

**PENGEMBANGAN MODEL ADSORPSI CO₂
UNTUK PREDIKSI POTENSI LAPISAN
BATUBARA INDONESIA SEBAGAI MEDIA
PENYIMPAN GAS RUMAH KACA**

SKRIPSI

Oleh

RAMADHANIA
04 04 06 050 Y



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

**PENGEMBANGAN MODEL ADSORPSI CO₂
UNTUK PREDIKSI POTENSI LAPISAN
BATUBARA INDONESIA SEBAGAI MEDIA
PENYIMPAN GAS RUMAH KACA**

SKRIPSI

Oleh

**RAMADHANIA
04 04 06 050 Y**



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

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

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

**PENGEMBANGAN MODEL ADSORPSI CO₂ UNTUK PREDIKSI
POTENSI LAPISAN BATUBARA INDONESIA
SEBAGAI MEDIA PENYIMPAN GAS RUMAH KACA**

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, 27 Juni 2008

Ramadhania

NPM 04 04 06 050 Y

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul:

**PENGEMBANGAN MODEL ADSORPSI CO₂ UNTUK PREDIKSI
POTENSI LAPISAN BATUBARA INDONESIA
SEBAGAI MEDIA PENYIMPAN GAS RUMAH KACA**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah disetujui untuk diajukan pada sidang ujian skripsi.

Depok, 27 Juni 2008

Dosen Pembimbing

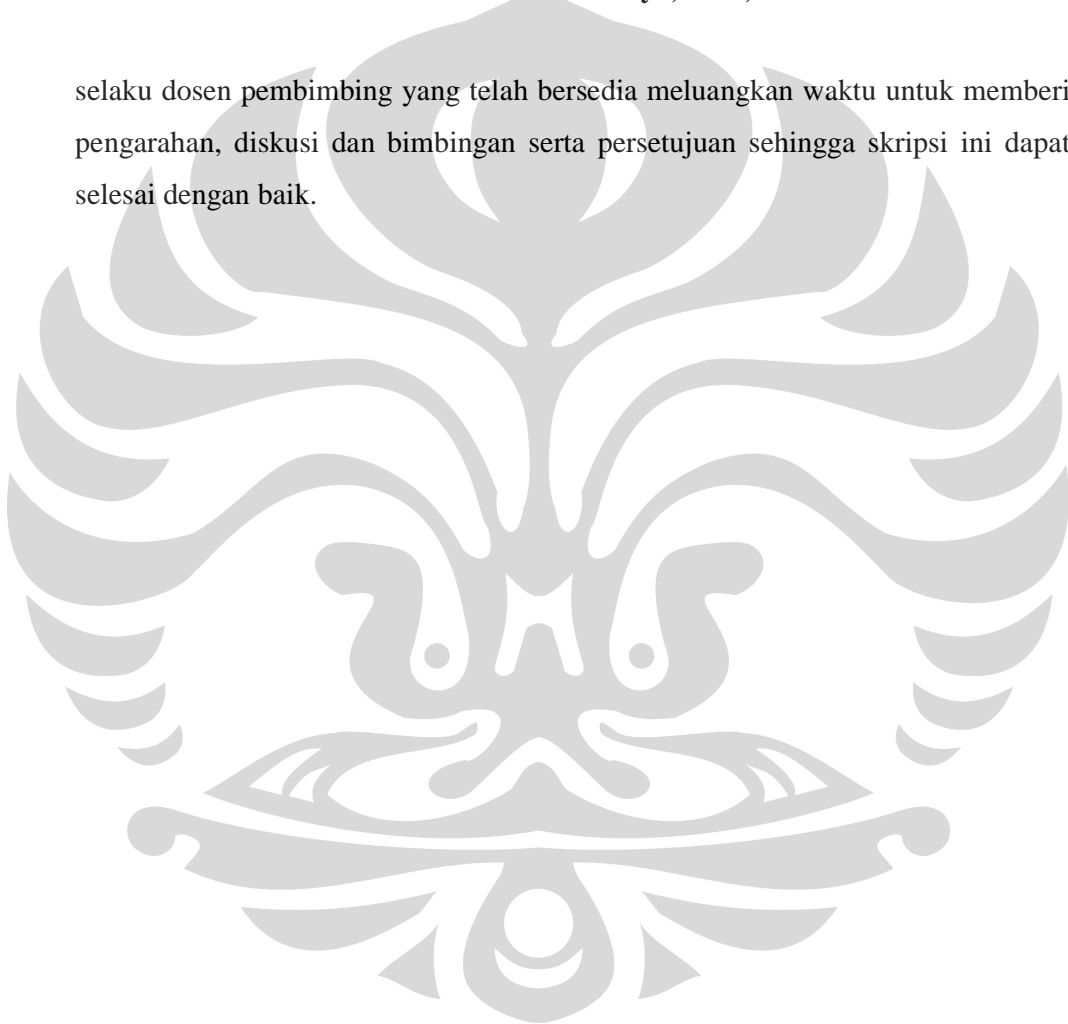
Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc, PhD
NIP.131 803 524

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc, PhD

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.



Ramadhania
NPM 040406050Y
Departemen Teknik Kimia

Dosen Pembimbing:
Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc, PhD

**PENGEMBANGAN MODEL ADSORPSI CO₂ UNTUK PREDIKSI
POTENSI LAPISAN BATUBARA INDONESIA
SEBAGAI MEDIA PENYIMPAN GAS RUMAH KACA**

ABSTRAK

Informasi mengenai kapasitas adsorpsi batubara Indonesia dalam berbagai kondisi operasi sangat diperlukan guna mengoptimalkan penerapan teknologi injeksi CO₂ pada *coalbed*. Untuk mendapatkan informasi tersebut, diperlukan suatu model adsorpsi CO₂ yang dapat mengkorelasikan antara kapasitas adsorpsi dengan karakteristik batubara Indonesia secara akurat. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dibuat suatu pengembangan model adsorpsi CO₂ pada batubara Indonesia dengan melakukan uji adsorpsi CO₂ pada tekanan tinggi, dengan variasi jenis batubara, temperatur, tekanan, dan kandungan air.

Pada penelitian ini, digunakan 2 variasi batubara (batubara Barito dan batubara Ombilin), 3 variasi temperatur (25°C, 40°C, dan 60°C), 6 variasi tekanan (150 psia, 300 psia, 450 psia, 600 psia, 750 psia, dan 900 psia), serta 2 jenis kandungan air (batubara kering dan batubara basah). Uji daya adsorpsi batubara terhadap CO₂ dilakukan dengan menggunakan prinsip adsorpsi isotermis Gibbs, sedangkan model yang digunakan adalah model adsorpsi Ono-Kondo. Pengembangan model yang akan dilakukan dalam penelitian ini hanya meliputi perhitungan dua parameter, yaitu nilai energi interaksi antara adsorbat dengan adsorben (ϵ_{is}/k) dan nilai kapasitas adsorpsi maksimum adsorben (C).

Dari hasil penelitian didapat bahwa kapasitas adsorpsi batubara Barito lebih besar daripada batubara Ombilin, kapasitas adsorpsi batubara kering lebih besar daripada batubara basah, kenaikan temperatur mengakibatkan penurunan daya adsorpsi, dan kenaikan tekanan menyebabkan peningkatan daya adsorpsi batubara terhadap CO₂. Kondisi adsorpsi maksimum terdapat pada batubara Barito kering, dengan temperatur 25°C dan tekanan 900 psia sebesar 0,8794 mmol/gram. Pengembangan model Ono-Kondo menghasilkan nilai ϵ_{is}/k terbesar pada batubara Barito kering dan nilai C terbesar pada batubara Barito kering dengan temperatur 25°C, yaitu sebesar -1300 K dan 0,741 mmol/gram. Penyimpangan antara model dengan hasil percobaan adalah sebesar 0,7%, sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan model Ono-Kondo untuk memprediksi kapasitas adsorpsi CO₂ pada batubara Indonesia cukup akurat.

Kata Kunci: Kapasitas Adsorpsi, Karakteristik Batubara, CO₂, Uji Adsorpsi, Model Ono-Kondo

Ramadhania
NPM 040406050Y
Chemical Engineering Department

Counsellor:
Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc, PhD

**CO₂ ADSORPTION MODEL DEVELOPMENT TO PREDICT
THE POTENCY OF INDONESIAN COAL SEAMS
FOR GREEN HOUSE GAS SEQUESTRATION**

ABSTRACT

Information of Indonesian coals' capacity in various operating conditions is important in order to optimize the application of CO₂ injection into coalbed. To get that kind of information, the accurate CO₂ adsorption model that able to correlate Indonesian coals' capacity with their characteristic is needed. So that, this research will develop CO₂ adsorption model on Indonesian coals by testing CO₂ adsorption in high pressure condition, in various types of coal, temperature, pressure, and moisture content.

This research utilized 2 types of coal (Barito coal and Ombilin coal), 3 variation of temperature (25°C, 40°C, dan 60°C), 6 variation of pressure (150 psia, 300 psia, 450 psia, 600 psia, 750 psia, dan 900 psia), and 2 kind of moisture content (dry coal and wet coal). Test of CO₂ adsorption on coals was done by applied Gibbs isotherm adsorption principal and the used model is Ono-Kondo adsorption model. Model development that will be carried out in this research was focussed on two paramaters, which are fluid – solid interaction energy parameter (ϵ_{is}/k) and maximum adsorption capacity (C).

Results of this research point out that Barito coal's adsorption capacity is higher than Ombilin coal's, dry coal's adsorption capacity is higher than wet coal's, increasing of temperature affect decreasing of adsorption capacity, and increasing of pressure affect increasing of adsorption capacity. Maximum adsorption condition is reached on dry Barito coal, in 25°C and 900 psia in the amount of 0,8794 mmol/gram. Development of Ono-Kondo model produced that the highest value of ϵ_{is}/k is on dry Barito coal and the highest C value is on dry Barito coal in 25°C, which are -1300 K and 0,741 mmol/gram. Deviation between the model and the result of this research is 0,7%, so it can be concluded that application of Ono-Kondo model to predict CO₂ adsorption capacity in Indonesian coals' is accurate.

Keywords: Adsorption Capacity, Coal Characteristic, CO₂, Adsorption Testing, Ono-Kondo Model

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR SIMBOL	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1 LATAR BELAKANG.....	1
I.2 RUMUSAN MASALAH.....	2
I.3 TUJUAN PENELITIAN.....	2
I.4 BATASAN MASALAH.....	3
I.5 SISTEMATIKA PENULISAN.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
II.1 ADSORPSI.....	4
II.1.1 Jenis-Jenis Adsorpsi.....	5
II.1.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi.....	6
II.1.3 Keseimbangan Adsorpsi.....	8
II.1.4 Model-Model Adsorpsi.....	9
II.1.5 Adsorben.....	15
II.2 BATUBARA SEBAGAI ADSORBEN.....	17
II.2.1 Jenis-Jenis Batubara.....	18
II.2.2 Struktur Batubara.....	18
II.2.3 Kegunaan Batubara.....	18
II.3 Gas Metana Batubara (<i>Coal Bed Methane</i>).....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	22
III.1 ALUR PENELITIAN.....	22

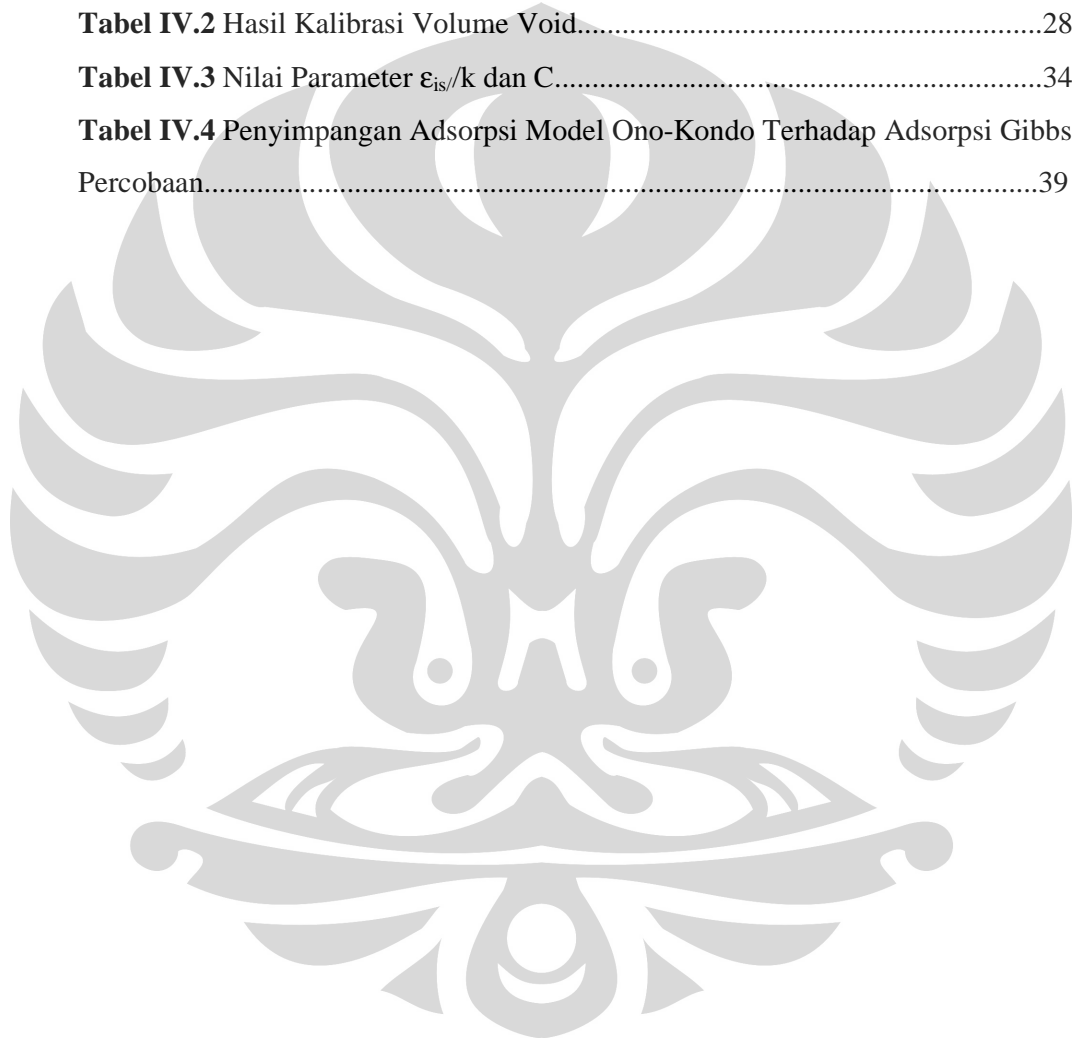
III.2 ALAT DAN BAHAN.....	23
III.3 PROSEDUR PENELITIAN.....	23
III.3.1 Percobaan.....	23
III.3.2 Pemodelan.....	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
IV.1 HASIL PREPARASI BATUBARA.....	27
IV.2 HASIL PERSIAPAN PERALATAN ADSORPS.....	28
IV.3 HASIL KALIBRASI VOLUME DOZING CYLINDER.....	29
IV.4 HASIL KALIBRASI VOLUME VOID PADA SAMPLING CYLINDER	29
IV.5. HASIL UJI DAYA ADSORPSI.....	30
IV.5.1 Pengaruh Jenis Batubara dalam Proses Adsorpsi.....	33
IV.5.2 Pengaruh Temperatur dan Tekanan dalam Proses Adsorpsi.....	34
IV.5.3 Pengaruh Kandungan Air dalam Proses Adsorpsi.....	35
IV.6. HASIL UJI ADSORPSI MENGGUNAKAN MODEL ONO – KONDO.....	35
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	42
V.1 KESIMPULAN.....	42
V.2 SARAN.....	43
DAFTAR PUSTAKA.....	44
LAMPIRAN.....	46

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Adsorpsi gas pada bahan berpori.....	5
Gambar 2.2 Kurva adsorpsi isoteremis Langmuir dan BET.....	8
Gambar 2.3 Grafik isoterm Langmuir.....	10
Gambar 2.4 Grafik adsorpsi isoteremis Gibbs.....	12
Gambar 2.5 Kurva adsorpsi isoteremis Gibbs.....	13
Gambar 2.6 Adsorpsi multilayer.....	14
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	20
Gambar 3.2 Skema alat untuk uji adsorpsi tekanan tinggi batubara.....	23
Gambar 3.3 Algoritma pemodelan.....	24
Gambar 4.1 Sampel batubara 0,2 mm.....	25
Gambar 4.2 Rangkaian peralatan uji adsorpsi.....	26
Gambar 4.3 Adsorpsi Gibbs CO ₂ pada batubara Barito kering.....	29
Gambar 4.4 Adsorpsi Gibbs CO ₂ pada batubara Ombilin kering.....	29
Gambar 4.5 Perbandingan hasil uji adsorpsi Gibbs CO ₂ pada batubara Barito...30	
Gambar 4.6 Perbandingan hasil uji adsorpsi Gibbs CO ₂ pada batubara Ombilin30	
Gambar 4.7 Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara Barito kering.....	37
Gambar 4.8 Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara Barito basah.....	37
Gambar 4.9 Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara Ombilin kering.....	38
Gambar 4.10 Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara Ombilin basah.....	38

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Perbedaan Adsorpsi Fisika dan Adsorpsi Kimia.....	6
Tabel II.2 Tipe, Karakteristik, Kegunaan, Dan Kerugian Adsorben.....	17
Tabel IV.1 Persentase Kandungan Air Keseimbangan.....	26
Tabel IV.2 Hasil Kalibrasi Volume Void.....	28
Tabel IV.3 Nilai Parameter ϵ_{is}/k dan C.....	34
Tabel IV.4 Penyimpangan Adsorpsi Model Ono-Kondo Terhadap Adsorpsi Gibbs Percobaan.....	39



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Analisa Proximate dan Ultimate Batubara Indonesia.....	44
Lampiran 2. Hasil Uji Adsorpsi Gibbs.....	45



DAFTAR SIMBOL

C	kapasitas adsorpsi maksimum dalam model Ono-Kondo
$C_{a,0}$	luas permukaan maksimum fasa teradsorp pada T_0
k	konstanta Boltzman
M	berat molekul
m	jumlah lapisan pada <i>lattice</i> model ; massa sampel
n_{ads}^{Gibbs}	jumlah gas yang teradsorpsi
n_{inj}	jumlah gas yang diinjeksikan dari tabung gas ke dalam silinder adsorpsi
P	tekanan
R	konstanta gas ideal
T	temperatur
T_0	normal <i>boiling point</i> (atau <i>triple point</i> untuk CO_2)
V	volume
V_{ads}	volume fasa teradsorp
V_{void}	volume void
x_{ads}	fraksi komponen murni dalam lapisan tunggal <i>lattice</i> model
x_i	fraksi mol komponen i pada fasa teradsorp
$x_{i,b}$	fraksi molekul gas i yang menempati sel dalam lapisan <i>lattice</i> model
y_i	fraksi mol komponen i pada fasa gas
z	jarak dari molekul ke permukaan adsorben
Z	faktor kompresibilitas
z_0	angka koordinasi pada <i>lattice</i> model
z_1	angka koordinasi paralel yang menunjukkan nomor sel tetangga terdekat dalam arah paralel
δ	koefisien ekspansi termal
ϵ^*	potensial Lennard-Jones
ϵ_{ii}	energi interaksi antar adsorbat

ϵ_{is}	energi interaksi antara adsorbat – adsorben
Φ	potensial adsorbat - adsorben
ρ	densitas
ρ_{ads}	densitas fasa teradsorp
ρ_{mc}	densitas fasa teradsorp pada kapasitas adsorpsi maksimum



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 LATAR BELAKANG

Efek rumah kaca merupakan salah satu masalah lingkungan yang saat ini menjadi sorotan utama masyarakat dunia. Gas utama yang mengakibatkan efek rumah kaca adalah karbon dioksida (CO₂), yaitu sekitar 45% - 50%. Indonesia sendiri merupakan negara dengan emisi CO₂ terbesar di Asia Tenggara, dimana pada tahun 1990 adalah sekitar 300 juta ton/tahun, dan diprediksi pada tahun 2012 menjadi 700 juta ton/tahun (PE-UI, 2006). Padahal negara kita berkomitmen untuk mengurangi emisi gas CO₂ sebagai perwujudan ratifikasi Protokol Kyoto di tahun 2004, yaitu sebesar 6% dari tingkat emisi tahun 1990, dengan batas waktu 2012. Oleh karena itu diperlukan media penyimpan gas CO₂ yang sesuai di Indonesia, salah satunya adalah *coal bed*.

Penyimpanan gas CO₂ pada *coal bed* selain berguna untuk mengurangi emisi gas CO₂, juga dapat mendorong produksi gas metana dari *coalbed* yang memberi dampak positif sebagai sumber energi alternatif baru. Dari hasil penelitian di USA, terbukti bahwa teknologi injeksi CO₂ ini dapat menyimpan gas tersebut sebanyak 8.8 Gt dan menghasilkan gas metana sebesar 55 TCF. Dan menurut penelitian yang dilakukan oleh *Advance Research Institute*, Indonesia adalah urutan ke-enam dari negara – negara di dunia yang berpotensi untuk menerapkan teknologi penginjeksian CO₂ ke dalam *coalbed methane* (Stevens, et.al, 1999).

Namun sayangnya di Indonesia sendiri saat ini belum ada penelitian mengenai kapasitas adsorpsi batubara Indonesia, berbeda dengan beberapa negara lain yang telah mengembangkan penelitian ini, seperti di Amerika Serikat yang meneliti mengenai adsorpsi tekanan tinggi pada batubara sejak tahun 1990 dan masih berlanjut sampai saat ini (Arii, 1992; Hall, 1994; Gasem 2003) serta penelitian mengenai kapasitas adsorpsi CO₂ pada beberapa batubara di Belanda yang dilakukan oleh Krooss, et.al. Padahal informasi mengenai kapasitas adsorpsi

dari batubara tertentu di Indonesia pada berbagai kondisi operasi sangat diperlukan guna mengoptimalkan penggunaan teknologi injeksi CO₂ pada batubara. Oleh karena itu diperlukan suatu model adsorpsi CO₂ untuk memprediksi potensi *coalbed* Indonesia sebagai media penyimpan gas rumah kaca.

Penelitian yang telah dilakukan oleh Sudibandriyo pada tahun 2003 telah berhasil mendapatkan suatu model umum adsorpsi gas pada batubara Amerika. Dengan model ini dapat diprediksi kemampuan adsorpsi batubara pada tekanan tinggi di berbagai temperatur, berdasarkan pada satu isoterm adsorpsi pada tekanan rendah. Model ini juga mengkorelasikan kapasitas adsorpsi dengan karakteristik batubara, seperti luas permukaan, kandungan air, karbon tetap, hidrogen, dan oksigen.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, peneliti tertarik untuk melakukan penelitian mengenai model adsorpsi CO₂ pada *coalbed* di Indonesia dengan mengacu pada hasil penelitian terdahulu. Penelitian ini diharapkan dapat memprediksi kapasitas adsorpsi CO₂ pada *coalbed* Indonesia sepanjang tersedianya informasi karakteristik batubara tersebut, sehingga mampu membantu optimalisasi proses penyimpanan gas tersebut, yang pada akhirnya dapat menanggulangi permasalahan emisi CO₂ di negara ini.

I.2 RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan yang ada sebagai berikut:

- Belum adanya informasi mengenai kapasitas adsorpsi batubara Indonesia pada berbagai kondisi operasi.
- Belum adanya model yang dapat mengkorelasikan antara kapasitas adsorpsi dengan karakteristik pada batubara Indonesia secara akurat.

I.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan khusus dari penelitian ini adalah mendapatkan informasi mengenai kapasitas adsorpsi CO₂ pada *coalbed* Indonesia dengan cara :

- mendapatkan informasi daya adsorpsi batubara pada tekanan tinggi sampai dengan 60 atm.

- membuat model adsorpsi CO₂ pada batubara.

I.4 BATASAN MASALAH

Batasan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah:

- Batubara yang digunakan dalam penelitian ini adalah batubara Ombilin dan Barito.
- Kondisi operasi adsorpsi CO₂ dalam penelitian ini adalah pada kondisi super kritis dan tekanan tinggi (60 atm).
- Pemodelan adsorpsi CO₂ pada penelitian ini menggunakan model Ono – Kondo yang didasarkan pada *Lattice Theory* (Sudibandriyo, 2003).

I.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.

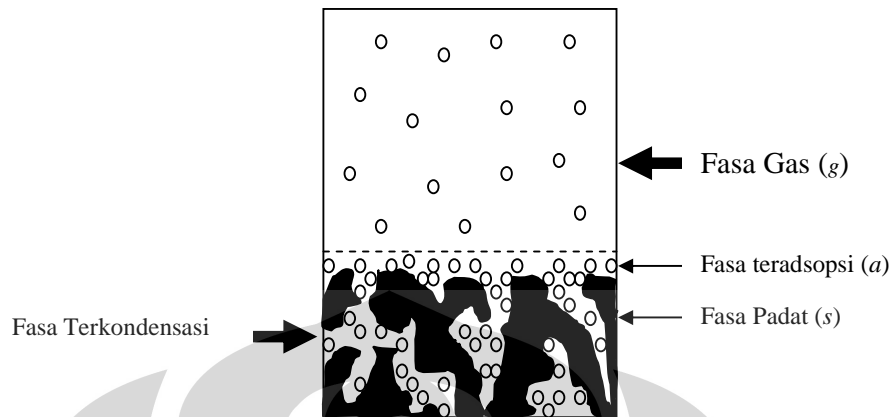
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 ADSORPSI

Adsorpsi termasuk dalam proses separasi dimana komponen-komponen tertentu dari suatu fasa fluida berpindah ke permukaan zat padat yang menyerap (adsorben). Biasanya partikel-partikel kecil zat penyerap ditempatkan di dalam suatu hampan tetap (*fixed bed*), dan fluida lalu dialirkan melalui hampan tersebut sampai adsorben itu mendekati jenuh dan pemisahan yang dikehendaki tidak dapat lagi berlangsung. Aliran itu lalu dipindahkan ke hampan kedua sampai adsorben jenuh tadi dapat diganti atau diregenerasi. (Mc Cabe et al. 1999). Adsorpsi biasanya dilakukan pada *fixed vertical beds* dari adsorben granular yang berpori (Walas 1990).

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. Gambar 2.1. menunjukkan fenomena adsorpsi gas pada suatu bahan berpori seperti yang telah dijelaskan di atas



Gambar 2.7 Adsorpsi gas pada bahan berpori (Sudibandriyo, 2003)

II.1.1 Jenis-Jenis Adsorpsi

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

a. Adsorpsi Fisis

Adsorpsi fisis 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 fisis, 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.

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.

Perbedaan antara adsorpsi kimia dan fisika dapat dilihat pada Tabel II.1 berikut ini:

Tabel II.3 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	Kurang dari 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
11.	Kegunaan	Untuk penentuan luas permukaan dan ukuran pori	Untuk penentuan daerah pusat aktif dan penjelasan kinetika reaksi permukaan

II.1.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi

Jumlah fluida yang teradsorpsi pada permukaan adsorben dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut ini: (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, berdasarkan prinsip Chatelier.

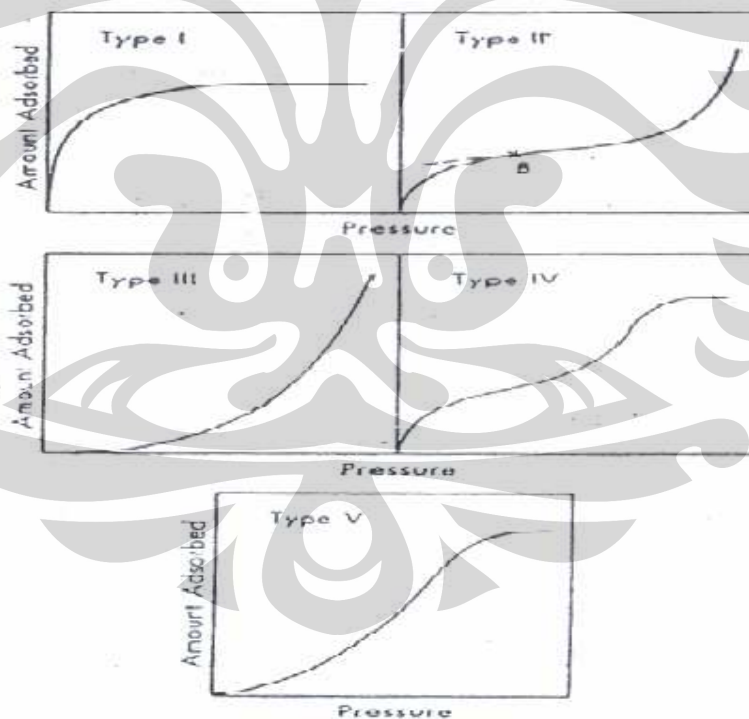
4. Tekanan adsorbat

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.

II.1.3 Kesetimbangan 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 teradsorpsi dalam padatan adsorben. Data kesetimbangan adsorpsi yang dihasilkan pada temperatur konstan biasa disebut adsorpsi isotermis, dimana terdapat hubungan antara jumlah zat yang teradsorpsi per unit massa padatan dan tekanan gas adsorbatnya. Adsorpsi isotermis dapat dihitung dengan mengukur tekanan adsorbat pada saat awal (sebelum terjadi kesetimbangan) dan pada saat terjadinya kesetimbangan. (Bahl et al. 1997, Sundstrom dan Herbert 1979, Ruthven 1993)

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



Gambar 2.8 Kurva adsorpsi isotermis Langmuir dan BET

- Tipe I
Jenis ini disebut *Langmuir Isoterm* 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.

II.1.4 Model-Model Adsorpsi

II.1.4.1 Model Adsorpsi Isotermis Absolut

a. Model Adsorpsi Langmuir

Langmuir isotermal dikembangkan oleh Irving Langmuir pada tahun 1916 untuk menggambarkan hubungan permukaan yang ditutupi oleh gas adsorbat pada tekanan gas di atas permukaan pada temperatur yang tetap. Pada adsorpsi isotermis

Langmuir, tipe adsorpsi isotermis yang digunakan adalah tipe I. Adsorpsi isotermis Langmuir digunakan pada adsorpsi kimia dan adsorpsi fisis tipe I.

Persamaan umum yang digunakan pada Langmuir adalah :

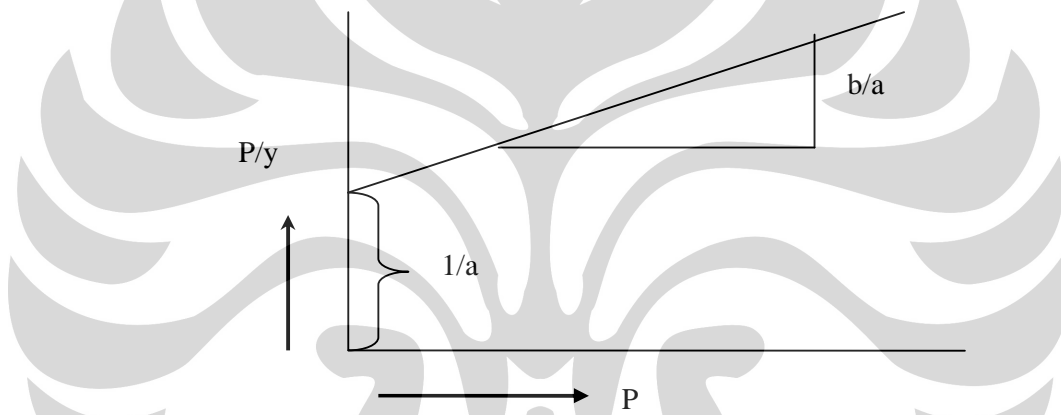
$$\frac{P}{y} = \frac{1}{a} + \frac{b}{a}P \quad (2.1)$$

dimana:

a dan b adalah konstanta

$$a = k_1 \cdot b$$

b = k_1/k_2 dengan k_1 adalah konstanta proporsionalitas dan k_2 adalah konstanta laju evaporasi



Gambar 2.9 Grafik isoterm Langmuir

Persamaan Langmuir diatas didasarkan pada asumsi :

- 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

b. Model Adsorpsi BET

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 fisis. Pada tipe ini, adsorben dapat dilapisi oleh beberapa lapisan molekul gas adsorbat (multimolekular atau *multilayer*). Persamaan dari BET adalah :

$$\frac{P}{v(P^0 - P)} = \frac{1}{v_m c} + \left(\frac{c-1}{v_m c} \right) \frac{P}{P^0} \quad (2.2)$$

dimana:

P = tekanan gas saat teradsorpsi

Po = tekanan jenuh adsorbat gas pada temperatur percobaan

V = volume gas yang diadsorp pada tekanan P

Vm = Volume gas yang diadsorp untuk monolayer

c = konstanta yang dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$c = e^{(E_1 - E_L) / RT} \quad (2.3)$$

E₁ = Panas adsorpsi lapisan 1

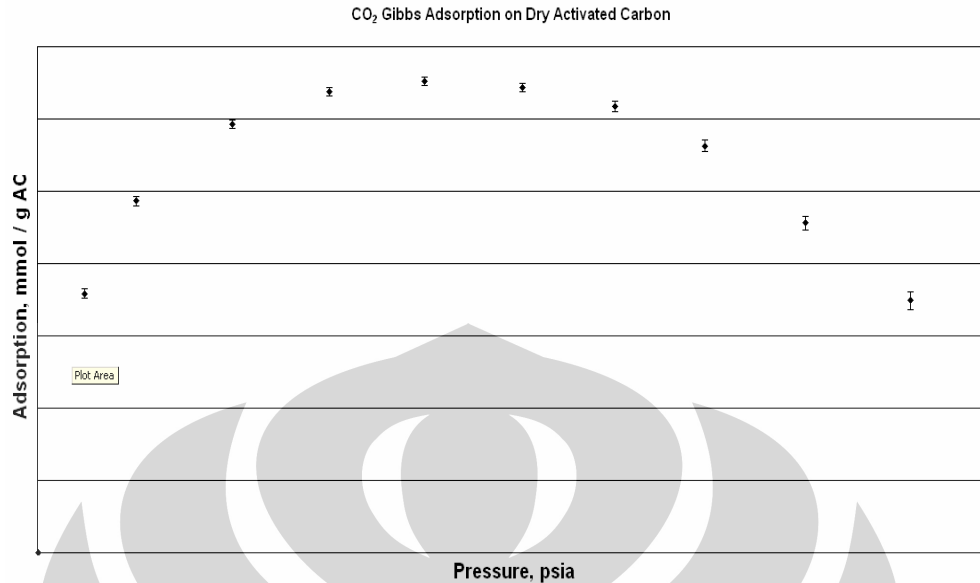
E_L = panas pencairan gas pada lapisan lain

Pada tipe IV dan V terdapat proses kondensasi gas di pori-pori adsorben, sementara pada proses II dan III tidak terdapat proses tersebut. Sementara itu, pada tipe II dan IV E₁ > E_L dan pada tipe III dan V E₁ < E_L.

II.1.4.2 Model Adsorpsi Isotermis Gibbs

a. Model Adsorpsi Isotermis Gibbs

Adsorpsi isotermis Gibbs berbeda 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 sudah melebihi dari tekanan dimana terdapat titik maksimum, maka jumlah mol gas yang teradsorpsi per gram adsorben akan turun seperti pada gambar 2.4 di bawah ini:



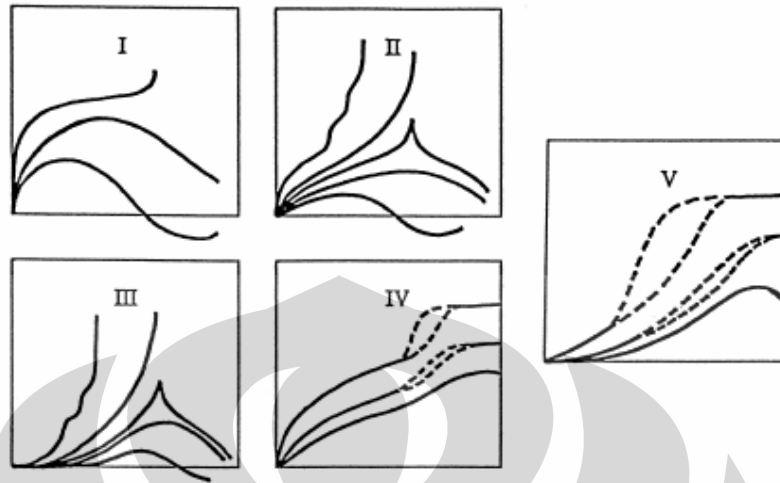
Gambar 2.10 Grafik adsorpsi isotermis Gibbs

Hubungan antara jumlah mol yang teradsorpsi per gram adsorben pada adsorpsi Gibbs dan jumlah mol yang teradsorpsi per gram adsorben absolut adalah sebagai berikut:

$$n_{Gibbs} = n_{absolute} \times \left(1 - \frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads}} \right) \quad (2.4)$$

Pada tekanan rendah, densitas gas sangat kecil (jauh lebih kecil daripada densitas adsorpsi) sehingga $\frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads}}$ bisa dianggap nol dan n_{Gibbs} sama dengan $n_{absolute}$ sehingga n_{Gibbs} terus mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan tekanan. Namun, pada tekanan tinggi, $\frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads}}$ tidak bisa dianggap nol sehingga nilai n_{Gibbs} akan menurun seiring dengan kenaikan tekanan walaupun harga $n_{absolute}$ naik.

Adsorpsi Gibbs juga terdiri dari 5 tipe (sama seperti adsorpsi Langmuir atau BET). Berikut ini adalah tipe-tipe adsorpsi isotermis Gibbs secara kualitatif: (Donohue dan Aranovich, 1999)



Gambar 2.11 Kurva adsorpsi isoteremis Gibss

Pada gambar di atas, absisnya adalah tekanan dan ordinatnya adalah jumlah zat yang teradsorpsi. Pada klasifikasi ini, Tipe I menunjukkan adsorpsi isoteremis pada adsorben mikropori untuk kondisi subkritis, dekat dengan titik kritis, dan superkritis. Pada kondisi superkritis, adsorpsi isoteremis tidak monoton. Tipe II dan III menunjukkan adsorpsi isoteremis pada adsorben makropori dengan afinitas kuat dan lemah. Pada temperatur rendah, Tipe II dan Tipe III mempunyai *steps*, tetapi dengan temperatur yang lebih tinggi kurva tersebut menjadi monoton (seperti pada tipe II dan tipe III adsorpsi isoteremis BET). Tetapi, di dekat temperatur kritis, adsorpsi isoteremis tipe II dan tipe III ini berubah secara signifikan menjadi tidak monoton yang menunjukkan adanya titik maksimum yang tajam dan pada temperatur yang lebih tinggi menunjukkan adanya titik maksimum yang *smooth*. Tipe IV dan V menunjukkan adsorpsi isoteremis pada adsorben mesopori dengan afinitas yang kuat dan lemah. (Donohue dan Aranovich, 1999)

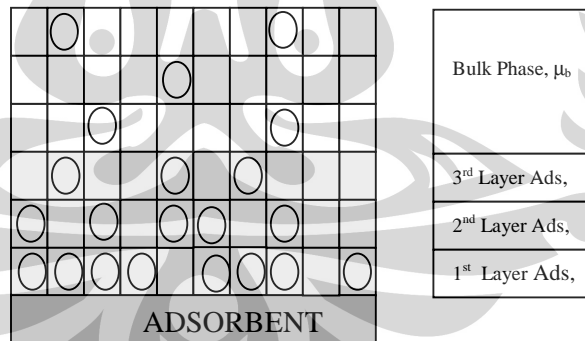
b. Model Adsorpsi Ono-Kondo

Model Ono-Kondo pertama kali dikenalkan pada tahun 1960. Model ini kemudian digunakan oleh Donohue, dkk (1996, 1997, 1999) untuk pemodelan adsorpsi komponen pada suatu larutan. 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:

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

Di dalam model kisi-kisi, sistem fluida diasumsikan terdiri dari beberapa lapisan kisi-kisi yang dapat terisi oleh molekul fluida ataupun hanya berupa ruang kosong. Pada kasus terjadinya adsorpsi (lihat Gambar 2.6), jumlah molekul yang lebih banyak akan berada pada lapisan fasa teradsorpsi daripada yang berada pada fasa gas (bulk)



Gambar 2.12 Adsorpsi multilayer (Sudibandriyo, 2003)

Pada model adsorpsi Ono-Kondo, kesetimbangan adsorpsi gas untuk lapisan pertama dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\ln\left[\frac{x_1(1-x_b)}{x_b(1-x_1)}\right] + (z_1x_1 + x_2 - z_0x_b)\epsilon_{ii}/kT + \epsilon_{is}/kT = 0 \quad (2.5)$$

Pada persamaan ini $x_{i,t} = \rho_{i,t} / \rho_{i,mc}$ dan $x_{i,b} = \rho_{i,b} / \rho_{i,mc}$, dimana $\rho_{i,t}$ adalah densitas komponen i yang teradsorpsi pada lapisan t , $\rho_{i,b}$ adalah densitas komponen i

yang teradsorpsi pada fasa gas, dan $\rho_{i,mc}$ adalah densitas komponen i yang teradsorpsi pada kapasitas maksimumnya. Parameter yang menunjukkan interaksi energi antara adsorbate-adsorbate dituliskan sebagai ε_{ii} , dan parameter interaksi energi antara adsorbate-adsorbent dituliskan sebagai ε_{is} . T adalah temperatur absolut dan k adalah konstanta Boltzman.

Sedangkan total adsorpsi Gibbs dihitung dengan menggunakan:

$$n_i^{Gibbs} = C_i \sum_{t=1}^m (x_{i,t} - x_{i,b}) \quad (2.6)$$

Pada persamaan di atas, parameter C merepresentasikan kapasitas maksimum dari adsorben dan bisa juga dianggap sebagai parameter yang berhubungan dengan fraksi pori aktif ataupun sifat struktur lain di dalam adsorben. Jumlah lapisan, m , bagaimanapun, adalah khas untuk sistem adsorbat-adsorben tertentu dan perlu didefinisikan sebelum menggunakan model tersebut di atas. Ini biasanya ditentukan dengan menggunakan angka yang dapat merepresentasikan data percobaan adsorpsi yang paling baik.

Dari pembahasan di atas, dapat disimpulkan bahwa terdapat empat parameter di dalam model Ono-Kondo, yaitu ρ_{mc} , ε_{ii}/k , ε_{is}/k dan C . Dari empat parameter tersebut, dua parameter dapat diestimasi harganya menurut literatur yaitu: (Sudibandriyo, 2003)

- ρ_{mc} = mendekati harga kebalikan dari van der Waals co volume.
- $\varepsilon_{ii} = 0.432\varepsilon^*$, dimana ε^* adalah parameter dalam potensial Lennard-Jones.

Sedangkan dua parameter lain, yaitu ε_{is}/k dan C masih diperlukan kajian lebih dalam untuk mengkorelasikannya dengan beberapa karakteristik adsorbat dan adsorben.

II.1.5 Adsorben

Adsorben dapat didefinisikan sebagai zat padat yang dapat menyerap komponen tertentu dari suatu fase 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 $2000 \text{ m}^2/\text{g}$. Pemisahan terjadi karena perbedaan bobot molekul atau karena perbedaan polaritas yang menyebabkan sebagian molekul melekat pada permukaan tersebut lebih erat daripada molekul lainnya.

Terdapat banyak sekali zat yang biasa digunakan sebagai adsorben. 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 BaSO_4 atau penghalusan padatan kristal. Luas permukaan spesifiknya kecil, tidak lebih dari $10 \text{ m}^2/\text{g}$, umumnya antara 0,1 sampai dengan $1 \text{ m}^2/\text{g}$. 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 m^2/g .

2. Adsorben berpori

Luas permukaan spesifik adsorben berpori berkisar antara 100 s.d. $1000 \text{ m}^2/\text{g}$. Biasanya dipergunakan sebagai penyangga katalis, dehidrator, dan penyeleksi komponen. Adsorben ini umumnya berbentuk granular.

Klasifikasi pori yang sering digunakan :

- Mikropori : diameter $< 2 \text{ nm}$
- Mesopori : diameter $2 - 200 \text{ nm}$
- Makropori : diameter $> 200 \text{ nm}$

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

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

- Memiliki permukaan yang besar per unit massa sehingga kapasitas adsorpsinya tinggi
- Secara alamiah dapat berinteraksi dengan adsorbat

- Ketahanan struktur fisik yang tinggi
- Mudah diperoleh, harga tidak mahal, tidak korosif, tidak beracun
- Tidak ada perubahan volume yang berarti selama adsorpsi, regenerasi
- Mudah dan ekonomis untuk diregenerasi

Tabel II.2 di bawah ini menginformasikan tentang karakteristik adsorben beserta kegunaan dan kerugian adsorben:

Tabel II.4 Tipe, Karakteristik, Kegunaan, Dan Kerugian Adsorben

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

II.2 BATUBARA SEBAGAI ADSORBEN

Batubara adalah bahan bakar fosil yang didapat dari dalam tanah dengan penambangan dasar bumi. Batubara merupakan batuan sedimentasi berwarna hitam atau hitam kecoklatan yang mudah terbakar, terbentuk dari endapan, batuan organik yang terutama terdiri dari karbon, hidrogen, dan oksigen. Batubara terbentuk dari tumbuhan yang telah terkonsolidai antara strata batuan lainnya dan diubah oleh kombinasi pengaruh tekanan dan panas selama jutaan tahun sehingga membentuk lapisan batubara.

Pada batubara, karbon membentuk lebih dari 50% berat dan 70% volume (termasuk *moisture*). *Moisture* yang dimaksud adalah air yang terperangkap di antara partikel-partikel batubara. Besar presentase bergantung pada tingkat mutu batubara, dimana batubara dengan mutu yang tinggi akan mengandung sedikit hidrogen, oksigen, dan nitrogen dengan kemurnian sampai 95% terdapat pada lapisan *Anthacite*.

II.2.1 Jenis-Jenis Batubara

Jenis-jenis batubara berdasarkan bentuk dan kandungan di dalamnya dibagi menjadi empat jenis, yaitu: (Kumar, et.al, 2004)

- *Lignite* merupakan batubara coklat, agak lembut, dan batubara dengan jenis maturitas organik rendah, mutu yang terendah dari batubara lainnya.
- *Sub-bituminous coal* – Hasil dehidrogenasi dan metanogenesis dari lignite. memiliki tingkat maturitas organik yang lebih tinggi, lebih keras, dan warnanya lebih gelap dari *lignite*. Range sifat-sifatnya adalah antara *bituminous* dan *lignite*.
- *Bituminous coal* – Reaksi lanjut dari dehidrogenasi pada pembentukan dan pemisahan gas metana dan gas hidrokarbon lebih tinggi seperti etana, propana, dan lainnya akan membentuk jenis batubara ini.
- *Anthracite* – Tahap akhir dimana proses pembentukan batubara telah sempurna akan membentuk jenis ini. Merupakan batubara dengan mutu tertinggi.

II.2.2 Struktur Batubara

Struktur kimia dan fisika dari batubara adalah sebagai berikut: (Sudibandriyo, 2003)

- a. *Lithotype region*, tersusun atas hidrokarbon organik yang memiliki perbedaan dalam densitas, reflektivitas, kekuatan, dan volatilitas.
- b. *Lithotype boundaries*, tersusun atas komposisi non-hidrokarbon yang memiliki densitas 50% lebih besar dari komposisi yang terdapat pada *lithotype*.
- c. *Microscopic organic region*, merupakan bahan pembangun *lithotype*.
- d. Pori-pori, merupakan rongga antara susunan zat organik dengan ukuran dan bentuk yang bervariasi. Pori-pori mempengaruhi kekuatan, densitas, properti perpindahan molekular, serta kapasitas adsorpsi batubara.

II.2.3 Kegunaan Batubara

Salah satu contoh kegunaan batubara sebagai adsorben adalah sebagai media penyimpan gas CO₂ untuk mengurangi emisi gas rumah kaca.

Penyimpanan CO₂ dalam batubara memiliki beberapa keuntungan, yaitu: (Stanton, Flores)

- Injeksi CO₂ dapat meningkatkan produksi metana dari batubara
- Batubara dapat mengikat atau menyimpan CO₂ dalam waktu yang lama
- Umumnya sumber emisi CO₂ berada dekat dengan daerah penghasil batubara

II.3 Gas Metana Batubara (*Coal Bed Methane*)

Coalbed Methane (CBM) atau gas metana batubara merupakan gas metana yang terbentuk dari aktivitas mikrobial (*biogenic*) atau panas (*thermogenic*) selama proses pembentukan batubara yang umum ditemui atau terperangkap di dalam lapisan batubara dan merupakan salah satu sumber daya energi bersih lingkungan yang telah dimanfaatkan di berbagai negara. Adapun gas lain yang juga ditemukan dalam *coalbed* atau *coalbed gas* yaitu gas etana, propana, butana, karbondioksida, dan nitrogen.

Gas metana batubara terbentuk dengan beberapa tahapan. Selama tahap awal pembentukan batubara, metana biogenik terbentuk dari *by-product* respirasi bakteri. Bakteri aerobik terlebih dahulu memetabolis oksigen yang tersisa pada sisa-sisa tanaman dan sedimen sekitar. Namun, dalam lingkungan air tawar, produksi gas metana mulai terbentuk setelah oksigen habis (Rice dan Claypool, 1981). Spesies bakteri anaerobik kemudian mengurangi karbondioksida dan menghasilkan gas metana melalui pernapasan anerobik (Rice dan Claypool, 1981). Ketika batubara mencapai temperatur sekitar 122°F, dan setelah beberapa lama, gas metana biogenik terbentuk. Pada waktu yang hampir bersamaan, sekitar dua pertiga kelembabannya dikeluarkan dan batubara telah mencapai tingkatan subbituminous (Rightmire, 1984).

Setelah batubara telah melebihi temperatur 122°F berdasarkan gradien geothermal, proses termogenik mulai membentuk tambahan gas berupa karbondioksida, nitrogen, metana, dan air. Pada tahap ini sejumlah hidrokarbon atau zat volatile meningkat dan mencapai *coal rank* bituminous (Rightmire, 1984). Kemudian setelah temperatur lebih dari 210°F, produksi gas karbondioksida juga meningkat dengan sedikit penambahan produksi gas metana. Produksi termogenik

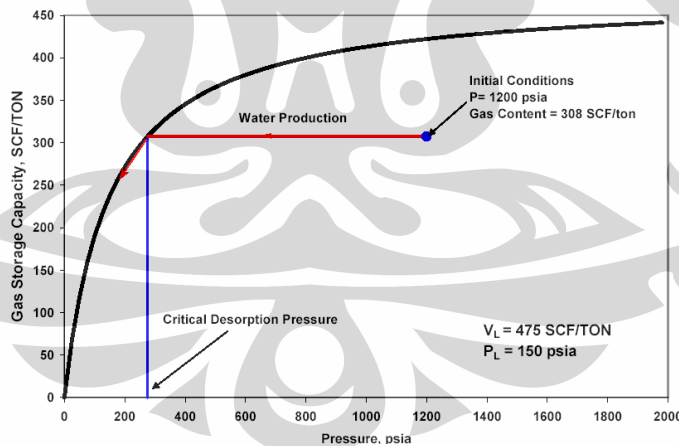
tidak melebihi produksi karbondioksida pada tingkatan batubara volatile tinggi hingga mencapai temperatur sekitar 250°F. pembentukan maksimum gas metana pada batubara bituminous terjadi pada temperatur sekitar 300°F (Rightmire, 1984).

Beberapa bagian karakteristik dari CBM adalah sebagai berikut :

- Penyimpanan

Mikropori batubara adalah tempat penyimpanan gas metana dalam jumlah besar. Jadi, batubara dapat menyimpan gas jauh lebih banyak dibandingkan pada reservoir konvensional yang terkompresi pada tekanan di bawah 1000 psia. Selain itu, porositas *cleat* kecil, dan jika terdapat gas, maka hal tersebut tidak signifikan. Kebanyakan gas pada batubara disimpan oleh adsorpsi *matrix* (sistem mikropori) batubara.

Gas content pada batubara diukur dengan tes desorpsi yang meliputi inti batubara, menempatkannya pada wadah, dan mengukur gas yang terkandung. Jika *gas content* tersebut berada di bawah kesetimbangan dengan isotherm, seperti yang digambarkan pada gambar 2.7, maka tidak akan ada gas dan *cleat* akan terisi dengan air.

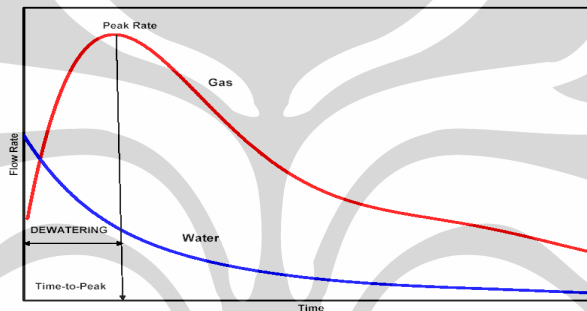


Gambar 2.7 Langmuir isotherm (K.Aminian, 2003)

- Produksi

Perilaku produksi *coalbed methane* itu kompleks dan sulit untuk diprediksi dan dianalisis. Hal tersebut karena produksi gas dari reservoir CBM ditentukan oleh interaksi kompleks fasa tunggal difusi gas melalui sistem

mikropori (*matrix*) dan dua fasa aliran gas dan cair melalui sistem makropori (*cleat*), yang keduanya melalui proses desorpsi. Sehingga, teknik pada reservoir konvensional tidak dapat digunakan untuk memprediksi produksi CBM. Cara yang terbaik untuk memprediksi performansi reservoir CBM adalah simulator reservoir numerik yang menggabungkan aliran dan karakteristik penyimpanan (kapasitas adsorpsi) serta perhitungan untuk variasi mekanisme yang mengontrol produksi CBM. Selain itu, teknik penyesuaian dengan simulator adalah salah satu kunci dalam menentukan parameter reservoir yang seringkali sulit didapatkan dengan metode lain.



Gambar 2.8 Produksi sebuah reservoir CBM (K.Aminian, 2003)

Adapun karakteristik batubara yang cocok untuk produksi CBM (Cockcroft, 2008)

1. Secara umum kandungan gas yang tinggi : $15 \text{ m}^3 - 30 \text{ m}^3$ per ton.
2. Umumnya permeabilitas batubara yang baik sekitar 30 mD-50 mD.
3. Dangkal : kedalaman lapisan batubara $< 1000 \text{ m}$. Tekanan pada kedalaman lebih dari $> 1000 \text{ m}$ seringkali terlalu tinggi yang mengakibatkan aliran gas walaupun ketika lapisan batubara telah di-*dewaterisasi*. Hal ini dikarenakan tingginya tekanan akibat struktur *cleat* yang berdekatan, mengurangi permeabilitas.
4. Tingkatan batubara : kebanyakan proyek CBM menghasilkan gas metana batubara dari batubara bituminous, namun tidak menutup kemungkinan untuk batubara jenis anthrasit.

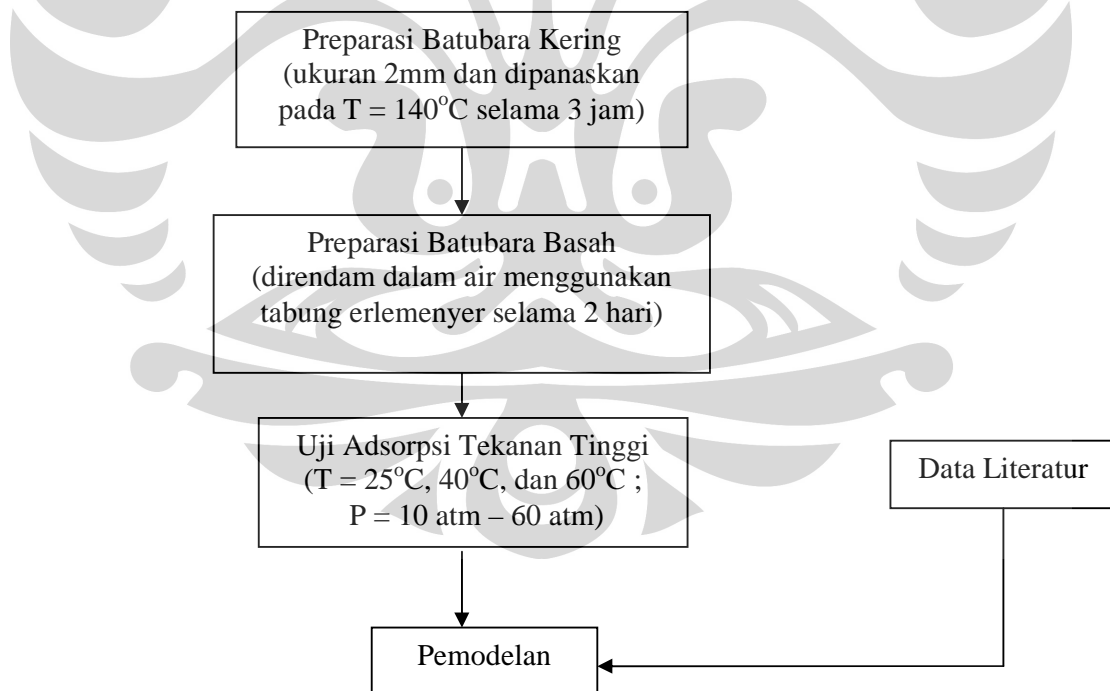
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini akan dibahas diagram alir proses penelitian, peralatan dan bahan yang digunakan, variabel penelitian, dan prosedur penelitian. Penelitian akan dilakukan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

III.1 ALUR PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan seperti diagram alir proses yang dapat dilihat pada skema alir di bawah ini. Untuk langkah-langkah yang lebih jelas dan lebih detail dapat dilihat pada bagian prosedur penelitian.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

III.2 ALAT DAN BAHAN

Dalam penelitian ini alat dan bahan yang akan digunakan adalah:

Alat:

1. Pemanas
2. Pengontrol suhu
3. Tabung adsorpsi
4. Indikator tekanan

Bahan:

1. Batubara Ombilin dan Barito
2. Helium
3. Karbon dioksida

III.3 PROSEDUR PENELITIAN

Prosedur penelitian ini terdiri dari 2 tahapan utama, yaitu percobaan yang terdiri dari preparasi batubara, preparasi batubara kering dan karakterisasi, dan uji adsorpsi tekanan tinggi batubara, serta pemodelan.

III.3.1 Percobaan

Dalam percobaan terdiri dari 3 tahap, yaitu:

a. Preparasi Batubara Kering

Dalam tahap ini diambil sampel batubara Ombilin dan batubara Barito masing-masing seberat 200 gram untuk digerus dengan menggunakan *grinder* dan diayak dengan ayakan 0,2 mm. Setelah halus, sampel tersebut dipanaskan dengan menggunakan pemanas pada temperatur 140°C selama tiga jam, sehingga akan didapatkan sampel batubara kering.

b. Preparasi Batubara Basah

Dalam tahap ini diambil sejumlah sampel batubara Ombilin dan batubara Barito kering untuk direndam di dalam air dengan menggunakan labu erlenmeyer selama dua hari. Setelah itu dicatat penambahan berat batubara, yang merupakan nilai kandungan air kesetimbangannya, dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\% \text{Kandungan Air} = \frac{m_{\text{awal}} - m_{\text{akhir}}}{m_{\text{batubara}}} \times 100\% \quad (3.1)$$

dimana : m_{awal} = massa sampel batubara kering dan labu erlenmeyer mula-mula

m_{akhir} = massa sampel batubara basah dan labu erlenmeyer akhir

m_{batubara} = massa sampel batubara kering

c. Uji Adsorpsi Tekanan Tinggi Batubara

Kedua sampel batubara (batubara kering dan batubara basah) ini kemudian diuji kemampuan adsorpsinya terhadap gas CO₂ pada tekanan tinggi (dari 10 atm sampai dengan 60 atm) dengan variasi temperatur dari 25°C – 60°C sehingga diperoleh kurva adsorpsi isothermal secara lengkap.

Untuk perhitungan jumlah gas yang teradsorpsi, maka digunakan persamaan

$$n_{\text{CO}_2 \text{ teradsorp}} = n_{\text{CO}_2 i} - n_{\text{CO}_2 \text{ tidak teradsorp}}$$

$$n_{\text{CO}_2 \text{ teradsorp}} = \left[\left(\frac{P_i}{Z_{\text{CO}_2 i} RT_i} - \frac{P_f}{Z_{\text{CO}_2 f} RT_f} \right) V_{\text{dozing cylinder}} \right] - \left[\frac{P_f V_{\text{void}}}{Z_{\text{CO}_2 f} RT_f} \right] \quad (3.2)$$

dimana $n_{\text{CO}_2 i}$ merupakan jumlah mol CO₂ yang diinjeksikan. Sedangkan untuk menghitung V_{void} maka dapat digunakan persamaan

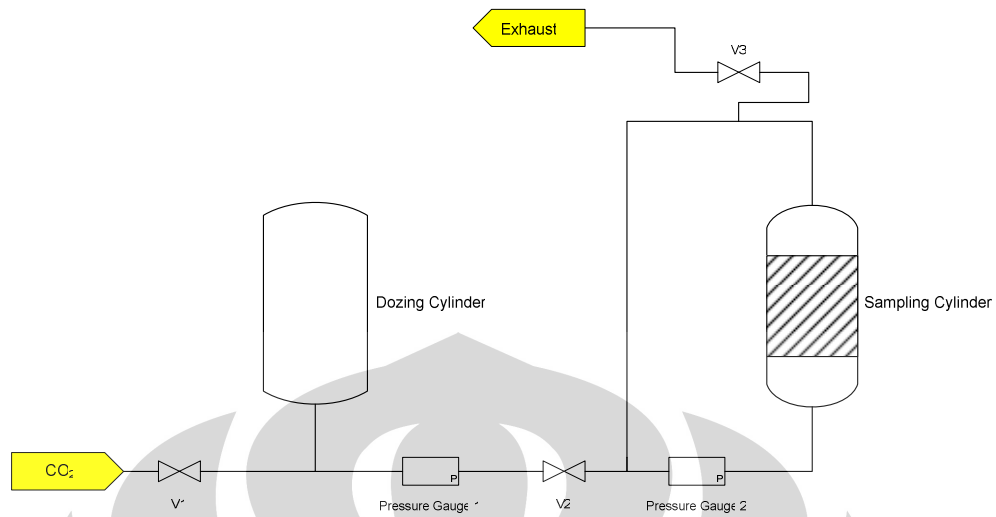
$$V_{\text{void}} = n_{\text{He}} \left(\frac{Z_{\text{He}} RT}{P} \right)_{\text{cell}} \quad (3.3)$$

dimana jumlah mol helium yang diinjeksikan ke dalam sel adalah:

$$n_{\text{He}} = \frac{V}{RT} \left(\frac{P_i}{Z_{\text{He},i}} - \frac{P_f}{Z_{\text{He},f}} \right) \quad (3.4)$$

dan volume *dozing cylinder* ditentukan dengan kalibrasi menggunakan air, dimana volume air yang mengisi *dozing cylinder* pada tekanan dan temperatur tertentu merupakan volume *dozing cylinder*.

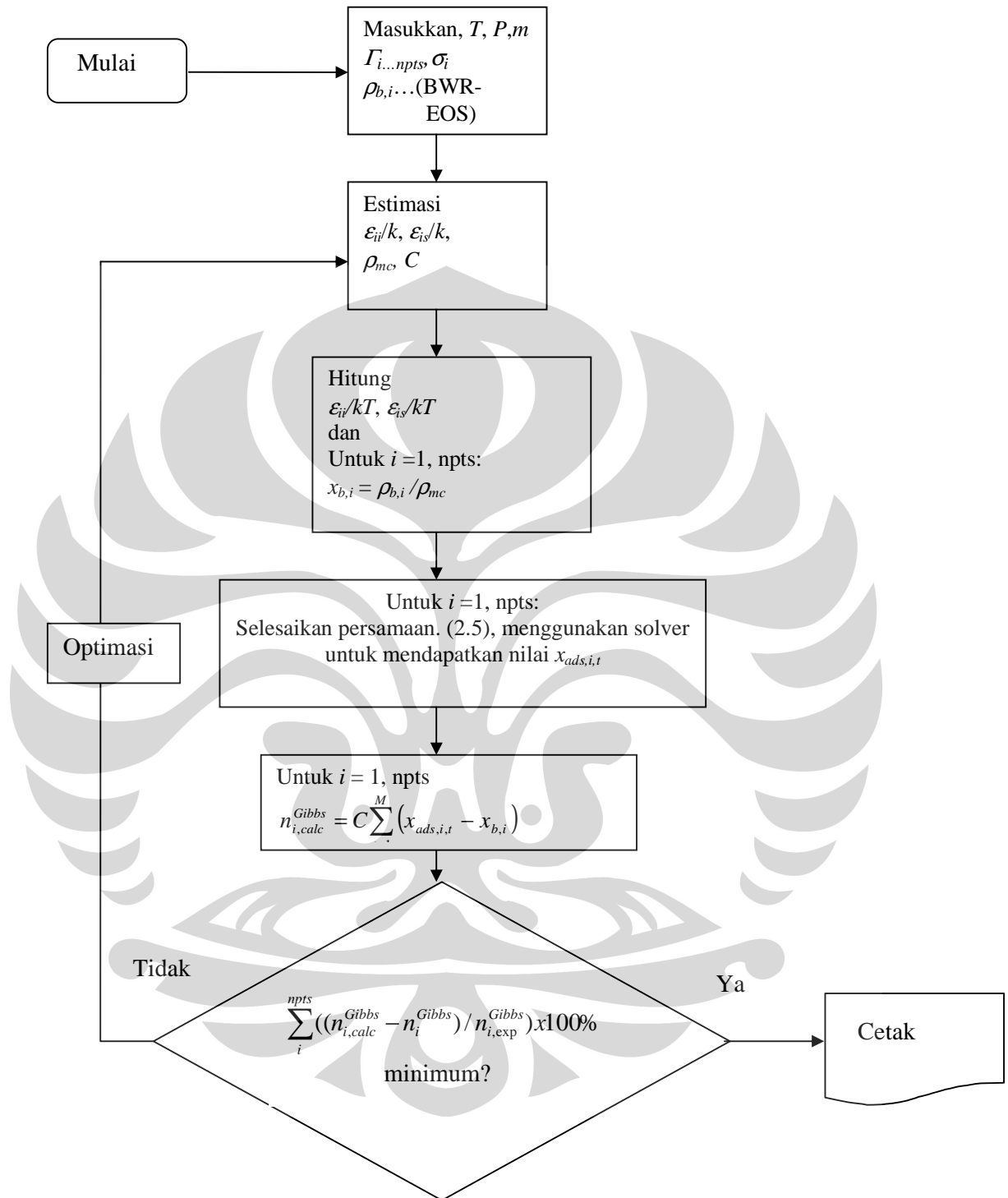
Peralatan adsorpsi gas pada tekanan tinggi ini menggunakan peralatan dari modifikasi peralatan autoclave yang dimiliki Departemen Teknik Kimia – FTUI. Skema alat untuk uji adsorpsi batubara tekanan tinggi adalah sebagai berikut:



Gambar 3.2 Skema alat untuk uji adsorpsi tekanan tinggi batubara

III.3.2 Pemodelan

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan model Ono-Kondo yang didasarkan pada Lattice Theory (Sudibandriyo, 2003). Algoritma pemodelan adalah sebagai berikut



Gambar 3.3 Algoritma pemodelan (Sudibandriyo, 2003)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 HASIL PREPARASI BATUBARA

Pada tahap pertama dari proses preparasi ini, batubara digerus menggunakan mortar sampai dengan ukuran 0,2 mm. Penghalusan batubara sampai dengan ukuran kecil ini dilakukan untuk mempermudah proses adsorpsi. Pori-pori kecil (mikropori) lebih diinginkan daripada makropori karena diameter pori yang besar akan menyebabkan luas area permukaan semakin kecil sehingga lebih sedikit gas CO₂ yang teradsorpsi. (Ding dan Bhatia, 2003).

Proses preparasi selanjutnya adalah pemanasan batubara. Pemanasan ini dilakukan dengan menggunakan oven pada temperatur 140°C selama tiga jam. Proses ini bertujuan untuk menguapkan molekul-molekul air dan pengotor lainnya yang terkandung pada batubara, sehingga akan didapatkan batubara kering tanpa kandungan air. Gambar 4.1 adalah sampel batubara yang telah dihaluskan,



Gambar 4.1 Sampel batubara 0,2 mm

Proses preparasi berikutnya adalah merendam sebagian dari batubara yang telah dikeringkan ke dalam wadah tertutup berisi air selama dua hari. Proses ini bertujuan untuk mendapatkan batubara basah dengan kandungan air kesetimbangannya. Sehingga dari proses kedua dan ketiga, akan didapatkan dua jenis batubara sebagai adsorben, untuk dilihat pengaruh kandungan air terhadap proses adsorpsi yang akan dilakukan. Kandungan air kesetimbangan untuk setiap jenis batubara dapat dilihat pada Tabel IV.1 di bawah ini,

Tabel IV.1 Persentase Kandungan Air Kesetimbangan

Jenis Batubara	% Kandungan Air
Batubara Barito Basah	7
Batubara Ombilin Basah	3

IV.2 HASIL PERSIAPAN PERALATAN ADSORPSI

Peralatan yang digunakan dalam proses adsorpsi ini terdiri dari satu buah *dozing cylinder*, *sampling cylinder*, tiga buah valve, pipa-pipa penghubung antara kedua silinder, dua buah *pressure gauge* yang berfungsi untuk mengukur tekanan pada kedua silinder, serta satu buah alat pengatur temperatur yang terhubung dengan termokopel. Gambar 4.2 menunjukkan rangkaian peralatan adsorpsi yang telah terpasang,



Gambar 4.2 Rangkaian peralatan uji adsorpsi

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.

IV.3 HASIL KALIBRASI VOLUME DOZING CYLINDER

Volume *dozing cylinder* diukur dengan memasukkan air ke *dozing cylinder* sampai penuh. Setelah penuh air dari *dozing cylinder* dimasukkan ke gelas ukur untuk mengetahui volume 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.

IV.4 HASIL KALIBRASI VOLUME VOID PADA SAMPLING CYLINDER

Untuk mengetahui *void volume*, maka dialirkan gas helium yang bersifat inert ke dalam *sampling cylinder* pada tekanan 900 psia dan temperatur 40°C. Setelah didapatkan data tekanan pada *dozing cylinder* dan *sampling cylinder*, pengukuran *void volume* dapat dihitung dengan persamaan berikut ini,

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

dengan

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

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 = 40 °C = 104 °F

$Z_{He,di}$ = faktor kompresibilitas pada kondisi P_{di} dan T

$Z_{He,df}$ = faktor kompresibilitas pada kondisi P_{df} dan T

Tabel IV.2 berikut ini menunjukkan data hasil *running* untuk menentukan *void volume*

Tabel IV.2 Hasil Kalibrasi Volume Void

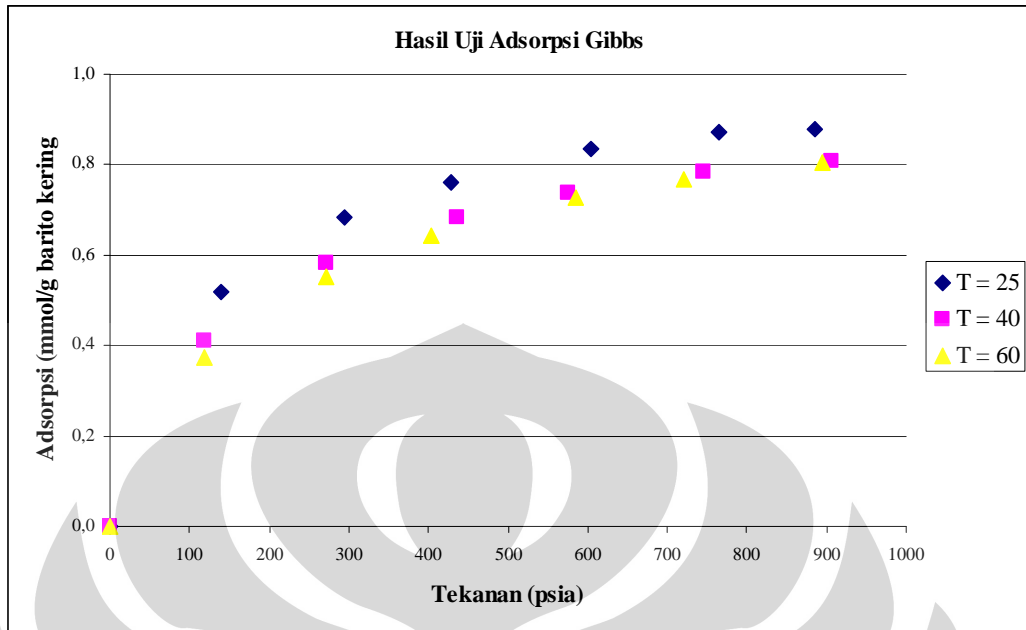
Jenis Batubara	Massa (gram)	P Dozing Awal (psia)	P Dozing Akhir (psia)	P Sampling Awal (psia)	P Sampling Akhir (psia)	Volume Void (ml)
Barito Kering	65	1091,25	901,43	925	953,99	93,8
Barito Basah	65,15	996,32	853,99	792,8	905,54	74,22
Ombilin Kering	65,3	1020,04	877,71	830,3	877,71	76,39
Ombilin Basah	65,5	1043,76	901,43	830,3	877,71	76,28

IV.5. HASIL UJI DAYA ADSORPSI

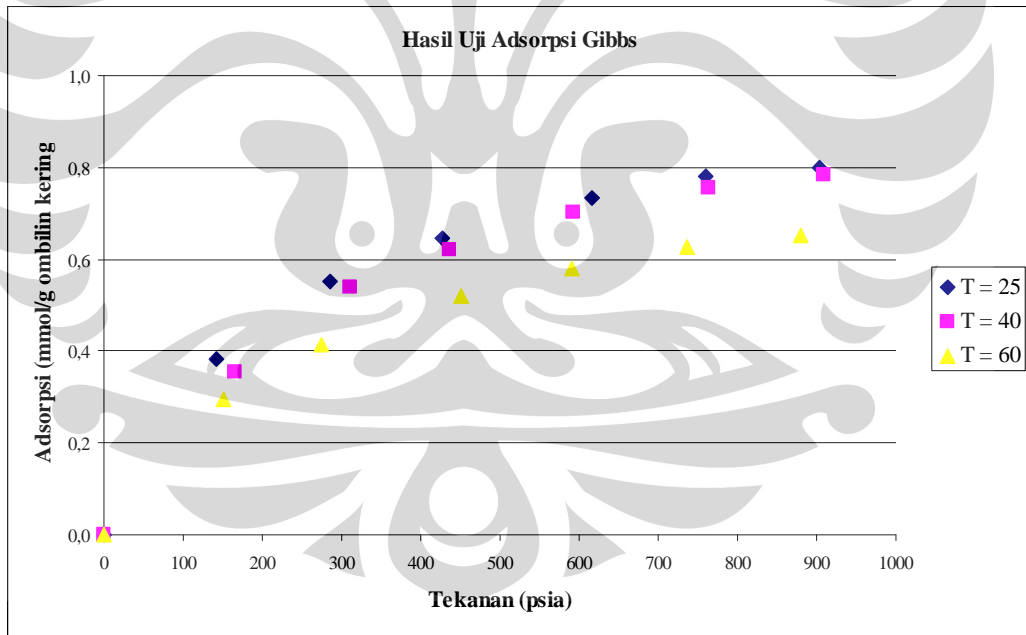
Adsorpsi yang terjadi dalam penelitian ini adalah adsorpsi fisika, dimana tidak terjadi reaksi kimia selama proses adsorpsi berlangsung. Sehingga proses adsorpsi hanya bergantung pada sifat fisis adsorbat (CO_2) dan karakteristik adsorben (batubara).

Dalam penelitian ini, uji daya adsorpsi dilakukan dengan variasi temperatur, tekanan, dan kandungan air, dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh ketiga variabel bebas tersebut terhadap proses adsorpsi. Data hasil penelitian adsorpsi untuk masing-masing sampel batubara dapat dilihat pada Lampiran.

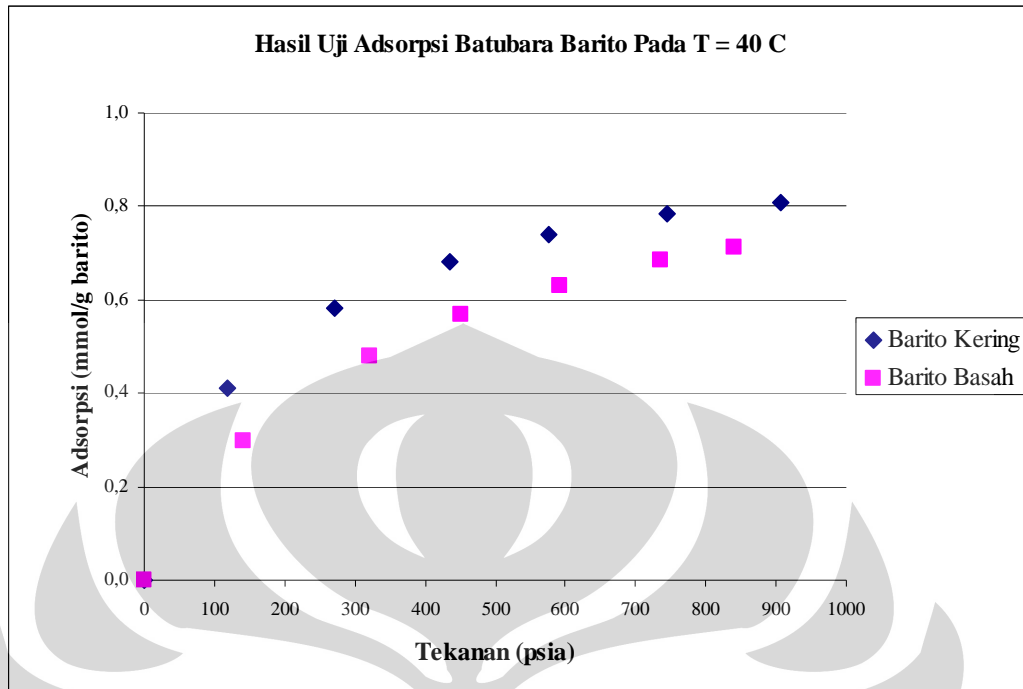
Gambar 4.3 sampai dengan Gambar 4.6 menunjukkan data jumlah CO_2 yang teradsorpsi pada batubara dalam berbagai temperatur dan tekanan tertentu:



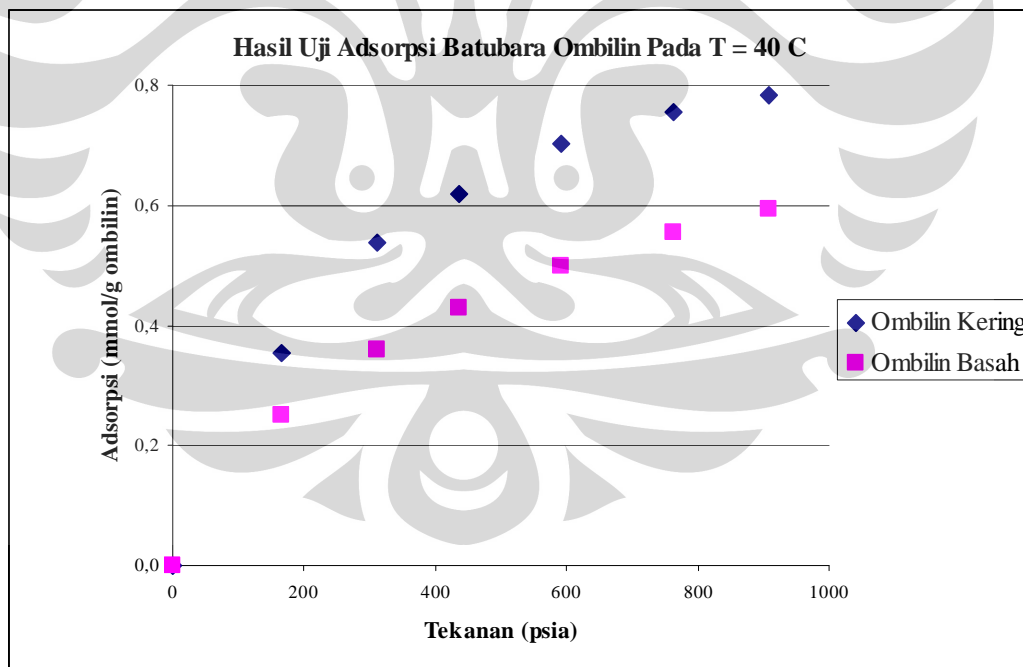
Gambar 4.3 Adsorpsi Gibbs CO₂ pada batubara Barito kering



Gambar 4.4 Adsorpsi Gibbs CO₂ pada batubara Ombilin kering



Gambar 4.5 Perbandingan hasil uji adsorpsi Gibbs CO₂ pada batubara Barito



Gambar 4.6 Perbandingan hasil uji adsorpsi Gibbs CO₂ pada batubara Ombilin

Dari keempat gambar di atas dapat dilihat bahwa jenis batubara, temperatur, tekanan, serta kandungan air berpengaruh terhadap proses adsorpsi.

IV.5.1 Pengaruh Jenis Batubara dalam Proses Adsorpsi

Berdasarkan hasil penelitian yang ditunjukkan oleh Gambar 4.3 dan Gambar 4.4, dapat dilihat bahwa proses adsorpsi berlangsung lebih baik pada batubara Barito daripada batubara Ombilin, meskipun perbedaannya tidak terlalu signifikan. Hal ini membuktikan bahwa batubara Barito memiliki jumlah mikropori yang lebih besar daripada batubara Ombilin. Semakin banyak jumlah mikropori, maka kapasitas adsorpsi akan semakin besar.

Sebenarnya batubara Barito dan batubara Ombilin masih tergolong dalam kategori *high volatile bituminous*, namun berdasarkan data literatur hasil analisa proximate dan ultimate, menunjukkan bahwa batubara Ombilin memiliki kadar *fixed carbon* sedikit lebih tinggi (46%) dibandingkan batubara Barito (39%). Sehingga dari data tersebut dapat dikatakan bahwa batubara Ombilin memiliki rank yang sedikit lebih tinggi daripada rank batubara Barito. Analisa proximate dan ultimate untuk kedua jenis batubara dapat dilihat di Lampiran.

Namun hasil penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan yang diungkapkan oleh Bustin dan Clarkson (1998) yang menyatakan bahwa hubungan linier antara rank batubara dengan kapasitas adsorpsi tidak dapat berlaku secara umum. Hasil penelitian ini juga memperkuat postulat bahwa daya adsorpsi batubara tidak secara signifikan linier terhadap rank dan komposisi batubara, melainkan bergantung kuat terhadap perkembangan struktur mikropori pada batubara tersebut (Crosdale et al., 1998).

Meskipun dalam penelitian ini belum dapat membuktikan bahwa batubara Barito mempunyai struktur mikropori yang lebih luas (yang menyebabkan daya adsorpsinya lebih tinggi), namun dari kandungan air kesetimbangan yang lebih besar serta volume void yang juga lebih tinggi (dalam satuan massa yang sama), mengindikasikan bahwa perkembangan struktur mikropori pada batubara Barito lebih baik daripada batubara Ombilin.

IV.5.2 Pengaruh Temperatur dan Tekanan dalam Proses Adsorpsi

Dari Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa kenaikan temperatur dalam proses adsorpsi pada jenis batubara yang sama akan menurunkan jumlah CO₂ yang teradsorpsi pada batubara. Penurunan ini terjadi karena dalam proses adsorpsi, semakin tinggi temperatur, pergerakan molekul gas semakin cepat, sehingga lebih sulit untuk teradsorpsi. Selain itu proses adsorpsi merupakan proses eksotermis, sehingga kenaikan temperatur akan mengurangi jumlah adsorbat yang teradsorpsi (Bahl et al., 1997 dan Treybal, 1980).

Kedua gambar di atas juga menunjukkan bahwa seiring dengan kenaikan tekanan, nilai adsorpsi meningkat. Hal ini terjadi karena dalam proses adsorpsi, peningkatan nilai tekanan, akan mengakibatkan molekul gas menjadi mampat, sehingga gerakan molekulnya akan terbatas, dan hal ini menyebabkan adsorbat akan lebih mudah teradsorpsi. Mampatnya molekul gas itu sendiri terjadi karena seiring dengan kenaikan tekanan, densitas adsorbat akan meningkat, sehingga molekulnya menjadi lebih rapat. Selain itu, peningkatan jumlah adsorbat yang teradsorpsi seiring dengan kenaikan tekanan disebabkan karena proses adsorpsi yang terjadi adalah proses adsorpsi fisika, dimana dalam proses tersebut kenaikan tekanan akan meningkatkan kapasitas adsorpsi, karena kenaikan tekanan akan meningkatkan gaya dorong terhadap adsorbat untuk masuk ke dalam pori - pori adsorben (Bahl et al., 1997 dan Treybal, 1980). Namun, sebenarnya jika tekanan bisa ditingkatkan maka secara teoritis akan terlihat jumlah CO₂ yang teradsorpsi akan menurun pada tekanan tertentu. Hal ini disebabkan karena pada tekanan rendah, densitas gas sangat kecil (jauh lebih kecil daripada densitas adsorpsi)

sehingga $\frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads,max}}$ bisa dianggap nol dan n_{Gibbs} sama dengan $n_{absolute}$ sehingga n_{Gibbs}

terus mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan tekanan. Namun, pada tekanan tinggi, $\frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads,max}}$ tidak bisa dianggap nol dan nilainya naik dengan cepat sehingga

nilai n_{Gibbs} akan menurun seiring dengan kenaikan tekanan walaupun harga $n_{absolute}$ naik. Pada penelitian ini, titik optimum belum tercapai, karena tekanan optimum dalam proses adsorpsi CO₂ pada batubara berkisar di atas 8 Mpa atau di atas 1000 psia (Kroos, 2002). Dalam penelitian ini, tekanan maksimal pada tabung CO₂

hanya sebesar 900 psia, sehingga tidak dapat dilakukan uji adsorpsi untuk tekanan di atas 1000 psia.

IV.5.3 Pengaruh Kandungan Air dalam Proses Adsorpsi

Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung lebih baik pada batubara kering daripada batubara basah. Hal ini dibuktikan dengan jumlah mol CO₂ yang teradsorpsi pada batubara kering lebih besar daripada batubara basah. Perbedaan ini disebabkan karena pada batubara basah terdapat molekul-molekul air yang ikut mengisi pori-pori batubara, sehingga CO₂ yang dialirkan dari *dozing cylinder* ke *sampling cylinder* tidak semuanya teradsorpsi oleh batubara.

Kandungan air pada batubara ini mengganggu proses adsorpsi, karena kandungan air pada adsorben akan mengurangi luas permukaan kontak antara batubara dengan CO₂ (Seewald dan Klein, 1986). Luas permukaan kontak yang besar sangat dibutuhkan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi (Bahl et al., 1997 dan Treybal, 1980). Selain itu, kandungan air dalam batubara dapat menutup jalan masuk bagi adsorbat ke dalam sistem mikropori (Yee et al., 1993 ; Laxminarayana dan Crosdale, 1999). Akses bagi adsorbat untuk masuk ke dalam mikropori merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi daya adsorpsi, karena sebagian besar proses adsorpsi berlangsung pada sistem mikropori (Ding dan Bhatia, 2003).

IV.6. HASIL UJI ADSORPSI MENGGUNAKAN MODEL ONO - KONDO

Setelah mendapatkan data adsorpsi dengan menggunakan perhitungan Gibbs, langkah selanjutnya adalah membuat model adsorpsi Ono-Kondo untuk menentukan kapasitas adsorpsi batubara terhadap CO₂.

Langkah awal dalam pembuatan model Ono-Kondo adalah penentuan parameter-parameter yang digunakan, yaitu densitas teradsorpsi pada kapasitas maksimum (ρ_{mc}), energi interaksi internal molekul CO₂ (ϵ_{ii}/k), energi interaksi antar molekul CO₂ dengan inti aktif adsorben (ϵ_{is}/k), kapasitas adsorpsi maksimum adsorben (C). Parameter-parameter tersebut nilainya bergantung pada temperatur, jenis adsorbat, dan jenis adsorben.

Dari keempat parameter tersebut, dua parameter yaitu ρ_{mc} dan ϵ_{ii}/k dapat ditentukan terlebih dahulu, berdasarkan literatur yang ada yaitu sebesar 23 mol/l dan 84,32 K untuk molekul CO₂ (Sudibandriyo, 2003) . Sehingga dalam penelitian ini hanya akan menghitung nilai ϵ_{is}/k dan C, yang diperoleh dengan cara meminimalkan *error* terhadap data percobaan. Hasil perhitungan nilai ϵ_{is}/k dan C disajikan dalam Tabel IV.3 di bawah ini,

Tabel IV.3 Nilai Parameter ϵ_{is}/k dan C

Adsorben	T (°C)	ϵ_{is}/k (K)	C (mmol/g)
Barito Kering	25	-1300	0,741
	40		0,734
	60		0,726
Barito Basah	25	-1000	0,695
	40		0,676
	60		0,673
Ombilin Kering	25	-1100	0,721
	40		0,708
	60		0,704
Ombilin Basah	25	-900	0,672
	40		0,666
	60		0,638

Pada Tabel IV.3 untuk paramater energi interaksi antar molekul CO₂ dengan inti aktif adsorben (ϵ_{is}/k) menunjukkan bahwa interaksi molekul CO₂ paling kuat terjadi saat berinteraksi dengan batubara Barito daripada batubara Ombilin dan dalam satu jenis batubara, interaksi molekul CO₂ paling kuat terjadi saat berinteraksi dengan jenis batubara kering. Hal ini terjadi karena besarnya nilai ϵ_{is}/k ditentukan oleh karakteristik adsorben, yang dapat didekati dengan persamaan 4.3 di bawah ini (Sudibadiyo, 2003) :

$$\Phi_{i,SLP} = \epsilon_{is} / k = 4\pi\rho_c \epsilon_{ic}^* \sigma_{ic}^2 \phi_c \left(1 + \xi_f \left[\frac{1}{5} \left(\frac{\sigma_{ic}}{z} \right)^{10} - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ic}}{z} \right)^4 \right] \right) \quad (4.3)$$

dimana nilai dari ϵ_{is}/k direpresentasikan oleh $\Phi_{i,SLP}$, yang merupakan nilai dari energi potensial suatu molekul yang berjarak z dari permukaan adsorbat, yang nilainya bergantung pada karakteristik adsorben. Ukuran adsorben yang semakin kecil, dengan kata lain adsorben yang memiliki persentase mikropori lebih besar,

maka jarak suatu molekul adsorbat dengan permukaan adsorben akan semakin kecil. Pada batubara Barito yang memiliki persentase pori pada mikropori lebih besar daripada batubara Ombilin, nilai z menjadi kecil, sehingga energi interaksi antara adsorbat dan adsorben (ϵ_{is}/k) semakin kuat dan bernilai besar, dibandingkan dengan nilai ϵ_{is}/k pada batubara Ombilin.

Dari Tabel IV.3, dapat dilihat bahwa nilai ϵ_{is}/k batubara kering lebih besar daripada batubara basah. Hal ini terjadi karena pengaruh nilai ϕ_c , yang merupakan faktor koreksi efek kandungan air pada batubara. Kehadiran nilai ϕ_c , yang nilainya sama dengan fraksi pori-pori batubara yang tidak diisi oleh air, akan menurunkan nilai ϵ_{is}/k . Pada batubara basah, persentase pori-pori yang tidak terisi oleh air lebih kecil daripada batubara kering, sehingga interaksi antara adsorbat dengan adsorben pun berkurang. Oleh karena itu, harga ϵ_{is}/k batubara basah lebih kecil daripada batubara kering.

Parameter yang kedua adalah kapasitas adsorpsi maksimum (C). Faktor kapasitas adsorpsi maksimum (C) dipengaruhi oleh temperatur, karakteristik adsorbat, dan karakteristik adsorben, yang dapat diperkirakan dengan persamaan 4.4 di bawah ini (Sudibandriyo, 2003) :

$$C(T) = \frac{AC_a(T)}{2} \quad (4.4)$$

dimana C_a merupakan luas permukaan pada densitas teradsorpsi (mmol/m^2) yang nilainya bergantung pada karakteristik adsorbat. Selain itu nilai C juga bergantung pada temperatur. Seperti ditunjukkan pada Tabel 4.3, kenaikan temperatur akan menurunkan nilai C . Hal ini terjadi karena peningkatan temperatur akan mengakibatkan ekspansi termal dari fasa teradsorpsi (Do, 1998), yang dijelaskan dari persamaan 4.5 di bawah ini,

$$\frac{dC_a / dT}{C_a} = -\delta \quad (4.5)$$

dan jika persamaan 4.4 digabungkan dengan persamaan 4.5 (Sudibandriyo, 2003)

$$\ln(1/C) = \delta T - [\ln C_{a,0} + \delta T_0 + \ln(A/2)] \quad (4.6)$$

dimana δ merupakan koefisien ekspansi termal. Dari persamaan 4.5 dan persamaan 4.6, dapat dilihat bahwa nilai C_a bergantung pada nilai δ dan

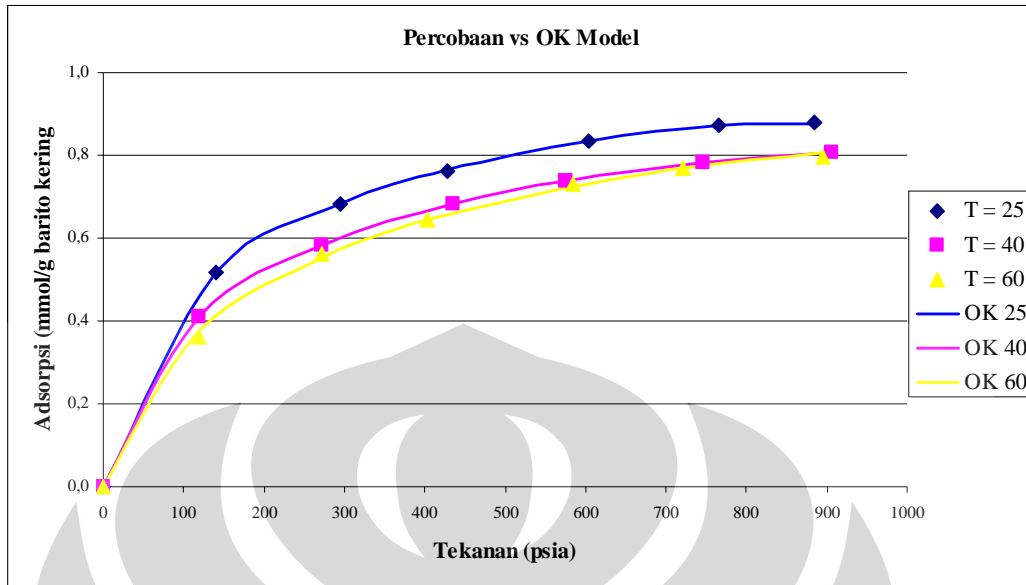
temperatur. Semakin tinggi temperatur, maka nilai C_a akan semakin turun, begitu pula dengan nilai C .

Selain temperatur dan karakteristik adsorbat, dari persamaan 4.4 nilai C juga dipengaruhi oleh karakteristik adsorben, yang diwakilkan oleh nilai luas permukaan kontak (A). Persamaan 4.4 menunjukkan bahwa semakin besar luas permukaan kontak adsorben, maka nilai kapasitas adsorpsi maksimum (C) akan semakin besar. Dari Tabel IV.3, batubara Barito kering memiliki nilai C lebih besar daripada batubara Ombilin kering. Hal ini membuktikan bahwa luas permukaan kontak pada batubara Barito lebih besar daripada luas permukaan kontak pada batubara Ombilin. Besarnya luas permukaan kontak pada batubara Barito dikarenakan batubara Barito memiliki persentase pori pada mikropori yang lebih besar daripada yang dimiliki oleh batubara Ombilin, walaupun rank batubara Barito lebih rendah daripada rank batubara Ombilin. Dari hasil ini, dapat dibuktikan bahwa kapasitas adsorpsi batubara tidak bergantung signifikan secara linier terhadap rank batubara (Bustin dan Clarkson, 1998).

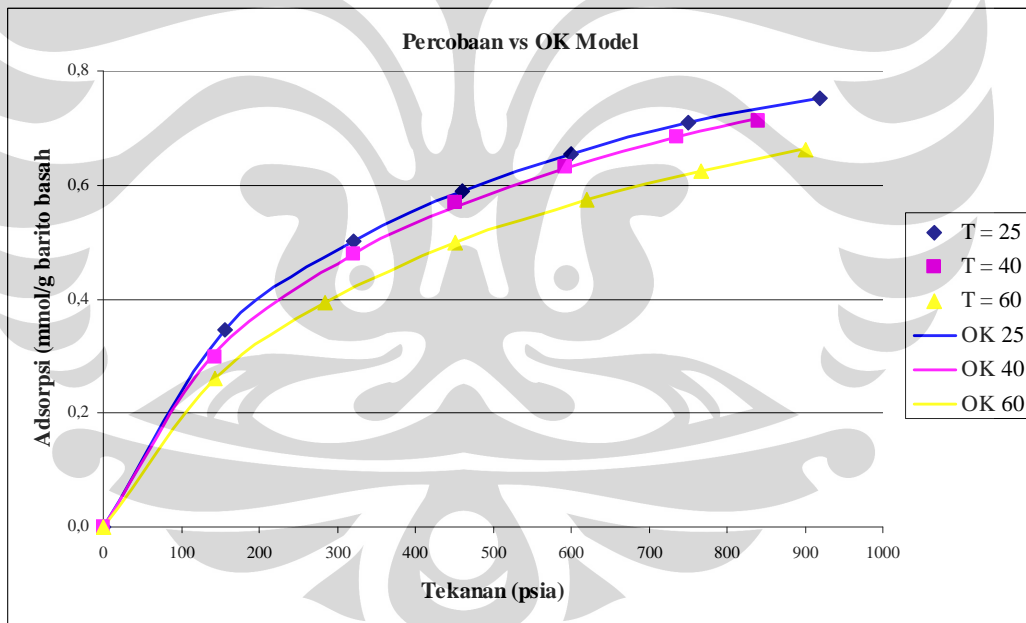
Selain itu, dari Tabel IV.3 dapat dilihat bahwa selain persentase pori pada mikropori, faktor luas permukaan kontak (A) dipengaruhi oleh kandungan air. Tabel IV.3 menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi batubara kering lebih besar daripada kapasitas adsorpsi batubara basah. Hal ini terjadi karena kehadiran molekul air pada batubara akan mengurangi luas permukaan kontak adsorben, sehingga jalan masuk bagi adsorbat ke dalam sistem mikropori adsorben menjadi terbatas (Yee et al., 1993 ; Laxminarayana dan Crosdale, 1999).

Hasil penelitian pada Tabel IV.3 juga menunjukkan bahwa semakin besar nilai dari ϵ_{is}/k , maka semakin besar pula kemampuan adsorpsinya. Hal ini terjadi karena semakin besar energi interaksi antara adsorbat dengan adsorben, maka proses adsorpsi menjadi maksimal, sehingga akan meningkatkan nilai kapasitas adsorpsinya.

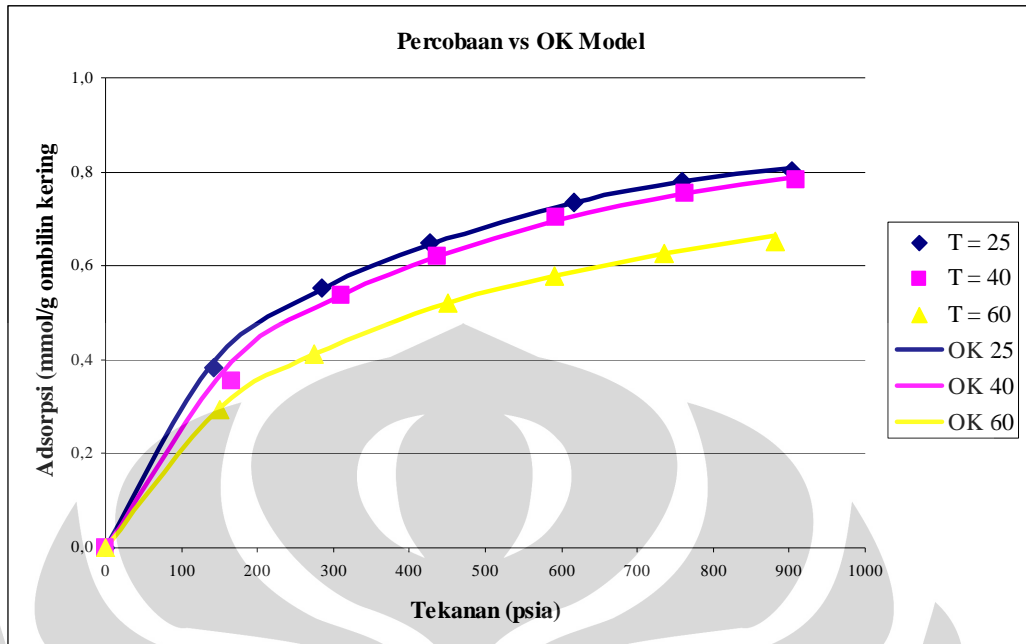
Langkah berikutnya setelah menentukan nilai dari keempat parameter adalah membuat model Ono-Kondo. Model ini dibuat dengan menentukan jumlah mol adsorpsi Gibbs dari model Ono-Kondo. Gambar 4.7 sampai dengan Gambar 4.10 menunjukkan kemampuan model adsorpsi Ono-Kondo untuk merepresentasikan data hasil percobaan.



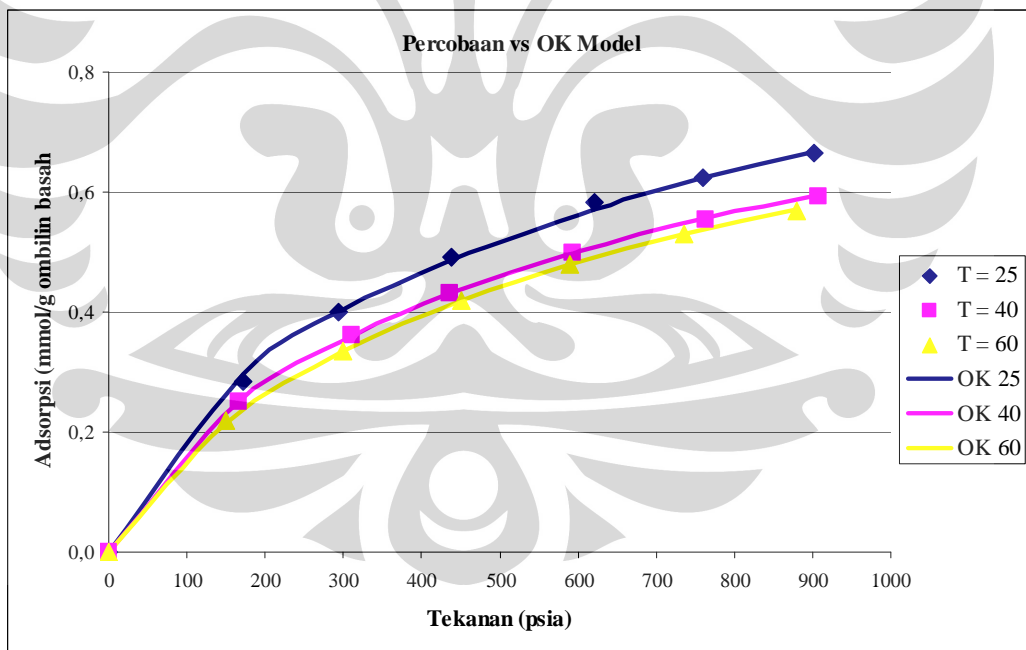
Gambar 4.7 Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara Barito kering



Gambar 4.8 Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara Barito basah



Gambar 4.9 Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara Ombilin kering



Gambar 4.10 Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara Ombilin basah

Dari Gambar 4.7 sampai dengan Gambar 4.10, dapat dilihat bahwa hasil adsorpsi perhitungan dengan model Ono-Kondo mendekati hasil percobaan,

dengan penyimpangan yang tidak terlalu besar. Hal ini menunjukkan bahwa model Ono-Kondo cukup baik untuk digunakan dalam perhitungan kapasitas adsorpsi batubara terhadap CO₂. Data persentase penyimpangan antara hasil adsorpsi menggunakan model Ono-Kondo terhadap hasil percobaan yang menggunakan perhitungan adsorpsi Gibbs dapat dilihat pada Tabel IV.4 di bawah ini,

Tabel IV.4 Penyimpangan Adsorpsi Model Ono-Kondo Terhadap Adsorpsi Gibbs Percobaan

Adsorben	%AAD		
	T = 25°C	T = 40°C	T = 60°C
Barito Kering	0,22	0,09	1,19
Barito Basah	0,05	0,91	0,06
Ombilin Kering	0,88	2,33	0,47
Ombilin Basah	1,28	0,13	0,71
Rata – Rata			0,7

Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa penyimpangan dari model Ono-Kondo terhadap hasil percobaan bernilai 0,7%. Rendahnya nilai penyimpangan ini membuktikan bahwa asumsi harga densitas teradsorpsi pada kapasitas maksimum (ρ_{mc}) dan energi interaksi internal molekul CO₂ ($\epsilon_{ii/k}$) yang digunakan cukup baik untuk merepresentasikan data hasil percobaan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan, yaitu:

1. Kapasitas adsorpsi batubara Barito 9% lebih besar daripada kapasitas adsorpsi batubara Ombilin.
2. Adanya kandungan air sampai kesetimbangan dapat menurunkan daya adsorpsi batubara sampai dengan 14,5% pada batubara Barito dan 17% untuk batubara Ombilin.
3. Kenaikan temperatur adsorpsi dari 25°C sampai dengan 60°C menurunkan daya adsorpsi batubara sebesar 9,6% pada batubara Barito dan 18,7% pada batubara Ombilin.
4. Sampai dengan tekanan 900 psia, kurva adsorpsi CO₂ pada batubara masih menunjukkan kenaikan yang monotonik.
5. Kondisi adsorpsi maksimum terdapat pada batubara Barito kering, dengan temperatur 25°C dan tekanan 900 psia, yaitu sebesar 0,8794 mmol/gram.
6. Nilai ϵ_{is}/k terbesar pada batubara Barito kering dan nilai C terbesar pada batubara Barito kering dengan temperatur 25°C, yaitu sebesar -1300 K dan 0,741 mmol/gram.
7. Model Ono-Kondo cukup akurat guna memprediksi potensi *coal bed* Indonesia untuk menyimpan gas CO₂, yang ditunjukkan dengan persentase penyimpangan yang kecil terhadap hasil percobaan, yaitu sebesar 0,7%.
8. Nilai penyimpangan yang kecil membuktikan bahwa asumsi harga densitas teradsorpsi pada kapasitas maksimum (ρ_{mc}), yaitu 23 mol/L, dan energi interaksi internal molekul CO₂ (ϵ_{ii}/k), yaitu 84,32 K, yang digunakan cukup baik untuk merepresentasikan data hasil percobaan.

V.2 SARAN

Untuk penelitian selanjutnya, peneliti menyarankan agar dilakukan uji daya adsorpsi pada tekanan yang lebih tinggi, sehingga titik optimum proses adsorpsi CO₂ pada batubara bisa terlihat. Selain itu, pada penelitian selanjutnya diharapkan dapat melakukan uji daya adsorpsi dengan variasi jenis batubara yang lebih banyak, untuk lebih mengetahui karakteristik batubara Indonesia serta korelasinya dengan kemampuan adsorpsinya terhadap gas CO₂.



DAFTAR PUSTAKA

- 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.
- Goodman, A.L., Busch, A., Duffy, G.J., Fitzgerald, J.E., Gasem, K.A.M., Gensterblum, Y., Krooss, B.M., Levy, J., Ozdemir, E., Pan, Z., Robinson Jr, R.L., Schroeder, K., Sudibandriyo, M., dan White, C.M. (2004). 'An Inter-laboratory Comparison of CO₂ Isotherms Measured on Argonne Premium Coal Samples', *Energy and Fuels*, vol. 18, no. 4, pp.1175-1182.
- Gultom, F.K. (1998). *Aplikasi Karbon Aktif dalam Pengendalian Mutu Volatile Organic Compound (VOC) melalui Proses Adsorpsi dalam Unggun Tetap*, Skripsi, Depok, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia FTUI.
- Herawaty, E. (1993). *Sifat-Sifat Permukaan dan Proses Katalisis*, Depok, Jurusan Gas dan Petrokimia FTUI.
- <http://www.coal-seq.com/Proceedings/Gasem-CO2-presentation.pdf>, 2 Maret 2007.
- Kroos, B.M. (2002). 'High Pressure Methane and Carbon Dioxide Adsorption on Dry and Moisture Equilibrated Pennsylvanian Coals', *International Journal of Coal Geology*.
- Maron, S.H., dan Lando, J. (1974). *Fundamentals of Physical Chemistry*, New York, Macmillan Publishing Co. Inc.
- Mc.Cabe, W.L., Smith, J.C., Harriot, P. (1999). *Operasi Teknik Kimia*, Penerbit Erlangga, Jakarta, jilid 2, edisi 4, pp. 229-236.
- Mulyati, S. (2006). Potensi Batubara Lokal dengan Perlakuan sebagai Adsorben untuk Penangan Limbah Cair Benzena dan Toluena, Skripsi, Depok, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia FTUI, pp. 10-11.
- Sudibandriyo, Mahmud. 2003. *A Generalized Ono-Kondo Lattice Model for High Pressure on Carbon Adsorben*. Ph.D dissertation, Oklahoma State University

Treybal, R.E. (1980). *Mass Transfer Operation*, Singapore, McGraw Hill, third edition.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Analisa Proximate dan Ultimate Batubara Indonesia

Sample	Location or Mine name	Province	Province Indonesian name	Latitude	Longitude
CQ01	Ombilin	West Sumatra	Sumatera Barat	0 ^o 40' S	100 ^o 45' E
CQ02	Banko	South Sumatra	Sumatera Selatan	3 ^o 45' S	103 ^o 47' E
CQ03	Kota Tengah	South Sumatra	Sumatera Selatan	2 ^o 25' S	103 ^o 15' E
CQ04	Kandui	Central Kalimantan	Kalimantan Tengah	1 ^o 20' S	115 ^o 10' E
CQ05	Sangatta	East Kalimantan	Kalimantan Timur	0 ^o 27' N	117 ^o 35' E
CQ06	Senakin	South Kalimantan	Kalimantan Selatan	2 ^o 58' S	116 ^o 16' E
CQ07	Timika	Papua	Papua (formerly Irian Jaya)	4 ^o 42' S	136 ^o 55' E
CQ08	Malawa	South Sulawesi	Sulawesi Selatan	4 ^o 50' S	119 ^o 52' E

Sample	Total moisture wt. %	Ash wt. %	Volatile matter wt. %	Fixed carbon wt. %	Sulfur wt. %	Calorific value kcal/kg	Apparent rank
CQ01	3.10	7.33	42.8	46.7	0.51	7340	high volatile A bituminous
CQ02	18.0	9.68	39.9	32.4	0.24	4780	sub-bituminous B
CQ03	9.68	10.1	41.0	39.3	2.21	6290	high volatile C bituminous
CQ04	26.5	5.38	33.0	35.1	1.00	4610	sub-bituminous C
CQ05	19.4	4.33	35.0	41.3	0.37	5580	sub-bituminous B
CQ06	5.29	12.6	42.6	39.5	0.79	6490	high volatile B bituminous
CQ07	5.23	3.54	7.48	83.8	0.61	7500	semi-anthracite
CQ08	48.3	2.99	25.4	23.3	0.14	3280	lignite B

Lampiran 2. Hasil Uji Adsorpsi Gibbs

a. Batubara Barito Kering

a.1 T = 25°C

Tekanan Sampling (psia)	0	140,33	294,66	428,71	603,77	765,1	884,71
Tekanan Dozing Awal (psia)	14,7	189,2	360,35	473,85	649,48	780,2	900,2
Tekanan Dozing Akhir (psia)	14,7	142,15	328,08	448,41	620,05	765,08	885,71
n _{adsgibbs} (mmol/g batubara)	0,0000	0,5178	0,6831	0,7622	0,8353	0,8714	0,8794

a.2 T = 40°C

Tekanan Sampling (psia)	0	119,33	271,65	435,39	575,77	745,39	906,43
Tekanan Dozing Awal (psia)	14,7	185,2	333,2	506,7	656,4	797,52	936,48
Tekanan Dozing Akhir (psia)	14,7	145,03	299,36	475,14	631,47	768,9	910,35
n _{adsgibbs} (mmol/g batubara)	0,0000	0,4106	0,5817	0,6817	0,7390	0,7834	0,8073

a.3 T = 60°C

Tekanan Sampling (psia)	0	119,33	271,66	403,99	585,05	720,88	895,43
Tekanan Dozing Awal (psia)	14,7	184,75	335,8	492,14	655,19	797,52	941,34
Tekanan Dozing Akhir (psia)	14,7	145,03	299,36	465,41	620,47	772,8	910,41
n _{adsgibbs} (mmol/g batubara)	0,0000	0,3625	0,5611	0,6436	0,7312	0,7693	0,7949

b. Batubara Barito Basah

b.1 T = 25°C

Tekanan Sampling (psia)	0	155,33	320,38	460,71	600,05	750,1	919,5
Tekanan Dozing Awal (psia)	14,7	192,4	351,46	486,7	627,75	790,82	935,5
Tekanan Dozing Akhir (psia)	14,7	157,03	323,08	465,41	607,75	773,25	924,15
n _{adsgibbs} (mmol/g batubara)	0,0000	0,3452	0,5023	0,5887	0,6542	0,7095	0,7523

b.2 T = 40°C

Tekanan Sampling (psia)	0	142,33	320,38	450,71	593,05	735,99	840,99
Tekanan Dozing Awal (psia)	14,7	204,47	354,8	484,79	630,65	779,05	951,2
Tekanan Dozing Akhir (psia)	14,7	171,85	323,08	463,41	608,75	760,08	865,43
n _{adsgibbs} (mmol/g batubara)	0,0000	0,2977	0,4799	0,5699	0,6308	0,6841	0,7117

b.3 T = 60°C

Tekanan Sampling (psia)	0	142,33	284,66	450,71	620,77	766,1	901,43
Tekanan Dozing Awal (psia)	14,7	194,73	334,06	492,95	654,49	795,4	981,82
Tekanan Dozing Akhir (psia)	14,7	162,05	308,38	465,41	627,75	773,05	934,52
n _{adsgibbs} (mmol/g batubara)	0,0000	0,2603	0,3946	0,4984	0,5748	0,6252	0,6632

c. Batubara Ombilin Kering

c.1 T = 25°C

Tekanan Sampling (psia)	0	142,33	284,66	426,99	616,77	759,1	902,95
Tekanan Dozing Awal (psia)	14,7	200,45	321,7	473,5	651,47	791,8	926,05
Tekanan Dozing Akhir (psia)	14,7	164,05	294,66	450,71	624,8	773,58	916,62
n _{adsgibbs} (mmol/g batubara)	0,0000	0,3821	0,5518	0,6471	0,7347	0,7805	0,8009

c.2 T = 40°C

Tekanan Sampling (psia)	0	166,05	310,38	435,99	593,05	763,1	908,43
Tekanan Dozing Awal (psia)	14,7	209,95	346,8	484,95	631,47	797,52	948,48
Tekanan Dozing Akhir (psia)	14,7	169,8	318,1	464,41	606,75	772,68	929,3
n _{adsgibbs} (mmol/g batubara)	0,0000	0,3538	0,5380	0,6201	0,7017	0,7542	0,7823

c.3 T = 60°C

Tekanan Sampling (psia)	0	150,33	273,94	450,71	590,32	735,66	880,71
Tekanan Dozing Awal (psia)	14,7	197,5	346,5	500,3	630,35	790,52	960,18
Tekanan Dozing Akhir (psia)	14,7	160,75	323,08	470,44	607,75	768,2	939,5
n _{adsgibbs} (mmol/g batubara)	0,0000	0,2954	0,4136	0,5204	0,5797	0,6273	0,6512

d. Batubara Ombilin Basah

d.1 T = 25°C

Tekanan Sampling (psia)	0	172,33	293	437,99	620,77	759,1	902,95
Tekanan Dozing Awal (psia)	14,7	213,49	320,08	473,77	651,47	790,9	926,05
Tekanan Dozing Akhir (psia)	14,7	177,05	298,35	450,71	625,47	773,8	916,65
n _{adsgibbs} (mmol/g batubara)	0,0000	0,2842	0,4001	0,4924	0,5831	0,6232	0,6639

d.2 T = 40°C

Tekanan Sampling (psia)	0	166,05	310,38	435,99	593,05	763,1	908
Tekanan Dozing Awal (psia)	14,7	203,95	343,42	484,4	630,95	797,4	948,48
Tekanan Dozing Akhir (psia)	14,7	168,8	318,1	464,41	606,75	772,8	929,3
n _{adsgibbs} (mmol/g batubara)	0,0000	0,2505	0,3609	0,4302	0,4980	0,5553	0,5926

d.3 T = 60°C

Tekanan Sampling (psia)	0	150,33	298,94	450,71	590,32	735,66	880,71
Tekanan Dozing Awal (psia)	14,7	193,5	345,8	495,55	629,55	790,52	960,18
Tekanan Dozing Akhir (psia)	14,7	160,75	318,18	470,44	606,9	768,15	939,15
n _{adsgibbs} (mmol/g batubara)	0,0000	0,2200	0,3350	0,4182	0,4794	0,5295	0,5680