

**PENGEMBANGAN MODEL ADSORPSI TEKANAN
TINGGI TERHADAP GAS METANA UNTUK
MEMPREDIKSI POTENSI *COALBED METHANE*
INDONESIA SEBAGAI SUMBER ENERGI BARU**

SKRIPSI

Oleh

DONI PABHASSARO

04 04 06 021 7



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

**PENGEMBANGAN MODEL ADSORPSI TEKANAN
TINGGI TERHADAP GAS METANA UNTUK
MEMPREDIKSI POTENSI *COALBED METHANE*
INDONESIA SEBAGAI SUMBER ENERGI BARU**

SKRIPSI

Oleh

DONI PABHASSARO

04 04 06 021 7



**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 TEKANAN TINGGI
TERHADAP GAS METANA UNTUK MEMPREDIKSI POTENSI
COALBED METHANE INDONESIA SEBAGAI SUMBER ENERGI BARU**

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

Doni Pabhassaro

NPM 04 04 06 021 7

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul:

**PENGEMBANGAN MODEL ADSORPSI TEKANAN TINGGI
TERHADAP GAS METANA UNTUK MEMPREDIKSI POTENSI
COALBED METHANE INDONESIA SEBAGAI SUMBER ENERGI BARU**

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

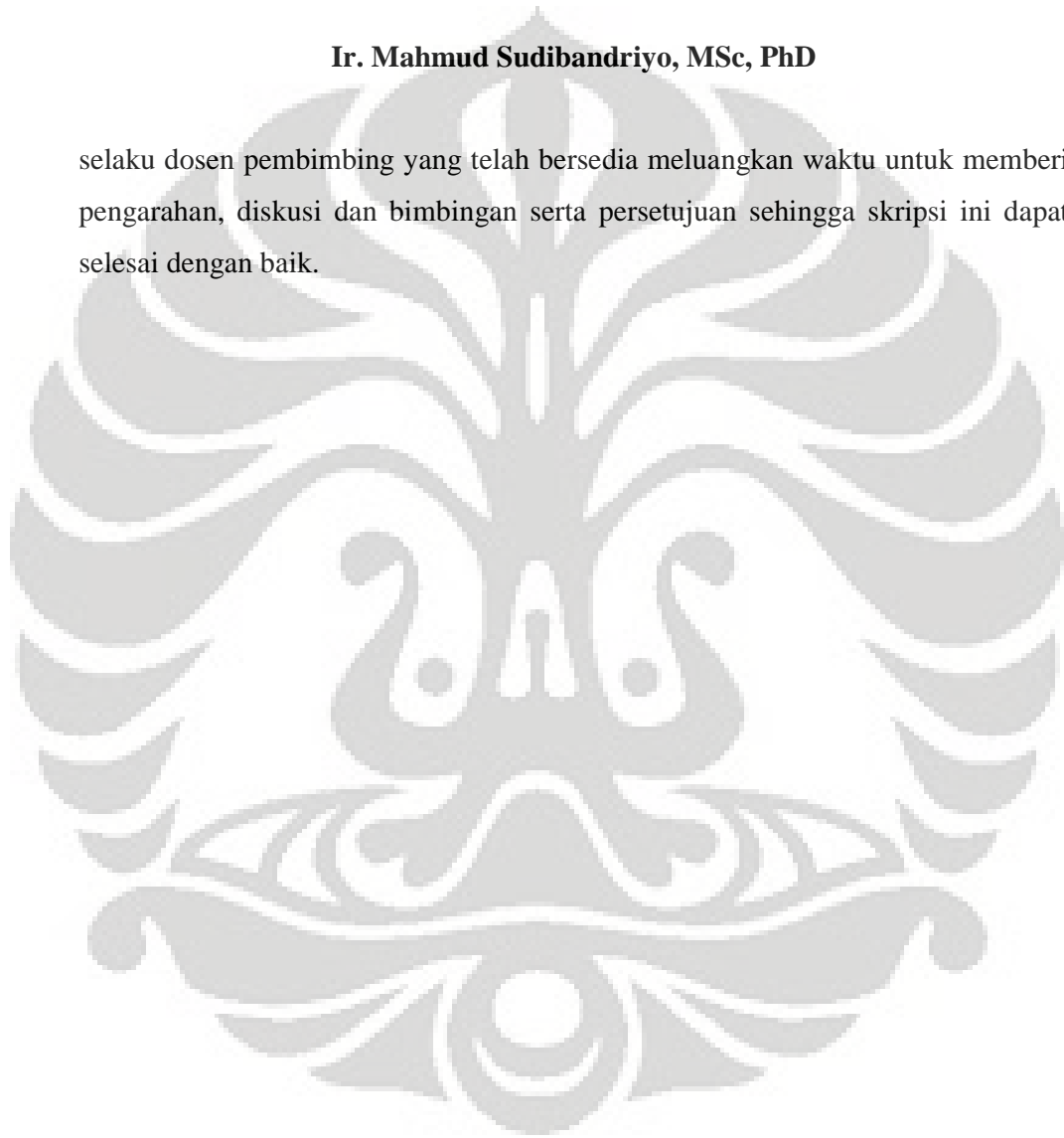
NIP. 131 803 524

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.



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa dan Sang Triratna atas berkat dan rahmat-Nya tugas seminar ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Tugas seminar dengan judul **Pengembangan Pemodelan Adsorpsi Tekanan Tinggi Terhadap Gas Metana Untuk Prediksi Potensi "Coalbed Methane" Indonesia Sebagai Sumber Energi Baru** 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 Wahyu Purwanto, DEA** selaku ketua Departemen Teknik Kimia FTUI atas masukan-masukan dan saran-saran selama masa kuliah dan penelitian.
2. Bapak **Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc, PhD** selaku pembimbing skripsi dan sebagai orangtua di kampus yang selalu memberi bimbingan dan semangat untuk penelitian dan saran-saran baik akademis dan non-akademis.
3. Bapak **Prof.Dr.Ir.M.Nasikin.M,Eng** selaku ketua lab RPKA atas pengarahan, perhatian, dan himbauan *safety* selama masa penelitian.
4. Kedua **orang tua** saya dan keluarga saya atas kasih sayang, perhatian, bantuan, doa, dan dukungan yang selalu diberikan selama ini.
5. **Nia**, seorang rekan lab yang selalu memberikan arahan,dukungan, motivasi selama masa penelitian.
6. Teman-temanku di lab RPKA (Jeffry, Ira Y, Felany, Josia, dkk) atas persahabatan, pemberian semangat, bantuan dan dukungannya selama ini dan selalu menemani di laboratorium RPKA.
7. **Teman ex-Tiga dara**, "koko" Marno , Asep "Botak", Ali "Baba" atas suka duka di kos-kosan masa-masa MABA.
8. Teman-teman **SPE-SC UI, KMBUI, TIS, BPH IMGP, BEM FTUI, Tim Basket GP, Duta Hijau, SEKBER Buddhist Banten, PIMNAS XXI, Duta**

Lingkungan Bayer dan yang lain yang tidak disebutkan satu persatu yang sangat membantu membangun pribadi dan karakter saya selama di kampus.

9. Teman-teman *separasi brotherhood*, terimakasih atas "tongkrongan"-nya selama perpustakaan tutup.
10. Kang Jajat, Mang Ijal, dan Mas Eko atas bantuan dan kerjasamanya selama melakukan penelitian.
11. Mas Opik dan Pak Min atas bantuannya dalam mencari literatur di perpustakaan serta mas Sri dan mas Mugeni yang membantu dalam administrasi.
12. **Teman-teman baikku di GP 2004 : all of you are my inspirations and friends once a life time.** Terima kasih atas persahabatan, kebersamaan, dan perhatiannya.
13. Teman-teman ex-ITI, ex-PRIBADI (*Pria Abadi High School*), ex-SLANK (Satu Pamulang) di luar sana. Terima kasih atas doa-doa dan dukungannya.
14. **Teman-teman Dershane Mahmud**, sebagai teman satu atap, satu inspirasi dan satu perjuangan.
15. Teman yang menolong di saat kritis pengumpulan skripsi (**Yayan, Cani, Nia, Juniatia**) dan ibu Wulan dan ibu Anti yang memberikan dorongan untuk tetap semangat selama PIMNAS XXI Semarang.
16. Teman-teman Vihara Avalokitesvara Pondok Cabe (**Renny, Lia, Linda, Tri, Handoko, Metta kecil, Metta, Cynthia, Widya, Lady, Widya** dan adik-adik kecil GABI) dan pihak di vihara lainnya atas dukungan dan doanya. **May Buddha bless us all.**
17. Semua orang yang belum saya sebutkan namun telah membantu saya.

Saya menyadari bahwa dalam makalah skripsi ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, saya berharap dapat diberikan masukan yang membangun untuk memperbaiki makalah skripsi ini. Akhir kata, saya berharap makalah ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Depok, 27 Juni 2008

Doni Pabhassaro

Doni Pabhassaro
NPM 04 04 06 021 7
Departemen Teknik Kimia

Dosen Pembimbing
Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc, PhD

**PENGEMBANGAN MODEL ADSORPSI TEKANAN TINGGI
TERHADAP GAS METANA UNTUK MEMPREDIKSI POTENSI
COALBED METHANE INDONESIA SEBAGAI SUMBER ENERGI BARU**

ABSTRAK

Coalbed methane adalah gas metana (CH_4) yang terkandung dalam batubara yang teradsorpsi dalam batubara. Di Indonesia saat ini diidentifikasi memiliki 11 cekungan batubara dengan potensi sumber daya CBM sangat besar. Penemuan sumber energi baru tersebut belum diiringi dengan penelitian lebih lanjut tentang potensi CBM Indonesia, terutama kapasitas adsorpsi gas metana pada batubara Indonesia. Informasi mengenai kapasitas adsorpsi gas metana sangat diperlukan untuk estimasi kandungan gas pada reservoir serta sebagai input pada simulator proses produksi.

Pada penelitian ini, digunakan 2 variasi batubara (batubara Barito dan batubara Ombilin), tiga variasi temperatur ($30\text{ }^\circ\text{C}$, $40\text{ }^\circ\text{C}$, $60\text{ }^\circ\text{C}$), dan 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 dengan kandungan air kesetimbangan). Uji adsorpsi batubara terhadap gas CH_4 dilakukan dengan menggunakan prinsip adsorpsi isothermis Gibbs, sedangkan model yang digunakan adalah model adsorpsi Ono-Kondo. Pengembangan model dalam penelitian ini meliputi perhitungan dua parameter yaitu energi interaksi antara adsorbat dengan adsorben (ϵ_{is}/k) dan nilai kapasitas adsorpsi maksimum adsorben (C).

Hasil uji adsorpsi menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi batubara Barito lebih besar 22 % daripada batubara Ombilin. Pengaruh kelembaban pada daya adsorpsi cukup signifikan. Kapasitas adsorpsi batubara kering lebih besar 14 % dibandingkan batubara basah. Selain itu, kapasitas adsorpsi berbanding terbalik dengan temperatur. Pada batubara kering Barito terdapat penurunan kapasitas adsorpsi 16.1 % sedangkan batubara kering Ombilin sebesar 12.8 % pada temperatur $30\text{ }^\circ\text{C}$. Pada penelitian ini, kondisi adsorpsi maksimum terjadi pada temperatur $30\text{ }^\circ\text{C}$, tekanan 900 psia dan batubara kering Barito adalah sebesar $0,3029\text{ mmol/gram}$ batubara. Pengembangan model Ono-Kondo menghasilkan nilai ϵ_{is}/k terbesar pada batubara Barito kering dan nilai C terbesar pada Barito kering dengan temperatur $30\text{ }^\circ\text{C}$. Penyimpangan antara model Ono-Kondo dengan hasil percobaan adalah sebesar 0.44 % sehingga dapat disimpulkan bahwa pemodelan Ono-Kondo untuk memprediksi kapasitas adsorpsi CH_4 pada batubara Indonesia cukup akurat.

Kata kunci : *Coalbed Methane* (CBM), kapasitas adsorpsi metana, batubara indonesia, uji adsorpsi, model Ono-Kondo.

Doni Pabhassaro
NPM 04 04 06 021 7
Chemical Engineering Department

Counsellor
Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc, PhD

**METHANE HIGH PRESSURE ADSORPTION MODEL DEVELOPMENT TO
PREDICT INDONESIA'S COALBED METHANE AS NEW PROSPECTIVE
ENERGY SOURCE**

ABSTRACT

Coalbed methane is methane gas (CH₄) that adsorbed in coal seams. In Indonesia there are 11 identified high potential CBM reservoirs. However these big inventions are not escorted with more researches about Indonesia's CBM potentials, especially methane adsorption capacity in Indonesian's coals. This information about methane adsorption capacity is required for estimating the gas content of CBM reservoirs and as the input of production process simulations.

In this research, utilized with two types of Indonesian's coal (Barito and Ombilin coal), three variations of temperatures (30 °C, 40 °C, 60 °C), and six variations of pressure (150 psia, 300 psia, 450 psia, 600 psia, 750 psia, dan 900 psia), also two variations of moisture content (dry coal and moisture equilibrium coal). Methane adsorption to Indonesia's coal is implemented according to isothermic Gibbs adsorption, and Ono-Kondo adsorption modeling. This high pressure adsorption model development consists of two parameters calculation; the fluid –solid energy parameter (ϵ_{is}/k) and maximum adsorption capacity (C).

The adsorption results show that the adsorption capacity of Barito coal is 22 % more than Ombilin coal. The moisture effect of both types of coals change significantly about 14 % less than dry coals. Moreover, the effect of pressure is monotonically proportional with the adsorption capacity of both coals. Then the effect of temperature is inversely proportional with it based on the comparison between 30 °C and 40 °C is about 16.1 % for dry Barito coal and 12.8 % for dry Ombilin coal. In this research, the maximum adsorption capacity occurred at the temperature 30 °C, 900 psia, and dry Barito coal which is 0.3029 mmol/gram of coal. The Ono-Kondo modeling development results at the highest on ϵ_{is}/k on dry Barito coal and C value at 30 °C. The deviation between Ono-Kondo modeling and the experimental results is about 0.44 %. So that, the Ono-Kondo modeling is quite accurate to predict the CH₄ adsorption capacity of Indonesia's coals.

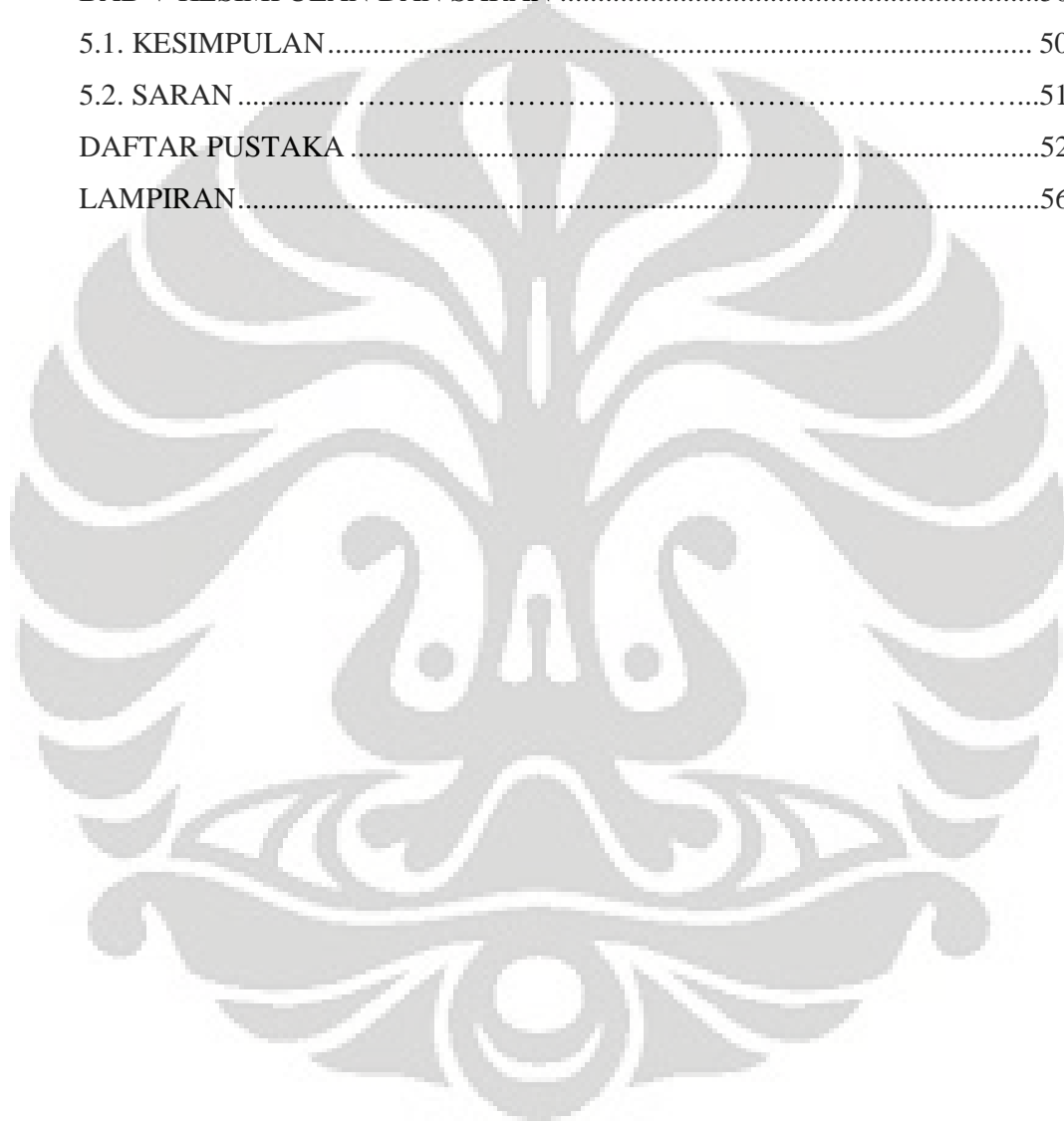
Keywords : Coalbed Methane (CBM), Methane adsorption capacity, Indonesia's coal, Adsorption experiment, Ono-Kondo modelling.

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
DAFTAR SINGKATAN	xv
DAFTAR SIMBOL	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. LATAR BELAKANG MASALAH	1
1.2. RUMUSAN MASALAH.....	3
1.3. TUJUAN PENELITIAN.....	4
1.4. BATASAN MASALAH.....	4
1.5. SISTEMATIKA PENULISAN.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 ADSORPSI	6
2.1.1 Jenis-Jenis Adsorpsi.....	7
2.1.1.1 Adsorpsi fisika (<i>adsorpsi van der waals</i>).....	7
2.1.1.2 Adsorpsi Kimia.....	8
2.1.2 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi	9
2.1.3 Keseimbangan Adsorpsi	10
2.1.4 Adsorben	12
2.1.5 Batubara	13
2.2 MODEL ADSORPSI.....	16
2.2.1 Adsorpsi isoteremis Langmuir.....	16

2.2.2 Adsorpsi isothermis BET.....	17
2.2.3 Adsorpsi isothermis <i>Lattice Theory</i> (Model Ono-Kondo).....	18
2.3 COALBED METHANE (CBM).....	21
2.3.1 Karakteristik reservoir CBM.....	22
2.3.1.1 Penyimpanan (<i>Storage</i>)	25
2.3.1.2 Produksi	25
BAB III METODE PENELITIAN	27
3.1 LOKASI PENELITIAN.....	27
3.2 BAHAN-BAHAN DAN ALAT-ALAT PENELITIAN	27
3.3 RANCANGAN PENELITIAN.....	27
3.4 PROSEDUR PENELITIAN	28
3.4.1 Persiapan Peralatan	28
3.4.2 Preparasi Batubara	29
3.4.3 Preparasi Batubara Kering	29
3.4.4 Preparasi Batubara Basah (<i>Moisture Equalibrium Coal</i>)	29
3.4.5 Uji Adsorpsi Tekanan Tinggi Batubara	30
3.4.6 Pemodelan.....	32
3.5 ANALISA	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 HASIL PREPARASI BATUBARA	34
4.1.1 Hasil Preparasi Batubara Kering.....	34
4.1.2 Hasil Preparasi Batubara Basah	35
4.2 HASIL PERSIAPAN PERALATAN ADSORPSI TEKANAN TINGGI CH ₄	36
4.3 HASIL KALIBRASI VOLUME DOZING CYLINDER.....	37
4.4 HASIL KALIBRASI VOLUME VOID PADA SAMPLING CYLINDER.....	37
4.5 HASIL ADSORPSI TEKANAN TINGGI TERHADAP GAS METANA (CH ₄).....	38
4.5.1 Pengaruh Jenis Batubara dalam Proses Adsorpsi	40
4.5.2 Pengaruh Temperatur dan Tekanan dalam Proses Adsorpsi.....	41
4.5.3 Pengaruh Kandungan Air dalam Proses Adsorpsi	42

4.6 UJI ADSORPSI TEKANAN TINGGI TERHADAP GAS METANA DENGAN MODEL ONO-KONDO (OK).....	43
4.6.1 Parameter-parameter Yang Mempengaruhi Dalam Pengujian Adsorpsi Tekanan Tinggi	43
4.6.2 Hasil Uji Adsorpsi Tekanan Tinggi Terhadap Gas Metana.....	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	50
5.1. KESIMPULAN.....	50
5.2. SARAN.....	51
DAFTAR PUSTAKA.....	52
LAMPIRAN.....	56



DAFTAR GAMBAR

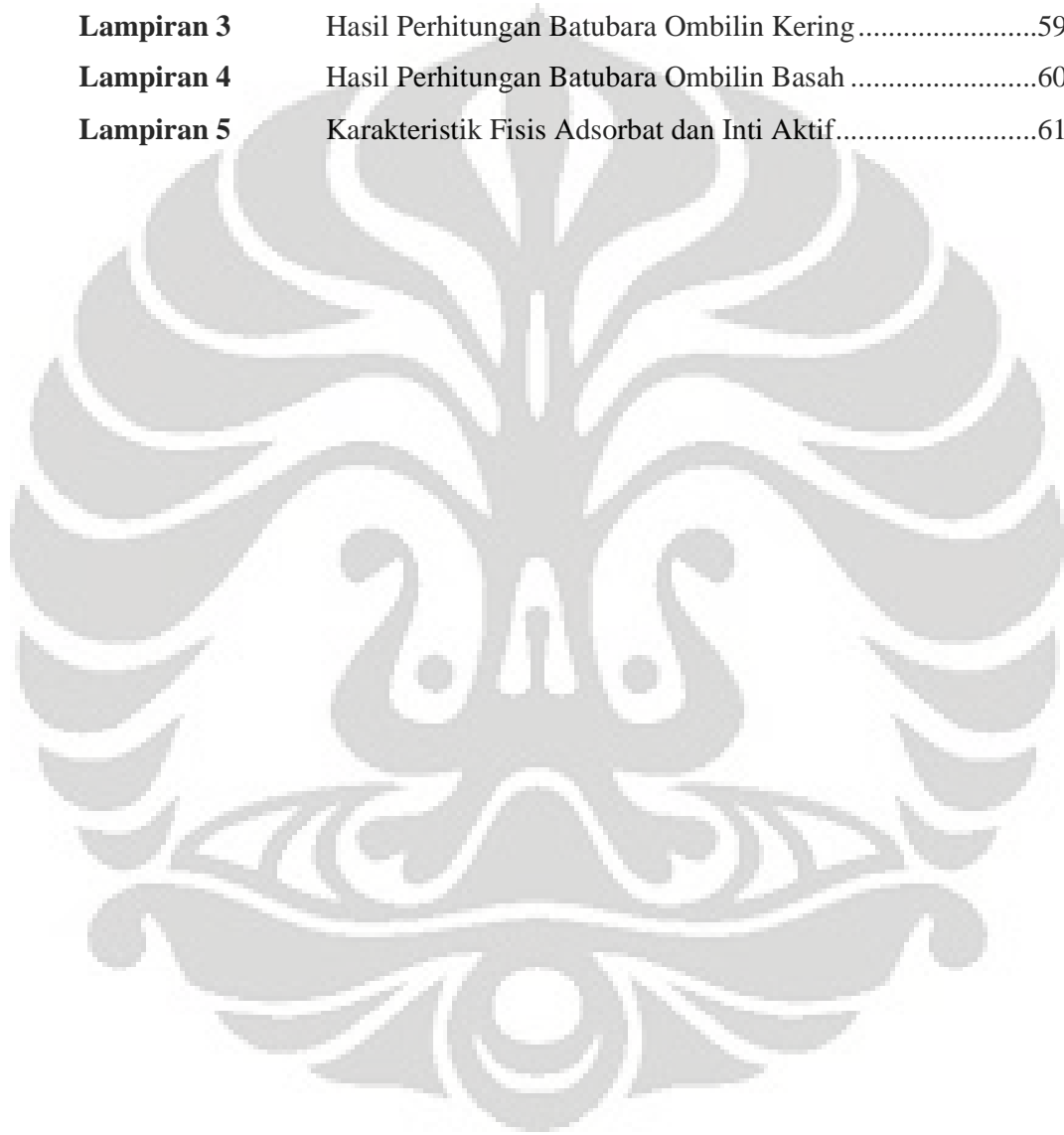
Gambar 2. 1.	Adsorpsi gas pada material berpori pada kondisi kesetimbangan	6
Gambar 2. 2.	Grafik adsorpsi isotermis Gibbs.....	11
Gambar 2. 3.	Kurva adsorpsi isotermis Gibbs	12
Gambar 2. 4.	SEM dari <i>maceral</i>	14
Gambar 2. 5.	Grafik isoterm Langmuir	16
Gambar 2. 6.	Adsorpsi multi-layer	18
Gambar 2. 7.	Hubungan volume gas yang terbentuk sebagai fungsi rank batubara.....	22
Gambar 2. 8.	Perbandingan Produksi Gas Konvensional dan CBM	23
Gambar 2. 9.	Langmuir isotherm.....	25
Gambar 2.10.	Produksi sebuah reservoir CBM	26
Gambar 3. 1.	Diagram alir penelitian.....	28
Gambar 3. 2.	Skema alat untuk analisa daya adsorpsi batubara	29
Gambar 3. 3.	Algoritma operasi parameter model.....	32
Gambar 4. 1.	Sampel batubara sebelum dipreparasi.....	33
Gambar 4. 2.	Batubara barito dan batubara Ombilin setelah dihaluskan.....	34
Gambar 4. 3.	Peralatan uji adsorpsi tekanan tinggi gas CH ₄	36
Gambar 4. 4.	Adsorpsi Gibbs CH ₄ pada batubara Barito kering	39
Gambar 4. 5.	Adsorpsi Gibbs CH ₄ pada batubara Ombilin kering.....	39
Gambar 4. 6.	Perbandingan adsorpsi Gibbs CH ₄ pada batubara Barito kering dan basah.....	40
Gambar 4. 7.	Perbandingan adsorpsi Gibbs CH ₄ pada batubara Barito dan Ombilin pada T=30 °C.....	40
Gambar 4. 8.	Posisi molekul dalam <i>slit</i> antara karbon aktif dan batubara.....	45
Gambar 4. 9.	Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara kering Barito	47
Gambar 4.10.	Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara basah Barito.....	47
Gambar 4.11.	Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara kering Ombilin	48
Gambar 4.12.	Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara basah Ombilin	48

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1.	Perbedaan Adsorpsi Fisika dan Adsorpsi Kimia	8
Tabel 2. 2.	Analisa <i>Proximate</i> dan <i>Ultimate</i> Batubara Ombilin dan Barito .	15
Tabel 2. 3.	Hasil Pendahuluan Model OK untuk Adsorpsi Gas Metana pada Karbon Aktif pada 45 °C	20
Tabel 2. 4.	Perbandingan antara Karakteristik Reservoir Gas Konvensional dan CBM.....	23
Tabel 2. 5.	Keuntungan dan Kerugian dari Gas Metana Batubara (CBM)...	24
Tabel 4. 1.	Persentase Kandungan Air Keseimbangan Sampel Batubara ...	34
Tabel 4. 2.	Hasil Kalibrasi Volume Void Sampel Batubara Ombilin dan Batubara Barito	37
Tabel 4. 3.	Nilai Parameter ε_{is}/k dan C	43
Tabel 4. 4.	Penyimpangan Adsorpsi Model Ono-Kondo Terhadap Adsorpsi Gibbs Penelitian	48

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Hasil Perhitungan Batubara Barito Kering	57
Lampiran 2	Hasil Perhitungan Batubara Barito Basah.....	58
Lampiran 3	Hasil Perhitungan Batubara Ombilin Kering.....	59
Lampiran 4	Hasil Perhitungan Batubara Ombilin Basah	60
Lampiran 5	Karakteristik Fisis Adsorbat dan Inti Aktif.....	61



DAFTAR SINGKATAN

AAD	<i>Absolute Average Percentage Deviation</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BET	Brunauer, Emmet, dan Teller
CBM	<i>Coalbed methane</i>
ESDM	Energi dan Sumber Daya Mineral
GWR	<i>Ground water recharge</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
SEM	<i>Scanning electron photomicrograph</i>
OK	Ono Kondo

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan
A	Luas permukaan per unit massa adsorben
C	Kapasitas adsorpsi maksimum pada model OK
C_a	Densitas permukaan dari fasa teradsorpsi
$C_{a,o}$	Densitas permukaan maksimum pada fasa teradsorpsi pada T_o
k	Konstanta Boltzman
K_B	Konstanta fungsi panas pencairan dan panas adsorpsi
k_1	Konstanta proporsionalitas dalam model Langmuir
k_2	Konstanta laju evaporasi dalam model Langmuir
m	Jumlah lapisan pada total adsorpsi Gibbs
m_i	Massa sampel dan cawan sebelum preparasi batubara basah
m_f	Massa sampel dan cawan setelah preparasi batubara basah
m_{bb}	Massa sampel batubara yang dipreparasi
n_i	Jumlah mol yang diinjeksikan ke dalam <i>sampling cylinder</i>
$n_{i,calc}^{Gibbs}$	Jumlah mol yang diinjeksikan hasil perhitungan
n_{exp}^{Gibbs}	Jumlah mol hasil eksperimen
P	Tekanan
P_L	Tekanan Langmuir
P_{di}	Tekanan dozing cylinder awal
P_{df}	Tekanan dozing cylinder akhir
P_{si}	Tekanan sampling cylinder awal
P_{sf}	Tekanan sampling cylinder akhir
q	Volume gas yang teradsorpsi pada tekanan P
q_m	Volume gas yang teradsorpsi untuk monolayer
R	Konstanta gas universal
T	Temperatur
V_L	Volume Langmuir
V_{void}	Volume void
V_{sc}	Volume sampling cylinder

$V-1, V-2, V-3$	Valve 1, 2, 3
$x_{i,t}$	Fraksi dari sel yang terisi oleh molekul teradsorpsi i pada lapisan t pada <i>Lattice model</i>
$x_{i,b}$	Fraksi komponen i yang teradsorpsi pada fasa gas (<i>bulk</i>) pada <i>Lattice model</i>
x_b	Fraksi molekul gas sebagai perbandingan antara densitas gas dan densitas teradsorpsi kapasitas maksimum
x_1	Fraksi mol adsorbat fase teradsorpsi pada lapisan pertama
x_2	Fraksi mol adsorbat fase teradsorpsi pada lapisan kedua
y	Fraksi mol pada fasa gas
z	Jarak inti molekul ke permukaan
z_o	Nomor koordinasi
z_l	Nomor koordinasi paralel
Z	Faktor kompresibilitas molekul
$Z_{He,di}$	Faktor kompresibilitas He pada kondisi P_{di} di T
$Z_{He,df}$	Faktor kompresibilitas He pada kondisi P_{df} di T
δ	Koefisien ekspansi thermal pada fasa teradsorpsi
Φ	Energi potensial adsorbat-adsorben
$\Phi_{i,SLP}$	Energi potensial molekul berjarak z dari permukaan
ζ_f	Nilai koreksi efek struktur kimia adsorben pada adsorbat
ρ_{ads}	Densitas fasa teradsorpsi
ρ_{mc}	Densitas teradsorpsi pada kapasitas maksimum
π	Jumlah fasa ; tekanan penyebaran
ε_{ij}	Energi interaksi intern molekul adsorbat
ε_{is}	Energi interaksi antar molekul adsorbat dan inti aktif adsorben
Γ	Ekses adsorpsi Gibbs per unit massa adsorben
σ	Diameter molekul



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG MASALAH

Sektor energi merupakan sektor yang sangat penting di Indonesia. Energi bagi Indonesia selain dikonsumsi juga diekspor untuk menghasilkan devisa negara. Meskipun total produksi energi Indonesia sampai saat ini masih lebih besar dari kebutuhan energi yang dikonsumsi, namun seiring dengan meningkatnya aktivitas, kebutuhan terhadap energi pun akan meningkat. Adapun usaha-usaha yang dilakukan para ahli energi dan lembaga-lembaga penelitian energi terbarukan (*renewable energy*) diprediksi tidak akan mampu mengimbangi kekurangan kebutuhan energi yang akan terjadi. Namun, Salah satu sumber energi alternatif yang sangat berpotensi di Indonesia adalah *Coalbed Methane* (CBM) atau gas metana batubara.

Coalbed methane adalah gas metana (CH_4) yang terkandung dalam batubara yang terperangkap dalam *micropore* atau pori-pori batubara melalui proses mikrobial (*biogenic*) atau panas (*thermogenic*) selama proses pembentukan batubara. Letak *coalbed methane* yang jauh di dalam bumi (sekitar 500-1500 m) tidak memungkinkan untuk dilakukan penambangan batubara, selain itu kandungan gas metana yang tinggi dapat membahayakan penambangan tersebut. Penemuan *Coalbed methane* ini dianggap sebagai penemuan sumber energi terbesar di abad ini, namun demikian penelitian yang lebih mendalam mengenai CBM dimulai pada awal tahun 1990 (Arri, 1992; Hall, 1994). Banyaknya kendala dalam penelitian CBM ini diantaranya kompleksitas struktur batubara dan karaktersisasinya yang berbeda antara batubara dari satu sumber dengan sumber yang lain (Meyers, 1982). Penelitian yang telah dilaksanakan melalui *Round Robin Project* yang dilakukan oleh departemen energi USA, secara jelas menunjukkan perbedaan kapasitas adsorpsi hingga 200% untuk batubara dari berbagai lokasi di Amerika Serikat (Schroeder, 2003). Selain itu, kandungan air



dalam batubara dapat mempengaruhi besarnya kapasitas adsorpsi batubara hingga 100% tergantung pada jenis batubaranya (Gasem,2003). Oleh karena karakteristik alami yang berbeda untuk setiap batubara dari berbagai lokasi, maka penelitian biasanya dilakukan secara spesifik untuk masing-masing lokasi batubara tersebut. Penelitian tentang adsorpsi tekanan tinggi pada batubara Amerika Serikat dimulai pada tahun 1990-an dan masih berlanjut sampai saat ini (Arii, 1992; Hall, 1994; Gasem, 2001-2003), sedangkan kapasitas adsorpsi gas metana pada batubara Australia serta efek terhadap kandungan airnya telah diteliti oleh Clarkson dkk. (1997, 2000) dan Levy dkk. (1997), juga penelitian mengenai adsorpsi gas metana pada beberapa batubara Belanda telah dilakukan oleh Krooss dkk. (2002). Sementara itu belum ada penelitian mengenai kapasitas adsorpsi gas metana pada batubara Indonesia. Padahal informasi ini sangat diperlukan untuk estimasi kandungan gas pada reservoir serta sebagai input pada simulator proses produksi. Di Indonesia sendiri saat ini diidentifikasi memiliki 11 cekungan batubara dengan potensi sumber daya CBM. Potensi besar sumber daya CBM tersebut berada pada pulau Kalimantan dan Sumatera namun hasil produksinya masih dalam estimasi (Balitbang ESDM, 2005).

Model adsorpsi yang paling banyak digunakan sampai saat ini adalah jenis model yang didasarkan pada adsorpsi absolut (Do, 1998). Dalam hal ini, model memprediksi isoterm adsorpsi naik secara monoton sampai mencapai kapasitas jenuhnya. Sementara itu adsorpsi gas yang terukur, sebetulnya adalah didasarkan pada adsorpsi dengan pengabaian pada volume gas teradsorpsi itu sendiri (adsorpsi Gibbs). Meskipun adsorpsi absolut dan Gibbs berbeda sedikit saja pada tekanan rendah, isoterm adsorpsi Gibbs pada tekanan tinggi menunjukkan adanya maksimum yang dilanjutkan dengan penurunan yang tetap sebagai fungsi densitas gas (Benard, 1997; Sudibandriyo, 2003). Hal ini menyebabkan model-model seperti Langmuir (Dreisbach, 1999) ataupun Dubinin-Astakhov (Clarkson, 1997) kurang tepat untuk diaplikasikan untuk adsorpsi tekanan tinggi. Sebaliknya, model yang didasarkan pada adsorpsi Gibbs seperti Ono-Kondo (Benard, 1997; Sudibandriyo, 2003) ataupun *Simplified Local Density* (Chen, 1997; Fitzgerald, 2003) lebih tepat digunakan baik tekanan rendah maupun tekanan tinggi. Selain itu, model seperti Langmuir mempunyai akurasi yang sangat rendah untuk



digunakan untuk memprediksi sistem adsorpsi multi-komponen (Zhou, 1994). Juga, tidak ada korelasi yang jelas antara model ini dengan karakteristik dan bahan adsorbennya.

Penelitian terdahulu (Sudibandriyo, 2003) telah berhasil untuk 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 (*fixed carbon*), hidrogen, serta oksigen. Dengan menggunakan model tersebut informasi karakteristik batubara dapat digunakan untuk memprediksi kapasitas adsorpsi gas metana pada tekanan tinggi dan untuk kalibrasi model. Selain itu, jika perlu dapat dilakukan penyesuaian model untuk batubara Indonesia.

Pada akhir penelitian ini, diharapkan dapat memberikan gambaran tentang potensi *coalbed methane* (CBM) di berbagai sumber batubara Indonesia sebagai sumber gas alam baru. Dengan menggunakan pemodelan yang dikembangkan pada penelitian ini, juga diharapkan dapat memprediksi kapasitas adsorpsi gas metana dari berbagai daerah lain di Indonesia sepanjang informasi karakteristik batubara tersebut ada, sehingga gas metana yang teradsorpsi tersebut dapat dieksplorasi secara tuntas untuk prediksi potensi sumber daya *Coalbed Methane* (CBM) Indonesia sebagai sumber energi baru yang sangat berpotensi.

1.2. RUMUSAN MASALAH

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

- Belum adanya penelitian mengenai kapasitas adsorpsi gas metana pada batubara Indonesia yang sangat diperlukan untuk estimasi kandungan gas methana pada reservoir serta sebagai input pada simulator proses produksi.
- Belum adanya model adsorpsi tekanan tinggi gas metana yang sesuai dengan karakterisasi batubara Indonesia.



1.3. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah :

- Mendapatkan informasi kapasitas adsorpsi gas metana pada batubara Indonesia yang sangat diperlukan untuk estimasi kandungan gas metana pada reservoir serta sebagai input pada simulator proses produksi.
- Mendapatkan suatu model adsorpsi tekanan tinggi terhadap gas metana pada batubara Indonesia untuk prediksi potensi “*Coalbed Methane*” Indonesia sebagai sumber energi baru.

1.4. BATASAN MASALAH

Batasan masalah yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah :

- Sampel batubara yang dipakai adalah batubara Ombilin dan Barito sebagai batuan utama *coalbed methane* Indonesia untuk diuji kemampuan adsorpsinya terhadap gas metana.
- Pemodelan yang digunakan adalah model adsorpsi tekanan tinggi (*Ono-Kondo Lattice Model*).

1.5. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan makalah skripsi ini terdiri dari lima bab, antara lain:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini mencakup penjelasan mengenai latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini mencakup penjelasan mengenai landasan teori dari penelitian yang akan dilakukan antara lain mengenai adsorpsi, model adsorpsi Ono Kondo, CBM, dan batubara sebagai adsorben.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini mencakup penjelasan mengenai metode serta prosedur yang akan digunakan pada saat melakukan penelitian.



BAB IV PEMBAHASAN DAN ANALISIS

Bab ini mencakup pembahasan hasil penelitian serta analisis dari hasil penelitian tersebut.

BAB V KESIMPULAN

Bab ini mencakup kesimpulan yang didapat dari penelitian yang dilakukan serta saran yang diberikan untuk pengembangan penelitian di masa yang akan datang.





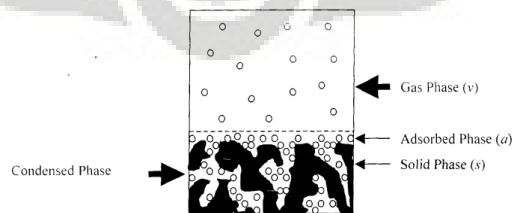
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 ADSORPSI

Adsorpsi merupakan suatu peristiwa dimana molekul-molekul dari suatu senyawa terikat oleh permukaan zat padat. 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).

Dalam adsorpsi gas, jumlah molekul yang teradsorpsi pada permukaan padatan bergantung pada kondisi dalam fasa gas. Jumlah molekul adsorbat yang teradsorpsi pada permukaan tersebut akan meningkat dengan kenaikan tekanan dan temperatur. Ketika ketebalan dari fasa yang teradsorpsi 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 menunjukkan ilustrasi dari proses adsorpsi gas pada material berpori.



Gambar 2.1 Adsorpsi gas pada material berpori pada kondisi kesetimbangan (Sudibandriyo, 2003)



Data adsorpsi gas tersebut dapat dilaporkan dengan menggunakan adsorpsi Gibbs atau Absolute. Dalam adsorpsi Gibbs dan Absolute 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 di atas menunjukkan bahwa adsorpsi absolute akan selalu lebih besar dari adsorpsi Gibbs. Pada tekanan rendah, koreksi Gibbs untuk adsorpsi absolut dapat diabaikan, tetapi untuk tekanan tinggi koreksi tersebut akan sangat signifikan.

2.1.1 Jenis-Jenis Adsorpsi

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

2.1.1.1 Adsorpsi fisika (*adsorpsi van der waals*)

Adsorpsi fisika merupakan bentuk yang paling umum dari adsorpsi. Adsorpsi ini terjadi karena terjadi gaya *Van der Waals* yaitu gaya tarik-menarik yang relatif lemah terjadi antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Pada adsorpsi fisika, adsorbat tidak terikat kuat pada permukaan adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan ke bagian permukaan lainnya, dan dapat diganti oleh adsorbat lainnya.

Adsorpsi fisik adalah suatu peristiwa yang reversibel. Bila dalam keadaan kesetimbangan kondisinya diubah, misalnya tekanannya diturunkan atau



temperaturnya dinaikkan, maka sebagian adsorbat akan terlepas dan akan membentuk kesetimbangan baru. Peristiwa adsorpsi gas terjadi sangat cepat.

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/gr-mol 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 *degassing* atau pemanasan pada temperatur 150 - 200 °C selama 2 - 3 jam.

2.1.1.2 Adsorpsi Kimia

Adsorpsi kimia merupakan adsorpsi yang terjadi karena terbentuknya ikatan kovalen dan ion antara molekul-molekul adsorbat dengan adsorben. Karena ikatan yang terbentuk merupakan ikatan yang kuat maka 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 dan hanya terbentuk monolayer. Adsorpsi kimia bersifat tidak reversibel dan umumnya terjadi pada temperatur tinggi di atas temperatur kritis adsorbat, sehingga panas adsorpsi yang dilepaskan juga tinggi (10 - 100 kkalgr-mol). 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/gr-mol.

Perbedaan antara adsorpsi kimia dan fisika dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Perbedaan Adsorpsi Fisika dan Adsorpsi Kimia(Otmer,1994):

Parameter	Adsorpsi Fisika	Adsorpsi Kimia
Adsorben	Semua padatan	Beberapa padatan
Adsorbat	Semua gas pada temperatur kritis	Beberapa gas secara kimiawi, Reaktif



Rentang temperatur	Temperatur ruang	Secara umum temperatur tinggi
Laju energi aktivasi	Sangat cepat, energi rendah	Non aktif energi rendah, aktif energi tinggi
Lapisan	Lapisan jamak (<i>multilayer</i>)	Lapisan tunggal
Reversibilitas	Sangat reversibel	Sangat irreversibel
Kegunaan	Untuk penentuan luas permukaan dan ukuran pori	Untuk penentuan daerah pusat aktif dan penjelasan kinetika reaksi permukaan
Panas Adsorpsi	Rendah (H = Panas kondensasi)	Tinggi, mencapai suhu reaksi

2.1.2 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi

Jumlah fluida yang teradsorpsi pada permukaan adsorben dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut ini: (Bahl dkk., 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 permukaan adsorben yang 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

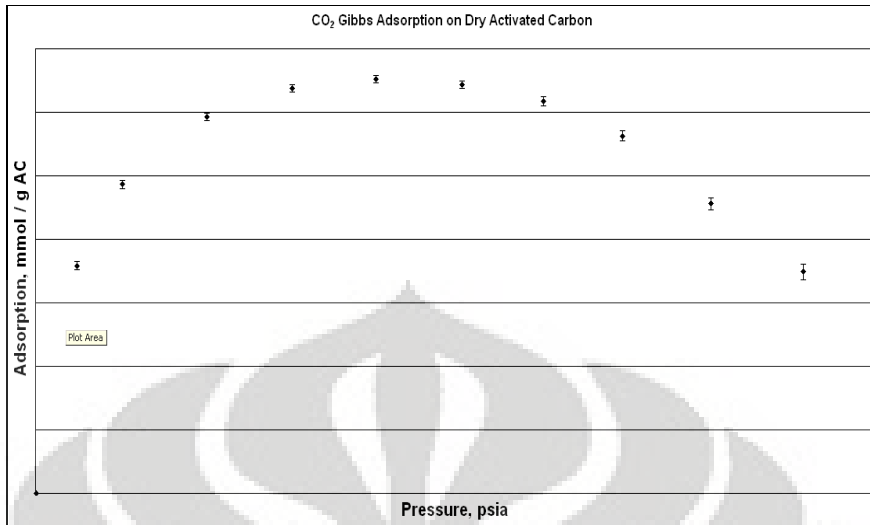
Pada adsorpsi fisika, jumlah zat yang diadsorpsi akan bertambah dengan menaikkan tekanan adsorbat. Sebaliknya pada adsorpsi kimia, jumlah zat yang diadsorpsi akan berkurang dengan menaikkan tekanan adsorbat.

2.1.3 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 teradsorpsi dalam padatan adsorben. Data keseimbangan 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 keseimbangan) dan pada saat terjadinya keseimbangan. (Bahl dkk., 1997; Sundstrom dan Herbert, 1979; Ruthven, 1993)

Adsorpsi Isotermis Gibbs

Pada adsorpsi Gibbs ini, jumlah adsorbat yang telah teradsorpsi lebih dahulu diabaikan, sehingga terdapat titik maksimum dari jumlah mol gas yang teradsorpsi per gram adsorben pada tekanan tertentu. Jika sudah tekanan sudah melebihi dari tekanan dimana terdapat titik maksimum, maka jumlah mol gas yang teradsorpsi per gram adsorben akan turun seperti pada gambar di bawah ini:



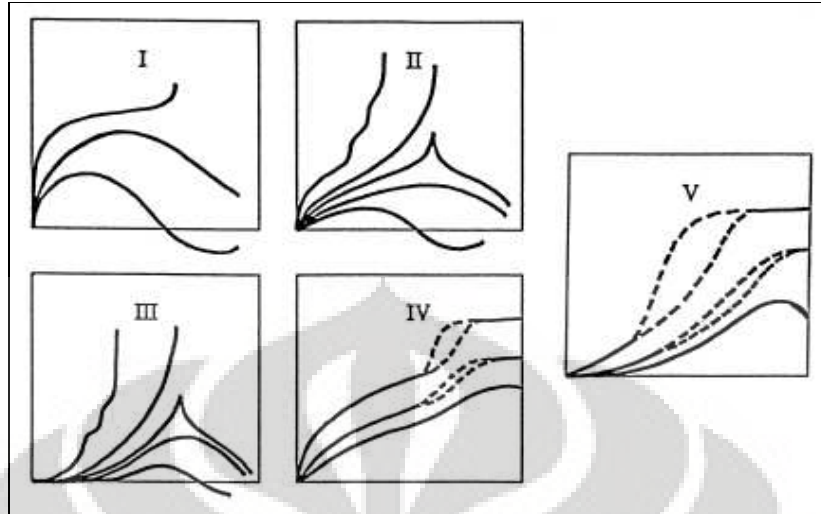
Gambar 2.2 Grafik adsorpsi isotermis Gibbs

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 2.3 Kurva adsorpsi isothermis Gibbs

Pada gambar di atas, absisnya adalah tekanan dan ordinatnya adalah jumlah zat yang teradsorp. Pada klasifikasi ini, Tipe I menunjukkan adsorpsi isothermis pada adsorben mikropori untuk kondisi subkritis, dekat dengan titik kritis, dan superkritis. Pada kondisi superkritis, adsorpsi isothermis tidak monoton. Tipe II dan III menunjukkan adsorpsi isothermis 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 isothermis BET). Tetapi, di dekat temperatur kritis, adsorpsi isothermis 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 isothermis pada adsorben mesopori dengan afinitas yang kuat dan lemah. (Donohue dan Aranovich, 1999)

2.1.4 Adsorben

Adsorben dapat didefinisikan sebagai zat padat yang dapat menyerap komponen tertentu dari suatu fase fluida. Secara alamiah semua zat padat dapat mengadsorpsi fluida karena permukaan suatu padatan memiliki afinitas yang kuat terhadap fluida sehingga fluida dapat terikat pada permukaan padatan tersebut,



namun kadang-kadang tidak terdeteksi karena sedemikian kecilnya adsorbat yang terserap.

Berdasarkan struktur dan unsur pembangunnya, adsorben dapat digolongkan menjadi dua yaitu adsorben tidak berpori (*non porous adsorbents*) dan adsorben berpori (*porous adsorbents*) (Oscik J, 1982).

2.1.4.1 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 dan $10 \text{ m}^2/\text{g}$, umumnya antara 0,1 sampai dengan $1 \text{ m}^2/\text{g}$. Bahan tak berpori seperti filter karet (*rubber filters*) 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 .

2.1.4.2 Adsorben berpori

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

Adapun klasifikasi pori menurut IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) yang sering digunakan: (Yang, 1997)

- Mikropori : diameter $< 20 \text{ \AA}$ ($d < 2 \text{ nm}$)
- Mesopori : diameter $20 \text{ \AA} < d < 500 \text{ \AA}$ ($2 - 200 \text{ nm}$)
- Makropori : diameter $> 500 \text{ \AA}$ ($> 200 \text{ nm}$)

Sebagai contoh beberapa jenis molekul yang menjadi adsorbat berdiameter efektif $< 3 \text{ \AA}$ adalah molekul H_2O , NH_3 , He, sedangkan molekul yang berukuran diameter efektif $> 3 \text{ \AA}$ adalah CH_4 , CO_2 , C_2H_2 , O_2 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, H_2S (Yang, 1997). Adapun beberapa jenis adsorben yang banyak digunakan dalam proses adsorpsi gas baik untuk penelitian maupun untuk proses di industri seperti silika, karbon aktif, zeolit, alumina, dan batubara.

2.1.5 Batubara

Batubara terbentuk dari materi-materi yang berasal dari tumbuhan yang terakumulasi di daerah rawa-rawa dan kemudian terkubur akibat proses geologi



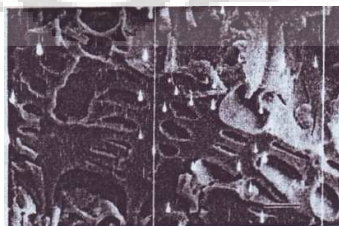
yang berlangsung secara terus menerus. Saat material yang berasal dari tumbuhan tersebut terkubur lebih dalam, maka temperatur dan tekanan menjadi meningkat, sehingga menyebabkan terjadinya suatu proses perubahan secara perlahan yang disebut dengan *coalification*. Selama proses *coalification* berlangsung, batubara perlahan-lahan menjadi kaya dengan kandungan karbon, menghasilkan dan mengeluarkan sejumlah besar gas yang kaya akan metana, serta mengandung sebagian kecil etana, karbondioksida dan nitrogen. Walaupun sebagian besar gas terlepas dengan seiring waktu, sebagian lagi terjebak (tersimpan) karena kemampuan batubara yang sangat baik untuk menyerap gas.

2.1.5.1 Struktur fisik batubara

Struktur fisik batubara meliputi : (Meyers, 1982)

1. *Lithotype region* dengan ukuran 10^{-2} - 10^{-1} m; terdiri dari hidrokarbon organik yang membedakan densitas, reflektivitas, kekuatan, dan kandungan volatil.
2. *Lithotype boundary* dengan ukuran 10^{-3} - 10^{-2} m; umumnya terdiri dari komposisi elemen non-hidrokarbon dan densitas sedikitnya 50 % lebih banyak daripada *lithotype*.
3. *Microscopic organic region* dengan ukuran 10^{-6} - 10^{-4} m ; dikenal sebagai *maceral* .
4. Pori-pori di antara matriks organik ; yang berukuran dan berbentuk variatif sekitar 10^{-9} - 10^{-5} .

Gambar 2.4 menunjukkan gambar SEM (*Scanning electron photomicrograph*) *maceral* :



Gambar 2.4 SEM dari maceral (Meyers,1982 ; Sudibandriyo,2003)



2.1.5.2 Batubara Barito dan batubara Ombilin

Pada sampel batubara Ombilin dan Barito dapat diketahui analisa batubara yaitu berupa analisa *proximate* dan *ultimate*, yaitu sebagai berikut :

- Analisa *Proximate* adalah analisa untuk mengetahui kandungan air , abu (residu inorganik sisa setelah pembakaran) , materi volatil (terdiri dari gas dan uap yang terlepas selama pyrolisis) , dan *fixed carbon* atau fraksi nonvolatil dari batubara. Selain itu, analisa *proximate* mengikutsertakan *ash fusion temperature* dan *free swelling index* (ASTM D-720, ISO 8264)
- Analisa *Ultimate* adalah analisa untuk mengetahui persentase berat karbon, sulfur, nitrogen, oksigen (yang biasanya diestimasi berdasarkan selisih) dan element mikro lainnya.

Pada tabel 2.2 menunjukkan analisa *proximate* dan *ultimate* dari kedua sampel batubara Ombilin dan Barito beserta rank batubaranya.

Tabel 2. 2 Analisa *Proximate* dan *Ultimate* Batubara Ombilin dan Barito (Belkin, Harvey, 2001)

Unit	Batubara Ombilin	Batubara Barito
Total moisture (% wt)	3.10	5.29
Residual moisture (% wt)	1.05	1.63
Air Dry loss (% wt)	2.07	3.72
Ash (% wt)	7.33	12.63
Volatile Matter (% wt)	42.84	42.58
Fixed Carbon (% wt)	46.73	39.50
Hydrogen (% wt)	5.41	5.33
Carbon (% wt)	73.16	63.69
Nitrogen (% wt)	1.35	1.10
Sulfur (% wt)	0.51	0.79
Oxygen (% wt)	9.14	11.2
Calorific Value (kcal/ kg)	7340	6490
Apparent Rank	<i>High volatile A bituminous</i>	<i>High Volatile B bituminous</i>



2.2 MODEL ADSORPSI

Banyak model teori dan empiris telah dikembangkan untuk menerangkan berbagai adsorpsi isothermal. Pada saat ini, tidak ada satupun persamaan yang dapat menerangkan seluruh mekanisme dengan sempurna. Namun terdapat beberapa model yang dapat lazim digunakan yaitu :

2.2.1 Adsorpsi isothermis Langmuir (Bond, 1987; Maron dan Lando 1974)

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

Persamaan umum yang digunakan pada Langmuir adalah:

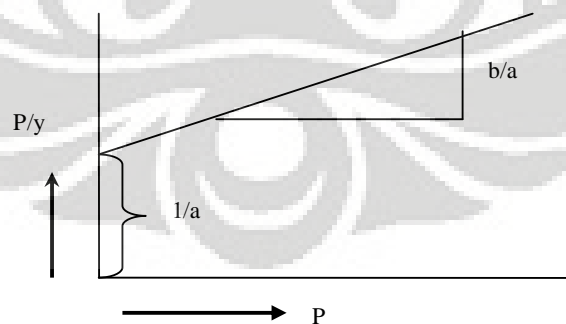
$$\frac{P}{y} = \frac{1}{a} + \frac{b}{a} P \quad (2.5)$$

dimana:

a dan b adalah konstanta

$$a = k_1 b$$

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



Gambar 2.5 Grafik isotherm Langmuir

Persamaan Langmuir di atas 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

2.2.2 Adsorpsi isoterms BET

Persamaan Langmuir berlaku untuk adsorpsi fisika dengan lapisan tunggal monolayer. Perluasan persamaan Langmuir sehingga dapat digunakan untuk adsorpsi dengan lapisan jamak (multilayer) adalah persamaan Brunauer, Emmet, dan Teller (BET).

Metode BET (Breunauer-Emmet-Teller) adalah salah satu metode yang paling umum digunakan untuk menentukan luas permukaan spesifik dari karbon aktif. Prinsip metode ini adalah pengukuran mesopori dan mikropori karbon aktif dengan pengukuran adsorpsi gas nitrogen (adsorbat) pada karbon aktif pada tekanan tertentu. Alat yang digunakan untuk mengukurnya adalah autosorb.

Metode BET didasarkan pada penentuan volume molekul yang teradsorpsi (q_m) secara fisika, setebal satu lapisan monolayer pada permukaan adsorben. Jumlah dari gas yang teradsorpsi oleh karbon aktif diekspresikan dengan persamaan berikut (Maron dan Lando, 1974) :

$$\frac{x}{q(1-x)} = \frac{1}{K_B \cdot q_m} + \frac{(K_B - 1) \cdot x}{K_B \cdot q_m} \quad (2.6)$$

Keterangan:

- $x = \frac{P}{P_0} = \frac{\text{Tekanan gas saat adsorpsi (tekanan ekuilibrium)}}{\text{Tekanan jenuh adsorbat gas pada suhu percobaan}}$
- q = Volume gas yang diadsorpsi pada tekanan P
- q_m = Volume gas yang diadsorpsi untuk monolayer
- K_B = Konstanta fungsi panas pencairan dan panas adsorpsi

Dari persamaan di atas terlihat bahwa dengan mengetahui data-data volume gas metana yang terserap pada tekanan tertentu, q_m dan K_B dapat diperoleh. Asumsi utama yang digunakan pada persamaan BET adalah interaksi antar molekul yang teradsorpsi selama adsorpsi berlangsung menyebabkan



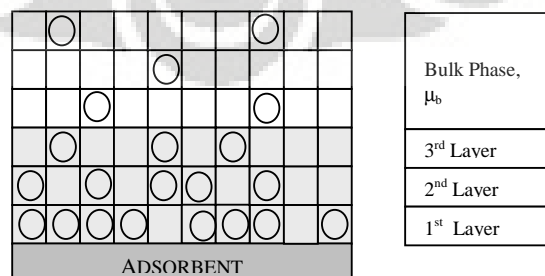
terbentuknya lapisan baru yang menutupi lapisan monomolekular yang telah terbentuk lebih dahulu.

2.2.3 Adsorpsi isoteremis *Lattice Theory* (Model Ono-Kondo)

Pemodelan adsorpsi berdasarkan pada teori lattice diusulkan pertama kali oleh Ono dan Kondo pada tahun 1960. Secara lebih formal lebih dikembangkan kembali oleh Donohue dan rekan untuk adsorpsi larutan (Aranovich dkk., 1996 dan 1997; Hocker dkk.,1999). 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 absolute.
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 2.6 Adsorpsi multi-layer (Sudibandriyo, 2003)



Interaksi molekular terjadi di antara molekul-molekul yang bertetangga. Pada saat kesetimbangan tercapai, konfigurasi energi bebas dari lapisan pertama dan lapisan berikutnya dapat dituliskan dengan kesetimbangan adsorpsi gas untuk lapisan $t = 2, 3, \dots, m$ (jumlah lapisan) sebagai berikut (Hocker, 1999):

$$\ln[x_t(1-x_b)/x_b(1-x_t)] + z_0(x_t - x_b)\epsilon_{ii} / kT + (x_{t+1} - 2x_t + x_{t-1})\epsilon_{ii} / kT = 0 \quad (2.7)$$

dengan x_t adalah fraksi dari sel yang terisi oleh molekul teradsorpsi pada lapisan t . Sedangkan kesetimbangan adsorpsi gas untuk lapisan pertama:

$$\ln[x_1(1-x_b)/x_b(1-x_1)] + (z_1x_1 + x_2 - z_0x_b)\epsilon_{ii} / kT + \epsilon_{is} / kT = 0 \quad (2.8)$$

dimana,

- x_t = Fraksi dari sel yang terisi oleh molekul teradsorpsi pada lapisan pertama
- x_b = Fraksi komponen yang teradsorpsi (adsorbat) pada fasa gas (*bulk*)
- z_0 = Nomor koordinasi (gas metana, $z_0 = 8$)
- z_1 = Nomor koordinasi paralel (gas metana, $z_1 = 6$)
- ϵ_{ii} = Energi interaksi intern molekul adsorbat
- ϵ_{is} = Energi interaksi antar molekul adsorbat dan inti aktif adsorben
- k = konstanta Boltzman
- T = Temperatur

Sedangkan total adsorpsi Gibbs dihitung dengan menggunakan:

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

dimana,

- m = Jumlah lapisan pada total adsorpsi Gibbs (gas metana, $m = 2$)
- $x_{i,t}$ = Fraksi dari sel yang terisi oleh molekul teradsorpsi i pada lapisan t



- $x_{i,b}$ = Fraksi komponen i yang teradsorpsi pada fasa gas (*bulk*)
- C = Kapasitas adsorpsi maksimum dari adsorben

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.

Tabel 2.3 menunjukkan hasil pendahuluan penggunaan model ini untuk merepresentasikan data adsorpsi gas metana pada karbon aktif pada 45 °C. Dalam hal ini, ada tiga parameter yang ditentukan, dan empat parameter yang diregresi untuk mendapatkan deviasi yang paling minimum terhadap data percobaan. Hasilnya menunjukkan bahwa model yang digunakan sangat baik merepresentasikan data percobaan, dilihat dari % AAD (Average Absolute Deviation) yang sangat kecil (0,8 %). Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun model yang diusulkan punya potensi besar dalam merepresentasikan data adsorpsi gas, parameter-parameter di dalam model masih perlu dievaluasi lebih lanjut. Evaluasi ini meliputi: penentuan jumlah lapisan di dalam fasa teradsorpsi untuk setiap sistem tertentu dan formulasi yang umum serta perkiraan harga parameter yang masuk akal, didasarkan pada sifat dan karakteristik dari adsorbat-adsorben yang dapat diperoleh dengan mudah (Sudibandriyo, 2003).

Tabel 2.3 Hasil Pendahuluan Model OK untuk Adsorpsi Gas Metana pada Karbon Aktif pada 45 °C (Sudibandriyo, 2003)

OK Parameters	Methane
M	2
z_0	8
z_1	6
$z_2=(z_0-z_1)/2$	1
ϵ_{1s}/k (K)	-1385
ϵ_{ii}/k (K)	64
ρ_{mc} (g/cc)	0.38



C (mmol/g AC)	3.21
%AAD	0.8

Sedangkan untuk estimasi parameter kapasitas maksimum adsorpsi, C , dapat dibagi dalam dua kontribusi; dalam hal ini, kontribusi dari karakteristik adsorben, yaitu luas permukaan (A , m^2/g), dan kontribusi dari karakteristik adsorbat. Di dalam studi ini diusulkan suatu korelasi sederhana sebagai berikut:

$$C(T) = \frac{AC_a(T)}{2} \quad (2.10)$$

C_a adalah densitas permukaan dari fasa teradsorpsi ($mmol/m^2$), yang besarnya hanya dipengaruhi oleh jenis adsorbat.

Nilai C juga merupakan fungsi temperatur, harga C naik jika temperatur diturunkan. Ketergantungan dari parameter C terhadap temperatur bukanlah sesuatu hal yang baru. Benard dan Chahine (1997; 2001) mengusulkan suatu korelasi empiris antara kapasitas maksimum adsorpsi dengan temperatur. Mirip dengan ini, Do (1998) juga menyatakan bahwa kapasitas maksimum adsorpsi di dalam model langmuir juga merupakan fungsi dari temperatur. Menurut Do (1998) menyebutkan bahwa ketergantungan terhadap temperatur ini adalah disebabkan karena adanya ekspansi thermal dari fase yang teradsorpsi.

2.3 COALBED METHANE (CBM)

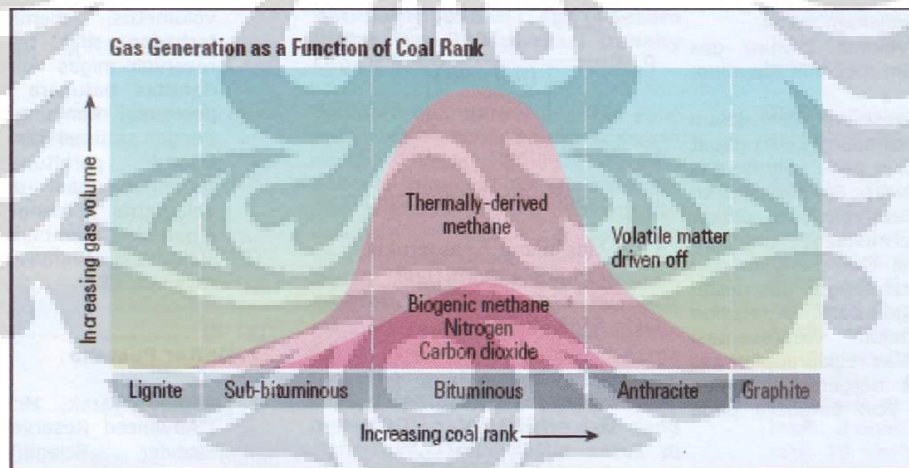
Coalbed Methane (CBM) atau *Coal seam Methane* (CSM) merupakan gas metana yang terbentuk dari aktivitas mikrobial (*biogenic*) atau panas (*thermogenic*) selama proses pembentukan batubara yang umum ditemui atau terperangkap di dalam lapisan batubara dan merupakan salah satu sumber daya energi bersih 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.

Coalbed methane (CBM) 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).



Gambar 2.7 Hubungan volume gas yang terbentuk sebagai fungsi rank batubara (Anderson, 2003)

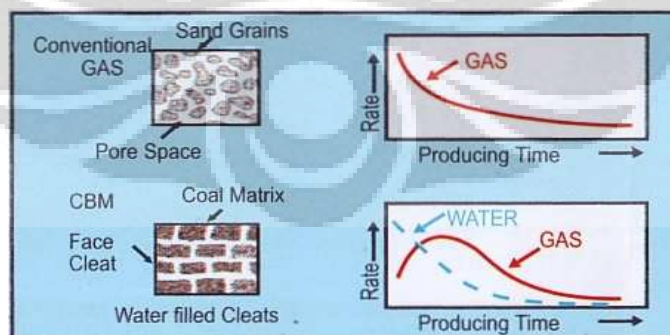
2.3.1 Karakteristik reservoir CBM



Karakteristik reservoir CBM berbeda dari gas konvensional pada berbagai lokasi. Perbedaan tersebut dapat dilihat dalam tabel 2.4:

Tabel 2.4 Perbandingan Antara Karakteristik Reservoir Gas Konvensional dan CBM (K.Aminian,2003)

Karakteristik	Konvensional	CBM
Produksi gas	Gas dihasilkan pada sumber batuan dan bermigrasi ke reservoir	Gas dihasilkan dan terperangkap di antara batubara
Struktur	Rekahan/retakan yang tak beraturan	<i>cleats</i> yang sama besar
Mekanisme penyimpanan gas	kompresi	adsorpsi
Mekanisme transportasi	Gradien tekanan (Hukum Darcy)	Gradien konsentrasi (Hukum Fick) dan Gradien tekanan (Hukum Darcy)
Performansi Produksi	Laju gas mulai meningkat kemudian menurun, awalnya terdapat sedikit atau tidak ada air. GWR (<i>Ground water Recharge</i>) menurun seiring dengan waktu	Laju gas meningkat dengan waktu kemudian menurun. Awalnya terdapat banyak air. GWR (<i>Ground water Recharge</i>) meningkat seiring dengan waktu.
Sifat-sifat fisika	Modulus Young $\sim 10^6$, kompresibilitas pori $\sim 10^{-6}$	Modulus Young $\sim 10^5$, kompresibilitas pori $\sim 10^{-4}$



Gambar 2.8 Perbandingan Produksi Gas Konvensional dan CBM (Hochheiser, 2003)



Komponen reservoir CBM terdiri atas batuan reservoir, isi dari reservoir yang terdiri atas komponen utama yaitu gas alam sedangkan air sebagai komponen ikutan, batuan penutup (*seal*) reservoir dan kondisi reservoir. Berbeda dengan reservoir gas konvensional, batubara adalah reservoir batuan dan sumber gas metana. Batubara adalah media heterogen dan media pori yang mempunyai karakteristik oleh dua jenis sistem porositas yaitu: makropori dan mikropori. Makropori yang dikenal sebagai *cleat*, merupakan rekahan batubara pada setiap lapisan batubara. Mikropori, atau *matrix* merupakan tempat penyimpanan sebagian besar gas. *Cleat* terdiri atas *face cleat* yang merupakan jalur rekahan dan disebut *face cleat* yang merupakan jalur rekahan bersifat menerus sepanjang pelapisan dan *butt cleat* yang merupakan jalur rekahan bersifat tidak menerus. Uniknya, *face cleat* dan *butt cleat* saling tegak lurus.

Adapun beberapa keuntungan dan kerugian dari gas metana batubara dapat dilihat pada tabel 2.5 sebagai berikut :

Tabel 2.5 Keuntungan dan Kerugian dari Gas Metana Batubara (CBM)

Keuntungan CBM	Kerugian CBM
Memberikan jaminan pasokan gas terhadap pasokan gas terhadap pasar-pasar utama	Memerlukan area yang luas di permukaan
Memungkinkan cara pengembangan lapangan bertahap	Memerlukan biaya pembuangan dan penanganan air
Produksi yang lama	Bertekanan rendah sehingga memerlukan jumlah sumur-sumur yang banyak
Lokasi di sumur-sumur dangkal di darat	Biaya operasi & pengembangan sumur yang lebih tinggi
Berpotensi untuk penyimpanan permanen CO ₂ (<i>CO₂ sequestration</i>)	Produksi awal yang rendah

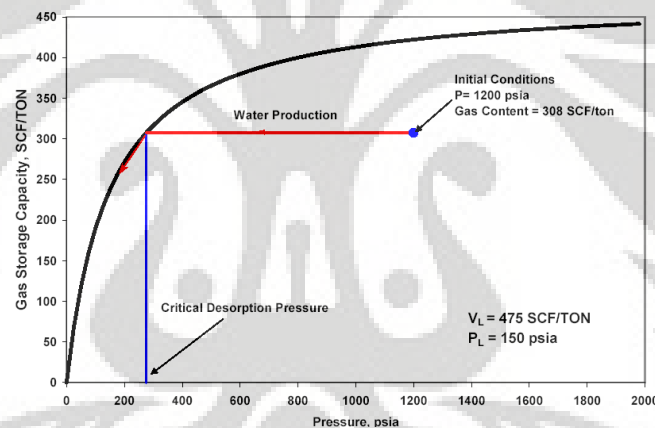
Beberapa bagian karakteristik dari CBM adalah sebagai berikut :



2.3.1.1 Penyimpanan (Storage)

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 2.9, maka tidak akan ada gas dan *cleat* akan terisi dengan air.



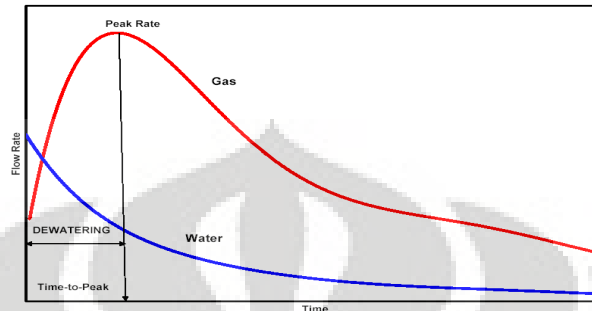
Gambar 2.9 Langmuir isotherm (K.Aminian, 2003)

2.3.1.2 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 2.10 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 m. Tekanan pada kedalaman lebih dari > 1000 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

METODE PENELITIAN

3.1 LOKASI PENELITIAN

Penelitian ini akan dilakukan Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam, Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. Penelitian akan dilanjutkan di laboratorium komputer dan di luar kampus.

3.2 BAHAN-BAHAN DAN ALAT-ALAT PENELITIAN

Adapun alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah :

1. Modifikasi alat gelas
2. Pengontrol suhu
3. Pemanas (*furnace*)
4. Indikator tekanan (*pressure indicator*)
5. Alat uji adsorpsi

Sementara itu, bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

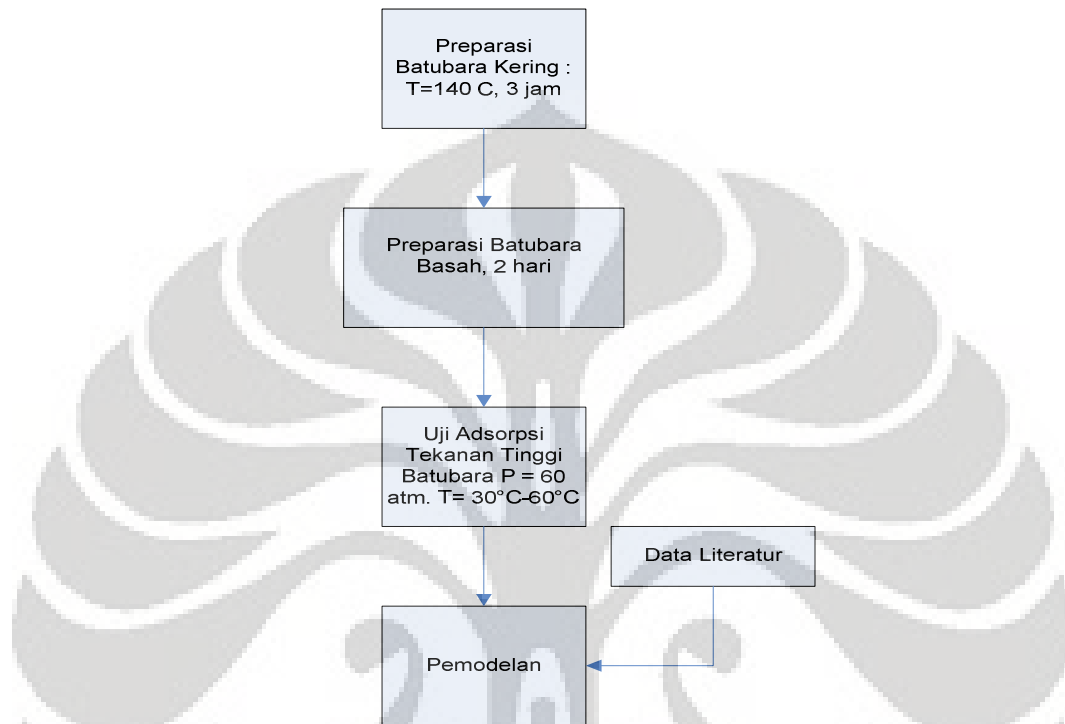
1. Batubara Ombilin dan Barito
2. Helium (He)
3. Metana (CH₄)

3.3 RANCANGAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui informasi kapasitas adsorpsi gas metana pada batubara Indonesia. Prinsip yang digunakan adalah prinsip adsorpsi dengan menggunakan batubara Barito dan Ombilin sebagai adsorben batubara kering. Selanjutnya, dalam hal ini akan diuji kapasitas adsorpsi batubara basah dengan maksud untuk mengetahui kapasitas adsorpsi batubara pada kondisi yang menyerupai sebenarnya di reservoir CBM.



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



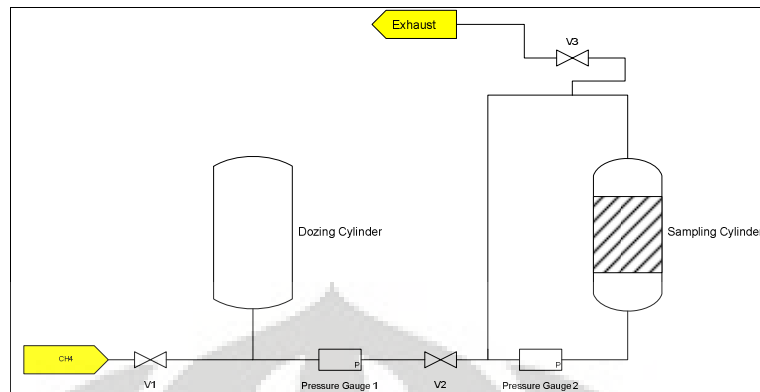
Gambar 3. 1. Diagram alir penelitian

3.4 PROSEDUR PENELITIAN

Prosedur penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yaitu persiapan alat, preparasi batubara, preparasi batubara kering dan basah, pengujian adsorpsi tekanan tinggi batubara, dan pemodelan.

3.4.1 Persiapan Peralatan

Adapun persiapan peralatan seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 3.2. Skema alat untuk analisa daya adsorpsi batubara

3.4.2 Preparasi Batubara

Sampel batubara dari Ombilin dan Barito sekitar 5 kg untuk dipreparasi dengan digerus dengan menggunakan “grinder” sampai menjadi pecahan kecil. Setelah itu, sampel ini digerus dengan mortar dan diayak dengan saringan ukuran 200 μm . Butiran batubara ini kemudian disimpan dalam kontainer dan ditutup rapat untuk kemudian dipakai sebagai sampel induk.

3.4.3 Preparasi Batubara Kering

Dari sampel induk, diambil sekitar 400 gram batubara dan ditaruh di atas nampan kering yang sudah ditimbang. Nampan dan batubara ini kemudian dimasukkan ke dalam oven pada temperatur 140 $^{\circ}\text{C}$ selama 3 jam. Selama pengovenan, ditunggu hingga diperoleh berat yang konstan.

3.4.4 Preparasi Batubara Basah (*Moisture Equilibrium Coal*)

Dari sampel yang telah dikeringkan, diambil lagi sekitar 65 gram batubara dan ditaruh di atas nampan kering yang sudah ditimbang. Nampan dan batubara ini kemudian dimasukkan ke dalam wadah tertutup (*humidifier*) yang dikelilingi air pada suhu ruang selama 2 hari. Setelah preparasi batubara basah, ditimbang perubahan berat sampel batubara. Besarnya persentase kandungan air kesetimbangan di dalam batubara dihitung sebagai berikut :

$$\frac{m_f - m_i}{m_{bb}} \times 100 \% \quad (3.1)$$

Dengan ,

m_f = massa sampel dan cawan setelah preparasi batubara basah



m_i = massa sampel dan cawan sebelum preparasi batubara basah

m_{bb} = massa sampel batubara yang dipreparasi

3.4.5 Uji Adsorpsi Tekanan Tinggi Batubara

Prosedur penelitiannya adalah sebagai berikut: (Goodman dkk, 2004; Perwitasari, 2007)

1. Kalibrasi volume void *sampling cylinder*

Volume void dari *sampling cylinder (equilibrium cell)* adalah volume total dari ruang kosong yang terdapat pada *sampling cylinder*.

$$V_{\text{void}} = V_{SC} - V_{\text{ruang yang terisi material}} + V_{\text{pori-porimaterial}} \quad (3.2)$$

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 :

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

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

- 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 :

$$n_i = \left(\frac{P_{di}}{Z_{He, di} RT} - \frac{P_{df}}{Z_{He, df} RT} \right) V_{\text{dozing cylinder}} \quad (3.4)$$



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

$$V_{void} = \frac{n_i Z_{i,di} RT}{P_{sf}} \quad (3.5)$$

- e. Mengeluarkan gas He dari *sampling cylinder* dengan membuka valve V-3.

2. Uji adsorpsi gas CH₄

- a. Mengisi *dozing cylinder* dengan gas CH₄ 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 CH₄ ke *sampling cylinder* dengan membuka valve V-2. Ketika gas CH₄ telah masuk ke dalam *sampling cylinder*, menutup valve V-2 serta mencatat tekanan akhir *dozing cylinder* (P_{df}).
- c. Menunggu selama 30 menit, kemudian mencatat tekanan akhir dari *sampling cylinder* (P_{sf}).
- d. Mencari jumlah mol zat yang teradsorpsi dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$n_{CH_4 \text{ teradsorp}} = n_{CH_4 i} - n_{CH_4 \text{ tidak teradsorp}}$$
$$n_{CH_4 \text{ teradsorp}} = \left[\left(\frac{P_{di}}{Z_{CH_4,di} RT} - \frac{P_{df}}{Z_{CH_4,df} RT} \right) V_{dozing \ cylinder} \right] - \left[\frac{P_{sf} V_{void}}{Z_{CH_4,df} RT} \right] \quad (3.6)$$

- e. Prosedur a sampai d dilakukan untuk tekanan akhir *sampling cylinder* (P_{sf}) sekitar 150 psia, 300 psia, 450 psia, 600 psia, 750 psia, dan 900 psia.

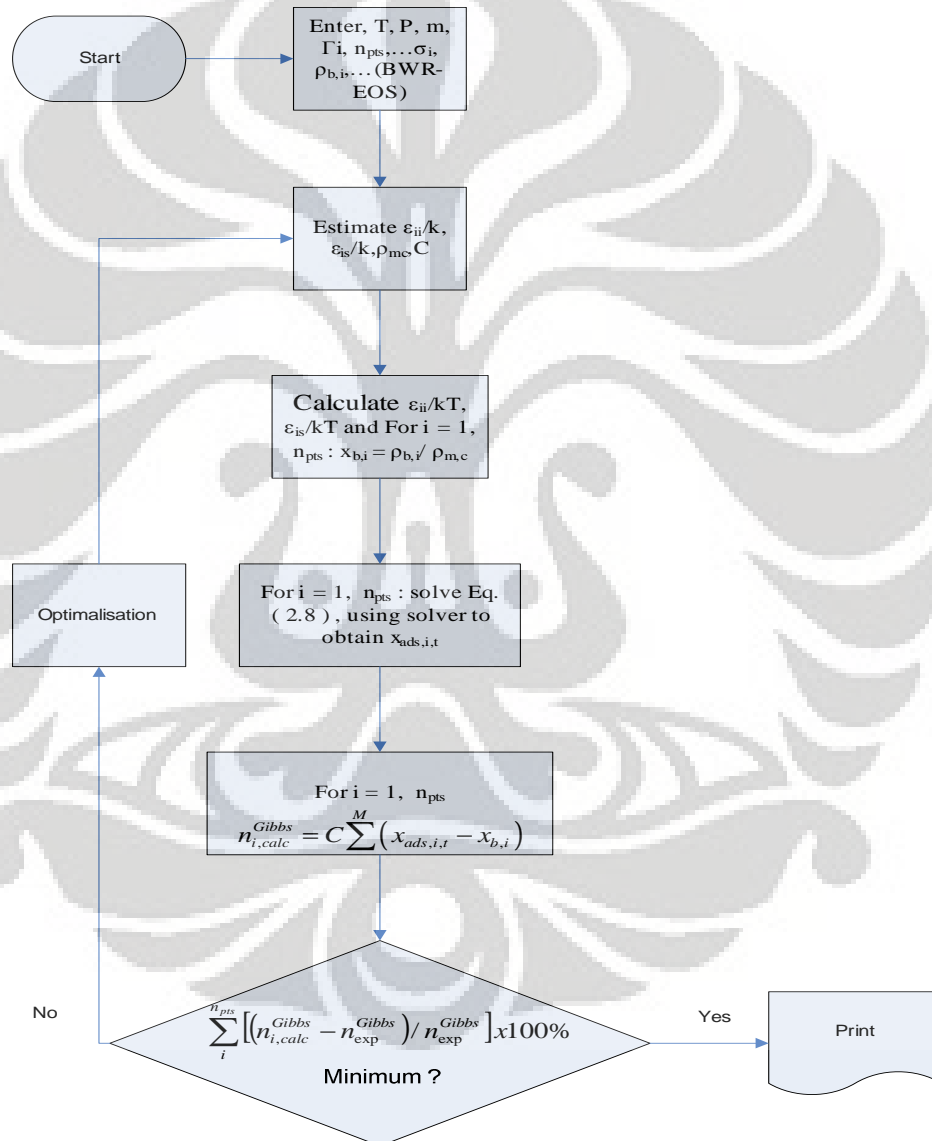
3. Prosedur 1 dan 2 dilakukan untuk variasi batubara basah dan 3 variasi temperatur (30°, 40°, & 60 °C).



4. Prosedur 1 dan 2 dilakukan untuk kedua jenis batubara (Batubara Ombilin & Batubara Barito).

3.4.6 Pemodelan

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan model Ono-Kondo yang didasarkan pada *Lattice Theory* (Sudibandriyo, 2003). Adapun algoritma pemodelannya adalah :



Gambar 3.3 Algoritma operasi parameter model



3.5 ANALISA

Pada penelitian ini akan dianalisa kapasitas adsorpsi gas metana pada sampel induk batubara yang divariasikan pada temperatur 30 °C - 60 °C dan tekanan antara 0 – 60 atm. Setelah itu akan dibandingkan dengan data literatur dan akan dibuat pemodelan adsorpsi tekanan tinggi yang sesuai dengan karakterisasi batubara Indonesia.





BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 HASIL PREPARASI BATUBARA

4.1.1 Hasil Preparasi Batubara Kering

Preparasi adsorben ini dilakukan untuk mengaktivasi sampel batubara agar siap digunakan sebagai adsorben. Proses preparasi ini merupakan proses fisika yang tidak adanya penggunaan bahan kimia ataupun reaksi kimia yang dialami oleh kedua sampel batubara. Proses preparasi ini terdiri dari proses penghalusan dan pemanasan. Kedua sampel batubara ini yaitu batubara Barito dan batubara Ombilin diperlakukan sama dalam proses preparasi. Kedua sampel batubara berwarna hitam kelam.

Proses preparasi pertama adalah penghalusan. Kedua jenis batubara awalnya berbentuk bongkahan besar kasar kemudian dihaluskan dengan lumpang dan mortar kemudian disaring dengan saringan berukuran 0,2 mm. Hal ini bertujuan untuk memperoleh ukuran sampel batubara yang lebih kecil sehingga memperbesar luas permukaan dan mempermudah proses adsorpsi. Terlihat dalam gambar 4. 1 menunjukkan sampel batubara yang belum dipreparasi dan gambar 4.2 menunjukkan kedua sampel batubara yang telah dihaluskan.



Gambar 4.1 Sampel batubara sebelum dipreparasi



Gambar 4.2 Batubara Barito dan batubara Ombilin setelah dihaluskan

Proses preparasi lainnya adalah pemanasan. Proses pemanasan yang dilakukan adalah pemanasan sampel sebanyak 400 gram dengan menggunakan furnace (oven) pada temperatur 140 °C selama 3 jam. Pemanasan ini bertujuan untuk menguapkan molekul-molekul air dan pengotor lainnya yang terkandung dalam batubara agar mendapatkan sampel batubara kering tanpa kandungan air.

4.1.2 Hasil Preparasi Batubara Basah (Batubara Dengan Kandungan Air Kesetimbangan)

Proses preparasi berikutnya adalah membuat adsorben batubara dengan kandungan air kesetimbangan. Sebagian adsorben batubara yang telah dikeringkan pada cawan diletakkan di wadah tertutup yang berisi air selama dua hari pada temperatur ruang. Preparasi batubara dengan kandungan air kesetimbangan dilakukan agar dapat diketahui pengaruh kandungan air terhadap besarnya kapasitas adsorpsi gas metana yang akan dilakukan. Kandungan air kesetimbangan untuk setiap jenis batubara dapat dilihat pada Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Persentase Kandungan Air Kesetimbangan Sampel Batubara

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



4.2 HASIL PERSIAPAN PERALATAN ADSORPSI TEKANAN TINGGI CH₄

Peralatan yang digunakan untuk proses adsorpsi tekanan tinggi gas CH₄ (Metana) terdiri dari satu buah *dozing cylinder*, *sampling cylinder*, tiga buah valve, pipa – pipa penghubung kedua silinder dan pipa penghubung tabung gas dan *dozing cylinder*, dan dua buah *pressure indicator* atau *pressure gauge* yang digunakan untuk mengukur tekanan pada kedua silinder tersebut. Pada peralatan yang didesain ini juga terdapat dua buah alat pengontrol suhu yang dipasang pada bagian samping dan tengah atas dari inkubator. Pengontrol suhu yang dipasang pada bagian samping dipasang termokopel yang akan mengatur nyala lampu pemanas hingga mencapai temperatur yang diinginkan. Peralatan adsorpsi tekanan tinggi tersebut dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Peralatan uji adsorpsi tekanan tinggi gas CH₄

Sebelum dilakukan uji adsorpsi tekanan tinggi, alat-alat tersebut dicek kebocorannya dengan uji menggunakan gelembung sabun pada bagian sambungan-sambungan pipa dan tabung. Jika terjadi kebocoran, maka gelembung sabun akan terlihat. Pengecekan kebocoran ini dilakukan untuk mendapatkan data uji adsorpsi yang baik dan juga untuk menghindari adanya bahaya yang akan terjadi pada lingkungan, peneliti dan peneliti-peneliti lainnya yang ada di laboratorium. Uji kebocoran ini dilakukan pada tekanan sekitar 900 psi. Hal ini dilakukan untuk menghindari kebocoran yang sangat kecil yang tidak dapat terdeteksi jika dilakukan uji pada tekanan yang lebih rendah.



4.3 HASIL KALIBRASI VOLUME DOZING CYLINDER

Untuk mengetahui volume *dozing cylinder* dapat diketahui 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*.

Besarnya volume *dozing cylinder* yang didapat adalah 486 mL. volume tersebut belum termasuk volume pipa-pipa yang ada dalam satu 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 didapatkan volume keseluruhan adalah 486,73 mL.

4.4 HASIL KALIBRASI VOLUME VOID PADA SAMPLING CYLINDER

Pengukuran *void volume* dengan menggunakan gas helium yang bersifat inert ke dalam *sampling cylinder* pada tekanan 900 psia dan temperature 40 °C. Setelah mendapatkan data tekanan pada *dozing cylinder* dan *sampling cylinder*, maka *void volume* ini dapat dihitung dengan persamaan berikut :

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

dengan

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

Dengan penjelasan sebagai berikut :

- 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



Penentuan kalibrasi *volume void* cukup dilakukan satu kali running saja karena hasilnya tidak jauh berbeda atau penyimpangannya kecil (Perwitasari, 2007). Pada tabel 4.2 menunjukkan hasil kalibrasi *volume void* pada sampel batubara Ombilin dan batubara Barito.

Tabel 4.2 Hasil Kalibrasi Volume Void Sampel Batubara Ombilin dan Batubara Barito

Jenis Sampel Batubara	Massa (gram)	P Dozing		P Sampling		Void volume (ml)
		Awal (psia)	Akhir (psia)	Awal (psia)	Akhir (psia)	
Barito Kering	65	1091,25	901,43	925	953,99	93,8
Barito Basah	65,15	996,32	853,99	792,98	905,34	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

4.5 HASIL ADSORPSI TEKANAN TINGGI TERHADAP GAS METANA (CH₄)

Adsorpsi yang terjadi adalah adsorpsi fisik dimana tidak terjadi reaksi kimia selama adsorpsi berlangsung, sehingga proses adsorpsi hanya tergantung pada sifat fisik adsorbat (CH₄) dan karakteristik adsorben (batubara Ombilin dan Barito) baik dalam keadaan kering maupun basah.

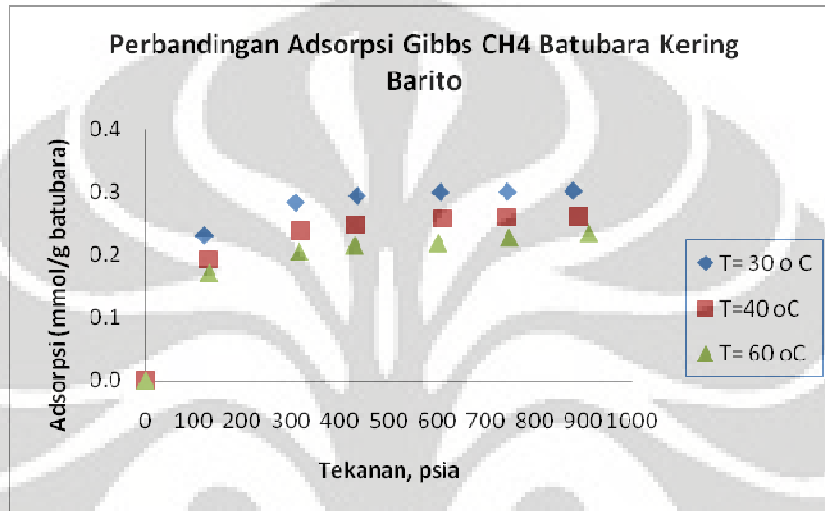
Dalam penelitian ini, uji adsorpsi dilakukan dengan variasi temperatur, tekanan, dan kandungan air sehingga dapat diketahui pengaruh ketiga variabel bebas tersebut terhadap kapasitas adsorpsi. Data hasil penelitian adsorpsi untuk masing-masing sampel batubara dapat dilihat pada lampiran.

Adsorpsi tekanan tinggi dilakukan masing-masing pada kedua sampel baik kering maupun basah pada temperatur 30°, 40°, dan 60°C. Untuk setiap isotherm, adsorpsi dilakukan untuk beberapa tekanan pada tekanan 150 hingga 900 psia. Pada setiap tekanan 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 adsorbat CH₄ yang dimasukkan ke dalam *sampling cylinder*. Sedangkan dari tekanan akhir *sampling*

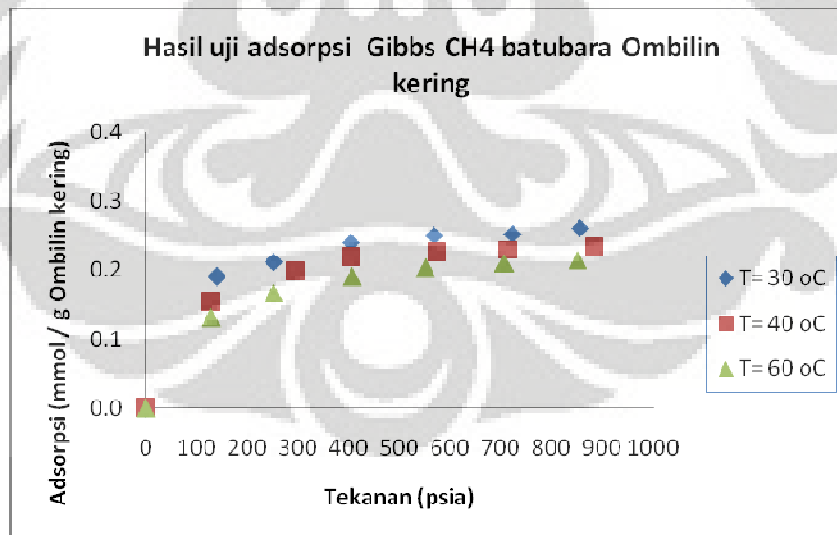


cylinder dapat diperoleh jumlah mol CH₄ yang teradsorpsi dengan menggunakan persamaan 3.5. Tekanan yang dicatat adalah tekanan yang tepat berubah ketika valve tertutup.

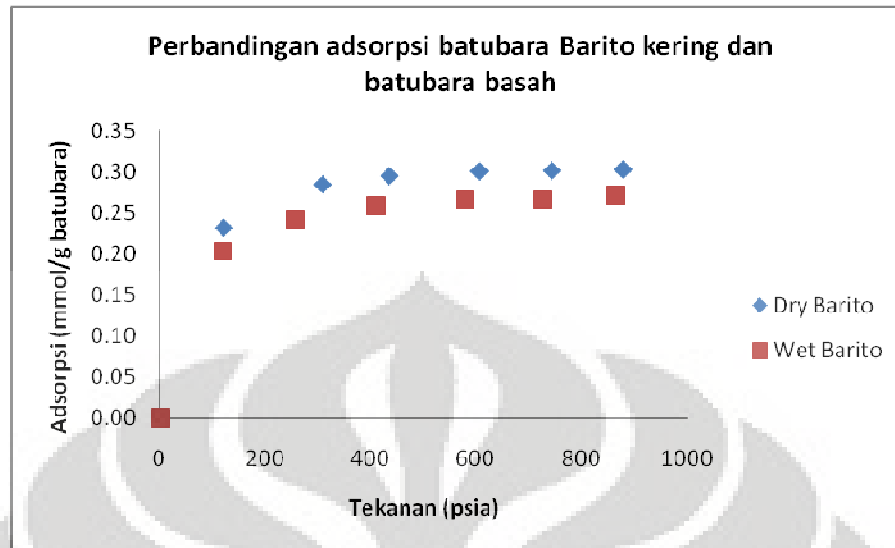
Gambar 4.4 hingga gambar 4.7 menunjukkan data jumlah CH₄ yang teradsorpsi dengan menggunakan sampel batubara Barito dan Ombilin dengan variasi temperatur, tekanan dan kandungan air.



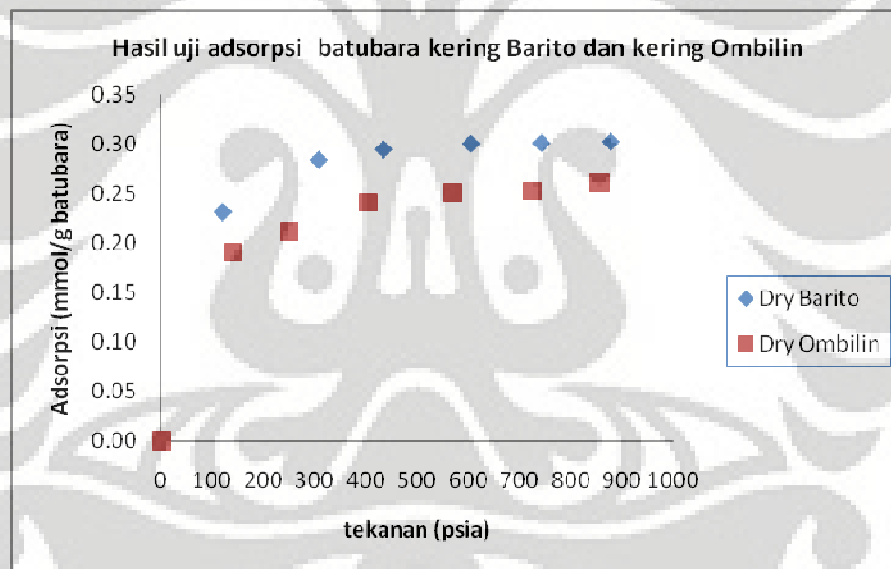
Gambar 4.4 Adsorpsi Gibbs CH₄ pada batubara Barito kering



Gambar 4.5 Adsorpsi Gibbs CH₄ pada batubara Ombilin kering



Gambar 4. 6 Perbandingan adsorpsi Gibbs CH_4 pada batubara Barito kering dan basah



Gambar 4.7 Perbandingan adsorpsi Gibbs CH_4 pada batubara Barito dan Ombilin pada $T=30^{\circ}C$

4.5.1 Pengaruh Jenis Batubara dalam Proses Adsorpsi

Pada gambar 4.7 menunjukkan perbandingan grafik data adsorpsi tekanan tinggi gas metana terhadap sampel batubara kering pada temperatur $30^{\circ}C$ pada berbagai tekanan tertentu. Pada gambar tersebut terlihat bahwa kapasitas adsorpsi gas metana pada batubara Barito dan batubara Ombilin berbeda. Hal ini dapat dikorelasikan dengan struktur pori dari *maceral* batubara. Menurut Clarkson dan



Bustin (1998) menemukan bahwa peningkatan rank batubara tidak berlaku secara umum pada kapasitas adsorpsi gas. Pada hasil penelitian ini juga memperkuat postulat bahwa kapasitas adsorpsi gas pada batubara tidak secara signifikan bersifat linier terhadap rank dan komposisi batubara, melainkan bergantung pada perkembangan struktur mikropori pada batubara tersebut (Crosdale dkk, 1998).

Pada penelitian ini berdasarkan analisa *proximate* dan *ultimate* pada tabel 2.2 terlihat bahwa batubara Ombilin merupakan batubara dengan rank *high volatile A bituminous* sedangkan batubara Barito merupakan batubara dengan rank *high volatile B bituminous* sehingga pada batubara Ombilin, *heating value*-nya sedikit lebih tinggi dibandingkan batubara Barito karena kandungan karbon (persentase *fixed carbon*) batubara Ombilin (46,73 %) lebih besar dibandingkan pada batubara Barito (39,50 %).

Meskipun pada penelitian ini belum dapat membuktikan bahwa batubara Barito mempunyai distribusi permukaan mikropori yang lebih baik sehingga menyebabkan kapasitas adsorpsinya lebih tinggi, namun terlihat pada gambar 4.7 bahwa kapasitas adsorpsi metana pada batubara Barito lebih besar 22 % daripada kapasitas adsorpsi batubara Ombilin. Kita dapat mengindikasikan hal tersebut dari besarnya kandungan air kesetimbangan pada batubara Barito lebih besar daripada batubara Ombilin. Selain itu, hasil perhitungan volume void pada batubara Barito lebih besar dibandingkan volume void batubara Ombilin.

4.5.2 Pengaruh Temperatur dan Tekanan dalam Proses Adsorpsi

Dari hasil uji adsorpsi, jumlah mol CH₄ yang teradsorpsi oleh batubara kering pada temperatur 30° lebih besar dibandingkan dengan adsorpsi pada temperatur 40° dan 60° C. Pada gambar 4.4, pada batubara Barito terdapat penurunan kapasitas adsorpsi sebesar 16,1 % seiring dengan peningkatan temperatur. Sama halnya dengan batubara Ombilin, yaitu sebesar 12,8 % penurunan kapasitas adsorpsi.

Hal ini terjadi karena proses adsorpsi adalah proses eksotermis, yang berarti semakin besar temperatur maka akan mengurangi jumlah senyawa adsorbat yang teradsorpsi (Treybal ,1980 & Bahl dkk, 1997) . Hal ini terjadi karena pergerakan molekul gas lebih cepat sehingga cenderung sulit untuk



teradsorpsi. Sebaliknya Jika pergerakan molekul adsorbat lebih lambat dan keadaannya lebih mampat maka akan semakin mudah teradsorpsi.

Pengaruh tekanan juga mempengaruhi besarnya adsorpsi gas metana ini, seiring dengan besarnya tekanan maka kapasitas adsorpsi akan meningkat secara monotonik hingga tekanan 900 psia. Peningkatan tekanan akan mengakibatkan pergerakan molekul adsorbat menjadi terbatas dan mampat sehingga densitas adsorbat pun meningkat. Selain itu, adsorbat juga akan mengalami gaya dorong untuk mengadsorpsi ke dalam pori-pori suatu adsorben. Namun, jika tekanan semakin tinggi lagi maka secara teoritis akan menyebabkan jumlah CH₄ yang teradsorpsi akan menurun pada tekanan optimum adsorbat tersebut teradsorpsi. Hal ini dapat dijelaskan pada persamaan 2.4 yang menjelaskan bahwa 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.

Pada penelitian ini, titik optimum belum tercapai, karena tekanan optimum dalam proses adsorpsi CH₄ pada batubara berkisar di atas 100 bar atau di atas 1500 psia (Kroos, 2002). Dalam penelitian ini, tekanan maksimal pada penelitian ini sebesar 1000 psia, sehingga tidak dapat dilakukan uji adsorpsi untuk tekanan di atas 1500 psia.

4.5.3 Pengaruh Kandungan Air dalam Proses Adsorpsi

Pada gambar 4.6 menunjukkan bahwa proses adsorpsi pada batubara kering lebih besar daripada batubara basah. Hal ini disebabkan adanya molekul-molekul air yang juga mengisi pori-pori batubara sehingga adsorbat gas metana sulit teradsorpsi batubara. Jika dilihat dari ukuran diameter molekul, molekul air ($d < 3 \text{ \AA}$) lebih kecil dibandingkan molekul gas metana ($d > 3 \text{ \AA}$) (Yang, 1997). Sehingga molekul air lebih mudah teradsorpsi ke dalam mikropori batubara.



Selain itu, molekul air lebih bersifat polar dibandingkan molekul metana sehingga molekul lebih cenderung mudah teradsorpsi dibandingkan metana yang bersifat nonpolar.

Molekul air yang lebih banyak mengisi mikropori batubara tersebut mengakibatkan luas permukaan kontak yang terjangkau oleh adsorbat menjadi jauh lebih sedikit dibandingkan pada batubara kering mengingat distribusi pori batubara kering lebih baik (Seewald & Klein, 1986). Selain itu, molekul air yang ukuran diameternya lebih kecil daripada adsorbat metana maka molekul air tersebut menghalangi adsorbat memasuki ke dalam sistem mikropori (Yee, dkk, 1993; Laxminarayana & Crosdale, 1999). Hal ini diperkuat oleh Mavor dkk. (1990) sebanyak 1 % kandungan kelembaban dapat mengurangi kapasitas adsorpsi sebesar 25 %, dan 5 % kandungan kelembaban dapat mengurangi kapasitas adsorpsi sebesar 65 % (Lama and Bodziony, 1996).

Sedangkan pada penelitian ini, terlihat pada gambar 4.6 terdapat pengurangan kapasitas adsorpsi sekitar 14 % untuk batubara basah jika dibandingkan pada batubara kering, sehingga mendukung uji adsorpsi ini.

4.6 UJI ADSORPSI TEKANAN TINGGI TERHADAP GAS METANA DENGAN MODEL ONO-KONDO (OK)

4.6.1 Parameter-parameter Yang Mempengaruhi Dalam Pengujian Adsorpsi Tekanan Tinggi

Pada pengujian adsorpsi tekanan tinggi terhadap gas metana dengan model Ono-Kondo dari kedua jenis sampel batubara ini diperlukan adanya suatu parameter-parameter yang akan digunakan dalam perhitungan. Parameter-parameter tersebut diantaranya kapasitas adsorpsi maksimum adsorben (C), energi interaksi intern molekul CH_4 (ϵ_{ii}/k), energi interaksi antar molekul CH_4 dan inti aktif dari adsorben (ϵ_{is}/k), dan densitas teradsorpsi pada kapasitas maksimum (ρ_{mc}). Parameter-parameter ini bergantung pada jenis adsorben dan temperatur.

Menurut Sudibandriyo (2003) dari keempat parameter tersebut, parameter kapasitas maksimum (ρ_{mc}) dan energi interaksi intern molekul CH_4 (ϵ_{ii}/k) dapat ditentukan terlebih dahulu, yaitu sebesar 23,37 mol/l dan 64,19 K untuk molekul



CH₄. Sehingga pada penelitian ini hanya akan menghitung nilai energi interaksi antar molekul CH₄ dan inti aktif dari adsorben (ϵ_{is}/k) dan parameter kapasitas adsorpsi maksimum adsorben (C) yang diperoleh dengan cara meminimalisir besarnya deviasi penyimpangan (% AAD) atau *absolute average percentage deviation* dari data percobaan. Adapun hasil perhitungan nilai ϵ_{is}/k dan C dapat dilihat pada tabel 4.3 di bawah ini.

Tabel 4. 3 Nilai Parameter ϵ_{is}/k dan C

Jenis Adsorben	T (°C)	$-\epsilon_{is}/k$ (K)	C (mmol/g)
Barito Kering	30	1709	0,1860
	40		0,1645
	60		0,1512
Barito Basah	30	1690	0,1654
	40		0,1629
	60		0,1606
Ombilin Kering	30	1562	0,1663
	40		0,1551
	60		0,1487
Ombilin Basah	30	1545	0,1535
	40		0,1534
	60		0,1429

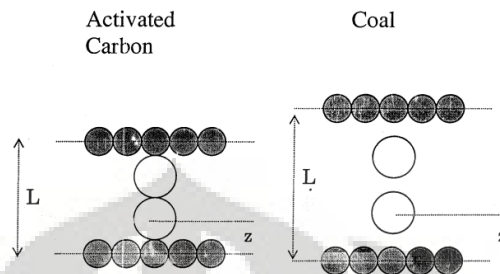
Pada tabel 4.3 untuk parameter energi interaksi antar molekul CH₄ dengan inti aktif adsorben (ϵ_{is}/k) menunjukkan bahwa interaksi molekul CH₄ paling besar terjadi pada batubara Barito kering dan dalam satu jenis batubara. Hal ini terjadi karena nilai ϵ_{is}/k ditentukan oleh karakteristik adsorben, yang dapat didekati dengan persamaan yang dimodifikasi pada persamaan 4.3 di bawah ini (Sudibandriyo, 2003) :

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

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 CH₄ yang nilainya bergantung pada karakteristik adsorben. Sedangkan nilai ξ_f merupakan nilai koreksi yang diperkenalkan untuk memperhitungkan efek dari struktur kimia adsorben pada adsorbat dan nilainya digeneralisasi berdasarkan



komposisi kimia batubara. Gambar 4.9 menunjukkan perbedaan posisi molekul dalam *slit* antara karbon aktif dan batubara.



Gambar 4.8 Posisi molekul dalam *slit* antara karbon aktif dan batubara (Sudibandriyo, 2003)

Jadi, adsorben yang memiliki persentase distribusi sistem 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. Oleh karena itu, energi interaksi antara adsorbat dan adsorben (ϵ_{is}/k) semakin kuat dan bernilai besar, dibandingkan dengan nilai pada batubara Ombilin. Selain pengaruh ukuran adsorben, nilai z juga bergantung pada kandungan air pada batubara. Adanya molekul air yang juga teradsorpsi akan meningkatkan nilai z , akan menurunkan nilai dari ϵ_{is}/k , sehingga energi interaksi antara adsorbat dan adsorben (ϵ_{is}/k) pada batubara basah lebih kecil daripada batubara kering.

Parameter lainnya adalah kapasitas adsorpsi maksimum (C). Faktor kapasitas adsorpsi maksimum (C) dipengaruhi oleh temperatur, karakteristik adsorbat, dan karakteristik adsorben direpresentasikan luas permukaan (A , m^2/g), yang dapat dilihat dengan persamaan 4.4 di bawah ini (Sudibandriyo, 2003):

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

dimana C_a merupakan densitas permukaan pada densitas teradsorpsi ($mmol/m^2$) yang nilainya bergantung pada karakteristik adsorbat. Selain itu, nilai C juga bergantung pada temperatur. Nilai C akan meningkat seiring dengan turunnya temperatur seperti ditunjukkan pada tabel 4.3. Ketergantungan temperatur ini berbeda dengan Benard dan Chahine (1997; 2001) yang



memberikan relasi temperatur empiris pada nilai C . Selain itu, menurut Do (1998) bahwa peningkatan temperatur akan mengakibatkan ekspansi termal dari fasa teradsorpsi, yang dijelaskan pada persamaan 4.5 di bawah ini :

$$\frac{\alpha C_a / aT}{C_a} = -\delta \quad (4.5)$$

Jika persamaan 4.4 diintegrasikan dan digabungkan dengan persamaan 4.5 (Sudibandriyo, 2003) :

$$\ln\left(\frac{1}{C}\right) = \delta T - (\ln C_{a,0} + \delta T_0 + \ln\left(\frac{A}{A_0}\right)) \quad (4.6)$$

Dimana δ merupakan koefisien ekspansi termal dan C_a merupakan densitas permukaan maksimum pada fasa teradsorpsi. Pada 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 .

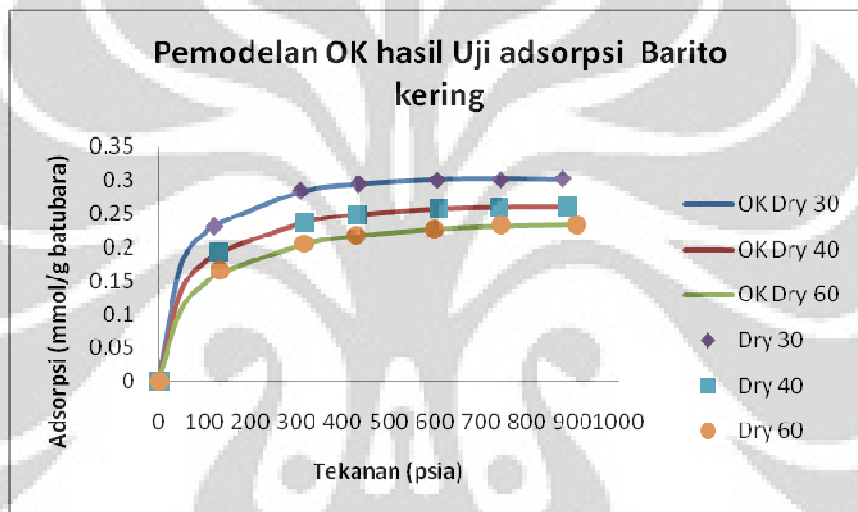
Selain itu pada persamaan 4.4 nilai C juga dipengaruhi oleh karakteristik adsorben, yang direpresentasikan oleh nilai luas permukaan kontak (A). Semakin besar luas permukaan kontak adsorben, maka nilai kapasitas adsorpsi maksimum (C) akan semakin besar. Pada Tabel 4.3, batubara Barito kering memiliki nilai C lebih besar daripada batubara Ombilin kering. Jadi, luas permukaan kontak pada batubara Barito lebih besar daripada luas permukaan kontak pada batubara Ombilin. Hal ini dikarenakan batubara Barito memiliki persentase pori pada mikropori yang lebih besar daripada yang dimiliki oleh batubara Ombilin, walaupun pada kenyataannya rank batubara Barito lebih rendah daripada rank batubara Ombilin. Sehingga dari hasil ini, dapat diperkuat bahwa kapasitas adsorpsi batubara tidak bergantung signifikan secara linier terhadap rank batubara (Bustin dan Clarkson, 1998).

Selain itu, besarnya kandungan air mempengaruhi faktor luas permukaan kontak. Pada tabel 4.3 menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi batubara kering lebih besar daripada kapasitas adsorpsi batubara basah. Hal ini terjadi adanya molekul air pada batubara yang berukuran lebih kecil dibandingkan adsorbat metana sehingga akan mengurangi luas permukaan kontak adsorben. Jadi, adsorbat akan terhalang masuk ke dalam sistem mikropori adsorben (Yee dkk., 1993 ; Laxminarayana & Crosdale, 1999).

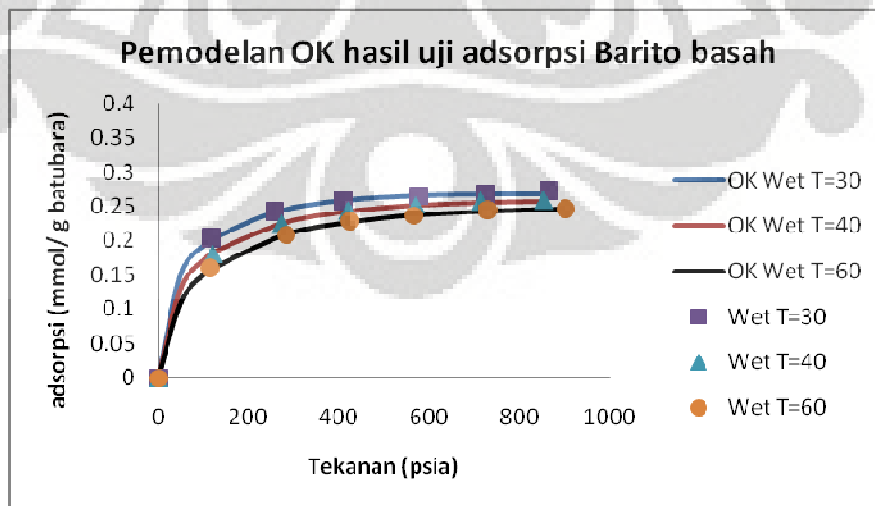


4.6.2 Hasil Uji Adsorpsi Tekanan Tinggi Terhadap Gas Metana

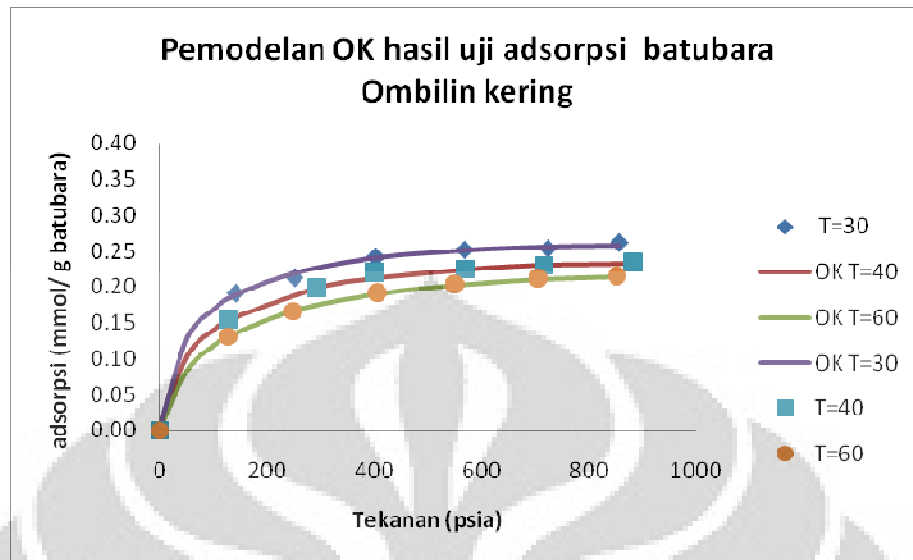
Pada gambar 4.9 hingga gambar 4.12 menunjukkan kurva model adsorpsi Ono-Kondo yang merepresentasikan data adsorpsi hasil percobaan untuk setiap jenis sampel batubara baik basah maupun kering pada temperatur 30°, 40° dan 60 °C. Dari gambar-gambar tersebut terlihat bahwa kurva adsorpsi model Ono-Kondo 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.



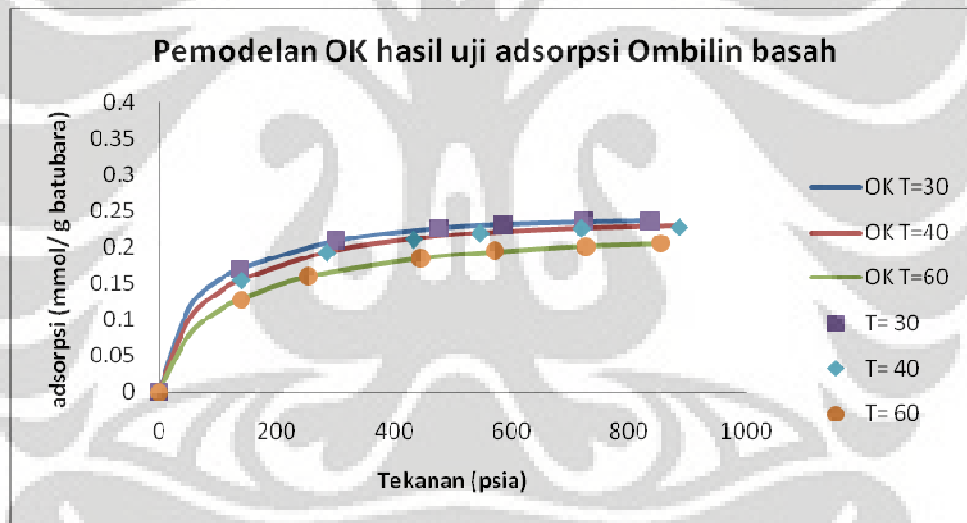
Gambar 4.9 Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara kering Barito



Gambar 4.10 Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara basah Barito



Gambar 4.11 Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara kering Ombilin



Gambar 4.12 Adsorpsi model Ono-Kondo pada batubara basah Ombilin

Tabel 4.4 menunjukkan penyimpangan atau deviasi model adsorpsi Ono-Kondo terhadap data adsorpsi Gibbs yang diperoleh dan penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa pemodelan Ono-Kondo cukup baik untuk digunakan dalam perhitungan kapasitas adsorpsi batubara terhadap gas metana (CH_4).



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

Jenis Sampel Batubara	Standard Error (% AAD)		
	T = 30 ° C	T = 40 ° C	T = 60 ° C
Batubara Barito Kering	0,36	0,21	0,73
Batubara Barito Basah	0,43	0,74	0,15
Batubara Ombilin Kering	1,23	0,73	0,23
Batubara Ombilin Basah	0,15	0,08	0,21
Rata-rata	0,54	0,44	0,33
Grand rata-rata	0,44		

Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa penyimpangan dari model Ono-Kondo terhadap hasil percobaan bernilai 0,44 %. Rendahnya nilai penyimpangan ini membuktikan bahwa asumsi harga densitas teradsorpsi pada kapasitas maksimum dan energi interaksi internal molekul CH₄ yang digunakan cukup baik untuk merepresentasikan data hasil percobaan. . Sehingga dapat dikatakan bahwa kurva kapasitas adsorpsi terhadap gas metana yang dihasilkan ini sudah cukup baik dan akurat.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan, yaitu :

1. Kapasitas adsorpsi CH_4 pada sampel batubara Barito lebih besar 22 % dibandingkan batubara Ombilin.
2. Pengaruh kelembaban pada batubara cukup signifikan sehingga kapasitas adsorpsi CH_4 pada batubara kering lebih baik 14 % dibandingkan batubara basah.
3. Variasi temperatur berbanding terbalik dengan kapasitas adsorpsi pada batubara Barito kering terdapat penurunan sebesar 16,1 % dan pada batubara Ombilin kering sebesar 12,8 % seiring dengan naiknya temperatur sedangkan variasi tekanan meningkat secara monotonik dengan kapasitas adsorpsi hingga tekanan 900 psia.
4. Kapasitas adsorpsi CH_4 terbesar terdapat pada batubara Barito kering dengan kondisi temperature 30 °C dan tekanan 900 psia yaitu sebesar 0,3029 mmol/gram batubara.
5. Pemodelan Ono-Kondo untuk memprediksi potensi *Coalbed methane* yang teradsorpsi dalam batubara Indonesia cukup akurat yang ditunjukkan dengan persentase penyimpangan yang kecil terhadap hasil penelitian, yaitu sebesar 0,4 %.
6. Nilai penyimpangan yang kecil sebesar 0,4 % membuktikan bahwa asumsi harga densitas teradsorpsi pada kapasitas maksimum (ρ_{mc}), yaitu 23,27 mol/l, dan energi interaksi internal molekul CH_4 (ϵ_{ii}/k), yaitu sebesar 64,19 K, cukup baik untuk merepresentasikan data hasil percobaan.



5.2. SARAN

Untuk penelitian berikutnya, peneliti menyarankan agar memodifikasi alat uji adsorpsi tekanan tinggi dengan menggunakan *pressure transducer*, sehingga besarnya tekanan yang terlihat dalam penelitian lebih akurat. Kemudian dalam prosedur uji adsorpsi sebaiknya dilakukan pada tekanan yang lebih tinggi, sehingga titik optimum proses adsorpsi CH₄ pada batubara Indonesia dapat terlihat. Selain itu, peneliti mengharapkan agar pada penelitian selanjutnya melakukan uji adsorpsi dengan variasi jenis batubara yang lebih banyak, untuk mengetahui karakteristik batubara Indonesia serta korelasinya dengan kemampuan adsorpsinya terhadap gas CH₄.



DAFTAR PUSTAKA

- Arri, L. E., Yee, D., *Modeling Coalbed Methane Production With Binary Gas Sorption*, SPE Paper 24363, presented at the SPE Rocky Mountain Regional Meeting, Casper, Wyoming, May 18-21, (1992).
- Zhou, C., Hall, F., Gasem, K. A. M., Robinson, Jr., R. L., *Predicting Gas Adsorption Using Two-Dimensional Equation of State*, I&EC Research 33 1280-1289 (1994).
- Meyers, R.A., *Coal Structure*, Academic Press, New York, (1982).
- Schroeder, K., Busch, A., Duff G., Fitzgerald, J. E., Gasem, K. A. M., Gensterbium, Y., Goodman, A. L., Krooss, B. M., Levy, J., Ozdemir, E., Pan, Z., Robinson, Jr., R. L.,
- Sudibandriyo, M., Pan, Z., Fitzgerald, J. E., Robinson, Jr., R. L., Gasem, K. A. M., *Adsorption of Methane, Nitrogen, Carbon Dioxide and their Binary Mixtures on Dry Activated Carbon at 318.2 K and Pressures to 13.6 MPa*, Langmuir (13), 5323-5331 (2003).
- Clarkson, C.R, Bustin, R.M., Levy, J.H., *Application of the Mono/multilayer and Adsorption Potential Theories to Coal Methane Adsorption Isotherms at Elevated Temperature and pressure*, Carbon 35(12)1689-1705 (1997).
- Coulson, J.M.; Richardson, J.F. *Chemical Engineering Vol.2*. New York : Pergamon Press. (1997)
- Levy J.H, Day S.J, Killingley J.S., *Methane capacities of Bowen Basin coals related to coal properties*, Fuel 81 813-819 (1997).
- Krooss, B.M., van Bergen, F., Gensterbium, Y., Siemons, N., Pagnier, H.J.M., David, P., *High-pressure Methane and Carbon Dioxide Adsorption on Dry and Moisture-equilibrated Pennsylvanian Coals*, International Journal of Coal Geology, 51 69-92 (2002).
- Do, D.D., *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*, Imperial College Press, London, (1998).



Benard, P., Chahine, R., *Modelling of High-Pressure Adsorption Isotherms above the Critical Temperature on Microporous Adsorbents: Application to Methane*, Langmuir, 13 808-813 (1997).

Dreisbach, F., Staudt, R., Keller, J.U., *High Pressure Adsorption Data of Methane, Nitrogen, Carbon Dioxide and Their Binary and ternary mixtures on Activated Carbon*. Adsorption, 5 2 15-227 (1999).

Hail, F., Zhou, C., Gasem, K. A. M., Robinson, Jr., R. L., *Adsorption of Pure Methane, Nitrogen, and Carbon Dioxide and Their Binary Mixtures on Wet Fruitland Coal*, presented at the Eastern Regional Conference & Exhibition, Charleston, November 8-10, (1994).

Ding, L.P., dan Bhatia, S.K. *Analysis of Multicomponent Adsorption Kinetics on Activated Carbon*, AIChE Journal, vol. 49, no. 4, pp. 883-895. (2003).

Kirk, Othmer. *Adsorption*. Ensiklopedia of Chemical Engineering Vol.1. Wiley Interscience. (1994)

Bahl, B.S., Tuli, G.D., dan Bahl, A. *Essential of Physical Chemistry*, New Delhi, S. Chand and Company, Ltd. (1997).

Bond, G.C. *Heterogeneous Catalysis, Principles and Application*, Oxford, Clarendon Press. (1987).

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

Sundstrom, D.W., dan Herbert, E.K. (1979). *Waste Water Treatment*, Prentice Hall Englewood Cliffs.

Ruthven, D.M. (1993). *Adsorption, Encyclopedia of Chemical Technology*, Wiley Inter Science, vol. 1, 4th edition.

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

Sontheimer, Crittenden, dan Summers. *Activated Carbon for water Treatment*. Edisi ke-2 dalam bahasa Inggris. Karlsruhe: DVGW-Forschungsstelle. (1988).



- Sudibandriyo, Mahmud. *A Generalized Ono-Kondo Lattice Model For High Pressure Adsorption On Carbon Adsorbents*. Oklahoma States University. (2003).
- Yang, R.T. *Gas Separation by Adsorption Process*, London, Imperial College Press. (1997).
- Aminian, K. *Coalbed Methane- Fundamental Concept*, Petroleum & Natural Gas Engineering Department West Virginia University (2003)
- ALL, co. *Handbook on Coal Bed Methane Produced Water: Management and Beneficial Use Alternatives*, Oklahoma, (2003)
- Rice, DD and Claypool, GE., *Generation, accumulation, and resource potential of biogenic gas: American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 65, no. 1, p. 5-25. (1981)
- Rightmire, CT., *Coalbed methane resources*, in Rightmire, C.T., Eddy, G.E., and Kirr, J.N., editors, *Coalbed methane resources of the United States: American Association of Petroleum Geologists Explorer*, v. 21, no.4 (April, 2000), p. 16, 18-20, 22-23. (1984).
- Kirk, Otmer. *Adsorption*. Ensiklopedia of Chemical Engineering Vol.1. Wiley Interscience (1994)
- Coulson, J.M.; Richardson, J.F. *Chemical Engineering Vol.2*. New York : Pergamon Press. (1997)
- Sontheimer, Crittenden, dan Summers. *Activated Carbon for water Treatment*. Edisi ke-2 dalam bahasa Inggris. Karlsruhe: DVGW-Forschungsstelle. (1988)
- H. William Hochheiser, *Environmental Activities Related to Coal Bed Methane Produced Water*, US department of energy (2003)
- Kroos, dkk, *High-pressure methane and carbon dioxide adsorption on dry and moisture-equilibrated Pennsylvanian coals*, Coal Geology of Netherland (2002)
- Miller, G. Bruce, *Coal Energy System*, California, Elsevier academic series (2005)
- Belkin, Harvey E. & ewalt, Susan J. T *Geochemistry of Selected Coal Samples from Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, and Papua, Indonesia*, US Geological survey, Virginia (2007)
- Perwitasari, Ayu, *Penentuan Luas Permukaan Zeolit dengan Menggunakan Adsorpsi Super Kritis dengan Model Ono-Kondo*, Departemen Teknik Kimia UI, Depok, (2007)



Atmayuda, Ardhana, *Pembuatan dan Uji Kinerja Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa dengan Perlakuan Aktivasi Terkontrol*, Departemen Teknik Kimia UI, Depok (2007)

Anderson, John. Et al.; *Producing Natural Gas from Coal*, Oilfield Review, Autumn, 2003.

Anonim, *Potensi CBM Cukup Besar dan Siap Dimanfaatkan*, available from URL:http://www2.esdm.go.id/index.php?option=com_content&task=view&id=336&Itemid=94 diakses : 16 Januari 2007. (2005)

Anonim. *Adsorption at the Solid/Gas Interface*, available from URL: http://www.iupac.org/reports/2001/colloid_2001/manual_of_s_and_t/node20.htm, diakses: 22 Mei 2007. (2002).





LAMPIRAN



**Lampiran 1 : Hasil Perhitungan Batubara Barito Kering**

T = 30 °C

Vvoid	93,8
V dozing	486,7283
Dozing Temp	77
Mass Barito Coal (Wet)	65
%moisture sample, mol H2O	0

Sampling Press*	0	120,33	307,83	434,42	605,37	743,14	878,23
Initial P dozing	14,7	184,29	366,18	473,74	649,99	783,68	933,25
Final P dozing	14,7	151,03	328,08	449,41	617,65	754,08	905,41
n_{adsgibbs} (mmol/g _{dryzeolite})	0,0000	0,2320	0,2846	0,2952	0,3009	0,3016	0,3030

T = 40 °C

Vvoid	93,8
V dozing	486,7283
Dozing Temp	107
Mass Barito Coal (Wet)	65
%moisture sample, mol H2O	0

Sampling Press*	0	128,93	316,98	430,81	608,57	740,15	889,21
Initial P dozing	14,7	183,45	364,55	470,44	649,67	783,85	924,13
Final P dozing	14,7	149,63	327,08	448,41	615,75	753,18	899,41
n_{adsgibbs} (mmol/g _{dryzeolite})	0,0000	0,1929	0,2376	0,2481	0,2577	0,2597	0,2612

T = 60 °C

Vvoid	93,8
V dozing	486,7283
Dozing Temp	140
Mass Zeolit (Wet)	65
%moisture sample, mol H2O	0

Sampling Press*	0	132,33	315,41	428,97	599,15	744,9	910,41
Initial P dozing	14,7	183,75	364,51	470,61	648,47	784,8	917,25
Final P dozing	14,7	150,03	327,8	448,41	615,75	745,3	899,41
n_{adsgibbs} (mmol/g _{dryzeolite})	0,0000	0,1644	0,2048	0,2165	0,2254	0,2331	0,2328

**Lampiran 2 : Hasil Perhitungan Batubara Barito Basah**

T = 30 °C

Vvoid	74,22
V dozing	486,7283
Dozing Temp	77
Mass Barito Coal (Wet)	65
%moisture sample, mol H2O	0,071423

Sampling Press*	0	118,43	256,64	409,35	578,86	726,26	864,29
Initial P dozing	14,7	178,33	316,46	456,69	619,55	791,01	929,93
Final P dozing	14,7	151,31	294,24	433,27	594,02	769,08	904,41
n_{adsgibbs} (mmol/g _{dryzeolite})	0,0000	0,2030	0,2411	0,2577	0,2652	0,2661	0,2716

T = 40 °C

Vvoid	74,22
V dozing	486,7283
Dozing Temp	107
Mass Barito Coal (Wet)	65
%moisture sample, mol H2O	0,071423

Sampling Press*	0	121,08	274,13	420,88	570,66	714,83	854,77
Initial P dozing	14,7	194,75	341,18	482,41	619,95	788,8	932,43
Final P dozing	14,7	167,83	316,34	459,69	597,09	763,08	913,88
n_{adsgibbs} (mmol/g _{dryzeolite})	0,0000	0,1807	0,2235	0,2430	0,2528	0,2576	0,2594

T = 60 °C

Vvoid	74,22
V dozing	486,7283
Dozing Temp	140
Mass Zeolit (Wet)	65
%moisture sample, mol H2O	0,071423

Sampling Press*	0	115,61	282,94	426,27	567,96	730,66	901,43
Initial P dozing	14,7	173,43	367,21	478,11	624,75	787,31	941,25
Final P dozing	14,7	148,31	339,88	455,69	603,02	754,08	925,85
n_{adsgibbs} (mmol/g _{dryzeolite})	0,0000	0,1590	0,2087	0,2276	0,2371	0,2435	0,2451

**Lampiran 3 : Hasil Perhitungan Batubara Ombilin Kering**

T = 30 °C

Vvoid	76,39
V dozing	486,7283
Dozing Temp	77
Mass Barito Coal (Wet)	65
%moisture sample, mol H2O	0

Sampling Press*	0	140,71	250,94	403,27	568,6	723,18	855,21
Initial P dozing	14,7	174,75	314,18	468,09	609,75	773,81	917,69
Final P dozing	14,7	144,31	296,36	443,69	584,02	750,08	892,41
n_{adsgibbs} (mmol/g _{dryzeolite})	0	0,1906	0,2123	0,2406	0,2512	0,2529	0,2611

T = 40 °C

Vvoid	76,39
V dozing	486,7283
Dozing Temp	107
Mass Barito Coal (Wet)	65
%moisture sample, mol H2O	0

Sampling Press*	0	127,99	294,65	403,27	571,82	715,86	883,51
Initial P dozing	14,7	182,25	355,71	466,09	610,25	779,8	939,85
Final P dozing	14,7	155,03	328,08	448,41	584,02	753,08	916,13
n_{adsgibbs} (mmol/g _{dryzeolite})	0,0000	0,1534	0,1979	0,2189	0,2253	0,2301	0,2326

T = 60 °C

Vvoid	76,39
V dozing	486,7283
Dozing Temp	140
Mass Zeolit (Wet)	65
%moisture sample, mol H2O	0

Sampling Press*	0	128,45	250,58	407,25	551,36	706,13	850,67
Initial P dozing	14,7	184,45	342,85	467,05	588,91	796,92	904,13
Final P dozing	14,7	157,75	322,28	441,69	566,02	764,21	892,41
n_{adsgibbs} (mmol/g _{dryzeolite})	0,0000	0,1312	0,1666	0,1907	0,2024	0,2110	0,2146

**Lampiran 4 : Hasil Perhitungan Batubara Ombilin Basah**

T = 30 °C

Vvoid	76,28
V dozing	486,7283
Dozing Temp	77
Mass Barito Coal (Wet)	65
%moisture sample, mol H2O	0,03

Sampling Press*	0	137,13	299,65	477,84	586,27	723,28	837,17
Initial P dozing	14,7	171,58	326,95	513,48	632,49	771,25	915,83
Final P dozing	14,7	142,93	300,36	485,54	615,65	750,08	894,41
n_{adsgibbs} (mmol/g _{dryzeolite})	0,0000	0,1693	0,2082	0,2257	0,2305	0,2349	0,2351

T = 40 °C

Vvoid	76,28
V dozing	486,7283
Dozing Temp	107
Mass Barito Coal (Wet)	65
%moisture sample, mol H2O	0,03

Sampling Press*	0	140,33	286,46	432,99	547,28	719,26	885,34
Initial P dozing	14,7	166,97	322,58	489,44	625,45	773,95	915,09
Final P dozing	14,7	137,93	298,36	466,14	606,72	743,08	891,69
n_{adsgibbs} (mmol/g _{dryzeolite})	0,0000	0,1544	0,1916	0,2099	0,2182	0,2253	0,2277

T = 60 °C

Vvoid	76,28
V dozing	486,7283
Dozing Temp	140
Mass Zeolit (Wet)	65
%moisture sample, mol H2O	0,03

Sampling Press*	0	139,01	255,91	446,15	570,52	727,39	854,97
Initial P dozing	14,7	176,68	300,24	494,25	603,75	790,57	899,41
Final P dozing	14,7	148,68	280,64	463,75	584,02	757,24	890,69
n_{adsgibbs} (mmol/g _{dryzeolite})	0,0000	0,1280	0,1585	0,1839	0,1934	0,2008	0,2060

Lampiran 5 : Karakteristik Fisis Adsorbat^a dan Inti Aktif (Sudibandriyo, 2003)

Jenis Adsorbat	Berat Molekul	Pc (MPa)	Tc (K)	Titik Didih Normal	Harga kebalikan Van de Waals co-Volume (mol / L)	σ (x 10 ⁻¹⁰ m)	ϵ^* / k (K)
H ₂	2,02	1,31	33,19	20,4	38,16	2,827	59,7
N ₂	28,01	3,40	126,20	77,3	25,89	3,798	71,4
H ₂ S	34,08	8,96	373,53	212,8	23,08	3,623	302,2
CO ₂	44,01	7,38	304,21	216,6 ^b	23,34	3,941	195,2
CH ₄	16,04	4,60	190,56	111,7	23,37	3,758	148,6
C ₂ H ₄	28,05	5,04	282,34	169,4	17,39	4,163	224,7
C ₂ H ₆	30,07	4,87	305,32	184,6	15,41	4,443	215,7
C ₃ H ₈	44,10	4,25	369,83	231,1	11,07	5,118	237,1
i-C ₄ H ₁₀	58,12	3,65	408,14	261,4	8,60	5,278	330,1
C						3,4 ^c	28 ^c
O (Zeolit)						3,04 ^d	139,96 ^d

^a Reid (1987)^b Triple point temperature^c Steele (1974)^d Mellot (1996)