

**PENENTUAN LUAS PERMUKAAN ZEOLIT
MENGUNAKAN METODE ADSORPSI
ISOTERMIS SUPERKRITIS CO₂
DENGAN MODEL
ONO-KONDO**

SKRIPSI

Oleh

AYU ADI PERWITASARI

04 04 06 0128



**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GANJIL 2007/2008**

**PENENTUAN LUAS PERMUKAAN ZEOLIT
MENGUNAKAN METODE ADSORPSI
ISOTERMIS SUPERKRITIS CO₂
DENGAN MODEL
ONO-KONDO**

SKRIPSI

Oleh

AYU ADI PERWITASARI

04 04 06 0128



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GANJIL 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

**PENENTUAN LUAS PERMUKAAN ZEOLIT MENGGUNAKAN
METODE ADSORPSI ISOTERMIS SUPERKRITIS CO₂
DENGAN MODEL ONO-KONDO**

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

Depok, 7 Januari 2007

Ayu Adi Perwitasari

0404060128

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi dengan judul:

**PENENTUAN LUAS PERMUKAAN ZEOLIT MENGGUNAKAN
METODE ADSORPSI ISOTERMIS SUPERKRITIS CO₂
DENGAN MODEL ONO-KONDO**

oleh

AYU ADI PERWITASARI

0404060128

Dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang Skripsi.

Depok, 7 Januari 2008

Menyetujui,

Dosen Pembimbing

Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc, PhD

NIP. 131 803 524

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur kepada Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya tugas skripsi ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Skripsi dengan judul **Penentuan Luas Permukaan Zeolit Menggunakan Metode Adsorpsi Isotermis Superkritis CO₂ Dengan Model Ono-Kondo** ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan akademis dalam meraih gelar Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Kimia Departemen kimia FTUI.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis banyak mendapatkan banyak bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA, selaku ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
2. Bapak Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc, PhD selaku pembimbing skripsi.
3. Kedua orang tua dan saudara-saudara saya atas kasih sayang, perhatian, doa, dan dukungan yang selalu diberikan selama ini.
4. Ira, Nia, Ade, dan Eki atas persahabatan, pemberian semangat, bantuan dan dukungannya selama ini.
5. M. Nadrul Jamal atas kasih sayang, perhatian, semangat, dan dukungan dan bantuan dalam bentuk apapun yang selalu mengalir untukku.
6. Dayat (terima kasih atas doanya), Ramos, Deni, Yadi, Mamat, Niken, Dudu, Jui, Bunda atas tawa, canda, dan kegilaan-kegilaan yang membantu mengusir kejenuhan penulis selama ini.
7. Dosen-dosen DTK FTUI terbaikkku.
8. Om dan tante-tanteku atas saran dan dukungan yang telah diberikan
9. Teman-teman angkatan 2004 dan temen-temen angkatan lain yang tidak bisa disebutkan satu per satu atas semua kerja sama dan pertemannya.
10. Teman-teman seperjuanganku di laboratorium (Dayat, Icut, Bunda, Rini, TKM-nya Dayat)
11. Teman-teman ekstensi (Debi, Irwan, Wafa).
12. Special Thanks to Giyot & Ira, tanpa laptop kalian skripsiku mungkin tidak selesai.

13. Mas Opik, mang Jajat, Mang ijal, Mas Eko, Mas Her atas bantuannya selama proses pengerjaan skripsi ini.

14. Pihak-pihak lainnya yang mendukung dan membantu yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan tugas skripsi ini. Untuk ini, saran dan kritik sangat penulis harapkan untuk memperbaiki penulisan di masa yang akan mendatang.

Depok, Desember 2007

Ayu Adi Perwitasari



Ayu Adi Perwitasari
NPM 04 04 06 0128
Departemen Teknik Kimia

Dosen Pembimbing
Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc, PhD

**PENENTUAN LUAS PERMUKAAN ZEOLIT MENGGUNAKAN
METODE ADSORPSI ISOTERMIS SUPERKRITIS CO₂
DENGAN MODEL ONO-KONDO**

ABSTRAK

Informasi mengenai luas permukaan suatu material berpori sangat dibutuhkan, khususnya di industri kimia yang menggunakan material berpori sebagai adsorben, katalis, dll. Metode penentuan luas permukaan yang selama ini biasa digunakan sering kali memberikan hasil yang kurang akurat akibat dari kondisi operasi yang kurang fleksibel dan dapat merusak struktur dari material berpori tersebut. Selain itu, metode penentuan luas permukaan yang selama ini digunakan memiliki proses yang terlalu rumit.

Dalam penelitian ini, dipelajari metode penentuan luas permukaan yang lebih sederhana, yaitu dengan menggunakan adsorpsi isotermis superkritis CO₂ dengan model Ono-Kondo. Dimana proses adsorpsi dengan model ini dapat dioperasikan pada kondisi temperatur ruang (tekanan tinggi) yang diperkirakan akan memberikan hasil yang lebih akurat. Pada penelitian ini, material berpori yang digunakan dalam percobaan adsorpsi adalah zeolit, dengan tiga jenis zeolit yaitu zeolit alam Lampung, zeolit alam Jawa Barat, dan zeolit alam Malang untuk kemudian dilihat perbandingan hasil luas permukaan terukur dari ketiga jenis zeolit ini. Proses adsorpsi berlangsung dengan variasi 2 temperatur yang mendekati temperatur kritis (untuk CO₂, *triple point*) dengan tekanan dari 100 hingga mencapai 700 psi untuk melihat pengaruh temperatur terhadap proses adsorpsi.

Dari penelitian ini diperoleh bahwa adsorpsi isotermis superkritis CO₂ model Ono-Kondo dapat merepresentasikan adsorpsi hasil percobaan dengan baik. Sehingga luas permukaan dari material berpori yang digunakan pada percobaan ini dapat dihitung dari adsorpsi model Ono-Kondo tersebut. Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa zeolit alam Malang memiliki luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan zeolit alam Lampung dan Jawa Barat.

Kata kunci : Luas, permukaan, adsorpsi, superkritis, CO₂, Ono, Kondo

Ayu Adi Perwitasari
NPM 04 04 06 0128
Chemical Engineering Department

Counsellor
Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc, PhD

**ZEOLITE SURFACE AREA DETERMINATION USING
SUPERCRITICAL ISOTHERM ADSORPTION OF CO₂
WITH ONO-KONDO MODEL**

ABSTRACT

The informations about surface area of porous materials are really needed, especially for chemical industries that using porous materilas as an adsorben, catalyst, and etc. Determination of surface area that being used until now is often give inaccurate results because of the operation conditions that inflexible and sometimes destroy the structure of porous materials. Besides, the method for measuring surface area that being used, have a complicated process.

This research observed a more simple method to determine surface area. It is use a supercritical isotherm adsorption of CO₂ using Ono-Kondo model. The adsorption process using this model can be operated at an atmospheric temperatur (high pressure) which is predicted will give more accurate results. In this experiment, porous materials that used in adsorption process are three types of natural zeolites. They are, natural zeolites from Lampung, natural zeolites from West Java, and natural zeolites from Malang. The surface area of these adsorben then be compared. The adsorption processes in this experiment use two different temperatures that approtimate with critical temperature (for CO₂, the *triple point*) in the pressure from 100 to 700 psi. This various pressures is used to see the effect of temperatures changing to the adsorption processes.

From this research, the researcher earn that the supercritical isotherm adsorption of CO₂ using Ono-Kondo model can represent the adsorption data from experiment. As the result, the surface areas of porous materials that used in this experiment can be calculated from Ono-Kondo model of adsorption. From this research we earned that the surface areas of natural zeolite from Malang is bigger than natural zeolite from West Java and Lampung.

Key words : area, surface, adsorption, supercritical, CO₂, Ono, Kondo

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
DAFTAR SINGKATAN	xiii
DAFTAR SIMBOL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH.....	3
1.3 TUJUAN PENELITIAN	3
1.4 BATASAN MASALAH.....	4
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 LUAS PERMUKAAN.....	5
2.2 ADSORPSI.....	6
2.2.1 Jenis-Jenis Adsorpsi.....	7
2.2.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi	9
2.2.3 Keseimbangan Adsorpsi	10
2.3 MODEL ADSORPSI ISOTERMIS DAN PENENTUAN LUAS PERMUKAAN	11
2.3.1 Adsorpsi Isotermis Langmuir.....	13
2.3.2 Adsorpsi Isotermis BET	14
2.3.3 Adsorpsi Isotermis <i>Lattice Theory</i> (Model Ono-Kondo).....	15
2.4 ADSORBEN.....	17

2.5 ZEOLIT	19
2.6 KARBONDIOKSIDA	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	26
3.1 ALUR PENELITIAN	26
3.2 VARIABEL YANG DIAMATI	27
3.3 ALAT DAN BAHAN.....	27
3.4 PROSEDUR PENELITIAN	28
3.4.1 Persiapan Adsorben dan Adsorpsi Model BET	28
3.4.2 Persiapan Peralatan Adsorpsi Isotermis Superkritis CO ₂	28
3.4.3 Adsorpsi Isotermis Superkritis CO ₂	29
3.4.4 Penentuan Luas Permukaan Dengan Model Adsorpsi Ono-Kondo.....	31
3.5 ANALISA.....	32
3.6 LOKASI PENELITIAN	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 HASIL PERSIAPAN ADSORBEN & ADSORPSI MODEL BET	33
4.2 HASIL PERSIAPAN PERALATAN ADSORPSI ISOTERMIS SUPERKRITIS CO ₂	35
4.3 HASIL KALIBRASI VOLUME DOZING CYLINDER	36
4.4 HASIL KALIBRASI VOLUME VOID PADA SAMPLING CYLINDER.....	36
4.5 HASIL ADSORPSI ISOTERMIS SUPERKRITIS CO ₂	39
4.6 LUAS PERMUKAAN ZEOLIT MENGGUNAKAN METODE ADSORPSI ISOTERMIS SUPERKRITIS CO ₂ DENGAN MODEL ONO- KONDO.....	44
4.6.1 Parameter-parameter Yang Mempengaruhi Luas Permukaan Zeolit...	44
4.6.2 Luas Permukaan Zeolit	45
BAB V KESIMPULAN & SARAN	53
5.1 KESIMPULAN	53
5.2 SARAN.....	54
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN.....	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Adsorpsi Gas Pada Material Berpori Pada Kondisi Kesetimbangan .	6
Gambar 2. 2 Kurva Adsorpsi Isotermis.....	10
Gambar 2. 3 Grafik Adsorpsi Isotermis Gibbs.....	12
Gambar 2. 4 Fluktuasi Energi Permukaan.....	13
Gambar 2. 5 Kurva Kesetimbangan Karbondioksida (CO ₂).....	25
Gambar 3. 1 Alur Penelitian.....	26
Gambar 3. 2 Skema Alat.....	28
Gambar 4. 1 Zeolit alam Lampung.....	33
Gambar 4. 2 Zeolit alam Jawa Barat.....	33
Gambar 4. 3 Zeolit alam Malang.....	34
Gambar 4. 4 Peralatan adsorpsi isotermis superkritis.....	36
Gambar 4. 5 Adsorpsi Gibbs CO ₂ Pada Zeolit Alam Lampung Pada T=30 °C....	40
Gambar 4. 6 Adsorpsi Gibbs CO ₂ Pada Zeolit Alam Lampung Pada T=40 °C....	40
Gambar 4. 7 Adsorpsi Gibbs CO ₂ Pada Zeolit Alam Jawa Barat Pada T=30 °C..	41
Gambar 4. 8 Adsorpsi Gibbs CO ₂ Pada Zeolit Alam Jawa Barat Pada T=40 °C..	41
Gambar 4. 9 Adsorpsi Gibbs CO ₂ Pada Zeolit Alam Malang Pada T=30 °C.....	42
Gambar 4. 10 Adsorpsi Gibbs CO ₂ Pada Zeolit Alam Malang Pada T=40 °C.....	42
Gambar 4. 11 Adsorpsi Model Ono-Kondo Pada Zeolit Alam Lampung Pada T=30°C.....	47
Gambar 4. 12 Adsorpsi Model Ono-Kondo Pada Zeolit Alam Jawa Barat Pada T=30°C.....	47
Gambar 4. 13 Adsorpsi Model Ono-Kondo Pada Zeolit Alam Malang Pada T=30°C.....	48
Gambar 4. 14 Adsorpsi Model Ono-Kondo Pada Zeolit Alam Lampung Pada T=40°C.....	49
Gambar 4. 15 Adsorpsi Model Ono-Kondo Pada Zeolit Alam Jawa Barat Pada T=40°C.....	49
Gambar 4. 16 Adsorpsi Model Ono-Kondo Pada Zeolit Alam Malang Pada T=40°C.....	50

DAFTAR TABEL

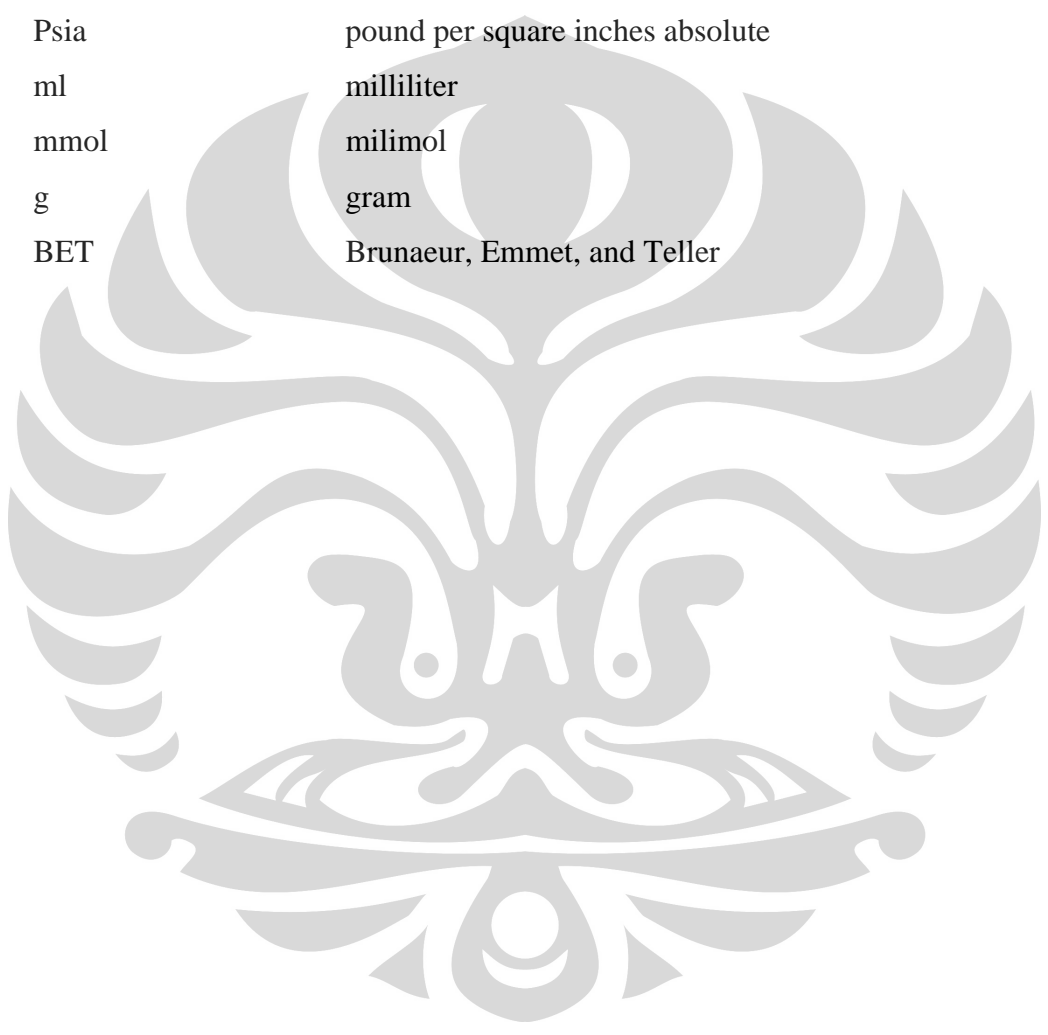
Tabel 2. 1 Perbedaan Adsorpsi Fisika Dan Adsorpsi Kimia.....	8
Tabel 2. 2 Tipe, Karakteristik, Kegunaan, Dan Kerugian Adsorben	19
Tabel 2. 3 Karakteristik Beberapa Jenis Zeolit	22
Tabel 2. 4 Hubungan Garis Tengah Ruang Hampa Dalam Zeolit Dengan Beberapa Jenis Molekul Gas	22
Tabel 2. 5 Data Komposisi Zeolit Alam Lampung.....	22
Tabel 2. 6 Data Komposisi Zeolit Alam Jawa Barat.....	23
Tabel 2. 7 Data-data Fisik Karbondioksida.....	23
Tabel 2. 8 Data-data Fisik Karbondioksida (Lanjutan).....	24
Tabel 4. 1 Luas Permukaan Dengan Menggunakan Adsorpsi N ₂	35
Tabel 4. 2 Hasil kalibrasi <i>Volume Void</i> Zeolit Alam Lampung.....	37
Tabel 4. 3 Hasil Kalibrasi <i>Volume Void</i> Zeolit Alam Jawa Barat.....	38
Tabel 4. 4 Hasil Kalibrasi <i>Volume Void</i> Zeolit Alam Malang.....	38
Tabel 4. 5 Parameter-parameter Dalam Menentukan Luas Permukaan Untuk T = 30°C.....	44
Tabel 4. 6 Parameter-parameter Dalam Menentukan Luas Permukaan Untuk T = 40°C.....	44
Tabel 4. 7 Penyimpangan Adsorpsi Model Ono-Kondo.....	46
Tabel 4. 8 Luas Permukaan Dengan Menggunakan Adsorpsi Isotermis Superkritis CO ₂	50
Tabel 4. 9 Perbedaan Luas Permukaan Menggunakan Metode Adsorpsi Isotermis Superkritis CO ₂	52

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Adsorpsi Pada Zeolit Alam Lampung T = 30 °C.....	58
Lampiran 2. Adsorpsi Pada Zeolit Alam Lampung T = 40 °C.....	59
Lampiran 3. Adsorpsi Pada Zeolit Alam Jawa Barat T = 30 °C.....	60
Lampiran 4. Adsorpsi Pada Zeolit Alam Jawa Barat T = 40 °C.....	61
Lampiran 5. Adsorpsi Pada Zeolit Alam Malang T = 30 °C.....	62
Lampiran 6. Adsorpsi Pada Zeolit Alam Malang T = 40 °C.....	63
Lampiran 7. Data Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung Dengan Adsorpsi N ₂ Model BET.....	64
Lampiran 8. Data Luas Permukaan Zeolit Alam Jawa Barat Dengan Adsorpsi N ₂ Model BET.....	65
Lampiran 9. Data Luas Permukaan Zeolit Alam Malang Dengan Adsorpsi N ₂ Model BET.....	66

DAFTAR SINGKATAN

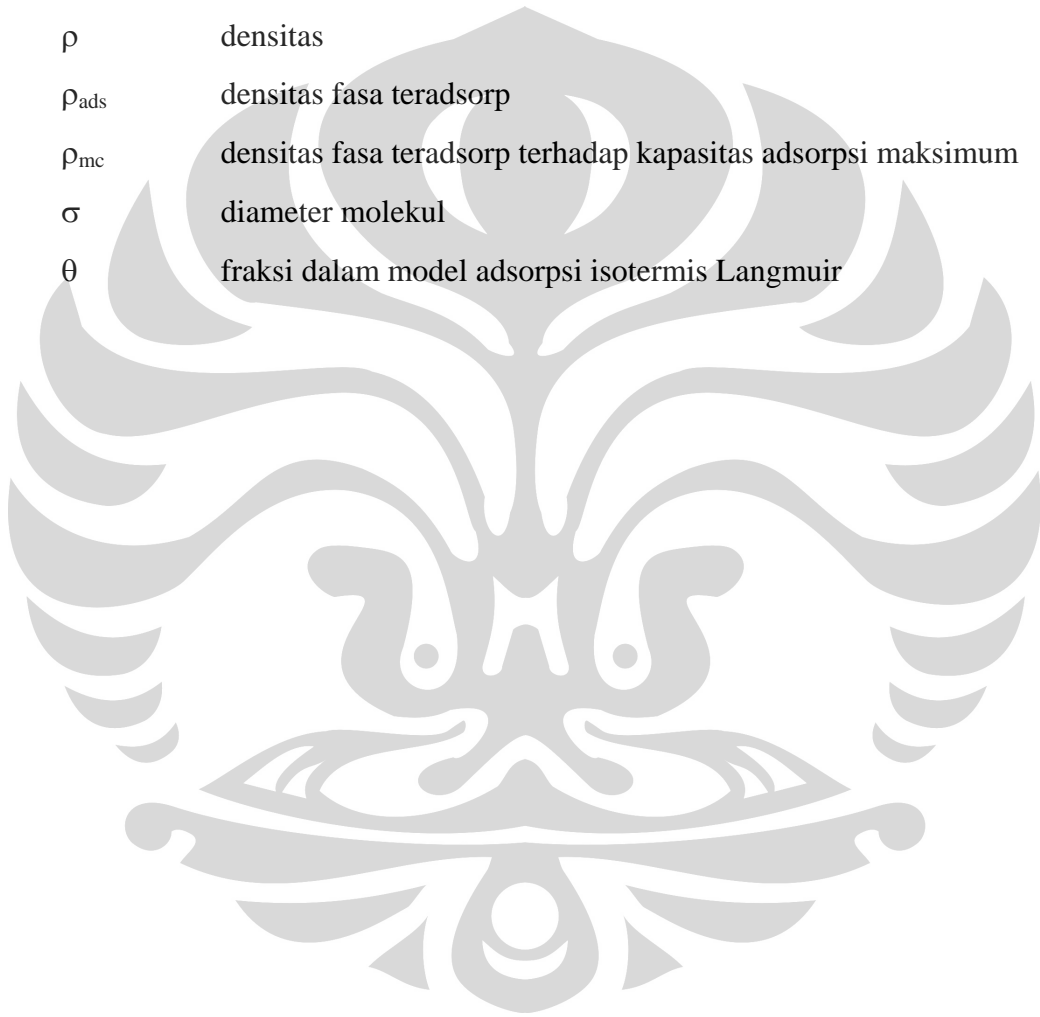
kkal	kilokalori
gmol	gram mol
nm	nanometer
Psia	pound per square inches absolute
ml	milliliter
mmol	milimol
g	gram
BET	Brunauer, Emmet, and Teller



DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan
A	luas permukaan per unit massa adsorben
a	parameter dalam persamaan keadaan
b	parameter co-volume dalam persamaan keadaan; parameter model adsorpsi isoteremis Langmuir
C	kapasitas maksimum adsorpsi model Ono-Kondo
C_a	densitas permukaan fasa teradsorp
$C_{a,0}$	densitas maksimum permukaan fasa teradsorp pada T_0
L	kapasitas adsorpsi Langmuir maksimum
m	jumlah lapisan pada model <i>Lattice</i>
N_{av}	bilangan avogadro
n	jumlah komponen
n_{ads}^{Gibbs}	jumlah gas yang teradsorp
n_{inj}	jumlah gas yang diinjeksikan ke dalam silinder
P	tekanan (psia)
R	konstanta gas ($\text{psi}\cdot\text{cm}^3/\text{mol}\cdot^\circ\text{R}$)
T	temperatur
T_0	<i>normal boiling point</i> dari adsorbat; <i>triple point</i> untuk CO_2
V	volume
V_{void}	void volume
X_{ads}	fraksi dari komponen adsorbat pada monolayer model <i>Lattice</i>
X_i	fraksi mol dari komponen i dalam fasa teradsorp
$X_{i,b}$	fraksi molekul gas i yang menempati sel pada sebuah lapisan dari model <i>Lattice</i>
$X_{i,t}$	fraksi dari molekul i pada lapisan t dari model <i>Lattice</i>
Z	faktor kompresibilitas
z_0	bilangan koordinasi <i>Lattice</i>

z_1	bilangan koordinasi paralel yang mewakili jumlah sel primer terdekat
δ	koefisien ekspansi termal fasa teradsorp
ε_{ij}	parameter energi interaksi intern fluida dalam model Ono-Kondo
ε_{is}	parameter energi interaksi antara fluida dengan permukaan padatan dalam adsorpsi model Ono-Kondo
Γ	adsorpsi Gibbs per unit massa adsorben
ρ	densitas
ρ_{ads}	densitas fasa teradsorp
ρ_{mc}	densitas fasa teradsorp terhadap kapasitas adsorpsi maksimum
σ	diameter molekul
θ	fraksi dalam model adsorpsi isoteremis Langmuir





BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Penentuan luas permukaan dari suatu material berpori merupakan hal yang penting untuk diaplikasikan dalam bidang ilmu pengetahuan dan keteknikan. Sebagai contoh pada bidang teknik kimia, penentuan luas permukaan suatu material berpori katalis digunakan untuk menentukan efektifitas reaksi yang mungkin terjadi pada permukaan katalis tersebut. Beberapa sistem telah dikembangkan untuk menentukan luas permukaan dengan adsorpsi gas dari model adsorpsi isoteremis Langmuir (1918) atau BET (1938). Beberapa sistem komersial juga telah tersedia untuk menentukan luas permukaan absolut dari suatu padatan. Namun, biaya dari penggunaan sistem-sistem tersebut seringkali menjadi masalah.

Penentuan luas permukaan yang selama ini biasa digunakan adalah menggunakan perhitungan dengan model adsorpsi isoteremis seperti Langmuir atau BET. Sejumlah gas yang teradsorpsi oleh padatan atau suatu material berpori sebagai fungsi tekanan ditentukan secara gravimetrik ataupun volumetrik dan luas permukaan material tersebut kemudian dihitung dengan kedua model adsorpsi isoteremis tersebut. Metode penentuan luas permukaan dari material berpori dari kedua model adsorpsi tersebut biasanya menggunakan adsorpsi gas nitrogen (N_2).

Namun, terdapat beberapa masalah yang timbul dari penggunaan adsorpsi gas nitrogen untuk menentukan luas permukaan tersebut. Permasalahan tersebut dikarenakan jumlah gas nitrogen yang teradsorpsi bergantung pada temperatur. Hal ini mengakibatkan luas permukaan yang terhitung juga akan bergantung pada temperatur dan tidak dapat dijadikan acuan apabila luas permukaan terhitung tersebut akan diaplikasikan pada kondisi temperatur yang berbeda. Gas inert nitrogen ini juga memiliki interaksi yang lemah dengan padatan. Sehingga untuk memastikan bahwa jumlah gas yang teradsorpsi dapat memenuhi atau menutupi seluruh permukaan, permukaan padatan tersebut perlu didinginkan (hingga mencapai 77 K). Dimana pendinginan ini biasa dilakukan dengan menggunakan



nitrogen cair. Akibat penggunaan temperatur yang sangat rendah ini, penentuan luas permukaan dengan metode ini membutuhkan suatu wadah khusus. Selain itu nitrogen dalam bentuk cair tidak selalu tersedia. Kondisi temperatur yang digunakan untuk menentukan luas permukaan dari material berpori dengan metode ini juga memiliki dampak terhadap struktur dari material berpori tersebut sehingga luas permukaan yang dihasilkan tidak akurat. Penelitian menunjukkan bahwa penentuan luas permukaan batubara dengan menggunakan metode ini menghasilkan nilai yang tidak masuk akal (mendekati nol) (Gan, 1972 dan Mulyati, 2006). Batubara memiliki struktur ikatan penyusun yang membentuk suatu polimer. Struktur polimer ini sangat rentan terhadap adanya perubahan temperatur. Sehingga ketika diukur luas permukaannya dengan metode adsorpsi N_2 dengan model BET yang berlangsung pada temperatur yang sangat rendah, struktur polimer ini menjadi *fracture* atau rusak dan luas permukaan yang dihasilkan menjadi tidak akurat.

Pada penelitian ini, diteliti dan dipelajari penentuan luas permukaan dari material berpori dengan prinsip adsorpsi menggunakan gas CO_2 (Do, 1998 dan Sudibandriyo, 2003). Gas CO_2 dipilih sebagai gas adsorbat karena CO_2 merupakan gas inert yang mudah diperoleh dan memiliki karakteristik menyerupai cairannya pada temperatur ruang (tekanan tinggi) sehingga dapat dioperasikan pada temperatur ruang. Material berpori yang ditentukan luas permukaannya pada penelitian ini adalah tiga jenis zeolit, yaitu zeolit alam Lampung, zeolit alam Jawa Barat, dan zeolit alam Malang. Material berpori ini dipilih karena memiliki peranan yang cukup besar dalam proses-proses di industri kimia, baik sebagai adsorben, penukar ion, katalis ataupun penyangga katalis (Ellyana, 2007). Model Lattice Ono-Kondo (OK) akan digunakan dalam hubungan adsorpsi isoteremis superkritis dan bertekanan tinggi. Model ini dan temperatur operasinya bergantung pada suatu parameter yang telah diteliti sebelumnya dan menjadikan model ini memberikan hasil luas permukaan dari material berpori yang konsisten dalam setiap adsorpsi isoteremis yang dilakukan (Sudibandriyo, 2003).



1.2 PERUMUSAN MASALAH

Masalah yang muncul dari metode penentuan luas permukaan yang selama ini digunakan adalah masalah kurang sederhananya metode pengukuran luas permukaan yang selama ini digunakan dan ketidakakuratan nilai luas permukaan yang dihasilkan akibat kondisi operasi (temperatur operasi) ataupun proses yang dijalankan. Oleh karena itu, diperlukan suatu pengembangan untuk memperoleh metode penentuan luas permukaan yang lebih sederhana dan dapat memberikan tingkat keakuratan yang lebih besar.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah

1. Untuk memperoleh metode sederhana untuk menentukan luas permukaan dari suatu material berpori dengan adsorpsi isoteremis superkritis CO₂.
2. Untuk menentukan luas permukaan dari zeolit berdasarkan pengukuran adsorpsi isoteremis dari CO₂ pada permukaan material berpori dengan menggunakan model Ono-Kondo.
3. Untuk memperoleh parameter-parameter yang mempengaruhi penentuan luas permukaan zeolit dengan pengukuran adsorpsi isoteremis dari CO₂ model Ono-Kondo.
4. Untuk mempelajari pengaruh perbedaan temperatur adsorpsi terhadap hasil perhitungan luas permukaan zeolit dan parameter-parameter yang mempengaruhi luas permukaan terhitung.
5. Untuk membandingkan dan mempelajari metode penentuan luas permukaan dari zeolit menggunakan adsorpsi isoteremis CO₂ dengan nilai konvensional yang dihasilkan dari metode BET.



1.4 BATASAN MASALAH

Pada penelitian ini dilakukan beberapa pembatasan terhadap komponen dan kondisi operasi, yaitu:

1. Adsorbat yang digunakan pada adsorpsi isotermis superkritis adalah CO₂.
2. Material berpori yang akan diukur luas permukaannya adalah 3 jenis zeolit alam, yaitu zeolit alam Lampung, zeolit alam Jawa Barat, zeolit alam Malang.
3. Pengukuran luas permukaan zeolit, digunakan data percobaan adsorpsi isotermis superkritis CO₂ yang dilakukan pada penelitian ini.
4. Model adsorpsi yang digunakan adalah model adsorpsi isotermis superkritis Ono-Kondo (Sudibandriyo, 2003).

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Susunan penulisan akan mengacu pada sistematika sebagai berikut:

- **BAB I PENDAHULUAN**
Berisi latar belakang sebagai dasar penelitian dilakukan, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.
- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**
Berisi landasan teori umum yang digunakan untuk menjelaskan masalah yang dibahas.
- **BAB III METODE PENELITIAN**
Berisi tentang metode penelitian serta langkah-langkah yang dilakukan dalam menjalankan penelitian untuk mencapai tujuan.
- **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**
Berisi hasil penelitian serta analisa dari hasil penelitian tersebut.
- **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**
Berisi kesimpulan dari hasil penelitian serta saran untuk penelitian sejenis di masa mendatang.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 LUAS PERMUKAAN

Permukaan dari suatu material padat merupakan batas antara material padat tersebut dengan daerah di sekelilingnya, baik berupa cairan, gas, atau padatan lainnya. Setiap material memiliki luas daerah permukaan yang berbeda-beda, keberadaan poros dari material padatan tersebut mempengaruhi besarnya luas permukaan dari material padat tersebut.

Luas permukaan dari suatu material merupakan faktor yang penting dari karakteristik material tersebut. Luas permukaan dari suatu material padat yang digunakan dalam suatu proses dapat mempengaruhi beberapa hal dari proses tersebut. Hal-hal yang dipengaruhi oleh besarnya luas permukaan dari material pada yang digunakan dalam suatu proses diantaranya aktifitas dari katalis, kecepatan semen terhidrasi, kapasitas adsorpsi dari pemurni air, kapasitas adsorben yang digunakan untuk proses *gas sweetening*, dll.

Perubahan bentuk dari suatu material padat dapat mempengaruhi besarnya luas permukaan dari material padat tersebut. Jika suatu material padat dibentuk menjadi partikel-partikel yang lebih kecil, maka akan terbentuk permukaan yang baru dan meningkatkan luas permukaan total dari material padat tersebut. Hal yang sama juga akan terjadi jika terbentuk pori di bagian dalam material padat karena adanya *dissolution*, dekomposisi atau proses lainnya, maka luas permukaan material tersebut juga akan meningkat. (Sudibandriyo, 2003)

Luas permukaan yang sesungguhnya, termasuk permukaan irreguler dan pori-pori dalam, tidak dapat ditentukan hanya dengan menggunakan informasi dari ukuran partikelnya tetapi luas permukaan juga harus dihitung dalam tingkatan atomik, yaitu dengan adsorpsi dari gas yang tidak reaktif atau gas inert.

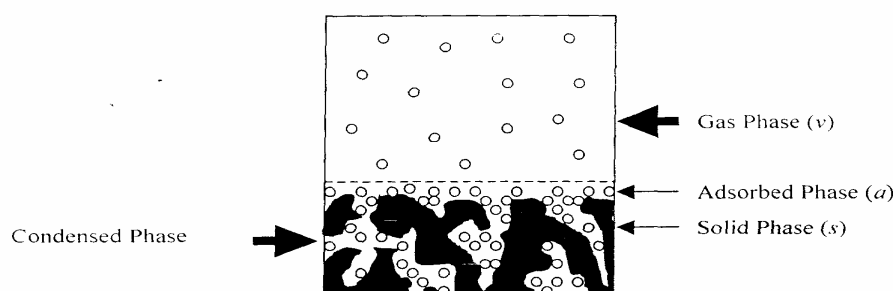


2.2 ADSORPSI

Adsorpsi merupakan suatu proses penyerapan komponen tertentu ke permukaan zat padat yang menyerap. Molekul-molekul pada zat padat atau zat cair mempunyai gaya dalam keadaan tidak seimbang dimana gaya kohesi cenderung lebih besar daripada gaya adhesi. Ketidaksetimbangan gaya-gaya tersebut menyebabkan zat padat atau zat cair tersebut cenderung menarik zat-zat lain atau gas yang bersentuhan pada permukaannya. Fenomena konsentrasi zat pada permukaan padatan atau cairan disebut fasa teradsorb atau adsorbat, sedangkan zat yang menyerap atau menariknya disebut adsorben.

Proses adsorpsi pada suatu adsorben terutama terjadi pada pori-pori kecilnya (*micropore*). Sementara itu, *macropore* hanya berperan sebagai tempat transfer adsorbat dari permukaan luar ke *micropore*. (Ding dan Bhatia, 2003). Adsorpsi gas pada permukaan zat padat menyebabkan terjadinya kesetimbangan antara gas yang terserap dengan gas sisa. Dimana daya serap adsorben terhadap gas tersebut bergantung pada jenis adsorbat, karakteristik adsorben, temperatur, tekanan. Semakin besar tekanan, semakin banyak pula zat yang diserap. Sebaliknya, semakin tinggi temperatur untuk adsorpsi fisika, semakin sedikit jumlah zat yang terserap.

Dalam adsorpsi gas, jumlah molekul yang teradsorp pada permukaan padatan bergantung pada kondisi dalam fasa gas. Jumlah molekul adsorbat yang teradsorp pada permukaan tersebut akan meningkat dengan kenaikan tekanan dan temperatur. Ketika ketebalan dari fasa yang teradsorp pada permukaan padatan sama dengan diameter molekul adsorbat, maka adsorpsi dikatakan membentuk monolayer. Setelah terbentuknya monolayer ini, maka peningkatan tekanan akan menghasilkan multilayer.



Gambar 2.1 Adsorpsi Gas Pada Material Berpori Pada Kondisi Kesetimbangan



2.2.1 Jenis-Jenis Adsorpsi

Berdasarkan interaksi molekular antara permukaan adsorben dengan adsorbat, adsorpsi dibagi menjadi dua bagian, yaitu: (Treybal, 1980 dan Herawaty, 1993)

a. Adsorpsi Fisik

Adsorpsi fisik merupakan adsorpsi yang terjadi karena adanya gaya *Van Der Waals* yaitu gaya tarik-menarik yang relatif lemah antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Adsorpsi ini terjadi apabila suatu adsorbat dialirkan pada permukaan adsorben yang bersih. Pada adsorpsi fisik, adsorbat tidak terikat kuat pada permukaan adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan ke bagian permukaan lainnya, dan pada permukaan yang ditinggalkan oleh adsorbat yang satu dapat digantikan oleh adsorbat lainnya. Adsorpsi fisik adalah suatu peristiwa yang reversibel, sehingga jika kondisi operasinya diubah akan membentuk kesetimbangan baru. Peristiwa adsorpsi gas terjadi sangat cepat. Proses adsorpsi disertai dengan pengeluaran panas sesuai dengan prinsip Le Chatelier. Panas yang terjadi atau dikeluarkan pada peristiwa adsorpsi disebut panas adsorpsi. Panas adsorpsi fisik umumnya rendah (5 – 10 kkal/gmol gas) dan terjadi pada temperatur rendah yaitu di bawah temperatur didih adsorbat. Hal ini yang menyebabkan kesetimbangan dari proses adsorpsi fisik reversibel dan berlangsung sangat cepat. Proses adsorpsi fisik terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi, sehingga pada proses tersebut akan membentuk lapisan multilayer pada permukaan adsorben. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi fisika dapat diputuskan dengan mudah, yaitu dengan cara pemanasan pada temperatur 150 – 200⁰C selama 2 – 3 jam.

b. Adsorpsi Kimia

Adsorpsi kimia merupakan adsorpsi yang terjadi karena terbentuknya ikatan kovalen dan ion antara molekul-molekul adsorbat dengan adsorben. Ikatan yang terbentuk merupakan ikatan yang kuat sehingga lapisan yang terbentuk adalah lapisan monolayer. Untuk adsorpsi kimia, yang paling penting adalah spesifikasi dan kepastian pembentukan monolayer. Pendekatannya adalah dengan menentukan kondisi reaksi, sehingga hanya adsorpsi kimia yang



terjadi dan hanya terbentuk monolayer. Adsorpsi kimia bersifat tidak reversible dan umumnya terjadi pada temperatur tinggi di atas temperatur kritis adsorbat, sehingga panas adsorpsi yang dilepaskan juga tinggi (10 – 100 kkal/gmol). Sedangkan untuk dapat terjadinya peristiwa desorpsi dibutuhkan energi lebih tinggi untuk memutuskan ikatan yang terjadi antara adsorben dan adsorbat. Energi aktivasi pada adsorpsi kimia berkisar antara 10 – 60 kkal/gmol.

Perbedaan antara adsorpsi kimia dan fisika dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2. 1 Perbedaan Adsorpsi Fisika Dan Adsorpsi Kimia (Herawaty, 1993)

No.	Parameter	Adsorpsi Fisika	Adsorpsi Kimia
1.	Adsorben	Semua jenis	Terbatas
2.	Adsorbat	Semua gas	Kecuali gas mulia
3.	Jenis ikatan	Fisika	Kimia
4.	Panas adsorpsi	5-10 kkal/gmol gas	10-100 kkal/gmol gas
5.	Energi aktivasi	< 1 kkal/gmol	10-60 kkal/gmol
6.	Reversibilitas	<i>Reversible</i>	<i>Irreversible</i>
7.	Tebal lapisan	Jamak (<i>multilayer</i>)	Tunggal (<i>monolayer</i>)
8.	Kecepatan adsorpsi	Besar	Kecil
9.	Jumlah zat teradsorpsi	Sebanding dengan kenaikan tekanan	Sebanding dengan banyaknya inti aktif adsorben yang dapat bereaksi dengan adsorbat
10.	Kegunaan	Untuk penentuan luas permukaan dan ukuran pori	Untuk penentuan daerah pusat aktif dan penjelasan kinetika reaksi permukaan



2.2.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi (Bahl et. al., 1997 dan Treybal, 1980)

1. Jenis adsorbat

a. Ukuran molekul adsorbat

Ukuran molekul yang sesuai merupakan hal yang penting agar proses adsorpsi dapat terjadi, karena molekul-molekul yang dapat diadsorpsi adalah molekul-molekul yang diameternya lebih kecil atau sama dengan diameter pori adsorben.

b. Kepolaran zat

Apabila berdiameter sama, molekul-molekul polar yang lebih kuat diadsorpsi daripada molekul-molekul yang kurang polar. Molekul-molekul yang lebih polar dapat menggantikan molekul-molekul yang kurang polar yang telah lebih dulu teradsorpsi.

2. Karakteristik Adsorben

a. Kemurnian adsorben

Sebagai zat yang digunakan untuk mengadsorpsi, maka adsorben yang lebih murni lebih diinginkan karena memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih baik.

b. Luas permukaan dan volume pori adsorben

Jumlah molekul adsorbat yang teradsorpsi meningkat dengan bertambahnya luas permukaan dan volume pori adsorben. Dalam proses adsorpsi seringkali adsorben diberikan perlakuan awal untuk meningkatkan luas permukaannya seperti karena luas permukaan adsorben merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi proses adsorpsi.

3. Temperatur

Proses adsorpsi adalah proses eksotermis, berarti peningkatan temperatur pada tekanan yang tetap akan mengurangi jumlah senyawa yang teradsorpsi.

4. Tekanan adsorbat

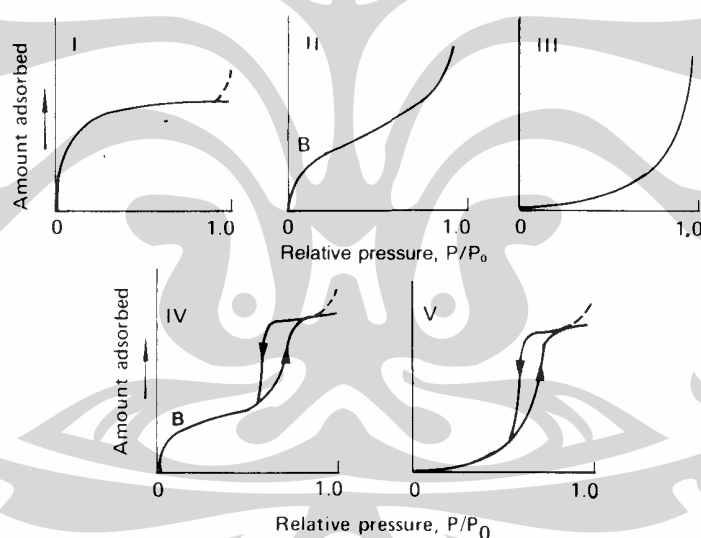
Pada adsorpsi fisika, jumlah zat yang diadsorpsi akan bertambah dengan menaikkan tekanan adsorbat. Sebaliknya pada adsorpsi kimia, jumlah zat yang diadsorpsi akan berkurang dengan menaikkan tekanan adsorbat.



2.2.3 Keseimbangan Adsorpsi

Pada saat fluida yang mengandung adsorbat dikontakkan dengan padatan adsorben, molekul-molekul adsorbat berpindah dari fluida ke padatan sampai konsentrasi adsorbat di aliran fluida berada dalam keadaan setimbang dengan adsorbat yang teradsorp dalam padatan adsorben. Data keseimbangan adsorpsi yang dihasilkan pada temperatur konstan biasa disebut adsorpsi isothermis, dimana terdapat hubungan antara jumlah zat yang teradsorp per unit massa padatan dan tekanan gas adsorbatnya. Adsorpsi isothermis dapat dihitung dengan mengukur tekanan adsorbat pada saat awal (sebelum terjadi keseimbangan) dan pada saat terjadinya keseimbangan. (Bahl et al., 1997; Sundstrom dan Herbert, 1979; Ruthven, 1993)

Brunauer mengklasifikasikan adsorpsi isothermis ke dalam lima jenis kurva seperti gambar berikut: (Maron dan Lando, 1974 dan Bond, 1987)



Gambar 2. 2 Kurva Adsorpsi Isothermis

- Tipe I

Jenis ini disebut *Langmuir Isotherm* menggambarkan adsorpsi satu lapis (monolayer). Banyaknya adsorbat mendekati harga pembatas saat P/P_0 mendekati satu. Jenis ini biasanya diperoleh dari adsorben berpori kecil (*micropore*) kurang dari 2 nm dan luas area eksternal yang sangat sedikit. Kurva jenis ini biasanya diperoleh dari adsorben karbon aktif dan *zeolit molecular sieve*.



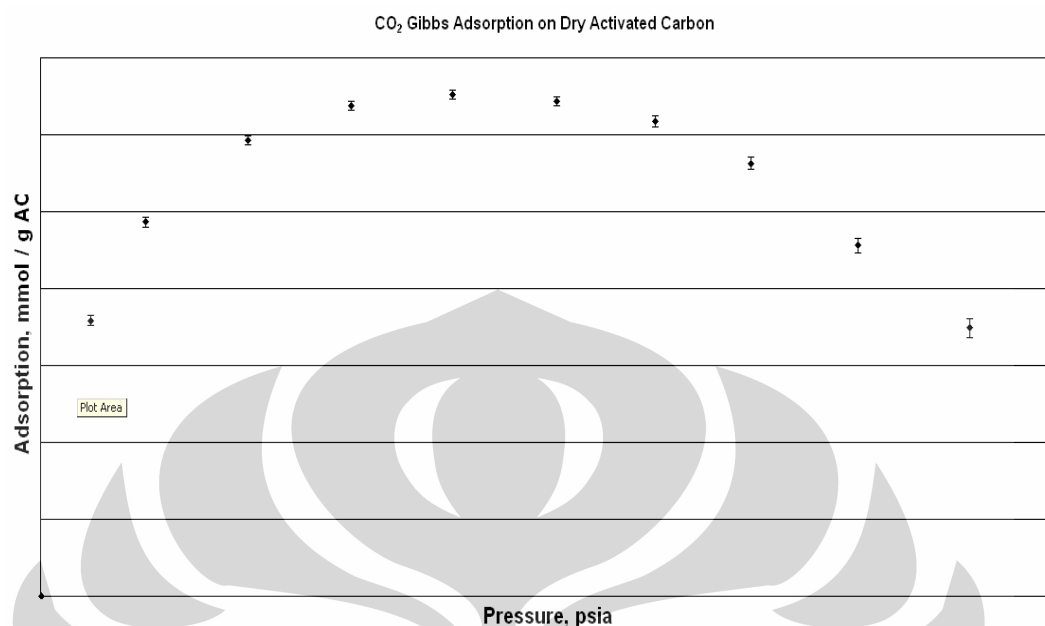
- Tipe II
Jenis ini adalah bentuk normal isoterm pada adsorben tak berpori (*non porous*) atau padatan berpori besar (*macro porous*), yang menunjukkan adsorpsi monolayer-multilayer. Titik B yang ditunjukkan pada gambar menunjukkan kondisi awal tahap linier dari isoterm, biasanya digunakan untuk mengindikasikan tekanan relatif saat pelapisan monolayer selesai.
- Tipe III
Jenis ini menunjukkan tipe kuantitas adsorben semakin tinggi saat tekanan relatif bertambah. Tidak adanya titik B seperti pada jenis kedua disebabkan karena interaksi adsorbat-adsorbat yang lebih kuat dibanding adsorben-adsorben. Sama seperti tipe II, jumlah lapisan pada permukaan adsorben tidak terbatas (*multilayer*).
- Tipe IV
Jenis ini hampir sama dengan tipe II pada rentang tekanan relatif rendah sampai menengah. Volume terbesar adsorbat yang teradsorpsi dapat dihitung dari *capillary condensation* yang telah sempurna mengisi pori. Kurva jenis ini dihasilkan dari padatan adsorben berukuran *mesopore* (2-50 nm).
- Tipe V
Jenis ini hampir sama dengan tipe III, dihasilkan dari interaksi yang rendah antara adsorben dengan adsorbat. Tipe V ini juga ditunjukkan oleh pori dengan ukuran sama seperti tipe IV.

2.3 MODEL ADSORPSI ISOTERMIS DAN PENENTUAN LUAS PERMUKAAN

Data adsorpsi gas tersebut dapat dilaporkan dengan menggunakan adsorpsi Gibbs atau Absolut. Adsorpsi isotermis Gibbs memiliki perbedaan dengan adsorpsi Absolut. Pada adsorpsi isotermis absolut, jumlah adsorbat yang sudah terlebih dahulu teradsorpsi diperhitungkan, dan model ini hanya bisa digunakan pada tekanan rendah. Pada adsorpsi Gibbs ini, 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 teradsorp per gram adsorben akan turun seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 3 Grafik Adsorpsi Isotermis Gibbs

Dalam adsorpsi Gibbs dan Absolut diperhitungkan jumlah mol adsorbat yang teradsorp dengan menggunakan persamaan berikut:

$$n_{\text{tidal teradsorp}}^{\text{Gibbs}} = \left(\frac{PV_{\text{void}}}{ZRT} \right) \quad (2. 1)$$

Persamaan di atas menggunakan prinsip bahwa total *void volume* terisi oleh sejumlah gas yang tidak teradsorp. Dimana $V_{\text{gas}} = V_{\text{void}} - V_{\text{teradsorp}}$ dan $V_{\text{gas}} = n_{\text{teradsorp}}^{\text{Abs}} / \rho_{\text{teradsorp}}$. Dengan menggunakan persamaan ini, persamaan adsorpsi Gibbs dan Absolut untuk densitas dapat diturunkan seperti berikut:

$$n_{\text{teradsorp}}^{\text{abs}} = n_{\text{teradsorp}}^{\text{Gibbs}} \left(\frac{\rho_{\text{teradsorp}}}{\rho_{\text{teradsorp}} - \rho_{\text{gas}}} \right) \quad (2. 2)$$

Atau
$$n_{\text{teradsorp}}^{\text{Abs}} = n_{\text{teradsorp}}^{\text{Gibbs}} + V_{\text{teradsorp}} \rho_{\text{gas}} \quad (2. 3)$$

Persamaan 2.3 menunjukkan bahwa adsorpsi Absolut akan selalu lebih besar dari adsorpsi Gibbs. Pada tekanan rendah, densitas gas sangat kecil (jauh lebih

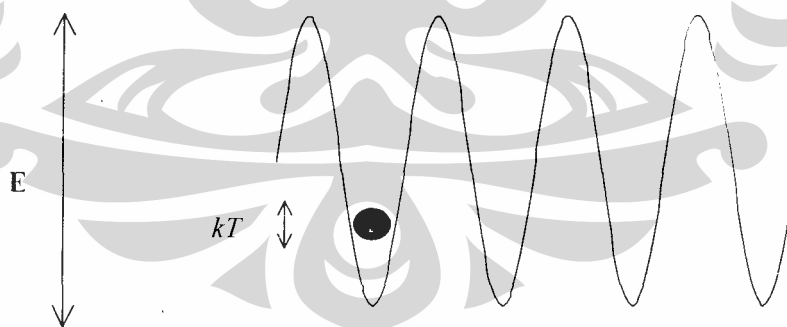


kecil daripada densitas adsorpsi) sehingga ρ_{gas} bisa dianggap nol sehingga koreksi Gibbs untuk adsorpsi Absolut dapat diabaikan ($n_{\text{Gibbs}} = n_{\text{absolute}}$) dan n_{Gibbs} terus mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan tekanan. Namun, pada tekanan tinggi, ρ_{gas} tidak bisa dianggap nol sehingga nilai n_{Gibbs} akan menurun seiring dengan kenaikan tekanan walaupun harga n_{absolute} naik dan koreksi tersebut akan sangat signifikan.

Model-model adsorpsi yang termasuk dalam adsorpsi isotermis Absolut adalah model adsorpsi isotermis Langmuir dan BET, sedangkan yang termasuk dalam adsorpsi isotermis Gibbs adalah model adsorpsi isotermis Ono-Kondo

2.3.1 Adsorpsi Isotermis Langmuir (Bond 1987, Maron dan Lando 1974)

Langmuir isotermal dikembangkan oleh Irving Langmuir pada tahun 1918 untuk menggambarkan hubungan permukaan yang ditutupi oleh gas adsorbat pada tekanan gas diatas permukaan pada temperatur yang tetap. Teori Langmuir menggambarkan adsorpsi monolayer pada permukaan ideal. Permukaan ideal yang dimaksud adalah dimana fluktuasi energi (E) pada permukaan bersifat periodik dengan jarak yang sama, dan jarak fluktuasi ini lebih besar energi termal sebuah molekul (kT).



Gambar 2. 4 Fluktuasi Energi Permukaan

Persamaan umum yang digunakan pada Langmuir adalah :

$$\theta = \frac{bP}{1 + bP} \quad \text{atau} \quad bP = \frac{\theta}{1 - \theta} \quad (2.4)$$



dimana:

- θ = fraksi luas permukaan yang tertutup oleh lapisan monolayer
- b = konstanta adsorpsi Langmuir yang besarnya bergantung pada temperatur
- P = tekanan adsorpsi

Pada tekanan rendah persamaan di atas akan mengikuti Hukum Henry's dimana $\theta = bP$. Persamaan Langmuir di atas didasarkan pada asumsi berikut:

- Adsorben dilapisi satu lapisan molekul gas adsorbat (unimolekular atau *monolayer*)
- Molekul teradsorpsi tidak bebas bergerak pada permukaan
- Tidak ada interaksi lateral di antara molekul-molekul adsorbat
- Entalpi adsorpsi sama untuk semua molekul

Jika kita definisikan kapasitas adsorpsi maksimum dari teori Langmuir ini dilambangkan dengan L (mol/gram adsorben) dimana nilainya diperoleh dari hasil percobaan, maka kita dapat menentukan luas permukaan dari adsorben dengan persamaan berikut:

$$A = L \cdot N_{av} \cdot \frac{\pi}{4} \sigma^2 \quad (2.5)$$

Dimana N_{av} adalah bilangan avogadro dan σ adalah diameter adsorbat.

2.3.2 Adsorpsi Isotermis BET (Maron dan Lando 1974)

Metode ini dikembangkan oleh Brunauer, Emmet dan Teller pada tahun 1938, yang merupakan suatu metode yang mengacu pada teori kinetika langmuir, dan sering digunakan untuk studi-studi karakteristik dari katalis dengan berdasarkan kepada teori adsorpsi gas.

Adsorpsi isotermis yang menggunakan prinsip dan persamaan BET adalah adsorpsi isotermis tipe II-V yang merupakan adsorpsi fisik. Pada tipe ini, adsorben dapat dilapisi oleh beberapa lapisan molekul gas adsorbat (multimolekular atau *multilayer*). Persamaan dari BET adalah :

$$\frac{P}{v(P^0 - P)} = \frac{1}{v_m c} + \left(\frac{c-1}{v_m c} \right) \frac{P}{P^0} \quad (2.6)$$



dimana:

P = tekanan gas saat teradsorpsi

P₀ = tekanan jenuh adsorbat gas pada temperatur percobaan

V = volume gas yang diadsorp pada tekanan P

V_m = Volume gas yang diadsorp untuk monolayer

c = konstanta yang dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$c = e^{(E_1 - E_L) / RT} \quad (2.7)$$

E₁ = panas adsorpsi monolayer

E_L = panas pencairan gas pada layer lain.

Model adsorpsi BET ini biasa digunakan untuk menentukan luas permukaan dari adsorben dengan menggunakan adsorpsi nitrogen pada temperatur 77K.

2.3.3 Adsorpsi Isotermis *Lattice Theory* (Model Ono-Kondo)

Konsep teori *Lattice* pertama kali ditemukan oleh Ono dan Kondo pada tahun 1960. Teori adsorpsi ini telah digunakan untuk adsorpsi zat terlarut dalam larutannya (Aranovich, 1996-1997 dan Hocker, 1999). Aplikasi model ini untuk adsorpsi gas murni dan campuran pada substrat karbon juga telah dilakukan (Sudibandriyo, 2003). Model adsorpsi ini merupakan model adsorpsi superkritis, dimana proses adsorpsi dilakukan pada kisaran temperatur kritis dari adsorbatnya. Model ini layak untuk dikembangkan untuk pemakaian adsorpsi gas tekanan tinggi karena selain mempunyai basis teori yang kuat, model ini juga menawarkan beberapa aspek keuntungan praktis, khususnya model ini:

- Mengakomodasi adsorpsi multilayer dan adsorpsi multi komponen.
- Dapat digunakan untuk memperkirakan densitas fasa teradsorpsi secara langsung, sehingga dapat digunakan untuk memprediksi adsorpsi absolut.
- Mempunyai potensi untuk menjelaskan perilaku adsorpsi didasarkan pada sifat-sifat fisis gas dan karakteristik dari adsorben.
- Mempunyai struktur yang memasukkan densitas gas sehingga memungkinkan pemakaian perhitungan densitas gas yang akurat tanpa membebani perhitungan dari adsorpsinya sendiri.



Model adsorpsi Ono-Kondo ini juga dapat digunakan untuk menentukan luas permukaan dari adsorbennya berdasarkan data percobaan adsorpsi pada berbagai temperatur. Dimana perhitungan ini dilakukan untuk adsorpsi lapisan tunggal. Persamaan kesetimbangan untuk lapisan tunggal yang berlaku pada model adsorpsi ini adalah sebagai berikut:

$$\ln[x_{ads}(1-x_b)/x_b(1-x_{ads})] + ((z_1 + 1)x_{ads} - z_0x_b)\varepsilon_{ii}/kT + \varepsilon_{is}/kT = 0 \quad (2.8)$$

Dimana $z_1 = 6$ dan $z_0 = 8$ untuk *hexagonal Lattice cell*

Berdasarkan teori *Lattice*, adsorpsi berlebih Gibbs dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\Gamma_i = C_i \sum_{t=1}^m (x_{i,t} - x_{i,b}) \quad (2.9)$$

Dimana: C_i = kapasitas maksimum dari adsorben

$X_{i,t}$ = fraksi dari molekul teradsorp yang menempati sel *Lattice* pada lapisan t

$X_{i,b}$ = fraksi dari molekul gas yang menempati jumlah yang sama dengan sel *Lattice* pada lapisan t

$X_{i,t}$ dan $x_{i,b}$ juga dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$x_{i,t} = \rho_{i,t} / \rho_{i,mc} \quad \text{dan} \quad x_{i,b} = \rho_{i,b} / \rho_{i,mc} \quad (2.10)$$

Dimana: $\rho_{i,t}$ = densitas teradsorp dari komponen i pada lapisan t

$\rho_{i,b}$ = densitas teradsorp dari komponen i pada fasa gas

$\rho_{i,mc}$ = densitas teradsorp dari komponen i pada kapasitas maksimum.

Untuk adsorpsi di dalam celah, berdasarkan pendekatan Benard dan Chacine (1197 dan 2001), jumlah lapisan, m, sama dengan 2 sehingga persamaan 2.9 menjadi:

$$\Gamma = 2C(x_{teradsorp} - x_b) = 2C \left(\frac{\rho_{teradsorp}}{\rho_{mc}} - \frac{\rho_b}{\rho_{mc}} \right) \quad (2.11)$$

Disini, pre-factor, C, dapat diasumsikan sebagai parameter yang dimasukkan dalam perhitungan fraksi dari pori-pori aktif adsorben dan sifat-sifat struktural lainnya dari adsorben.

Berdasarkan evaluasi yang telah dilakukan sebelumnya terhadap parameter C, ditemukan bahwa nilai C akan meningkat seiring dengan peningkatan luas



permukaan adsorben (Sudibandriyo, 2003). Sehingga dapat dilihat bahwa kapasitas maksimum, C , dapat ditentukan oleh dua hal, yaitu karakteristik adsorben yang ditunjukkan oleh luas permukaannya (A , m^2/g) dan karakteristik adsorbat. Berikut ini adalah hubungan antara C dengan luas permukaan (A) :

$$C(T) = \frac{A \cdot C_a(T)}{2} \quad (2.12)$$

Dimana C_a adalah densitas fasa permukaan teradsorp ($mmol/m^2$) dan nilainya hanya bergantung pada jenis adsorbat.

Lebih lanjut, C juga dapat diberikan pada persamaan berikut :

$$\ln\left(\frac{1}{C}\right) = \delta T - \left[\ln C_{a,0} + \delta T_0 + \ln\left(\frac{A}{2}\right) \right] \quad (2.13)$$

Dimana $T_0(K)$ adalah *normal boiling point* dari adsorbat (untuk CO_2 *triple point*), $T(K)$ adalah temperatur absolut, $C_{a,0}$: densitas fasa teradsorb pada T_0 , dan δ : koefisien ekspansi termal pada fasa teradsorp. Untuk CO_2 , $C_{a,0} = 0,0142$ $mmol/m^2$; $\delta = 0,0039$ K^{-1} . Persamaan 2.13 adalah persamaan yang digunakan untuk menentukan luas permukaan dengan model Ono-Kondo (Sudibandriyo, 2003).

2.4 ADSORBEN

Adsorben dapat didefinisikan sebagai zat padat yang dapat menyerap komponen tertentu dari suatu fasa fluida. Kebanyakan adsorben adalah bahan-bahan yang sangat berpori, dan adsorpsi berlangsung terutama pada dinding pori-pori atau pada letak-letak tertentu di dalam partikel itu. Oleh karena pori-pori itu biasanya sangat kecil, luas permukaan dalam menjadi beberapa orde besaran lebih besar daripada permukaan luar, dan bisa sampai 2000 m^2/g .

Untuk dapat menjadi adsorben komersial, suatu zat padat harus memenuhi beberapa kriteria berikut : (Gultom 1998)

- Memiliki luas permukaan yang besar per unit massa sehingga kapasitas adsorpsinya tinggi
- Secara alamiah dapat berinteraksi dengan adsorbat
- Mudah diperoleh, harga tidak mahal, tidak korosif, tidak beracun
- Tidak ada perubahan volume yang berarti selama adsorpsi dan regenerasi
- Mudah dan ekonomis untuk diregenerasi



Terdapat banyak sekali zat yang biasa digunakan sebagai adsorben. Adsorben yang paling sering dipakai adalah karbon aktif karena memiliki luas permukaan area yang besar sehingga daya adsorpsinya lebih besar dibandingkan adsorben yang lain. Berdasarkan struktur dan unsur pembangunnya, adsorben dapat digolongkan menjadi dua yaitu adsorben tidak berpori (*non porous adsorbents*) dan adsorben berpori (*porous adsorbents*). (Gultom 1998).

1. Adsorben tak berpori

Adsorben tak berpori dapat diperoleh dengan cara presipitasi deposit kristalin seperti BaSO₄ atau penghalusan padatan kristal. Luas permukaan spesifiknya kecil, tidak lebih dari 10 m²/g, umumnya antara 0,1 sampai dengan 1 m²/g. Bahan tak berpori seperti filter karet (rubber fillers) dan karbon hitam bergrafit (*graphitized carbon blacks*) adalah jenis adsorben tak berpori yang telah mengalami perlakuan khusus sehingga luas permukaannya dapat mencapai ratusan m²/g.

2. Adsorben berpori

Luas permukaan spesifik adsorben berpori berkisar antara 100 s.d. 1000 m²/g. Biasanya dipergunakan sebagai penyangga katalis, dehidrator, dan penyeleksi komponen. Adsorben ini umumnya berbentuk granular.

Klasifikasi pori yang sering digunakan :

- Mikropori : diameter < 2 nm
- Mesopori : diameter 2 – 200 nm
- Makropori : diameter > 200 nm

Beberapa jenis adsorben berpori yang terkenal adalah : silikagel, alumina, karbon aktif, zeolit, *molecular sieve*, dan *porous glasses*.

Tabel 2.2 ini menginformasikan tentang beberapa jenis adsorben, karakteristik, beserta kegunaan dan kerugiannya.



Tabel 2. 2 Tipe, Karakteristik, Kegunaan, Dan Kerugian Adsorben
(Atmayudha, 2006)

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

2.5 ZEOLIT

Zeolit merupakan mineral yang terdiri dari kristal aluminosilikat terhidrasi yang mengandung kation alkali atau alkali tanah. Pada struktur zeolit, semua atom Al dalam bentuk tetrahedral sehingga atom Al akan bermuatan negatif karena berkoordinasi dengan empat atom oksigen dan selalu dinetralkan oleh kation alkali atau alkali tanah untuk mencapai senyawa yang stabil.

Zeolit dengan struktur *framework* mempunyai luas permukaan yang besar dan mempunyai rongga atau ruang kosong yang membentuk saluran yang dapat menyaring ion/molekul (*molecular sieving*). Itulah sebabnya pada tahun 1954, zeolit diklasifikasikan sebagai *molecular sieve material*. Maksud dari sifat penyaring molekular tersebut adalah kemampuan zeolit untuk menyeleksi bentuk molekul yang teradsorpsi ataupun yang terdesorpsi

Rumus empiris zeolit adalah $M_2O_n \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$ dimana:

M : kation alkali atau alkali tanah

n : valensi logam alkali

x,y : bilangan bulat positif (biasanya antara 2-10)

Pemanfaatan zeolit untuk berbagai aplikasi tidak terlepas dari sifat-sifat fisik dan kimia yang dimilikinya. Sifat-sifat zeolit alam dipengaruhi oleh struktur kristal tertentu dari masing-masing zeolit alam, kerangka, dan komposisi kation-kation. Beberapa sifat fisik ataupun kimia zeolit alam yaitu:



1. Sifat Adsorpsi

Pada kondisi normal, ruang hampa dalam kristal zeolit terisi oleh molekul air membentuk bola-bola hidrat dalam kation. Bila kristal zeolit dipanaskan pada temperatur 300-400⁰C, maka air tersebut keluar sehingga molekul-molekul zat dengan *cross sectional diameter* tertentu akan dapat melewati dan menempati saluran-saluran dan rongga zeolit (diadsorpsi). Faktor-faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi pada permukaan zeolit yaitu:

a. Jenis adsorbat

- Ukuran molekul adsorbat, dimana molekul-molekul yang bisa diadsorpsi adalah molekul-molekul yang diameternya sama atau lebih kecil dari diameter pori zeolit.
- Kepolaran adsorbat, dimana molekul-molekul polar lebih kuat diadsorpsi daripada molekul-molekul yang kurang polar bila diameternya sebanding

b. Kemurnian adsorben

Adsorben yang lebih murni memiliki daya adsorpsi yang lebih baik

c. Luas permukaan zeolit

Semakin besar luas permukaan zeolit maka jumlah adsorbat yang teradsorp akan bertambah

d. Temperatur

Berdasarkan prinsip Le Chatelier, untuk proses adsorpsi kimia bersifat eksotermis, sehingga jumlah adsorbat yang teradsorp akan meningkat dengan meningkatnya temperatur

e. Tekanan

Semakin tinggi tekanan maka semakin banyak adsorbat yang teradsorp

2. Sifat Dehidrasi

Sifat dehidrasi zeolit akan mempengaruhi sifat-sifat adsorpsinya. Zeolit akan melepaskan molekul airnya dari dalam rongga permukaan dan akan efektif terinteraksi dengan molekul yang diadsorpsi. Jumlah molekul air sesuai dengan jumlah pori-pori atau volume ruang hampa yang terbentuk bila unit sel kristal tersebut dipanaskan



3. Sifat Penukar Ion

Ion-ion pada rongga atau kerangka zeolit berguna untuk menjaga kenetralan zeolit. Ion-ion ini dapat bergerak bebas sehingga pertukaran ion yang terjadi tergantung dari ukuran, muatan, ataupun jenis zeolitnya. Sifat-sifat penukar ion dari zeolit sangat bergantung pada sifat kation, temperatur, dan jenis anion. Penukaran ion dapat menyebabkan perubahan beberapa sifat zeolit seperti, stabilitas terhadap panas, sifat adsorpsi dan aktifitas katalis.

4. Sifat Katalis/Penyangga Katalis

Zeolit merupakan katalisator yang baik karena mempunyai pori-pori yang besar dan permukaan yang maksimum.

5. Sifat Penyaring Molekul

Ukuran garis tengah ruang hampa dalam kisi-kisi zeolit menjadi dasar kemampuan zeolit untuk bertindak sebagai penyaring molekul. Kemampuan zeolit untuk menyeleksi bentuk molekul timbul karena adanya ruang kosong yang membentuk saluran di dalam strukturnya dengan satu atau lebih ukuran yang seragam dengan diameter pori zeolit. Molekul-molekul yang terlalu besar akan ditolak, sehingga zeolit dikatakan memiliki sifat *molecular sieve*.

Beberapa jenis zeolit, ukuran diameter ruang hampa dalam kisi-kisinya, serta jenis molekul yang dapat diadsorp untuk ukuran garis tengah ruang hampa tertentu dapat dilihat pada tabel 2.3 dan 2.4



Tabel 2.3 Karakteristik Beberapa Jenis Zeolit (Ellyana, 2007)

Jenis Zeolit	Ukuran Rongga (A)	Si/Al	Kapasitas Tukar Kation(meq/g)
Analcim	2,6	4	4,9
Klinoptilolit	4,0 x 5,5	10	4,9
	3,7 x 4,2	4	
Erionit	3,6 x 5,5	5	2,6
Ferririt	3,6 x 5,2	11	2,4
	3,4 x 4,6		
Modernit	6,7 x 7,0	10	2,6
	2,9 x 5,7		
Filipsit	4,2 x 4,4	4,4	4,7
	4,3 x 4,0		

Tabel 2.4 Hubungan Garis Tengah Ruang Hampa Dalam Zeolit Dengan Beberapa Jenis Molekul Gas (Hakim, 2001)

Garis Tengah Ruang Hampa (A)	Molekul Gas Yang Dapat Melintas
3	H ₂ O, NH ₃ , He
4	H ₂ S, CO ₂ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₆ , C ₂ H ₅ OH, C ₄ H ₆
5	n-parafin, n-olefin, n-C ₂ H ₅ OH
8	Iso-parafi, iso-olefin
10	n-butylamin

Zeolit yang akan digunakan pada penelitian ini ada tiga jenis, yaitu zeolit alam Lampung, zeolit alam Jawa Barat, dan zeolit alam Malang. Zeolit alam Lampung merupakan campuran dari zeolit jenis klinoptilolit (78%), analcim (14%), dan modernit (8%). Komposisi dari zeolit alam Lampung sebagai berikut:

Tabel 2.5 Data Komposisi Zeolit Alam Lampung (Ellyana, 2007)

MGO	AL ₂ O ₃	SIO ₂	K ₂ O	CAO	TIO ₂	MNO	FE ₂ O ₃	CUO
0,75%	11,7%	79,9%	3,4%	2,68%	0,15%	0,03%	1,34%	0,01%



Zeolit alam Jawa Barat merupakan campuran dari zeolit jenis modernit (32,70%) dan klinoptilolit (30,89%). Komposisi dari zeolit alam Jawa Barat sebagai berikut:

Tabel 2. 6 Data Komposisi Zeolit Alam Jawa Barat (<http://www.dim.esdm.go.id>, 2007)

MGO	AL ₂ O ₃	SIO ₂	K ₂ O	CAO	TIO ₂	MNO	FE ₂ O ₃	CUO
0,71%	12,83%	64,55%	2,81%	1,64%	0,22%	0,03%	1,46%	0,01%

Adsorben yang ketiga, zeolit alam Malang, merupakan campuran dari zeolit jenis modernit (34%) dan klinoptilolit (37%).

2.6 KARBONDIOKSIDA

Berikut ini merupakan data-data fisik dari karbondioksida

Tabel 2. 7 Data-data Fisik Karbondioksida
(Handbook of Chemistry and Physics., 48th ed., 1967)

PHYSICAL CONSTANTS		
	U.S. Units	Metric Units
International symbol	CO ₂	CO ₂
Molecular weight	44.01	44.01
Vapor pressure		
at 70 F (21.1 C)	838 psig	5778 kPa, gage
at 32 F (0 C)	491 psig	3385 kPa, gage
at 2 F (-16.7 C)	302 psig	2082 kPa, gage
at -20 F (-28.9 C)	200 psig	1379 kPa, gage
at -69.9 F (-56.6 C)	60.4 psig	416 kPa, gage
at -109.3 F (-78.5 C)	0 psig	0 kPa, gage
Density of the gas		
at 70 F (21.1 C) and 1 atm	0.1144 lb/ft ³	1.833 kg/m ³
at 32 F (0 C) and 1 atm	0.1234 lb/ft ³	1.977 kg/m ³
Specific gravity of the gas		
at 70 F (21.1 C) and 1 atm (air = 1)	1.522	1.522
at 32 F (0 C) and 1 atm (air = 1)	1.524	1.524
Specific volume of the gas		
at 70 F (21.1 C) and 1 atm	8.741 ft ³ /lb	0.5457 m ³ /kg
at 32 F (0 C) and 1 atm	8.104 ft ³ /lb	0.5059 m ³ /kg
Density of liquid, saturated		
at 70 F (21.1 C)	47.6 lb/ft ³	762 kg/m ³
at 32 F (0 C)	58.0 lb/ft ³	929 kg/m ³
at 2 F (-16.7 C)	63.3 lb/ft ³	1014 kg/m ³
at -20 F (-28.9 C)	66.8 lb/ft ³	1070 kg/m ³
at -69.9 F (-56.6 C)	73.5 lb/ft ³	1177 kg/m ³
Sublimation temperature (1 atm)	-109.3 F	-78.5 C
Critical temperature	87.9 F	31.1 C
Critical pressure	1070.6 psia	7382 kPa, abs.



Tabel 2. 8 Data-data Fisik Karbondioksida (Lanjutan)

	U.S. Units	Metric Units
Critical density	29.2 lb/ft ³	468 kg/m ³
Triple point	-69.9 F at 60.4 psig	-56.6 C at 416 kPa, gage
Latent heat of vaporization		
at 32 F (0 C)	100.8 Btu/lb	234.5 kJ/kg
at 2 F (-16.7 C)	119.0 Btu/lb	276.8 kJ/kg
at -20 F (-28.9 C)	129.6 Btu/lb	301.4 kJ/kg
Latent heat of fusion		
at -69.9 F (-56.6 C)	85.6 Btu/lb	199 kJ/kg
Specific heat of gas		
at 77 F (25 C) and 1 atm		
C_p	0.203 Btu/(lb) (F)	0.850 kJ/(kg) (C)
C_v	0.157 Btu/(lb) (F)	0.657 kJ/(kg) (C)
Ratio of specific heats		
at 59 F (15 C)	1.304	1.304
Solubility in water, vol/vol		
at 68 F (20 C)	0.90	0.90
Weight of liquid		
at 2 F (16.7 C)	8.46 lb/gal	1014 kg/m ³
Cylinder pressure at 68 percent filling density (42.5 lb/ft ³ ; 681 kg/m ³)		
at 70 F (21.1 C)	838 psig	5778 kPa, gage
at 100 F (37.8 C)	1450 psig	10,000 kPa, gage
at 130 F (54.4 C)	2250 psig	15,500 kPa, gage
Latent heat of sublimation		
at -109.3 F (-78.5 C)	245.5 Btu/lb	571.0 kJ/kg
Viscosity of saturated liquid		
at 2 F (-16.7 C)	0.287 lb/(ft) (hr)	0.119 (g/(cm) (sec) × 10 ⁻² (centi-poise)

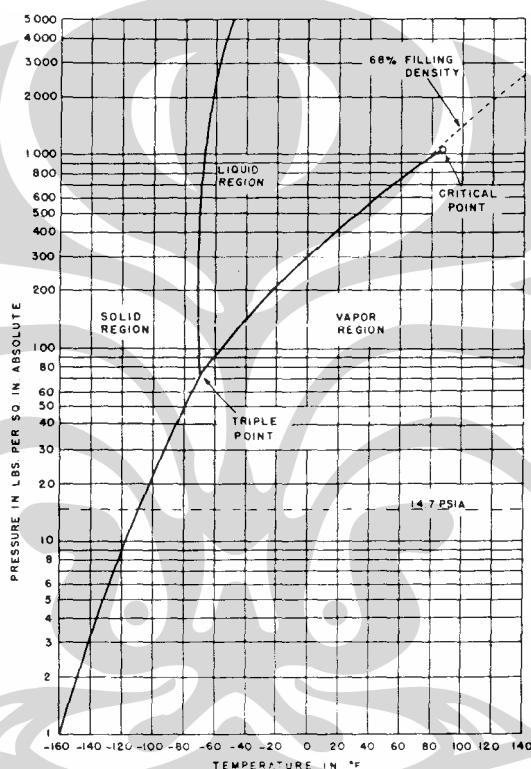
Karbondioksida merupakan persenyawaan antara karbon (27,3 wt%) dengan oksigen (72,7 wt%). Pada kondisi temperatur dan tekanan atmosferik, karbondioksida merupakan gas yang tidak berwarna dan tidak berbau. Karbondioksida juga merupakan gas yang tidak reaktif dan tidak beracun. Gas tersebut tidak mudah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

Pada kondisi *triple point*, karbondioksida dapat berupa padat, cair, ataupun gas. Pada kondisi di bawah *triple point*, karbondioksida dapat berwujud padat ataupun gas, bergantung pada kondisinya. Karbondioksida memadat, pada temperatur -109 F (-78,5 C) dan tekanan atmosferik akan langsung menyublim



tanpa melalui fasa cair terlebih dahulu. Sedangkan pada temperatur dan tekanan di atas *triple point* dan di bawah temperatur 87,9 F (31,1 C), maka karbondioksida cair dan gas akan berada pada kondisi kesetimbangan. Artinya sifat karbondioksida gas akan menyerupai wujud cairnya pada kondisi ini (Handbook of Chemistry and Physics., 48th ed., 1967).

Berikut ini adalah gambar kurva kesetimbangan dari karbondioksida:



Gambar 2.5 Kurva Kesetimbangan Karbondioksida (CO₂)



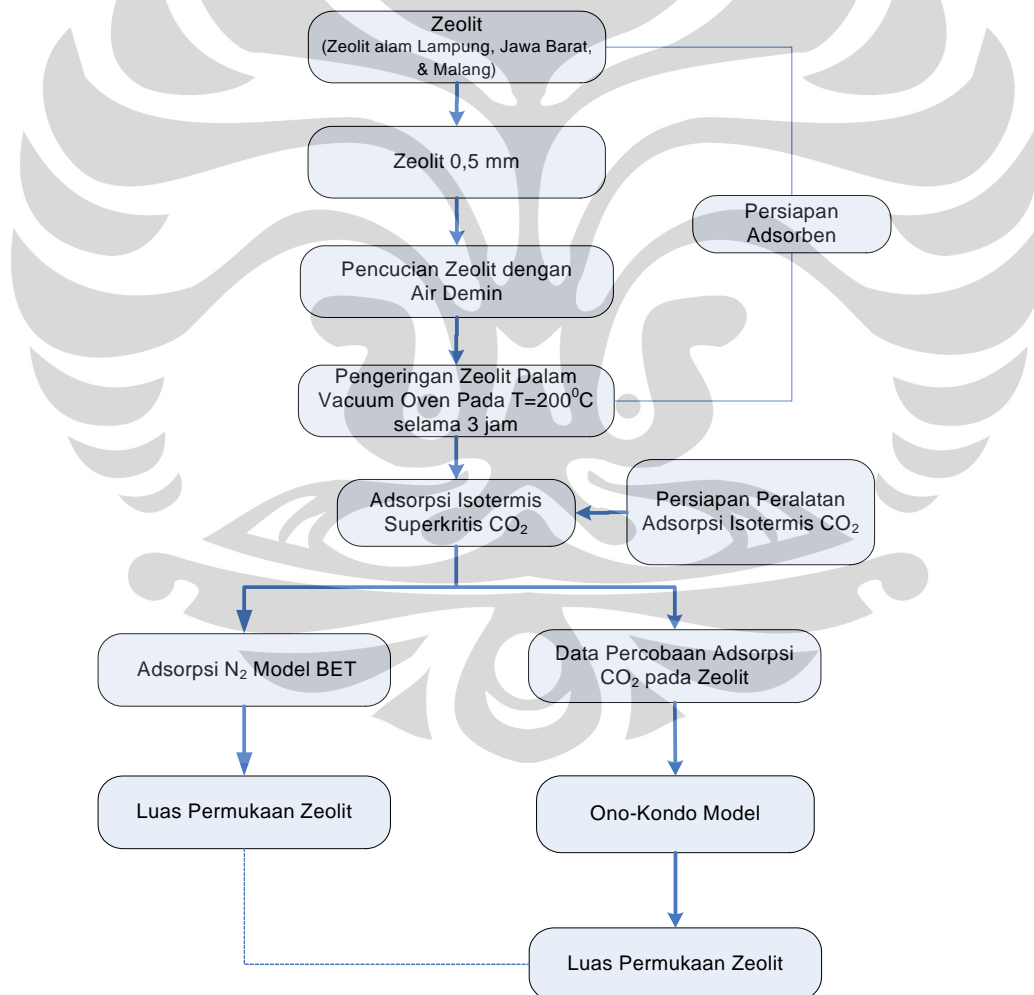
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini akan dibahas diagram alir proses penelitian, peralatan dan bahan yang digunakan, variabel penelitian, dan prosedur penelitian.

3.1 ALUR PENELITIAN

Metodologi dari penelitian ini, secara skematik dapat dilihat pada gambar 2.5 di bawah ini. Untuk langkah-langkah yang lebih jelas dan lebih detail dapat dilihat pada bagian prosedur penelitian.



Gambar 3. 1 Alur Penelitian



3.2 VARIABEL YANG DIAMATI

Adapun variabel yang diamati pada penelitian ini adalah:

Variabel Bebas :

- Jenis Zeolit
- Temperatur adsorpsi isoteremis CO₂

Variabel Terikat :

- Luas permukaan zeolit yang terukur dengan menggunakan model Ono-Kondo

3.3 ALAT DAN BAHAN

Peralatan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Tabung gas N₂
- Tabung gas CO₂
- Tabung gas He
- Autosorb 6B
- Inkubator
- *Reference Cylinder*
- *Sampling Cylinder (Equilibrium Cell)*
- 2 buah pengukur temperatur
- 2 buah pengukur tekanan (*pressure gauges*)
- 4 buah *valve*

Bahan-bahan yang perlu disiapkan dalam penelitian ini adalah:

- Gas N₂
- Gas CO₂
- Gas He
- Zeolit (zeolit alam Lampung, zeolit alam Jawa Barat, zeolit alam Malang)
- Air demin



3.4 PROSEDUR PENELITIAN

Prosedur penelitian yang akan dilakukan terdiri dari beberapa tahap, yaitu: persiapan adsorben dan penentuan luas permukaan dengan model adsorpsi nitrogen BET, persiapan peralatan adsorpsi isotermis CO₂, adsorpsi isotermis CO₂ dan penentuan luas permukaan dengan model Ono-Kondo.

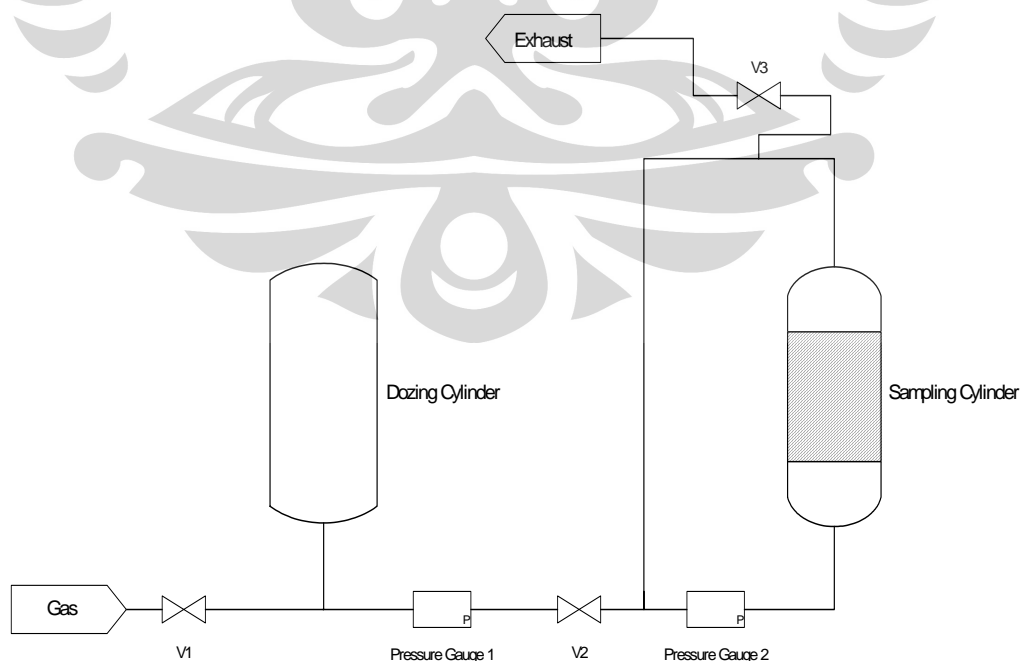
3.4.1 Persiapan Adsorben dan Adsorpsi Model BET

Adsorben yang digunakan pada penelitian ini untuk diuji luas permukaannya adalah zeolit. Sebelum digunakan pada proses adsorpsi adsorben (zeolit) diayak terlebih dahulu untuk memperoleh diameter butir yang diinginkan (0,5mm). Zeolit ini kemudian dicuci dengan menggunakan air distilasi dan dikeringkan dengan menggunakan *oven* selama 3 jam pada suhu 200°C untuk menghilangkan kadar airnya.

Penentuan luas permukaan zeolit dengan adsorpsi nitrogen model BET menggunakan Asap 2400 Micromeritics.

3.4.2 Persiapan Peralatan Adsorpsi Isotermis Superkritis CO₂

Peralatan yang akan digunakan untuk adsorpsi isotermis superkritis CO₂ dipersiapkan seperti pada gambar berikut:



Gambar 3. 2 Skema Alat



3.4.3 Adsorpsi Isotermis Superkritis CO₂

Prosedur penelitiannya adalah sebagai berikut: (Goodman et al. 2004)

1. Kalibrasi volume *Dozing Cylinder*

- Mengisi *dozing cylinder* serta pipa-pipa dengan air sampai penuh.
- Air tersebut kemudian dimasukkan ke dalam gelas ukur untuk mengetahui volumenya. Volume ini adalah volume *dozing cylinder* beserta pipa-pipa.

2. Kalibrasi volume void *Sampling Cylinder*

Pada *sampling cylinder* terdapat zeolit sebagai adsorben dengan massa zeolit alam Lampung 87,62 gram, zeolit alam Jawa Barat 105 gram dan zeolit alam Malang 85 gram. *Volume void* dari *Sampling Cylinder (Equilibrium Cell)* adalah volume total dari ruang kosong yang terdapat pada *Sampling Cylinder*.

$$V_{\text{void}} = V_{\text{SC}} - V_{\text{ruang yang terisi material}} + V_{\text{pori-pori material}} \quad (3.1)$$

Prosedur pencarian volume void *Sampling Cylinder* adalah sebagai berikut:

- Mengatur temperatur yang diinginkan.
- Mengisi *dozing cylinder* dengan gas He dengan cara membuka valve V-1 dan mengalirkan gas He ke dalam alat tersebut. Sementara itu, valve V-2 dalam keadaan tertutup. Valve V-1 ditutup ketika pada tekanan tertentu di *dozing cylinder*. Setelah itu, mencatat tekanan *dozing cylinder* awal (P_{di}) serta tekanan awal *sampling cylinder* (P_{si}). Dengan data ini, maka kita bisa mengetahui jumlah mol He yang terdapat pada *dozing cylinder* menurut persamaan berikut ini:

$$n = \frac{P_{di} V_{\text{dozing cylinder}}}{Z_{He,di} RT} \quad (3.2)$$

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

- Membuka valve V-2 dan mengalirkan gas He tersebut ke dalam *Sampling Cylinder*. Kemudian mencatat tekanan (P_{df}) dari *Dozing Cylinder*. Dengan data ini, maka kita akan dapat mengetahui jumlah mol (n_i) dari gas He yang dimasukkan ke *Sampling Cylinder* dengan persamaan:

$$n_i = \left(\frac{P_{di}}{Z_{He,di} RT} - \frac{P_{df}}{Z_{He,df} RT} \right) V_{\text{dozing cylinder}} \quad (3.3)$$



- d. Menunggu 15 menit setelah itu mencatat tekanan akhir *Sampling Cylinder* (P_{sf}). Mencari volume void dari *Sampling Cylinder* dengan persamaan:

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

- e. Mengeluarkan gas He dari *Sampling Cylinder* dengan membuka valve V-3.
f. Langkah a sampai e dilakukan 5 kali. Setelah 5 kali *running*, hasil volume void yang didapatkan dari setiap *running* dirata-ratakan.

3. Adsorpsi Gas CO₂

- a. Mengisi *dozing cylinder* dengan gas CO₂ dengan membuka valve V-1 dan mengalirkannya ke *dozing cylinder*. Setelah terisi, valve V-1 ditutup dan mencatat tekanan awal *dozing cylinder* (P_{di}) dan *sampling cylinder* (P_{si}).
b. Mengalirkan gas CO₂ ke *Sampling Cylinder* dengan membuka valve V-2. Ketika gas CO₂ telah masuk ke dalam *Sampling Cylinder*, menutup valve V-2 serta mencatat tekanan akhir *dozing cylinder* (P_{df}).
c. Menunggu selama 1 jam, kemudian mencatat tekanan akhir dari *sampling cylinder* (P_{sf}).
d. Mencari jumlah mol zat yang teradsorp dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$n_{CO_2 \text{ teradsorp}} = n_{CO_2 i} - n_{CO_2 \text{ tidak teradsorp}}$$

$$n_{CO_2 \text{ teradsorp}} = \left[\left(\frac{P_{di}}{Z_{CO_2,di} RT} - \frac{P_{df}}{Z_{CO_2,df} RT} \right) V_{dozing \ cylinder} \right] - \left[\frac{P_{sf} V_{void}}{Z_{CO_2,sf} RT} \right] \quad (3.5)$$

- e. Prosedur a sampai d dilakukan untuk tekanan akhir *sampling cylinder* (P_{sf}) sekitar 100 psi, 200 psi, 300 psi, 400 psi, 500 psi, dan 700 psi.
4. Prosedur 2 sampai 3 dilakukan untuk 2 variasi temperatur (30 °C & 40 °C).
5. Prosedur 2 sampai 4 dilakukan untuk ketiga jenis zeolit alam.



3.4.4 Penentuan Luas Permukaan Dengan Model Adsorpsi Ono-Kondo

Prosedur penentuan luas permukaan dari data adsorpsi yang diperoleh adalah sebagai berikut:

1. Menentukan jumlah mol CO_2 yang teradsorpsi dari data tekanan selama percobaan
2. Setelah semua data jumlah mol CO_2 yang teradsorpsi untuk semua variasi tekanan didapatkan, kemudian membuat grafik hubungan antara tekanan adsorpsi dengan jumlah mol CO_2 yang teradsorpsi pada berbagai temperatur untuk mengetahui kondisi tekanan adsorpsi yang optimal
3. Menentukan parameter-parameter yang digunakan dalam penentuan luas permukaan zeolit
4. Melakukan perhitungan untuk menentukan luas permukaan dari zeolit dengan model Ono-Kondo yang telah dijelaskan pada Bab II Tinjauan Pustaka.
5. Membuat grafik hubungan antara temperatur adsorpsi dengan luas permukaan zeolit terhitung pada masing-masing jenis zeolit untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur terhadap luas permukaan terhitung.



3.5 ANALISA

Pada penelitian ini akan dianalisa luas permukaan zeolit dengan menggunakan model adsorpsi Ono-Kondo dan parameter-parameter yang mempengaruhi, pengaruh variasi temperatur terhadap luas permukaan terukur dengan menggunakan model adsorpsi Ono-Kondo. Setelah itu akan dibandingkan dengan hasil pengukuran dengan model adsorpsi nitrogen BET.

3.6 LOKASI PENELITIAN

Penelitian mengenai Penentuan Luas Permukaan Zeolit Menggunakan Metode Adsorpsi Isotermis Superkritis CO₂ Dengan Model Ono-Kondo akan dilakukan Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok.





BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 HASIL PERSIAPAN ADSORBEN & ADSORPSI MODEL BET

Preparasi adsorben ini dilakukan untuk mengaktivasi ketiga zeolit alam agar siap digunakan sebagai adsorben. Proses preparasi yang dilakukan merupakan proses fisika dimana tidak adanya penggunaan bahan kimia ataupun suatu reaksi kimia yang dialami oleh ketiga zeolit. Proses preparasi ini terdiri dari proses penghalusan, pencucian, dan pemanasan. Ketiga jenis zeolit alam, yaitu zeolit alam Lampung, zeolit alam Jawa Barat, dan zeolit alam Malang diberikan perlakuan yang sama dalam proses preparasi. Secara penglihatan, ketiga jenis zeolit tersebut dapat dibedakan dari warnanya. Zeolit alam lampung berwarna putih keabu-abuan, zeolit alam Jawa Barat berwarna putih kehijauan, dan zeolit alam Malang berwarna hijau

Proses preparasi pertama yaitu penghalusan. Ketiga jenis zeolit alam yang awalnya berbentuk kerikil-kerikil kasar dihaluskan dengan mortar dan kemudian disaring pada ukuran 0,5 mm. Hal ini bertujuan untuk memperoleh zeolit dengan ukuran yang lebih kecil sehingga mempermudah proses adsorpsi. Gambar 4. 1 sampai Gambar 4. 3 menunjukkan ketiga jenis zeolit yang belum dihaluskan.



Gambar 4. 1 Zeolit Alam Lampung



Gambar 4. 2 Zeolit Alam Jawa Barat



Gambar 4. 3 Zeolit Alam Malang

Proses preparasi kemudian dilanjutkan dengan pencucian zeolit 0,5 mm dengan menggunakan air demin atau air yang telah dihilangkan kandungan mineral dan ion-ionnya. Dalam proses pencucian ini dilakukan 2-3 kali pembilasan hingga air tidak lagi terlalu keruh. Pencucian ini bertujuan untuk membersihkan material zeolit dari pengotor seperti debu atau partikel-partikel pengotor lainnya yang berukuran mikro. Partikel-partikel tersebut akan larut dalam air dan ikut terbuang. Penggunaan air demin itu sendiri bertujuan untuk menghindari adanya mineral atau ion yang dapat masuk ke dalam pori-pori zeolit. Keberadaan mineral dan ion-ion ini dapat mempengaruhi proses adsorpsi dan pada akhirnya mempengaruhi luas permukaan terukur.

Proses preparasi terakhir adalah pemanasan. Proses pemanasan ini dilakukan dengan menggunakan oven pada temperatur 200 °C selama 3 jam. Pemanasan ini bertujuan untuk menguapkan molekul-molekul air yang terkandung dalam zeolit terutama setelah proses pencucian. Molekul-molekul air ini akan terlepas dari pori-pori zeolit pada temperatur 200 °C. (Chumaidi, 2007). Molekul-molekul air ini akan sangat mengganggu proses adsorpsi CO₂ karena molekul-molekul air ini dapat teradsorpsi ke dalam pori-pori zeolit. Hal ini dikarenakan zeolit memiliki kemampuan yang cukup baik untuk digunakan sebagai adsorben air (Campbell, 1976).

Setelah proses preparasi ini, zeolit kemudian diukur luas permukaannya dengan metode adsorpsi gas nitrogen menggunakan model BET. Metode adsorpsi model BET ini beroperasi pada tekanan vakum dan temperatur 77 K. Dari hasil adsorpsi model BET ini diperoleh luas permukaan zeolit alam Malang lebih



besar dibandingkan dengan zeolit alam Lampung dan Jawa Barat. Tabel 4. 1 menunjukkan data luas permukaan ketiga sampel zeolit alam dengan metode pengukuran menggunakan adsorpsi gas nitrogen dengan model BET.

Tabel 4. 1 Luas Permukaan Dengan Menggunakan Adsorpsi N₂
Model BET

Jenis Zeolit	Luas Permukaan (m ² /g)
Zeolit alam Lampung	83,11
Zeolit alam Jawa Barat	92,90
Zeolit alam Malang	131,14

4.2 HASIL PERSIAPAN PERALATAN ADSORPSI ISOTERMIS SUPERKRITIS CO₂

Peralatan yang digunakan untuk proses adsorpsi isoteremis superkritis ini terdiri dari satu buah *dozing cylinder*, *sampling cylinder*, tiga buah valve, pipa-pipa penghubung kedua silinder dan dua buah *pressure indicator* atau *pressure gauge* yang digunakan untuk mengukur tekanan pada kedua silinder. Pada peralatan ini juga terdapat dua buah alat pengontrol temperatur yang dipasang di bagian samping dan tengah dari inkubator. Pengontrol temperatur yang dipasang pada bagian samping dipasang termokopel yang akan mengatur nyala lampu pemanas hingga mencapai temperatur yang diinginkan.

Alat-alat tersebut disusun seperti pada Gambar 4. 4. Setelah terpasang, kemudian dicek kebocorannya supaya bila terjadi kebocoran bisa langsung diatasi. Kebocoran selain berpengaruh terhadap proses adsorpsi, juga bisa membahayakan lingkungan serta peneliti dan orang yang ada di laboratorium. Uji kebocoran dilakukan pada tekanan sekitar 900 psi. Hal ini dilakukan untuk menghindari adanya kebocoran yang sangat kecil yang tidak dapat terdeteksi jika dilakukan uji pada tekanan yang lebih rendah.



Gambar 4.4 Peralatan Adsorpsi Isotermis Superkritis CO₂

4.3 HASIL KALIBRASI VOLUME DOZING CYLINDER

Volume *dozing cylinder* diukur dengan menggunakan air yang dimasukkan ke dalam *dozing cylinder* sampai penuh. Setelah penuh, air dari *dozing cylinder* kemudian dipindahkan ke dalam gelas ukur untuk mengetahui volume air yang masuk ke *dozing cylinder*.

Volume *dozing cylinder* yang didapat adalah 486 mL. Volume tersebut belum termasuk volume pipa-pipa yang ada dalam 1 set alat adsorpsi ini. Adapun volume total dari pipa-pipa tersebut adalah 0,73 mL (Atmayudha, 2007). Jika dijumlahkan antara volume *dozing cylinder* dengan volume pipa-pipa tersebut, maka didapat volume 486,73 mL.

4.4 HASIL KALIBRASI VOLUME VOID PADA SAMPLING CYLINDER

Untuk mengetahui *void volume*, dilakukan 5 kali *running* agar data *void volume* yang didapat lebih akurat. Kalibrasi *volume void* ini dilakukan pada 2 temperatur yang akan digunakan dalam adsorpsi isotermis superkritis CO₂ yaitu 30 °C dan 40 °C. Pengukuran *void volume* dengan menggunakan gas Helium ini dapat dihitung dengan persamaan 4.1.



$$V_{void} = \frac{n_i Z_{He, sf} RT}{P_{sf}} \quad (4.1)$$

Dimana

$$n_i = \left(\frac{P_{di}}{Z_{He, di} RT} - \frac{P_{df}}{Z_{He, df} RT} \right) V_{dozing\ cylinder} \quad (4.2)$$

- dimana
- n_i = jumlah mol He yang diinjeksikan ke *sampling cylinder*
 - P_{di} = tekanan *dozing cylinder* awal
 - P_{df} = tekanan *dozing cylinder* akhir
 - T = temperatur
 - $Z_{He, di}$ = faktor kompresibilitas pada kondisi P_{di} dan T
 - $Z_{He, df}$ = faktor kompresibilitas pada kondisi P_{df} dan T

Sampel zeolit alam Lampung yang dimasukkan ke dalam *sampling cylinder* memiliki massa 87,62 gram. Tabel 4.2 berikut ini menunjukkan data hasil *running* untuk menentukan *void volume* pada sampel zeolit alam Lampung:

Tabel 4.2 Hasil kalibrasi *Volume Void* Zeolit Alam Lampung

P Dozing Awal (psia)	P Dozing Akhir (psia)	P Sampling Awal (psia)	P Sampling Akhir (psia)	Void Volume (ml)
560,3	489,14	14,7	358,03	94,60
607,75	520,16	14,7	441,69	94,41
733,8	607,75	14,7	631,47	94,96
584,0	510,01	14,7	370,53	94,97
524,86	441,69	14,7	417,97	94,51
Rata-rata				94,69

Sampel zeolit alam Jawa Barat yang dimasukkan ke dalam *sampling cylinder* memiliki massa 105 gram. Tabel 4.3 berikut ini menunjukkan data hasil *running* untuk menentukan *void volume* pada sampel zeolit alam Jawa Barat:

Tabel 4. 3 Hasil Kalibrasi *Volume Void* Zeolit Alam Jawa Barat

P Dozing Awal (psia)	P Dozing Akhir (psia)	P Sampling Awal (psia)	P Sampling Akhir (psia)	Void Volume (ml)
465,41	404,10	14,70	370,53	79,24
536,58	463,41	14,70	441,69	79,18
631,47	550,08	14,70	489,14	79,20
726,36	628,87	14,70	584,02	79,26
844,97	738,46	14,70	631,47	79,23
Rata-Rata				79,22

Sampel zeolit alam Malang yang dimasukkan ke dalam *sampling cylinder* memiliki massa 85 gram. Tabel 4.4 berikut ini menunjukkan data hasil *running* untuk menentukan *void volume* pada sampel zeolit alam Malang:

Tabel 4. 4 Hasil Kalibrasi *Volume Void* Zeolit Alam Malang

P Dozing Awal (psia)	P Dozing Akhir (psia)	P Sampling Awal (psia)	P Sampling Akhir (psia)	Void Volume (ml)
157,03	144,01	14,70	133,31	47,27
251,92	229,69	133,31	228,19	47,02
394,25	362,53	228,19	323,08	47,12
473,61	431,64	323,08	426,69	47,14
615,70	560,30	441,69	554,02	47,46
Rata-Rata				47,20

Volume void dari ketiga jenis zeolit yang diperoleh untuk setiap kali *running* tidak jauh berbeda atau penyimpangannya kecil. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kalibrasi *volume void* untuk ketiga jenis zeolit sudah cukup akurat.



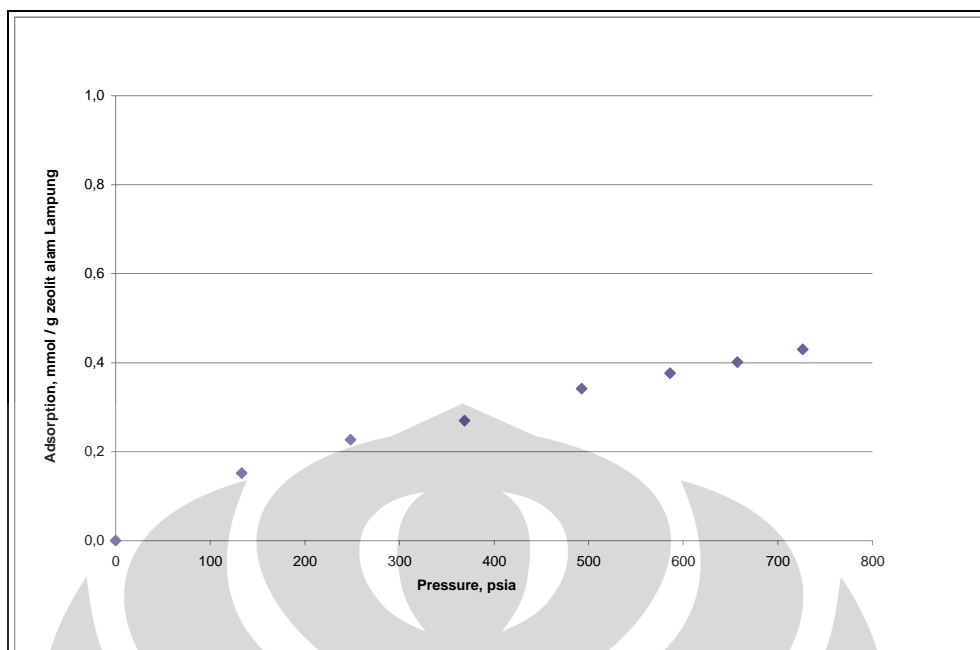
4.5 HASIL ADSORPSI ISOTERMIS SUPERKRITIS CO₂

Adsorpsi yang terjadi adalah adsorpsi fisik dimana tidak terjadi reaksi kimia selama adsorpsi berlangsung. Sehingga proses adsorpsi hanya bergantung kepada sifat fisik adsorbat (CO₂) dan karakteristik adsorben (ketiga jenis zeolit).

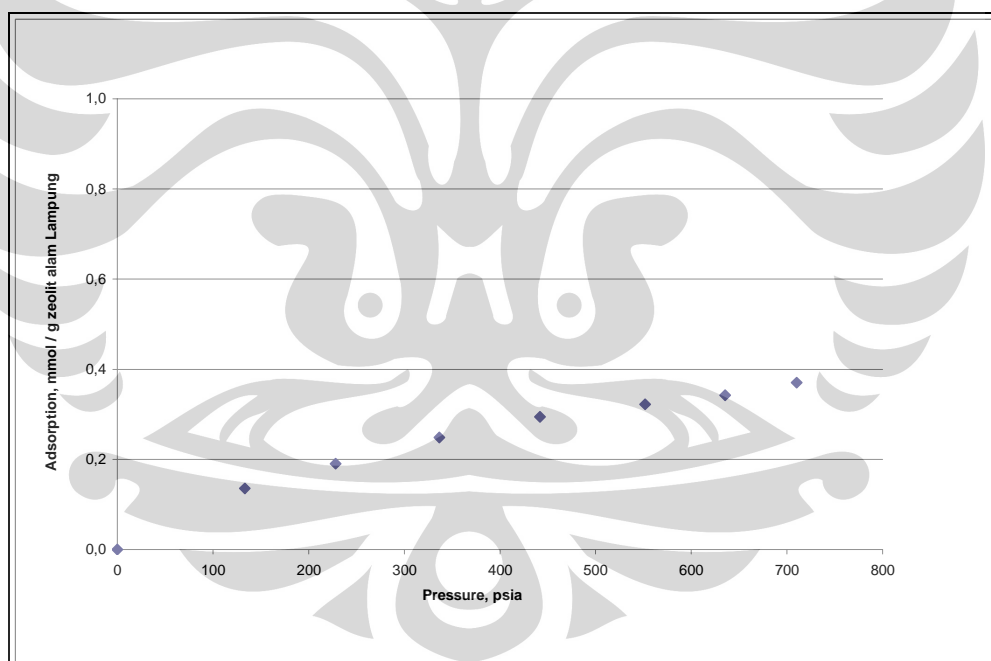
Pada penelitian ini, adsorpsi dilakukan untuk dua isotermis yaitu pada temperatur 30 °C dan 40 °C. Untuk setiap isoterm, adsorpsi dilakukan untuk beberapa tekanan yaitu pada tekanan 100 sampai 700 psi. Pada setiap tekanan ini diambil data tekanan awal dan tekanan akhir pada *dozing cylinder* dan tekanan akhir pada *sampling cylinder*. Dari data tekanan awal dan tekanan akhir *dozing cylinder* diperoleh jumlah mol CO₂ yang dimasukkan ke dalam *sampling cylinder*. Sedangkan dari tekanan akhir *sampling cylinder* dapat diperoleh jumlah mol CO₂ yang teradsorpsi dengan menggunakan persamaan 3. 5. Tekanan yang dicatat adalah tekanan yang tepat berubah ketika valve ditutup. Hal ini untuk meminimalisir kesalahan dalam pengambilan data tekanan.

Data adsorpsi diambil pada beberapa tekanan dengan tujuan untuk memperoleh data jumlah mol CO₂ yang teradsorpsi seiring dengan meningkatnya tekanan. Data hasil penelitian adsorpsi untuk masing-masing sampel zeolit pada temperatur 30 °C dan 40 °C dapat dilihat pada Lampiran.

Gambar 4. 5 dan Gambar 4. 6 menunjukkan data jumlah CO₂ yang teradsorpsi dengan menggunakan sampel zeolit alam Lampung pada temperatur 30 °C dan 40 °C pada berbagai tekanan tertentu. Dari adsorpsi yang diperoleh terlihat bahwa pada tekanan tertentu, jumlah mol CO₂ yang teradsorpsi oleh zeolit alam Lampung pada temperatur 30 °C lebih besar dibandingkan dengan adsorpsi pada temperatur 40 °C. Hal ini dikarenakan, pada temperatur di atas *triple point*-nya CO₂ akan memiliki sifat fluida gas yang cenderung lebih sulit teradsorpsi karena gerakan molekul gas lebih besar dari sifat fluida cairnya.

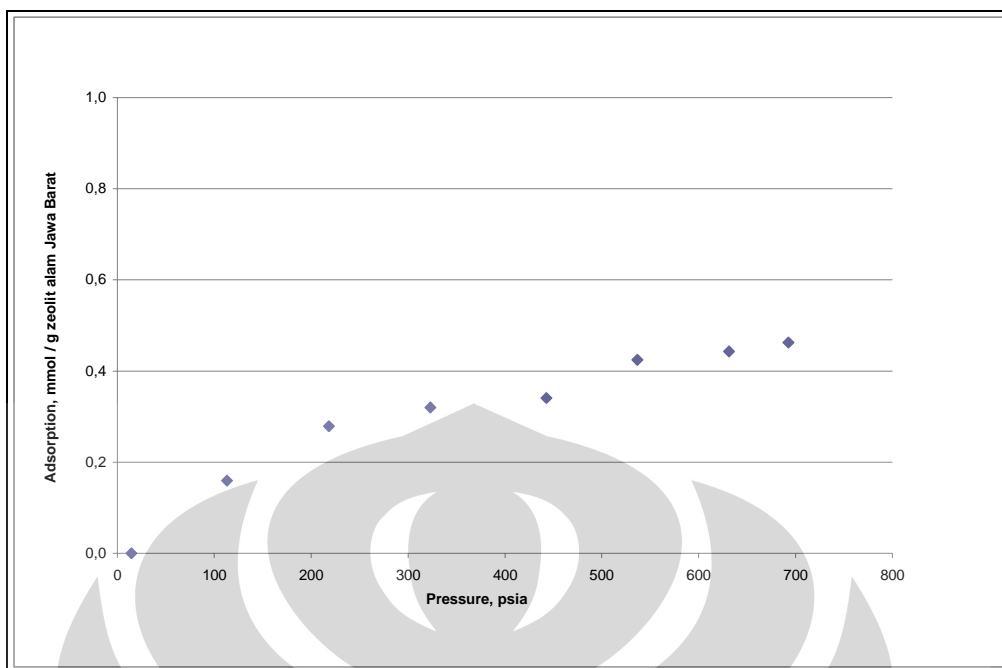


Gambar 4. 5 Adsorpsi Gibbs CO₂ Pada Zeolit Alam Lampung Pada T=30 °C

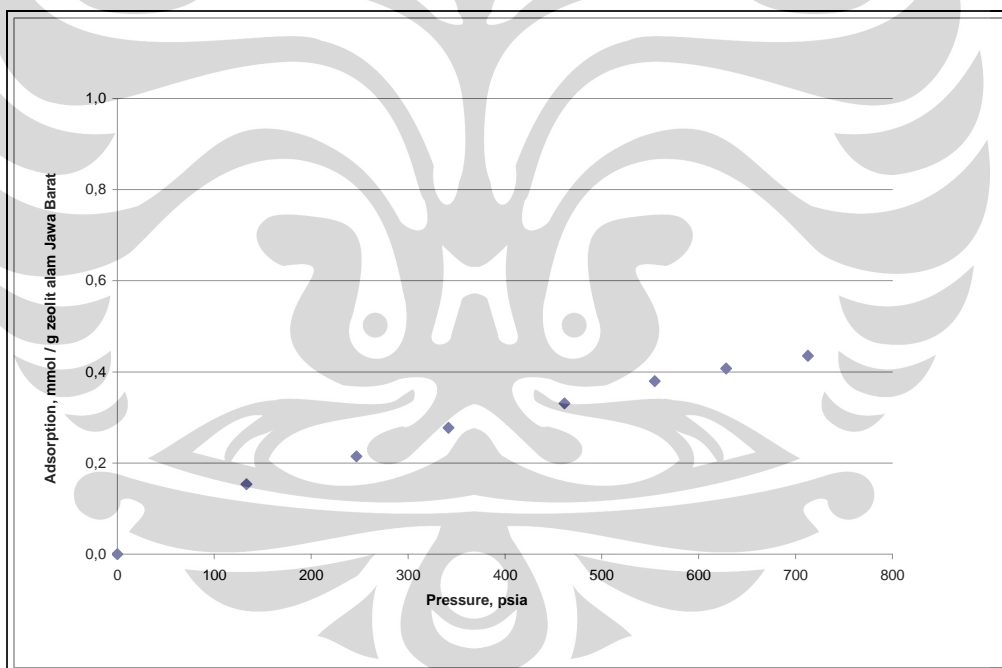


Gambar 4. 6 Adsorpsi Gibbs CO₂ Pada Zeolit Alam Lampung Pada T=40 °C

Gambar 4. 7 dan Gambar 4. 8 menunjukkan data jumlah CO₂ yang teradsorpsi dengan menggunakan sampel zeolit alam Jawa Barat pada temperatur 30 °C dan 40 °C pada berbagai tekanan tertentu. Sama halnya pada zeolit alam Lampung, pada zeolit alam Jawa Barat ini jumlah mol CO₂ yang teradsorpsi pada temperatur 30 °C lebih besar dibandingkan adsorpsi pada temperatur 40 °C.

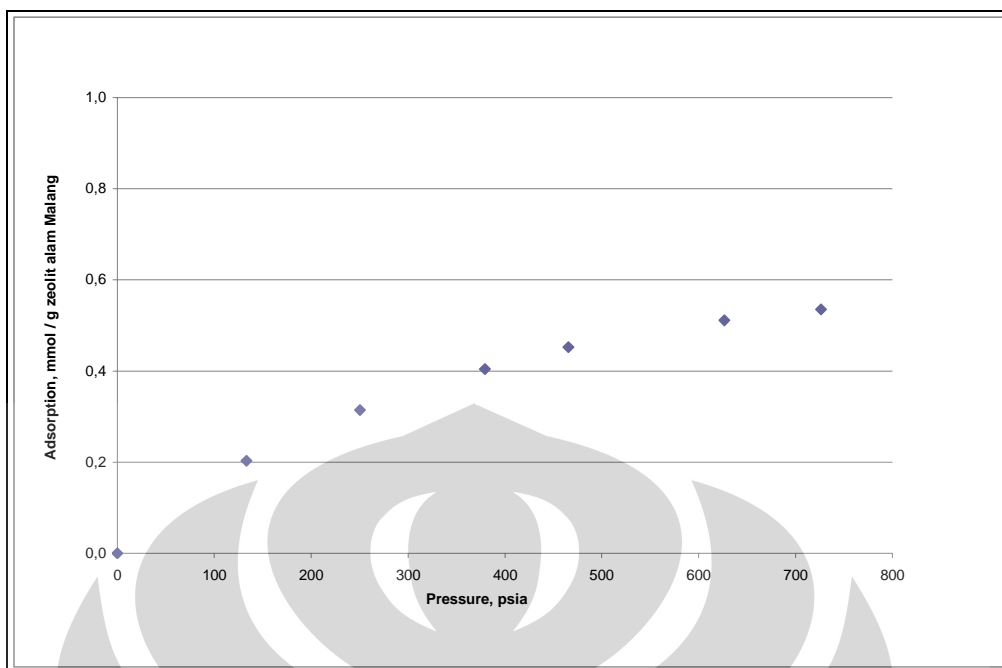


Gambar 4. 7 Adsorpsi Gibbs CO₂ Pada Zeolit Alam Jawa Barat Pada T=30 °C

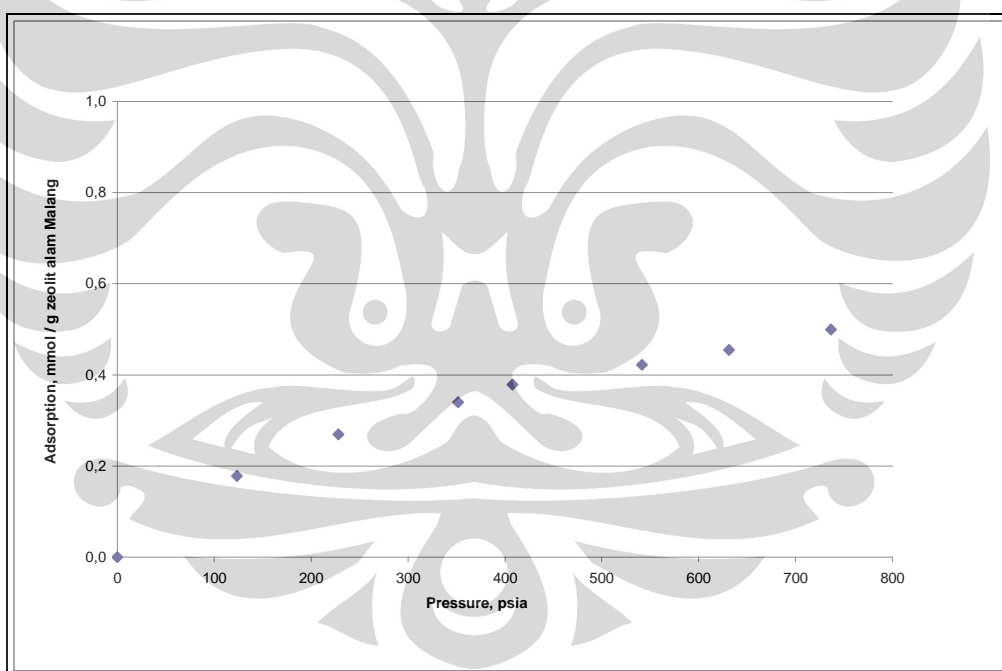


Gambar 4. 8 Adsorpsi Gibbs CO₂ Pada Zeolit Alam Jawa Barat Pada T=40 °C

Gambar 4. 9 dan Gambar 4. 10 menunjukkan data jumlah CO₂ yang teradsorpsi dengan menggunakan sampel zeolit alam Malang pada temperatur 30 °C dan 40 °C pada berbagai tekanan tertentu. Adsorpsi yang ditunjukkan pada zeolit alam Malang ini juga serupa dengan adsorpsi pada zeolit alam Lampung dan Jawa Barat. Pada tekanan tertentu jumlah mol CO₂ yang teradsorpsi pada temperatur 30 °C juga lebih besar dibandingkan dengan adsorpsi pada temperatur 40 °C.



Gambar 4. 9 Adsorpsi Gibbs CO₂ Pada Zeolit Alam Malang Pada T=30 °C



Gambar 4. 10 Adsorpsi Gibbs CO₂ Pada Zeolit Alam Malang Pada T=40 °C

Data adsorpsi yang ditunjukkan oleh Gambar 4. 5 sampai Gambar 4. 10 tersebut merupakan data adsorpsi Gibbs. Dari persamaan 2.11 dapat diketahui bahwa adsorpsi Gibbs merupakan hasil kali selisih fraksi gas teradsorpsi dan fraksi gas yang diwakili dengan densitasnya dengan kapasitas adsorpsi. Kedua densitas ini merupakan fungsi tekanan dimana kenaikan tekanan akan



meningkatkan densitas. Namun, ketika adsorpsi maksimum tercapai, densitas teradsorp menjadi tetap sehingga fraksinya tetap. Dengan peningkatan fraksi gas dan konstannya nilai fraksi teradsorp maka selisih dari kedua fraksi tersebut akan makin kecil. Hal inilah yang menyebabkan jumlah mol CO₂ yang teradsorp pada perhitungan adsorpsi Gibbs akan semakin kecil hingga mencapai titik maksimum dari jumlah mol CO₂ yang teradsorp oleh zeolit. Dimana setelah titik maksimum tersebut akan terjadi penurunan dari jumlah mol CO₂ yang teradsorp oleh zeolit.

Pada data adsorpsi dari ketiga jenis zeolit belum terlihat titik maksimum tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah mol CO₂ yang teradsorpsi masih dapat meningkat dengan meningkatnya tekanan. Hal ini dikarenakan keterbatasan tekanan tabung CO₂ yang tersedia yang hanya mampu mencapai tekanan 800 psi. Sehingga proses adsorpsi pada penelitian ini tidak dapat dilakukan pada tekanan yang lebih tinggi dari tekanan 800 psi.

Berdasarkan komposisi utama dari zeolit penyusun ketiga jenis zeolit, seharusnya zeolit alam Malang yang memiliki jumlah mol CO₂ teradsorpsi yang paling besar. Sebagaimana telah dijelaskan pada Tinjauan Pustaka, zeolit alam Malang memiliki kandungan zeolit tipe modernit yang paling besar dibandingkan dengan zeolit alam Lampung dan Jawa Barat. Dimana zeolit tipe modernit ini memiliki ukuran rongga rata-rata dan rasio Si/Al yang lebih besar dibandingkan dengan zeolit tipe klinoptilolit. Ukuran rongga rata-rata zeolit tipe modernit adalah $6,7 \times 7,0 \text{ \AA}$. Dari data hasil adsorpsi dapat dilihat bahwa pada tekanan yang sama, jumlah mol CO₂ yang teradsorpsi pada zeolit alam Malang lebih besar jika dibandingkan dengan jumlah mol CO₂ yang teradsorpsi pada zeolit alam Lampung dan Jawa Barat. Namun perbedaan ini tidak terlalu signifikan, hal ini dikarenakan perbedaan ukuran rongga antara zeolit tipe modernit dengan tipe klinoptilolit tidak jauh berbeda dan diameter dari CO₂ adalah $3,94 \text{ \AA}$. Sehingga pori-pori dari kedua tipe zeolit, baik zeolit tipe modernit maupun klinoptilolit hanya dapat terisi oleh 1 lapisan molekul CO₂. Hal yang mempengaruhi perbedaan adsorpsi ini hanya kecenderungan molekul CO₂ yang lebih mudah masuk ke dalam pori-pori zeolit tipe modernit.



4.6 LUAS PERMUKAAN ZEOLIT MENGGUNAKAN METODE ADSORPSI ISOTERMIS SUPERKRITIS CO₂ DENGAN MODEL ONO-KONDO

4.6.1 Parameter-parameter Yang Mempengaruhi Luas Permukaan Zeolit

Pada penentuan luas permukaan dari ketiga jenis zeolit alam ini diperlukan adanya suatu parameter-parameter yang akan digunakan dalam perhitungan. Parameter-parameter tersebut diantaranya kapasitas adsorpsi maksimum adsorben (C_i), energi interaksi intern molekul CO₂ (ϵ_{ij}/k), energi interaksi antar molekul CO₂ dan inti aktif dari adsorben (ϵ_{is}/k), dan densitas teradsorp pada kapasitas maksimum (ρ_{mc}). Parameter-parameter ini bergantung pada jenis adsorben dan temperatur. Tabel 4.5 dan 4.6 menunjukkan hasil perhitungan untuk setiap jenis zeolit diperoleh parameter-parameter tersebut pada kedua temperatur.

Tabel 4.5 Parameter-parameter Dalam Menentukan Luas Permukaan Untuk T = 30°C

Jenis Zeolit	C_i	ϵ_{ij}/k	ϵ_{is}/k	ρ_{mc}
Zeolit alam Lampung	0,4584	84,3264	-1117,6590	50
Zeolit alam Jawa Barat	0,5087	84,3264	-1150,0616	50
Zeolit alam Malang	0,5687	84,3264	-1172,2106	50

Tabel 4.6 Parameter-parameter Dalam Menentukan Luas Permukaan Untuk T = 40°C

Jenis Zeolit	C_i	ϵ_{ij}/k	ϵ_{is}/k	ρ_{mc}
Zeolit alam Lampung	0,4416	84,3264	-1117,6590	50
Zeolit alam Jawa Barat	0,4866	84,3264	-1150,0616	50
Zeolit alam Malang	0,5448	84,3264	-1172,2106	50

Pada parameter kapasitas adsorpsi maksimum (C_i) dapat dilihat bahwa, kapasitas maksimum untuk semua jenis zeolit pada temperatur 30 °C lebih besar dibandingkan dengan kapasitas maksimum pada temperatur 40 °C. Hal ini dikarenakan nilai C_i bergantung pada karakteristik adsorbat. Pada proses adsorpsi fisika, adsorbat akan memiliki kecenderungan untuk teradsorp pada temperatur



yang lebih rendah. Pada temperatur rendah terutama temperatur yang mendekati *normal boiling point* atau *triple point* untuk CO₂, adsorbat akan bersifat sebagai cairannya sehingga lebih mudah untuk teradsorpsi. Namun pada temperatur yang lebih tinggi adsorbat akan bersifat sebagai gas yang memiliki ikatan yang lebih renggang dan cenderung sulit teradsorpsi. Hal inilah yang mengakibatkan nilai parameter ini semakin kecil dengan meningkatnya temperatur.

Parameter berikutnya adalah parameter energi interaksi intern molekul CO₂ (ϵ_{ii}/k) dan energi interaksi antar molekul CO₂ dan inti aktif dari adsorben (ϵ_{is}/k). Kedua parameter ini tidak terpengaruhi oleh perubahan temperatur. Energi interaksi intern molekul CO₂ (ϵ_{ii}/k) hanya bergantung pada jenis adsorbat. Sehingga untuk ketiga jenis zeolit dan untuk setiap temperatur nilainya tidak berubah. Sedangkan parameter energi interaksi antar molekul CO₂ dan inti aktif dari adsorben (ϵ_{is}/k) dipengaruhi oleh jenis adsorbat dan permukaan dari adsorben. Sehingga nilainya berbeda untuk setiap jenis zeolit dan tidak berubah dengan berubahnya temperatur. Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa nilai ϵ_{is} dari zeolit alam Malang lebih besar. Hal ini mengindikasikan daya tarik permukaan untuk menangkap gas CO₂ yang cenderung lebih besar pada zeolit alam Malang.

Parameter yang terakhir adalah densitas teradsorpsi pada kapasitas adsorpsi maksimum (ρ_{mc}). Pada ketiga jenis zeolit, parameter ini nilainya sama dan tidak berubah dengan berubahnya temperatur. Hal ini dikarenakan parameter ini hanya bergantung pada jenis adsorbat dan kemampuan maksimumnya untuk menempati semua sel *Lattice* yang ada.

4.6.2 Luas Permukaan Zeolit

Dari data adsorpsi yang diperoleh dari percobaan, dibuat suatu model adsorpsi Ono-Kondo untuk menentukan luas permukaan dari setiap zeolit. Model ini dibuat dengan menentukan jumlah mol adsorpsi Gibbs dari model adsorpsi Ono-Kondo.

Gambar 4. 11 sampai Gambar 4. 13 menunjukkan kurva model adsorpsi Ono-Kondo yang merepresentasikan data adsorpsi hasil percobaan untuk setiap jenis zeolit pada temperatur 30 °C. Dari gambar-gambar tersebut terlihat bahwa kurva adsorpsi model Ono-Kondo dapat merepresentasikan data adsorpsi hasil



percobaan dengan baik. Hampir semua data adsorpsi model Ono-kondo pada tekanan tertentu yang ditunjukkan oleh garis pada kurva sama atau mendekati data adsorpsi hasil percobaan yang ditunjukkan oleh titik-titik pada kurva.

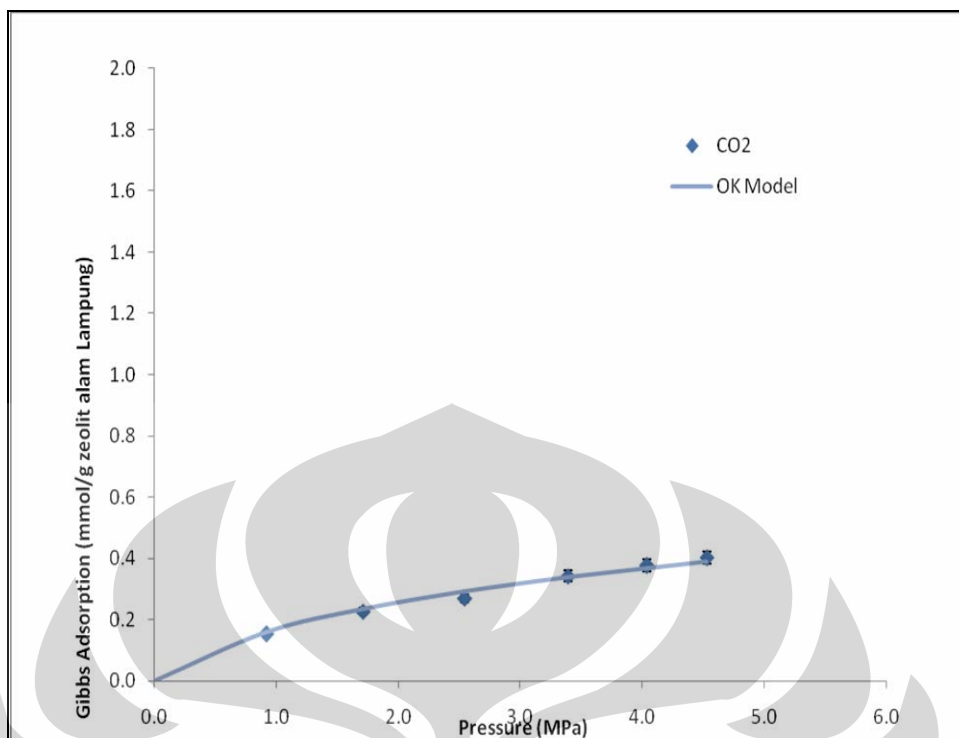
Tabel 4.7 menunjukkan penyimpangan atau deviasi model adsorpsi Ono-Kondo terhadap data adsorpsi Gibbs yang diperoleh dari penelitian.

Tabel 4. 7 Penyimpangan Adsorpsi Model Ono-Kondo Terhadap Adsorpsi Gibbs Penelitian

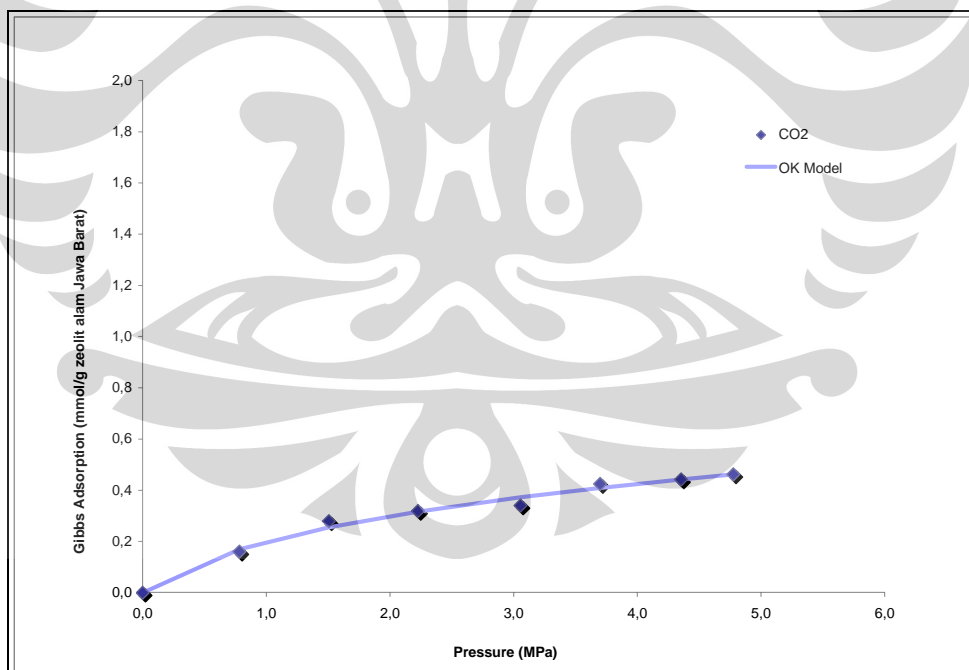
Jenis Zeolit	Standard Error	
	T = 30°C	T = 40 °C
Zeolit alam Lampung	0,02269	0,02053
Zeolit alam Jawa Barat	0,01791	0,01167
Zeolit alam Malang	0,01001	0,01499

Penyimpangan tersebut dapat disebabkan oleh kesalahan saat percobaan adsorpsi isotermis superkritis CO₂. Kesalahan tersebut diantaranya valve tidak tepat tertutup ketika tekanannya tepat berubah sehingga tekanan di dalam silinder tidak lagi sama dengan tekanan yang ditunjukkan pada *pressure gauge*. Kesalahan lainnya adalah di dalam silinder tidak hanya terdapat gas CO₂ tetapi juga terdapat gas helium sisa kalibrasi *volume void*. Untuk menghindari kesalahan ini seharusnya pada setiap silinder dipasang pompa vakum untuk mengeluarkan gas-gas dari dalam silinder.

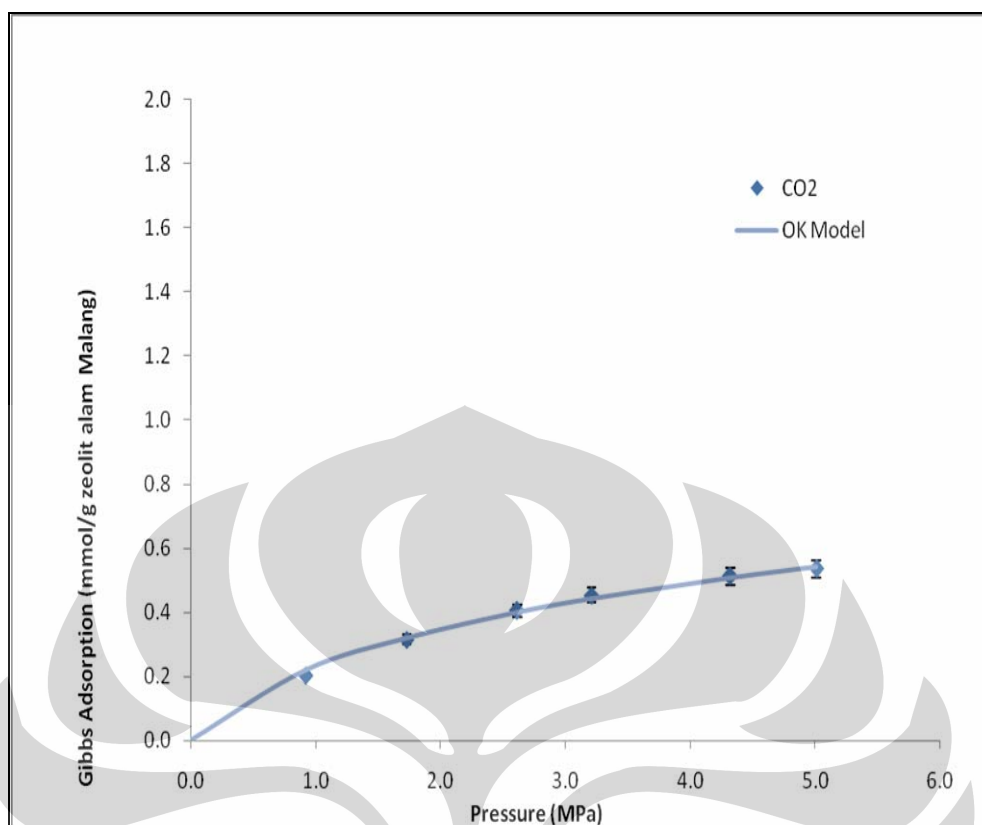
Dari penyimpangan tersebut dapat diketahui bahwa adsorpsi model Ono-Kondo yang diperoleh dari perhitungan sangat mendekati data adsorpsi Gibbs hasil penelitian. Sehingga dapat dikatakan bahwa luas permukaan yang akan dihasilkan dengan menggunakan adsorpsi model Ono-kondo ini sudah cukup baik dan akurat.



Gambar 4.11 Adsorpsi Model Ono-Kondo Pada Zeolit Alam Lampung Pada $T=30^{\circ}\text{C}$

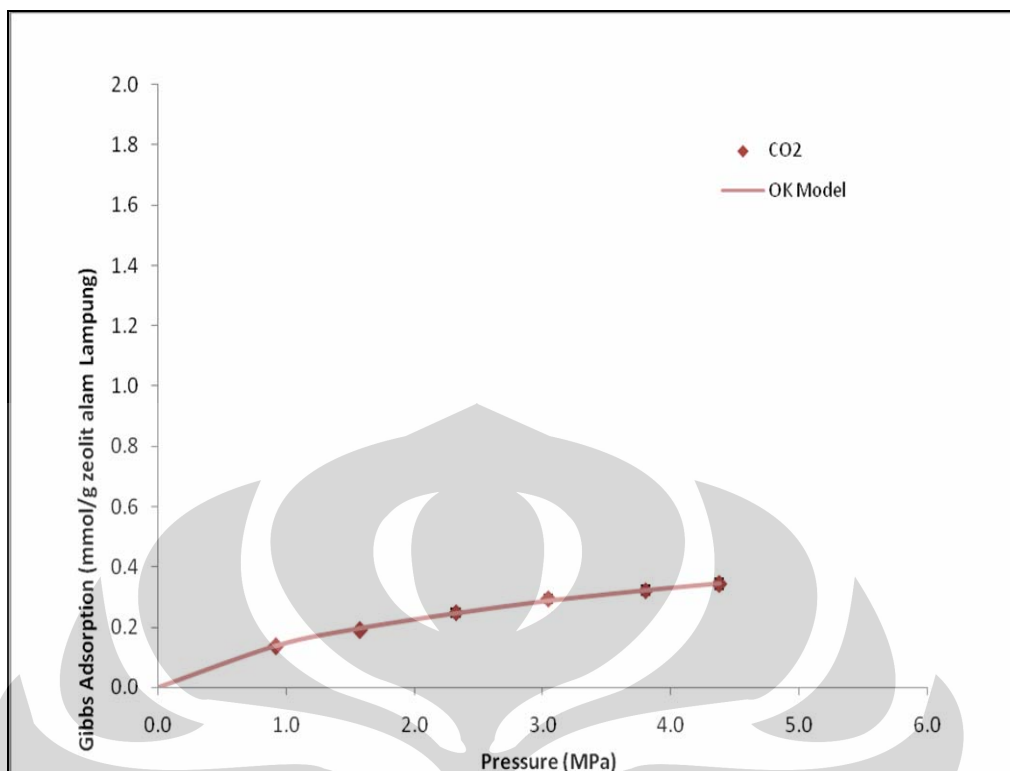


Gambar 4.12 Adsorpsi Model Ono-Kondo Pada Zeolit Alam Jawa Barat Pada $T=30^{\circ}\text{C}$

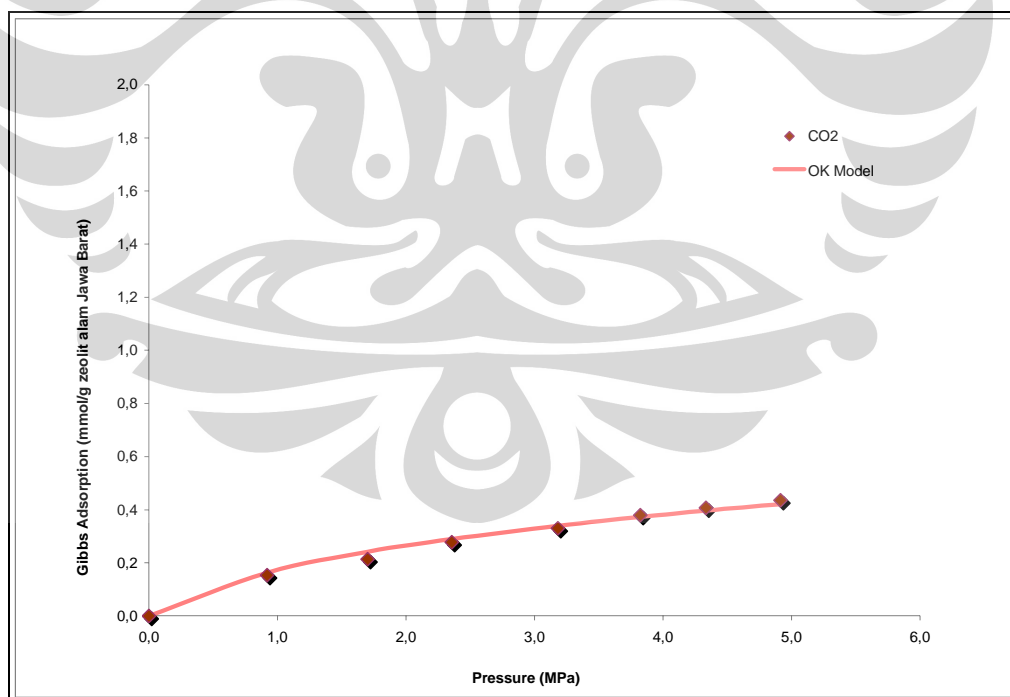


Gambar 4. 13 Adsorpsi Model Ono-Kondo Pada Zeolit Alam Malang Pada $T=30^{\circ}\text{C}$

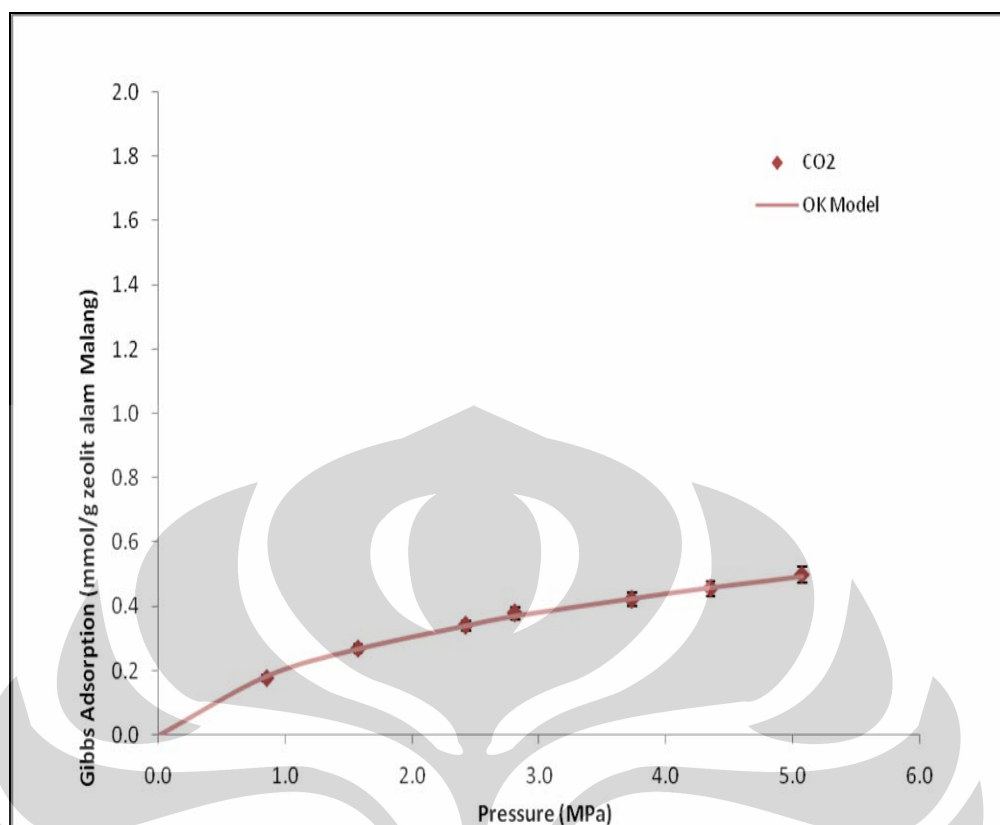
Gambar 4. 14 sampai Gambar 4. 16 kurva model adsorpsi Ono-Kondo yang merepresentasikan data adsorpsi hasil percobaan untuk setiap jenis zeolit pada temperatur 40°C . Sama halnya dengan kurva pada temperatur 30°C , pada ketiga jenis zeolit terlihat bahwa kurva model Ono-Kondo mengenai titik-titik yang menunjukkan data adsorpsi yang diperoleh dari penelitian yang menandakan adsorpsi model Ono-Kondo dapat merepresentasikan data adsorpsi dari percobaan dengan baik.



Gambar 4.14 Adsorpsi Model Ono-Kondo Pada Zeolit Alam Lampung Pada $T=40^{\circ}\text{C}$



Gambar 4.15 Adsorpsi Model Ono-Kondo Pada Zeolit Alam Jawa Barat Pada $T=40^{\circ}\text{C}$



Gambar 4. 16 Adsorpsi Model Ono-Kondo Pada Zeolit Alam Malang Pada $T=40^{\circ}\text{C}$

Dari adsorpsi model Ono-Kondo dan parameter-parameter yang telah diperoleh maka dapat dihitung luas permukaan dengan menggunakan metode adsorpsi isotermis superkritis model Ono-Kondo untuk ketiga jenis zeolit pada temperatur 30°C dan 40°C dengan menggunakan persamaan 2.13. Hasil perhitungan luas permukaan untuk ketiga jenis zeolit alam ditunjukkan pada Tabel 4. 8:

Tabel 4. 8 Luas Permukaan Dengan Menggunakan Adsorpsi Isotermis Superkritis CO_2 Model Ono-Kondo

Jenis Zeolit	Luas Permukaan (m^2/g)	
	$T = 30^{\circ}\text{C}$	$T = 40^{\circ}\text{C}$
Zeolit alam Lampung	90,1319	90,1892
Zeolit alam Jawa Barat	99,6652	99,3891
Zeolit alam Malang	111,5069	111,2676



Dari luas permukaan yang diperoleh dapat dilihat bahwa tidak terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara luas permukaan yang diperoleh pada temperatur 30 °C dengan luas permukaan yang diperoleh pada temperatur 40 °C. Hal ini membuktikan bahwa pengukuran luas permukaan dengan metode adsorpsi isoteremis superkritis CO₂ dengan menggunakan model Ono-Kondo tidak terpengaruhi secara signifikan oleh adanya perubahan temperatur adsorpsi. Namun, berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, adsorpsi sebaiknya dilakukan pada temperatur yang mendekati *normal boiling point* dari adsorbatnya, karena CO₂ tidak memiliki *normal boiling point* maka untuk CO₂ digunakan *triple point*-nya. Hal ini dikarenakan pada temperatur tersebut, gas adsorbat akan bersifat seperti cairannya sehingga adsorpsi optimum pada fasa gas dapat terjadi (Sudibandriyo, 2003).

Luas permukaan yang diperoleh untuk ketiga jenis zeolit tidak jauh berbeda dan cenderung sama dengan adanya perubahan temperatur. Hal ini dikarenakan perubahan temperatur hanya mempengaruhi kerapatan molekul-molekul adsorbat pada permukaan adsorben. Sementara luas permukaan adsorben tidak berubah meskipun temperaturnya meningkat.

Dari data pengukuran luas permukaan zeolit dengan menggunakan metode adsorpsi gas nitrogen model BET sebelumnya, diketahui bahwa luas permukaan zeolit alam Lampung adalah 83,1094 m²/g, luas permukaan zeolit alam Jawa Barat adalah 92,9032 m²/g, dan luas permukaan zeolit alam Malang adalah 131,1369 m²/g. Dari data ini terlihat adanya perbedaan luas permukaan dengan luas permukaan hasil metode pengukuran menggunakan model adsorpsi Ono-Kondo. Hal ini dapat disebabkan oleh dua hal, diantaranya kondisi operasi (temperatur dan tekanan) yang digunakan pada pengukuran luas permukaan dengan adsorpsi gas nitrogen menggunakan model BET. Temperatur yang digunakan pada pengukuran luas permukaan dengan model adsorpsi BET sangat rendah. Hal ini dapat mengakibatkan struktur dari material berpori menjadi rusak. Material tersebut dapat menyusut karena rendahnya temperatur yang digunakan sehingga pori-porinya mengecil dan luas permukaan yang dihasilkan tidak lagi akurat. Faktor lainnya dapat disebabkan kesalahan pada data adsorpsi isoteremis superkritis CO₂ yang ditunjukkan dengan adanya penyimpangan data adsorpsi



isotermis superkritis CO₂ model Ono-Kondo dengan data adsorpsi isotermis superkritis CO₂ hasil percobaan. Adapun perbedaan antara luas permukaan rata-rata dari kedua isoterm yang dihasilkan dengan metode adsorpsi isotermis superkritis CO₂ dengan model Ono-Kondo dan luas permukaan yang dihasilkan dengan menggunakan metode adsorpsi N₂ model BET dapat dilihat pada Tabel 4.9:

Tabel 4. 9 Perbedaan Luas Permukaan Menggunakan Metode Adsorpsi Isotermis Superkritis CO₂ Model Ono-Kondo Dengan Menggunakan Adsorpsi N₂ Model BET

Jenis Zeolit	Luas Permukaan (m ² /g)		Selisih Ono-Kondo Dengan BET (%)
	Ono-Kondo	BET	
Zeolit alam Lampung	90,0745	83,11	7,79
Zeolit alam Jawa Barat	99,9413	92,90	6,79
Zeolit alam Malang	111,7461	131,14	17,61

Namun, hasil perhitungan luas permukaan yang diperoleh baik dengan menggunakan adsorpsi gas nitrogen model BET maupun menggunakan adsorpsi isotermis superkritis CO₂ model Ono-Kondo menunjukkan bahwa zeolit alam Malang memiliki luas permukaan yang paling besar. Sesuai dengan penjelasan pada hasil adsorpsi isotermis superkritis CO₂ menggunakan model Ono-Kondo bahwa zeolit alam Malang memiliki kandungan zeolit jenis modernit yang paling besar. Dimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa zeolit jenis ini memiliki ukuran rongga dan rasio Si/Al yang lebih besar dibandingkan dengan zeolit jenis klinoptilolit dan jenis lainnya. Semakin besar ukuran rongga dan rasio Si/Al maka luas permukaannya akan semakin besar (Ellyana, 2007). Hal ini dikarenakan struktur dari Si yang lebih berpori. Sehingga zeolit alam Malang memiliki luas permukaan yang paling besar.



BAB V

KESIMPULAN & SARAN

5.1 KESIMPULAN

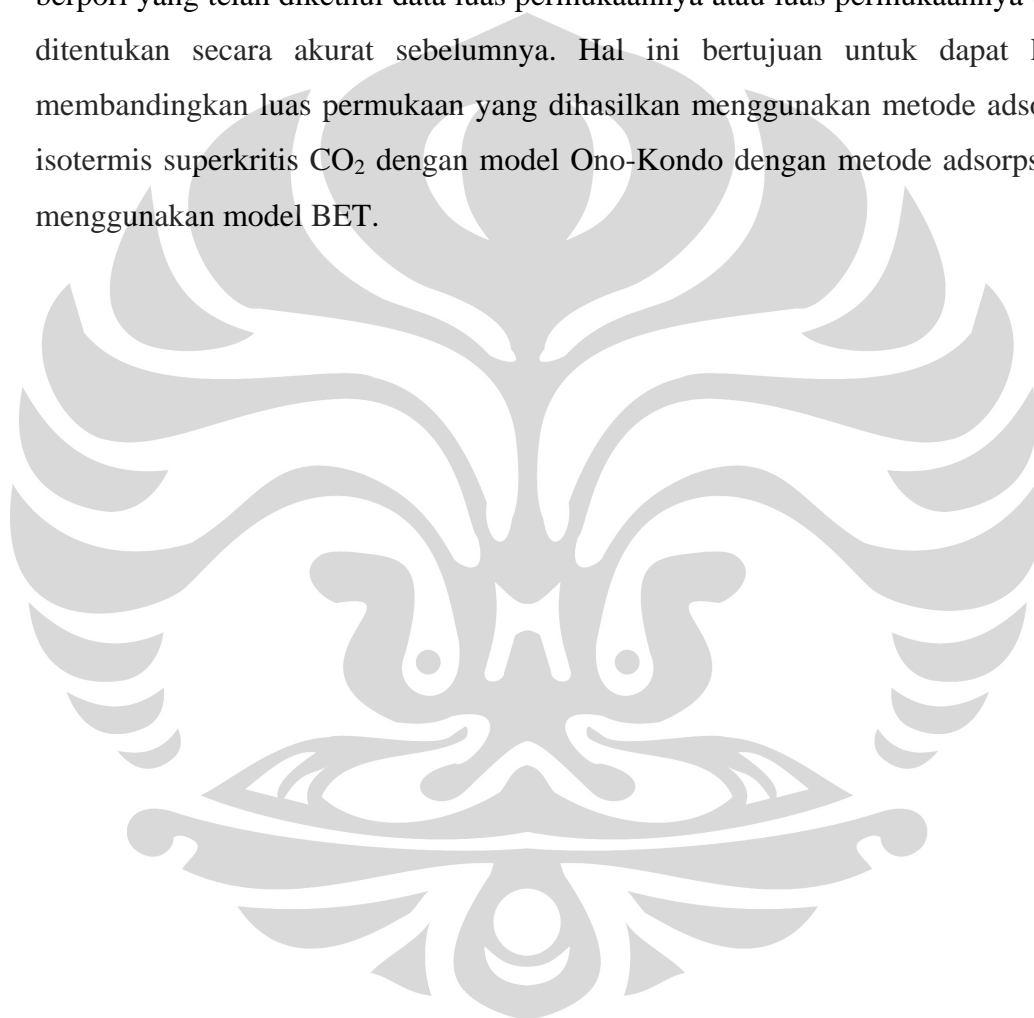
Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Data adsorpsi isothermis superkritis CO₂ model Ono-Kondo dapat merepresentasikan data adsorpsi hasil percobaan dengan baik.
- Adsorpsi isothermis superkritis CO₂ model Ono-Kondo dapat digunakan untuk menentukan luas permukaan dari material berpori.
- Dalam penentuan luas permukaan material berpori dengan menggunakan adsorpsi isothermis superkritis model Ono-Kondo diperlukan adanya beberapa parameter yaitu C_i dimana nilainya berbeda untuk setiap temperatur, ϵ_{ii}/k dan ρ_{mc} yang nilainya bergantung pada jenis adsorbat, dan ϵ_{is}/k yang nilainya berbeda untuk setiap jenis adsorben.
- Luas permukaan material berpori yang diperoleh dengan adsorpsi isothermis superkritis CO₂ dengan menggunakan model Ono-Kondo tidak terpengaruhi oleh adanya perubahan temperatur.
- Perbedaan luas permukaan yang dihasilkan dari metode pengukuran dengan adsorpsi isothermis superkritis CO₂ model Ono-Kondo dan dengan adsorpsi gas nitrogen model BET disebabkan oleh kondisi operasi (temperatur rendah) yang digunakan pada pengukuran dengan adsorpsi gas nitrogen model BET.
- Luas permukaan yang dihasilkan baik dengan adsorpsi isothermis superkritis CO₂ model Ono-Kondo maupun dengan adsorpsi gas nitrogen model BET menunjukkan bahwa luas permukaan zeolit alam Malang lebih besar dibandingkan dengan zeolit alam Jawa Barat dan Lampung.



5.2 SARAN

Untuk penelitian lebih lanjut mengenai penentuan luas permukaan menggunakan metode adsorpsi isothermis superkritis CO₂ dengan model Ono-Kondo ini sebaiknya menggunakan lebih banyak jenis material berpori terutama material berpori yang diketahui rentan terhadap temperatur rendah. Selain itu material berpori yang akan ditentukan luas permukaannya sebaiknya adalah material berpori yang telah diketahui data luas permukaannya atau luas permukaannya telah ditentukan secara akurat sebelumnya. Hal ini bertujuan untuk dapat lebih membandingkan luas permukaan yang dihasilkan menggunakan metode adsorpsi isothermis superkritis CO₂ dengan model Ono-Kondo dengan metode adsorpsi N₂ menggunakan model BET.





DAFTAR PUSTAKA

- Alberty, Robert A., Farrington Daniels,. (1983) *Kimia Fisika, terj.*M.N. Surdia. Jakarta: Erlangga,.
- Atmayudha, A. "Pembuatan dan Uji Kinerja Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa dengan Perlakuan Aktivasi Terkontrol," Skripsi, Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok, 2007.
- Aranovich, G.L., Hocker, T., Wu, D.W., Donohue, M.D., (1997). *Nonrandom Behavior in Multicomponent Lattice Mixture: Effects of Solute Size and Shape*, J. Chem. Phys.
- Bahl, B.S., Tuli, G.D., dan Bahl, A . (1997). *Essential of Physical Chemistry*, New Delhi, S. Chand and Company, Ltd.
- Bond, G.C. (1987). *Heterogeneous Catalysis, Principles and Application*, Oxford, Clarendon Press.
- Campbell, John M. (1976)., *Gas Conditioning and Processing*.Norman, Oklahoma, Campbell Petroleum Series.
- Chumaidi, Achmad. *Studi Pembuatan Katalis Zeolit Untuk Reaksi Metanol Menjadi Gasoline Dam Bahan Zeolit Alam*, ITS Union Catalogue,. Diakses 8 Desember 2007.
(<http://library.its.ac.id/harvester/index.php/record/view/5461>)
- Ding, L.P., dan Bhatia, S.K. (2003). *Analysis of Multicomponent Adsorption Kinetics on Activated Carbon*, AIChE Journal, vol. 49, no. 4, pp. 883-895.
- Do, D.D. (1998). *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*. Imperial College Press, London.



Donohue, M.D., Aranovich, G.L., (1999). *A New Classification of Isotherms for Gibbs Adsorption of Gases on Solids*, Fluid Phase Equilibria Journal, vol. 158, no. 1, pp. 557-563.

Ellyana, M. "Modifikasi Zeolit Alam Lampung dengan Fotokatalis TiO₂ Melalui Metode Sol-Gel Untuk Degradasi Fenol," Skripsi, Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok, 2007.

Gan, H., Nandi, S.P., Walker, P.L., Jr. (1972). *Nature of Porosity in American Coals*.

Goodman, A.L., et.al. (2004). *An Inter-laboratory Comparison of CO₂ Isotherms Measured on Argonne Premium Coal Samples*, Energy and Fuels Journal, vol. 18, no. 4, pp.1175-1182.

Gultom, F.K. "Aplikasi Karbon Aktif dalam Pengendalian Mutu Volatile Organic Compound (VOC) melalui Proses Adsorpsi dalam Unggun Tetap," Skripsi, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia FTUI, Depok, 1998.

Hakim, D.L. "Studi Pendahuluan Pengayaan Oksigen dengan Metode Pressure Swing Adsorption: Studi Kasus Penggunaan Adsorben Zeolit Alam Lampung," Skripsi, Jurusan Gas dan Petrokimia FTUI, Depok, 2000.

Handbook of Chemistry and Physics, Chemical Rubber Publishing Co., 48th ed., 1967.

Maron, S.H., dan Lando, J. (1974). *Fundamentals of Physical Chemistry*, New York, Macmillan Publishing Co. Inc.

Mulyanto, Budi dan Suryadi. (2006). "Prospek Zeolit Sebagai Bahan Penjerap Dalam Remediasi Lahan Bekas Tambang", Presentation. Diakses 8 Desember 2007

(http://www.dim.esdm.go.id/index2.php?option=content&do_pdf=1&id=493)



- Mulyati, S. "Potensi Batubara Lokal dengan Perlakuan sebagai Adsorben untuk Penanganan Limbah Cair Benzena dan Toluena," Skripsi, Depok, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia FTUI, Depok, 2006.
- Herawaty, E. (1993). "Sifat-Sifat Permukaan dan Proses Katalisis," Skripsi, Jurusan Gas dan Petrokimia FTUI, Depok, 1993.
- Oktianasari, I. "Karakteristik Pemisahan Campuran Gas H₂/N₂ Menggunakan Adsorben Zeolit Alam dan Zeolit Alam/NiO dengan Teknik PSA," Skripsi, Jurusan Teknik Gas dan Petrokimia FTUI, Depok, 2002. pp. 5-11.
- Ruthven, D.M. (1993). *Adsorption, Encyclopedia of Chemical Technology*, Wiley Inter Science, vol. 1, 4th edition.
- Sudibandriyo, M. (2003). *A Generalized Ono-Kondo Lattice Model For High Pressure Adsorption On Carbon Adsorbents*. Oklahoma States University.
- Sundstrom, D.W., dan Herbert, E.K. (1979). *Waste Water Treatment*, Prentice Hall Englewood Cliffs.
- Treybal, R.E. (1980). *Mass Transfer Operation*, Singapore, McGraw Hill, third edition.
- Yang, R.T. (1997). *Gas Separation by Adsorption Process*, London, Imperial College Press.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Adsorpsi Pada Zeolit Alam Lampung T = 30 °C

Vvoid (ml)	94,69
V dozing (ml)	486,73
Dozing Temp (°F)	86
Mass Zeolit (Wet) gr	87,62

Sampling Press*	0	133,31	248,19	368,94	492,41	586,02	657,17	726,27
Initial P dozing	-1,5	132,1	247,2	368,1	491,8	585,5	656,7	725,9
Final P dozing	20,4	167,75	275,64	442,691	560,3	609,75	701,87	792,3
Z dozing awal		0,943517893	0,904533592	0,838810207	0,787581635	0,764088625	0,717120086	0,664744153
Z dozing final	0,97313	0,955101822	0,913298179	0,84819305	0,798318969	0,773052149	0,738336627	0,699399547
Z _{cell}	0,99522	0,954941289	0,914698277	0,868900652	0,817915862	0,775433743	0,740499927	0,703463603
n _{inj}	0,00000	0,04949	0,09015	0,13358	0,18588	0,22874	0,26500	0,30459
n _{unads}	-0,00040	0,03616	0,07028	0,10998	0,15594	0,19575	0,22987	0,26693
n _{ads}	0,00000	0,01333	0,01987	0,02360	0,02995	0,03299	0,03513	0,03766
n_{adsgibbs} (mmol/g_{dryzeolite})	0,0000	0,1521	0,2267	0,2694	0,3418	0,3765	0,4009	0,4298



Lampiran 2. Adsorpsi Pada Zeolit Alam Lampung T = 40 °C

Vvoid (ml)	94,69
V dozing (ml)	486,73
Dozing Temp (°F)	104
Mass Zeolit (Wet) gr	87,62

Sampling Press*	0	133,31	228,19	336,8	441,69	551,58	635,19	710,08
Initial P dozing	-1,5	132,1	227,2	336,0	441,0	551,0	634,7	709,7
Final P dozing	20,4	170,75	275,64	386,25	468,41	584,02	678,91	773,8
Z dozing awal		0,948647014	0,915341168	0,878306536	0,849300459	0,80600769	0,767813182	0,726982562
Z dozing final	0,97313	0,958695052	0,921263721	0,885941819	0,857430662	0,814671155	0,779608872	0,742882959
Z _{cell}	0,99522	0,960228312	0,930569415	0,894995542	0,858708889	0,817502335	0,785378759	0,754112879
n _{inj}	0,00000	0,04672	0,07820	0,11614	0,15478	0,20298	0,23278	0,26852
n _{unads}	-0,00038	0,03481	0,06149	0,09436	0,12898	0,17476	0,20280	0,23610
n _{ads}	0,00000	0,01191	0,01671	0,02178	0,02580	0,02822	0,02998	0,03241
n _{adsgibbs} (mmol/g _{dryzeolite})	0,0000	0,1359	0,1907	0,2486	0,2945	0,3221	0,3422	0,3699



Lampiran 3. Adsorpsi Pada Zeolit Alam Jawa Barat T = 30 °C

Vvoid (ml)	79,22
V dozing (ml)	486,73
Dozing Temp (°F)	86
Mass Zeolit (Wet) gr	105

Sampling Press*	14,7	113,31	218,19	323,08	442,97	536,58	631,47	692,63
Initial P dozing	13,2	112,0	217,1	322,2	442,3	536,0	631,0	692,2
Final P dozing	14,7	162,03	251,92	346,8	489,14	559,3	678,91	726,36
Z dozing awal	9,95E-01	0,945486425	0,913143348	0,877929217	0,819150671	0,787836712	0,72944189	0,7033961
Z dozing final	0,99525	0,954943817	0,922767403	0,884600717	0,826846652	0,796675151	0,749216534	0,722101544
Z _{cell}	0,99525	0,962381619	0,92568141	0,88679051	0,839636218	0,79858284	0,753329838	0,722278342
n _{inj}	0,00000	0,04230	0,08037	0,11251	0,15007	0,19017	0,22814	0,25637
n _{unads}	0,00288	0,02551	0,05108	0,07895	0,11433	0,14560	0,18165	0,20781
n _{ads}	0,00000	0,01679	0,02929	0,03356	0,03575	0,04457	0,04649	0,04856
n_{adsgibbs} (mmol/g_{dryzeolite})	0,0000	0,1599	0,2790	0,3197	0,3404	0,4245	0,4428	0,4625



Lampiran 4. Adsorpsi Pada Zeolit Alam Jawa Barat T = 40 °C

Vvoid (ml)	79,22
V dozing (ml)	486,73
Dozing Temp (°F)	104
Mass Zeolit (Wet) gr	105

Sampling Press*	0	133,31	246,92	341,8	461,69	554,58	628,47	712,63
Initial P dozing	-1,5	132,1	245,9	341,0	461,0	554,0	628,0	712,2
Final P dozing	20,4	167,53	275,64	370,53	489,14	584,02	655,19	773,8
Z dozing awal		0,949703981	0,915348363	0,883725671	0,84168791	0,80583412	0,777810254	0,727033903
Z dozing final	0,97313	0,95960307	0,921263721	0,889930339	0,84935682	0,81380994	0,7868836	0,742691085
Z _{cell}	0,99522	0,960228312	0,924646797	0,893399014	0,851807143	0,817502335	0,78689391	0,753051803
n _{inj}	0,00000	0,04522	0,07852	0,10941	0,14839	0,18684	0,21031	0,24422
n _{unads}	-0,00032	0,02912	0,05602	0,08026	0,11370	0,14701	0,16755	0,19852
n _{ads}	0,00000	0,01609	0,02250	0,02915	0,03469	0,03983	0,04277	0,04570
n_{adsgibbs} (mmol/g_{dryzeolite})	0,0000	0,1533	0,2143	0,2777	0,3304	0,3794	0,4073	0,4352


Lampiran 5. Adsorpsi Pada Zeolit Alam Malang T = 30 °C

Vvoid (ml)	47,20
V dozing (ml)	486,73
Dozing Temp (°F)	86
Mass Zeolit (Wet) gr	85

Sampling Press*	0	133,31	250,64	379,25	465,41	626,47	726,36
Calibrated	-1,5	132,1	249,6	378,5	464,8	626,0	726,0
Initial P dozing	20,4	180,75	275,64	394,25	489,14	683,91	773,8
Z dozing awal		0,93911074	0,905332427	0,858667673	0,819035589	0,728720657	0,675092646
Z dozing final	0,97310	0,947299971	0,910749663	0,8652611	0,82334493	0,734956852	0,703276391
Z _{cell}	0,99522	0,955494646	0,914652252	0,864946836	0,829619023	0,756856291	0,70350244
n _{inj}	0,00000	0,03527	0,06213	0,09097	0,11087	0,15035	0,17881
n _{unads}	-0,00020	0,01801	0,03538	0,05661	0,07243	0,10686	0,13330
n _{ads}	0,00000	0,01726	0,02675	0,03437	0,03844	0,04348	0,04551
n_{adsgibbs} (mmol/g_{dryzeolite})	0,0000	0,2031	0,3147	0,4043	0,4523	0,5116	0,5354


Lampiran 6. Adsorpsi Pada Zeolit Alam Malang T = 40 °C

Vvoid (ml)	47,20
V dozing (ml)	486,73
Dozing Temp (°F)	104
Mass Zeolit (Wet) gr	85

Sampling Press*	0	123,31	228,19	351,8	407,97	541,58	631,47	736,36
Initial P dozing	20,4	180,75	275,64	394,25	489,14	584,02	678,91	797,52
Final P dozing	81,55	159,03	260,92	379,63	483,41	569,3	661,47	765,08
Z dozing awal		0,945551219	0,915341168	0,875377803	0,840807455	0,80600769	0,767813182	0,714933745
Z dozing final	0,97313	0,952246135	0,919604046	0,880464186	0,844983248	0,811041567	0,775447799	0,730781236
Z _{cell}	0,99522	0,963285082	0,930569415	0,889930339	0,870612418	0,822030242	0,7868836	0,743385478
n _{inj}	0,00000	0,03113	0,05356	0,07832	0,09076	0,12091	0,13897	0,16627
n _{unads}	-0,00019	0,01600	0,03065	0,04941	0,05857	0,08506	0,10030	0,12381
n _{ads}	0,00000	0,01513	0,02291	0,02891	0,03219	0,03585	0,03867	0,04247
n_{adsgibbs} (mmol/g_{dryzeolite})	0,0000	0,1780	0,2696	0,3401	0,3787	0,4218	0,4549	0,4996



**Lampiran 7. Data Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung
Dengan Adsorpsi N₂ Model BET**

Micromeritics Instrument Corporation
ASAP 2400 V3.07 PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA2 /80 START 15:15:19 12/14/07
SAMPLE ID: ZAL COMPL 17:44:18 12/14/07
SUBMITTER: kat REPR 07:42:03 12/24/07
OPERATOR: ry SAMPLE WT: 0.2011 g
STATION NUMBER: 1 EQUIL INTERVAL: 5 sec FREE SPACE: 54.6650 cc

SUMMARY REPORT

AREA

SINGLE POINT SURFACE AREA AT P/P₀ 0.1986: 83.1094 sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORES LESS THAN
1212.6195 A DIAMETER AT P/P₀ 0.9838: 0.157152 cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A BY SINGLE POINT): 75.6362 A



**Lampiran 8. Data Luas Permukaan Zeolit Alam Jawa Barat
Dengan Adsorpsi N₂ Model BET**

```
Micromeritics Instrument Corporation
ASAP 2400 V3.07                                     PAGE 1
SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA2 /80                START 15:15:19 12/14/07
SAMPLE ID: zajb                                     COMPL 17:44:18 12/14/07
SUBMITTER: kat                                      REPT 08:01:46 12/24/07
OPERATOR: ry                                        SAMPLE WT: 0.1799 g
STATION NUMBER: 1    EQUIL INTERVAL: 5 sec        FREE SPACE: 54.6650 cc

SUMMARY REPORT

AREA
SINGLE POINT SURFACE AREA AT P/Po 0.1986:          92.9032 sq. m/g

VOLUME
SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORES LESS THAN
1212.6195 A DIAMETER AT P/Po 0.9838:             0.175671 cc/g

PORE SIZE
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A BY SINGLE POINT):    75.6362 A
```



Lampiran 9. Data Luas Permukaan Zeolit Alam Malang Dengan Adsorpsi N₂ Model BET

Micromeritics Instrument Corporation
ASAP 2400 V3.07 PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA2 /76' START: 15:00:51 12/13/07
SAMPLE ID: ZAM COMPL 19:01:47 12/13/07
SUBMITTER: kat REPR 07:57:47 12/24/07
OPERATOR: ry SAMPLE WT: 0.1666 g
STATION NUMBER: 1 EQUIL INTERVAL: 5 sec FREE SPACE: 52.8554 cc

SUMMARY REPORT

AREA

SINGLE POINT SURFACE AREA AT P/P₀ 0.2054: 131.1369 sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORES LESS THAN
1642.9459 A DIAMETER AT P/P₀ 0.9881: 0.246529 cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A BY SINGLE POINT): 75.1973 A