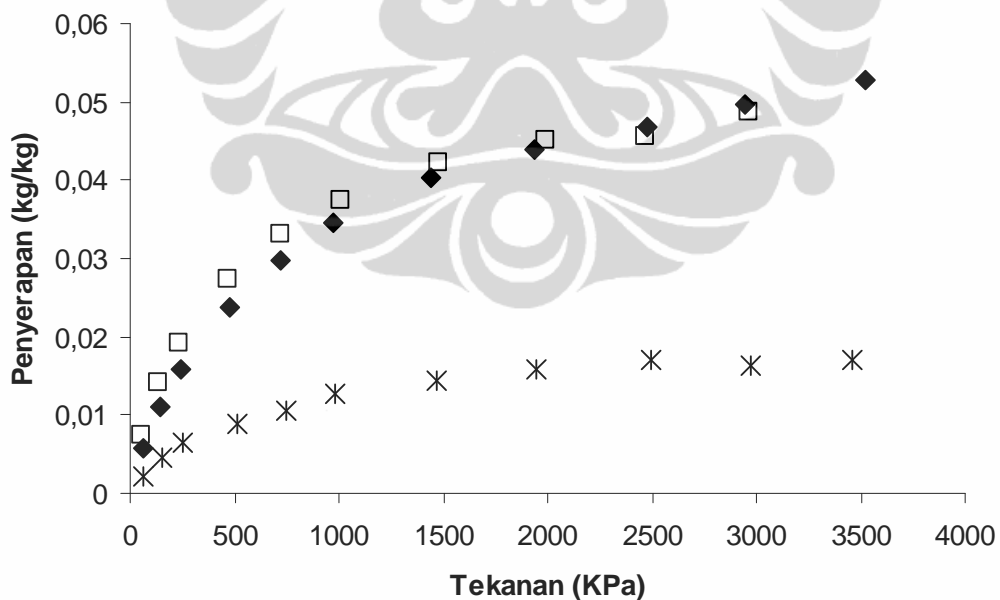
Pada Gambar 4.22 sampai dengan Gambar 4.24 juga menjelaskan bahwa kapasitas penyerapan sangat tergantung pada tekanan dan temperatur proses penyerapan. Semakin besar tekanan penyerapan dan semakin rendah temperatur penyerapan maka kapasitas penyerapan karbon dioksida pada karbon aktif juga akan semakin besar.

Pada Gambar 4.25 terlihat bahwa kapasitas penyerapan CH_4 pada karbon aktif maksimum juga terjadi pada karbon aktif komersial.

Dengan demikian bahwa kapasitas penyerapan adsorbat pada adsorben sangat dipengaruhi oleh besarnya tekanan dan rendahnya temperatur serta kualitas permukaan adsorben itu sendiri.



Gambar 4.24 Adsorpsi Isotermal CH₄ pada Karbon Aktif Riau;
 ◆ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C



Gambar 4.25 Komparasi Adsorpsi Isotermal CH₄ pada Temperatur 27°C;
 ◆ Karbon Aktif Komersial; □ Karbon Aktif KT; * Karbon Aktif RU

Kapasitas penyerapan CO₂ pada karbon aktif pada tekanan dan temperatur yang sama lebih besar dibanding dengan kapasitas penyerapan CH₄ pada

karbon aktif. Hal tersebut disamping karena diameter molekul CO_2 yang lebih kecil daripada CH_4 , sehingga memudahkan CO_2 untuk terserap, selain itu juga densitas CO_2 lebih besar dibanding CH_4 sehingga memungkinkan CO_2 lebih mudah menempel pada permukaan karbon aktif.

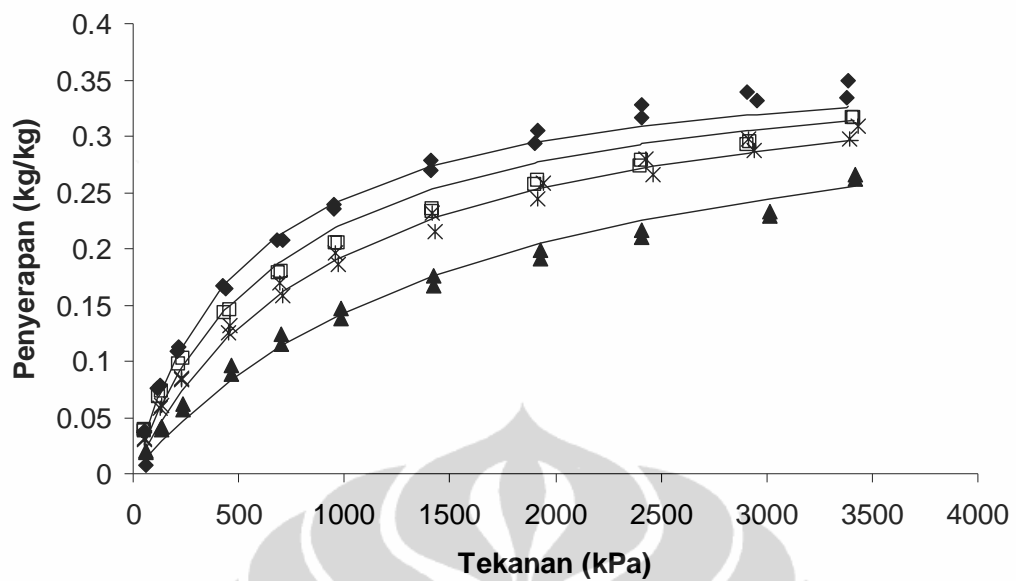
4.3 KORELASI ADSORPSI ISOTERMAL

Korelasi adsorpsi isotermal dilakukan dengan menggunakan beberapa persamaan model seperti persamaan model Langmuir, persamaan model Toth dan persamaan model Dubinin-Astakhov. Korelasi adsorpsi isotermal dilakukan untuk mendapatkan persamaan model yang paling cocok yang dapat digunakan untuk memprediksi kapasitas penyerapan pada tekanan dan temperatur isotermal yang berbeda. Persamaan model yang memiliki deviasi atau simpangan terkecil adalah persamaan model yang akan digunakan selanjutnya untuk mendapatkan data panas adsorpsi isosterik dan adsorpsi isosterik.

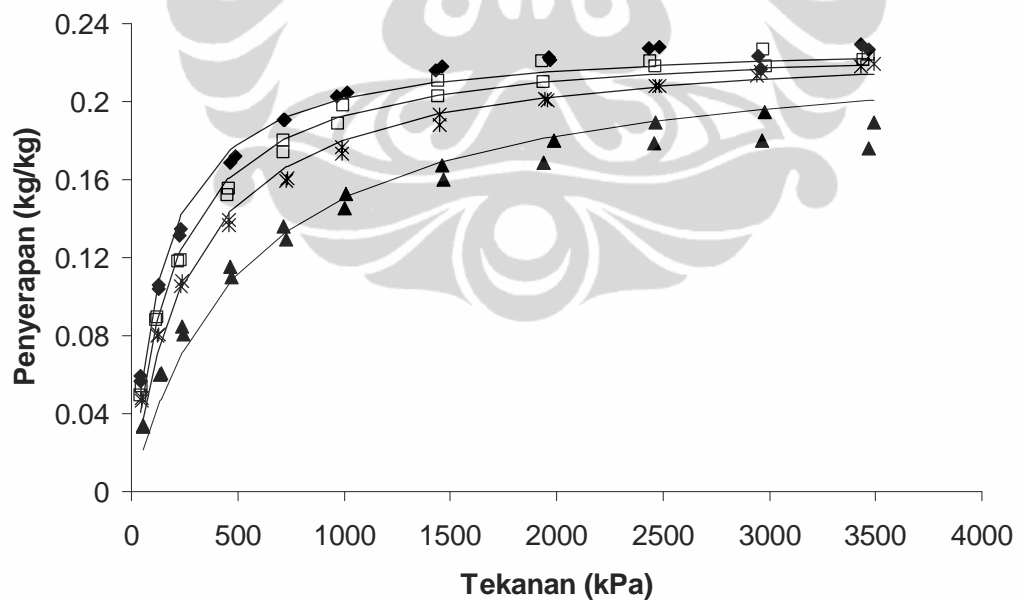
4.3.1 Persamaan Model Langmuir

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

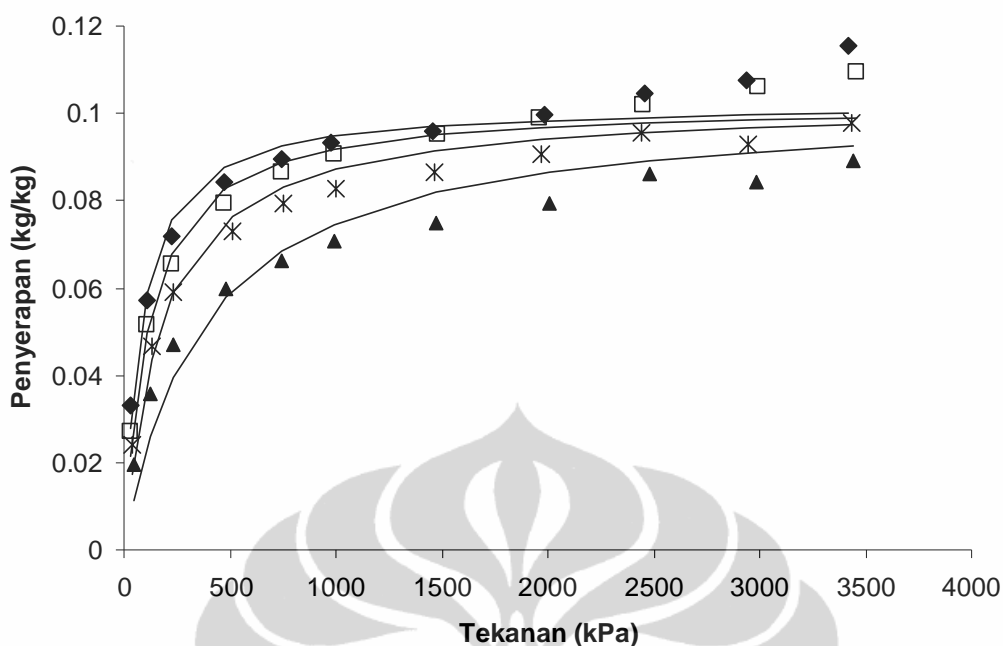
Gambar 4.26 sampai dengan Gambar 4.28 adalah grafik adsorpsi isotermal karbon dioksida pada karbon aktif, sementara garis tebal pada grafik tersebut adalah garis regresi dengan persamaan model Langmuir.



Gambar 4.26 Adsorpsi Isotermal CO_2 pada Karbon Aktif Komersial; \blacklozenge 27°C ; \square 35°C ; $*$ 45°C ; \blacktriangle 65°C ; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan Persamaan Langmuir



Gambar 4.27 Adsorpsi Isotermal CO_2 pada Karbon Aktif KT; \blacklozenge 27°C ; \square 35°C ; $*$ 45°C ; \blacktriangle 65°C ; Garis Tebal Adalah Regresi Dengan Persamaan Langmuir



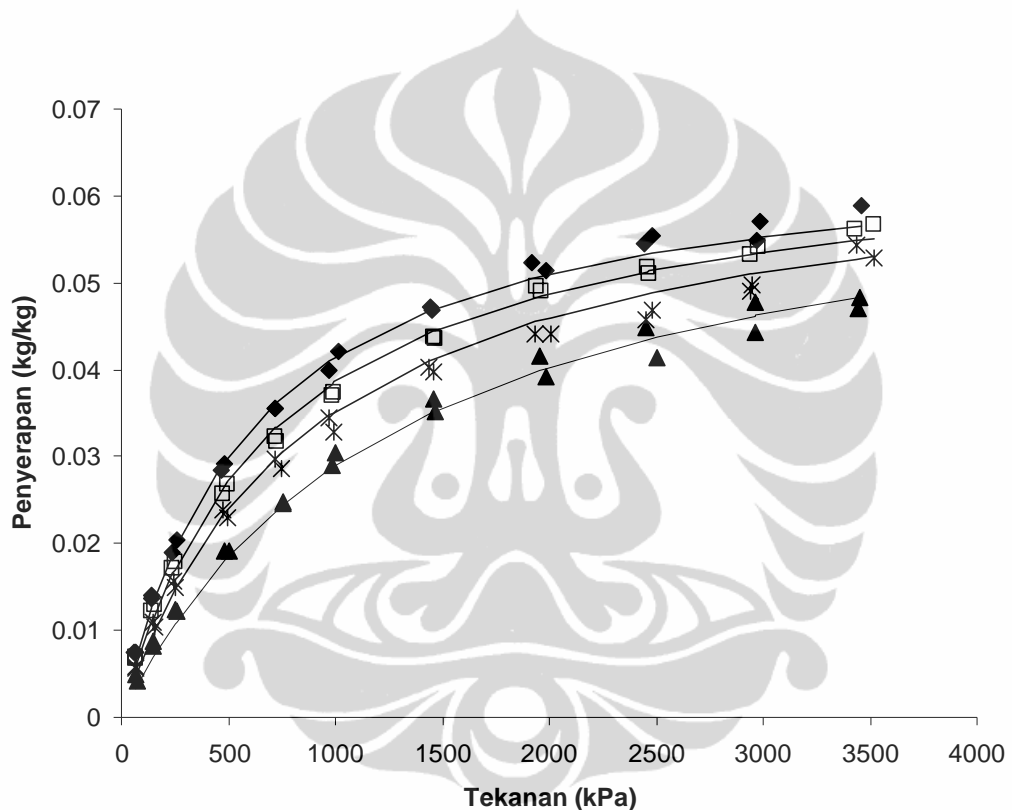
Gambar 4.28 Adsorpsi Isotermal CO₂ pada Karbon Aktif RU;
 ◆ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C; Garis Tebal adalah Regresi Dengan
 Persamaan Langmuir

Tabel 4.2 adalah besaran yang didapat dengan menyelesaikan persamaan model Langmuir dengan menggunakan metode iterasi serta melalui bantuan *Software Excel*, dan dari hasil perhitungan didapat simpangan terbesar terjadi pada karbon aktif RU yaitu sebesar 6,766% dan terendah adalah pada karbon aktif KT yaitu 4,608%.

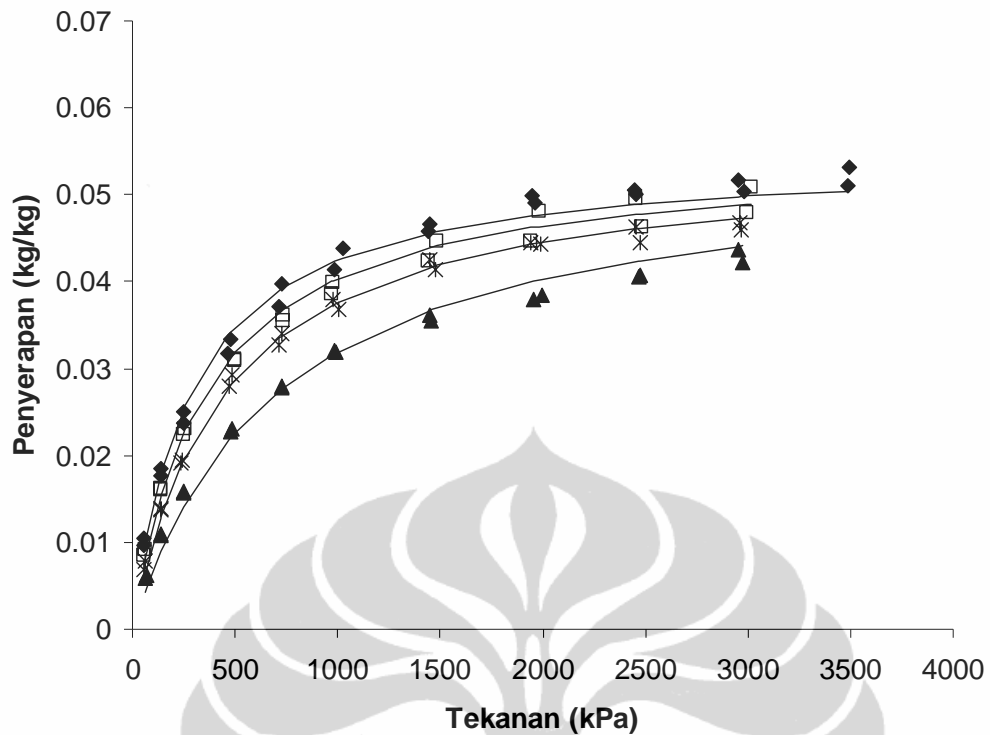
Tabel 4.2 Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Langmuir Untuk Adsorpsi Isotermal CO₂

Parameter	Komersial	KT	RU
C_{μ} (kg/kg)	0,378	0,2315	0,1023
Q/R (K)	2799,08	3279,99	3909,24
b_{∞}	$1,64 \times 10^{-7}$	$1,21 \times 10^{-7}$	$2,75 \times 10^{-8}$
k_{∞}	463	893	465
α	0,0095	0,0135	0,0016
Deviasi/ δ (%)	5,975	4,608	6,766

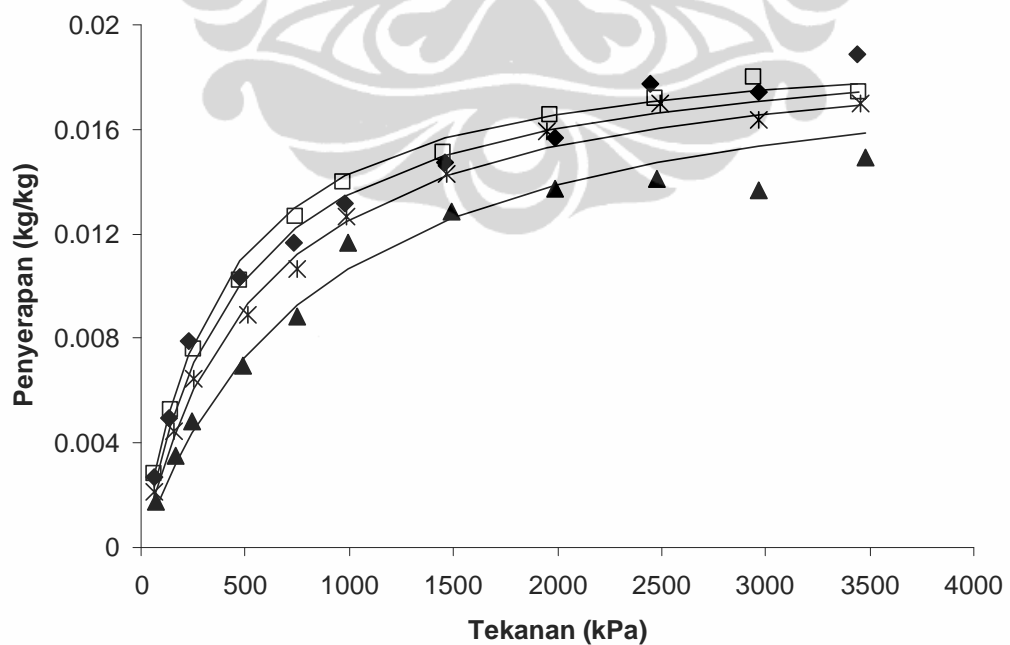
Gambar 4.29 sampai dengan Gambar 4.31 adalah grafik adsorpsi isotermal metana pada karbon aktif, sementara garis tebal pada grafik tersebut adalah garis regresi dengan persamaan model Langmuir. Simpangan atau deviasi adsorpsi isotermal metana pada karbon aktif nilainya lebih kecil dibanding dengan adsorpsi isotermal karbon dioksida pada karbon aktif yang sama, sehingga dengan demikian persamaan model Langmuir lebih akurat digunakan pada karbon aktif dengan adsorbat metana.



Gambar 4.29 Adsorpsi Isotermal CH_4 pada Karbon Aktif Komersial;
 ♦ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Langmuir



Gambar 4.30 Adsorpsi Isotermal CH_4 pada Karbon Aktif KT; \blacklozenge 27°C ; \square 35°C ; $*$ 45°C ; \blacktriangle 65°C ; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Langmuir



Gambar 4.31 Adsorpsi Isotermal CH_4 pada Karbon Aktif RU; \blacklozenge 27°C ; \square 35°C ; $*$ 45°C ; \blacktriangle 65°C ; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Langmuir

Tabel 4.3 adalah besaran besaran yang didapat dengan menyelesaikan persamaan model Langmuir dengan menggunakan metode iterasi serta melalui bantuan *Software Excel* dan dari hasil perhitungan didapat simpangan atau deviasi terbesar adalah pada karbon aktif RU yaitu sebesar 5,495% dan terkecil adalah pada karbon aktif KT yaitu 3,721%.

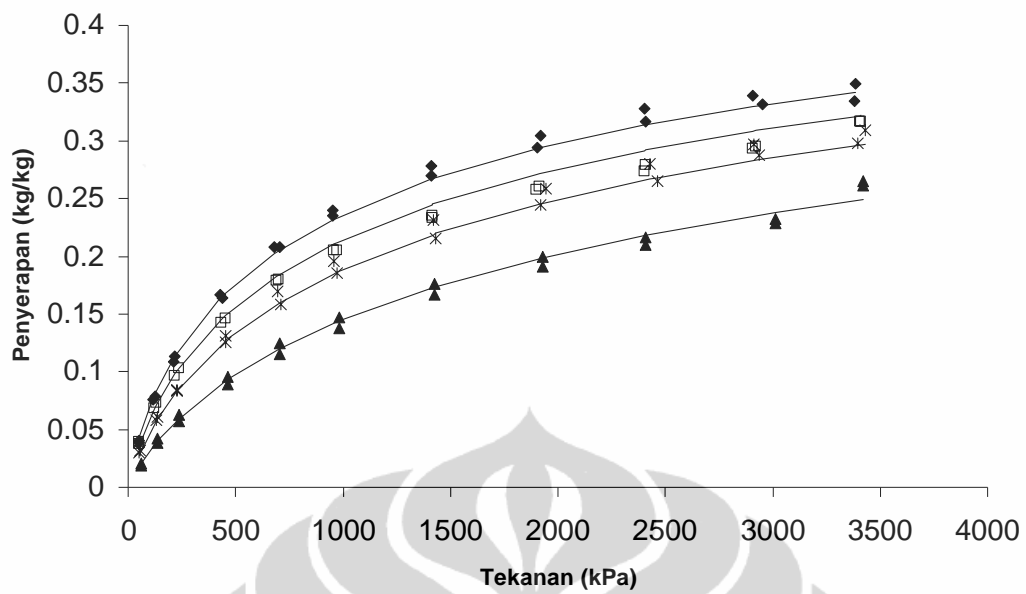
Tabel 4.3 Besaran yang digunakan pada Persamaan Model Langmuir Untuk Adsorpsi Isotermal CH₄

Parameter	Komersial	KT	RU
C _μ (kg/kg)	0,0663	0,0546	0,0197
Q/R (K)	1874,36	2259,10	1988,18
b _∞	3,22 x 10 ⁻⁶	1,88 x 10 ⁻⁶	3,5 x 10 ⁻⁶
k _∞	205	224	203
α	0,083	0,053	0,089
Deviasi/δ (%)	3,727	3,721	5,495

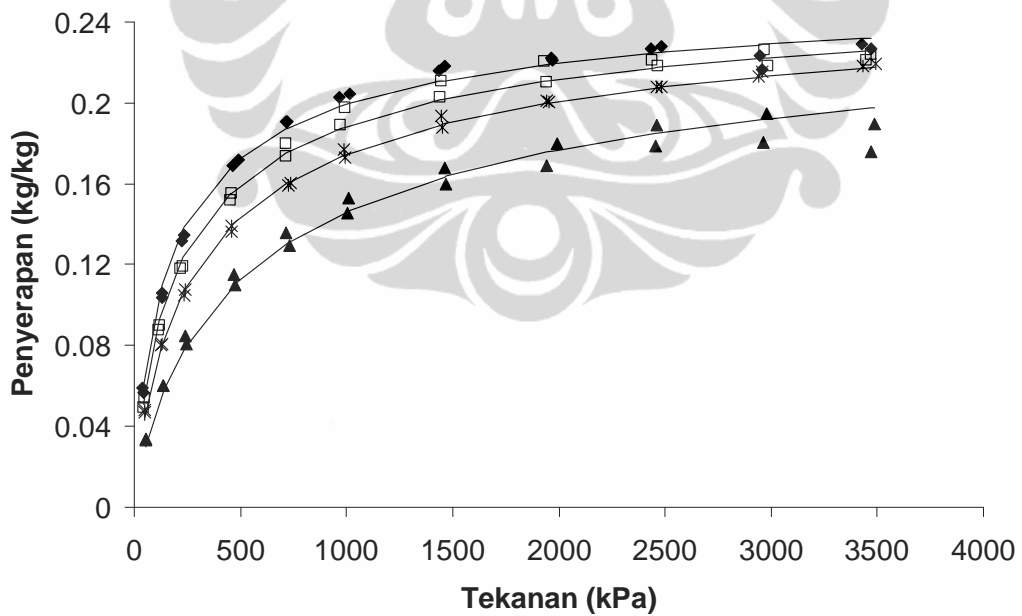
4.3.2 Persamaan Model Toth

Model persamaan Toth biasanya digunakan pada permukaan adsorben yang heterogen seperti pada karbon aktif dan juga persamaan tersebut dapat digunakan pada tekanan rendah dan tekanan tinggi (Shuji Himeno, dkk., 2005).

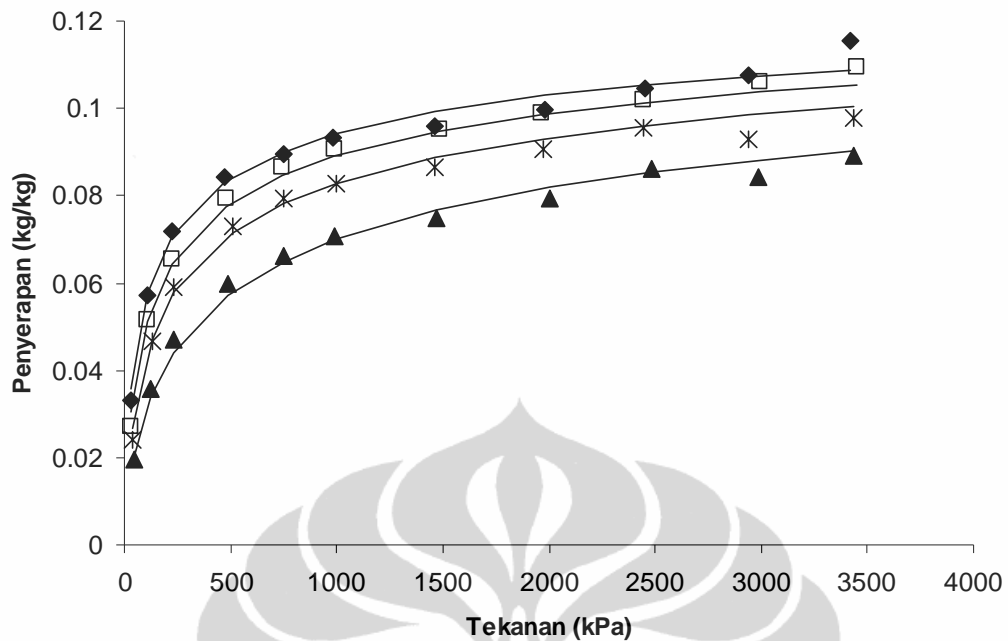
Gambar 4.32 sampai dengan Gambar 4.34 adalah grafik adsorpsi isotermal karbon dioksida pada karbon aktif, sementara garis tebal pada grafik tersebut adalah garis regresi dengan persamaan model Toth.



Gambar 4.32 Adsorpsi Isotermal CO₂ pada Karbon Aktif Komersial; ♦ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Toth



Gambar 4.33 Adsorpsi Isotermal CO₂ pada Karbon Aktif KT; ♦ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Toth



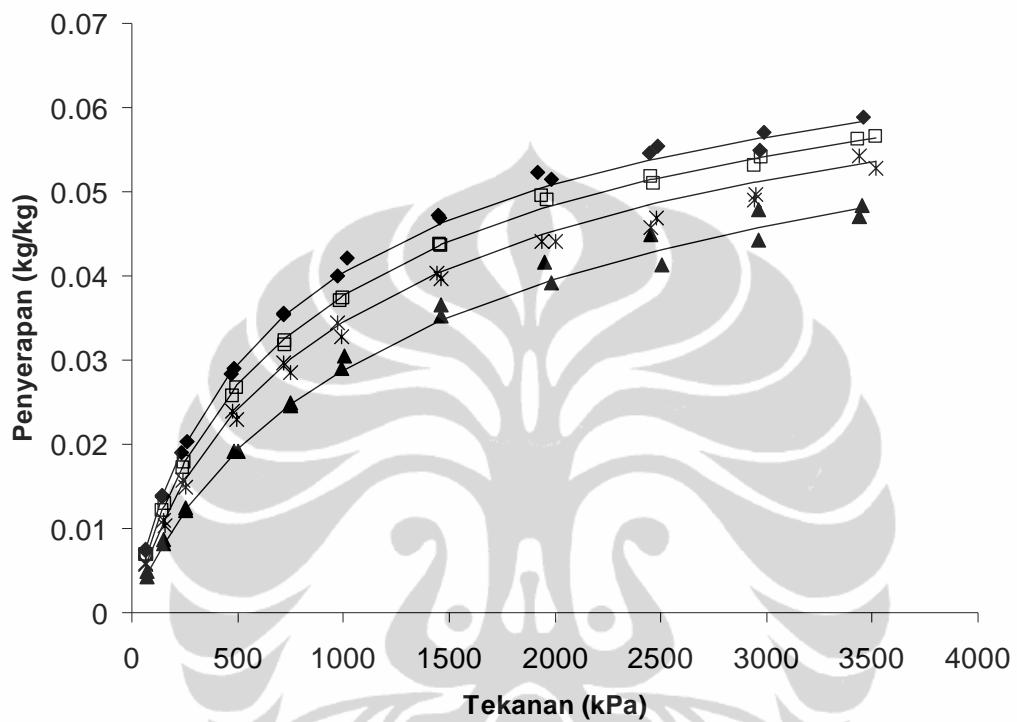
Gambar 4.34 Adsorpsi Isotermal CO₂ pada Karbon Aktif RU; ♦ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Toth

Tabel 4.4 adalah besaran yang didapat dengan menyelesaikan persamaan model Toth dengan menggunakan metode iterasi serta melalui bantuan *Software Excel*, dan dari hasil perhitungan didapat simpangan terbesar terjadi pada karbon aktif komersial yaitu sebesar 3,886% dan terendah adalah pada karbon aktif RU yaitu sebesar 2,962%.

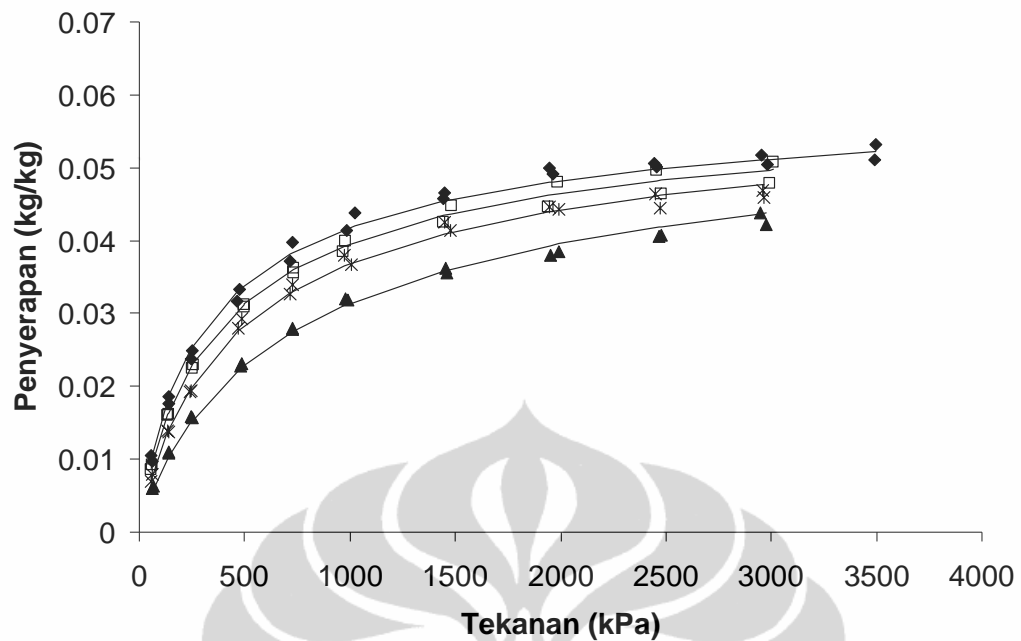
Tabel 4.4 Besaran yang Digunakan pada Persamaan Model Toth Untuk Adsorpsi Isotermal CO₂

Parameter	Komersial	KT	RU
C_{μ} (kg/kg)	0,5602	0,266	0,1356
Q/R (K)	2727,54	3278,51	3905,95
b_{∞}	$2,82 \times 10^{-7}$	$2,09 \times 10^{-7}$	$1,27 \times 10^{-7}$
k_{∞}	840	888	693
α	0,029	0,023	0,011
t	0,548	0,644	0,4359
Deviasi/ δ (%)	3,886	3,008	2,962

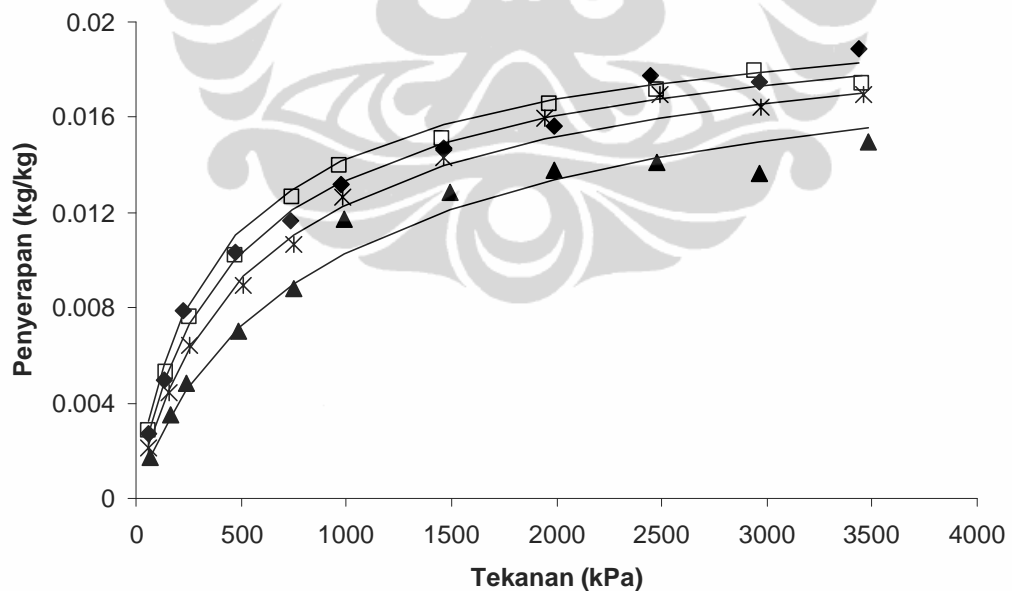
Gambar 4.35 sampai dengan Gambar 4.37 adalah grafik adsorpsi isotermal metana pada karbon aktif, sementara garis tebal pada grafik tersebut adalah garis regresi dengan persamaan model Toth.



Gambar 4.35 Adsorpsi Isotermal CH_4 pada Karbon Aktif Komersial; \blacklozenge 27°C; \square 35°C; $*$ 45°C; \blacktriangle 65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Toth



Gambar 4.36 Adsorpsi Isotermal CH_4 pada Karbon Aktif KT; \blacklozenge 27°C ; \square 35°C ; $*$ 45°C ; \blacktriangle 65°C ; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Toth



Gambar 4.37 Adsorpsi Isotermal CH_4 pada Karbon Aktif RU; \blacklozenge 27°C ; \square 35°C ; $*$ 45°C ; \blacktriangle 65°C ; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan Toth

Tabel 4.5 adalah besaran yang didapat dengan menyelesaikan persamaan model Toth dengan menggunakan metode iterasi serta melalui bantuan *Software Excel* dan dari hasil perhitungan didapat simpangan terbesar terjadi pada karbon aktif RU yaitu sebesar 5,257% dan terendah adalah pada karbon aktif KT yaitu sebesar 2,817%.

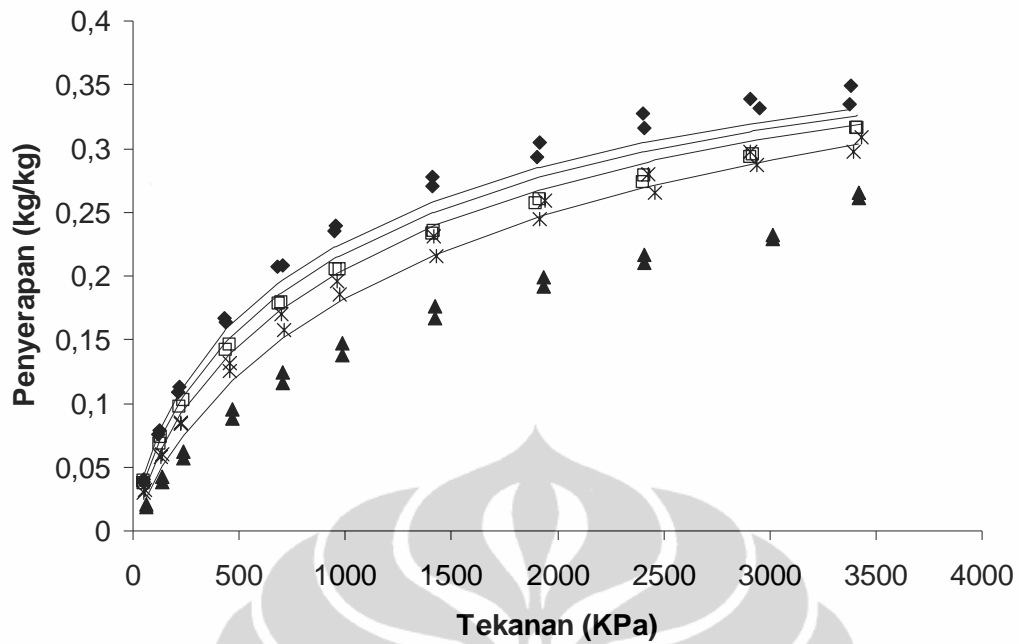
Tabel 4.5 Besaran yang digunakan pada Persamaan Model Toth Untuk Adsorpsi Isotermal CH₄

Parameter	Komersial	KT	RU
C _o (kg/kg)	0,0821	0,0619	0,0219
Q/R (K)	1831,25	2237,18	2252,72
b _∞	4,29 x 10 ⁻⁶	2,59 x 10 ⁻⁶	1,84 x 10 ⁻⁶
k _∞	232	213	219
α	0,1244	0,0689	0,0504
t	0,695	0,7322	0,769
Deviasi/ δ (%)	2,86	2,817	5,257

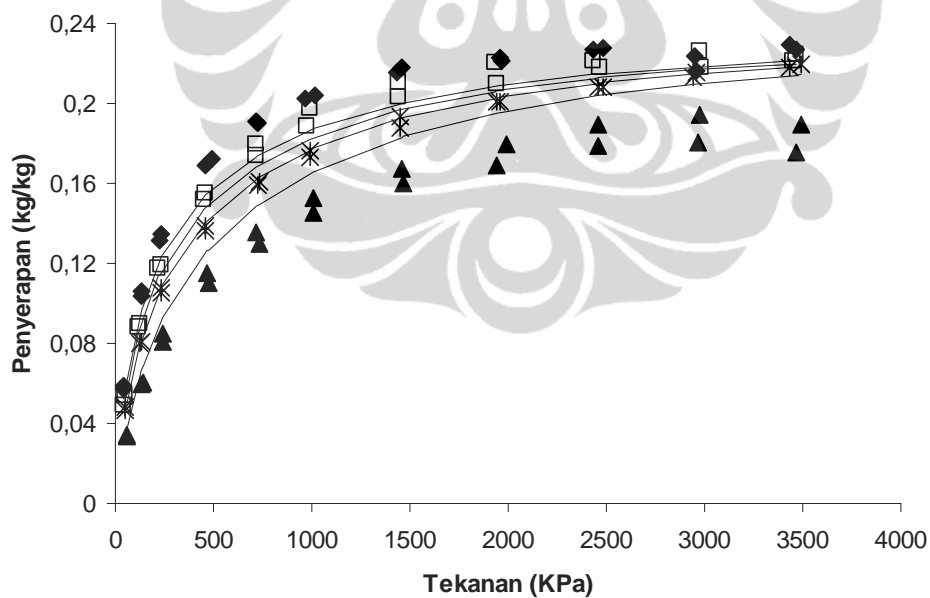
Persamaan model Toth memiliki nilai deviasi yang lebih rendah dibanding dengan persamaan model Langmuir untuk seluruh karbon aktif, sehingga dengan demikian persamaan model Toth lebih akurat dibandingkan dengan persamaan model Langmuir untuk adsorpsi isotermal karbon dioksida maupun metana pada karbon aktif.

4.3.3 Persamaan Model Dubinin-Astakhov (D-A)

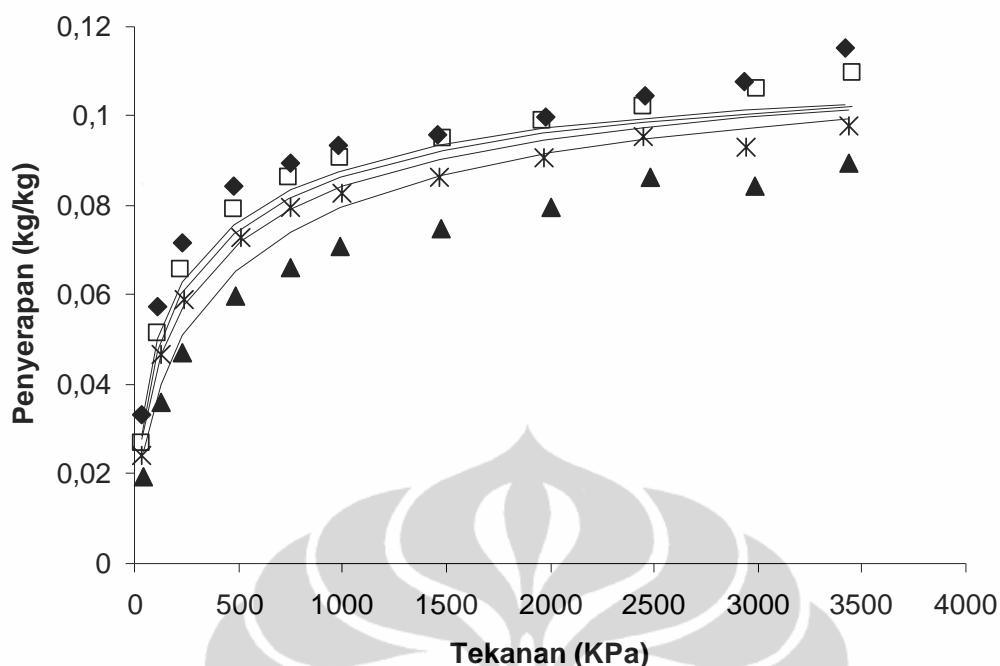
Gambar 4.38 sampai dengan Gambar 4.40 adalah grafik adsorpsi isotermal karbon dioksida pada karbon aktif, sementara garis tebal pada grafik tersebut adalah garis regresi dengan persamaan model Dubinin-Astakhov (D-A). Garis-garis seperti yang terlihat pada gambar-gambar tersebut tidak satupun yang berhimpitan dengan titik-titik grafik. Sehingga dari gambar terlihat bahwa simpangan atau deviasi antara hasil eksperimen dengan persamaan model D-A cukup besar.



Gambar 4.38 Adsorpsi Isotermal CO₂ pada Karbon Aktif Komersial; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲ 65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan D-A



Gambar 4.39 Adsorpsi Isotermal CO₂ pada Karbon Aktif KT; ♦ 27°C; □ 35° C; * 45°C; ▲ 65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan D-A



Gambar 4.40 Adsorpsi Isotermal CO_2 pada Karbon Aktif RU; \blacklozenge 27°C ; \square 35°C ; $*$ 45°C ; \blacktriangle 65°C ; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan D-A

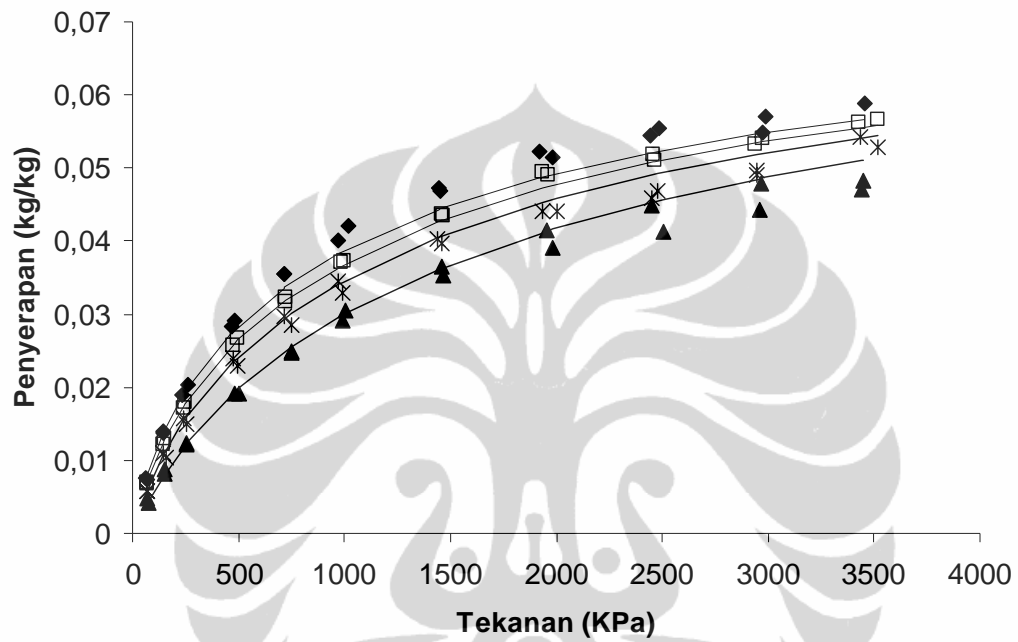
Tabel 4.6 adalah besaran yang didapat dengan menyelesaikan persamaan model D-A dengan menggunakan metode iterasi serta melalui bantuan *Software Excel* dan dari hasil perhitungan didapat deviasi terbesar adalah pada karbon aktif komersial yaitu sebesar 8,68% dan terendah yaitu sebesar 6,06% pada karbon aktif komersial.

Tabel 4.6 Besaran yang digunakan pada Persamaan Model D-A Untuk Adsorpsi Isotermal CO_2

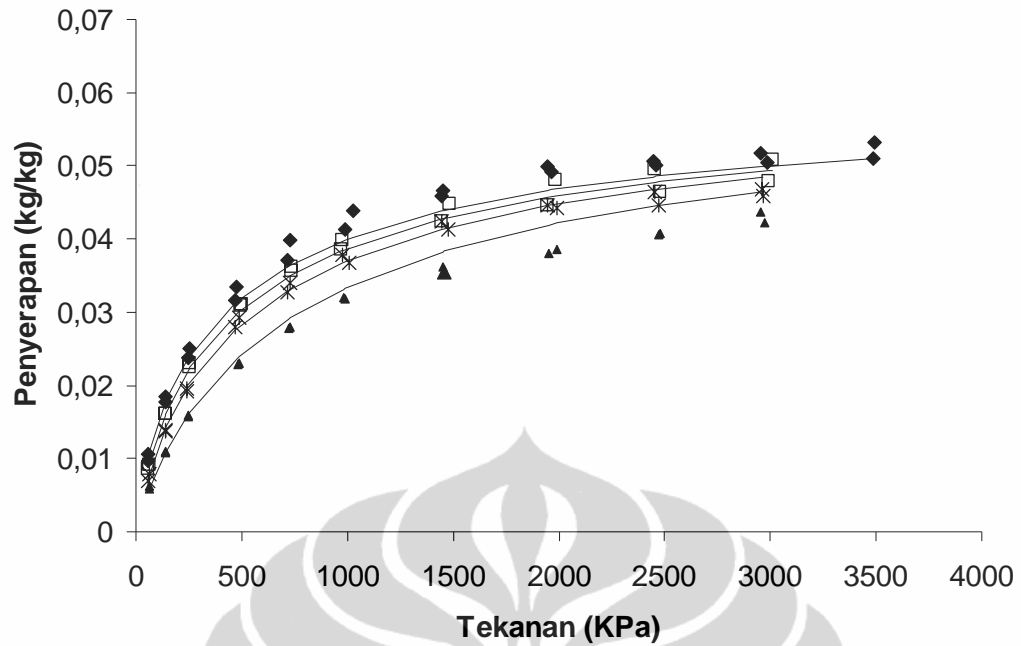
Parameter	Komersial	KT	RU
C_0 (kg/kg)	0,364	0,226	0,10567
E (kJ/kg)	177,046	245,29	278,6
n	1,64	2,096	1,858
Deviasi/ δ (%)	6,06	7,46	8,138

Gambar 4.41 sampai dengan Gambar 4.43 adalah grafik adsorpsi isotermal metana pada karbon aktif sementara garis tebal pada grafik tersebut adalah garis regresi dengan persamaan model Dubinin-Astakhov (D-A).

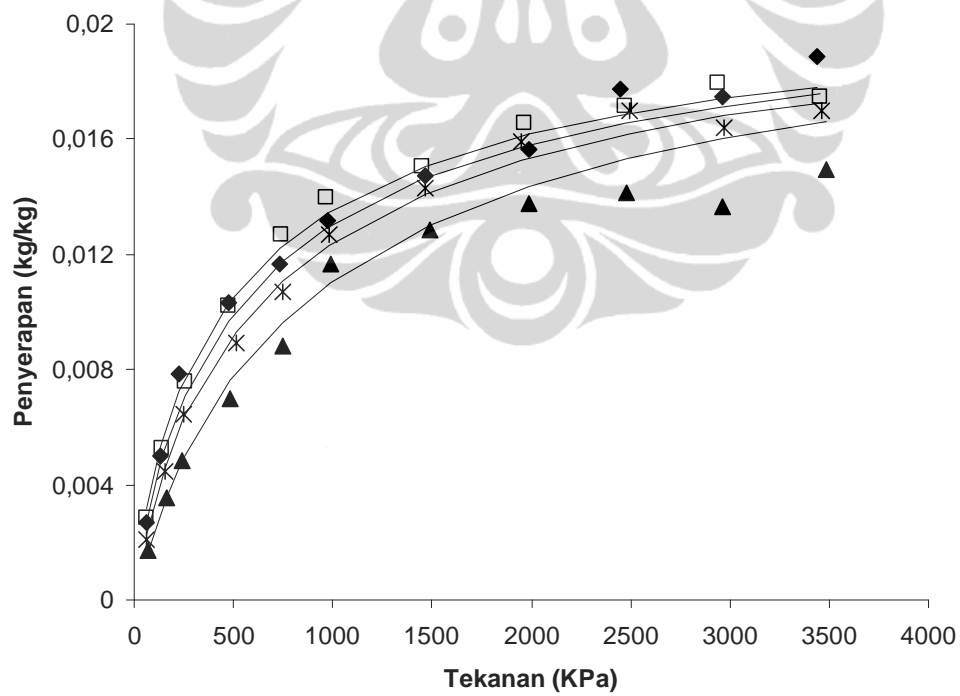
Simpangan yang diperoleh dari menyelesaikan persamaan model D-A pada adsorpsi isotermal metana lebih rendah dibanding dengan adsorpsi isotermal karbon dioksida.



Gambar 4.41 Adsorpsi Isotermal CH_4 pada Karbon Aktif Komersial; \blacklozenge 27°C; \square 35°C; $*$ 45°C; \blacktriangle 65°C; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan D-A



Gambar 4.42 Adsorpsi Isotermal CH_4 pada Karbon Aktif KT; \blacklozenge 27°C ; \square 35°C ; $*$ 45°C ; \blacktriangle 65°C ; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan D-A



Gambar 4.43 Adsorpsi Isotermal CH_4 pada Karbon Aktif RU; \blacklozenge 27°C ; \square 35°C ; $*$ 45°C ; \blacktriangle 65°C ; Garis tebal adalah regresi dengan Persamaan D-A

Tabel 4.7 adalah besaran yang didapat dengan menyelesaikan persamaan model D-A dengan menggunakan metode iterasi serta melalui bantuan *Software Excel* dan dari hasil perhitungan didapat simpangan terendah yaitu 4,75% pada karbon aktif komersial dan tertinggi 6,12% pada karbon aktif RU.

Tabel 4.7 Besaran yang digunakan pada Persamaan Model D-A Untuk Adsorpsi Isotermal CH₄

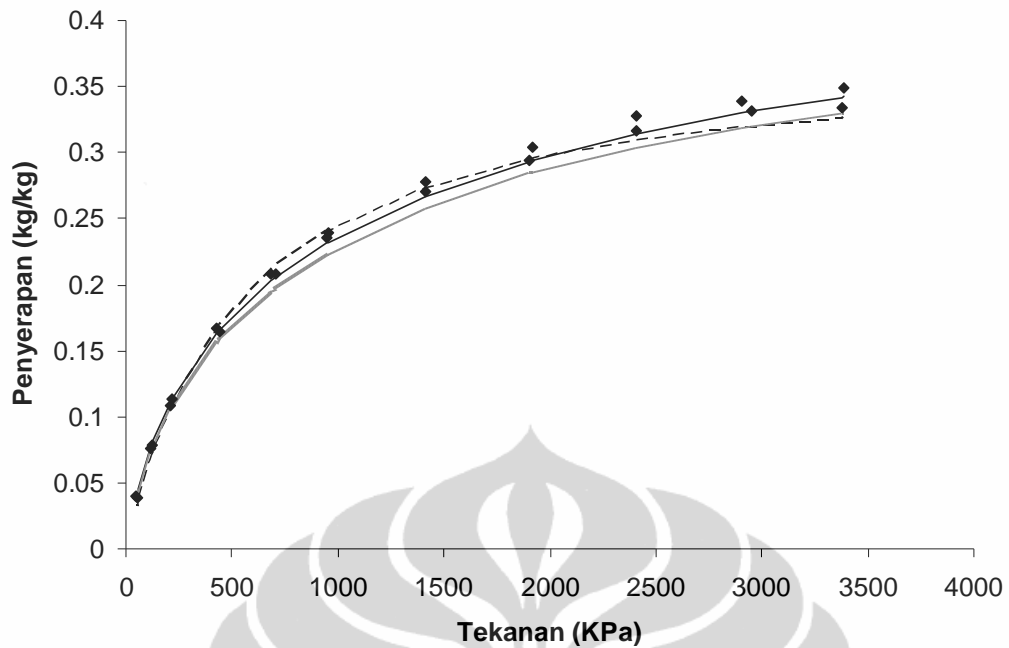
Parameter	Komersial	KT	RU
C _o (kg/kg)	0,065	0,0543	0,0191
E (kJ/kg)	538,29	653,28	618,46
n	1,85	2,182	2,15
Deviasi/ δ (%)	4,75	5,08	6,12

4.4 PANAS ADSORPSI

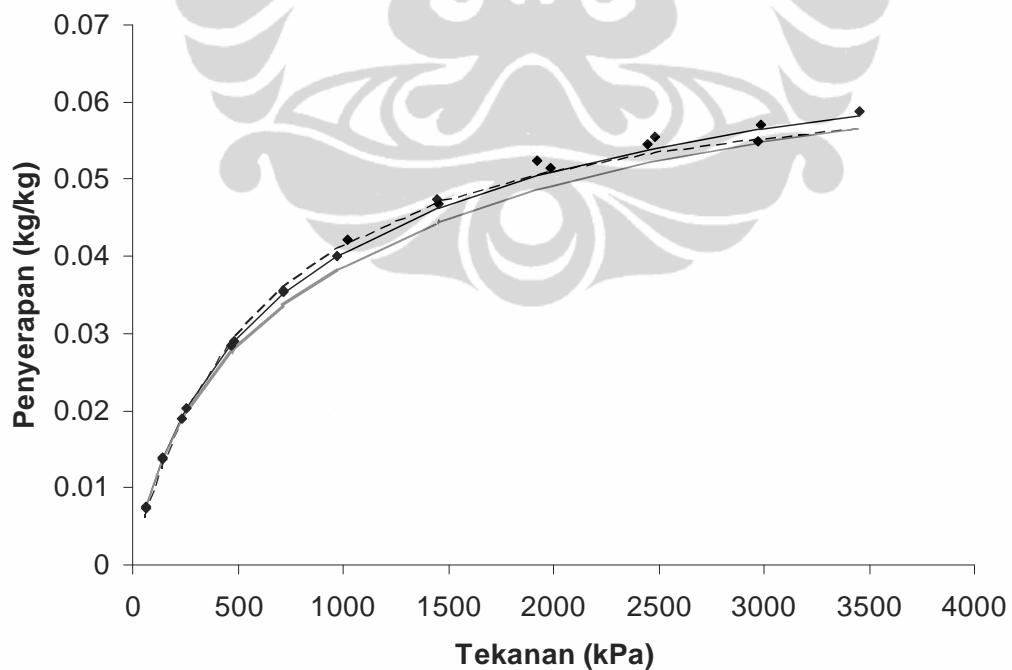
Panas adsorpsi adalah salah satu fungsi termodinamika yang sangat penting yang dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik permukaan suatu padatan. Proses adsorpsi adalah proses eksotermal, sehingga besarnya panas adsorpsi adalah salah satu yang menjadi pertimbangan dalam hal teoritis maupun praktis.

Panas adsorpsi didefinisikan sebagai total jumlah panas (Q) yang diberikan ketika satu gram adsorben menyerap satu gram adsorbat (J/g adsorben).

Pada Gambar 4.44 dan Gambar 4.45 terlihat adsorpsi isotermal CO₂ dan CH₄ pada karbon aktif komersial yang diregresi dengan menggunakan persamaan model Langmuir, Toth dan Dubinin-Astakhov. Pada gambar tersebut terlihat bahwa garis yang dihasilkan dengan menyelesaikan persamaan model Toth memiliki simpangan yang lebih kecil dibanding dengan persamaan model lainnya.



Gambar 4.44 Adsorpsi Isotermal CO_2 pada Karbon Aktif Komersial pada Temperatur 27°C ; _ Persamaan Model Toth ($\delta = 3,886\%$); - -- Persamaan Model Langmuir ($\delta = 5,975\%$); Persamaan Model D-A ($\delta = 6,06\%$)



Gambar 4.45 Adsorpsi Isotermal CH_4 pada Karbon Aktif Komersial pada Temperatur 27°C ; _ Persamaan Model Toth ($\delta = 2,86\%$); ----- Persamaan Model Langmuir ($\delta=3,727\%$); Persamaan Model D-A ($\delta = 4,74\%$)

Persamaan model Langmuir adalah persamaan model adsorpsi isothermal pertama dengan salah satu asumsi adalah bahwa permukaan adsorben adalah homogen, sementara pada kenyataannya bahwa permukaan adsorben tidak homogen. Persamaan model Dubinin-Astakhov adalah persamaan model yang sangat cocok digunakan pada karbon aktif, namun kondisi tekanan proses adsorpsi adalah pada kondisi tekanan kritis, sementara pada penelitian yang dilakukan tekanan adsorpsi tidak pada tekanan kritis. Sehingga pada penelitian ini, persamaan model yang paling cocok adalah persamaan model Toth, karena persamaan model tersebut dapat digunakan pada tekanan rendah dan tinggi, juga dengan mengasumsikan bahwa permukaan adsorben adalah heterogen.

Oleh karenanya panas adsorpsi isosterik didapat dengan menyelesaikan persamaan model Toth.

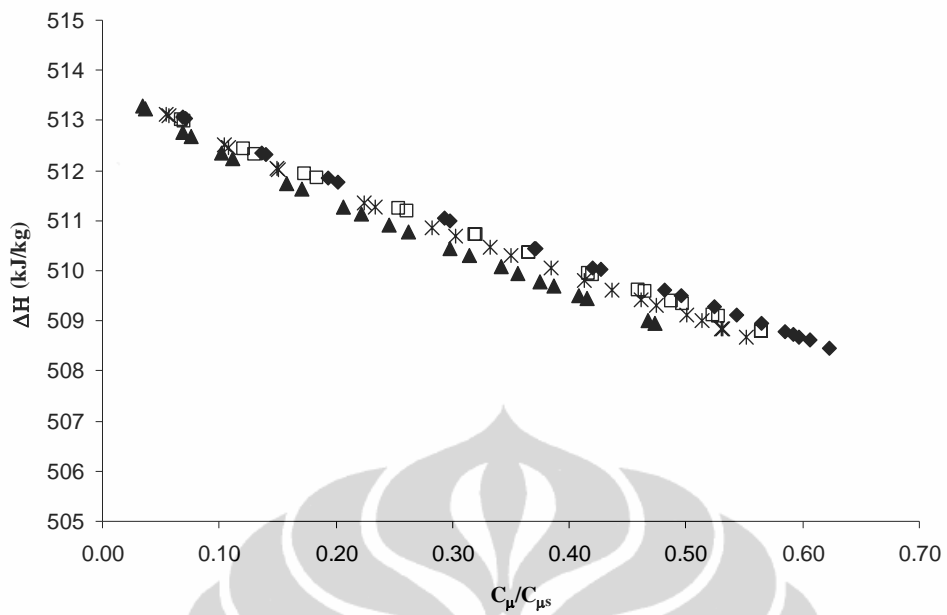
Persamaan panas adsorpsi isosterik model Toth adalah sebagai berikut (Do., Duong. D, 2008):

$$-(\Delta H) = Q - \frac{1}{t} (\alpha \cdot R_g \cdot T) \left\{ \ln \left[\frac{C_\mu}{(C_{\mu s}^t - C_\mu^t)^{1/t}} \right] - \frac{\ln(C_\mu / C_{\mu s})}{1 - (C_\mu / C_{\mu s})^t} \right\} \quad (4.1)$$

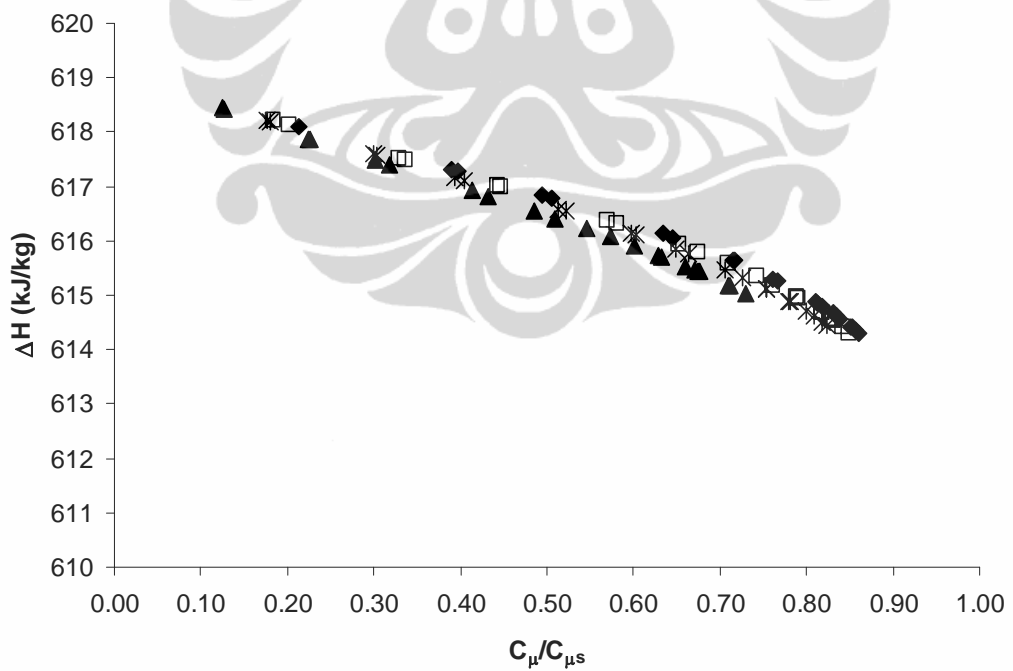
4.4.1 Panas Adsorpsi Isosterik (Isosteric Heat of Adsorption) Karbon dioksida pada Karbon Aktif

Gambar 4.46 sampai dengan Gambar 4.48 adalah grafik panas adsorpsi isosterik CO₂ pada karbon aktif. Panas adsorpsi isosterik diperoleh dengan menyelesaikan persamaan panas adsorpsi model Toth.

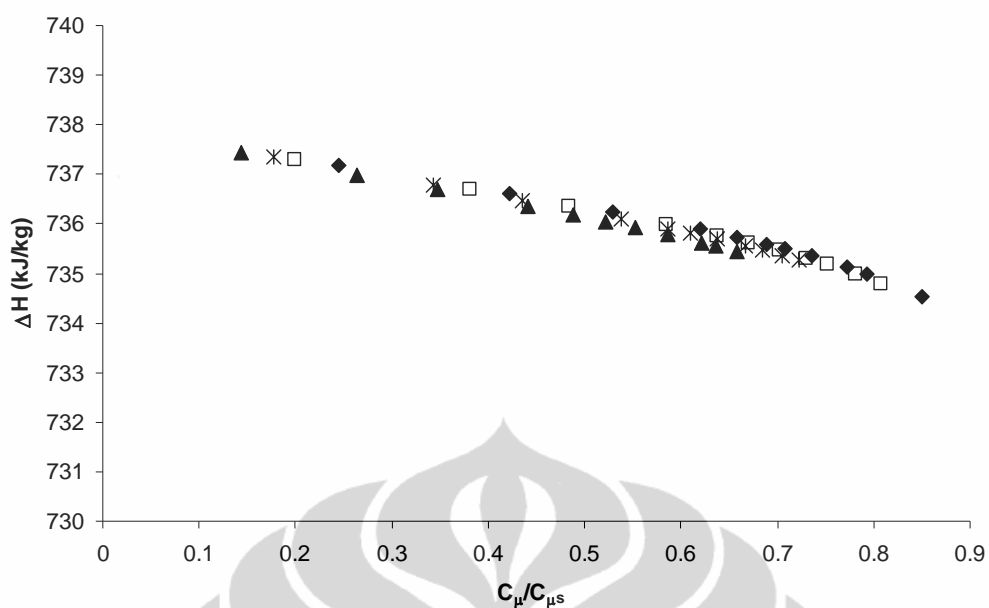
Pada Gambar 4.46 sampai dengan Gambar 4.48 terlihat bahwa temperatur adsorpsi sangat berpengaruh terhadap panas adsorpsi yang dilepaskan, Semakin rendah temperatur adsorpsi maka panas adsorpsi yang dilepaskan akan semakin besar.



Gambar 4.46 Panas Adsorpsi Isosterik CO_2 pada Karbon Aktif Komersial; ♦ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C

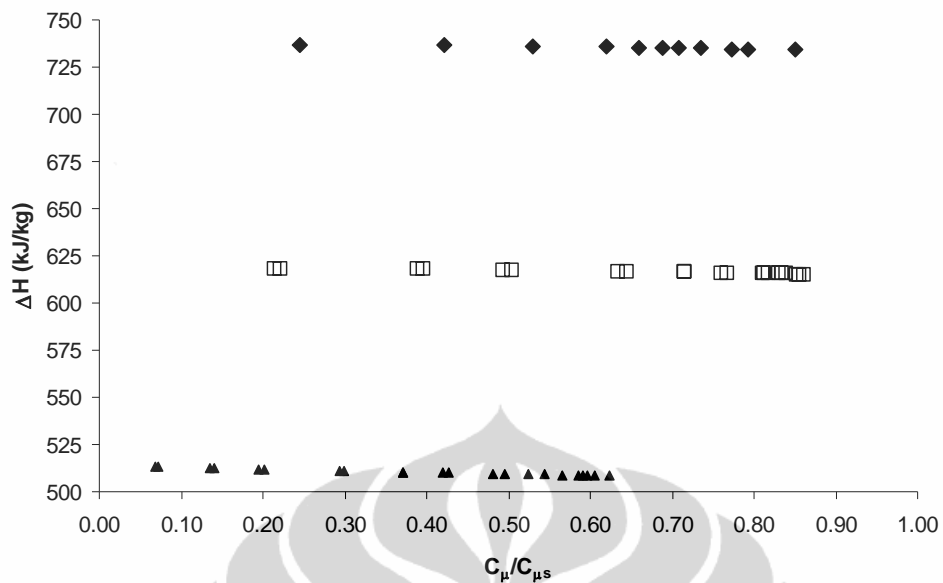


Gambar 4.47 Panas Adsorpsi Isosterik CO_2 pada Karbon Aktif KT; ♦ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C



Gambar 4.48 Panas Adsorpsi Isosterik CO₂ pada Karbon Aktif RU; ◆ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C

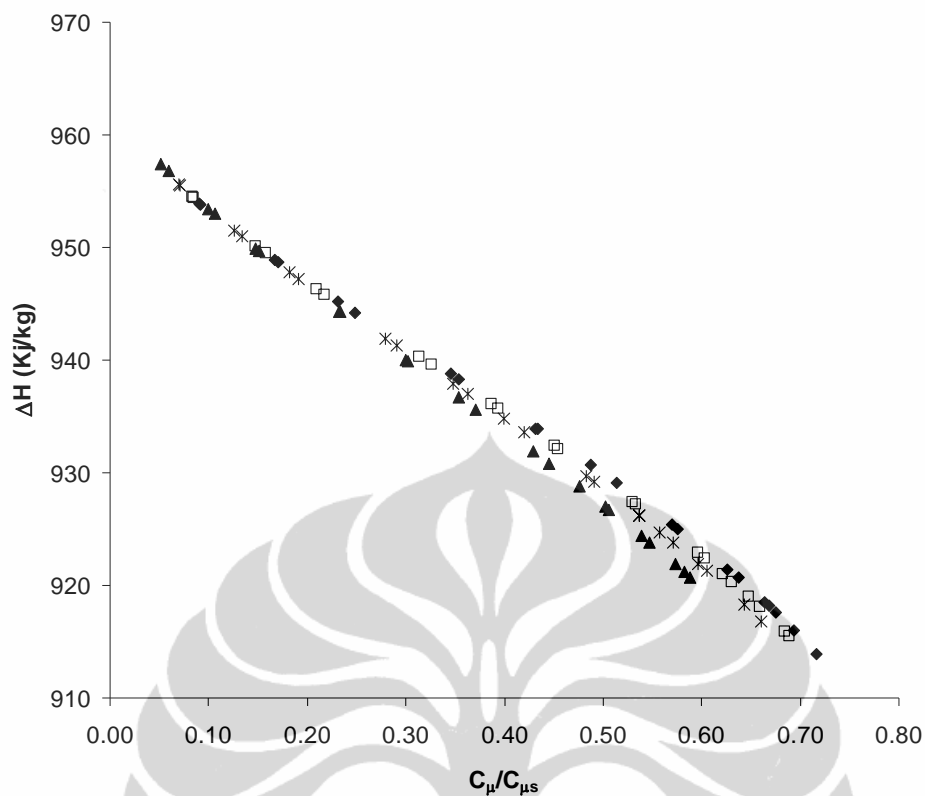
Gambar 4.49 adalah grafik komparasi panas adsorpsi isosterik CO₂ pada beberapa karbon aktif pada temperatur 27°C. Pada Gambar 4.49 terlihat bahwa panas adsorpsi isosterik yang dilepaskan pada karbon aktif RU adalah yang terbesar dibanding dengan karbon aktif lainnya. Hal tersebut dikarenakan karbon aktif RU memiliki karakter kualitas yang rendah, dengan kapasitas penyerapan yang paling rendah seharusnya pada karbon aktif RU jumlah panas yang dilepas pada proses adsorpsi juga paling rendah.



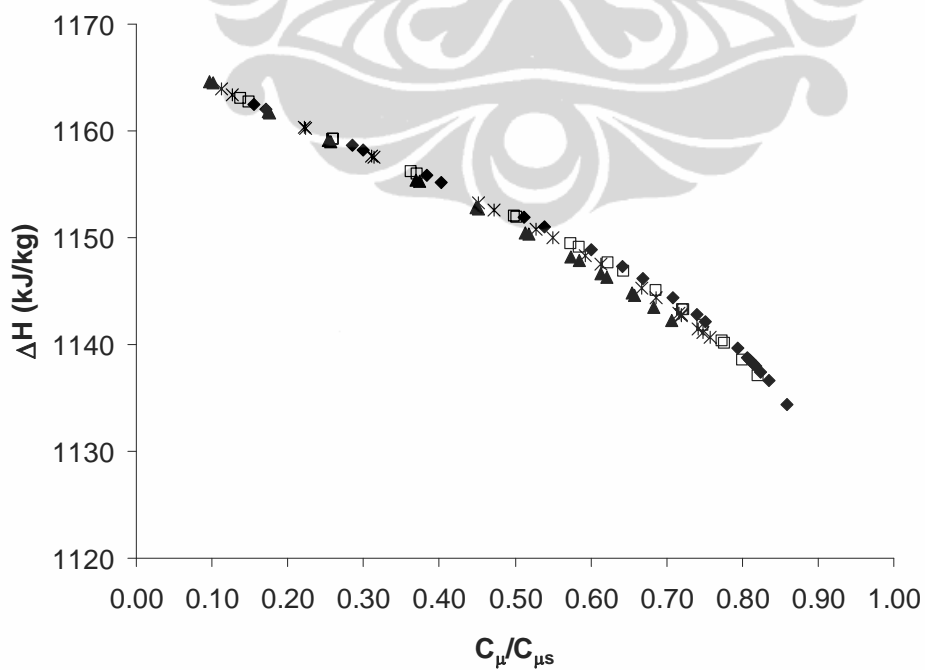
Gambar 4.49 Komparasi Panas Adsorpsi Isosterik CO_2 pada Karbon Aktif pada Temperatur 27°C ; ♦ Karbon Aktif RU; □ Karbon Aktif KT; ▲ Karbon Aktif Komersial

4.4.2 Panas Adsorpsi Isosterik (Isosteric Heat of Adsorption) Metana pada Karbon Aktif

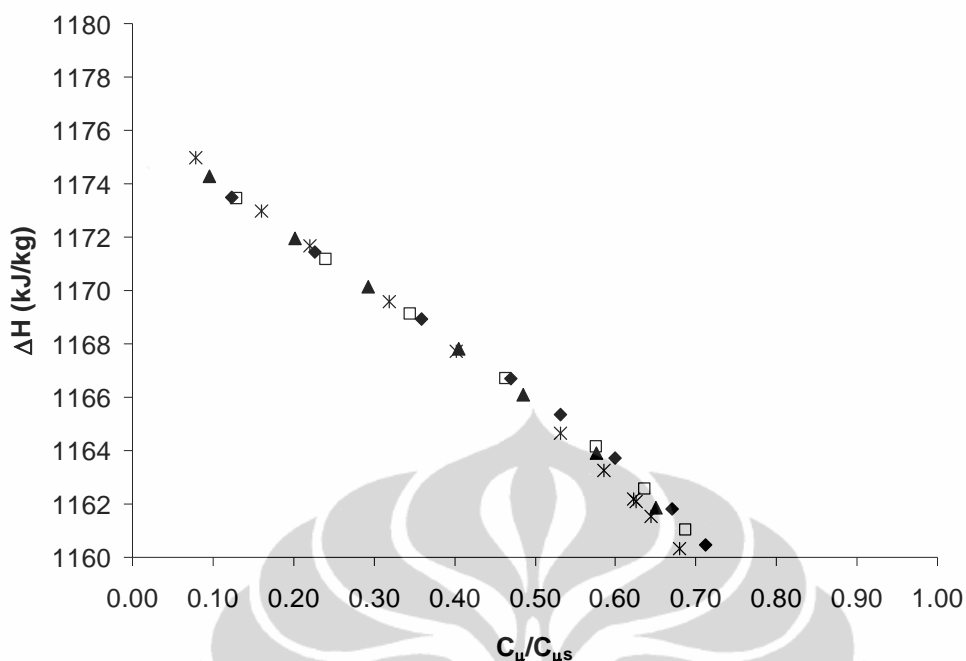
Pada Gambar 4.50 sampai dengan Gambar 4.52 adalah grafik panas adsorpsi isosterik CH_4 pada karbon aktif. Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, bahwa temperatur adsorpsi sangat berpengaruh terhadap panas adsorpsi yang dilepaskan. Semakin rendah temperatur adsorpsi maka panas adsorpsi yang dilepaskan semakin akan besar.



Gambar 4.50 Panas Adsorpsi Isosterik CH_4 pada Karbon Aktif Komersial;
 ◆ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C

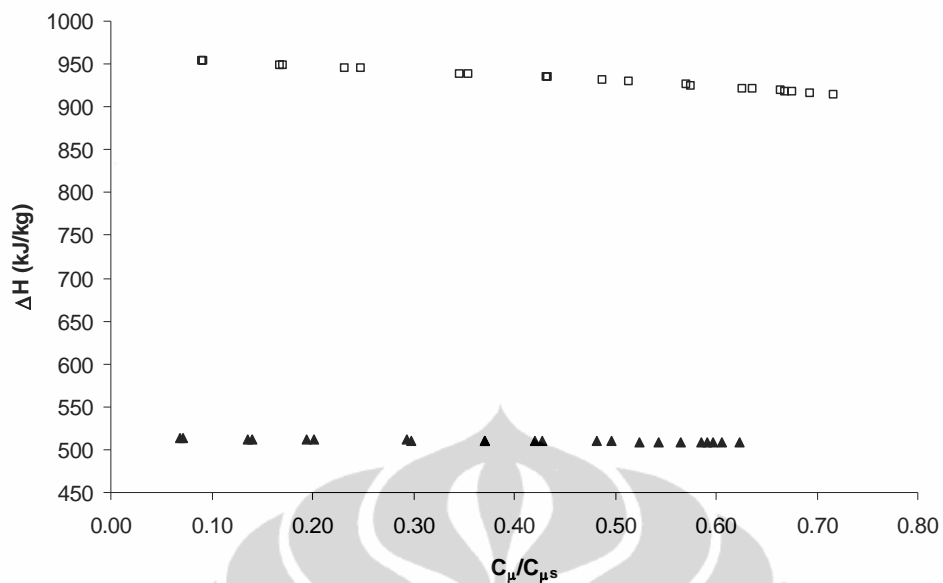


Gambar 4.51 Panas Adsorpsi Isosterik CH_4 pada Karbon Aktif KT;
 ◆ 27°C; □ 35°C; * 45°C; ▲ 65°C



Gambar 4.52 Panas Adsorpsi Isosterik CH_4 pada Karbon Aktif RU;
♦ 27°C ; □ 35°C ; * 45°C ; ▲ 65°C

Gambar 4.53 adalah grafik panas adsorpsi isosterik CO_2 dan CH_4 pada karbon aktif komersial pada temperatur 27°C . Dari gambar terlihat bahwa panas adsorpsi isosterik yang dilepaskan pada proses adsorpsi isotermaal CO_2 pada karbon aktif lebih kecil dibanding dengan adsorpsi isotermaal CH_4 , hal tersebut terjadi karena pada tekanan dan temperatur yang sama, entalpi CO_2 jauh lebih kecil dibanding dengan entalpi CH_4 , sehingga proses penyerapan pada CH_4 akan melepaskan panas yang lebih besar dibanding pada adsorpsi CO_2 .



Gambar 4.53 Komparasi Panas Adsorpsi Isosterik CO_2 dan CH_4 pada Karbon Aktif Komersial pada Temperatur $27^{\circ}C$; ▲ CO_2 ; □ CH_4

4.5 ADSORPSI ISOSTERIK

Data adsorpsi isosterik diperlukan untuk dapat memprediksi besar tekanan yang dibutuhkan dan temperatur isothermal yang harus dikondisikan untuk dapat menyerap massa adsorbat dalam jumlah yang telah ditentukan.

Data adsorpsi isosterik diperoleh dengan menyelesaikan persamaan model Toth. Seperti telah diuraikan sebelumnya pada persamaan 2.18 bahwa persamaan Toth adalah:

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

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

$$[1 + (b.P)^t]^{1/t} = \frac{b.P}{C_{\mu} / C_{\mu s}} \quad (4.2)$$

$$\left(\frac{b}{C_{\mu} / C_{\mu s}} \right)^t P^t = [1 + (b.P)^t] \quad (4.3)$$

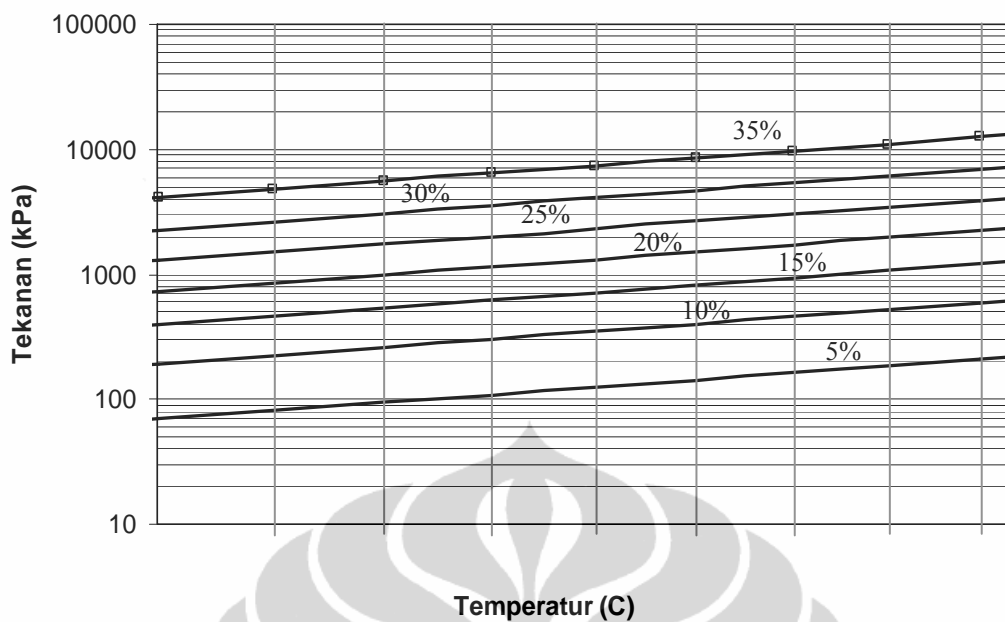
$$P^t \left[\left(\frac{b}{C_{\mu} / C_{\mu s}} \right)^t - b^t \right] = 1 \quad (4.4)$$

$$P^t = \frac{1}{\left[\left(\frac{b}{C_{\mu} / C_{\mu s}} \right)^t - b^t \right]} \quad (4.5)$$

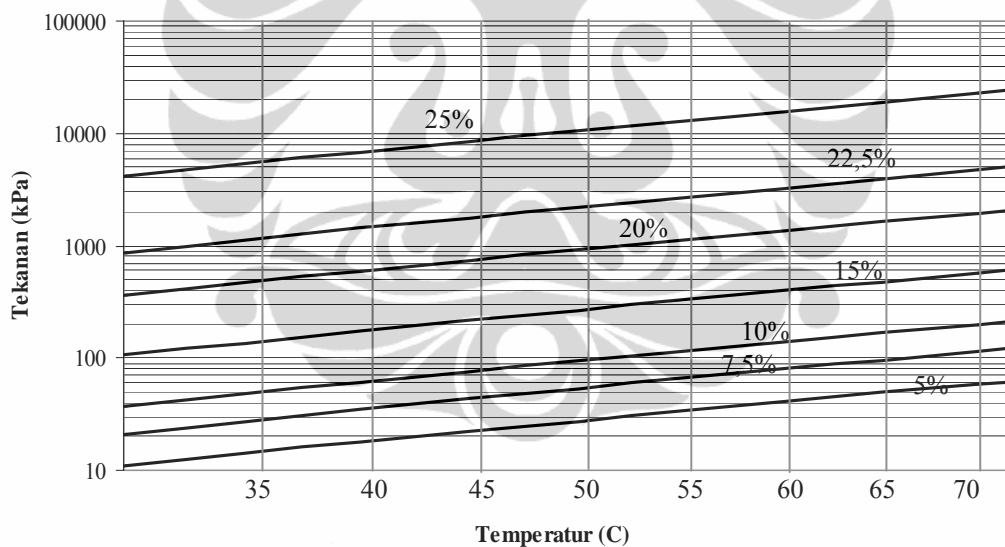
$$P = \frac{1}{\left[\left(\frac{b}{C_{\mu} / C_{\mu s}} \right)^t - b^t \right]^{\frac{1}{t}}} \quad (4.6)$$

4.5.1 Adsorpsi Isosterik Karbon Dioksida (CO₂) Pada Karbon Aktif

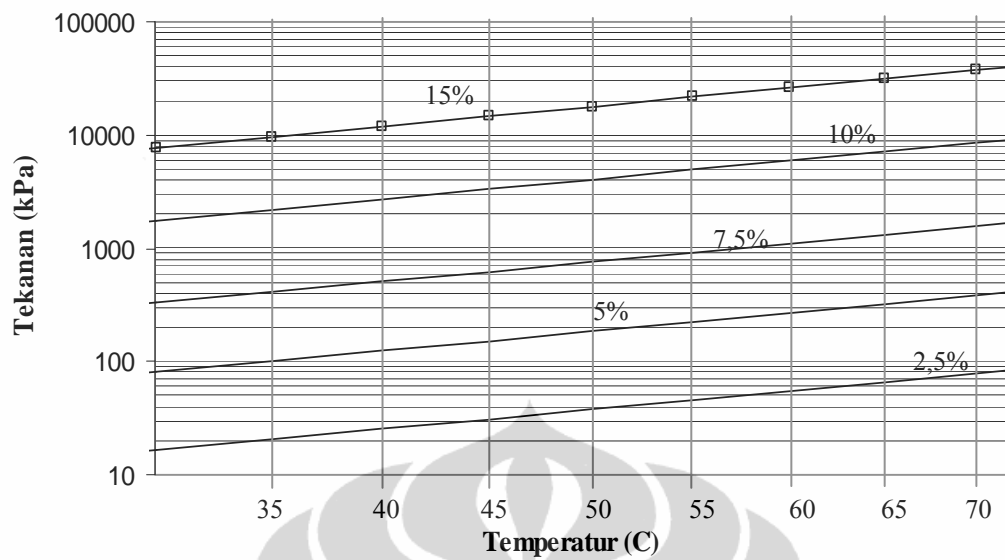
Gambar 4.54 sampai dengan Gambar 4.56 adalah grafik adsorpsi isosterik CO₂ pada karbon aktif. Gambar-gambar tersebut sangat berguna, karena dapat dijadikan sebagai data dasar perancangan sistem adsorpsi. Dengan grafik tersebut dapat diprediksi tekanan penyerapan yang dibutuhkan dan temperatur yang harus dikondisikan untuk menyerap CO₂ pada jumlah tertentu.



Gambar 4.54 Adsorpsi Isosterik CO₂ pada Karbon Aktif Komersial



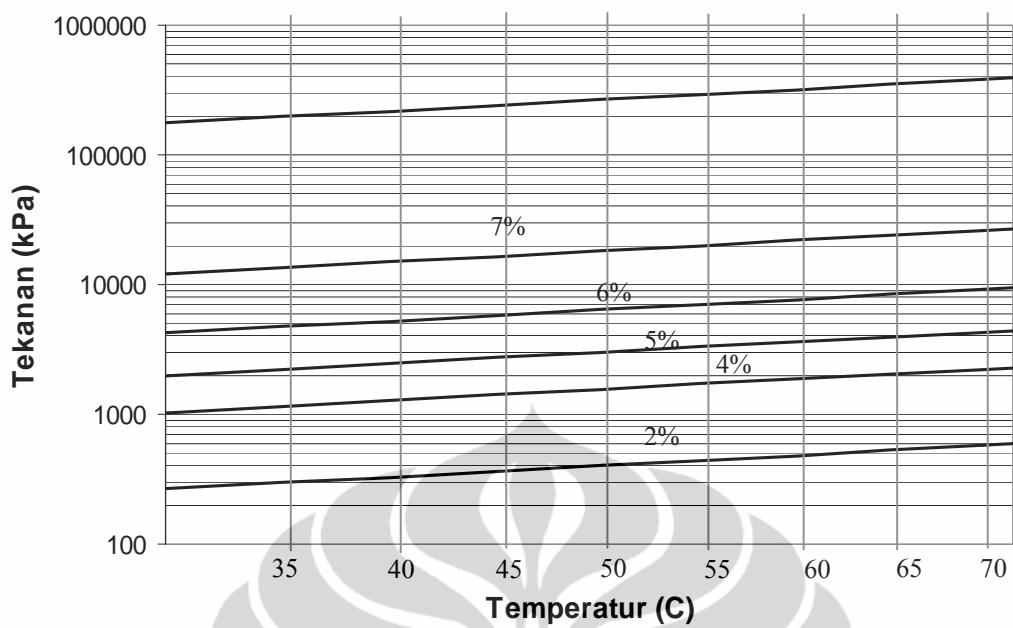
Gambar 4.55 Adsorpsi Isosterik CO₂ pada Karbon Aktif KT



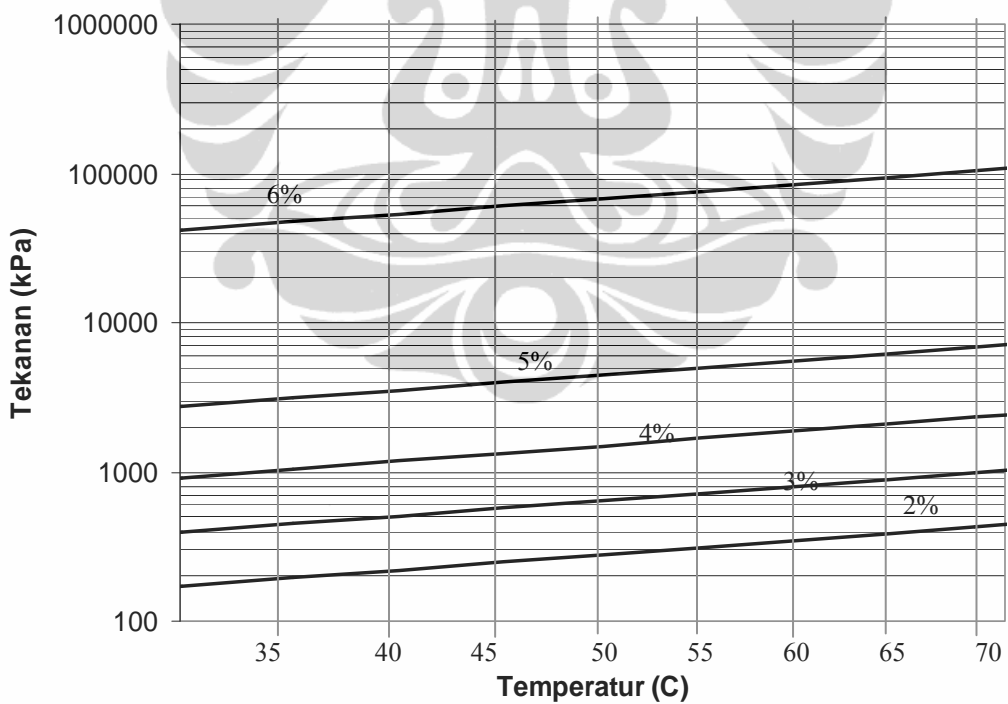
Gambar 4.56 Adsorpsi Isosterik CO₂ pada Karbon Aktif RU

4.5.2 Adsorpsi Isosterik Metana (CH₄) Pada Karbon Aktif

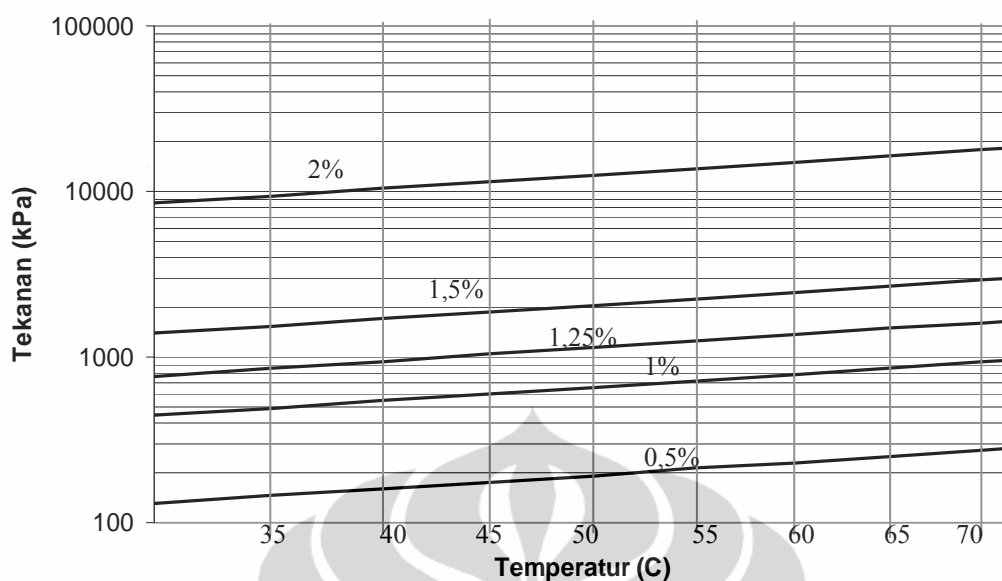
Gambar 4.57 sampai dengan Gambar 4.59 adalah grafik adsorpsi isosterik CH₄ pada karbon aktif. Gambar-gambar tersebut sangat berguna, karena dapat dijadikan sebagai data dasar perancangan sistem adsorpsi. Dengan grafik tersebut dapat diprediksi tekanan penyerapan yang dibutuhkan dan temperatur yang harus dikondisikan untuk menyerap CH₄ pada jumlah tertentu.



Gambar 4.57 Adsorpsi Isosterik CH₄ pada Karbon Aktif Komersial



Gambar 4.58 Adsorpsi Isosterik CH₄ pada Karbon Aktif KT



Gambar 4.59 Adsorpsi Isosterik CH₄ pada Karbon Aktif RU

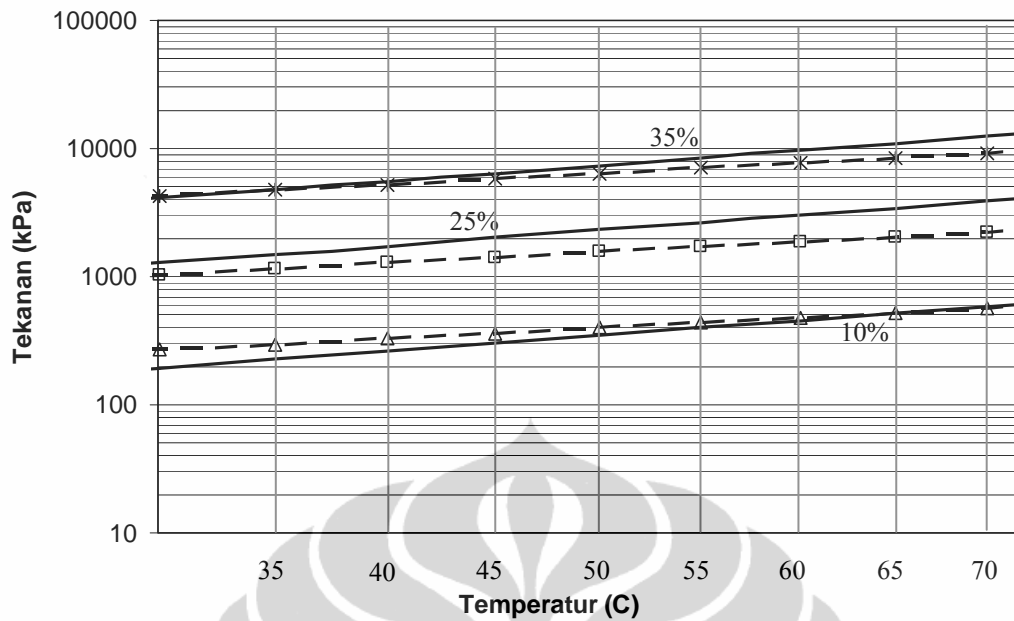
4.6 PEMURNIAN GAS ALAM

Sistem adsorpsi adalah salah satu metode alternatif yang dapat memisahkan karbon dioksida dari gas alam yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan. Hal tersebut dimungkinkan karena diameter molekul CO₂ (0,33 nm) lebih kecil dibanding dengan diameter molekul CH₄ (0,4 nm) sehingga dengan demikian molekul CO₂ akan lebih cepat terserap oleh karbon aktif (Marsh, Harry, et al., 2006).

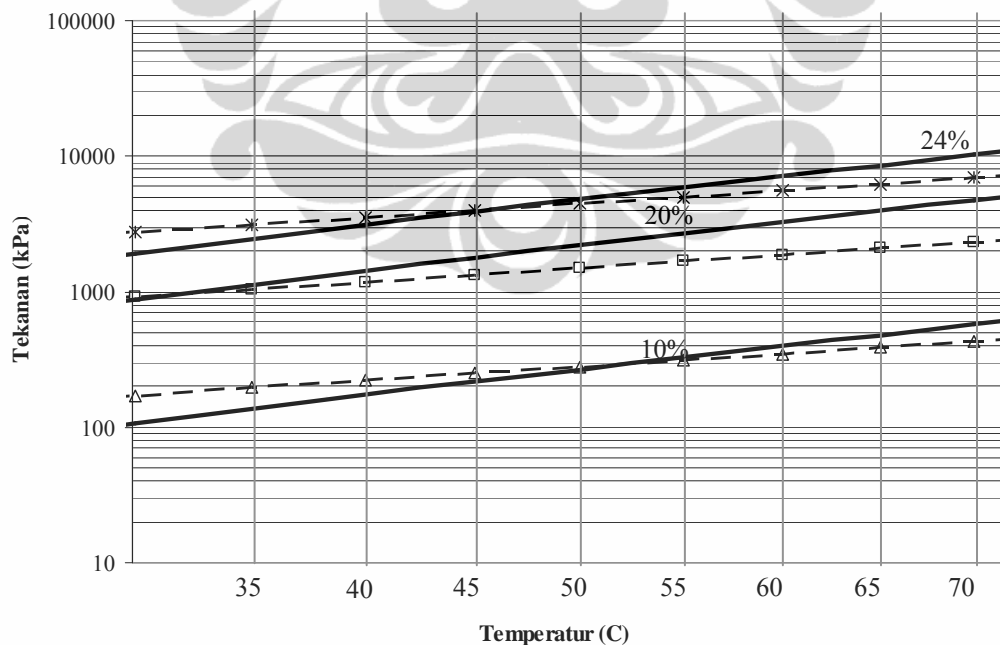
Pada Gambar 4.60 sampai dengan Gambar 4.62 terlihat grafik adsorpsi isosterik CO₂ dan CH₄ pada karbon aktif, dari grafik tersebut terlihat bahwa pada tekanan dan temperatur yang hampir sama jumlah CO₂ dan CH₄ yang terserap pada karbon aktif berbeda. Pada karbon aktif komersial untuk tekanan dan temperatur yang hampir sama, pada penyerapan CO₂ sebesar 35% jumlah CH₄ yang terserap hanya sekitar 6%.

Pada karbon aktif KT untuk tekanan dan temperatur yang hampir sama, pada penyerapan CO₂ sebesar 24% jumlah CH₄ yang terserap hanya sekitar 5%.

Pada karbon aktif RU untuk tekanan dan temperatur yang hampir sama, pada penyerapan CO₂ sebesar 11,5% jumlah CH₄ yang terserap hanya sekitar 2%.

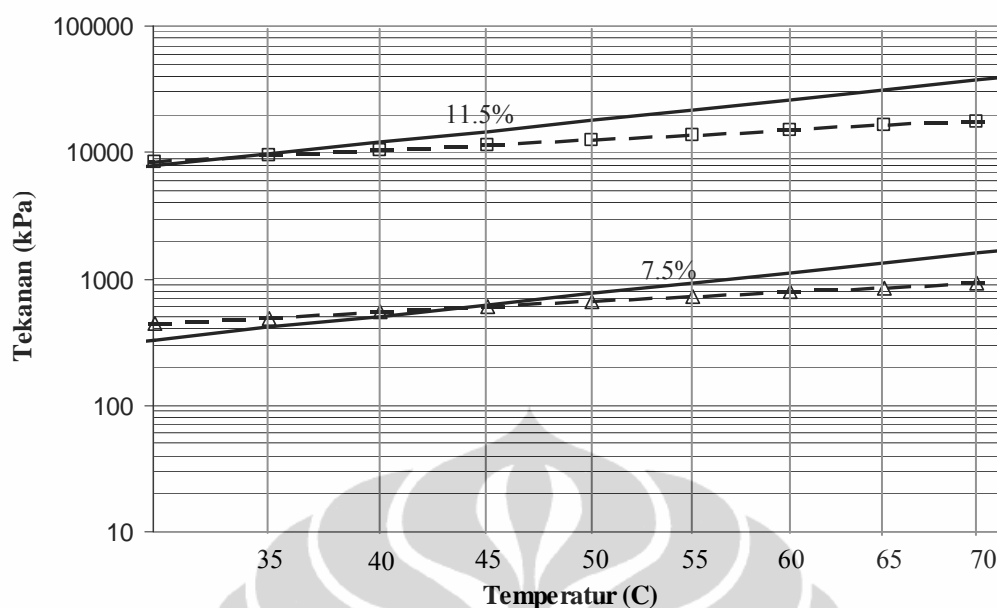


Gambar 4.60 Adsorpsi Isosterik CO_2 dan CH_4 pada Karbon Aktif Komersial; Garis lurus tebal adalah adsorpsi isosterik CO_2 ; ---*--- Adsorpsi Isosterik CH_4 dengan Persentasi Penyerapan 6%; ---□--- Adsorpsi Isosterik CH_4 dengan Persentasi Penyerapan 4%; ---Δ--- Adsorpsi Isosterik CH_4 dengan Persentasi Penyerapan 2%



Gambar 4.61 Adsorpsi Isosterik CO_2 dan CH_4 pada Karbon Aktif KT; Garis lurus tebal adalah adsorpsi isosterik CO_2 ; ---*--- Adsorpsi Isosterik CH_4 dengan Persentasi Penyerapan 5%; ---□--- Adsorpsi Isosterik CH_4 dengan Persentasi Penyerapan 4%; ---Δ--- Adsorpsi Isosterik CH_4 dengan Persentasi Penyerapan 2%

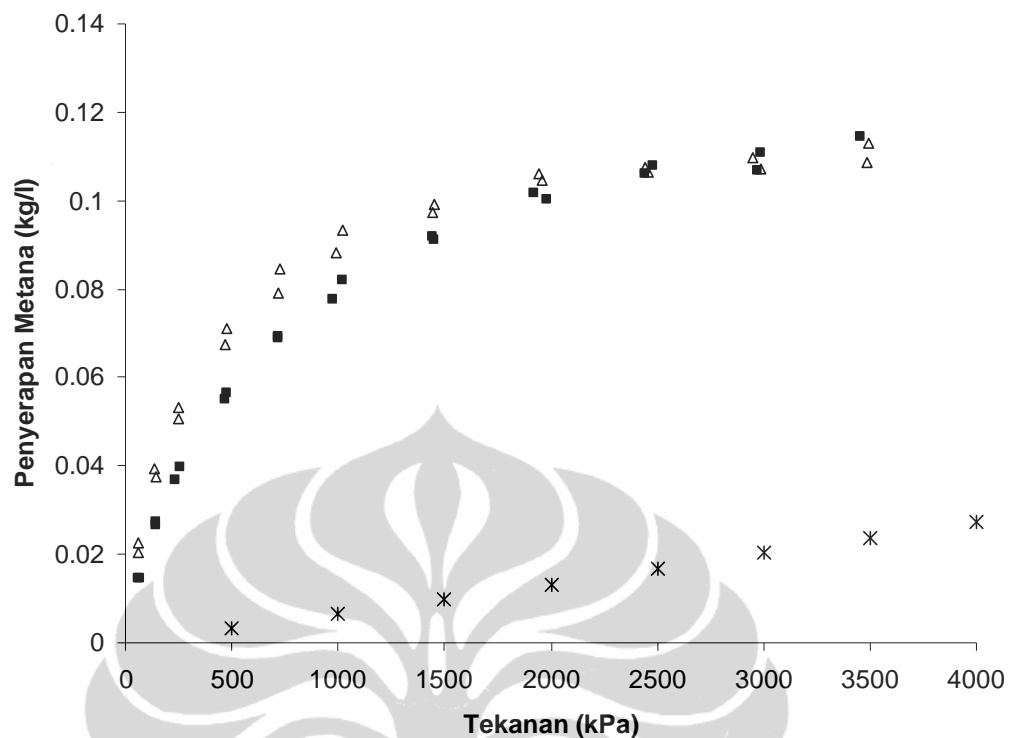
Universitas Indonesia



Gambar 4.62 Adsorpsi Isosterik CO₂ dan CH₄ pada Karbon Aktif RU; Garis lurus tebal adalah adsorpsi isosterik CO₂; ---□--- Adsorpsi Isosterik CH₄ dengan Persentasi Penyerapan 2%; ---△--- Adsorpsi Isosterik CH₄ dengan Persentasi Penyerapan 1%

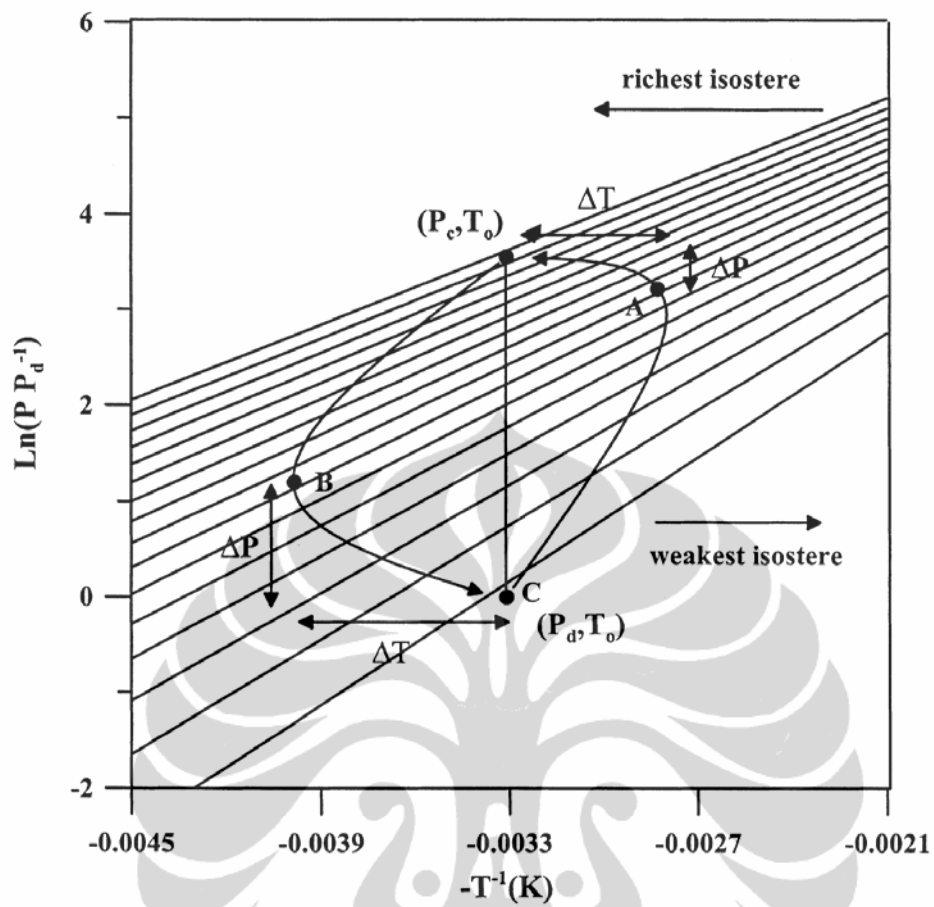
4.7 PENYIMPANAN GAS ALAM (ADSORBED NATURAL GAS)

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa *adsorbed natural gas* adalah metode penyimpanan bahan bakar gas yang lebih murah dan aman dibandingkan dengan menggunakan *compressed natural gas*, hal tersebut dikarenakan sistem penyerapan (adsorption system) membutuhkan tekanan penyimpanan yang lebih rendah pada temperatur ruang (Himeno, Shuji et al., 2005 dan Pupier, O., et al., 2005). Gambar 4.63 menjelaskan perbandingan penyerapan metana dengan karbon aktif dan tanpa karbon aktif. Karbon aktif yang digunakan sebagai perbandingan adalah karbon aktif komersial dan karbon aktif KT. Dari data diketahui bahwa pada tekanan dan temperatur yang sama penyimpanan metana dengan karbon aktif 4 kali lebih besar dibandingkan tanpa karbon aktif.



Gambar 4.63 Komparasi penyimpanan gas Metana dengan Karbon Aktif dan Tanpa Karbon Aktif; Δ Karbon Aktif KT; \blacksquare Karbon Aktif Komersial; * Penyimpanan Metana Tanpa Karbon Aktif

Pada aplikasi *Adsorbed Natural Gas (ANG) Storage* grafik adsorpsi isosterik dibutuhkan untuk memprediksi tekanan pengisian dan temperatur maksimum yang tercapai pada proses adsorpsi gas alam. Pada Gambar 4.64 terlihat grafik adsorpsi isosterik pada proses pengisian dan pelepasan gas pada sistem, dengan menggunakan grafik adsorpsi isosterik juga dapat diprediksi jumlah gas alam yang tersisa pada karbon aktif pada tekanan pelepasan minimum. Sehingga dengan grafik tersebut dapat diperkirakan siklus pengisian dan pelepasan gas alam pada karbon aktif pada tekanan dan temperatur isothermal tertentu.



Gambar 4.64 Grafik Adsorpsi Isosterik Gas Alam pada Karbon Aktif
(Biloe, S. Et al., 2002)

BAB 5

KESIMPULAN

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

1. Karbon aktif berbahan dasar batubara Kalimantan Timur memiliki kualitas yang lebih baik dibanding dengan karbon aktif berbahan dasar batubara Riau, hal tersebut dikarenakan batubara Kalimantan Timur memiliki perbandingan unsur oksigen dan karbon yang lebih besar dan memiliki kandungan abu yang lebih kecil dibanding dengan batubara Riau. Angka *Iodine* maksimum pada karbon aktif berbahan dasar batubara Riau adalah 589,1 ml/g, sementara karbon aktif berbahan dasar batubara Kalimantan Timur sampai dengan 879 ml/g
2. Karbon aktif yang diproses dengan posisi *autoclave* vertikal menghasilkan karbon aktif yang lebih baik dibanding dengan posisi *autoclave* horisontal model 1, hal tersebut dikarenakan pada posisi vertikal gas oksigen dan karbon dioksida yang dialirkan saat proses karbonisasi dan aktivasi terdistribusi lebih merata dibanding dengan posisi horisontal model 1.
3. Kapasitas maksimum penyerapan CO₂ dan CH₄ terjadi pada karbon aktif komersial, hal tersebut dikarenakan luas permukaan dan volume total pori karbon aktif komersial lebih tinggi dibanding karbon aktif berbahan dasar batubara Kalimantan Timur dan batubara Riau.
4. Kapasitas penyerapan CO₂ pada karbon aktif komersial (CB) maksimum adalah 0,349 kg/kg pada temperatur 27°C dan tekanan 3384,69 kPa, sementara untuk karbon aktif Kalimantan Timur (KT) adalah 0,227 kg/kg pada temperatur 27°C dan tekanan 3469,27 kPa dan untuk karbon aktif Riau (RU) adalah 0,115 kg/kg pada temperatur 27°C dan tekanan 3418,87 kPa.
5. Kapasitas penyerapan CH₄ pada karbon aktif CB maksimum adalah 0,0589 kg/kg pada temperatur isothermal 27°C dan tekanan 3457,2 kPa, sementara untuk karbon aktif KT adalah 0,0532 kg/kg pada temperatur

27°C dan tekanan 3495,75 kPa dan untuk karbon aktif RU adalah 0,0189 kg/kg pada temperatur 27°C dan tekanan 3439,96 kPa.

6. Korelasi yang dilakukan menghasilkan simpangan atau deviasi yang beragam. Simpangan terbesar terjadi pada persamaan model Dubinin-Astakhov, hal tersebut dikarenakan persamaan model Dubinin-Astakhov lebih cocok digunakan pada tekanan tinggi, yaitu tekanan di atas tekanan kritis CO₂ dan CH₄.
7. Simpangan terkecil adalah dengan menggunakan persamaan model Toth, untuk itu persamaan model Toth adalah persamaan yang paling cocok digunakan pada penelitian ini dimana nilai simpangan antara data eksperimen adsorpsi isothermal CO₂ dengan korelasi persamaan model Toth adalah 3,886% (CB), 3,008% (KT) dan 2,962% (RU). Sementara untuk adsorpsi isothermal CH₄ adalah 2,86% (CB), 2,817 (KT), dan 5,257% (RU)
8. Panas adsorpsi yang dilepas pada proses adsorpsi sangat bergantung pada jumlah adsorbat yang terserap, semakin besar jumlah adsorbat yang terserap maka panas adsorpsi yang dilepas juga semakin besar.
9. Data adsorpsi isosterik dibutuhkan untuk dapat memprediksi tekanan dan temperatur isothermal yang harus dikondisikan yang digunakan untuk menyerap CO₂ dan CH₄ pada jumlah tertentu. Selain itu, untuk aplikasi sistem penyimpanan gas alam (*ANG storage*), grafik adsorpsi isosterik dibutuhkan untuk mengetahui kondisi pengisi gas dan dengan grafik tersebut juga dapat diketahui berapa banyak adsorbat yang masih tersisa pada adsorben pada tekanan dan temperatur akhir pelepasan (desorpsi) gas.

DAFTAR REFERENSI

- 1 Alhamid, M. Idrus, Bambang Suryawan, Nasruddin, Awaludin Martin, Sehat Abdi, *Characterization of Activated Carbon as Adsorbent From Riau Coal by Physical Activation Method*, The First International Meeting on Advances in Thermo-fluids, University Technology Malaysia, Malaysia, 26th August 2008
- 2 B. Serrano-Talavera, M. J. Muñoz-Guillena, A. Linares-Solano, and C. Salinas-Martínez de Lecea, 1997, *Activated Carbons from Spanish Coals 3: Preoxidation Effect on Anthracite Activation*, *Energy & Fuels* 1997, 11, 785-791
- 3 Bansal, Roop Chand & Meenakshi Goyal, 2005, *Activated Carbon Adsorption*, Taylor & Francis Group, USA
- 4 Belmabkhout, Y., M Frère and G. DeWeireld, 2004, *High-pressure adsorption measurements. A comparative study of the volumetric and gravimetric methods*, *Meas. Sci. Technol.* 15 (2004) 848–858
- 5 Biloe, S., V. Goetz, A. Guillot, 2002, *Optimal Design of An Activated Carbon for an Adsorbed Natural Gas Storage System*, *Carbon* 40 (2002) 1295 – 1308
- 6 Castello, D. Lozano, Alcaniz Monge, M.A. de la Casa-Lillo, D. Cazorla-Amoros, A. Linares-Solano, 2002, *Advances in the Study of Methane Storage in Porous Carbonaceous Materials*, *Fuel*, 81 (2002) 1777-1803
- 7 Dawoud, Belal, Yuri Aristov, 2003, *Experimental Study on The Kinetics of Water Vapor Sorption on Selective Water Sorbent, Silica Gel and Alumina Under Typical Operating Conditions of Sorption Heat Pumps*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp 273-281
- 8 Do, Duong D., 2008, *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore
- 9 Illan-Gomez, M.J., A. Garcia-Garcia, C. Salinas-Martinez de Lecea and A. Linares-Solano, 1996, *Activated Carbon from Spanish Coals 2: Chemical Activation*, *Energy & Fuels*, 1996, 10, 1108-1114

- 10 Keller, Jürgen U, Reiner Staudt, 2005, *Gas adsorption equilibria; Experimental methods and Adsorptive isotherms*, Springer Science + Business Media, Inc., Boston, United States of America, 2005
- 11 Krooss, B.M., F. van Bergen, Y. Gensterblum, N. Siemons, H.J.M. Pagnier, P. David, *High-pressure methane and carbon dioxide adsorption on dry and moisture-equilibrated Pennsylvanian coals*, International Journal of Coal Geology 51, 2002, 69– 92
- 12 Lee, Jong-Seok, Jong-Hwa Kim, Jin-Tae Kim, Jeong-Kwon Suh, Jung-Min Lee, and Chang-Ha Lee, 2002, *Adsorption Equilibria of CO₂ on Zeolite 13X and Zeolite X/Activated Carbon Composite*, J.Chem. Eng. Data, 2002, 47, 1237-1242
- 13 Lee, Jae-Wook, M. S. Balathanigaimani, Hyun-Chul Kang, Wang-Geun Shim, Chan Kim, and Hee Moon, 2007, *Methane Storage on Phenol-Based Activated Carbons at (293.15, 303.15, and 313.15) K*, J. Chem. Eng. Data 2007, 52, 66-70
- 14 Manocha, Satish. M, 2003, *Porous Carbons*, Sadhana volume 28 part 1 & 2 pp 335-348, India
- 15 Marsh, Harry and Francisco Rodriguez-Reinoso, *Activated Carbon*, Elsevier Ltd, Oxford, UK, 2006
- 16 Martin, Awaludin, Arfie I. Firmansyah, Bambang Suryawan, M. Idrus Alhamid, Nasruddin, 2008, *Design, Manufacturing and Testing Kinetic Adsorption Test Rig*, Sriwijaya International Seminar on Energy Science and Technology, Universitas Sriwijaya, Palembang, 5-6 Nov 2008
- 17 Martin, Awaludin, Bambang Suryawan, M. Idrus Alhamid, Nasruddin, 2008, *Karakteristik Karbon Aktif sebagai Adsorben dari Batubara pada Temperatur Karbonisasi 900°C dan Temperatur Aktivasi 950°C*, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin 7, Universitas Sam Ratulangi, Manado, 4-6 November 2008
- 18 Martin, Awaludin, Bambang Suryawan, M. Idrus Alhamid, Nasruddin, 2009, *Preparation of Activated Carbon from Low Rank Coal with CO₂ activation*, International Meeting of Advance Thermofluid, Taman Safari, Indonesia, 16-17th November 2009

- 19 Nugroho, Yulianto S., 2000, *Self – Ignition of Indonesia Coal*, PhD Thesis, Leeds University, UK, pp 98
- 20 Pengkajian Energi Universitas Indonesia, 2006, *Indonesia Energy Outlook and Statistics*, FTUI, Depok
- 21 Prauchner, Marcos J., Francisco Rodri ´guez-Reinoso, 2008, *Preparation of granular activated carbons for adsorption of natural gas, Microporous and Mesoporous Materials*, 109 (2008) 581–584
- 22 Pupier,O., V. Goetz, R. Fiscal, 2005, *Effect of cycling operations on an adsorbed natural gas storage, Chemical Engineering and Processing* 44 (2005) 71–79
- 23 Rouquerol, Jean, François Rouquerol, Kenneth Sing,1998, *Adsorption By Powders And Porous Solids*, Elsevier
- 24 Ruthven, D. M. *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*; John Wiley & Sons: New York, 1984
- 25 Salako Abiodun, Ebenezer, Prof. J. S. Gudmundsson, 2005, *Removal of carbon dioxide from natural gas for LNG production*, Institute of Petroleum Technology Norwegian University of Science and Technology
- 26 Sertifikat analisis *Proximate* dan *Ultimate* batubara, 2010, Laboratorium Batubara, PT. Geoservices, Bandung
- 27 Shuji Himeno, Toshiya Komatsu, and Shoichi Fujita, 2005, *High-Pressure Adsorption Equilibria of Methane and Carbon Dioxide on Several Activated Carbons*, J. Chem. Eng. Data, 50, 369-376
- 28 Siriwardane, Ranjani V., Ming-Shing Shen, Edward P. Fisher, and James A. Poston, *Adsorption of CO₂ on Molecular Sieves and Activated Carbon, Energy & Fuels* 2001, 15, 279-284
- 29 Speight, James. G., 2005., *Handbook of Coal Analysis*, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, Canada
- 30 Suryawan, Bambang, Awaludin, Martin, M. Idrus Alhamid, Nasruddin, 2008, *Karakteristik Karbon Aktif Sebagai Adsorben Dari Batubara Kalimantan Timur*, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin 7 (SNTTM 7), Universitas Sam Ratulangi, Manado, Sulawesi Utara, 4-6 November 2008

- 31 Suryawan, Bambang, 2004, *Karakteristik Zeolit Indonesia sebagai Adsorben Uap Air*, Disertasi, FTUI, Depok
- 32 Suzuki Motoyuki, *Adsorption Engineering*, 1990, Kodansha Ltd, Tokyo
- 33 Teng, Hsisheng, Jui-An Ho, Yung-Fu Hsu, and Chien-To Hsieh, 1996, *Preparation of Activated Carbons from Bituminous Coals with CO₂ Activation. 1. Effects of Oxygen Content in Raw Coals*, Ind. Eng. Chem. Res., 35 (11), 4043 -4049, American Chemical Society
- 34 Tim Kajian Batubara Nasional, 2006, *Kelompok Kajian Kebijakan Mineral dan Batubara*, Pusat Litbang Teknologi Mineral dan Batubara, Departemen Energi Sumber Daya dan Mineral
- 35 www.pgn.co.id, 10-Februari-2010
- 36 www.wikipedia, 10-Februari-2010
- 37 Yang, Ralph. T, 2003, *Adsorbents: Fundamentals and Applications*, John Wiley and Sons, New Jersey
- 38 Yang, X.D., Q.R. Zheng , A.Z. Gu b, X.S. Lu, 2005, *Experimental studies of the performance of adsorbed natural gas storage system during discharge*, Applied Thermal Engineering 25 (2005) 591–601
- 39 Zou, Yong, Bu-Xing Han, 2001, *High surface Area activated Carbon from Chinese Coal*, Energy & Fuel, 2001, 15, 1383-1386



PT. GEOSERVICES

www.geoservices.co.id

Jl. Setiabudi 79-81
P.O. Box 4 Bandung 40153
INDONESIA

Phone : (022) 203 1316, 203 9464
Fax : (022) 203 8090, 203 1198
E-mail : bdgoff@geoservices.co.id



Page 1 of 3

JOB NO. : 20.10.00917
REPORT NO. : 01/6465

CLIENT : REFRIGERATION & AIR-CONDITIONING LABORATORY
MECHANICAL ENGINEERING DEPT.
UNIVERSITY OF INDONESIA

REPORT ON : The analyses of two coal samples

REPORT TO : Dr. -Ing. Ir. Nasrudin, M.Eng
REFRIGERATION & AIR-CONDITIONING LABORATORY
MECHANICAL ENGINEERING DEPT.
UNIVERSITY OF INDONESIA
Kampus Baru UI Depok 16424

AUTHORIZATION : Letter no. RTU-UI/03/06/10 dated June 24, 2010

DATE : July 06, 2010

Report prepared by,

PT. GEOSERVICES
BANDUNG
Siti Marlia Agustina
Coal Lab Administration

For and on behalf of
PT. GEOSERVICES

PT. GEOSERVICES
Rudy D. Bachlan
Coal Lab Manager

This report is not to be reproduced, except in full, without authority from PT. Geoservices

SAMPLES :

The following samples were received in properly sealed plastic bag from REFRIGERATION & AIR-CONDITIONING LABORATORY MECHANICAL ENGINEERING DEPT. UNIVERSITY OF INDONESIA on June 28, 2010 and were sent by courier.

Lab Sample ID	Client Sample ID	Weight of received sample (g)
BDL 3317/10	RIAU	2642.0
BDL 3318/10	KALTIM	2676.0

Note :

We are responsible only for the analysis result of the sample we received in our laboratory and are not responsible for the sampling process of the above sample.

PREPARATION :

The preparation was performed in accordance with ASTM D2013. A part of the samples was retained for store.

ANALYSES :

All analyses were performed in duplicate and in accordance with standard methods below,

	Standard Methods
Total Moisture	ASTM-D3302
Moisture in the analysis sample	ASTM-D3173
Ash Content	ASTM-D3174
Volatile Matter	ASTM-D3175
Total Sulphur	ASTM-D4239
Calorific Value	ASTM-D5865
Ultimate Analysis	
- Carbon & Hydrogen	ASTM-D3178
- Nitrogen	ASTM-D3179

ASTM - American Society for Testing and Materials

This report is not to be reproduced, except in full, without authority from PT. Geoservices



ANALYSIS RESULTS

Job No. : 20.10.00917
 Report No. : 01/6465
 Client : REFRIGERATION & AIR-CONDITIONING LABORATORY
 MECHANICAL ENGINEERING DEPT.
 UNIVERSITY OF INDONESIA
 Date : July 06, 2010

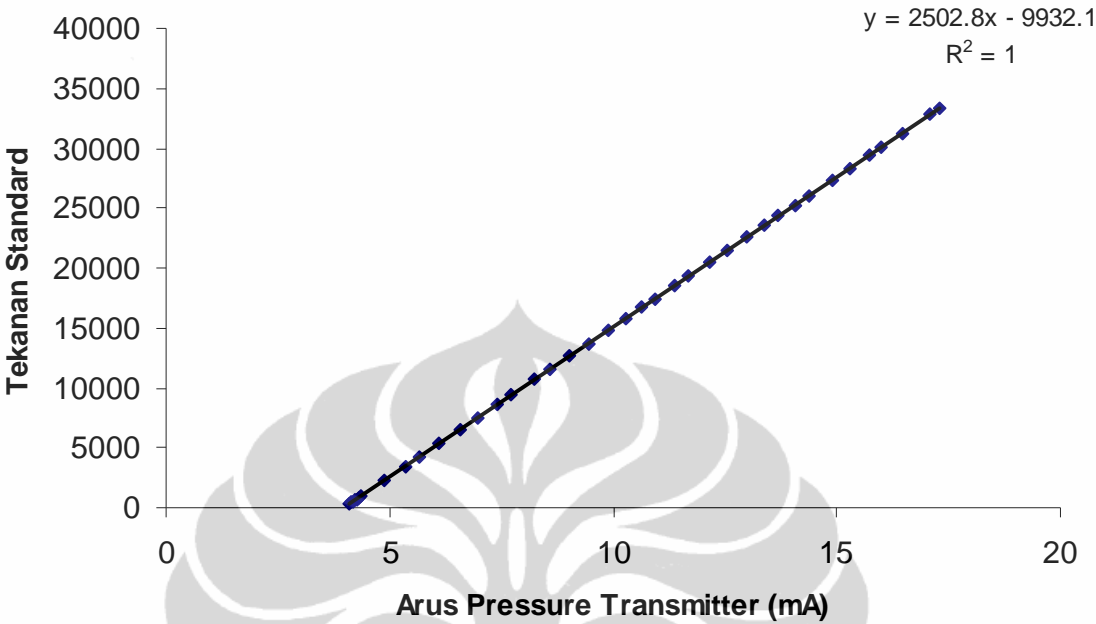
Analysis	Unit	Basis	Client Sample ID :	
			RIAU	KALTIM
			Lab Sample ID :	
			BDL 3317/10	BDL 3318/10
Total Moisture	(%)	ar	5.38	15.99
Moisture in the analysis sample	(%)	adb	3.56	12.11
Ash Content	(%)	adb	18.20	4.03
Volatile Matter	(%)	adb	34.81	43.22
Fixed Carbon	(%)	adb	43.43	40.64
Total Sulphur	(%)	adb	1.82	1.90
Calorific Value	(Cal/g)	adb	6158	5545
Ultimate Analysis				
Carbon	(%)	adb	58.79	56.70
Hydrogen	(%)	adb	3.70	3.50
Nitrogen	(%)	adb	1.39	0.93
Sulphur	(%)	adb	1.82	1.90
Oxygen + Error			12.54	20.83

ar = air received basis
adb = air dried basis

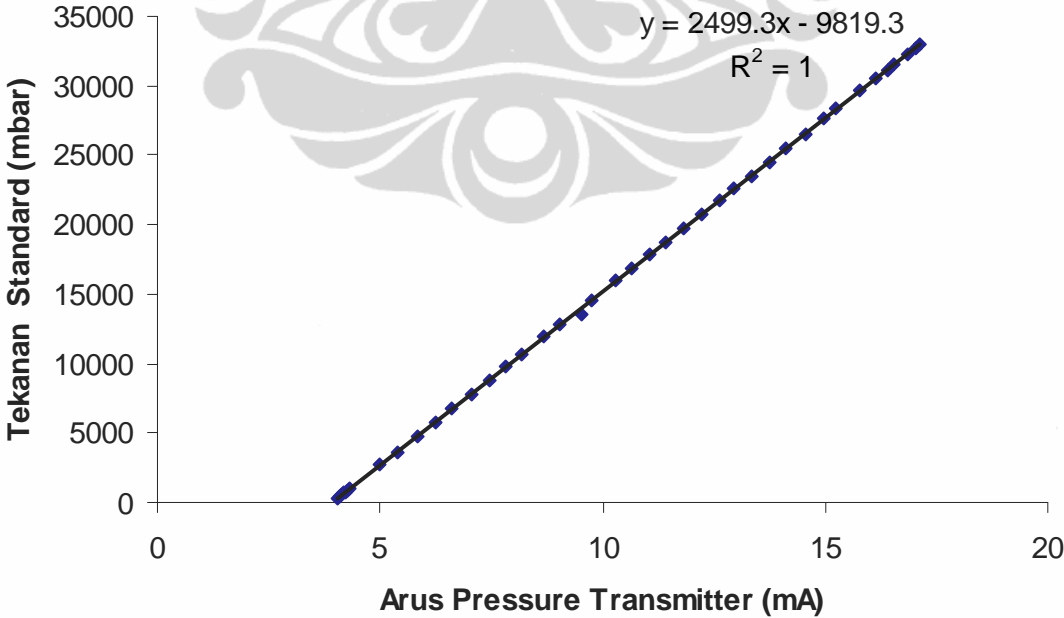
Rully D. Dachlan
Coal Lab Manager

This report is not to be reproduced, except in full, without authority from PT. Geoservices

Pressure Transmitter 1



Pressure Transmitter 2





Furnace dengan autoclave didalamnya posisi vertical



Autoclave dalam furnace

(lanjutan)



Furnace dengan posisi horizontal

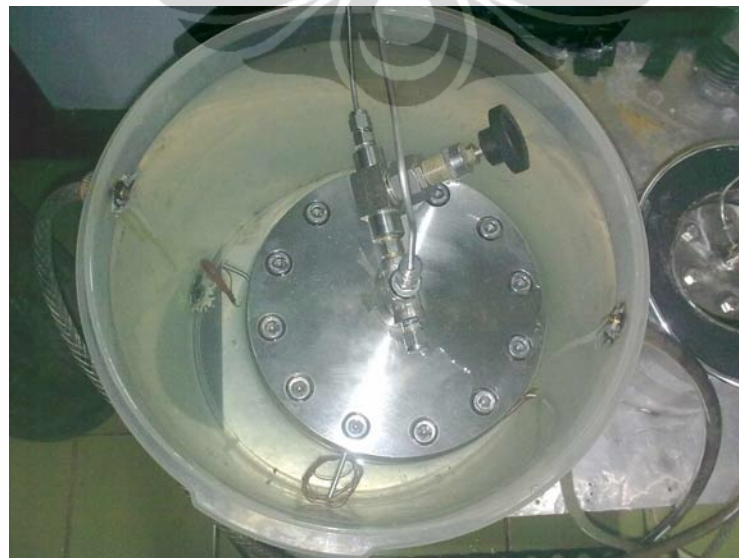


Alat Uji Adsorpsi Isotermal

(lanjutan)

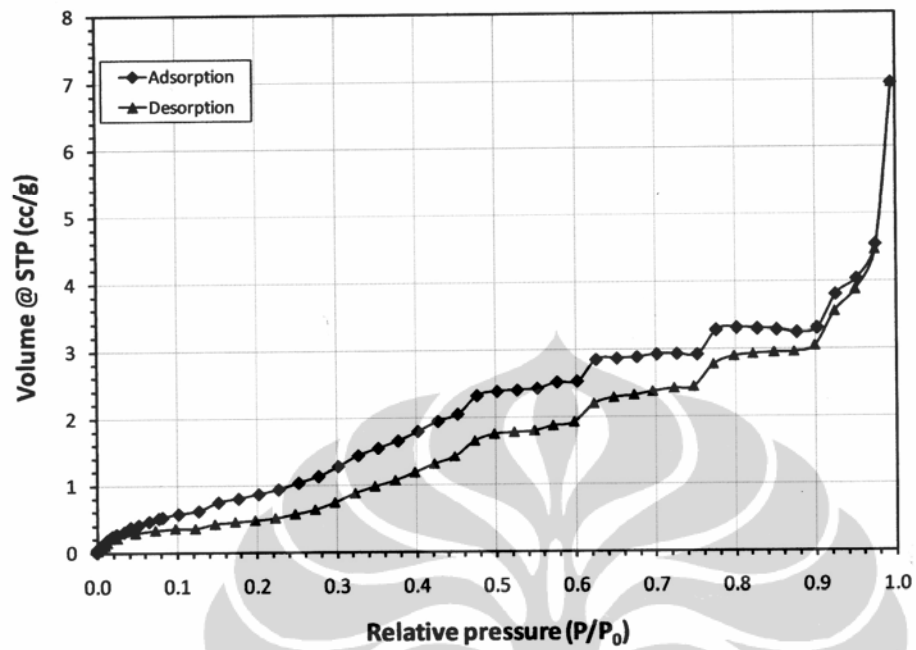


Measuring cell

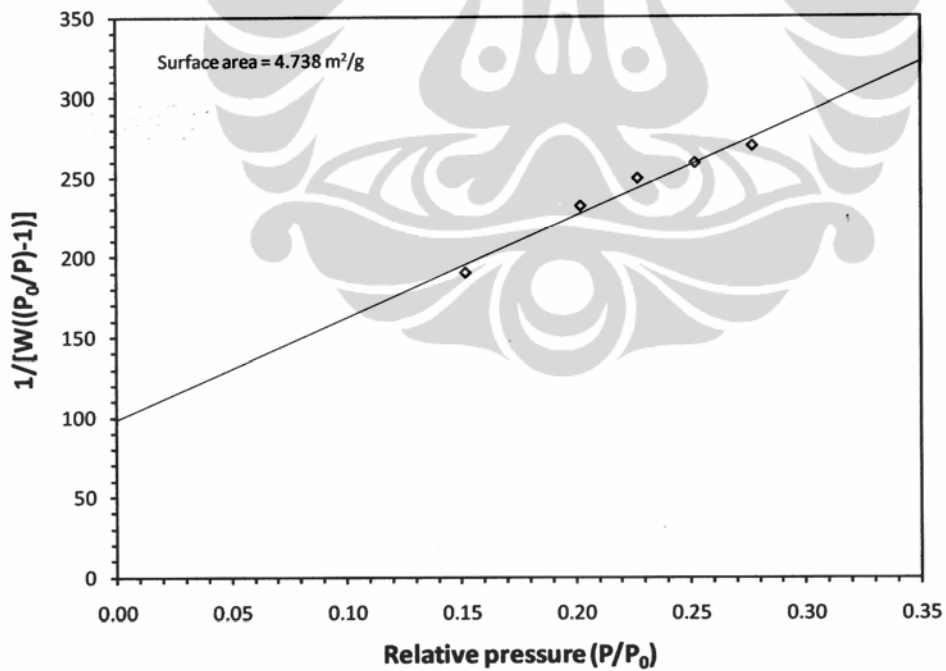


Charging Cell

Batubara Riau



N₂ adsorption of coal from RAIU



BET surface area

(lanjutan)

Quantachrome NovaWin2 - Data Acquisition and Reduction
for NOVA instruments
©1994-2003, Quantachrome Instruments
version 2.1



*** This report was generated by an unaudited system ***

Analysis	Report	Date: 7/6/2010
Operator:SKD	Operator:SKD	
Sample ID: RV 02=100(1102)	Filename: C:\QCdata\physisorb\G 1 RU 1102 OK-OK.qps	
Sample Desc:	Comment: NONE	
Sample weight: 0.1000 g	Sample Volume: 0.0256 cc	Sample Density: 3.9000 cc/g
Outgas Time: 1.0 hrs	OutgasTemp: 100.0 C	Analysis gas: Nitrogen
Analysis Time: 103.7 min	End of run: 2010/07/01 15:10:48	Instrument: Nova Station A
Bath Temp: 77.3 K	Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Equil time: 60/60 sec (ads/des)

Multi-Point BET

Data Reduction Parameters

Adsorbate	Thermal Transpiration: on Nitrogen Molecular Wt.: 28.013 g/mol	Eff. mol. diameter (D): 3.5400 Å Temperature: 77.350K Cross Section: 16.200 Å ² /mol	Eff. cell stem diam. (d): 7.0000 mm Liquid Density: 0.808 g/cc
------------------	--	---	---

Multi-Point BET

Relative Pressure [P/Po]	Volume@STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]	Relative Pressure [P/Po]	Volume@STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]
2.28695e-01	0.7223	3.2846e+02	2.78271e-01	0.8768	3.5183e+02
2.53777e-01	0.7984	3.4079e+02			

BET summary

Slope = 471.504
Intercept = 2.208e+02
Correlation coefficient, r = 0.999685
C constant = 3.1
Surface Area = 5.03 m²/g

(lanjutan)

*** This report was generated by an unaudited system ***

Analysis	Report	Date: 7/6/2010
Operator: SKD	Operator: SKD	
Sample ID: RV 02=100(1102)	Filename: C:\Q\data\physisorb\G 1 RU 1102 OK-OK.qps	
Sample Desc:	Comment: NONE	
Sample weight: 0.1000 g	Sample Volume: 0.0256 cc	Sample Density: 3.9000 cc/g
Outgas Time: 1.0 hrs	Outgas Temp: 100.0 C	Analysis gas: Nitrogen
Analysis Time: 103.7 min	End of run: 2010/07/01 15:10:48	Instrument: Nova Station A
Bath Temp: 77.3 K	Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Equil time: 60/60 sec (ads/des)

Average Pore Size

Data Reduction Parameters

Adsorbate	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D): 3.5400 Å	Eff. cell stem diam. (d): 7.0000 mm
	Nitrogen	Temperature: 77.350K	
	Molecular Wt.: 28.013 g/mol	Cross Section: 16.200 Å ² /mol	Liquid Density: 0.808 g/cc

Average Pore Size summary

Average pore Diameter = 6.36434e+01 Å

(lanjutan)

*** This report was generated by an unaudited system ***

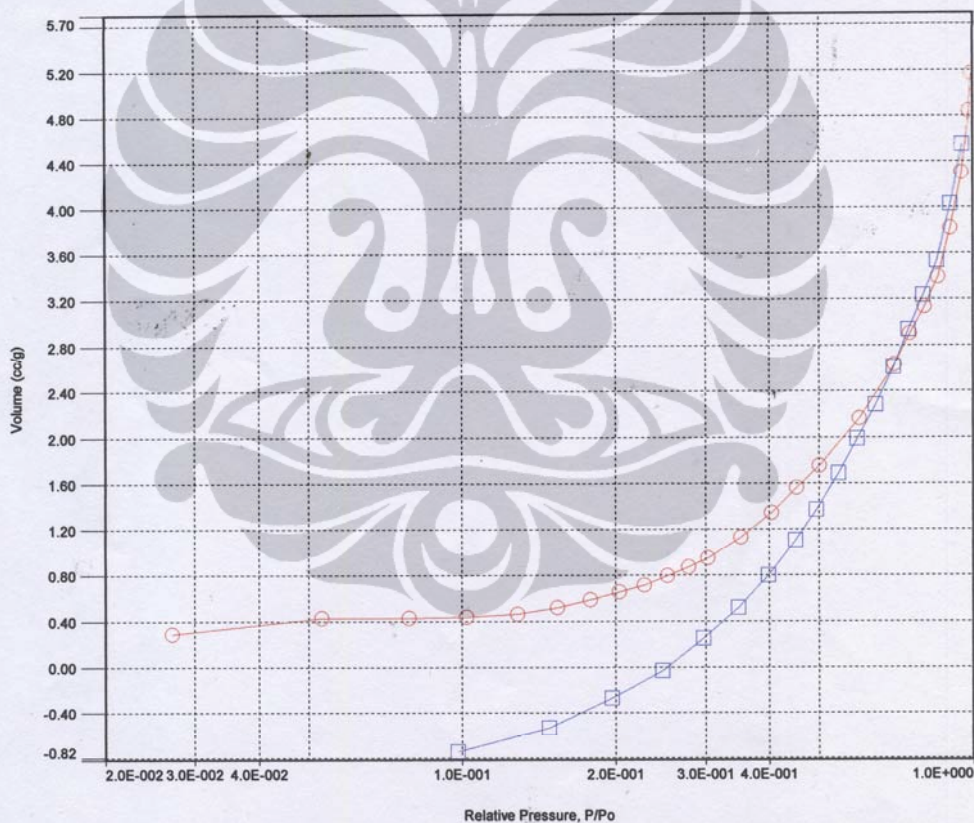
Analysis	Report	Date: 7/6/2010
Operator: SKD	Operator: SKD	
Sample ID: RV 02=100(1102)	Filename: C:\QCdata\physisorb\G 1 RU 1102 OK-OK.qps	
Sample Desc:	Comment: NONE	
Sample weight: 0.1000 g	Sample Volume: 0.0256 cc	Sample Density: 3.9000 cc/g
Outgas Time: 1.0 hrs	Outgas Temp: 100.0 C	Analysis gas: Nitrogen
Analysis Time: 103.7 min	End of run: 2010/07/01 15:10:48	Instrument: Nova Station A
Bath Temp: 77.3 K	Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Equil time: 60/60 sec (ads/des)

Isotherm Log Scale

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration: on Eff. mol. diameter (D): 3.5400 Å Eff. cell stem diam. (d): 7.0000 mm

○ Ads □ Des



*** This report was generated by an unaudited system ***

Analysis	Report	Date: 2010/07/01	Operator: SKD	Date: 7/6/2010
Operator: SKD	Filename: C:\QCdata\physisorb\G 1 RU 1102 OK-OK.qps	Sample ID: RV 02=100(1102)	Comment: NONE	
Sample Desc:	Sample Volume: 0.0256 cc	Sample weight: 0.1000 g	OutgasTemp: 100.0 C	Sample Density: 3.9000 cc/g
Outgas Time: 1.0 hrs	End of run: 2010/07/01 15:10:48	Analysis Time: 103.7 min	Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Analysis gas: Nitrogen
Bath Temp: 77.3 K				Instrument: Nova Station A
				Equil time: 60/60 sec (ads/des)

Total Pore Volume

Data Reduction Parameters

Adsorbate	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D): 3.5400 Å	Eff. cell stem diam. (d): 7.0000 mm
	Nitrogen	Temperature: 77.350K	
	Molecular Wt.: 28.013 g/mol	Cross Section: 16.200 Å ² /mol	Liquid Density: 0.808 g/cc

Total Pore Volume summary
Total Pore Volume

Total pore volume = 8.004e-03 cc/g for
pores smaller than 2452.8 Å (Diameter)
at P/Po = 0.99213

(lanjutan)

Quantachrome NovaWin2 - Data Acquisition and Reduction
for NOVA instruments
©1994-2003, Quantachrome Instruments
version 2.1



*** This report was generated by an unaudited system ***

Analysis	Report	Date: 7/6/2010
Operator:SKD	Operator:SKD	
Sample ID: RU 02=150(1103)	Filename: C:\QCdata\physisorb\G 2 RU 1103 OK OK.qps	
Sample Desc:	Comment: NONE	
Sample weight: 0.1568 g	Sample Volume: 0.0402 cc	Sample Density: 3.9000 cc/g
Outgas Time: 1.0 hrs	OutgasTemp: 100.0 C	Analysis gas: Nitrogen
Analysis Time: 107.5 min	End of run: 2010/07/03 12:42:51	Instrument: Nova Station A
Bath Temp: 77.3 K	Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Equil time: 60/60 sec (ads/des)

Multi-Point BET

Data Reduction Parameters

Adsorbate	Thermal Transpiration: on Nitrogen Molecular Wt.: 28.013 g/mol	Eff. mol. diameter (D): 3.5400 Å Temperature: 77.350K Cross Section: 16.200 Å ² /mol	Eff. cell stem diam. (d): 7.0000 mm Liquid Density: 0.808 g/cc
------------------	--	---	---

Multi-Point BET

Relative Pressure [P/Po]	Volume@STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]	Relative Pressure [P/Po]	Volume@STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]
7.82130e-02	2.8277	2.4008e+01	1.54322e-01	3.0084	4.8534e+01
1.03857e-01	2.8947	3.2034e+01	1.79150e-01	3.0530	5.7197e+01

BET summary

Slope = 328.410
Intercept = -1.884e+00
Correlation coefficient, r = 0.999848
C constant = -173.3
Surface Area = 10.67 m²/g

(lanjutan)

Quantachrome NovaWin2 - Data Acquisition and Reduction
for NOVA instruments
©1994-2003, Quantachrome Instruments
version 2.1

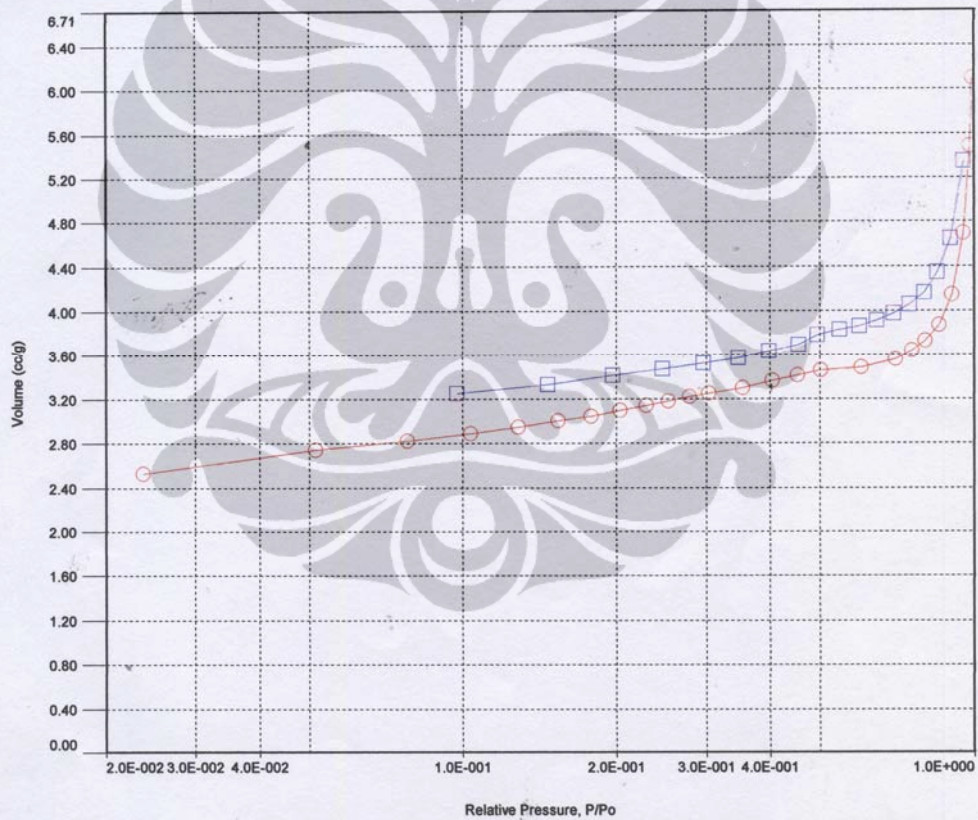
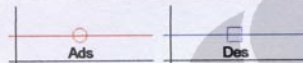


*** This report was generated by an unaudited system ***

Analysis	Report	Date: 7/6/2010
Operator: SKD	Operator: SKD	
Sample ID: RU 02=150(1103)	Filename: C:\QCdata\physisorb\G 2 RU 1103 OK OK.qps	
Sample Desc:	Comment: NONE	
Sample weight: 0.1568 g	Sample Volume: 0.0402 cc	Sample Density: 3.9000 cc/g
Outgas Time: 1.0 hrs	Outgas Temp: 100.0 C	Analysis gas: Nitrogen
Analysis Time: 107.5 min	End of run: 2010/07/03 12:42:51	Instrument: Nova Station A
Bath Temp: 77.3 K	Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Equil time: 60/60 sec (ads/des)

Isotherm Log Scale

Data Reduction Parameters
Thermal Transpiration: on Eff. mol. diameter (D): 3.5400 Å Eff. cell stem diam. (d): 7.0000 mm



(lanjutan)

Quantachrome NovaWin2 - Data Acquisition and Reduction
for NOVA instruments
©1994-2003, Quantachrome Instruments
version 2.1



*** This report was generated by an unaudited system ***

Analysis	Report	Date: 7/6/2010
Operator: SKD	Operator: SKD	
Sample ID: RU 02=150(1103)	Filename: C:\QCdata\physisorb\G 2 RU 1103 OK OK.qps	
Sample Desc:	Comment: NONE	
Sample weight: 0.1568 g	Sample Volume: 0.0402 cc	Sample Density: 3.9000 cc/g
Outgas Time: 1.0 hrs	Outgas Temp: 100.0 C	Analysis gas: Nitrogen
Analysis Time: 107.5 min	End of run: 2010/07/03 12:42:51	Instrument: Nova Station A
Bath Temp: 77.3 K	Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Equil time: 60/60 sec (ads/des)

Total Pore Volume

Data Reduction Parameters

Adsorbate	Thermal Transpiration: on Nitrogen Molecular Wt.: 28.013 g/mol	Eff. mol. diameter (D): 3.5400 Å Temperature: 77.350K Cross Section: 16.200 Å ² /mol	Eff. cell stem diam. (d): 7.0000 mm Liquid Density: 0.808 g/cc
------------------	--	---	---

Total Pore Volume summary

Total Pore Volume

Total pore volume = 9.435e-03 cc/g for
pores smaller than 2044.2 Å (Diameter)
at P/Po = 0.99053

(lanjutan)

Quantachrome NovaWin2 - Data Acquisition and Reduction
for NOVA instruments
©1994-2003, Quantachrome Instruments
version 2.1



*** This report was generated by an unaudited system ***

Analysis	Report	Date: 2010/07/03	Operator: SKD	Date: 7/6/2010
Operator: SKD	Filename: C:\QCdata\physisorb\G 2 RU 1103 OK OK.qps	Comment: NONE	Sample Density: 3.9000 cc/g	
Sample ID: RU 02=150(1103)	Sample Volume: 0.0402 cc	Outgas Temp: 100.0 C	Analysis gas: Nitrogen	
Sample Desc:	End of run: 2010/07/03 12:42:51	Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Instrument: Nova Station A	
Sample weight: 0.1568 g			Equil time: 60/60 sec (ads/des)	
Outgas Time: 1.0 hrs				
Analysis Time: 107.5 min				
Bath Temp: 77.3 K				

Average Pore Size

Data Reduction Parameters

Adsorbate	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D): 3.5400 Å	Eff. cell stem diam. (d): 7.0000 mm
	Nitrogen	Temperature 77.350K	
	Molecular Wt.: 28.013 g/mol	Cross Section: 16.200 Å ² /mol	Liquid Density: 0.808 g/cc

Average Pore Size summary

Average pore Diameter = 3.53870e+01 Å

Lampiran 5 Luas Permukaan dan Volume Pori Karbon Aktif

Quantachrome NovaWin2 - Data Acquisition and Reduction
for NOVA instruments
©1994-2003, Quantachrome Instruments
version 2.1



*** This report was generated by an unaudited system ***

Analysis	Report		
Operator:SKD	Date:2010/06/09	Operator:SKD	Date:6/10/2010
Sample ID: R U 1	Filename: C:\QCdata\physisorb\RU 1-ok.qps		
Sample Desc: Powder	Comment: Long Standard + File Road		
Sample weight: 0.1170 g	Sample Volume: 0.0300 cc	Sample Density	3.9000 cc/g
Outgas Time: 3.0 hrs	Outgas Temp: 320.0 C	Analysis gas:	Nitrogen
Analysis Time: 95.6 min	End of run: 2010/06/09 18:26:21	Instrument:	Nova Station A
Bath Temp: 273.0 K	Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Equil time:	30/30 sec (ads/des)

Multi-Point BET

Data Reduction Parameters

Adsorbate	Thermal Transpiration: on Nitrogen Molecular Wt.: 28.013 g/mol	Eff. mol. diameter (D): 3.5400 Å Temperature 77.350K Cross Section: 16.200 Å ² /mol	Eff. cell stem diam. (d): 7.0000 mm Liquid Density: 0.808 g/cc
------------------	--	--	---

Multi-Point BET

Relative Pressure [P/Po]	Volume@STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]	Relative Pressure [P/Po]	Volume@STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]
9.89550e-02	15.3786	5.7138e+00	1.75682e-01	17.0594	9.9958e+00
1.24887e-01	15.9995	7.1367e+00	2.00783e-01	17.5112	1.1479e+01
1.50554e-01	16.5601	8.5633e+00			

BET summary

Slope = 56.544
Intercept = 8.634e-02
Correlation coefficient, r = 0.999889
C constant = 655.9
Surface Area = 61.50 m²/g

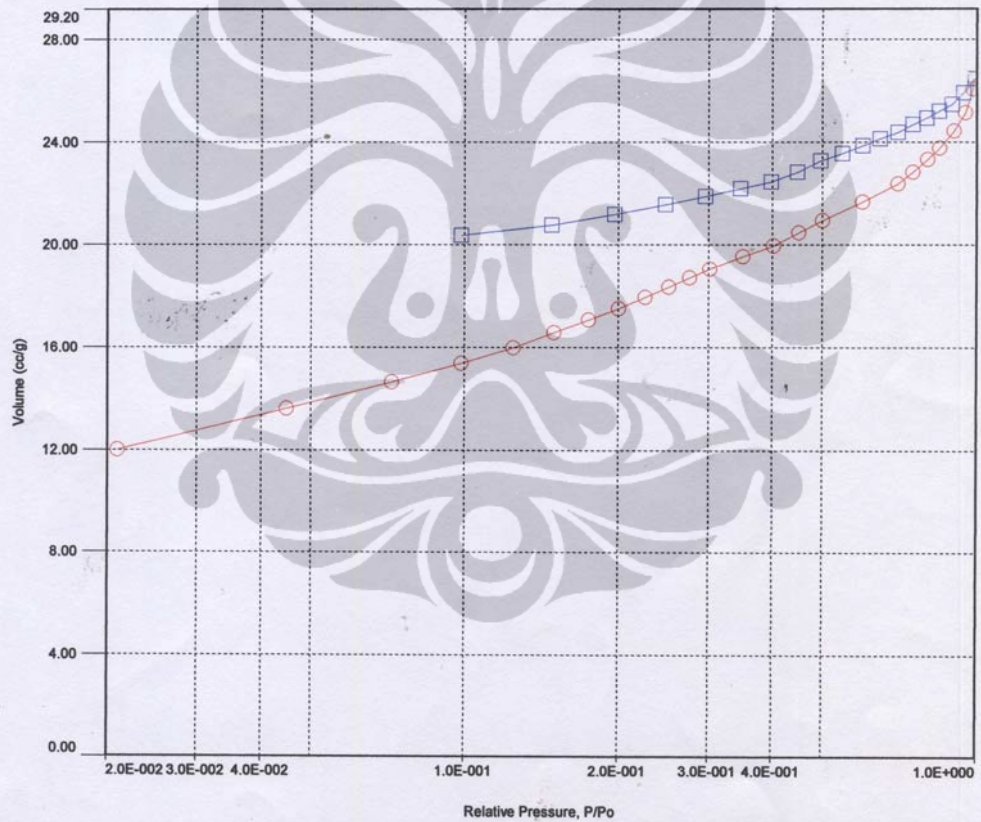
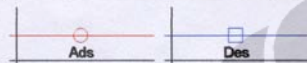
(lanjutan)

*** This report was generated by an unaudited system ***

Analysis	Date: 2010/06/09	Report	Operator: SKD	Date: 6/10/2010
Operator: SKD	Filename: C:\QCdata\physisorb\RU 1-ok.qps	Comment: Long Standard + File Road		
Sample ID: R U 1	Sample weight: 0.1170 g	Sample Volume: 0.0300 cc	Sample Density: 3.9000 cc/g	
Sample Desc: Powder	Outgas Time: 3.0 hrs	Outgas Temp: 320.0 C	Analysis gas: Nitrogen	
Analysis Time: 95.6 min	Bath Temp: 273.0 K	End of run: 2010/06/09 18:26:21	Instrument: Nova Station A	
		Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Equil time: 30/30 sec (ads/des)	

Isotherm Log Scale

Data Reduction Parameters
Thermal Transpiration: on Eff. mol. diameter (D): 3.5400 Å Eff. cell stem diam. (d): 7.0000 mm



(lanjutan)

Quantachrome NovaWin2 - Data Acquisition and Reduction
for NOVA instruments
©1994-2003, Quantachrome Instruments
version 2.1



*** This report was generated by an unaudited system ***

Analysis	Report	Date: 6/10/2010
Operator: SKD	Operator: SKD	
Sample ID: R U 1	Filename: C:\QC\data\physisorb\RU 1-ok.qps	
Sample Desc: Powder	Comment: Long Standard + File Road	
Sample weight: 0.1170 g	Sample Volume: 0.0300 cc	Sample Density: 3.9000 cc/g
Outgas Time: 3.0 hrs	Outgas Temp: 320.0 C	Analysis gas: Nitrogen
Analysis Time: 95.6 min	End of run: 2010/06/09 18:26:21	Instrument: Nova Station A
Bath Temp: 273.0 K	Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Equil time: 30/30 sec (ads/des)

Total Pore Volume

Data Reduction Parameters

Adsorbate	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D): 3.5400 Å	Eff. cell stem diam. (d): 7.0000 mm
Nitrogen	Nitrogen	Temperature: 77.350 K	
	Molecular Wt.: 28.013 g/mol	Cross Section: 16.200 Å ² /mol	Liquid Density: 0.808 g/cc

Total Pore Volume summary Total Pore Volume

Total pore volume = 4.096e-02 cc/g for
pores smaller than 2052.0 Å (Diameter)
at P/Po = 0.99092

*** This report was generated by an unaudited system ***

Analysis	Report
Operator:SKD	Operator:SKD
Sample ID: R U 1	Date:2010/06/09
Sample Desc: Powder	Filename: C:\QCdata\physisorb\RU 1-ok.qps
Sample weight: 0.1170 g	Comment: Long Standard + File Road
Outgas Time: 3.0 hrs	Sample Volume: 0.0300 cc
Analysis Time: 95.6 min	OutgasTemp: 320.0 C
Bath Temp: 273.0 K	End of run: 2010/06/09 18:26:21
	Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)
	Sample Density: 3.9000 cc/g
	Analysis gas: Nitrogen
	Instrument: Nova Station A
	Equil time: 30/30 sec (ads/des)

Average Pore Size

Data Reduction Parameters

<u>Adsorbate</u>	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D): 3.5400 Å	Eff. cell stem diam. (d): 7.0000 mm
	Nitrogen	Temperature: 77.350K	
	Molecular Wt.: 28.013 g/mol	Cross Section: 16.200 Å ² /mol	Liquid Density: 0.808 g/cc

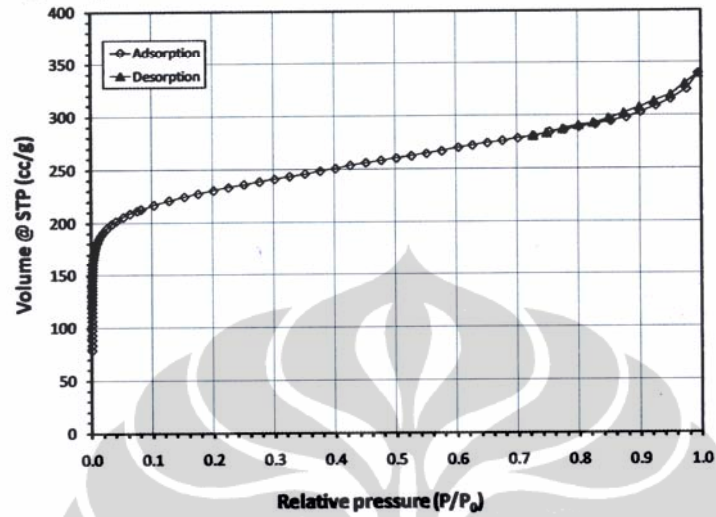
Average Pore Size summary

Average pore Diameter = 2.66397e+01 Å

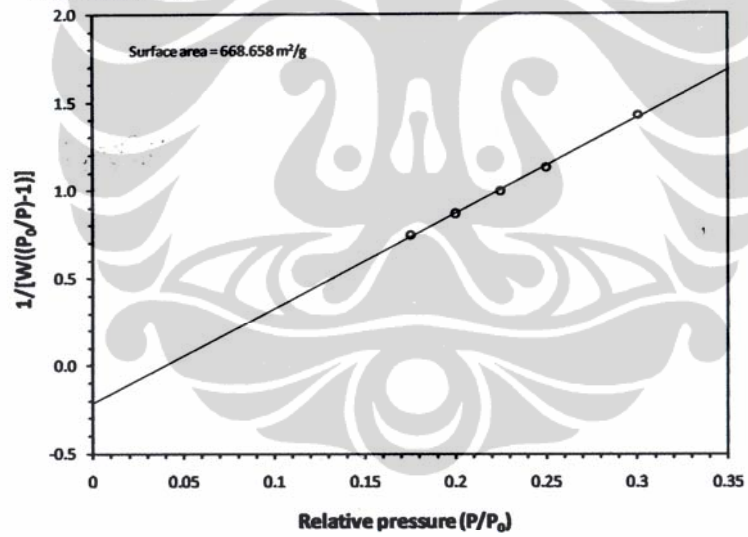
(lanjutan)

ACTIVATED CARBON (COAL FROM KALIMATAN)

N₂ adsorption



BET surface area





Analysis

Operator:001
Sample ID: : Active Carbob (Kali)
Sample Desc: Active Carbob (Kali)
Outgas Time: 25.0 hrs
Analysis gas: Nitrogen
Analysis Time: 2381.4 min

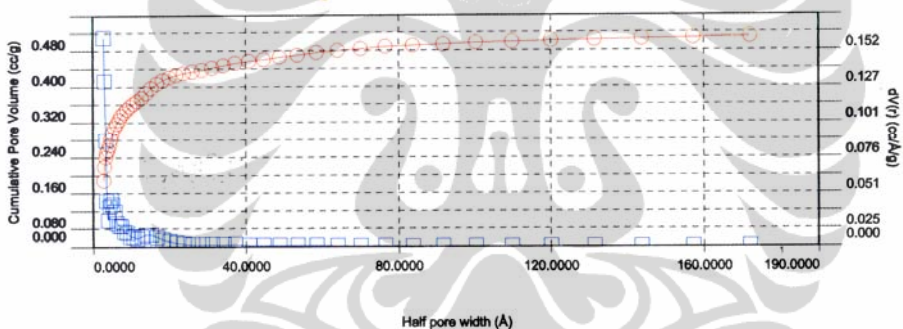
Report

Date: Mon Dec 14 16:42:54 2009 Operator: Kyaw Thu Date: 2/27/2010
Filename: C:\Users\mpekt\Desktop\Activated carbon\Data\ACTIVE CARBOB (KALI)_2009-12-11
Comment:
Outgas Temp: 250.0 °C Sample Weight: 0.0188 g
Molec. Wt: 28.0134 g Non-Ideality: 6.58e-05 1/mmHg
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	
	Moving pt. avg: off		
Adsorbate	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 =	0.470 cc/g
Lower confidence limit =	3.070 Å
Fitting error =	0.247 %
Half pore width (Mode) =	3.070 Å
Moving point average :	off

(lanjutan)



PERTAMINA
DIREKTORAT PENGOLAHAN
PENELITIAN & LABORATORIUM
Jl. Raya Bekasi km. 20 Pulogadung, Jakarta
Telp. (021) 4609311 - 4609312 - 4609313 / Facs (021) 4609314

SERTIFIKAT PENGUJIAN
CERTIFICATE OF ANALYSIS

No. 012/CSN/IP&L/2008

Diterima dari : Mahasiswa UI
Principal : up. Sehat Abdi
Tanggal terima contoh : 28 Mei 2008
Date of Received : ember 2007
Alamat : Jakarta
Tanggal Selesai : 19 Juni 2008
Date of complete
Nomor Registrasi : 012/JL/CSN/2008
Registration Number : Halaman / Page : 1 (satu)

HASIL PENGUJIAN

Sampel : Carbon Aktif

Jenis Analisa	Metoda	Satuan	Hasil Uji						
			KA 1	KT 3	KT 4	KT 5	RU 2	RU 4	
BET Area	Surface	Gemini	M ² /g	896	164	189	190	30	27
				855	159	182	201	22	29

Jenis Analisa	Metoda	Satuan	Hasil Uji					
			RU 5	RU 6	SS 3	SS 4	SS 5	
BET Area	Surface	Gemini	M ² /g	46	80	30	55	110
				48	72	32	47	88

Jakarta, 19 Juni 2008
Manajer Teknis

Agustina Eliyanti



Hasil pengujian ini hanya berlaku untuk contoh uji yang diujikan. Dilarang memperbanyak/copy secara terpisah tanpa izin dari PERTAMINA
This report is valid for tested sample only. This report may not be reproduced or copied separately without legal permission PERTAMINA.

FR/02/MP - SUM1
No. Revisi : 01

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



Analysis
Operator:001
Sample ID: : Active Carbob (CarboTech)
Sample Desc: Active Carbob (CarboTech)
Outgas Time: 8.0 hrs
Analysis gas: Nitrogen
Analysis Time: 3503.6 min

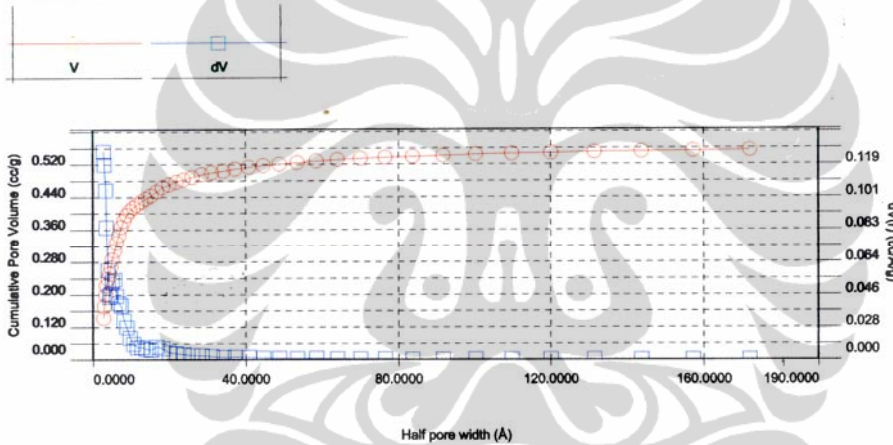
Report
Date:Thu Jan 28 22:29:06 2010
Operator:Kyaw Thu
Filename: C:\Users\mpekt\Desktop\Activated carbon\Data\ACTIVE CARBON (CARBOTECH)_20
Comment:
Outgas Temp: 250.0 °C
Molec. Wt: 28.0134 g
Instrument: Autosorb Station 1

Date:2/27/2010
Sample Weight: 0.0492 g
Non-Ideality: 6.58e-05 1/mmHg
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	
	Moving pt. avg: off		
Adsorbate	Nitrogen	Temperature 77.350K	
	Molec. Wt.: 28.013 g	Cross Section: 16.200 Å²	Liquid Density: 0.808 g/cc



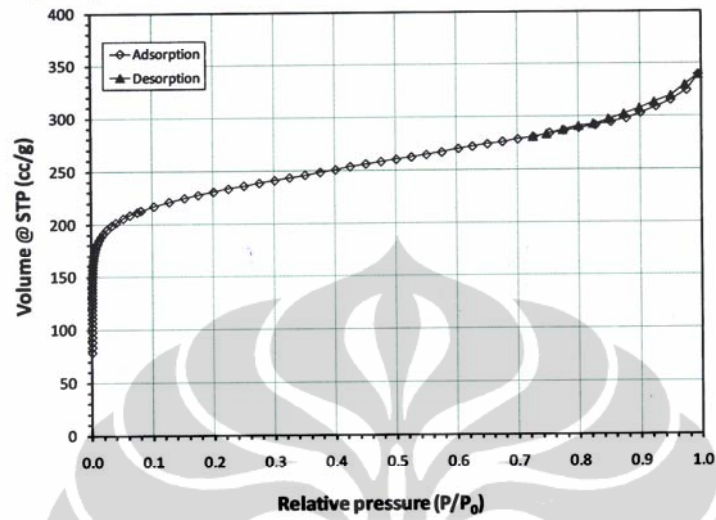
DFT method summary

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

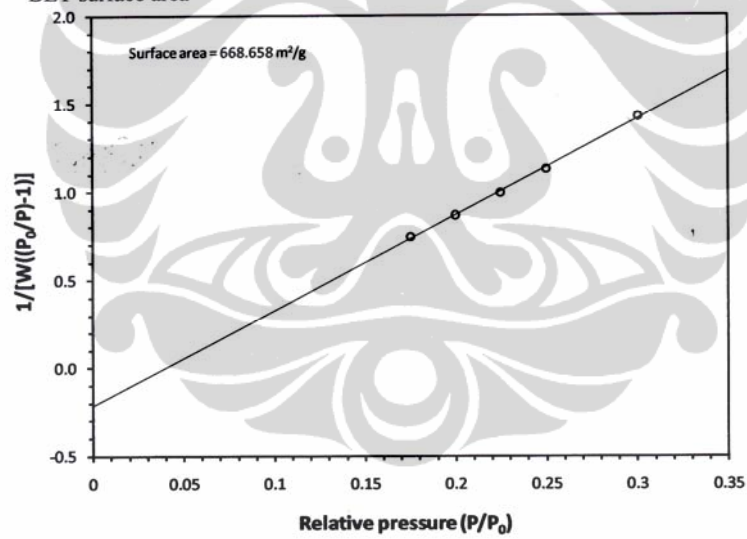
(lanjutan)

LUAS PERMUKAAN KARBON AKTIF KT

N₂ adsorption



BET surface area



(lanjutan)

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



Analysis

Operator:001
Sample ID: : Active Carbob (Kali)
Sample Desc: Active Carbob (Kali)
Outgas Time: 25.0 hrs
Analysis gas: Nitrogen
Analysis Time: 2381.4 min

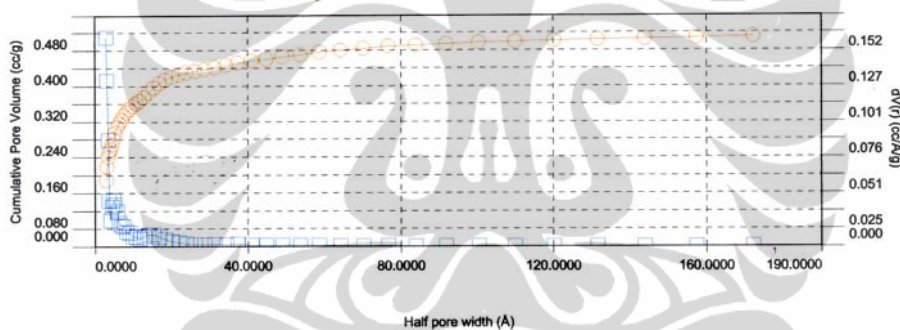
Report

Date: Mon Dec 14 16:42:54 2009 Operator: Kyaw Thu Date: 2/27/2010
Filename: C:\Users\mpekt\Desktop\Activated carbon\Data\ACTIVE CARBOB (KALI)_2009-12-11
Comment:
Outgas Temp: 250.0 °C Sample Weight: 0.0188 g
Molec. Wt: 28.0134 g Non-ideality: 6.58e-05 1/mmHg
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	
	Moving pt. avg: off		
Adsorbate	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 =	0.470 cc/g
Lower confidence limit =	3.070 Å
Fitting error =	0.247 %
Half pore width (Mode) =	3.070 Å
Moving point average :	off

(lanjutan)



PERTAMINA
DIREKTORAT PENGOLAHAN
PENELITIAN & LABORATORIUM
Jl. Raya Bekasi km. 20 Pulogadung, Jakarta
Telp. (021) 4609311 - 4609312 - 4609313 / Facs (021) 4609314

SERTIFIKAT PENGUJIAN
CERTIFICATE OF ANALYSIS

No. 012/CSN/IP&L/2008

Diterima dari : Mahasiswa UI
Principal up. Sehat Abdi
Tanggal terima contoh : 28 Mei 2008
Date of Received ember 2007

Alamat : Jakarta
Tanggal Selesai : 19 Juni 2008
Date of complete

Nomor Registrasi : 012/JL/CSN/2008
Registration Number
Halaman / Page : 1 (satu)

HASIL PENGUJIAN

Sampel : Carbon Aktif

Jenis Analisa	Metoda	Satuan	Hasil Uji						
			KA 1	KT 3	KT 4	KT 5	RU 2	RU 4	
BET Area	Surface	Gemini	M ² /g	896	164	189	190	30	27
				855	159	182	201	22	29

Jenis Analisa	Metoda	Satuan	Hasil Uji					
			RU 5	RU 6	SS 3	SS 4	SS 5	
BET Area	Surface	Gemini	M ² /g	46	80	30	55	110
				48	72	32	47	88

Jakarta, 19 Juni 2008
Manajer Teknis

Agustina Eliyanti

05
Hasil pengujian ini hanya berlaku untuk contoh uji yang diujikan. Dilarang memperbanyak/copy secara terpisah tanpa izin dari PERTAMINA.
This report is valid for tested sample only. This report may not be reproduced or copied separately without legal permission PERTAMINA.

FR/02/MP - SUM1
No. Revisi : 01

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



Analysis
Operator: 001
Sample ID: : Active Carbob (CarboTech)
Sample Desc: Active Carbob (CarboTech)
Outgas Time: 8.0 hrs
Analysis gas: Nitrogen
Analysis Time: 3503.6 min

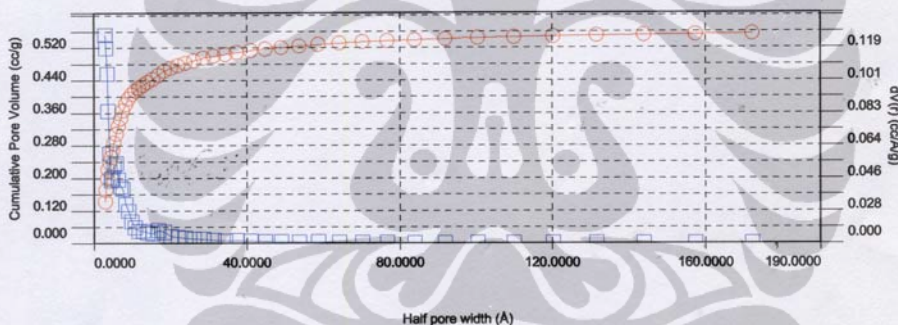
Report
Date: Thu Jan 28 22:29:06 2010
Operator: Kyaw Thu
Date: 2/27/2010
Filename: C:\Users\impekt\Desktop\Activated carbon\Data\ACTIVE CARBON (CARBOTECH)_20
Comment:
Outgas Temp: 250.0 °C
Molec. Wt: 28.0134 g
Instrument: Autosorb Station 1

Sample Weight: 0.0492 g
Non-ideality: 6.58e-05 1/mmHg
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	
	Moving pt. avg: off		
Adsorbate	Nitrogen	Temperature 77.350K	
	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