



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**EVALUASI PERSAMAAN BET DAN HASIL  
MODIFIKASINYA DALAM MEREPRESENTASIKAN DATA  
EKSPERIMEN ADSORPSI GAS PADA TEKANAN TINGGI**

**SKRIPSI**

**PANJI DERMAWAN  
0606043206**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
DESEMBER 2008**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**EVALUASI PERSAMAAN BET DAN HASIL  
MODIFIKASINYA DALAM MEREPRESENTASIKAN DATA  
EKSPERIMEN ADSORPSI GAS PADA TEKANAN TINGGI**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik  
di Departemen Teknik Kimia FT UI**

**PANJI DERMAWAN  
0606043206**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
DESEMBER 2008**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Panji Dermawan

NPM : 0606043206

Tanda Tangan :

Tanggal : 5 Januari 2009

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Panji Dermawan  
NPM : 0606043206  
Program Studi : Ekstensi Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Evaluasi Persamaan BET dan Hasil Modifikasinya  
dalam Merepresentasikan Data Eksperimen  
Adsorpsi Gas Pada Tekanan Tinggi

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Mahmud Sudibandriyo, Msc. PhD ( )  
Penguji : Prof. Dr. Widodo Wahtu Purwanto, DEA ( )  
Penguji : Ir. Dijan Supramono, Msc. ( )

Ditetapkan di : Kampus Baru UI, Depok

Tanggal : 24 Desember 2008

## KATA PENGANTAR

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

1. Bapak Ir. Setiyadi, selaku koordinator tugas akhir.
2. Bapak Ir. Mahmud Sudibandriyo, Msc.PhD, selaku pembimbing I yang telah memberikan nasihat dan bimbingannya didalam penyusunan makalah ini.
3. Bapak Ir. Bambang Heru Susanto selaku dosen wali.
4. Bapak Toto Wiradisastra dan Bapak Zaenal Muttaqien selaku atasan penulis di PT Corelab Indonesia atas kebijakannya memberikan keleluasaan waktu kepada penulis untuk menyelesaikan makalah ini.
5. Teman-teman di PT Corelab, Reza, Eky, Ucan, Arief, Pak Somad, Pak Maizir, Pak Istami, Pak Endang, dan mas Zully atas dukungannya.
6. Ibunda dan Ayahanda serta keluarga yang tercinta dan tersayang terimakasih atas doa, perhatian, dan dukungannya selama ini. “Semoga putramu ini dapat menjadi anak yang berbakti kepada Ayah dan Ibu”
7. Ayang dan buah hati “Azwa” tercinta yang senantiasa menanti dirumah, “kehadiran kalian merupakan sumber inspirasi hidup ini....makasih atas dukungannya sayang...”
8. Rizky, Ronald, Cepy, Sanny dan teman-teman dikampus atas segala dukungannya.

Penulis berharap semoga makalah ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Depok, 16 Desember 2008

Penulis

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

---

---

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

Nama : Panji Dermawan  
NPM : 0606043206  
Program Studi : S-1 Ekstensi Teknik Kimia  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik UI  
Jenis Karya : Skripsi

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

Evaluasi Persamaan BET dan Hasil Modifikasinya dalam Merepresentasikan Data Eksperimen Adsorpsi Gas pada Tekanan Tinggi

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Kampus Baru UI, Depok

Pada Tanggal : 5 Januari 2009

Yang menyatakan

( )

## ABSTRAK

Nama : Panji Dermawan  
Program Studi : Ekstensi Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Evaluasi Persamaan BET dalam Merepresentasikan Data  
Eksperimen Adsorpsi Gas Pada Tekanan Tinggi

Pada umumnya proses pengolahan gas yang berlangsung di dalam industri terjadi terjadi pada keadaan tekanan tinggi sehingga pengetahuan dan pengembangan teknik adsorpsi gas pada tekanan tinggi sangatlah diperlukan. Dalam suatu proses, biasanya dilakukan beberapa pendekatan melalui model atau persamaan empirik untuk mengoptimasikan proses secara efektif dan efisien. Salah satu model yang biasa digunakan adalah model BET.

Model BET memiliki kelebihan yaitu dapat digunakan untuk adsorpsi gas secara *multilayer*, tetapi juga memiliki kelemahan jika digunakan untuk merepresentasikan data adsorpsi gas pada tekanan tinggi. Hal ini disebabkan model adsorpsi BET merupakan adsorpsi absolut yaitu suatu angka hipotesis yang tidak pernah dapat terukur secara percobaan karena yang terukur dari suatu percobaan sebenarnya adalah apa yang disebut sebagai “adsorpsi Gibbs”. Data adsorpsi Gibbs seiring dengan kenaikan tekanan akan menunjukkan kenaikan dari jumlah zat yang teradsorpsi sampai pada titik tekanan tertentu (maksimum) kemudian saat tekanan terus dinaikkan akan mengalami penurunan jumlah zat teradsorpsi sedangkan model BET nilainya akan terus naik. Perbedaan ini menggambarkan bahwa model BET merupakan kondisi yang nyata (absolut) sedangkan model Gibbs merupakan kondisi yang ideal dari eksperimen Untuk mengatasi permasalahan tersebut, kita memerlukan modifikasi pada model BET.

Hasil Penelitian menunjukkan bahwa model modifikasi BET dapat merepresentasikan data eksperimen adsorpsi gas pada tekanan tinggi dengan lebih baik dibandingkan dengan model BET. Hal ini dapat diketahui dari nilai *Average Absolute Percent Deviation* (AAPD) yang dihasilkan dari model modifikasi BET nilainya lebih kecil dibandingkan dengan nilai AAPD dari model BET. Hasil pengolahan data dari eksperimen adsorpsi gas dengan menggunakan adsorben karbon aktif, zeolit, batu bara, dan silika gel masing-masing diperoleh nilai AAPD untuk model modifikasi BET adalah 1,98 %; 1,00 %; 3,12 %; dan 3,38 % sedangkan model BET adalah 2,48 %; 2,02 %; 3,29 %; dan 3,36 %.

Kata kunci :  
Adsorpsi, BET, Modifikasi, Gibbs, AAPD

## ABSTRACT

Name : Panji Dermawan  
Study Program : Chemical Engineering  
Title : Evaluation of BET Equation in Representing the High Pressure Adsorption Gas Experiment

Gas treatment processes in industry are usually occurred at high pressure condition. In the gas adsorption process, some approach can be used a model or empirical equation to optimize gas adsorption process effectively and efficiently. BET model is one of the popular models used.

BET model can be used for multilayer gas adsorption, but it has also weakness to present the gas adsorption data at high pressure condition. As an absolute model, BET has hypothetical value that never be measured in practice because the result of the experiment is "Gibbs adsorption". Gibbs adsorption shows that if the pressure increases it will also increase the amount of adsorption, until it reaches maximum value, then the amount of adsorption will decrease by increasing pressure, while the BET model will decrease. This phenomenon shows that BET model is a real (absolute) condition, while Gibbs model is an ideal condition of experiment. To solve this problem we need some modification of BET model to make better representation of the adsorption data.

The results of experiment prove that the modification of BET can represent gas adsorption data better than BET model. This can be shown by its lower value of AAPD, compared to BET without modification. The AAPD value for BET modification from gas adsorption evaluation using active carbon, zeolite, coal, and silica gel as adsorbent are 1,98 %; 1,00 %; 3,12 %; and 3,38 % while BET model are 2,48 %; 2,02 %; 3,29 %; and 3,36 %.

Key Words:

Adsorption, BET, Modification, Gibbs, AAPD



## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR TABEL .....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
DAFTAR SIMBOL .....	xv
DAFTAR KONVERSI SATUAN.....	xvi
<b>1. PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	1
1.3 Tujuan Penelitian .....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Adsorpsi.....	5
1.2.1. Adsorpsi Fisika.....	5
1.2.2. Adsorpsi Kimia .....	7
2.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi .....	8
2.3 Adsorben.....	9
2.3.1 Karbon Aktif .....	11
2.3.2 Zeolit.....	14
2.4 Pemilihan Adsorben .....	18
2.5 Teori Potensial .....	19
2.6 Isoterm Adsorpsi.....	20
2.6.1 Isoterm Adsorpsi Absolut .....	21
2.6.1.1 Isoterm Adsorpsi Freundlich .....	21
2.6.1.2 Isoterm Adsorpsi Langmuir.....	22
2.6.1.3 Isoterm Adsorpsi BET.....	23
2.6.2 Isoterm Adsorpsi Gibbs .....	25
2.6.3 Isoterm Adsorpsi Gibbs dan Hubungannya dengan Isoterm Adsorpsi Absolut.....	25
2.6.4 Pengaruh Temperatur pada Keseimbangan Adsorpsi .....	28
<b>3. METODE PENELITIAN</b>	
3.1 Tahapan Penelitian.....	30
3.2 Diagram Alir Penelitian.....	36

<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Hasil Representasi Model dari Data Adsorpsi Gas pada Karbon Aktif .....	37
4.2 Hasil Representasi Model dari Data Adsorpsi Gas Pada Zeolit .....	43
4.3 Hasil Representasi Model Data Adsorpsi Gas Pada Batu bara.....	46
4.4 Hasil Representasi Model Data Adsorpsi Gas pada Silika Gel .....	48
4.5 Pengaruh Temperatur Terhadap Parameter yang Terdapat Dalam Persamaan BET dan Persamaan Hasil Modifikasi.....	54
4.5.1 Pengaruh Temperatur Terhadap Nilai Konstanta c.....	54
4.5.2 Pengaruh Temperatur Terhadap Jumlah Gas yang Teradsorpsi maksimum (nmaks).....	55
4.6 Perbandingan Jumlah Gas Teradsorpsi antara Karbon Aktif dengan Zeolit dan Silika Gel .....	57
<b>5. KESIMPULAN</b> .....	59
<b>DAFTAR REFERENSI</b> .....	60



## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1	Perbedaan antara Adsorpsi Fisika dengan Adsorpsi Kimia.....8
Tabel 2.2	Klasifikasi Adsorben Berdasarkan Strukturnya ..... 11
Tabel 2.3	Klasifikasi Adsorben Berdasarkan Diameter Porinya..... 11
Tabel 2.4	Adsorben dan Aplikasinya..... 19
Tabel 3.1	Sumber Data Adsorpsi Gas dengan Karbon Aktif .....30
Tabel 3.1	Sumber Data Adsorpsi Gas dengan Karbon Aktif (lanjutan).....31
Tabel 3.2	Sumber Data Adsorpsi Gas dengan Zeolit.....31
Tabel 3.3	Sumber Data Adsorpsi Gas dengan Batu Bara .....32
Tabel 3.4	Sumber Data Adsorpsi Gas dengan Silika Gel .....32
Tabel 4.1	Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Karbon Aktif .....38
Tabel 4.1	Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Karbon Aktif (lanjutan).....39
Tabel 4.2	Data Adsorpsi $C_3H_8$ dalam Sistem No.4 pada $T = 193,7^\circ F$ .....41
Tabel 4.3.	Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Zeolit .....44
Tabel 4.4	Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Batu bara.....47
Tabel 4.5	Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Silika Gel.....49
Tabel 4.6	Data Adsorpsi $CO_2$ dalam Zeolit pada Sistem No.6 $T = 77^\circ F$ .....50
Tabel 4.7	Data Adsorpsi $CO_2$ dalam Karbon Aktif pada Sistem No.8 $T = 77^\circ F$ .....50
Tabel 4.8	Data Adsorpsi $CO_2$ dalam Silika Gel pada $T = 77^\circ F$ .....51

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Gambar 2.1 Klasifikasi isotherm adsorpsi fisika menurut Brunauer .....	6
Gambar 2.2 Distribusi ukuran partikel tiap-tiap adsorben .....	13
Gambar 2.3 Isoterm Freundlich untuk adsorpsi H <sub>2</sub> pada tungsten (suhu 400oC) .....	22
Gambar 2.4 Pendekatan isotherm adsorpsi Langmuir .....	22
Gambar 2.5 Pendekatan Isoterm Adsorpsi BET .....	24
Gambar 2.6 Grafik Adsorpsi Isotermis Gibbs .....	25
Gambar 2.7 Adsorpsi Gas Pada Bahan Berpori .....	26
Gambar 2.8 Hubungan antara Adsorpsi Gibbs dan Adsorpsi Absolut .....	27
Gambar 3.1 Diagram alir Tahap Optimasi Data Eksperimen .....	35
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian .....	36
Gambar 4.1 Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> pada Sistem No. 3 .....	40
Gambar 4.2 Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Sistem No. 4 pada T = 229,7 °F .....	42
Gambar 4.3 Adsorpsi C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> pada Sistem No. 5 .....	43
Gambar 4.4 Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam Silika gel pada T = 77 °F .....	48
Gambar 4.5 Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam Zeolit pada Sistem No.6 T = 77 °F .....	52
Gambar 4.6 Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam Karbon Aktif pada Sistem No. 8 T = 77 °F .....	52
Gambar 4.7 Pengaruh Temperatur Terhadap Nilai c Pada Adsorpsi N <sub>2</sub> dalam Zeolit .....	55
Gambar 4.8 Hubungan Temperatur Terhadap n <sub>maks</sub> Gas CO <sub>2</sub> dalam Karbon Aktif .....	56
Gambar 4.9 Hubungan Konstanta BET c dengan n <sub>maks</sub> Gas CH <sub>4</sub> dalam Karbon Aktif .....	56
Gambar 5.0 Perbandingan Kemampuan Adsorben dalam Mengadsorpsi CO <sub>2</sub> pada T = 77 °F .....	58

## DAFTAR LAMPIRAN

### Lampiran A. Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Adsorben Karbon Aktif

Lampiran A.1.1	Adsorpsi CH <sub>4</sub> dalam Karbon Aktif pada T = 85.7 °F (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium)
Lampiran A.1.2	Adsorpsi CH <sub>4</sub> dalam Karbon Aktif pada T = 121.7 °F (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium)
Lampiran A.1.3	Adsorpsi CH <sub>4</sub> dalam Karbon Aktif pada T = 157.7 °F (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium)
Lampiran A.1.4	Adsorpsi CH <sub>4</sub> dalam Karbon Aktif pada T = 191, 9°F (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium)
Lampiran A.1.5	Adsorpsi CH <sub>4</sub> dalam Karbon Aktif pada T = 229.7°F (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium)
Lampiran A.2.1	Adsorpsi CH <sub>4</sub> dalam Karbon Aktif (Norit RB1) pada T = 69.17 °F
Lampiran A.2.2	Adsorpsi CH <sub>4</sub> dalam Karbon Aktif (Norit RB1) pada T=101.03 °F
Lampiran A.2.3	Adsorpsi CH <sub>4</sub> dalam Karbon Aktif (Norit RB1) pada T=136.57 °F
Lampiran A.2.4	Adsorpsi CH <sub>4</sub> dalam Karbon Aktif (Norit RB1) pada T=171.41 °F
Lampiran A.3.1	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium) pada T = 85.7 °F
Lampiran A.3.2	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium) pada T = 121.7 °F
Lampiran A.3.3	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium) pada T =157.7 °F
Lampiran A.3.4	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium) pada T = 193.7 °F
Lampiran A.3.5	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium) pada T =229.7 °F
Lampiran A.4.1	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (BET: 1157 +/- 30 sqm/g) pada T = 68°F
Lampiran A.4.2	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (BET: 1157 +/- 30 sqm/g) pada T =86°F
Lampiran A.4.3	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (BET: 1157 +/- 30 sqm/g) pada T =104°F
Lampiran A.4.4	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (BET: 1157 +/- 30 sqm/g) pada T =122°F
Lampiran A.4.5	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (BET:1157 +/- 30 sqm/g) pada T = 68°F
Lampiran A.5.2	Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam karbon Aktif pada T = 59 °F (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium; BET= 1150 sqm/g)

Lampiran A.5.3	Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam karbon Aktif pada T = 59 °F (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium; BET= 1150 sqm/g)
Lampiran A.5.4	Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam karbon Aktif pada T = 59 °F (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium; BET= 1150 sqm/g)
Lampiran A.5.5	Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam karbon Aktif pada T = 59 °F (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium; BET= 1150 sqm/g)
Lampiran A.5.6	Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam karbon Aktif pada T = 59 °F (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium; BET= 1150 sqm/g)
Lampiran A.5.7	Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam karbon Aktif pada T = 59 °F (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium; BET= 1150 sqm/g)
Lampiran A.6.1	Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam karbon Aktif pada T = 69.9 °F (Norit RB1)
Lampiran A.6.2	Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam karbon Aktif pada T = 100.49 °F (Norit RB1)
Lampiran A.6.3	Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam karbon Aktif pada T = 133.6 °F (Norit RB1)
Lampiran A.6.4	Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam karbon Aktif pada T = 167.3 °F (Norit RB1)
Lampiran A.6.4	Adsorpsi CO <sub>2</sub> dalam karbon Aktif pada T = 167.3 °F (Norit RB1)
Lampiran A.7.1	Adsorpsi CO <sub>2</sub> Pada Karbon Aktif (Norit R1; BET: 1262 sqm/g; micropore vol: 0.59 cc/g; total pore volume: 0.64 cc/g)
Lampiran A.8.1	Adsorpsi N <sub>2</sub> dalam Karbon Aktif pada T = 77 F
Lampiran A.9.1	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium) pada T = 85.7 °F
Lampiran A.9.2	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium) pada T = 121.7 °F
Lampiran A.9.3	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium) pada T = 157.7 °F
Lampiran A.9.4	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium) pada T = 193.7 °F
Lampiran A.9.5	Adsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dalam Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium) pada T = 229.7 °F

### **Lampiran B. Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Adsorben Batu Bara**

Lampiran B.1.1	Adsorpsi CH <sub>4</sub> dalam batubara pada T =115.1 °F (Cabot Corp.: Spheron-6; BET: 123 sqm/g)
Lampiran B.2.1	Adsorpsi CH <sub>4</sub> dalam Batu Bara pada T = 100.4 °F (Cabot Corp.: Spheron-6; BET: 123 sqm/g)
Lampiran B.2.2	Adsorpsi CH <sub>4</sub> dalam Batu Bara pada T = 130.1 °F (Cabot Corp.: Spheron-6; BET: 123 sqm/g)

- Lampiran B.2.3 Adsorpsi CH<sub>4</sub> dalam Batu Bara pada T = 160 °F (Cabot Corp.: Spheron-6; BET: 123 sqm/g)
- Lampiran B.2.4 Adsorpsi CH<sub>4</sub> dalam Batu Bara pada T = 190.04 °F (Cabot Corp.: Spheron-6; BET: 123 sqm/g)
- Lampiran B.2.5 Adsorpsi CH<sub>4</sub> dalam Batu Bara pada T = 220.1 °F (Cabot Corp.: Spheron-6; BET: 123 sqm/g)
- Lampiran B.2.6 Adsorpsi CH<sub>4</sub> dalam Batu Bara pada T = 250 °F (Cabot Corp.: Spheron-6; BET: 123 sqm/g)
- Lampiran B.3.1 Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Batu Bara pada T = 115.7 °F (Wet Fruitland Coal)
- Lampiran B.4.1 Adsorpsi N<sub>2</sub> dalam Batu Bara pada T = 115.1 °F (Norit RB1)

### **Lampiran C. Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Adsorben Silika Gel**

- Lampiran C.1.1 Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Silica Gel KC) pada T = 41 °F (Trockenperlen Blau, Kali Chemie AG; BET= 750 sqm/g)
- Lampiran C.1.2 Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Silica Gel KC pada T = 41 °F (Trockenperlen Blau, Kali Chemie AG; BET= 750 sqm/g)
- Lampiran C.1.3 Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Silica Gel KC pada T = 77 °F (Trockenperlen Blau, Kali Chemie AG; BET= 750 sqm/g)
- Lampiran C.1.4 Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Silica Gel KC pada T = 86 °F (Trockenperlen Blau, Kali Chemie AG; BET= 750 sqm/g)
- Lampiran C.1.5 Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Silica Gel KC pada T = 95 °F (Trockenperlen Blau, Kali Chemie AG; BET= 750 sqm/g)
- Lampiran C.1.6 Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Silica Gel KC pada T = 113 °F (Trockenperlen Blau, Kali Chemie AG; BET= 750 sqm/g)
- Lampiran C.1.7 Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Silica Gel KC pada T = 131 °F (Trockenperlen Blau, Kali Chemie AG; BET= 750 sqm/g)

### **Lampiran D. Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Adsorben Zeolit**

- Lampiran D1.1 Adsorpsi CH<sub>4</sub> dalam Zeolit Sintetik Pada T = 77 °F (Linde 5A, 1-2 mm; 8 g)
- Lampiran D1.2 Adsorpsi CH<sub>4</sub> dalam Zeolit Sintetik Pada T = 77 °F (Linde 5A, 1-2 mm; 8 g)
- Lampiran D1.3 Adsorpsi CH<sub>4</sub> dalam Zeolit Sintetik Pada T = 167 °F (Linde 5A, 1-2 mm; 8 g)
- Lampiran D2.1 Adsorpsi CH<sub>4</sub> dalam Zeolit G5 Pada T = 49.8 °F (Ceca-Athochem; BET=430 sqm/g; pore vol: 1.08 cc/g)
- Lampiran D2.2 Adsorpsi CH<sub>4</sub> dalam Zeolit G5 Pada T = 85.8 °F (Ceca-Athochem; BET=430 sqm/g; pore vol: 1.08 cc/g)
- Lampiran D3.1 Adsorpsi C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> dalam Zeolit G5 pada T = 49.8 F
- Lampiran D3.2 Adsorpsi C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> dalam Zeolit G5 pada T = 85.5 F
- Lampiran D4.1 Adsorpsi C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> dalam Zeolit G5 Pada T = 49.8 °F (Ceca-Athochem; BET=430 sqm/g; pore vol: 1.08 cc/g)
- Lampiran D4.2 Adsorpsi C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> dalam Zeolit G5 Pada T = 85.8 °F (Ceca-Athochem; BET=430 sqm/g; pore vol: 1.08 cc/g)

## DAFTAR SIMBOL

P	Tekanan gas yang teradsorpsi
$P_0$	Tekanan uap murni gas
R	Konstanta gas ( $\text{Psi.cm}^3/\text{mol}^\circ\text{R}$ )
$\rho_{gas}$	Densitas gas
$\rho_{ads}$	Densitas adsorpsi
T	Suhu
$k_1, k_2$	Tetapan laju adsorpsi dan desorpsi
$\theta$	Fraksi yang ditempati oleh adsorbat
b	Konstanta isotherm adsorpsi Langmuir
c	Konstanta isotherm adsorpsi BET
n	Volume gas teradsorpsi
nm	Volume gas pembentuk lapisan <i>monolayer</i>
$\Delta H_{ads}$	Entalpi adsorpsi
Z	Faktor kompresibilitas
Vvoid	<i>Void Volume</i>



## DAFTAR KONVERSI SATUAN

### 1. Tekanan

$$1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ Pa (Pascal)} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ Psia} = 1 \text{ lb}_f/\text{in.}^2$$

$$1 \text{ atm} = 14.696 \text{ Psia} = 1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1.01325 \text{ bar}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg at } 0^\circ\text{C} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$$

### 2. Densitas dan Volume

$$1 \text{ g mol gas ideal pada } 0^\circ\text{C, } 760 \text{ mm Hg} = 22.4140 \text{ liter} = 22414 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ kg mol gas ideal pada } 0^\circ\text{C, } 760 \text{ mm Hg} = 22.414 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ g/cm}^3 = 62.43 \text{ lbm/ft}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Densitas udara kering pada } 0^\circ\text{C, } 760 \text{ mm Hg} = 1.2929 \text{ g/liter} = 0.080711 \text{ lbm/ft}^3$$

### 3. Konstanta Gas, R

$$669.9542893 \text{ (Psi cm}^3\text{)/(mol } ^\circ\text{R)}$$

$$10.73 \text{ (Psia) (ft}^3\text{) (lb mol) (} ^\circ\text{R)}$$

$$0.08206 \text{ (L) (atm)/ (g mol) (K)}$$

$$8.314 \text{ (kPa) (m}^3\text{)/ (kg mol) (K)}$$

### 4. Faktor Konversi lainnya

$$\text{\AA} = 1,00 \times 10^{-10} \text{ meter}$$

$$T^\circ\text{F} = (9/5 \times T^\circ\text{C}) + 32$$

$$T^\circ\text{C} = 5/9 \times (T^\circ\text{F} - 32)$$

$$T \text{ K} = T^\circ\text{C} + 273.15$$

$$T^\circ\text{C} = T \text{ K} - 273.15$$

$$T^\circ\text{R} = T^\circ\text{F} + 459.67$$

$$T^\circ\text{F} = T^\circ\text{R} - 459.67$$

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Adsorpsi gas secara teoritis maupun eksperimen telah banyak dipelajari oleh para ilmuwan hampir dari satu abad lamanya dan secara empirik hasilnya telah banyak memberikan sumbangan terhadap perkembangan dan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi diberbagai aplikasi, terutama dalam bidang industri gas dan petroleum.

Adsorpsi biasanya dilakukan secara isothermal, dimana terjadi suatu hubungan kesetimbangan antara jumlah adsorbat di dalam partikel pada adsorben dengan tekanannya (jika gas) atau konsentrasinya (jika cairan). Adsorpsi isoterm pertama kali diperkenalkan oleh Freundlich dan Kuster dan rumus empirik murninya valid digunakan untuk adsorbat-adsorbat gas. Teori adsorpsi Langmuir dan BET adalah teori adsorpsi yang sering digunakan pada aplikasi teknik terutama untuk adsorbat gas. Teori Langmuir biasanya digunakan untuk adsorpsi kimia sedangkan teori BET biasa digunakan untuk adsorpsi fisika.

Proses pengolahan gas yang berlangsung di dalam industri umumnya berlangsung pada tekanan tinggi sehingga pengetahuan dan pengembangan teknik adsorpsi gas pada tekanan tinggi sangatlah diperlukan. Dalam suatu proses, biasanya dilakukan beberapa pendekatan melalui model atau persamaan empirik untuk mengoptimasikan proses secara efektif dan efisien. Persamaan-persamaan yang biasa digunakan untuk proses adsorpsi diantaranya adalah persamaan Freundlich, persamaan Langmuir, persamaan BET, dan lain-lain.

Pada penelitian ini akan dievaluasi teori adsorpsi isothermal yang akan digunakan untuk adsorpsi gas pada tekanan tinggi, yaitu teori adsorpsi isothermal model BET. Model BET ini merupakan pengembangan dari model Langmuir. Model Langmuir merupakan model yang paling sederhana dan mudah diaplikasikan sehingga banyak digunakan dalam berbagai bidang industri. Namun model Langmuir ini hanya berasumsi bahwa adsorpsi yang terjadi adalah

monolayer, sedangkan di beberapa aplikasi terutama pada proses adsorpsi secara fisika yang banyak terjadi adalah adsorpsi multilayer. Kekurangan dari model Langmuir ini kemudian disempurnakan lagi oleh model BET. Model adsorpsi BET ini akhirnya dapat diaplikasikan pada adsorpsi multilayer. Namun, sesuai dengan perkembangan industri sekarang yang menggunakan sistem adsorpsi gas pada tekanan tinggi, model BET pun belum dapat merepresentasikan data hasil eksperimen dengan baik.

### **1.2 Perumusan Masalah**

Model BET digunakan untuk menutupi model Langmuir yang hanya bisa digunakan pada adsorpsi monolayer, akan tetapi model BET pun memiliki kelemahan jika digunakan untuk merepresentasikan data eksperimen adsorpsi gas pada kondisi tekanan tinggi. Pada eksperimen, hasil yang diperoleh merupakan data adsorpsi Gibbs, dimana jumlah zat yang teradsorpsi seiring dengan kenaikan tekanan akan mengalami kenaikan sampai pada tekanan tertentu kemudian akan mengalami penurunan kembali. Tidak halnya seperti yang ditunjukkan oleh model BET, seiring dengan kenaikan tekanan jumlah zat yang teradsorpsi akan terus mengalami kenaikan. Hal ini disebabkan model adsorpsi BET merupakan adsorpsi absolut yaitu suatu angka hipotesis yang tidak pernah dapat terukur secara percobaan sedangkan yang terukur dari suatu percobaan sebenarnya adalah apa yang disebut sebagai “adsorpsi Gibbs”. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka dilakukanlah modifikasi pada model BET dengan mengkombinasikan persamaan adsorpsi BET dan persamaan adsorpsi Gibbs sehingga diharapkan model BET dapat merepresentasikan data eksperimen adsorpsi gas pada tekanan tinggi dengan lebih baik.

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan hasil kombinasi persamaan BET dengan persamaan lain, dalam hal ini persamaan Gibbs.
2. Mendapatkan data adsorpsi gas yang menggunakan persamaan BET dan hasil

modifikasinya dengan kualitas deviasi yang minimum.

3. Mendapatkan nilai *Average Absolute Percent Deviation* (AAPD) yang dihasilkan dari model BET dan hasil modifikasinya.
4. Mengetahui profil jumlah zat yang teradsorpsi dari model BET dan hasil modifikasinya terhadap tekanan.
5. Mengetahui model isoterm adsorpsi yang dapat merepresentasikan data adsorpsi gas pada tekanan tinggi dengan lebih baik.

#### 1.4 Batasan Masalah

Ruang lingkup permasalahan dalam penelitian ini adalah :

1. Proses adsorpsi diasumsikan terjadi pada kondisi isoterm.
2. Model yang digunakan untuk proses adsorpsi adalah persamaan adsorpsi isoterm BET dan persamaan adsorpsi BET yang dimodifikasi.
3. Data-data yang digunakan untuk mengevaluasi persamaan berasal dari literatur.
4. Gas yang terlibat adalah *single* komponen.
5. Gas kerja pada penelitian ini meliputi :
  - Gas Metana ( $\text{CH}_4$ )
  - Gas Etana ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )
  - Gas Etena ( $\text{C}_2\text{H}_4$ )
  - Gas Propana ( $\text{C}_3\text{H}_8$ )
  - Gas Karbondioksida ( $\text{CO}_2$ )
  - Gas Nitrogen ( $\text{N}_2$ )
6. Adsorben yang digunakan pada penelitian adalah :
  - Karbon aktif
  - Zeolit
  - Batubara
  - Silika gel

## **1.5 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan terdiri dari :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini berisi tentang permasalahan secara umum yang mencakup latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisikan tentang teori-teori yang mendukung penelitian serta hasil penelitian orang lain sebagai acuan khusus.

### **BAB III METODE PENELITIAN**

Bab ini berisi tentang metode yang dipakai dalam penelitian yang mencakup tahapan-tahapan penelitian yaitu mulai dari metode pengumpulan data hingga pengolahan data. Bagian ini juga menjelaskan diagram alir penelitian, prosedur percobaan.

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi tentang hasil pengolahan data yang sudah dilakukan beserta gambar grafiknya yang diperoleh dari hasil regresi pengolahan data. Kemudian membahas tentang hasil dari representasi data yang sudah dilakukan.

### **BAB V KESIMPULAN**

Bab ini berisi tentang rangkuman poin-poin penting dari hasil dan pembahasan sehingga tercapai tujuan dari penelitian yang diharapkan.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Adsorpsi

**Adsorpsi** adalah suatu proses yang terjadi ketika suatu fluida (cairan maupun gas) terikat kepada suatu padatan dan akhirnya membentuk suatu film (lapisan tipis) pada permukaan padatan tersebut. Adsorpsi terjadi karena molekul-molekul pada permukaan zat padat memiliki gaya tarik dalam keadaan tidak seimbang yang cenderung tertarik ke arah dalam (gaya kohesi adsorben lebih besar daripada gaya adhesinya). Ketidakseimbangan gaya tarik tersebut mengakibatkan zat padat yang digunakan sebagai adsorben cenderung menarik zat-zat lain yang bersentuhan dengan permukaannya. Menurut Reynold (1982), adsorpsi adalah suatu proses dimana suatu partikel menempel pada suatu permukaan akibat dari perbedaan muatan lemah diantara kedua benda, sehingga akhirnya akan membentuk suatu lapisan tipis partikel-partikel halus pada permukaan tersebut.

Berdasarkan interaksi molekular antara permukaan adsorben dengan adsorbat, adsorpsi dibagi menjadi dua bagian, yaitu adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia.

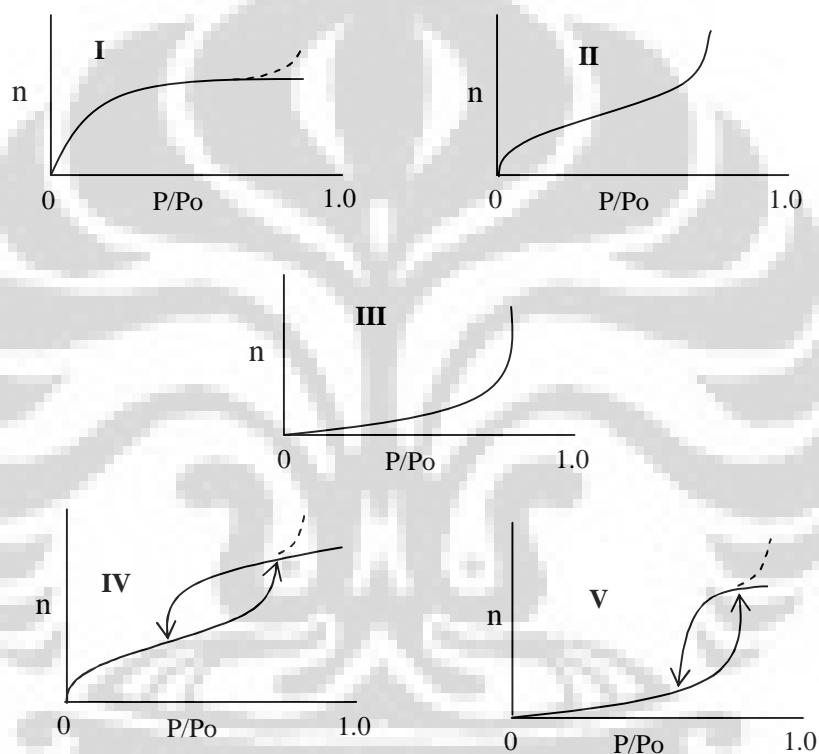
#### 2.1.1 Adsorpsi Fisika

Adsorpsi fisika terjadi bila gaya intermolekular lebih besar dari gaya tarik antar molekul atau gaya tarik menarik yang relatif lemah antara adsorbat dengan permukaan adsorben, gaya ini disebut gaya Van der Waals sehingga adsorbat dapat bergerak dari satu bagian permukaan ke bagian permukaan lain dari adsorben.

Gaya antar molekul adalah gaya tarik antara molekul-molekul fluida dengan permukaan padat, sedangkan gaya intermolekular adalah gaya tarik antar molekul-molekul fluida itu sendiri. Adsorpsi ini berlangsung cepat, dapat membentuk lapisan jamak (*multilayer*), dan dapat bereaksi balik (*reversible*), karena energi yang dibutuhkan relatif rendah. Energi aktivasi untuk terjadinya

adsorpsi fisika biasanya adalah tidak lebih dari 1 kkal/g-mol, sehingga gaya yang terjadi pada adsorpsi fisika termasuk lemah. Adsorpsi fisika dapat berlangsung di bawah temperatur kritis adsorbat yang relatif rendah sehingga panas adsorpsi yang dilepaskan juga rendah yaitu sekitar 5 – 10 kkal/g-mol gas, lebih rendah dari panas adsorpsi kimia.

Brunauer et al. membagi isoterm untuk adsorpsi fisika kedalam 5 kelas, yaitu seperti yang terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Klasifikasi isotherm adsorpsi fisika menurut Brunauer

Pada Gambar 2.1, tekanan merupakan absis sedangkan jumlah gas yang teradsorpsi merupakan ordinatnya. Pada klasifikasi ini, tipe I menunjukkan adsorpsi isoterm pada adsorben mikropori untuk kondisi subkritik dekat dengan titik kritis dan superkritik. Pada kondisi super kritik, adsorpsi isoterm tidak monoton. Tipe II dan III mempunyai *steps*, tetapi dengan temperatur yang lebih tinggi kurva tersebut menjadi monoton. Pada kondisi didekat temperatur kritis, adsorpsi isoterm tipe II dan III ini berubah secara signifikan menjadi tidak monoton yang menunjukkan adanya titik maksimum yang tajam. Tipe IV dan V

menunjukkan adsorpsi isoterm pada adsorben mesopori dengan afinitas yang kuat dan lemah. Tipe I dan II merupakan jenis yang paling sering ditemui dalam proses pemisahan. Begitu banyak teori-teori dan persamaan-persamaan yang telah dikembangkan untuk menginterpretasikan perbedaan tipe-tipe isoterm. Persamaan-persamaan isoterm yang dihasilkan dapat memprediksikan jumlah zat yang teradsorpsi (adsorbat) berdasarkan sejumlah eksperimen yang terbatas.

### 2.1.2 Adsorpsi Kimia

Adsorpsi kimia terjadi karena adanya reaksi antara molekul-molekul adsorbat dengan adsorben dimana terbentuk ikatan kovalen dan ion. Gaya ikat adsorpsi ini bervariasi tergantung pada zat yang bereaksi. Adsorpsi jenis ini bersifat tidak *reversible* dan hanya dapat membentuk lapisan tunggal (*monolayer*). Adsorpsi kimia umumnya terjadi pada temperatur tinggi di atas temperatur kritis adsorbat sehingga panas adsorpsi yang dilepaskan juga tinggi yaitu sekitar 10-100 kkal/g-mol. Untuk dapat terjadinya peristiwa desorpsi dibutuhkan energi lebih tinggi untuk memutuskan ikatan yang terjadi antara adsorbat dengan adsorben. Energi aktivasi pada adsorpsi kimia berkisar antara 10-60 kkal/g-mol. Beberapa ciri-ciri yang biasa terdapat pada *chemisorption* :

1. Adanya ciri khusus yang melibatkan proses kimiawi
2. Adanya perubahan pada keadaan elektron yang dapat dideteksi oleh infrared *spectroscopy*.
3. Tahap awal pada *chemisorption* melibatkan energi aktivasi.
4. Hanya terbentuk satu lapis pada saat terjadi adsorpsi (adsorpsi monolayer)

Permasalahan yang timbul dalam membedakan antara adsorpsi secara kimia dengan adsorpsi secara fisik pada dasarnya sama dengan membedakan antara interaksi secara kimia dan interaksi secara fisika. Tidak terdapat perbedaan tajam mengenai keduanya yang timbul. Perbedaan antara adsorpsi fisika dengan adsorpsi kimia dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Tabel 2.1 Perbedaan antara Adsorpsi Fisika dengan Adsorpsi Kimia

No	Parameter	Adsorpsi fisika	Adsorpsi kimia
1	Adsorben	semua jenis	Terbatas
2	Adsorbat	semua gas	kecuali gas mulia
3	Jenis ikatan	fisika	Kimia
4	Panas adsorpsi	5 – 10 kkal/g-mol gas	10-100 kkal/g-mol gas
5	Temperatur operasi	di bawah temperatur kritis	di atas temperatur kritis
6	Energi aktivasi	kurang dari 1 kkal/g-mol	10-60 kkal/g-mol
7	Reversibilitas	Reversibel	Tidak selamanya reversibel
8	Jumlah lapisan	Banyak (multilayer)	Satu (monolayer)
9	Kecepatan adsorpsi	Besar	Kecil
10	Jumlah zat teradsorp	Sebanding dengan kenaikan tekanan	Sebanding dengan banyaknya inti aktif adsorben yang dapat bereaksi dengan adsorbat

## 2.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi

Banyaknya adsorbat yang teradsorp pada permukaan adsorben dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu :

1. Jenis adsorbat, dapat ditinjau dari :
  - Ukuran molekul adsorbat. Rongga tempat terjadinya adsorpsi dapat dicapai melalui ukuran yang sesuai, sehingga molekul-molekul yang bisa diadsorpsi adalah molekul-molekul yang berdiameter sama atau lebih kecil dari diameter pori adsorben.
  - Polaritas molekul adsorbat. Apabila diameter sama, molekul-molekul polar lebih kuat diadsorpsi daripada molekul-molekul yang kurang polar, sehingga molekul-molekul yang lebih polar bisa menggantikan molekul-molekul yang kurang polar yang telah diserap.

2. Sifat adsorben, dapat ditinjau dari :

- Kemurnian adsorben. Adsorben yang lebih murni memiliki daya adsorpsi yang lebih baik.
- Luas permukaan adsorben. Semakin luas permukaan adsorben maka jumlah adsorbat yang terserap akan semakin banyak pula.

3. Temperatur

Adsorpsi merupakan proses eksotermis sehingga jumlah adsorbat akan bertambah dengan berkurangnya temperatur adsorbat. Adsorpsi fisika yang substansial biasa terjadi pada temperatur di bawah titik didih adsorbat, terutama dibawah  $50^{\circ}$  C.

4. Tekanan

Pada adsorpsi fisika, kenaikan tekanan adsorbat mengakibatkan kenaikan jumlah zat yang diadsorpsi. Sebaliknya pada adsorpsi kimia, jumlah yang diadsorpsi berkurang dengan naiknya temperatur adsorbat.

### 2.3 Adsorben

Padatan yang digunakan untuk menyerap fluida (cair maupun gas) pada proses adsorpsi disebut adsorben. Karakteristik adsorben yang penting adalah memiliki porositas yang tinggi. Selain itu, karakteristik secara fisik untuk adsorben lebih penting dibandingkan dengan karakteristik kimianya.

Struktur mikroskopis adsorben dapat diketahui dengan metode standar. Karakteristik secara fisik yang penting diantaranya:

1. Volume pori
2. Luas permukaan
3. Distribusi ukuran pori

Untuk mengetahui volume pori, baik volume total pori maupun distribusinya serta diameter pori yang dibutuhkan digunakan berdasarkan pada penentuan densitas (penempatan) dari merkuri dan helium. Helium digunakan karena ukuran atomnya yang kecil serta adsorpsi yang menyertainya dapat

diabaikan menunjukkan total kekosongan dimana merkuri tidak berpenetrasi kedalam pori pada tekanan ambient dan memberikan kekosongan antar partikel. Total volume pori setara dengan perbedaan antara kekosongan. Distribusi ukuran pori (*pore size distribution*) diukur dengan menggunakan merkuri porosimeter untuk pori dengan ukuran lebih besar dari 100-150 Angstrom serta dengan menggunakan N<sub>2</sub> desorpsi untuk rentang ukuran pori 10-250 Angstrom. Radius pori pada tekanan tertentu dihitung dengan didasarkan pada kesetimbangan tekanan yang diterapkan dan tegangan antar permukaan:

$$r = \frac{-2\sigma m \cos \theta}{p} \quad (2.1)$$

Dimana :

$\sigma$  = tegangan antar permukaan

$\theta$  = sudut kontak

Secara umum  $\sigma$  bernilai 0,48 N/m dan  $\theta$  memiliki rata-rata nilai sebesar 140°. Persamaan diatas diturunkan menjadi  $r = 7500/P$  dimana P dalam atm dan r dalam Angstrom. Pada teknik N<sub>2</sub> adsorpsi memiliki keuntungan ketika terjadi kondensasi secara kapiler pada tekanan relatif. Hal ini disebabkan karena kesetimbangan tekanan uap diatas miniskus konkaf lebih rendah dibandingkan tekanan diatas permukaan lurus, yang diprediksikan oleh persamaan Kelvin :

$$\frac{\ln P}{P_o} = \frac{-2\sigma V_m \cos \theta}{r_k RT} \quad (2.2)$$

dimana :

$V_m$  = Volum molar cairan

$r_k$  = Radius kelvin

R dan T = konstanta gas dan temperatur absolut

Adsorben berdasarkan struktur dan karakteristik air dibagi menjadi dua bagian, yaitu adsorben yang amorf dan adsorben yang memiliki struktur jelas. Pembagian ini dapat dilihat dari Tabel 2.2 .

Tabel 2.2 Klasifikasi Adsorben Berdasarkan Strukturnya

Struktur dan Karakteristik Air	Amorf	Non amorf
Hidrofilik	Karbon Aktif, Polimer	Carbon Molecular Sieve, Silikat
Hidrofobik	Silika gel, Alumina aktif	Jenis-jenis Zeolit seperti :3A (KA), 4A(NaA), 5A (CaA)

Klasifikasi adsorben yang dilakukan selain berdasarkan struktur juga berdasarkan ukuran porinya. Berikut ini merupakan hasil pengklasifikasian adsorben yang dilakukan oleh IUPAC :

Tabel 2.3 Klasifikasi Adsorben Berdasarkan Diameter Porinya

Tipe	Diameter Pori ( $\omega$ )
Mikropori	$\omega < 2 \text{ nm}$
Mesopori	$2 \text{ nm} < \omega < 50 \text{ nm}$
Makropori	$\omega > 50 \text{ nm}$

### 2.3.1 Karbon Aktif

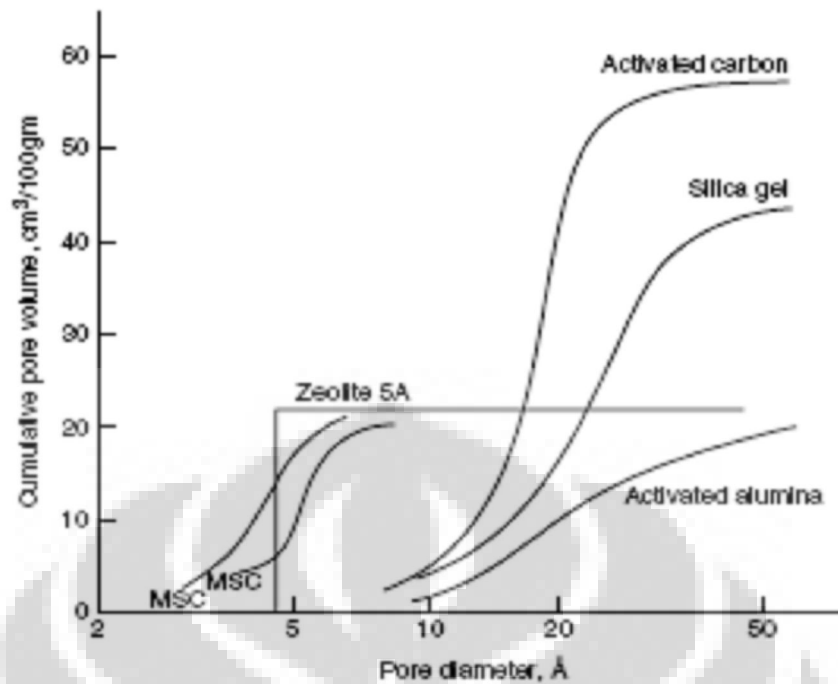
Karbon aktif merupakan jenis adsorben yang luas penggunaannya. Proses modern pembuatan karbon aktif pada dasarnya terdiri dari preparasi *raw material*, karbonisasi pada temperatur rendah, dan aktivasi. Bahan dasar untuk pembuatan karbon aktif sendiri biasanya berasal dari tempurung kelapa, tulang, kayu dan arang. Didalam bahan dasar karbon aktif terdapat pori-pori. Aktivasi dilakukan untuk mengatur pendistribusian pori sehingga tercapai distribusi pori yang diinginkan.

Metode yang digunakan untuk proses aktivasi itu sendiri terdiri dari dua jenis, yaitu dengan gasifikasi dan bahan kimia. Pada proses aktivasi dengan menggunakan gas, keterlibatan gas terjadi pada tahapan perlakuan awal dan pembentukan pelet. Gas digunakan pada karbonisasi awal yang bertujuan untuk mengurangi bagian-bagian pada bahan dasar yang bersifat volatil yaitu pada temperatur 400-500 °C kemudian gas kembali terlibat pada gasifikasi parsial yang bertujuan untuk menaikkan porositas dan luas permukaan pada temperatur 800-1000 °C. Tahap aktivasi merupakan tahapan yang sangat krusial dalam mencapai

distribusi pori yang diinginkan. Pada dasarnya tahap ini merupakan gasifikasi yang didalamnya digunakan steam karbondioksida maupun oksigen sebagaimana penambahan katalis.

Metode kedua yang digunakan untuk memproduksi karbon aktif adalah dengan menggunakan bahan kimia. Bahan kimia ditambahkan berfungsi untuk mendegradasi dan mendehidrasi *raw material* selulotik. *Raw material* yang biasanya digunakan untuk metode ini adalah lignin, misalnya serbuk kayu. Pada proses aktivasi menggunakan reagen kimia tidak dibutuhkan tahap pra karbonisasi. *Raw material* akan dicampur dengan aktivator seperti asam fosfat, seng klorida, kalium sulfida dan kalium tiosianat yang kemudian dikarbonisasi pada temperatur antara 500-900 °C. Sisa bahan kimia yang bercampur dengan produk dihilangkan dengan menggunakan air atau asam. Produk yang dihasilkan biasanya berbentuk bubuk dan digunakan untuk tujuan pada fase gas dan fase terlarut.

Karbon aktif merupakan adsorben yang memiliki luas permukaan yang paling besar dibandingkan dengan adsorben lainnya. Luas permukaan karbon aktif berkisar antara 300 sampai 4000 m<sup>2</sup>/g yang diukur dengan menggunakan metode BET. Pengujian terhadap karbon aktif dilakukan dengan melakukan pengukuran *bulk density*, *absolute density*, *particle density*, distribusi ukuran partikel, kekuatan mekanik, dan *pressure drop* sepanjang *packed bed*. Efektifitas dari karbon aktif dapat diuji dengan mengukur banyaknya reagen kimia yang dapat teradsorpsi dalam kondisi standar. Gambar 2.2 menunjukkan distribusi pori pada tiap adsorben.



Gambar 2.2 Distribusi ukuran partikel tiap-tiap adsorben

### 2.3.1.1 Karakteristik Karbon Aktif

Karbon aktif memiliki karakteristik permukaan yang unik dan kontras dengan sebagian besar yang dimiliki oleh adsorben lainnya. Karakteristik yang unik ini adalah permukaan karbon aktif yang bersifat non polar atau sedikit polar yang disebabkan karena pada permukaannya terdapat pengotor anorganik dan grup dari oksida. Karakteristik yang unik ini memberikan keuntungan bagi karbon aktif itu sendiri, diantaranya :

1. Merupakan satu-satunya adsorben yang tidak membutuhkan pemindahan uap ketika digunakan untuk proses pemurnian dan pemisahan.
2. Karena sangat luas dengan volume pori yang besar dibandingkan adsorben lainnya, maka karbon aktif dapat mengadsorpsi lebih banyak molekul nonpolar dan molekul polar yang lemah. Sebagai contoh, besarnya metana yang diadsorpsi oleh karbon aktif dua kali lebih banyak dibandingkan dengan besarnya metana yang diadsorpsi oleh zeolit.

3. Kalor adsorpsi atau kekuatan ikatannya secara umum lebih lemah dibandingkan dengan adsorben lainnya, sehingga dibutuhkan energi yang rendah pula untuk proses regenerasi karbon aktif itu sendiri.

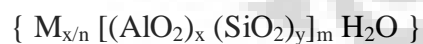
### 2.3.2 Zeolit

Adsorben zeolit merupakan adsorben kristal berpori yang memiliki struktur teratur. Pada umumnya zeolit terdiri atas silika, alumunium, oksigen dan beberapa kation pada bagian porinya. Struktur penting dari zeolit adalah adanya lubang dalam susunan kristalnya yang dibentuk oleh silika alumina tetrahedron. Tiap tetrahedron memiliki empat anion oksigen dengan kation alumina atau silika ditengahnya. Dengan demikian zeolit memiliki sisi asam yang lebih besar dan kemampuan mengadsorbsi reaktan pada permukaan katalis yang lebih kuat jika dibandingkan dengan katalis asam jenis lain.

Sisi asam pada zeolit merupakan asam bronsted hasil dari substitusi silika dengan alumina yang dapat mendonorkan proton. Tingginya kekuatan asam zeolit didukung dengan luas permukaan yang besar menjadikan zeolit sebagai katalis yang komersil digunakan pada industri untuk reaksi heterogen.

Dalam struktur zeolit, atom Al dan Si berkoordinasi dengan seluruh atom oksigen dalam bentuk tertrahedral silika atau alumina (Gambar 2.5). Gugus alumina  $AlO_4$  akan bermuatan negatif dan dinetralsir oleh logam alkali atau alkali tanah untuk mencapai struktur yang stabil.

Rumus empiris senyawa zeolit adalah:



dimana:

M = kation logam yang dapat saling ditukarkan

n = valensi kation M

m = jumlah molekul air per unit sel

x,y = menyatakan banyaknya atom Al dan Si

Logam M dikenal sebagai kation tukar, sedangkan Si dan Al dikenal sebagai kation struktural.

Jadi zeolit terdiri dari 3 komponen utama, yaitu:

1. Kation yang dipertukarkan
2. Kerangka aluminasilikat
3. Fase air

Zeolit juga sering disebut sebagai '*molecular sieve*'/'*molecular mesh*' (saringan molekuler) karena zeolit mempunyai pori-pori berukuran molekuler sehingga mampu memisahkan atau menyaring molekul dengan ukuran tertentu.

#### 2.3.2.1 Aktivasi Zeolit

Zeolit yang terbentuk secara alami biasanya mengandung banyak pengotor, seperti mineral-mineral dan bahan-bahan organik yang ada di tanah misalnya asam humat. Oleh karena itu, untuk meningkatkan kemampuan zeolit sesuai dengan tujuan penggunaannya, biasanya dilakukan aktivasi terhadap zeolit. Beberapa cara aktivasi yang biasa digunakan, yaitu:

##### 1. Aktivasi secara kimia

Aktivasi ini biasa dilakukan dengan tujuan untuk melarutkan pengotor-pengotor yang menutupi permukaan zeolit dan gugus fungsi yang ada pada zeolit. Pengotor yang bersifat asam akan larut dengan pencucian yang menggunakan larutan basa dan pengotor yang bersifat basa akan larut dalam pencucian dengan larutan asam, sehingga akan diperoleh zeolit yang bersih dan gugus fungsi yang terdapat pada zeolit teraktifkan.

##### 2. Aktivasi secara fisik atau pemanasan

Aktivasi fisik atau secara pemanasan dilakukan untuk menghilangkan air yang terdapat pada permukaan atau pori-pori zeolit, sehingga pori-pori zeolit dapat lebih terbuka. Selain itu aktivasi secara fisik dapat membuat pori-pori zeolit lebih terbuka karena pemanasan ini dapat menguraikan senyawa-senyawa organik yang terdapat dalam rongga atau pori zeolit. Biasanya aktivasi ini dilakukan dengan pemanasan pada suhu 300°C-600°C.



### 2.3.2.2 Sifat-sifat Zeolit

Hal pertama yang harus diketahui dalam pemanfaatan zeolit adalah mengenai sifat-sifatnya. Adapun yang menjadi sifat zeolit adalah meliputi:

#### 1. Sifat Adsorpsi

Pada temperatur ruang, rongga hampa kristal zeolit terisi oleh molekul air bebas yang berada di sekitar kation. Jika dilakukan proses kalsinasi pada suhu sekitar 250°-400°C, maka akan menyebabkan terjadinya dehidrasi atau penguapan air yang terkandung didalamnya. Hal ini akan mengakibatkan zeolit mempunyai luas permukaan kontak yang besar, sehingga memungkinkan zeolit digunakan sebagai adsorben yang mampu menyerap molekul gas atau cairan.

#### 2. Sifat Penukar Ion

Kation yang terdapat pada zeolit umumnya berasal dari golongan alkali dan alkali tanah. Kation tersebut mempunyai posisi yang tidak tetap dan tidak terikat kuat dalam rongga zeolit, sehingga memungkinkan kation tersebut dipertukarkan dengan kation lain. Pertukaran ion dapat terjadi dalam suatu cairan yang mengandung anion, kation dan molekul air, dimana salah satu atau ion akan terikat pada matriks mikropori dari zeolit. Molekul air dapat berada dalam mikropori bersama ion (kation, anion) dengan muatan untuk mencapai keadaan netral. Ion yang berada dalam cairan yang bergerak bebas di dalam matriks mikropori zeolit sehingga zeolit disebut sebagai penukar kation atau anion tergantung pada jenis ion yang ditukar.

Proses pertukaran kation antara larutan garam suatu logam tertentu dengan kation pada (zeolit) adalah sebagai berikut:



Kemampuan pertukaran ion biasanya dinamakan dengan nilai Kapasitas Tukar Kation (KTK) yaitu miliekivalen kation yang terserap oleh satu gram zeolit. KTK zeolit dapat bervariasi dari 1,5 sampai 6 meq/g. KTK tergantung pada

komposisi kimia dan perbandingan Si/Al. Pada umumnya zeolit dengan perbandingan Si/Al yang rendah kurang baik digunakan sebagai penukar kation, karena kurang stabil dalam suasana asam.

Setiap jenis zeolit mempunyai urutan selektivitas pertukaran kation yang berlainan. Selektivitas kation dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. Struktur pembentukan zeolit alam dipengaruhi oleh besarnya rongga yang terjadi.
2. Mobilitas kation yang diperlukan.
3. Pengaruh difusi kation ke dalam larutan dan energi hidrasi.

Kapasitas pertukaran ion merupakan fungsi dari perbandingan oksida silikon dan oksida aluminium, karena pertukaran ion hanya terjadi pada suatu kerangka tetrahedral  $AlO_4^{5-}$ . Zeolit selain sebagai penukar kation, juga dapat sebagai penukar anion, seperti monmorilonit, atau dapat menggunakan jenis zeolit lain yang telah dimodifikasi dengan polimer organik.

Sifat khusus penapis molekular zeolit dapat mengakibatkan ion-ion yang berukuran lebih besar dari rongga zeolit sukar tertukar. Sedangkan ion-ion yang berukuran lebih kecil dari rongga zeolit mudah tertukar. Pertukaran ion dengan garis tengah ion yang lebih besar dari rongga zeolit dapat terjadi jika didahului proses difusi ion dalam larutan sehingga dapat masuk ke rongga zeolit. Setiap jenis zeolit mempunyai sifat-sifat pertukaran ion tersendiri, tergantung dari struktur dan susunan molekul-molekul aluminosilikat serta besarnya rongga-rongga yang terbentuk di antara molekul-molekul tersebut.

### 3. Sifat Katalis atau Penyangga Katalis

Zeolit dapat digunakan sebagai katalis maupun sebagai penyangga katalis untuk reaksi-reaksi katalitik. Ciri paling khusus dari zeolit adalah banyaknya ruang kosong yang membentuk saluran didalamnya. Bila zeolit digunakan pada proses katalisis maka akan terjadi difusi molekul ke dalam ruang bebas antar kristal dan reaksi kimia juga terjadi di permukaan saluran tersebut.

#### 4. Sifat Penyaring Molekul

Zeolit dapat menyaring molekul, karena mempunyai saluran dan rongga berukuran molekul. Proses penyaringan molekul berdasarkan perbedaan ukuran, bentuk, dan polaritas molekul yang akan disaring. Oleh karena itu ada beberapa molekul yang dapat melintas dalam rongga dan saluran zeolit, tetapi ada juga yang tidak dapat melintasi atau terserap. Selain itu polaritas zeolit yang sangat besar juga mengakitkannya mampu untuk menyerap molekul-molekul gas bersifat polar.

#### 2.4 Pemilihan Adsorben

Hal utama yang dijadikan dasar dalam pemilihan adsorben adalah kesetimbangan isoterm. Dalam hal memilih adsorben kesetimbangan isoterm dari komponen-komponen yang ada dalam campuran gas, pada rentang temperatur dan tekanan operasi perlu dipertimbangkan. Berdasarkan hal ini maka faktor-faktor yang mempengaruhi penggunaan adsorben pada suatu desain proses pemisahan adalah:

1. Kapasitas adsorben, pada rentang temperatur dan tekanan operasi
2. Metode regresi dari adsorben
3. Kemurnian produk yang diinginkan

Temperatur untuk aktivasi dan regenerasi dari adsorben juga perlu dipertimbangkan. Sebagai contoh untuk penggunaan pada temperatur tinggi yaitu mendekati  $300^{\circ}\text{C}$  maka digunakan zeolit sebagai adsorben, sedangkan untuk temperatur yang rendah adsorben yang digunakan adalah karbon aktif.

Berikut ini merupakan tabel 2.4 yang menunjukkan adsorben beserta kegunaannya.

Tabel 2. 4 Adsorben dan Aplikasinya

Adsorben	Aplikasi
Karbon aktif	Memisahkan gas-gas nonpolar dan uap-uap organik (contoh : uap pelarut, uap gasolin)
Zeolit : Sintetis Alami	Pengeringan; Pemurnian gas H <sub>2</sub> , Pemurnian udara, gas kromatografi, Pemisahan udara, pemisahan yang didasarkan pada ukuran dan bentuk molekul (contoh pada n- dan iso-parafin, senyawaan aromatik)
Silika Gel	Pengeringan; gas kromatografi
Alumina aktif	Pengeringan; gas kromatografi

## 2.5 Teori Potensial

Secara resmi dijelaskan oleh Polanyi pada tahun 1914, sistem adsorpsi digambarkan sebagai peningkatan secara bertahap konsentrasi molekul gas pada permukaan adsorben yang dilihat dari segi potensial, menyerupai atmosfer pada planet. Terdapat hubungan antara potensial,  $\epsilon$ , dan volume di atas permukaan,  $W$ , pada sistem padatan-gas. Hubungan secara empiris dicapai pada sistem dan disebut kurva karakteristik yang mengasumsikan ketidakbergantungan temperatur. Selain itu, gaya yang terdapat pada proses adsorpsi diasumsikan menjadi gaya dispersi yang tidak tergantung pada temperatur. Hal ini menjadi alasan kenapa teori potensial paling sering digunakan pada adsorpsi dengan menggunakan karbon aktif. Potensial adsorpsi berhubungan dengan kerja kompresi gas dari tekanan gas ( $P$ ) menuju tekanan jenuh ( $P_0$ ) pada proses pencairan. Begitu pula, volume ( $W$ ) dirubah menjadi jumlah zat yang teradsorpsi dengan mengasumsikan fasa yang teradsorpsi adalah cair. Dengan demikian isoterm adsorpsi dapat dicapai.

Salah satu persamaan yang menggunakan pendekatan ini adalah Polanyi-Dubinin Isoterm. Pada persamaan ini diasumsikan bahwa gaya permukaan dapat direpresentasikan oleh kontur ekuipotensial di atas permukaan, dan ruang antar permukaan ekuipotensial sesuai dengan volum teradsorpsi. Hal ini akan memiliki konsekuensi ruang teradsorpsi sebagai fungsi dari potensial,  $\epsilon$ :

$$W = f(\epsilon) \quad (2.3)$$

Fungsi diatas tiadalah bersifat khusus tapi merupakan karakteristik dari sistem padatan-gas dan oleh karena itu dirujuk sebagai kurva karakteristik. Selanjutnya, kurva karakteristik tidak bergantung pada temperatur dikarenakan potensial adsorpsi menyatakan kerja gaya dispersi yang tidak tergantung pada temperatur. Persamaan  $W = f(\epsilon)$  merupakan suatu persamaan adsorpsi isoterm, karena  $W$  menunjukkan jumlah molekul yang teradsorpsi dan  $\epsilon$  dapat dihubungkan dengan tekanan. Potensial sama dengan kerja yang dibutuhkan untuk memindahkan molekul dari lokasinya menuju pada fasa teradsorpsi menuju fasa gas. Sehingga untuk satu mol gas ideal :

$$\epsilon = \Delta F = \int_P^{P_0} V dP = RT \ln \frac{P_0}{P} \quad (2.4)$$

Dimana  $\Delta F$  adalah perubahan energi bebas dan  $P_0$  merupakan tekanan uap jenuh. Volume ( $W$ ) pada ruang teradsorpsi adalah:

$$W = nV_m \quad (2.5)$$

Dimana  $n$  adalah jumlah mol zat yang teradsorpsi per unit massa adsorben dan  $V_m$  merupakan volume molar

## 2.6 Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi (*adsorption isotherm*) merupakan hubungan kesetimbangan antara konsentrasi dalam fase fluida dan konsentrasi didalam partikel adsorben pada suhu tertentu. Untuk fasa gas, biasanya dinyatakan dalam persen mol atau tekanan parsial. Untuk zat cair, konsentrasi biasanya dinyatakan dalam satuan massa, seperti bagian per satu juta (ppm). Konsentrasi adsorbat dalam zat padat dinyatakan sebagai massa zat yang teradsorpsi per satuan massa adsorben semula.

Untuk sistem gas-padatan, jumlah zat yang teradsorpsi pada kesetimbangan dinyatakan dalam :

$$v = f(P, T) \quad (2.6)$$

Dimana  $v$  dinyatakan dalam cc STP/g. Pada temperatur yang sesuai  $v$  merupakan fungsi dari  $P$ , yang disebut dengan isoterm adsorpsi.

Pada sistem gas-padat, yang terjadi adalah adsorpsi secara fisik dimana molekul dari adsorbat (fasa gas) akan terikat dalam padatan melalui gaya van der Waals dan gaya coulomb. Kapasitas dari adsorben yang digunakan tergantung pada luas permukaan dan porositas.

Percobaan adsorpsi yang paling umum adalah menentukan hubungan jumlah gas teradsorpsi (pada adsorben) dan tekanan gas. Pengukuran ini dilakukan pada suhu tetap, dan hasil pengukuran digambarkan dalam grafik dan disebut sebagai **isoterm adsorpsi**.

### 2.6.1 Isoterm Adsorpsi Absolut

Isoterm adsorpsi absolut adalah isoterm adsorpsi yang menggambarkan proses adsorpsi secara teori yaitu terjadinya proses adsorpsi dalam kondisi yang nyata atau seharusnya. Pada isoterm adsorpsi absolut, jumlah adsorbat yang sudah terlebih dahulu teradsorpsi diperhitungkan, dan model ini hanya bisa digunakan pada tekanan rendah. Model-model isoterm adsorpsi absolut yang biasa digunakan diantaranya adalah isoterm adsorpsi Freundlich, isoterm adsorpsi Langmuir, dan isoterm adsorpsi BET.

#### 2.6.1.1 Isoterm Adsorpsi Freundlich

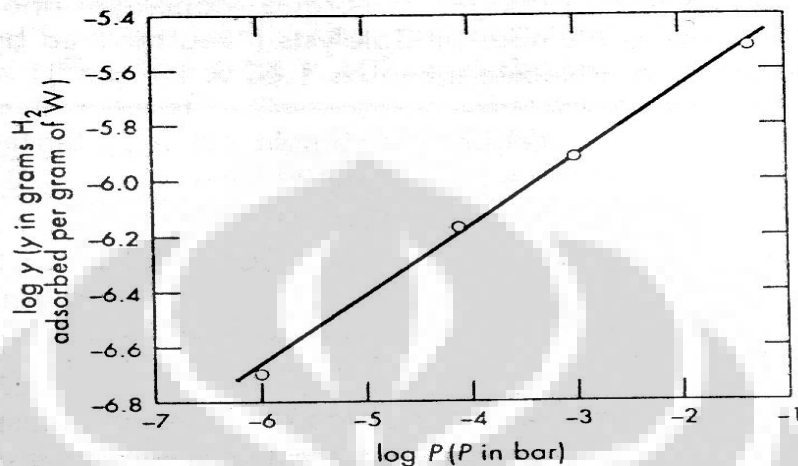
Adsorpsi zat terlarut (dari suatu larutan) pada padatan adsorben merupakan hal yang penting. Aplikasi penggunaan prinsip ini antara lain penghilangan warna larutan (*decolorizing*) dengan menggunakan batu apung (*charcoal*) dan proses pemisahan dengan menggunakan teknik kromatografi.

Pendekatan isoterm adsorpsi yang cukup memuaskan dijelaskan oleh H. Freundlich. Menurut Freundlich, jika  $y$  adalah berat zat terlarut per gram adsorben dan  $c$  adalah konsentrasi zat terlarut dalam larutan, maka :

$$y = k c^{1/n} \quad (2.7)$$

$$\log y = \log k + \frac{1}{n} \log c \quad (2.8)$$

dimana  $k$  dan  $n$  adalah konstanta empiris. Jika persamaan (2.7) diaplikasikan untuk gas, maka  $y$  adalah jumlah gas yang teradsorpsi dan  $c$  digantikan dengan tekanan gas. Plot  $\log y$  terhadap  $\log c$  atau  $\log P$  menghasilkan kurva linier. Dengan menggunakan kurva tersebut, maka nilai  $k$  dan  $n$  dapat ditentukan.

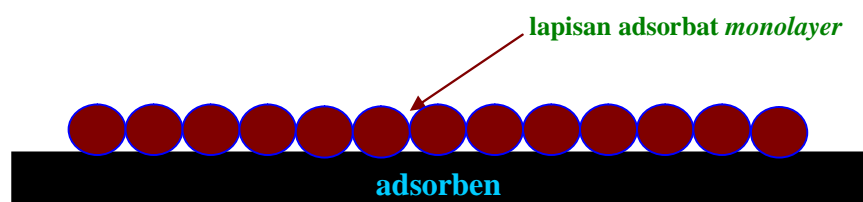


Gambar 2.3 isoterm Freundlich untuk adsorpsi H<sub>2</sub> pada tungsten (suhu 400°C)

#### 2.6.1.2 Isoterm Adsorpsi Langmuir

Pada tahun 1918, Irving Langmuir menurunkan teori isoterm adsorpsi dengan menggunakan model sederhana berupa padatan yang mengadsorpsi gas pada permukaannya. Pendekatan Langmuir meliputi lima asumsi mutlak, yaitu :

1. Gas yang teradsorpsi berkelakuan ideal dalam fasa uap
2. Gas yang teradsorpsi dibatasi sampai lapisan *monolayer*
3. Permukaan adsorbat homogen, artinya afinitas setiap kedudukan ikatan untuk molekul gas sama
4. Tidak ada interaksi lateral antar molekul adsorbat
5. Molekul gas yang teradsorpsi terlokalisasi, artinya mereka tidak bergerak pada permukaan



Gambar 2.4 Pendekatan isoterm adsorpsi Langmuir

Persamaan umum yang digunakan pada model Langmuir adalah :

$$\theta = \frac{v}{v_m} = \frac{bP}{1+bP} \quad \text{atau} \quad bP = \frac{\theta}{1-\theta} \quad (2.9)$$

Dimana :

$\theta$  = fraksi luas permukaan yang tertutup oleh lapisan monolayer

$v$  = volume gas teradsorpsi persatuan massa adsorben

$v_m$  = volume gas yang diperlukan untuk membentuk lapisan *monolayer*

$b$  = konstanta adsorpsi Langmuir

$P$  = tekanan adsorpsi

Pada adsorpsi *monolayer*, jumlah gas yang teradsorpsi pada tekanan  $P$  ( $y$ ) dan jumlah gas yang diperlukan untuk membentuk lapisan *monolayer* dihubungkan dengan  $\theta$  melalui persamaan

$$\theta = \frac{y}{y_m} \quad (2.10)$$

$$y = \frac{y_m P}{a + P} \quad (2.11)$$

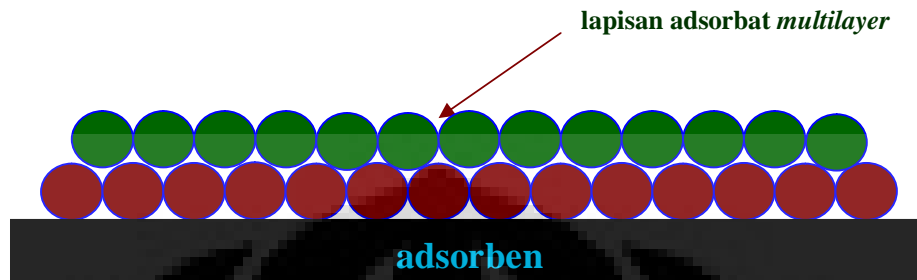
Teori isoterm adsorpsi Langmuir berlaku untuk adsorpsi kimia, dimana reaksi yang terjadi adalah spesifik dan umumnya membentuk lapisan *monolayer*.

### 2.6.1.3 Adsorpsi BET

Teori isoterm adsorpsi BET merupakan hasil kerja dari S. Brunauer, P.H. Emmet, dan E. Teller yang diperkenalkan pertama kali pada tahun 1938. Konsep teori ini merupakan pengembangan dari teori Langmuir. Teori BET ini merupakan adsorpsi fisika yang termasuk dalam isoterm tipe II-V *monolayer*, sehingga isoterm adsorpsi BET dapat diaplikasikan untuk adsorpsi *multilayer*. Keseluruhan proses adsorpsi dapat digambarkan sebagai :



1. Penempelan molekul pada permukaan padatan (adsorben) membentuk lapisan *monolayer*
2. Penempelan molekul pada lapisan *monolayer* membentuk lapisan *multilayer*



Gambar 2.5 Pendekatan Isoterm Adsorpsi BET

Pada pendekatan ini, perbandingan kekuatan ikatan pada permukaan adsorben dan pada lapisan adsorbat *monolayer* didefinisikan sebagai konstanta  $c$ . Lapisan adsorbat akan terbentuk sampai tekanan uapnya mendekati tekanan uap dari gas yang teradsorpsi. Bila  $n$  menyatakan jumlah mol gas yang teradsorpsi persatuan massa adsorbent,  $n_m$  menyatakan jumlah mol gas yang diperlukan untuk membentuk lapisan *monolayer*, dan  $z$  adalah  $P/P^0$  dimana  $P^0$  adalah tekanan uap murni adsorbat, maka isoterm adsorpsi BET dapat dinyatakan sebagai :

$$\theta = \frac{n}{n_m} = \frac{cz}{(1-z)(1-z+cz)} \quad (2.12)$$

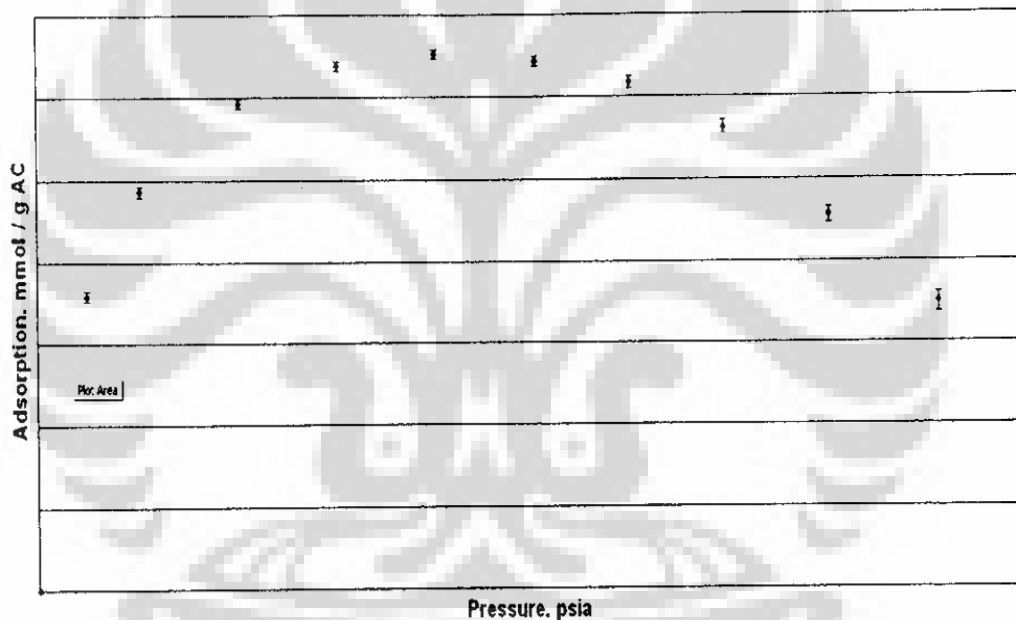
Kesetimbangan antara fasa gas dan senyawa yang teradsorpsi dapat dibandingkan dengan kesetimbangan antara fasa gas dan cairan dari suatu senyawa. Dengan menggunakan analogi persamaan Clausius – Clapeyron, maka

$$\frac{d(\ln P)}{dT} = -\frac{\Delta H_{ads}}{RT^2} \quad (2.13)$$

dimana  $\Delta H_{ads}$  adalah entalpi adsorpsi. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa tekanan kesetimbangan dari gas teradsorpsi bergantung pada permukaan dan entalpi adsorpsi.

## 2.6.2 Isoterm Adsorpsi Gibbs

Isoterm adsorpsi Gibbs adalah isoterm adsorpsi yang menggambarkan proses adsorpsi secara eksperimen yaitu terjadinya proses adsorpsi dalam kondisi yang ideal. Pada adsorpsi Gibbs, jumlah adsorbat yang telah teradsorpsi lebih dahulu tidak diperhitungkan, sehingga terdapat titik maksimum dari jumlah mol gas yang teradsorpsi per gram adsorben pada tekanan tertentu. Jika tekanan adsorpsi sudah melebihi dari tekanan dimana terdapat titik maksimum, maka jumlah mol gas yang teradsorpsi per gram adsorben akan turun seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6.

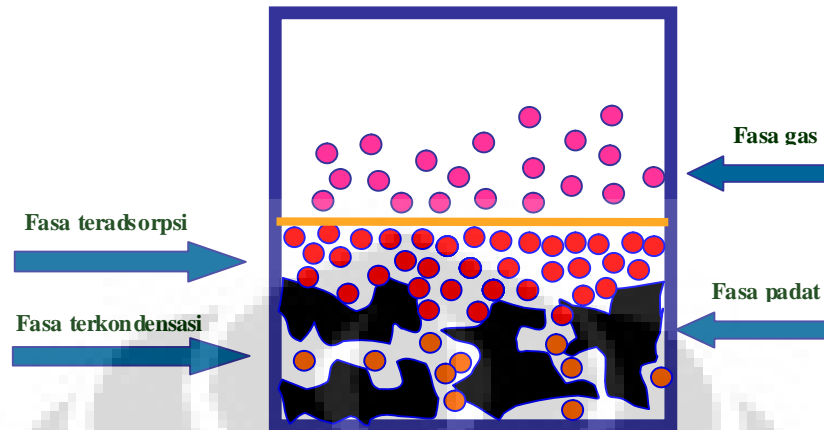


Gambar 2.6. Grafik Adsorpsi Isotermis Gibbs

## 2.6.3 Isoterm Adsorpsi Gibbs dan Hubungannya dengan Isoterm Adsorpsi Absolut

Ketika sejumlah molekul secara terus-menerus "menabrak" suatu permukaan dan tetap berada disana selama periode waktu tertentu sebelum terlepas kembali, konsentrasi molekul pada permukaan akan menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi di fasa gas. Fasa "terkondensasi" ini biasa

disebut fasa teradsorpsi dan fenomena ini disebut proses adsorpsi. Gambar 2.7 menunjukkan situasi terjadinya proses adsorpsi pada suatu bahan berpori.



Gambar 2.7 Adsorpsi Gas Pada Bahan Berpori

Jika ketebalan dari fasa teradsorpsi pada permukaan padatan adalah sekitar satu kali diameter partikel, maka adsorpsi ini disebut "monolayer", namun dengan kenaikan tekanan gas bisa saja menyebabkan terjadinya adsorpsi "multilayer".

Jumlah gas yang teradsorpsi biasa disebut "adsorpsi absolute" yang secara teoritis dapat dituliskan sebagai:

$$n^{abs} = V_{ads} \rho_{ads} \quad (2.14)$$

Dimana  $V_{ads}$  dan  $\rho_{ads}$  adalah volume dan densitas fasa teradsorpsi. Adsorpsi absolute ini sebetulnya adalah suatu angka hipotesis karena tidak pernah dapat terukur secara percobaan, yang terukur dari suatu percobaan sebetulnya adalah apa yang disebut sebagai "adsorpsi Gibbs" (Myers, 2002). Jika jumlah molekul gas yang dimasukkan kedalam sistem pada gambar 2.7 adalah  $n_{total}$ , maka adsorpsi Gibbs ini dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$n^{Gibbs} = n_{total} - \frac{PV_{void}}{Z_{gas}RT} \quad (2.15)$$

Sedangkan persamaan absolut dihitung berdasarkan persamaan :

$$n^{abs} = n_{total} - \frac{P(V_{void} - V_{ads})}{Z_{gas} RT} \quad (2.16)$$

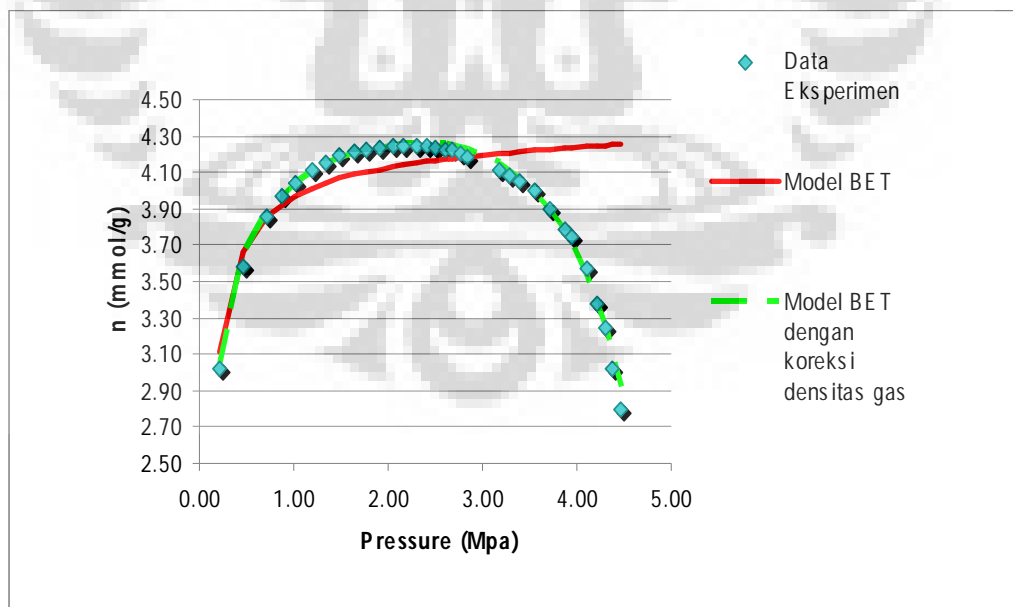
Hubungan antara adsorpsi absolut dengan adsorpsi Gibbs dapat diturunkan dari kedua persamaan diatas sebagai berikut:

$$n^{Gibbs} = n^{Abs} - V_{ads} \rho_{gas} \quad (2.17)$$

Atau

$$n^{Gibbs} = n^{Abs} \left( 1 - \frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads}} \right) \quad (2.18)$$

Dari persamaan diatas menunjukkan terdapat ketimpangan dimana adsorpsi absolut selalu lebih besar dibandingkan adsorpsi Gibbs. Pada adsorpsi tekanan rendah (dimana densitas gas juga rendah), koreksi dari adsorpsi Gibbs ke adsorpsi absolut dapat diabaikan, namun pada tekanan tinggi koreksi ini menjadi sangat penting, bahkan harga adsorpsi gas dapat mencapai nol ketika densitas gas sama dengan densitas molekul yang teradsorpsi.



Gambar 2.8 Hubungan antara Adsorpsi Gibbs dan Adsorpsi Absolut

Gambar 2.8 menjelaskan bahwa pada tekanan tinggi koreksi dari adsorpsi Gibbs terhadap adsorpsi absolut sangatlah penting.

#### 2.6.4 Pengaruh Temperatur pada Kesetimbangan Adsorpsi.

Apabila kita mengasumsikan energi dan entropi dari kisi-kisi molekul tidak berubah secara signifikan selama adsorpsi maka kita dapat menyatakan bahwa ketika molekul yang teradsorpsi entropi akan menurun,  $\Delta S$  akan bernilai negatif oleh karena itu  $\Delta H$  pun akan bernilai negatif.

Berikut ini merupakan persamaan yang memperlihatkan hubungan antara temperatur pada suatu kesetimbangan adsorpsi :

Penerapan termodinamika

$$K = e^{-\Delta G^0/RT} = -e^{-\Delta H^0/RT} + e^{-\Delta S^0/RT} = \frac{k_1}{k_2} \quad (2.19)$$

Pada saat kesetimbangan

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = 0 \quad (2.20)$$

Persamaan Arrhenius :

$$k_1 = k_{10} e^{-E_{ads}/RT} \quad (2.21)$$

$$k_2 = k_{20} e^{-E_{desorp}/RT} \quad (2.22)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.21 dan 2.22 kedalam persamaan 2.17, maka pengaruh temperatur terhadap kesetimbangan adsorpsi dapat dilihat pada persamaan dibawah ini :

$$K = \frac{k_1}{k_2} = \frac{k_{10}}{k_{20}} e^{-\frac{(E_{ads} - E_{desorp})}{RT}} = K_0 e^{-\Delta H/RT} \quad (2.23)$$

Pada tekanan yang diberikan, tingkat adsorpsi ditentukan oleh nilai  $K$ , hal ini bergantung pada temperatur dan entalpi adsorpsi. Besarnya entalpi adsorpsi menunjukkan kekuatan ikatan molekul yang diadsorpsi dengan adsorben.

$K$  meningkat seiring dengan :

- ✚ Penurunan temperatur sistem
- ✚ Peningkatan kekuatan adsorpsi

Pada temperatur yang tinggi  $K$  menurun. Hal ini berarti permukaan menjadi kosong kembali.



## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Tahapan Penelitian

Metode dalam penelitian ini terdiri atas 6 tahap, yaitu:

#### Tahap I : Pengumpulan Data-data dari Literatur

Penelitian diawali dengan mengumpulkan data-data mengenai adsorpsi gas. Data-data eksperimen ini merupakan data yang berasal dari literatur dengan variasi yang terdapat pada parameternya seperti adsorben, adsorbat yang digunakan serta kondisi temperatur dan tekanan yang bervariasi. Tabel 3.1 sampai dengan Tabel 3.4 merupakan data-data dari literatur yang akan digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 3.1 Sumber Data Adsorpsi Gas dengan Karbon Aktif

Sistem	Deskripsi		T (F)	Referensi
	Gas	Adsorben		
1	CH <sub>4</sub>	Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium)	85,7 121,7 157,7 193,7 229,7	Frere, M.G. dan De Weireld, G.F. (2002)
2	N <sub>2</sub>	Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium)	85,7 121,7 157,7 193,7 229,7	Frere, M.G. dan De Weireld, G.F. (2002)
3	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium)	85,7 121,7 157,7 193,7 229,7	Frere, M.G. dan De Weireld, G.F. (2002)
4	CO <sub>2</sub>	Karbon Aktif (F30/470; Chemviron Carbon, Belgium)	40,7 58,7 76,7 85,7 94,7 112,7 130	Frere, M.G. dan De Weireld, G.F. (2002)

Tabel 3.1 Sumber Data Adsorpsi Gas dengan Karbon Aktif (lanjutan)

Sistem	Deskripsi		T (F)	Referensi
	Gas	Adsorben		
5	CO <sub>2</sub>	(Norit R1; BET)	77	Beutekamp, S. dan Harting, P.(2002)
6	N <sub>2</sub>	(Norit R1; BET)	77	Beutekamp, S. dan Harting, P.(2002)
7	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Karbon Aktif	68 86 104 122 140	Payne, H.K., Sturdevant, G.A., dan Leland, T.W. (1968)
8	CH <sub>4</sub>	Karbon Aktif	50 68 86 104 122 211,8 404,4	Payne, H.K., Sturdevant, G.A., dan Leland, T.W. (1968)
9	CH <sub>4</sub>	Karbon Aktif (Norit RB1)	89,1 100,9 136,6 171,3	Vaart, R. v der; Huiskes, C; Bosch, H. dan Reith, T (2000)

Tabel 3.2 Sumber Data Adsorpsi Gas dengan Zeolit

Sistem	Deskripsi		T (F)	Referensi
	Gas	Adsorben		
1	N <sub>2</sub>	Zeolit Sintetik (Linde 5A, 1-2 mm; 8g)	77 122 167	Wakasugi, Y., Ozawa, S. and Ogino, Y. (1981)
2	CH <sub>4</sub>	Zeolit Sintetik (Linde 5A, 1-2 mm; 8g)	49,8 85,8	Wakasugi, Y., Ozawa, S. and Ogino, Y. (1981)
3	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Zeolit Sintetik (Linde 5A, 1-2 mm; 8g)	77 122 167	Wakasugi, Y., Ozawa, S. and Ogino, Y. (1981)
4	CH <sub>4</sub>	Zeolit G5	49,8 85,8	Berlier, K; Oliveier, M-G; and Jadot, R. (1995)
4	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Zeolit G5	49,8 85,8	Berlier, K; Oliveier, M-G; and Jadot, R. (1995)



Tabel 3.3 Sumber Data Adsorpsi Gas dengan Batu Bara

Sistem	Deskripsi		T (F)	Referensi
	Gas	Adsorben		
1	CH <sub>4</sub>	Wet Fruitland Coal	115,1	Arri, L. E.; Yee, D.
2	CO <sub>2</sub>	Wet Fruitland Coal	115,3	Arri, L. E.; Yee, D.
3	N <sub>2</sub>	Wet Fruitland Coal	114,8	Arri, L. E.; Yee, D.
4	CH <sub>4</sub>	Carbon black (Cabot Corp.: Spheron-6; BET: 123 sqm/g)	100,0 130,1 160,0 190,0 220,1 250,0	Stacy, T.D., Hough, E.W., and McCain, W.D. Jr.

Tabel 3.4 Sumber Data Adsorpsi Gas dengan Silika Gel

Sistem	Deskripsi		T (F)	Referensi
	Gas	Adsorben		
1	CO <sub>2</sub>	Silika Gel (BET) = 750	41 59 77 86 95 113 131	Arri, L. E.; Yee, D.

### Tahap II : Memasukkan Data-data dari Literatur dengan Menggunakan Spreadsheet

Data-data adsorpsi yang didapat dari literatur kemudian dimasukkan kedalam Spreadsheet. Lalu disimpan dengan menggunakan format : nama dokumen.xls.

### Tahap III : Membuat Persamaan BET dengan Menggunakan Spreadsheet

Pada tahap ini dilakukan pembuatan persamaan BET ke dalam Spreadsheet.

Persamaan yang dimaksud adalah :

$$n_{BET} = \frac{cz}{(1-z)(1-z+cz)} n_{maks} \quad (3.1)$$

#### **Tahap IV : Memodifikasi Persamaan BET**

Setelah persamaan BET dimasukkan kedalam Spreadsheet, maka dilakukan modifikasi terhadap persamaan tersebut. Modifikasi ini dilakukan dengan cara mensubstitusikan persamaan BET yang didasarkan pada adsorpsi absolut kedalam persamaan yang memperlihatkan hubungan antara adsorpsi absolut dan adsorpsi gibbs. Hasil modifikasi ini akan menghasilkan persamaan adsorpsi gas yang baru, kemudian seperti halnya pada persamaan BET persamaan ini dimasukkan kedalam Spreadsheet. Adapun persamaan yang dihasilkan oleh modifikasi tersebut sebagai berikut:

$$n_{BETMOD} = \frac{cz}{(1-z)(1-z+cz)} (n_{maks}) \left( 1 - \frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads}} \right) \quad (3.2)$$

#### **Tahap V : Penentuan Densitas Gas**

Penentuan nilai densitas ini dilakukan dengan cara menggunakan program aplikasi NIST. Dalam penggunaannya, setiap gas yang terlibat dalam penelitian ini dapat ditentukan nilai densitasnya pada temperatur dan tekanan tertentu dengan menggunakan program aplikasi ini. Dengan menginput nilai temperatur dan tekanan pada program aplikasi ini, maka akan didapat nilai densitas gasnya.

#### **Tahap VI : Melakukan optimasi parameter-parameter yang ada dalam Persamaan BET dan Persamaan Modifikasi BET**

Dari tiap-tiap data hasil eksperimen dilakukan dua macam perlakuan. Perlakuan pertama adalah pengolahan data gas teradsorpsi maksimum dengan menggunakan persamaan BET. Pada pengolahan data yang pertama ini dilakukan perhitungan dengan cara menginput persamaan Langmuir kedalam satu sel yang ada pada spread sheet lalu kedalam persamaan ini dimasukkan nilai tekanan (Mpa), serta nilai konstanta BET(c), setelah itu ditentukan nilai persen deviasi dari data jumlah gas teradsorpsi maksimum hasil pengolahan dengan menggunakan persamaan BET terhadap data jumlah gas teradsorpsi maksimum literatur. Data-data yang didapatkan kemudian dituangkan dalam suatu grafik dimana yang bertindak sebagai absis (sumbu x) adalah tekanan yang terlibat dalam sistem P

dan yang bertindak sebagai ordinat (sumbu y) adalah jumlah gas yang teradsorpsi ( $n$ ). Pengolahan data yang kedua adalah mengoptimasi nilai jumlah gas teradsorpsi maksimum dan konstanta BET ( $c$ ), serta tekanan uap jenuh gas ( $P_0$ ) sebagai parameter yang terdapat dalam persamaan BET dengan menggunakan salah satu *tools* yang ada dalam program Microsoft Excel yaitu solver sehingga didapat nilai jumlah gas teradsorpsi maksimum dan nilai konstanta BET yang optimum. Perlakuan kedua dilakukan seperti perlakuan pertama terhadap data yang berasal dari literatur, hanya saja persamaan yang digunakan adalah persamaan hasil kombinasi persamaan BET dengan persamaan adsorpsi Gibbs, parameter-parameter yang dioptimasi pada perlakuan kedua terdiri dari nilai konstanta BET ( $c$ ), jumlah gas maksimum yang teradsorpsi ( $n_{maks}$ ), tekanan uap jenuh gas ( $P_0$ ) serta densitas gas yang teradsorpsi ( $\rho_{ads}$ ). Untuk perlakuan data yang kedua, dilakukan penentuan nilai densitas dari gas pada temperatur dan tekanan tertentu, hal ini dilakukan dengan cara menggunakan program aplikasi NIST. Dalam penggunaannya, setiap gas yang terlibat dalam penelitian ini dapat ditentukan nilai densitasnya pada temperatur dan tekanan tertentu dengan menggunakan program aplikasi ini. dari hasil substitusi ini data yang baru dihasilkan kemudian diplotkan dalam suatu grafik. Hasil optimasi haruslah memiliki kriteria sebagai berikut :

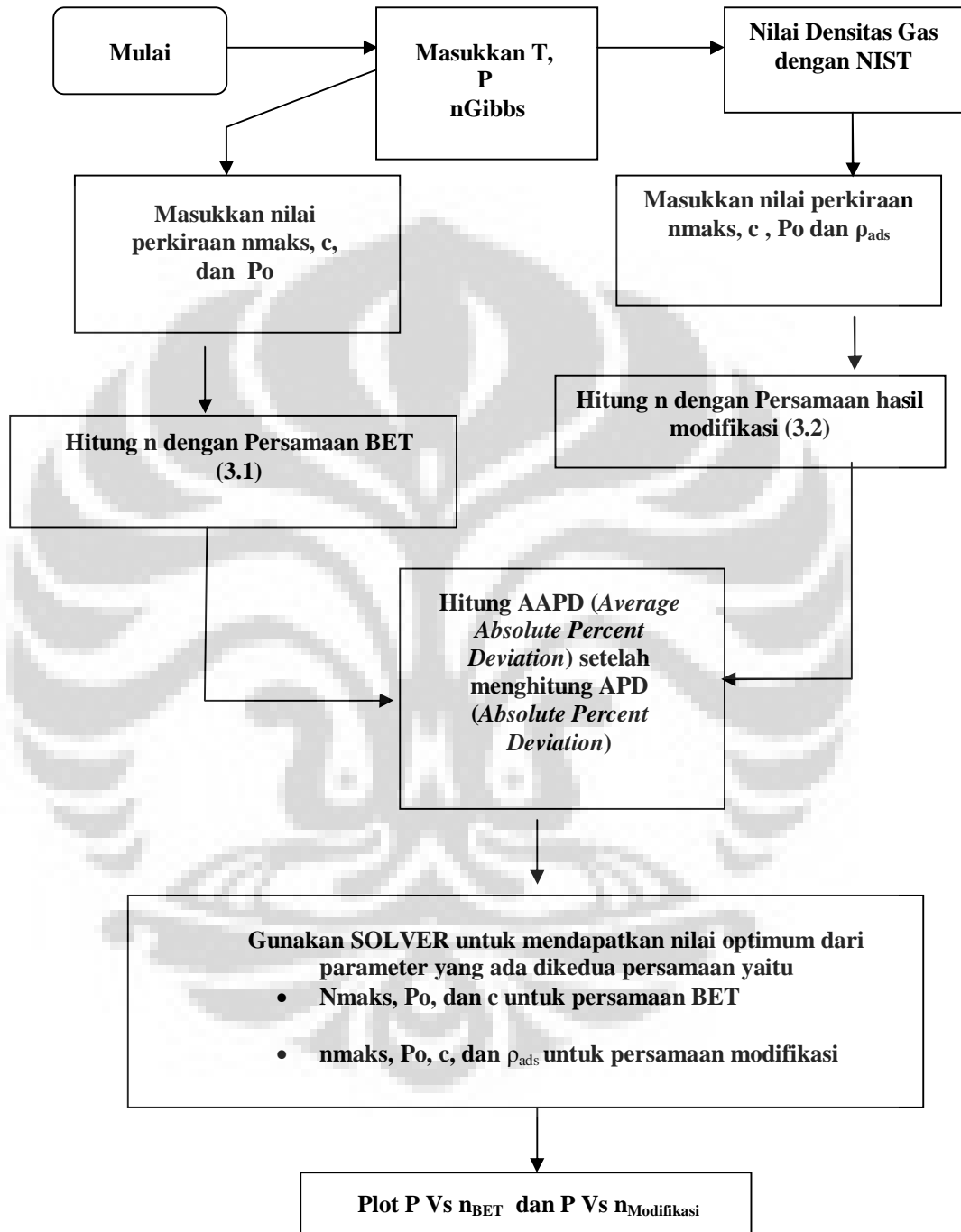
$$\sum \left| \frac{X_{eksoerimen} - X_{persamaan}}{X_{eksperimen}} \right| \times 100\% = \min imum \quad (3.3)$$

Parameter-parameter yang dioptimasi adalah sebagai berikut :

- Untuk persamaan BET adalah  $n_{maks}$  dan  $c$
- Untuk persamaan modifikasi BET adalah  $n_{maks}$ ,  $P_0$ ,  $c$  dan  $\rho_{ads}$

optimasi ini dilakukan hingga kualitas deviasi dari masing-masing persamaan memiliki nilai yang paling kecil sehingga sudah tidak dapat lagi dilakukan optimasi.

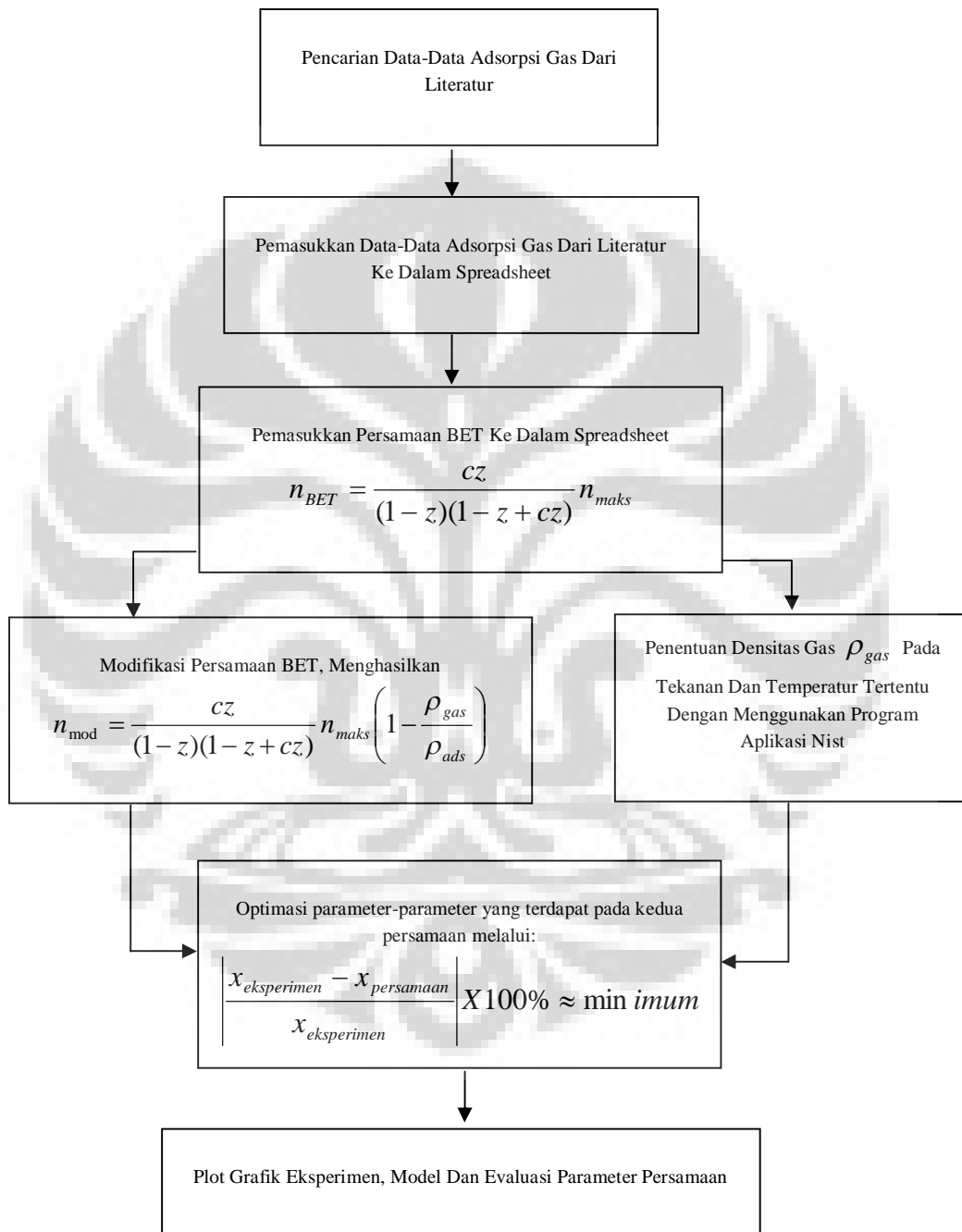
Berikut ini merupakan diagram alir optimasi parameter-parameter yang terdapat dalam persamaan.



Gambar 3.1 Diagram alir Tahap Optimasi Data Eksperimen

### 3.2 Diagram Alir Penelitian

Secara ringkas metode penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2 yang merangkum tahapan-tahapan penelitian yang telah dijelaskan pada sub bab 3.1.



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, Persamaan BET dan persamaan hasil modifikasinya digunakan untuk merepresentasikan data hasil eksperimen adsorpsi gas pada tekanan tinggi dengan menggunakan empat jenis adsorben. Gas-gas yang digunakan sebagai adsorbat adalah  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{CO}_2$ , dan  $\text{N}_2$ . Sedangkan adsorben yang digunakan adalah karbon aktif, batubara, zeolit, dan silika gel.

Berikut ini akan dijelaskan lebih lanjut mengenai hasil representasi adsorpsi beberapa macam gas murni didalam empat jenis adsorben yang telah disebutkan diatas berdasarkan masing-masing persamaan, baik persamaan BET maupun persamaan hasil modifikasinya.

#### **4.1 Hasil Representasi Model dari Data Adsorpsi Gas pada Karbon Aktif**

Dari hasil pengolahan data yang ditunjukkan pada Tabel 4.1, secara umum dapat kita lihat bahwa persamaan BET yang telah dimodifikasi menghasilkan representasi data yang lebih baik daripada persamaan BET. Hal ini dapat dilihat dari nilai persen defiasi rata-rata (AAPD) yang didapatkannya cenderung lebih kecil. Dari hasil pengolahan data secara keseluruhan, persamaan modifikasi BET pada adsorpsi gas dengan karbon aktif sebagai adsorben memiliki nilai AAPD sebesar 1,98 % sedangkan nilai AAPD untuk persamaan BET memiliki nilai 2.48 %. Selain nilai AAPD, pada umumnya pengolahan data dengan menggunakan persamaan hasil modifikasi menghasilkan nilai jumlah gas teradsorpsi maksimum ( $n_{maks}$ ) yang lebih besar dibandingkan dengan pengolahan data dengan menggunakan persamaan BET. Berikut ini merupakan Tabel 4.1serta grafik hasil pengolahan data adsorpsi gas pada karbon aktif .

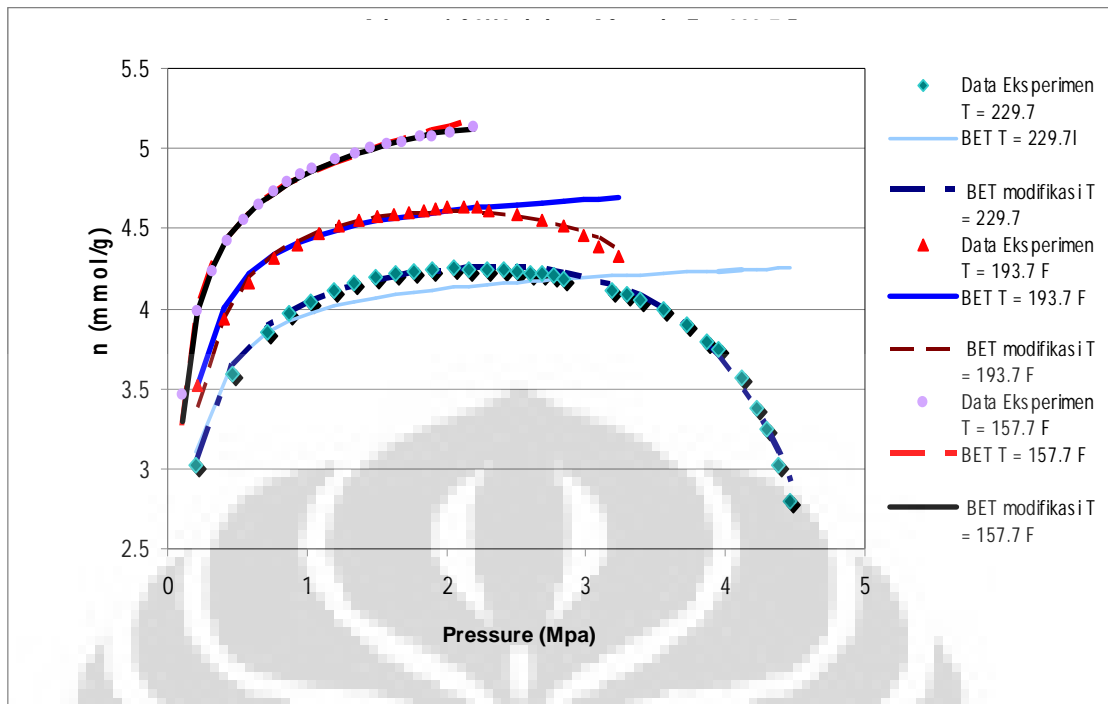
Tabel 4.1 Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Karbon Aktif

Sistem	Deskripsi		T (F)	Persamaan BET				Persamaan Hasil Modifikasi				
	Gas	Adsorben		$n_{maks}(mmol/g)$	c	Po(Mpa)	AAPD (%)	$n_{maks}(mmol/g)$	c	Po(Mpa)	$\rho_{ads} (mol/l)$	AAPDm (%)
1	CH <sub>4</sub>	Activated Carbon	85.7	5.66	403.56	299.97	2.21	6.61	345.88	352.42	23.91	0.81
			121.7	5.28	860.22	825.33	1.69	6.12	623.78	807.46	25.63	0.87
			157.7	4.77	534.25	611.70	2.08	6.21	517.43	939.61	14.59	1.38
			191.9	4.78	640.77	737.82	2.06	5.52	505.11	749.75	21.94	1.29
			229.7	4.04	384.14	676.83	1.58	4.43	300.15	599.95	29.39	0.98
2	CH <sub>4</sub>	Activated Carbon	69.2	3.30	23.26	4.29	1.14	3.21	21.54	3.83	50.60	1.03
			101	2.76	16.25	3.78	0.84	2.74	16.11	3.71	52.20	0.86
			136.7	2.38	12.16	3.59	0.78	2.37	12.01	3.53	79.98	0.78
			171.4	2.23	10.24	4.11	0.84	2.18	9.86	3.84	49.99	0.83
3	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Activated Carbon	85.7	4.98	467.41	5.84	0.48	4.98	416.78	5.20	19.05	0.48
			121.7	4.82	446.83	10.85	0.46	4.82	358.10	8.71	17.51	0.44
			157.7	4.92	579.80	30.94	0.65	4.85	224.51	11.39	8.30	0.47
			193.7	4.75	3997.32	299.52	1.57	4.82	210.69	19.52	7.77	0.54
			229.7	4.25	3322.94	251.67	7.97	4.24	111.33	9.62	4.18	0.66
4	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Activated Carbon	68	5.36	499.99	2.33	4.33	5.35	459.96	2.14	22.00	4.32
			86	4.92	899.77	3.06	9.99	4.91	799.99	2.71	24.02	9.96
			104	5.21	499.98	0.65	5.99	5.21	480.60	0.63	25.00	5.99
			122	5.04	400.00	0.81	4.95	5.03	396.89	0.80	55.00	4.94
			140	4.79	369.90	5.55	6.28	4.75	298.14	4.41	8.11	6.27

Tabel 4.1 Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Karbon Aktif (lanjutan)

Sistem	Deskripsi		T (F)	Persamaan BET				Persamaan Hasil Modifikasi				
	Gas	Adsorben		nmaks(mmol/g)	c	Po(Mpa)	AAPD (%)	nmaks(mmol/g)	c	Po(Mpa)	pads (mol/l)	AAPDm (%)
5	CO <sub>2</sub>	Activated Carbon	40.7	7.69	100.71	14.58	14.69	7.70	101.34	14.69	11.22	1.07
			58.7	7.38	83.34	15.40	1.03	7.42	73.52	13.76	40.23	1.01
			76.7	6.98	73.63	16.90	1.27	7.10	57.23	14.03	23.05	1.26
			85.7	4.62	2999.45	95.45	0.81	4.69	534.81	19.16	8.59	0.21
			94.7	6.66	64.10	17.63	1.28	6.64	51.39	14.11	26.20	1.28
			112.7	6.23	50.26	17.87	1.04	6.17	33.82	11.88	12.79	1.05
			130.7	5.59	46.68	16.27	1.76	5.66	44.59	16.22	146.12	1.71
6	CO <sub>2</sub>	Activated Carbon	69.9	7.45	828.92	179.64	2.21	7.49	881.40	192.25	77.53	2.25
			100.5	6.51	824.35	235.64	2.40	6.56	874.88	254.48	169.68	2.42
			133.6	5.84	577.41	225.70	2.27	5.78	694.59	264.51	203.77	2.29
			167.3	5.10	811.85	394.39	2.02	5.14	839.39	412.50	326.20	2.02
7	CO <sub>2</sub>	Activated Carbon	77	10.79	180.40	71.90	4.30	10.87	118.77	47.83	55.11	4.15
8	N <sub>2</sub>	Activated Carbon	77	4.58	83.97	99.16	3.67	4.12	4.69	5.25	2.12	3.59
9	N <sub>2</sub>	Activated Carbon	85.7	4.05	575.33	899.37	1.79	4.33	473.09	819.51	55.88	1.28
			121.7	3.68	350.63	677.54	1.65	4.49	205.80	524.49	19.15	0.65
			157.7	2.93	399.27	494.13	2.82	3.46	280.88	487.88	23.96	2.09
			193.7	3.04	176.02	509.20	1.58	3.38	155.10	511.91	33.76	0.88
			229.7	2.75	136.46	454.45	1.40	2.87	148.94	520.15	69.49	1.13
<b>Grand Average</b>						<b>2.48</b>					<b>1.98</b>	





Gambar 4.1 Adsorpsi  $C_3H_8$  pada Sistem No. 3

Gambar 4.1 menunjukkan hasil representasi model BET serta modifikasinya terhadap data adsorpsi pada sistem No.3. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa representasi data yang berasal dari persamaan modifikasi mengikuti profil data eksperimen, dimana ketika tekanan semakin tinggi, pada saat representasi data dari persamaan BET memiliki kecenderungan untuk terus meningkat tetapi representasi data persamaan hasil modifikasi menunjukkan kecenderungan menurun mengikuti profil data eksperimen. Tendensi seperti tersebut juga diamati pada sebagian besar sistem-sistem yang diamati. Hal ini disebabkan persamaan hasil modifikasi merupakan persamaan yang tidak bersifat absolut dimana didalamnya diperhitungkan juga nilai dari  $\rho_{ads}$  yang menunjukkan densitas gas yang teradsorpsi sekaligus menunjukkan volume gas teradsorpsi. Sedangkan persamaan BET merupakan persamaan yang bersifat absolut dimana nilai densitas gas yang teradsorpsi tidaklah diperhitungkan karena nilainya dianggap kecil sekali sehingga representasi dari data yang dihasilkan oleh pengolahan data dengan menggunakan persamaan ini akan cenderung terus meningkat. Pada kenyataanya nilai densitas gas tersebut akan sangat berpengaruh pada saat kondisi gas yang digunakan adalah tekanan tinggi. Bahkan harga adsorpsi gas dapat mencapai nol

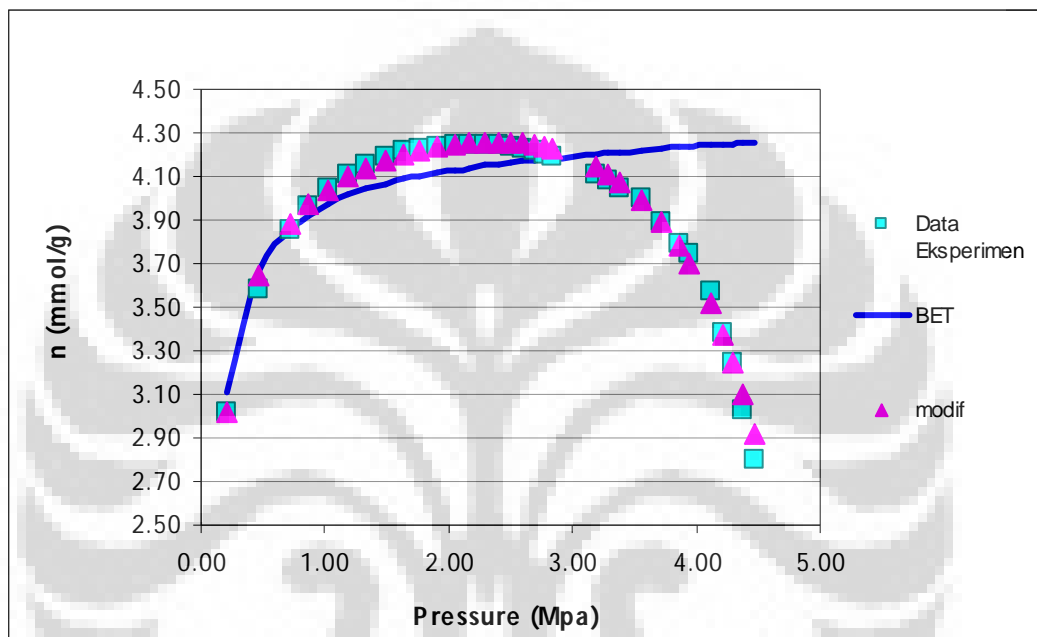
ketika densitas gas sama dengan densitas molekul yang teradsorpsi. Seperti halnya yang ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Adsorpsi C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> dalam Sistem No. 3 Pada T =193.7 °F

T (°F)	P (Mpa)	$\rho_{\text{gas}}$	$\frac{\rho_{\text{gas}}}{\rho_{\text{ads}}}$	nG(mmol /g)	z	zmod	$n_{\text{BET}}$	$n_{\text{BET Mod}}$	APD (%)	APDm (%)	
193.7	0.21	0.07	0.01	3.520	0.001	0.011	3.520	3.380	0.00	4.00	
193.7	0.40	0.14	0.02	3.939	0.001	0.020	4.006	3.939	1.71	0.01	
193.7	0.59	0.20	0.03	4.164	0.002	0.030	4.220	4.194	1.34	0.73	
193.7	0.77	0.27	0.04	4.309	0.003	0.039	4.339	4.338	0.70	0.67	
193.7	0.93	0.33	0.04	4.393	0.003	0.047	4.408	4.419	0.33	0.59	
193.7	1.09	0.40	0.05	4.466	0.004	0.056	4.460	4.480	0.13	0.32	
193.7	1.24	0.46	0.06	4.516	0.004	0.063	4.497	4.521	0.42	0.11	
193.7	1.37	0.52	0.07	4.550	0.005	0.070	4.525	4.550	0.55	0.00	
193.7	1.50	0.58	0.07	4.570	0.005	0.077	4.547	4.571	0.51	0.00	
193.7	1.62	0.64	0.08	4.591	0.005	0.083	4.565	4.585	0.56	0.12	
193.7	1.74	0.69	0.09	4.605	0.006	0.089	4.580	4.595	0.54	0.20	
193.7	1.83	0.74	0.10	4.609	0.006	0.094	4.592	4.601	0.38	0.17	
193.7	1.93	0.79	0.10	4.618	0.006	0.099	4.602	4.605	0.36	0.29	
193.7	2.01	0.83	0.11	4.632	0.007	0.103	4.610	4.606	0.47	0.56	
193.7	2.12	0.90	0.12	4.634	0.007	0.109	4.621	4.605	0.29	0.62	
193.7	2.22	0.95	0.12	4.630	0.007	0.114	4.630	4.602	0.00	0.60	
193.7	2.31	1.00	0.13	4.616	0.008	0.118	4.636	4.597	0.44	0.41	
193.7	2.51	1.13	0.15	4.586	0.008	0.128	4.651	4.578	1.41	0.18	
193.7	2.68	1.25	0.16	4.552	0.009	0.137	4.662	4.552	2.42	0.01	
193.7	2.84	1.37	0.18	4.518	0.009	0.145	4.672	4.519	3.40	0.01	
193.7	2.99	1.50	0.19	4.461	0.010	0.153	4.680	4.477	4.91	0.34	
193.7	3.09	1.59	0.21	4.389	0.010	0.158	4.686	4.439	6.77	1.16	
193.7	3.23	1.74	0.22	4.327	0.011	0.165	4.693	4.379	8.45	1.20	
Variabel	BET	BETmod	Unit					unit	%		
$\rho_{\text{ads}}$	-	7.77	mol/l					AAPD	1.57		
c	3997.32	210.69						AAPDm	0.54		
nm	4.749	4.819	mmol /g								
Po	299.52	19.52	Mpa								

Tabel 4.2 menunjukkan hasil representasi data dari adsorpsi C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> dalam karbon aktif pada temperatur 193.7 °F. Dari Tabel 4.2 dapat kita lihat pada saat tekanan gas mengalami kenaikan dari 0,21 Mpa sampai dengan 2,12 Mpa, nilai  $n_{\text{BET}}$  dan  $n_{\text{mod}}$  juga mengalami kenaikan. Pada titik ini, kedua model tersebut memiliki jumlah gas yang teradsorpsi yang relatif dekat dengan jumlah gas yang teradsorpsi dari data eksperimen atau kita sebut juga dengan  $n_{\text{Gibbs}}$ . Pada titik ini  $n_{\text{BET}}$  bernilai 2,62 mmol/g dan  $n_{\text{mod}}$  bernilai 2,61 mmol/g. Sedangkan  $n_{\text{Gibbs}}$  sendiri bernilai 2,63 mmol/g. Namun, ketika tekanan gas dinaikkan menjadi 2,51Mpa nilai  $n_{\text{mod}}$  cenderung menurun mengikuti nilainya  $n_{\text{Gibbs}}$  sedangkan  $n_{\text{BET}}$  sendiri cenderung mengalami kenaikan. Pada titik ini,  $n_{\text{mod}}$  bernilai 4,58 mmol/g yang

mendekati nilai  $n_{\text{Gibbs}}$  yaitu 4,59 mmol/g. Sedangkan  $n_{\text{BET}}$  sendiri mengalami kenaikan menjadi 4,64 mmol/g. Trend yang seperti ini terus terjadi sampai tekanan gas mencapai nilai 3,23 Mpa dimana jumlah gas yang teradsorpsi dari model hasil modifikasi BET mengalami penurunan mengikuti nilai jumlah gas yang teradsorpsi berdasarkan eksperimen. Sedangkan untuk model BET jumlah gas yang teradsorpsi terus mengalami kenaikan. Hal ini juga dapat dilihat dari gambar yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.

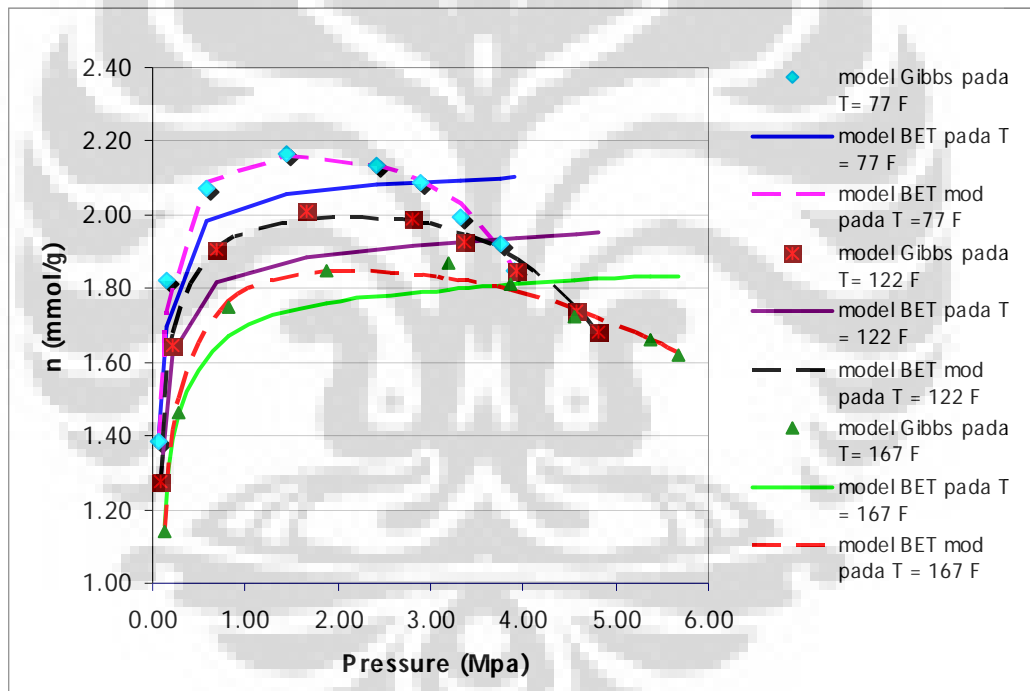


Gambar 4.2 Adsorpsi  $\text{C}_3\text{H}_8$  dalam Sistem No. 4 pada  $T = 229,7\text{ }^\circ\text{F}$

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa pada tekanan tinggi koreksi dari adsorpsi Gibbs terhadap adsorpsi absolut sangatlah penting. Kita dapat melihat dari Gambar 4.2 bahwa model hasil modifikasi BET jauh lebih baik dari model BET dimana model hasil modifikasi BET sangat dekat sekali profilnya dengan profil yang ditunjukkan dari model Gibbs. Perbedaan yang ekstrim seperti ini juga membuat nilai AAPD dari model BET dan hasil modifikasinya menjadi jauh berbeda. Dapat kita lihat pada tabel 4.1 pada sistem 4 bahwa nilai AAPD dari data adsorpsi  $\text{C}_3\text{H}_8$  dalam karbon aktif pada temperatur 229,7 °F antara model BET dan hasil modifikasinya sangatlah jauh berbeda dimana nilai AAPD untuk model BET sebesar 7,97 % sedangkan model hasil modifikasinya adalah 0,66 %.

## 4.2 Hasil Representasi Model dari Data Adsorpsi Gas Pada Zeolit

Dari hasil pengolahan data, secara umum model modifikasi BET juga merepresentasikan data lebih baik dibandingkan representasi data yang dihasilkan oleh model BET. Hal ini dapat dilihat dari nilai AAPD yang dicapai oleh persamaan hasil modifikasi sebesar 1,0 % sedangkan nilai AAPD yang dicapai oleh persamaan BET sebesar 2,02 %. Dari tabel 4.3 yaitu pada sistem 5 dapat kita lihat suatu perbedaan yang cukup ekstrim antara nilai AAPD yang dihasilkan oleh model BET dengan model hasil modifikasinya pada setiap temperatur yang digunakan dimana nilai rata-rata AAPD model BET adalah 5,18 % sedangkan untuk model hasil modifikasi BET rata-rata nilainya adalah 0,91 %. Hal ini dapat juga ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Adsorpsi  $C_2H_6$  pada Sistem No. 5

Tabel 4.3 Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Zeolit

Sistem	Deskripsi		T (F)	Persamaan BET				Persamaan Hasil Modifikasi				
	Gas	Adsorben		nmaks (mmol/g)	c	Po (Mpa)	AAPD (%)	nmaks (mmol/g)	c	Po (Mpa)	pads (mol/l)	AAPDm (%)
1	CH4	Zeolit Sintetik (Linde 5A, 1-2 mm; 8 g)	77.0	2.656	934.92	499.13	2.30	2.930	157.42	102.12	17.21	0.66
			122.0	2.425	1375.71	855.67	1.54	2.575	121.05	87.60	19.21	0.82
			167.0	2.223	199.98	199.98	2.38	2.471	82.41	95.63	15.63	0.78
2	CH4	Zeolit G5	49.8	3.830	471.83	235.12	1.14	3.943	495.07	254.39	24.83	1.04
			85.8	4.280	166.60	165.65	0.91	4.350	169.13	171.05	46.74	0.88
3	C2H4	Zeolit G5	49.8	3.559	1623.74	20.23	0.33	3.515	200.02	2.34	1.16	0.29
			85.8	3.170	1000.94	12.90	0.29	3.189	498.64	7.59	6.61	0.28
4	C2H6	Zeolit G5	49.8	2.929	722.83	10.13	0.28	2.928	699.99	9.81	129.00	0.28
			85.8	2.791	446.01	12.37	0.25	2.792	409.53	11.36	50.00	0.25
5	C2H6	Zeolit Sintetik (Linde 5A, 1-2 mm; 8 g)	77.0	2.097	9990.24	352.27	5.27	2.237	466.94	20.08	8.46	0.90
			122.0	1.903	3999.65	148.38	5.43	2.006	299.95	13.09	5.97	0.83
			167.0	1.815	3492.61	251.50	4.84	1.976	352.13	32.35	9.03	0.99
6	CO2	Zeolit Sintetik (Linde 5A, 1-2 mm; 8 g)	77.0	3.72	24999.79	148.30	3.26	3.684	4999.94	29.06	23.24	2.36
			122.0	3.46	19999.45	279.35	4.63	3.57	2000.00	30.89	15.73	2.17
			167.0	3.47	11341368	747674	5.94	3.58	2000.26	81.59	22.50	1.83
7	C2H6	Zeolit 13x ( BET: 383 sqm/g; micropore vol: 0.21 cc/g; total pore volume: 0.26 cc/g)	77.0	2.738	6015.31	204.25	1.23	2.818	3007.64	127.92	38.30	0.67
8	N2	Zeolit Sintetik (Linde 5A, 1-2 mm; 8 g)	77.0	2.341	406.05	286.30	2.73		113.48	95.66	23.70	1.78
			122.0	2.026	175.28	168.74	2.68		167.28	171.74	91.88	2.00
			167.0	1.832	168.64	239.31	1.49	2.516	138.04	210.92	88.92	2.16
9	N2	Zeolit Sintetik (Linde 13X, 1-2 mm; 8 g)	77.0	2.435	839.10	848.15	1.40	2.109	395.68	396.07	870.21	1.40
			122.0	2.126	126.03	188.24	1.56	1.924	42.37	63.34	29.96	1.58
			167.0	1.690	30.44	54.35	2.38	2.416	4.75	10.10	3.33	1.42
<i>Grand average</i>							2.02				1.00	

Gambar 4.3 menunjukkan hasil representasi model BET serta modifikasinya terhadap data adsorpsi pada Sistem No.5. Pada gambar ini terlihat sekali bahwa model BET tidak mampu merepresentasikan data eksperimen adsorpsi gas secara baik pada kondisi gas dalam tekanan tinggi. Hal ini dapat terlihat dari grafiknya yang tidak dapat mengikuti profil dari data eksperimen. Dari Gambar 4.3 terlihat bahwa pada saat tekanan mendekati 3 Mpa, model Gibbs dan model hasil modifikasi BET sama- mengalami penurunan jumlah gas yang teradsorpsi sedangkan model BET tidak mengikuti. Bahkan sampai tekanan melebihi 5 Mpa pun model BET masih terus menunjukkan kenaikan. Hal ini tentunya tidak lepas dari pengaruh adanya koreksi densitas gas yang teradsorpsi ( $\rho_{ads}$ ) terhadap jumlah gas yang teradsorpsi pada gas dalam tekanan tinggi. Jika kita lakukan optimasi dengan menggunakan program solver yang terdapat dalam program Microsoft Excel maka dengan dimasukkannya parameter  $\rho_{ads}$  kedalam solver ini akan selalu kita dapati bahwa nilai  $n_{BETmod}$  ini selalu dekat dengan nilai dari  $n_{Gibbs}$ . Namun, nilai  $\rho_{ads}$  yang kita dapati dari hasil optimasi solver ini tidak selalu menunjukkan nilai yang logis karena nilainya yang terlalu besar. Secara nyata nilai  $\rho_{ads}$  yang tinggi ini tidaklah masuk akal. Seperti halnya yang dapat kita lihat pada tabel 4.3 dimana sistem No. 8 pada temperatur 77 °F nilai  $\rho_{ads}$  yang dihasilkan adalah 870,21 mol/l. Pencapaian nilai  $\rho_{ads}$  yang tinggi ini terjadi karena solver yang terdapat dalam program Microsoft Excel akan berusaha mencapai nilai optimum yang minimum sehingga dicapai nilai optimasi yang diinginkan. padahal apabila ditinjau kembali pada model hasil modifikasi maka nilai  $\rho_{ads}$  yang tinggi ini tidak terlalu memiliki efek perbaikan terhadap representasi data yang dihasilkan. Hal ini dapat terlihat dari nilai AAPD keduanya yang relatif sama.

### 4.3 Hasil Representasi Model Data Adsorpsi Gas Pada Batu bara

Hasil pengolahan data dengan menggunakan model BET dan model hasil modifikasinya pada adsorpsi gas dengan menggunakan batu bara sebagai adsorben, secara umum menunjukkan bahwa representasi data yang dihasilkan oleh model hasil modifikasi sedikit lebih baik dibandingkan representasi data yang dihasilkan oleh model BET. Dari Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa nilai AAPD yang dihasilkan oleh model BET sebesar 3,12 % sedangkan nilai AAPD untuk model modifikasi BET memiliki nilai AAPD sebesar 3,29 %. Dari nilai jumlah gas yang teradsorpsi maksimum atau  $n_{maks}$  dapat dilihat bahwa nilai jumlah gas yang teradsorpsi maksimum untuk persamaan modifikasi cenderung lebih besar dibandingkan jumlah gas yang teradsorpsi maksimum oleh model BET. Namun, pada sistem No.3 pada Tabel 4.4 dapat kita lihat adanya suatu perbedaan yang signifikan jika dibandingkan dengan sistem lainnya. Pada sistem ini kita lihat bahwa nilai-nilai  $n_{maks}$  yang dihasilkannya cenderung jauh lebih besar daripada nilai-nilai  $n_{maks}$  sistem lainnya. Akan tetapi jika kita lihat dari nilai-nilai  $\rho_{ads}$  yang dihasilkan pada sistem No. 3 juga cenderung besar-besar, terutama nilai  $\rho_{ads}$  pada saat temperatur  $160^{\circ}\text{F}$  mencapai nilai 4999,99 mol/l. Nilai  $\rho_{ads}$  yang tinggi tersebut secara nyata tidaklah masuk akal. Hal ini dapat terjadi juga karena program solver yang terdapat dalam Microsoft Excel berusaha untuk mencapai nilai optimum sehingga dicapai nilai optimasi yang diinginkan. Penyimpangan ini juga dapat ditunjukkan dari nilai AAPD pada sistem No.3 ini cenderung jauh lebih besar dibandingkan dengan nilai AAPD sistem lainnya.

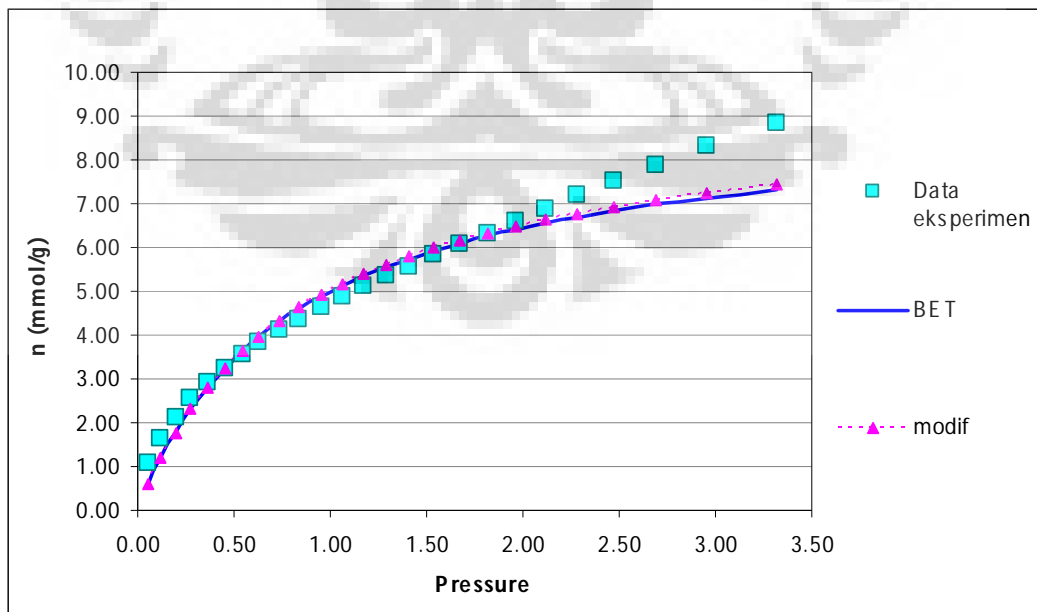
Tabel 4.4 Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Batu bara

Sistem	Deskripsi		T (F)	Persamaan BET				Persamaan Hasil Modifikasi				
	Gas	Adsorben		nmaks (mmol/g)	c	Po (Mpa)	AAPD (%)	nmaks (mmol/g)	c	Po (Mpa)	pads (mol/l)	AAPDm (%)
1	CH4	Wet Fruitland Coal	115.1	0.792	549.90	19.22	0.95	0.840	466.52	17.79	1.56	0.60
2	CH4	Carbon black	100.0	14.340	17.84	1000.38	7.09	16.740	15.11	999.93	300.01	7.18
			130.1	7.231	5.03	187.19	3.83	13.628	5.79	411.00	120.11	2.60
			160.0	19.507	29.13	3999.94	5.87	19.713	28.84	3999.96	4999.99	5.87
			190.0	9.050	14.68	999.94	3.53	10.648	12.47	999.98	200.05	3.51
			220.1	5.694	9.15	499.98	3.34	6.473	8.03	500.00	200.00	3.35
			250.0	2.784	5.35	202.43	3.74	2.937	5.07	202.98	400.00	3.74
3	CO2	Wet Fruitland Coal	115.3	1.282	550.15	12.42	0.51	1.359	466.29	11.49	0.74	0.44
4	N2	Wet Fruitland Coal	114.8	0.582	465.37	64.96	0.71	0.589	450.87	63.78	9.99	0.75
Grand Average							3.29					3.12



#### 4.4 Hasil Representasi Model Data Adsorpsi Gas pada Silika Gel

Adsorben keempat yang digunakan dalam penelitian ini adalah silika gel. Hasil pengolahan data dengan menggunakan persamaan hasil modifikasi dan persamaan BET pada adsorpsi gas CO<sub>2</sub> dengan menggunakan silika gel sebagai adsorben, secara umum jika dilihat dari nilai AAPDnya model hasil modifikasi BET lebih besar sedikit dari AAPD yang dihasilkan oleh model BET. Pada tabel 4.5 dapat kita lihat nilai AAPD dari model BET adalah 3,36 % sedangkan nilai AAPD model hasil modifikasinya adalah 3,38 %. Perbedaan ini nilainya tidaklah terlalu signifikan hanya selisih nilai 0,02 % sehingga hal ini belum dapat dijadikan sebagai barometer bahwa model BET lebih baik dari hasil modifikasinya. Perbedaan yang tidak terlalu signifikan ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi yang terjadi pada sistem tersebut belum dipengaruhi oleh kenaikan tekanan pada sistem. Dengan kata lain, tekanan yang diberikan pada sistem belum mencapai tekanan yang maksimal, yaitu suatu tekanan dimana pada saat tercapai nilai tekanan tersebut akan terjadi penurunan dari nilai jumlah zat yang teradsorpsi ( $n_{\text{Gibbs}}$ ). Hal ini dapat dilihat dari gambar 4.4 bahwa seiring dengan kenaikan tekanan pada sistem, data eksperimen masih terus menunjukkan kenaikan pada nilai jumlah zat yang teradsorpsi ( $n_{\text{Gibbs}}$ ).



Gambar 4.4 Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Silika Gel pada T = 77 °F

Gambar 4.4 menunjukkan suatu kondisi dimana sistem belum dipengaruhi oleh kenaikan tekanan, maka nilai  $n_{\text{absolut}}$  yang diwakilkan oleh  $n_{\text{BET}}$  dan nilai  $n_{\text{BETmod}}$  yang merupakan model pendekatan dari adsorpsi Gibbs akan tidak berbeda jauh. Hal ini dikarenakan pada tekanan yang rendah nilai koreksi densitas gas,  $\left(1 - \frac{\rho_{\text{gas}}}{\rho_{\text{ads}}}\right)$  yang terdapat pada persamaan 2.16 tidaklah berpengaruh terhadap nilai  $n_{\text{Gibbs}}$  yang dihasilkan karena nilainya dianggap 1, sehingga nilai jumlah gas yang teradsorpsi ( $n_{\text{BET}}$ ) dan  $n_{\text{BETmod}}$  akan relatif sama dimana nilainya akan terus mengalami kenaikan.

Tabel 4.5 Hasil Pengolahan Data Adsorpsi Gas pada Silika Gel

Sistem	Deskripsi		T (F)	Persamaan BET				Persamaan Hasil Modifikasi				
	Gas	Adsorben		nmaks	c	Po	AAPD	nmaks	c	Po	$\rho_{\text{ads}}$	AAPDm
1	CO2	Silica Gel	41,0	8,855	219,875	173,157	8,36	9,043	200,993	163,550	831,351	8,37
			59,0	4,939	21,179	8,344	3,06	4,943	21,033	8,308	450,000	3,06
			77,0	4,231	16,829	7,730	2,30	4,234	15,569	7,168	28,000	2,34
			86,0	4,116	16,011	8,152	2,35	4,047	16,409	8,004	4777,283	2,36
			95,0	3,927	16,419	8,921	3,00	3,973	15,073	8,335	27,564	3,03
			113,0	3,307	13,761	7,666	2,84	3,317	13,438	7,511	67,108	2,84
			131,0	3,309	12,122	9,307	1,60	3,328	11,114	8,608	25,005	1,64
<i>Grand Average</i>							3,36					3,38

Akan tetapi, pada saat sistem mencapai tekanan maksimalnya, maka nilai-nilai pada ( $n_{\text{BET}}$ ) dan  $n_{\text{BETmod}}$  akan menunjukkan suatu perbedaan dimana pada tekanan maksimal tersebut nilai  $n_{\text{BETmod}}$  akan mengalami penurunan sedangkan nilai  $n_{\text{BET}}$  akan tetap naik. Jika kita bandingkan dengan hasil representasi data adsorpsi gas CO<sub>2</sub> dalam adsorben lainnya yaitu pada adsorben karbon aktif dan zeolit pada temperatur yang sama, dapat kita lihat bahwa tekanan maksimum yang dicapai oleh tiap adsorben adalah berbeda nilainya. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 4.6 sampai dengan Tabel 4.8.

Tabel 4.6 Data Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Zeolit pada Sistem No. 6 T =77 °F

T(°F)	P (Mpa)	$\rho_{gas}$	$\rho_{gas}/\rho_{ads}$	nG(mmol/g)	z	zmod	nBET	nBETMod	APD	APDm
77	0.01	0.004	0.000	2.422	0.000	0.000	2.426	2.422	0.15	0.00
77	0.11	0.045	0.002	3.255	0.001	0.004	3.532	3.509	8.50	7.79
77	0.33	0.137	0.006	3.554	0.002	0.012	3.660	3.642	3.00	2.49
77	0.94	0.400	0.017	3.717	0.006	0.032	3.717	3.720	0.00	0.07
77	1.37	0.594	0.026	3.906	0.009	0.047	3.735	3.752	4.37	3.94
77	2.00	0.902	0.039	3.939	0.013	0.069	3.756	3.792	4.64	3.74
77	<b>2.67</b>	1.261	0.054	<b>3.944</b>	0.018	0.092	3.776	3.828	4.25	2.93
77	<b>3.29</b>	1.637	0.070	<b>3.910</b>	0.022	0.113	3.794	3.856	2.96	1.38
77	4.59	2.594	0.112	3.846	0.031	0.158	3.830	3.883	0.41	0.95
77	5.77	3.923	0.169	3.717	0.039	0.198	3.863	3.817	3.93	2.69
77	6.15	4.636	0.199	3.738	0.041	0.212	3.874	3.738	3.62	0.00
Variable	BET	BETmod	unit							
$\rho_{ads}$	-	23.243	mol/l							
c	24999.8	4999.9								
nm	3.716	3.684	mmol/g							
Po	148.30	29.06	Mpa							
				AAPD				3.26		
				AAPDm				2.36		

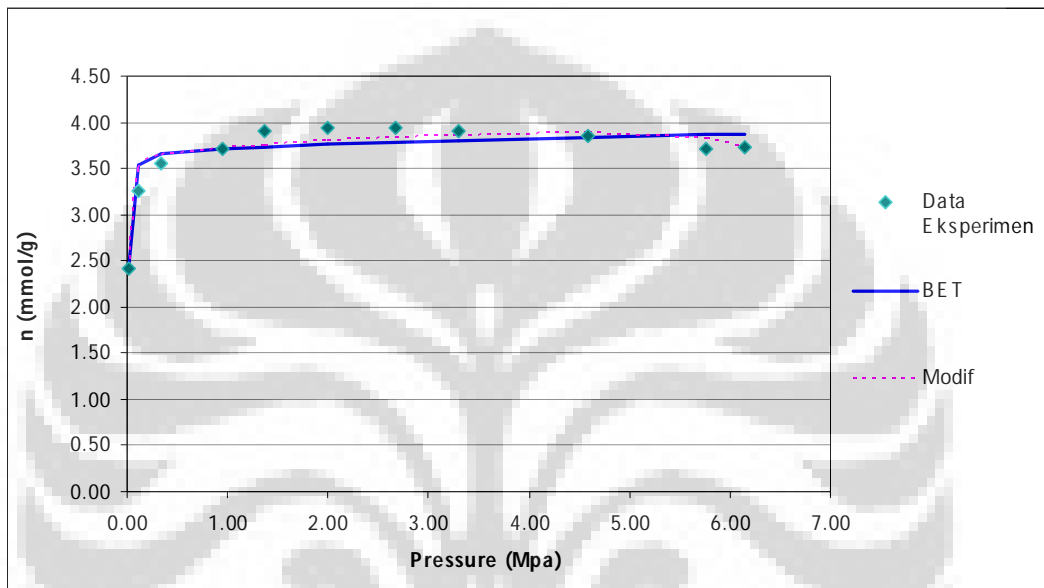
Tabel 4.7 Data Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Karbon Aktif pada Sistem No. 8 T =77 °F

T(°F)	P (Mpa)	$\rho_{gas}$	$\rho_{gas}/\rho_{ads}$	nG(mmol/g)	z	zmod	nBET	nBETMod	APD	APDm
77	0.034	0.014	0.000	1.050	0.000	0.001	0.849	0.847	19.15	19.35
77	0.063	0.026	0.000	1.637	0.001	0.001	1.483	1.481	9.36	9.53
77	0.092	0.037	0.001	2.119	0.001	0.002	2.019	2.017	4.70	4.81
77	0.099	0.040	0.001	2.238	0.001	0.002	2.152	2.150	3.84	3.94
77	0.130	0.053	0.001	2.661	0.002	0.003	2.662	2.661	0.04	0.00
77	0.218	0.089	0.002	3.642	0.003	0.005	3.834	3.838	5.28	5.39
77	0.348	0.143	0.003	4.739	0.005	0.007	5.067	5.080	6.93	7.19
77	0.464	0.192	0.003	5.492	0.006	0.010	5.860	5.879	6.69	7.05
77	0.685	0.286	0.005	6.580	0.010	0.014	6.911	6.942	5.04	5.50
77	0.804	0.338	0.006	7.039	0.011	0.017	7.323	7.359	4.03	4.53
77	1.184	0.509	0.009	8.166	0.016	0.025	8.242	8.288	0.93	1.49
77	1.306	0.565	0.010	8.457	0.018	0.027	8.457	8.504	0.00	0.56
77	1.519	0.666	0.012	8.890	0.021	0.032	8.771	8.821	1.35	0.78
77	1.703	0.755	0.014	9.211	0.024	0.036	8.997	9.048	2.33	1.77
77	2.011	0.909	0.016	9.704	0.028	0.042	9.308	9.359	4.08	3.56
77	2.510	1.174	0.021	10.232	0.035	0.052	9.695	9.741	5.24	4.80
77	3.012	1.463	0.027	10.577	0.042	0.063	9.995	10.030	5.50	5.17
77	3.512	1.778	0.032	10.771	0.049	0.073	10.240	10.257	4.93	4.77
77	<b>4.012</b>	2.128	0.039	<b>10.845</b>	0.056	0.084	10.448	10.441	3.66	3.73
77	<b>4.519</b>	2.532	0.046	<b>10.819</b>	0.063	0.094	10.635	10.592	1.70	2.10
77	5.010	2.989	0.054	10.705	0.070	0.105	10.800	10.707	0.89	0.02
77	5.511	3.562	0.065	10.487	0.077	0.115	10.955	10.788	4.47	2.88
77	6.036	4.390	0.080	10.090	0.084	0.126	11.108	10.813	10.08	7.16
Variable	BET	BETmod	unit							
$\rho_{ads}$	-	55.107	mol/l							
c	180.397	118.77								
nm	10.791	10.865	mmol/g							
Po	71.90	47.83	Mpa							
				AAPD				4.30		
				AAPDm				4.15		

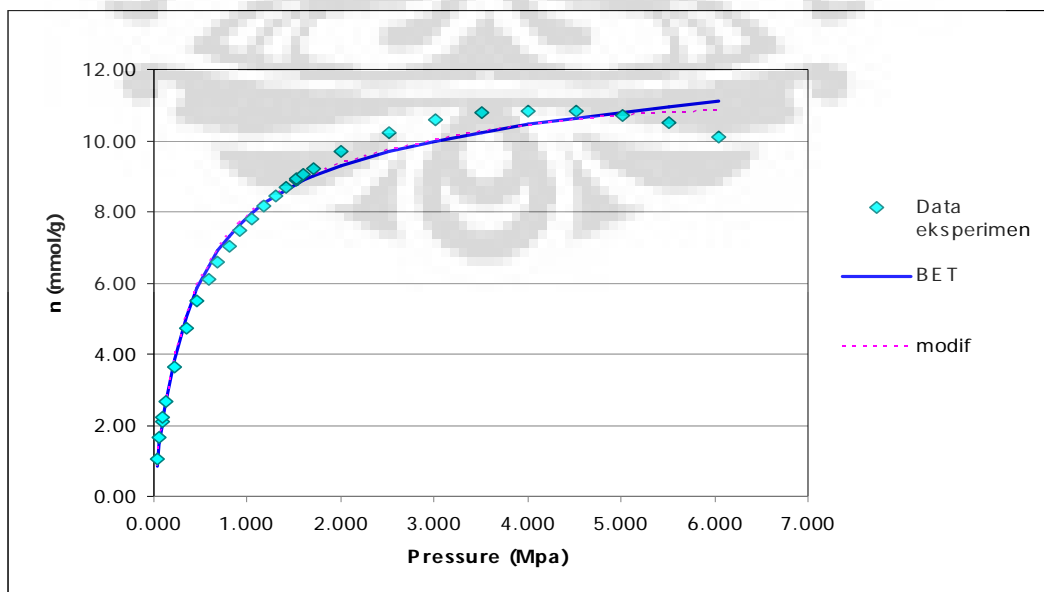
Tabel 4.8 Data Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Silika Gel pada T =77 °F

T(°F)	P (Mpa)	$\rho_{gas}$	$\rho_{gas}/\rho_{pads}$	nG(mmol/g)	z	zmod	nBET	nBETMod	APD	APDm
77	0.06	0.026	0.0009	0.682	0.008	0.009	0.520	0.520	23.66	23.74
77	0.11	0.044	0.0016	0.961	0.014	0.015	0.835	0.834	13.19	13.26
77	0.13	0.052	0.0019	1.050	0.017	0.018	0.953	0.952	9.24	9.30
77	0.16	0.066	0.0024	1.214	0.021	0.023	1.145	1.145	5.64	5.69
77	0.20	0.082	0.0029	1.391	0.026	0.028	1.350	1.349	2.96	2.99
77	0.26	0.107	0.0038	1.620	0.034	0.036	1.622	1.622	0.10	0.09
77	0.28	0.115	0.0041	1.707	0.036	0.039	1.707	1.707	0.02	0.01
77	0.30	0.121	0.0043	1.798	0.038	0.041	1.765	1.765	1.80	1.81
77	0.36	0.148	0.0053	1.959	0.047	0.050	2.007	2.007	2.44	2.44
77	0.41	0.169	0.0060	2.159	0.053	0.057	2.167	2.167	0.36	0.37
77	0.45	0.186	0.0067	2.243	0.058	0.063	2.295	2.295	2.31	2.32
77	0.47	0.195	0.0070	2.305	0.061	0.066	2.353	2.354	2.12	2.14
77	0.52	0.214	0.0077	2.455	0.067	0.072	2.481	2.481	1.08	1.09
77	0.55	0.228	0.0081	2.523	0.071	0.077	2.564	2.564	1.62	1.64
77	0.59	0.245	0.0088	2.634	0.076	0.082	2.664	2.664	1.13	1.14
77	0.63	0.263	0.0094	2.752	0.082	0.088	2.762	2.762	0.36	0.37
77	0.65	0.270	0.0097	2.789	0.084	0.090	2.801	2.801	0.44	0.45
77	0.70	0.293	0.0105	2.877	0.091	0.098	2.916	2.916	1.35	1.35
77	0.75	0.312	0.0112	3.014	0.096	0.104	3.007	3.007	0.21	0.21
77	0.77	0.322	0.0115	3.052	0.099	0.107	3.052	3.052	0.00	0.00
77	0.83	0.348	0.0124	3.127	0.107	0.115	3.167	3.167	1.28	1.28
77	0.88	0.371	0.0132	3.243	0.114	0.122	3.261	3.261	0.55	0.54
77	0.95	0.405	0.0145	3.357	0.123	0.133	3.395	3.394	1.13	1.11
77	0.98	0.418	0.0149	3.450	0.127	0.137	3.446	3.445	0.11	0.13
77	1.02	0.435	0.0155	3.509	0.132	0.143	3.507	3.506	0.05	0.08
77	1.08	0.461	0.0165	3.575	0.140	0.151	3.601	3.600	0.73	0.70
77	1.17	0.501	0.0179	3.770	0.151	0.163	3.737	3.735	0.89	0.93
77	1.22	0.523	0.0187	3.795	0.157	0.170	3.808	3.806	0.32	0.27
77	1.32	0.572	0.0204	4.027	0.171	0.184	3.961	3.959	1.64	1.69
77	1.36	0.591	0.0211	4.041	0.176	0.190	4.017	4.015	0.58	0.64
77	1.51	0.661	0.0236	4.266	0.195	0.210	4.223	4.220	1.01	1.08
77	1.54	0.675	0.0241	4.305	0.199	0.215	4.264	4.261	0.94	1.01
77	1.67	0.741	0.0265	4.468	0.217	0.234	4.446	4.442	0.50	0.58
77	1.70	0.751	0.0268	4.527	0.219	0.237	4.474	4.471	1.17	1.25
77	1.86	0.833	0.0297	4.780	0.241	0.259	4.692	4.688	1.83	1.91
77	2.04	0.924	0.0330	4.998	0.264	0.285	4.931	4.928	1.34	1.40
77	2.23	1.025	0.0366	5.227	0.289	0.312	5.193	5.191	0.66	0.70
77	2.44	1.136	0.0406	5.480	0.316	0.341	5.480	5.479	0.00	0.00
77	2.68	1.268	0.0453	5.732	0.347	0.374	5.823	5.827	1.59	1.67
77	2.97	1.436	0.0513	6.091	0.384	0.414	6.269	6.283	2.93	3.15
77	3.31	1.650	0.0589	6.518	0.429	0.462	6.864	6.897	5.31	5.81
Variabel	BET	BETmod	unit							
$\rho_{pads}$	-	28.00	mol/l					AAPD		
c	16.829	15.57						2.30		
nm	4.231	4.234	mmol/g					AAPDm		
Po	7.73	7.17	Mpa					2.34		

Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 memperlihatkan bahwa pada rentang tekanan 2,67-3,29 Mpa, adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam zeolit mencapai tekanan yang maksimum dan adsorben karbon aktif baru akan mencapai tekanan maksimum pada rentang tekanan 4,012 - 4,519 Mpa, sedangkan adsorpsi CO<sub>2</sub> pada adsorben silika gel seperti yang kita lihat pada Tabel 4.8 belum mencapai tekanan maksimum sehingga jumlah gas yang teradsorpsi dari eksperimen terus mengalami kenaikan. Profil yang terjadi pada sistem-sistem tersebut dapat ditunjukkan oleh gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



Gambar 4.5 Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Zeolit pada Sistem No.6 T = 77 °F



Gambar 4.6 Adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Karbon Aktif pada Sistem No. 8 T = 77 °F

Gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan perbedaan antara model BET dan hasil modifikasinya pada saat sistem mencapai tekanan yang maksimum. Dari Gambar 4.5 dan 4.6 dapat kita lihat bahwa pada saat tercapai kondisi tekanan yang maksimum, profil model BET hasil modifikasi cenderung mengalami penurunan jumlah gas yang teradsorpsi mengikuti profil yang ditunjukkan oleh adsorpsi Gibbs ( $n_{Gibbs}$ ), sedangkan profil model BET tetap mengalami kenaikan. Pada kondisi inilah nilai AAPD yang dihasilkan dari model BET dan model hasil modifikasinya mempunyai perbedaan nilai yang cukup signifikan dimana pada Tabel 4.4 didapatkan nilai AAPD model BET dan hasil modifikasinya 3,26 % dan 2,36 % dan pada Tabel 4.6 didapatkan nilai AAPD model BET dan hasil modifikasinya sebesar 4,30 % dan 4,15 %. Namun, jika kita lihat pada Tabel 4.8 adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam Silika Gel, tekanan tertinggi yang diberikan pada sistem adalah bernilai 3,31 Mpa dimana pada saat nilai tekanan tersebut jumlah gas yang teradsorpsi yang dihasilkan baik oleh adsorpsi absolut maupun adsorpsi Gibbs belum mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tersebut belum mencapai tekanan yang maksimum. Kondisi inilah yang menyebabkan nilai AAPD yang dihasilkan dari model BET dan model hasil modifikasinya relatif sama yaitu 2,30 % dan 2,34 %.

Penyimpangan ini juga dapat disebabkan dari keterbatasan program solver dalam melakukan optimasi terhadap parameter-parameter dari model. Hal ini dapat kita jumpai pada temperatur 86 °F dihasilkan nilai  $\rho_{ads}$  yang jauh berbeda dari nilai  $\rho_{ads}$  yang dihasilkan pada temperatur lainnya dimana nilai parameter-parameter lainnya seperti nilai (c) dan  $n_{maks}$  tidaklah jauh berbeda.

## 4.5 Pengaruh Temperatur Terhadap Parameter yang Terdapat Dalam Persamaan BET dan Persamaan Hasil Modifikasi

### 4.5.1 Pengaruh Temperatur Terhadap Nilai Konstanta $c$

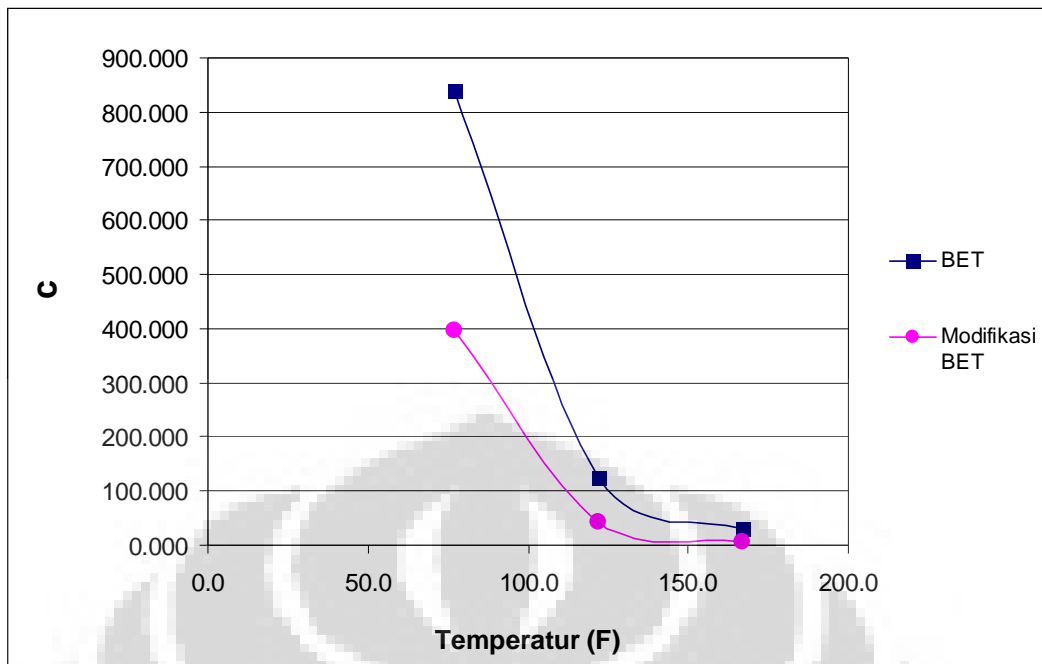
Dari hasil pengolahan data, dapat dilihat untuk tiap-tiap sistem yang memiliki variasi temperatur tertentu pada tiap jenis adsorben memiliki nilai konstanta  $c$  yang cenderung semakin menurun ketika temperatur dalam sistem meningkat. Hal ini dapat dipahami karena nilai ( $c$ ) merupakan suatu konstanta yang besarnya tergantung pada temperatur yang terdapat dalam sistem. Konstanta ini sendiri dapat ditunjukkan dengan persamaan :

$$c = K = \frac{k_1}{k_2} = \frac{k_{10}}{k_{20}} e^{-\frac{(E_{ads}-E_{desorp})}{RT}} = K_0 e^{-\Delta H/RT} \quad (2.21)$$

$$c \approx e^{-\Delta H/RT}$$

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa nilai  $c$  sebanding dengan nilai  $e^{-\Delta H/RT}$ . Dengan demikian nilai  $c$  akan berbanding terbalik dengan nilai temperatur, dimana semakin tinggi temperatur maka nilai konstanta  $c$  akan semakin rendah. Penurunan ini disebabkan oleh sifat eksotermis dari proses adsorpsi fisika yang dapat melepaskan kalor selama proses terjadi. Hubungan antara nilai konstanta  $c$  dengan kenaikan temperatur ini dapat ditunjukkan dari Gambar 4.4.

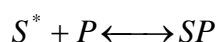
Gambar 4.7 menunjukkan nilai  $c$  yang cenderung menurun akibat dari meningkatnya temperatur sistem. Penurunan nilai  $c$  juga akan berakibat pada berkurangnya gas yang teradsorpsi oleh adsorben. Pada temperatur yang lebih rendah jumlah gas yang teradsorpsi lebih banyak dibandingkan dengan temperatur yang lebih tinggi, peningkatan temperatur akan mengakibatkan difusifitas molekul adsorbate ke permukaan adsorben menjadi rendah, sehingga kemungkinan adsorbat untuk terikat dengan adsorben menjadi rendah pula.



Gambar 4.7 Pengaruh Temperatur Terhadap Nilai c Pada Adsorpsi N<sub>2</sub> dalam Zeolite

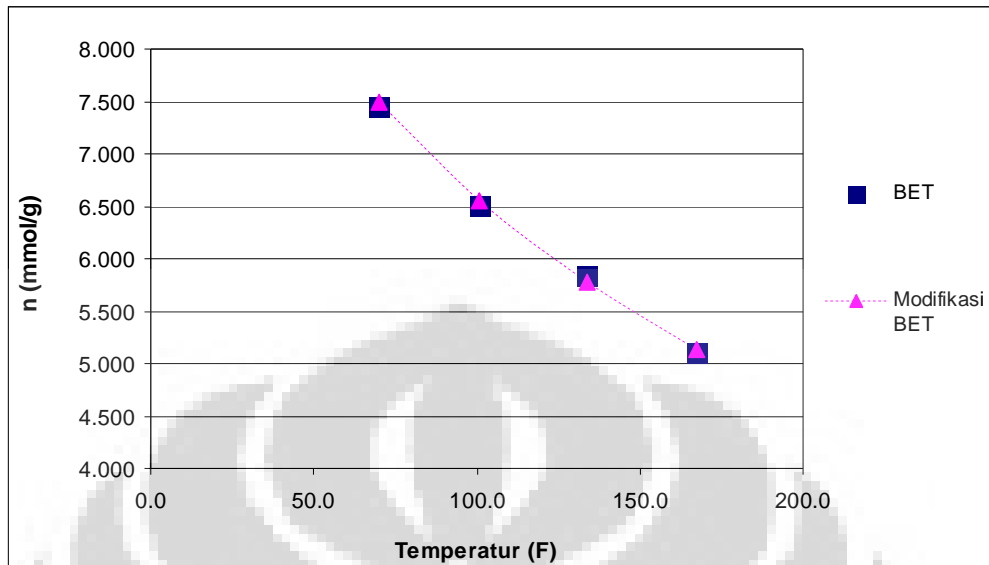
#### 4.5.2 Pengaruh Temperatur Terhadap Jumlah Gas Yang Teradsorpsi maksimum ( $n_{maks}$ )

Hasil pengolahan menunjukkan bahwa baik pada representasi data yang menggunakan persamaan BET maupun representasi data yang menggunakan persamaan hasil modifikasi memberikan nilai  $n_{maks}$  yang cenderung menurun, pada suatu sistem dengan variasi temperatur tertentu. Jumlah gas yang teradsorpsi mengalami penurunan ketika temperatur naik disebabkan karena peningkatan temperatur mempengaruhi nilai kalor adsorpsi, dimana ketika temperatur naik nilai kalor adsorpsi akan menurun, dengan menurunnya nilai kalor adsorpsi ini maka akan mempengaruhi nilai konstanta ( $c$ ) sehingga jumlah gas yang teradsorpsi akan menurun pula. Untuk nilai kalor adsorpsi pada proses adsorpsi bernilai positif. Hal ini disebabkan karena proses adsorpsi bersifat eksotermis, dimana akan dilepaskannya sejumlah energi dari sistem ke lingkungan. Dengan demikian, kenaikan temperatur akan menyebabkan berkurangnya jumlah gas yang teradsorpsi. Seperti telah diketahui bahwa adsorpsi merupakan suatu reaksi kesetimbangan yang bersifat *reversible*, sehingga kenaikan temperatur akan menyebabkan kesetimbangan bergeser ke arah reaktan.

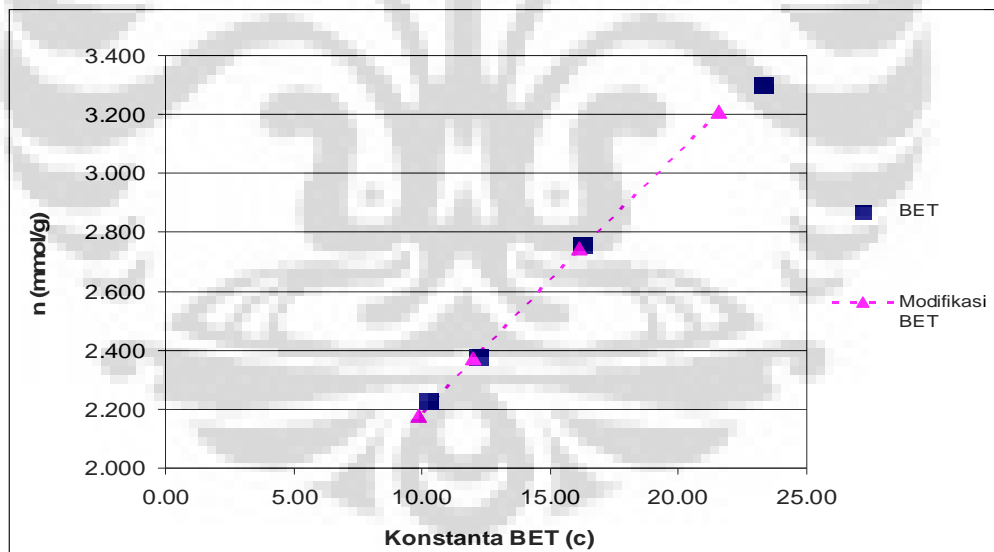




Gambar 4.8 menunjukkan adanya hubungan kenaikan temperatur terhadap jumlah gas yang teradsorpsi.



Gambar 4.8 Hubungan Temperatur Terhadap  $n_{maks}$  Gas  $CO_2$  dalam Karbon Aktif

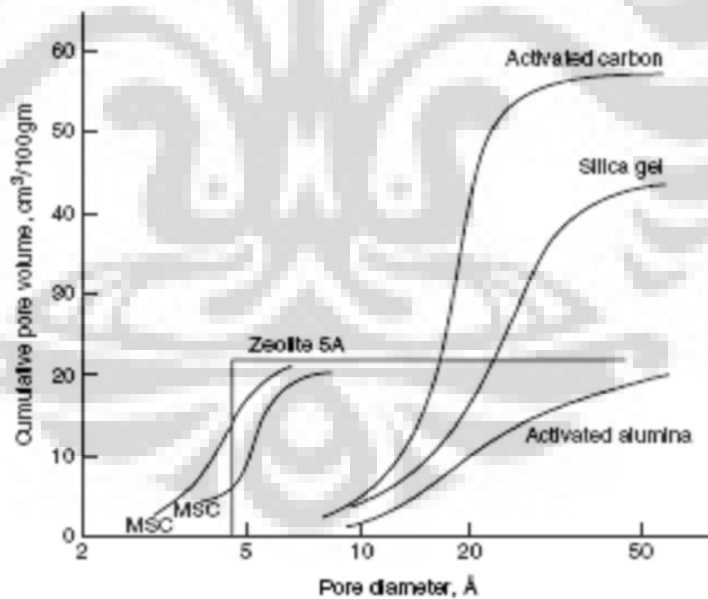


Gambar 4.9 Hubungan Konstanta BET c dengan  $n_{maks}$  Gas  $CH_4$  dalam Karbon Aktif

Gambar 4.9 memperlihatkan hubungan antara jumlah gas  $CH_4$  yang teradsorpsi didalam karbon aktif dengan nilai konstanta BET yang didapatkan dari hasil optimasi program solver. Gambar 4.9 juga menunjukkan bahwa kenaikan temperatur sistem dapat mempengaruhi nilai konstanta c yang dapat berpengaruh terhadap jumlah gas maksimum yang teradsorpsi.

#### 4.6 Perbandingan Jumlah Gas Teradsorpsi antara Karbon Aktif dengan Zeolit dan Silika Gel

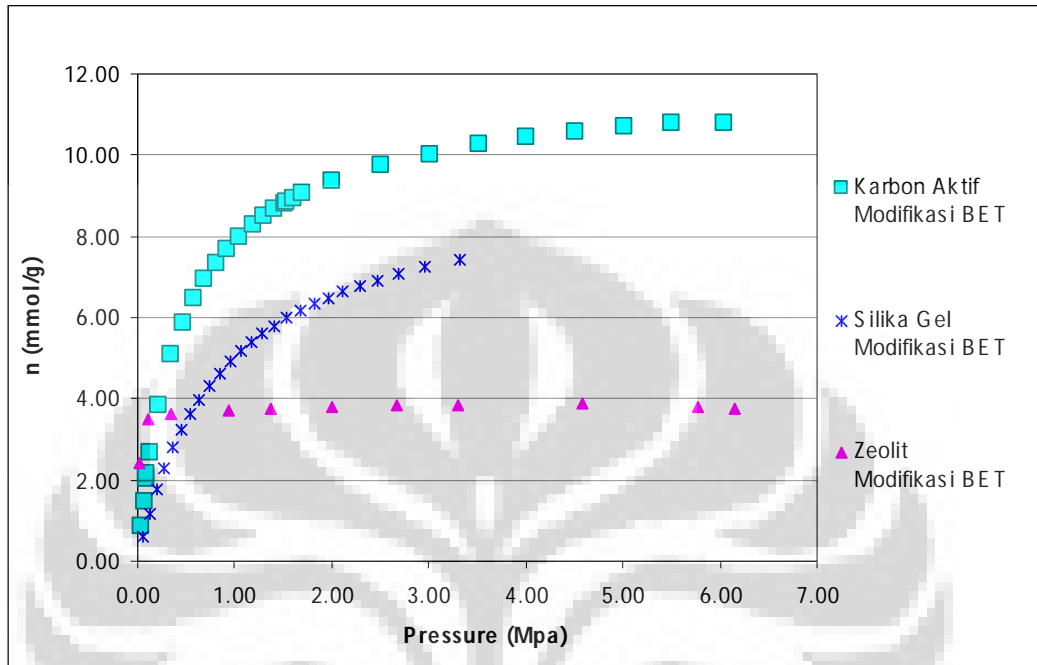
Hasil pengolahan data yang terdapat pada Tabel 4.6 sampai dengan 4.8 menunjukkan bahwa pada temperatur yang sama dengan adsorbat yang sama, karbon aktif dapat mengadsorpsi gas yang lebih besar dibandingkan dengan zeolit dan silika gel. Hal ini disebabkan karena karakteristik dari adsorben itu sendiri, karbon aktif memiliki luas permukaan, porositas serta diameter pori-pori yang lebih besar dibandingkan dengan zeolit dan silika gel. Karbon aktif merupakan adsorben yang memiliki luas permukaan yang paling besar dibandingkan dengan adsorben lainnya. Luas permukaan karbon aktif berkisar antara 300 sampai 4000  $\text{m}^2/\text{g}$  yang diukur dengan menggunakan metode BET. Dengan karakteristik yang demikian maka, jumlah gas yang teradsorpsi oleh karbon aktif akan lebih besar dibandingkan dengan jumlah gas yang teradsorpsi oleh silika gel dan zeolit. Hal ini dapat dijelaskan baik dari penjelasan yang terdapat pada literatur maupun dari hasil pengolahan data adsorpsi yang telah dilakukan.



Gambar 2.5 Distribusi ukuran partikel tiap-tiap adsorben

Gambar 2.2 yang terdapat dalam Bab 2 Tinjauan Pustaka menunjukkan bahwa pada ukuran diameter pori yang sama dari tiap-tiap adsorben, karbon aktif mempunyai daya adsorpsi yang terbesar dibandingkan dengan silika gel dan zeolit, sedangkan Gambar 2.0 menunjukkan suatu perbandingan kemampuan

adsorben antara karbon aktif, silika gel, dan zeolit dalam mengadsorpsi gas CO<sub>2</sub> pada temperatur 77 °F yang diperoleh dengan menggunakan model hasil modifikasi BET.



Gambar 5.0 Perbandingan Kemampuan Adsorben dalam Mengadsorpsi CO<sub>2</sub> pada T = 77 °F

Dari Gambar 4.7 dapat kita lihat bahwa jumlah gas yang teradsorpsi oleh karbon aktif lebih besar nilainya dibandingkan dengan silika gel dan zeolit. Hasil pengolahan data yang terdapat pada Tabel 4.6 sampai dengan Tabel 4.8 juga menunjukkan bahwa nilai  $n_{maks}$  untuk adsorben karbon aktif dalam mengadsorpsi gas CO<sub>2</sub> adalah yang tertinggi nilainya yaitu sebesar 10,865 mmol/g. Kemudian diurutan kedua adalah silika gel dengan nilai  $n_{maks}$  sebesar 4,234 mmol/g, dan terakhir adalah zeolit dengan nilai  $n_{maks}$  yang dihasilkan yaitu 3,684 mmol/g.

## BAB 5

### KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini antara lain :

1. Model modifikasi BET secara umum dapat dikatakan lebih merepresentasikan data eksperimen adsorpsi gas pada tekanan tinggi secara lebih baik dibandingkan dengan model BET. Hal ini dapat dilihat dari nilai AAPDnya yang cenderung lebih kecil untuk hampir setiap adsorben yang digunakan. Dari data eksperimen adsorpsi gas dengan menggunakan adsorben karbon aktif, zeolit, batu bara, dan silika gel didapatkan nilai AAPD untuk model BET adalah 2,48 %; 2,02 %; 3,29 %; dan 3,36 % sedangkan untuk model hasil modifikasinya adalah 1,98 %; 1,00 %; 3,12 %; dan 3,38 %.
2. Faktor koreksi densitas gas yang telah dilakukan terhadap model modifikasi BET sangatlah berpengaruh terhadap representasi data eksperimen adsorpsi gas yang dihasilkan. Hal ini terutama terjadi pada kondisi tekanan tinggi saat sistem telah mencapai tekanan maksimum yang umumnya pada penelitian ini terjadi sekitar diatas 2,5 Mpa dimana pada rentang nilai tekanan ini, jumlah gas yang teradsorpsi oleh adsorben pada model hasil modifikasi BET akan mengalami titik maksimum sampai akhirnya cenderung mengalami penurunan. Hal inilah yang menjadi perbedaan dari model BET dimana pada rentang nilai tekanan tersebut jumlah gas yang teradsorpsi dari model BET akan terus mengalami kenaikan.
3. Kenaikan temperatur sistem dapat membuat nilai konstanta  $c$  dan jumlah gas yang teradsorpsi ( $n$ ) cenderung mengalami penurunan. Hal ini secara umum terjadi pada setiap sistem dan adsorben yang digunakan.
4. Karbon aktif merupakan adsorben yang mempunyai daya adsorpsi yang paling tinggi dibandingkan adsorben lainnya dengan nilai  $n_{maks}$  yang dihasilkan pada adsorpsi gas  $CO_2$  sebesar 10,865 mmol/g. Kemudian diurutan kedua adalah silika gel dengan nilai  $n_{maks}$  sebesar 4,234 mmol/g, dan terakhir adalah zeolit dengan nilai  $n_{maks}$  yang dihasilkan yaitu 3,684 mmol/g.

## DAFTAR REFERENSI

- Myers, A.L., Cales, J. And G. Calleja, Adsorption, 1997, 3, 107
- Yang, R. T., Gas separation by adsorption processes, Butterworths, Boston, 1987
- Smith, J. M., Van Ness, H.C and Abbott, M.M., Introduction to chemical Engineering Thermodynamics, 6<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, New York, 2001
- Douglas, J.M., "Conceptual Design of Chemical Engineering", MacGraw-Hill, New York, 1998
- King, C.J., "Separation Processes", MacGraw-Hill, New York, 1971
- [www.Adsorption.org/BET](http://www.Adsorption.org/BET)
- Husnil, Yuli Amalia. (2005). Evaluasi Model Kisi Ono-Kondo Pada Adsorpsi Gas Tekanan Tinggi. Departemen Teknik Kimia FT UI.
- Ruthven, Douglas M..(1984). Principles of Adsorption and Adsorption Processes. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Ruthven, Douglas M., Shamsuzzaman Farooq and Kent S. Knaebel. (1994). Pressure Swing Adsorption. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Reid, Robert C., John M. Prausnitz and Bruce E. Poling. (1987). *The Properties of Gases and Liquids (4<sup>th</sup> ed.)*. Singapore: McGraw-Hill.
- Do, D.D..(1998). *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*. London: Imperial College Press.