



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KANDUNGAN AIR TERHADAP ADSORPSI TEKANAN
TINGGI GAS METANA PADA BATUBARA INDONESIA**

SKRIPSI

**SUCI AYUNDA RACHMALIA
0706270081**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA**

**DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KANDUNGAN AIR TERHADAP ADSORPSI TEKANAN
TINGGI GAS METANA PADA BATUBARA INDONESIA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**SUCI AYUNDA RACHMALIA
0706270081**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA**

**DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : SUCI AYUNDA RACHMALIA

NPM : 0706270081

Tanda Tangan :

Tanggal : 30 Juni 2011



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Suci Ayunda Rachmalia

NPM : 0706270081

Program Studi : Teknik Kimia

Judul Skripsi : Pengaruh Kandungan Air Terhadap Adsorpsi
Tekanan Tinggi Gas Metana Pada Batubara Indonesia

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Mahmud Sudibandriyo, M.Sc, Ph. D ()

Penguji : Dr. rer.nat. Ir. Yuswan Muharam, MT ()

Penguji : Dr. Ir. Asep Handaya Saputra, M.Eng ()

Penguji : Dr. Eny Kusrini, S.Si ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Juni 2010

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas karunianya, sehingga penulis dapat menyelesaikan seminar ini tepat pada waktunya. Berkat rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan makalah skripsi dengan judul **“Pengaruh Kandungan Air Terhadap Adsorpsi Tekanan Tinggi Gas Metana Pada Batubara Indonesia”** untuk memenuhi tugas skripsi, salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

- (1) Prof. Dr. Ir Widodo Wahyu P, DEA selaku ketua Departemen Teknik Kimia FTUI dan ketua Riset Grup Energi Berkelanjutan.
- (2) Ir. Mahmud Sudibandriyo, Msc, Phd, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (3) Ir. Yuliusman M.Eng selaku kordinator Skripsi Teknik Kimia FTUI;
- (4) Para dosen Departemen Teknik Kimia FTUI yang telah memberikan ilmu dan wawasannya;
- (5) Ayah, Ibu, Ina, yang selalu memberi dukungan dan semangat selama mengerjakan skripsi ini di rumah;
- (6) Rekan satu bimbingan Menner yang sudah membantu dalam pencarian sumber dan saling bertukar wawasan serta informasi yang ada;
- (7) Sukma pamungkas dan gondang yang sangaaaatttt membantu sekali terutama untuk tenaganya.
- (8) Kang jajat dan Mang Ijal atas segala bantuannya.
- (9) Tante Desi, tante Qnoy, tante AJ, tante Medul, tante Fia yang selalu memberi dukungan, semangat dan hiburan selama proses pembuatan skripsi ini.

- (10) Semua teman-teman Teknik Kimia angkatan 2007, dan-lain-lain yang tidak dapat disebutkan satu demi satu, yang selalu memberikan informasi dan semangat;
- (11) Temen-temen geng RPKA, yuko, ika, winda, alin, zay, mutia, alin, eka, teh elin, teh wilda, valent, dhinda dan lain-lain.
- (12) Tante Shiina, yang albumnya selalu mendampingi saya dalam proses penulisan skripsi ini dan saat ngelab.
- (13) Semua pihak yang telah membantu penyusunan makalah skripsi ini secara langsung maupun tidak langsung;

Penulis menyadari bahwa dalam makalah skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sehingga dapat menyempurnakan skripsi ini dan melaksanakan perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan bagi dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan.

Depok, 1 Juni 2011

Suci Ayunda

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Suci Ayunda Rachmalia
NPM : 0706270081
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

Pengaruh Kandungan Air Terhadap Adsorpsi Tekanan Tinggi Gas Metana Pada Batubara Indonesia

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 30 Juni 2011

Yang menyatakan

(Suci Ayunda Rachmalia)

ABSTRAK

Nama : Suci Ayunda Rachmalia
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Pengaruh Kandungan Air Terhadap Adsorpsi Tekanan Tinggi Gas Metana pada Batubara Indonesia

Kandungan air pada batubara mempunyai efek yang signifikan terhadap kapasitas adsorpsi gas. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan uji adsorpsi gas metana untuk meneliti pengaruh kandungan air terhadap kapasitas adsorpsi gas pada batubara Indonesia. Batubara yang digunakan adalah batubara Barito dan Ombilin dengan kandungan air 0%, 3%, 7%, dan 10% untuk batubara Barito, dan 0%, 1%, 3%, dan 7% untuk batubara Ombilin. Uji adsorpsi dilakukan pada suhu 25-26°C dari tekanan 116-816 Psia, dengan rentang 100 psia. Uji adsorpsi metana menggunakan metode volumetrik dengan temperatur konstan sehingga dapat dilakukan dengan perhitungan adsorpsi isothermal Gibbs. Dalam penelitian ini, digunakan model Langmuir yang dimodifikasi untuk permodelan kapasitas adsorpsi batubara. Hasil uji adsorpsi menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi metana batubara kering Barito pada tekanan 816 psia adalah 2,01 mmol/gr, lebih besar 9,5% dibandingkan dengan batubara kering Ombilin (1,82 mmol/gr). Secara umum, kapasitas adsorpsi metana pada batubara berkurang dengan penambahan kandungan air sampai pada kandungan air kesetimbangannya. Kandungan air pada batubara diatas kesetimbangannya tidak berpengaruh signifikan terhadap pengurangan kapasitas adsorpsi lebih lanjut. Kapasitas adsorpsi batubara Barito dengan kandungan air 3% serta 7% (kesetimbangan) turun sebesar 20,96% dan 35,45% dibandingkan dengan batubara Barito kering, sedangkan kapasitas adsorpsi batubara Ombilin dengan kandungan air 1% serta 3% (kesetimbangan) turun sebesar 26,9% dan 37,76% dibandingkan dengan batubara Ombilin kering. Hasil data adsorpsi isothermal gas metana pada batubara Ombilin dan Barito tersebut dapat direpresentasikan dengan baik oleh permodelan adsorpsi isoteremis Langmuir modifikasi dengan rata-rata %AAD sebesar 4,2%.

Kata Kunci: *Adsorpsi, Batubara, Kandungan Air, Metana*

ABSTRACT

Name : Suci Ayunda Rachmalia
Major Study : Chemical Engineering
Title : Effect of Moisture Content on the High Pressure Methane
Adsorption on Indonesia Coal

Moisture content in coal has significant effect on gas adsorption capacity. Therefore, this study of methane adsorption test are to examine the influence of moisture content on gas adsorption capacity of Indonesia coal. Barito and Ombilin Coal with moisture content 0%, 3%, 7%, and 10% for Barito coal, and 0%, 1%, 3% and 7% for Ombilin coal are used in the experiment. Adsorption tests are performed at 25-26°C temperature and 116-816 psia pressure, with a range of 100 psia. Methane adsorption test in this study use volumetric method with a constant temperature, hence the method could be done with the calculation of isothermal Gibbs adsorption. In this study, Langmuir model modified is used for modeling adsorption capacity of coal. Adsorption test results show that methane adsorption capacity of dry Barito coal at 816 psia was 2.01 mmol/g, 9.5% higher than dry Ombilin coal (1.82 mmol/g). In general, methane adsorption capacity on coal is reduced in response to the addition of moisture content which were added until equilibrium moisture content is reached. Moisture content in coal above the equilibrium has no significant effect on further reduction of adsorption capacity. Adsorption capacity of Barito coal with moisture content of 3% and 7% (equilibrium) decreased by 20.96% and 35.45% compared with dry Barito coal, while the adsorption capacity of Ombilin coal with moisture content of 1% and 3% (equilibrium) decreased by 26.9% and 37.76% compared with dry Ombilin coal. The results of methane adsorption isotherm data in Barito and Ombilin coal could be appropriately represented by the Langmuir model modified with an average AAD percentage of 4.2%.

Keywords: *Adsorption, Coal, Moisture Content, Methane*

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Adsorpsi	5
2.1.1 Jenis-jenis Adsorpsi	5
2.1.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi	8
2.1.3 Keseimbangan Adsorpsi	9
2.1.4 Adsorben	11
2.2 Model-model Adsorpsi	13
2.2.1 Model Adsorpsi Isotermis Langmuir	13
2.2.2 Model Adsorpsi Isotermis BET	16
2.2.3 Model Adsorpsi Isotermis Gibbs	17
2.2 Batubara	20
2.2.1 Klasifikasi Batubara	20
2.2.2 Struktur Batubara	21
2.2.3 Kandungan Batubara	22
2.2.4 Karakteristik Cekungan Coal di Indonesia	23
2.2.5 Batubara Ombilin dan Batubara Barito	24
2.3 Coalbed Methane (CBM)	26
2.3.1 Reservoir Coalbed methane	27
2.3.2 Penyimpanan	29
2.3.3 Produksi	29
BAB III	31
METODE PENELITIAN	31
3.1 Lokasi Penelitian	31
3.2 Bahan-bahan dan Alat-alat Penelitian	31
3.3 Rancangan Penelitian	31
3.4 Prosedur Penelitian	32
3.4.1 Persiapan Peralatan	33
3.4.2 Preparasi Batubara	34

3.4.3 Preparasi Batubara Kering	34
3.4.4 Preparasi Batubara dengan Berbagai Kandungan Air.....	34
3.4.5 Uji Adsorpsi Tekanan Tinggi Batubara	36
3.5 Permodelan.....	39
3.6 Analisa.....	40
BAB IV	41
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1 Hasil Preparasi Batubara.....	41
4.1.1 Preparasi Batubara Kering	41
4.1.2 Preparasi Batubara Basah.....	42
4.1.3 Massa Batubara Untuk Uji Adsorpsi.....	44
4.2 Hasil Preparasi Peralatan Uji Adsorpsi	45
4.3 Hasil Uji Kebocoran.....	47
4.4 Hasil pengukuran Volume Void Area Sampling	49
4.5 Hasil Uji Kapasitas Adsorpsi Tekanan Tinggi Batubara	52
4.5.1 Pengaruh Kandungan Air Terhadap Adsorpsi Tekanan Tinggi Metana pada Batubara Ombilin dan Barito.....	53
4.5.2 Pengaruh Jenis Batubara Terhadap kapasitas Adsorpsi Tekanan Tinggi Gas Metana.....	57
4.6 Representasi Data Adsorpsi Dengan Permodelan Langmuir	59
BAB V.....	65
KESIMPULAN	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Adsorpsi Isotermal	9
Gambar 2.2 Struktur Adsorben Berpori	12
Gambar 2.3 Ilustrasi Energi Fluktuasi Pada permukaan Adsorben	13
Gambar 2.4 Diagram Skema Mekanisme Adsorpsi Langmuir	14
Gambar 2.5 Ilustrasi Keadaan Fasa Teradsorpsi pada Suatu Pori Adsorben	17
Gambar 2.6 Grafik Adsorpsi Gibbs CO ₂ pada Karbon Aktif Kering	19
Gambar 2.7 Tipe-tipe Adsorpsi Isotermis Gibbs	19
Gambar 2.8 Hubungan Volume Gas yang terbentuk sebagai Fungsi Rank Batubara	27
Gambar 2.9 Makropori dan Mikropori Batubara	29
Gambar 2.10 Langmuir isotherm (K.Aminian, 2003).....	29
Gambar 2.11 Produksi sebuah reservoir CBM (K.Aminian, 2003).....	30
Gambar 3.1 Skema Penelitian.....	32
Gambar 3.2 Skema Alat untuk Analisa Daya Adsorpsi Batubara	33
Gambar 3.3 Alat Uji Adsorpsi	33
Gambar 3.4 <i>Sampling cylinder</i>	34
Gambar 3.5 Skema Alat Preparasi Batubara Basah	35
Gambar 3.6 Diagram Alir Uji Adsorpsi	36
Gambar 3.7 Konstanta A dan B pada Model Langmuir Modifikasi	40
Gambar 4.1 Batubara Barito Setelah Dihaluskan dan Disaring.....	41
Gambar 4.2 Pembagian Daerah Alat Uji Adsorpsi	45
Gambar 4.3 Hasil Uji Kebocoran pada Batubara Ombilin kering	48
Gambar 4.4 Hasil Uji Kebocoran pada Batubara Ombilin kering	48
Gambar 4.5 Perbandingan kapasitas Adsorpsi CH ₄ pada Batubara Barito.....	53
Gambar 4.6 Perbandingan kapasitas Adsorpsi CH ₄ pada Batubara Ombilin.....	54
Gambar 4.7 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Batubara Ombilin dan Barito	58
Gambar 4.8 Model Langmuir Modifikasi Data Adsorpsi Batubara Ombilin	63
Gambar 4.9 Model Langmuir Modifikasi Data Adsorpsi Batubara Barito.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel karakteristik Adsorpsi	7
Tabel 2.2 Parameter Model Adsorpsi Langmuir pada Batubara Tiffani Basah....	16
Tabel 2.3 Karakteristik Cekungan Coal di Indonesia	23
Tabel 2.4 Perkiraan Potensi CBM di Indonesia	24
Tabel 2.5 Analisa <i>Proximate</i> dan <i>Ultimate</i> Batubara Ombilin dan Barito	25
Tabel 2.6 Karakteristik Reservoir CBM dengan Gas Konvensional	28
Tabel 4.1 Persentase Kandungan Air Keseimbangan Sampel Batubara.....	42
Tabel 4.2 Persentase Kandungan Air dibawah dan diatas Titik Keseimbangan..	44
Tabel 4.3 Tabulasi Massa Batubara Aktual pada Sampling Cylinder	45
Tabel 4.4 Diameter Molekul Gas Penguji Volume Void.....	50
Tabel 4.5 Tabulasi Hasil Uji Volume Void Menggunakan Gas Helium	51
Tabel 4.6 % Penurunan Kapasitas Adsorpsi terhadap Batubara kering.....	54
Tabel 4.7 Model Persamaan Isotermis Langmuir	60
Tabel 4.8 Model Langmuir Modifikasi untuk Batubara Barito dan Batubara Ombilin.....	61

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Hasil Tes Kebocoran
Lampiran B	Perhitungan Volume Void Sampling Cylinder
Lampiran C	Perhitungan Kapasitas Adsorpsi Metana Pada Batubara
Lampiran D	Perbandingan Error Percobaan dengan Error Model



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di Indonesia, kebutuhan energi semakin meningkat setiap tahunnya, sedangkan jumlah cadangan energi cenderung menurun. Minyak bumi sebagai sumber utama energi diperkirakan akan habis dalam 9 tahun mendatang (ESDM, 2005). Kondisi tersebut mendorong pemerintah melakukan pengembangan dan pemanfaatan energi alternatif terbarukan. Dari beberapa sumber energi alternatif di Indonesia, pemanfaatan gas metana dari *Coalbed methane* (CBM) termasuk yang potensial untuk dikembangkan.

Coalbed methane adalah gas metana yang terkandung dalam batubara yang terperangkap dalam mikropori atau pori-pori batubara melalui proses mikrobial (*biogenic*) atau panas (*thermogenic*) selama proses pembentukan batubara. Indonesia diprediksi memiliki cadangan CBM yang cukup besar untuk dikelola, yaitu sebesar 450 TCF yang tersebar dalam 11 *coal* basin dengan konsentrasi terbesar terdapat pada cekungan Sumatera Selatan sebesar 183 TCF dan cekungan Barito sebesar 101,6 TCF (Stevens, 2003). Namun, potensi sumber daya CBM yang besar tersebut, hasil produksinya masih dalam estimasi dan belum bisa dimanfaatkan sepenuhnya (ESDM, 2005). Salah satu kendala dalam produksi CBM tersebut adalah sulitnya memprediksi berapa jumlah metana yang bisa diproduksi dalam suatu *reservoir* sehingga perlu dilakukan penelitian mengenai kapasitas adsorpsi metana pada batubara. Selain itu, banyak pula kendala lain dalam penelitian mengenai CBM, salah satu diantaranya yaitu struktur batubara yang kompleks dan karakteristik setiap batubara yang berbeda antara satu sumber dengan sumber lainnya (Meyers, 1982). Karakteristik tersebut meliputi kandungan air, kandungan mineral dan abu, kandungan oksigen, jumlah maceral, rank batubara, jumlah *micropore*, dan lain-lain (Clarckson & Bustin, 1996). 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). Oleh karena karakteristiknya yang berbeda-beda untuk

setiap lokasi, maka penelitian yang dilakukan harus spesifik sesuai dengan lokasi batubara tersebut. Di Indonesia, penelitian mengenai kapasitas adsorpsi metana sudah dilakukan yaitu untuk batubara Ombilin dan batubara Barito (Pabhassaro, 2007). Namun, penelitian mengenai kapasitas adsorpsi tersebut hanya dilakukan pada kondisi kesetimbangan airnya saja (batubara kering dan batubara basah), belum mempertimbangkan kandungan air pada batubara di atas dan di bawah titik kesetimbangan airnya. Padahal, kandungan air pada batubara dapat mempengaruhi besarnya kapasitas adsorpsi batubara hingga 100% tergantung dari jenis batubaranya (Gasem, 2003). Hal ini diperkuat dengan hasil penelitian Mavor (1990) yaitu sebanyak 1% kandungan air dapat mengurangi kapasitas adsorpsi sebesar 25%, dan 5% kandungan air dapat mengurangi kapasitas adsorpsi sebesar 65% (Lama & Bodziony, 1996). Kapasitas adsorpsi gas metana pada batubara Australia dengan berbagai kandungan air serta pengaruhnya terhadap difusi gas telah dilakukan oleh Pan pada tahun 2010. Kandungan air 3,3% dan 8,5% pada batubara Australia dapat mengurangi kapasitas adsorpsi sebesar 30% dan 67%. Namun, penelitian pengaruh kandungan air terhadap kapasitas adsorpsi gas metana pada batubara Indonesia belum dilakukan. Padahal, informasi mengenai hal tersebut sangat penting mengingat batubara di Indonesia sebagian besar merupakan batubara basah dan memiliki kandungan air yang berbeda-beda untuk setiap lokasi. Informasi tersebut sangat diperlukan untuk estimasi kandungan gas pada reservoir di Indonesia serta sebagai input simulator pada proses produksi.

Pada akhir penelitian ini, diharapkan peneliti dapat melengkapi penelitian yang sudah ada sebelumnya mengenai adsorpsi gas metana pada batubara Indonesia. Dengan menggunakan permodelan yang dihasilkan pada penelitian ini, diharapkan dapat diprediksi kapasitas adsorpsi gas metana dengan kandungan air yang berbeda-beda dari berbagai daerah lain di Indonesia sepanjang informasi karakteristik batubara tersebut ada. Hasil penelitian ini selanjutnya dapat digunakan untuk estimasi potensi sumber daya CBM Indonesia sebagai sumber energi baru yang sangat potensial.

1.2 Perumusan Masalah

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

1. Belum adanya penelitian mengenai pengaruh kandungan air pada batubara Indonesia terhadap kapasitas adsorpsi gas metana yang sangat diperlukan untuk estimasi kandungan gas metana pada *reservoir*.
2. Belum adanya model adsorpsi tekanan tinggi gas metana pada batubara Indonesia dengan berbagai kandungan air.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan informasi mengenai pengaruh kandungan air terhadap kapasitas adsorpsi gas metana pada batubara di Indonesia.
2. Mendapatkan suatu model adsorpsi tekanan tinggi gas metana pada batubara Indonesia dengan kandungan air yang berbeda-beda untuk prediksi potensi CBM Indonesia sebagai sumber energi baru.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Sampel batubara yang diuji kemampuan adsorpsinya terhadap gas metana adalah batubara Ombilin dari daerah Sawahlunto dan batubara Barito dari daerah Warukin.
2. Uji adsorpsi dilakukan untuk batubara Barito dan Ombilin kering serta batubara Barito dan Ombilin dengan kandungan air kesetimbangannya, di atas, dan di bawah kesetimbangannya.
3. Pemodelan yang digunakan adalah model adsorpsi Langmuir modifikasi

1.5 Sistematika Penulisan

Susunan penulisan akan mengacu pada sistematika sebagai berikut:

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 Langmuir, 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.

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. Ketidakseimbangan 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 teradsorpsi atau adsorbat, sedangkan zat yang menyerap atau menariknya disebut adsorben. Proses adsorpsi pada suatu adsorben terutama terjadi pada pori-pori kecilnya (mikropori). Sementara itu, makropori hanya berperan sebagai tempat transfer adsorbat dari permukaan luar ke mikropori (Ding & 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.

2.1.1 Jenis-jenis Adsorpsi

Adsorpsi dapat dibagi menjadi dua bagian berdasarkan sifat interaksi antara permukaan adsorben dengan adsorbat (Treybal, 1980):

a. Adsorpsi fisik (*Physisorption*)

Proses adsorpsi ini sangat bersifat dinamik dimana terdapat suatu keadaan setimbang antara molekul dan adanya kesetimbangan interaksi antara adsorbat dan adsorben. Dalam proses adsorpsi fisik, tidak terdapat suatu ikatan kimia yang terbentuk antara molekul adsorben dan molekul adsorbat. Ikatan antara molekul adsorbat dan adsorben terjadi karena adanya gaya elektrostatis, seperti gaya

London atau gaya *van der Waals* yang berasal dari induksi dipol-dipol. Ikatan ini juga bisa dipengaruhi oleh karakteristik fisik dari adsorben, seperti porositas adsorben. Penyebaran gaya antar molekul-molekul itu merupakan dampak dari fluktuasi induksi yang sangat cepat pada muatan elektron dari molekul adsorben dan adsorbat (Gregg, 1982).

Adsorpsi fisik adalah suatu peristiwa yang *reversible*, sehingga jika kondisi operasinya diubah akan membentuk suatu kesetimbangan baru. Peristiwa adsorpsi gas terjadi sangat cepat dan mekanismenya tergantung dari ukuran molekul adsorbat dibandingkan dengan lebar pori adsorben. Hal ini berhubungan dengan interaksi antara adsorbat dan pori-pori. Mula-mula molekul adsorbat terserap pada pori-pori adsorben dengan energi sangat besar, dengan mengabaikan efek aktivasi difusi, proses adsorpsi dilanjutkan dengan pengisian pori-pori adsorben sehingga energi adsorpsi yang digunakan menurun. Beberapa macam pori adsorben dapat menampung antara dua sampai tiga molekul adsorbat. Dengan adanya proses adsorpsi fisik, volume elemen adsorbat akan berkurang dengan cara meningkatkan potensi adsorptif pada pori.

Semua proses adsorpsi fisik bersifat eksotermik yang dikarenakan penarikan molekul adsorbat kedalam pori adsorben. Hal ini juga menyebabkan entropi berkurang sesuai dengan persamaan :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.1)$$

Dikarenakan adsorpsi fisik bersifat isotermis, maka bila temperatur dinaikkan maka jumlah gas yang terserap akan berkurang, hal ini sesuai dengan prinsip Le Chatelier. Untuk kasus adsorpsi fisik yang disertai aktivasi difusi, hipotesa ini tidak berlaku. Lamond dan Mars melaporkan bahwa data interpretasi dari adsorpsi fisik Nitrogen pada permukaan yang polar ataupun yang nonpolar menunjukkan bahwa adsorpsi fisik tidak tergantung dari sifat kimia dari permukaan adsorben

Panas yang dikeluarkan pada peristiwa adsorpsi disebut panas adsorpsi. Panas adsorpsi fisik pada umumnya rendah (5-10 kkal/gmol gas) dan terjadi pada temperatur rendah yaitu di bawah temperatur didih adsorbat. Hal ini menyebabkan adsorpsi fisika bersifat *reversible* dan berlangsung sangat cepat. Proses adsorpsi fisik dapat terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi, sehingga proses tersebut akan membentuk lapisan multilayer pada permukaan adsorben. Ikatan yang

terbentuk dalam adsorpsi fisika dapat diputus dengan mudah, yaitu dengan cara pemanasan pada temperatur 102-200°C selama 2-3 jam.

b. Adsorpsi Kimia (*Chemisorption*)

Adsorpsi kimia adalah adsorpsi yang terjadi karena terbentuknya ikatan kovalen dan ion antara molekul-molekul adsorbat dan adsorben. Adsorpsi jenis ini melibatkan transfer elektron antara adsorben dan adsorbat dengan membentuk ikatan kimia, sehingga menyebabkan adanya adhesi pada molekul adsorben. Ikatan yang terbentuk merupakan ikatan yang kuat sehingga lapisan yang terbentuk adalah lapisan monolayer.

Adsorpsi kimia bersifat *irreversible* dan pada umumnya terjadi pada temperatur tinggi di atas temperatur kritis adsorbat, sehingga panas adsorpsi yang dilepaskan juga tinggi, sekitar 10-100 kkal/gmol, sedangkan untuk dapat terjadinya desorpsi (pada proses regenerasi) dibutuhkan energi yang lebih tinggi lagi untuk memutuskan ikatan yang terjadi antara adsorben dan adsorbat. Energi aktivasi yang dibutuhkan sekitar 10-60 kkal/gmol.

Adsorpsi kimia biasanya menyebabkan perubahan kimia dari adsorbat karena pada saat desorpsi fasa teradsorpsi, adsorbat mengalami proses pelepasan secara kimia. Pada Tabel 2.1 dijelaskan mengenai beberapa karakteristik yang berhubungan dengan adsorpsi fisika dan kimia (Ruthven D. M., 1984) yaitu :

Tabel 2. 1 Tabel karakteristik Adsorpsi

	Adsorpsi Fisika	Adsorpsi Kimia
Panas adsorpsi	Relatif rendah (kurang dari 2 atau 3 kali panas laten evaporasi)	Relatif tinggi (lebih dari 2 atau 3 kali panas laten evaporasi)
Sifat lapisan fasa teradsorp	Mono atau multilayer tergantung kondisi	Monolayer
Disosiasi adsorbat	Tidak ada	Mungkin saja disertai disosiasi
Signifikasi	Hanya signifikan pada temperatur rendah	Terjadi pada rentang temperatur yang lebar
Efek yang dihasilkan dari penambahan suhu	Menurun	Naik
Laju adsorpsi (T=273K)	Cepat, tidak aktif, dan <i>reversible</i>	Lambat, aktif, dan <i>irreversible</i>
Desorpsi	Mudah- dengan cara menurunkan P dan menambah T	Sulit, diperlukan suhu tinggi untuk memutus ikatan
Transfer elektron	Tidak ada	Ada

2.1.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi

Jumlah fluida yang teradsorpsi pada permukaan adsorben dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut (Bahl & Tuli, 1997; Treybal, 1980):

1. Jenis Adsorbat

a. Ukuran molekul adsorbat

Ukuran molekul adsorbat 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

Jika molekul adsorben dan adsorbat memiliki ukuran yang sama, molekul-molekul polar yang lebih kuat diadsorpsi daripada molekul-molekul yang kurang polar. Molekul-molekul yang lebih polar dapat menggantikan molekul-molekul kurang polar yang telah lebih dahulu teradsorpsi.

2. Karakteristik Adsorben

a. Kemurnian adsorben

Kemurnian adsorben dari zat pengotor dapat meningkatkan daya adsorpsi, hal ini menyangkut luas permukaan adsorben yang akan semakin besar apabila kadar zat pengotor yang dapat menutupi pori-pori semakin kecil.

b. Luas Permukaan dan Volume Pori Adsorben

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

3. Tekanan Adsorbat

Pada adsorpsi fisika, jumlah zat yang diadsorpsi akan bertambah dengan menaikkan tekanan dari adsorbat (tekanan sistem) karena dapat memperkuat ikatan *van der Waals* antar molekul adsorben dan adsorbat, sebaliknya pada adsorpsi kimia, jumlah zat yang diadsorpsi akan berkurang dengan menaikkan tekanan adsorbat

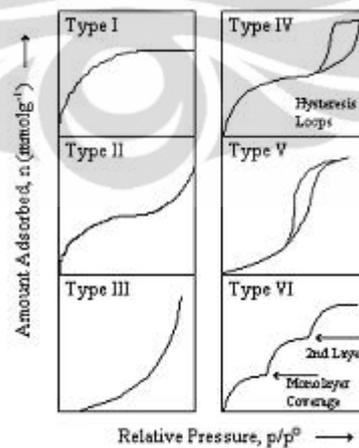
4. Temperatur

Proses adsorpsi merupakan proses yang eksotermis, berarti peningkatan temperatur pada tekanan yang tetap akan mengurangi jumlah senyawa yang teradsorpsi, sesuai dengan prinsip Le Chatelier.

2.1.3 Kesetimbangan Adsorpsi

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

Brunauer mengklasifikasikan adsorpsi isotermis dengan klasifikasi adsorpsi fisika menjadi lima kelas (Maron & Lando, 1974; Ruthven D. M., 1984) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Adsorpsi Isotermal

Profil dari adsorpsi isotermis harus memiliki kesamaan profil sedikitnya dengan satu kurva di atas atau kombinasi dari dua atau lebih kurva adsorpsi di

atas. Tipe adsorpsi isothermis yang ke-enam merupakan tipe terbaru yang diklasifikasikan oleh metode Brunauer, Deming, Deming dan Teller (sistem B.D.D.T). Beberapa informasi tentang tipe adsorpsi isothermis adalah sebagai berikut :

1. Isothermis tipe I

Proses adsorpsi ini biasanya terjadi secara sempurna pada tekanan parsial 0,5 Mpa. Jenis adsorpsi ini disebut juga *Langmuir Isotherm* dan menggambarkan adsorpsi satu lapis (*monolayer*). Jumlah adsorbat mendekati harga pembatas saat P/P_0 mendekati satu.

2. Isothermis tipe II

Jenis adsorpsi ini adalah jenis adsorpsi fisik dari gas pada media non-pori atau padatan berpori besar, yang menunjukkan sifat adsorpsi *monolayer-multilayer*. Lapisan *monolayer* akan diikuti oleh pembentukan *multilayer* apabila tekanan sistem dinaikkan. Pada profil kurva tipe II terlihat ada kemiripan dengan tipe pertama, tetapi kurva kemudian naik kembali. Pada transisi dimana slope kurva bernilai 0 maka pada bagian ini mengindikasikan tekanan relatif pada saat pelapisan *monolayer* selesai. Adsorben campuran karbon mesopori dan mikropori menghasilkan adsorpsi tipe II.

3. Isothermis tipe III

Plot kurva yang dihasilkan berbentuk cembung berdasarkan perubahan tekanan relatif pada axis plot. Kelompok adsorpsi isothermis ini merupakan karakteristik khas dari interaksi adsorbat-adsorben yang lemah (Kiselev, 1968). Tipe ini sering terjadi pada adsorben yang memiliki ukuran pori yang cukup lebar, dan tipe ini juga biasanya diasosiasikan dengan adsorben mikropori dan tak berpori. Interaksi yang lemah antara adsorben dan adsorbat menyebabkan penyerapan adsorbat yang sedikit pada tekanan rendah. Sekali molekul telah teradsorp pada tempat proses adsorpsi, maka interaksi adsorbat-adsorben akan semakin kuat, sehingga dapat menjadi *driving force* dari proses adsorpsi tipe ini. Hal ini menghasilkan daya adsorpsi yang tinggi pada tekanan relatif yang tinggi pula. Tipe adsorpsi yang terjadi pada tekanan relatif yang besar biasa dikenal dengan teori *cluster*.

4. Isotermis tipe IV

Jenis ini hampir sama dengan tipe II pada rentang tekanan yang relatif rendah sampai menengah. Loop histerisis, yang keberadaannya sering diasosiasikan dengan pori berukuran mesopori (2-50 nm), sering terjadi pada tipe ini. Kondensasi kapiler (*capillary condensation*) meningkat sampai daerah histerisis. Volume terbesar adsorbat yang teradsorpsi dapat dihitung dari *capillary condensation* yang telah sempurna mengisi pori. Profil adsorpsi isotermis tipe ini menunjukkan batasan kapasitas maksimum pada tekanan relatif yang tinggi.

5. Isotermis tipe V

Profil adsorpsi tipe ini berbentuk cembung terhadap tekanan relatif disumbu x, adsorpsi ini merupakan karakteristik interaksi yang lemah antara adsorbat dan adsorben. Adsorpsi ini mengindikasikan pemakaian adsorben mikropori atau mesopori, alasan kenapa bentuk profil seperti ini dapat dijelaskan oleh teori adsorpsi tipe III, perbedaan hanya terjadi pada besarnya pengaruh daya tarik intermolekul yang sangat besar pada adsorpsi tipe V.

6. Isotermis tipe VI

Pada awalnya adsorpsi tipe ini dikenalkan sebagai profil adsorpsi hipotetik. Bentuk kurva merupakan penggambaran dari pembentukan sempurna lapisan monomolekuler sebelum proses pembentukan lapisan selanjutnya.

2.1.4 Adsorben

Adsorben dapat didefinisikan sebagai zat padat (*solid*) yang dapat menyerap komponen tertentu dari suatu fase fluida. Mayoritas adsorben merupakan bahan-bahan yang sangat berpori, dan adsorpsi berlangsung terutama pada dinding pori-pori atau pada letak-letak tertentu di dalam partikel itu. Oleh karena pori-pori itu berukuran sangat kecil, luas permukaan dalam menjadi beberapa orde besaran lebih besar daripada permukaan luar, dan bisa mencapai 2000 m²/g adsorben. Pemisahan terjadi karena perbedaan bobot molekul atau karena perbedaan polaritas yang menyebabkan sebagian molekul yang melekat pada permukaan tersebut lebih erat daripada molekul lainnya.

Terdapat banyak sekali zat yang biasa digunakan sebagai adsorben. Berdasarkan struktur dan unsur pembangunnya, adsorben dapat digolongkan

menjadi dua, yaitu adsorben tidak berpori (*non-porous adsorbent*) dan adsorben berpori (*porous adsorbent*) (Gultom, 1998).

1. Adsorben Tak Berpori

Adsorban tak berpori dapat diperoleh dengan cara presipitasi deposit kristalin seperti BaSO_4 atau penghalusan padatan kristal. Luas permukaan spesifiknya relatif kecil, tidak lebih dari $10 \text{ m}^2/\text{g}$, umumnya antara 0,1 sampai dengan $1 \text{ m}^2/\text{g}$. Bahan tak berpori seperti filer karet (*rubber filler*) dan karbon hitam bergrafit (*graphitized carbon black*) adalah jenis adsorben yang tak berpori yang telah mengalami perlakuan khusus sehingga luas permukaannya dapat mencapai ratusan m^2/g .

2. Adsorben Berpori

Luas permukaan spesifik adsorben berpori berkisar antar $100 - 1000 \text{ m}^2/\text{g}$. adsorben ini biasanya digunakan sebagai penyangga katalis, dehidrator, dan penyeleksi komponen. Adsorben ini biasanya berbentuk granular. Gambar 2.2 menunjukkan struktur dari suatu adsorben berpori.



Gambar 2. 2 Struktur Adsorben Berpori

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

- Mikropori : diameter $< 2 \text{ nm}$
- Mesopori : diameter $< 2 - 50 \text{ nm}$
- Makropori : diameter $> 50 \text{ nm}$

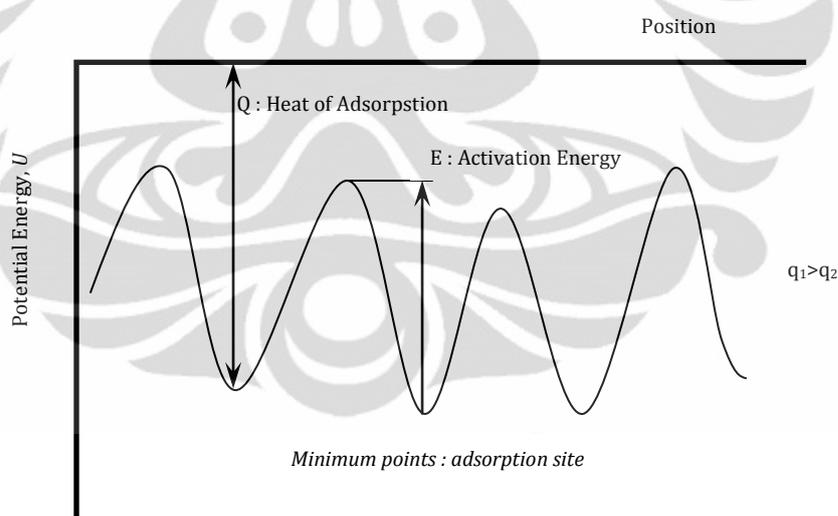
Beberapa jenis adsorben berpori yang terkenal adalah: silika gel, alumina, karbon aktif, *molecular sieve*, dan *porous glass*. Terdapat beberapa jenis adsorben yang banyak digunakan dalam proses adsorpsi gas baik untuk penelitian maupun untuk proses di industri seperti silika, karbon aktif, zeolit, alumina, dan batubara.

2.2 Model-model Adsorpsi

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

2.2.1 Model Adsorpsi Isotermis Langmuir

Pendekatan ini dilakukan oleh Langmuir pada tahun 1918. Teori ini menggambarkan adsorpsi monolayer pada permukaan ideal. Permukaan ideal merupakan energi fluktuasi (E) dengan besaran amplitudo yang sama, dan besarnya fluktuasi ini lebih besar daripada energi termal molekulnya (kT), sehingga cekungan pantulan energi fluktuasi tersebut menjadi tempat terjadinya adsorpsi. Jika jarak antar kedua palung tersebut lebih besar daripada adsorbat maka adsorpsi yang terjadi disebut *localized* dan tiap-tiap molekul adsorbat hanya menempati satu situs adsorben. Proses terjadinya adsorpsi tersebut dapat dilihat ilustrasinya seperti gambar 2.3.

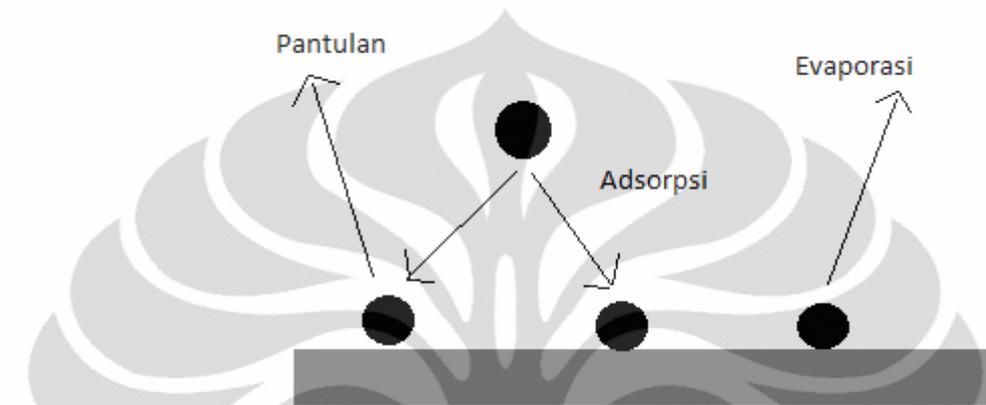


Gambar 2. 3 Ilustrasi Energi Fluktuasi Pada permukaan Adsorben

Meskipun model Langmuir dapat ditentukan dengan melihat dari sisi kesetimbangan, cara yang terbaik dalam menentukan model Langmuir tersebut adalah dengan menggunakan teori kinetika.

Ketika suatu molekul berbenturan dengan suatu permukaan adsorbat, maka akan ada dua kemungkinan yaitu molekul tersebut akan terpantul atau teradsorpsi. Apabila suatu molekul membentur situs yang sudah terisi oleh molekul, maka

molekul tersebut akan terpantulkan. Jadi adsorpsi hanya akan terjadi pada suatu situs yang kosong. Setelah menempati suatu situs, molekul yang teradsorpsi mungkin akan terdesorpsi dari situs yang ditempatinya. Proses kemungkinan teradsorpsi atau terdesorpsinya suatu molekul pada suatu permukaan dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Diagram Skema Mekanisme Adsorpsi Langmuir

Dari penjelasan diatas, maka dalam model Langmuir ada beberapa hal yang diasumsikan, antar lain:

1. Molekul teradsorpsi pada jumlah pori yang ada secara pasti dan membentuk satu lapisan
2. Setiap situs adsorben hanya dapat ditempati oleh satu molekul adsorbat.
3. Semua pori adsorben memiliki jumlah energi/entalpi yang sama
4. Tidak ada interaksi antara molekul-molekul yang teradsorpsi (tidak bergerak bebas di satu tempat dengan tempat yang lainnya)

Kesetimbangan adsorpsi terjadi karena adanya laju adsorpsi dan desorpsi, diasumsikan kesetimbangan ini berorde satu.

$$\text{Laju Adsorpsi} = k_a p(1 - \theta) \quad (2.2)$$

$$\text{Laju Desorpsi} = k_d \theta \quad (2.3)$$

$$\text{Dimana } \theta = \frac{q}{q_s} \quad (2.4)$$

Sehingga pada saat terjadi kesetimbangan, maka nilai adsorpsi sama dengan desorpsi

$$k_a p(1 - \theta) = k_d \theta \quad (2.5)$$

$$\frac{\theta}{1-\theta} = \left(\frac{k_a}{k_d}\right) p = bp \quad (2.6)$$

$$\theta = \frac{q}{q_s} = \frac{bp}{1+bp} \quad (2.7)$$

dimana ;

k_a, k_b : konstanta laju adsorpsi dan desorpsi

p : tekanan sistem

q : jumlah gas teradsorpsi per satuan massa atau volum adsorben

q_s : jumlah kapasitas adsorpsi maksimum per satuan massa atau volum adsorben

θ : fraksi luas permukaan yang tertutup oleh lapisan monolayer

Besaran q_s menggambarkan kapasitas adsorpsi maksimum yang dimiliki adsorben yang tidak terikat oleh perubahan temperatur. Untuk konstanta yang memiliki keterikatan dengan temperatur, maka variabel itu harus tunduk pada persamaan vant Hoff dimana ;

$$b = b_0 e^{\left(\frac{-\Delta H_0}{RT}\right)} = b_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.8)$$

Parameter b adalah konstanta afinitas atau konstanta Langmuir, sedangkan $-\Delta H_0$ biasa dikenal dengan Panas Adsorpsi (Q). Selama terjadi proses adsorpsi maka akan terjadi reaksi isotermik (ΔH negatif), maka nilai b akan menurun seiring dengan bertambahnya temperatur. b_0 merupakan faktor pre-eksponensial yang dipengaruhi suhu dan dirumuskan dengan persamaan :

$$b_0 = \frac{\alpha}{k_{d\infty} \sqrt{2\pi MRT}} \quad (2.9)$$

dimana :

α : koefisien nonperfect sticking

$k_{d\infty}$: koefisien kecepatan adsorpsi pada temperatur tak berhingga

Model Adsorpsi Langmuir telah banyak digunakan untuk merepresentasikan adsorpsi berbagai gas di beberapa adsorben, seperti karbon aktif, batubara, dan lain-lain. Tabel 2.2 merupakan tabel parameter Langmuir pada batubara Tiffany beserta %AAD-nya.

Tabel 2. 2 Parameter Model Adsorpsi Langmuir pada Batubara Tiffani Basah
(Fitzgerald J.E *et al*, 2005)

Pure gas	L_i (mmol/g)	B_i (MPa ⁻¹)	η_i	RMSE (mmol/g)	%AAD
CH ₄ (Well 1)	0,569	0,234	1	0,0055	1,9
CH ₄ (Well 10)	0,550	0,227	1	0,0034	1,1
CH ₄ (mixed coal)	0,573	0,219	1	0,0095	2,6
N ₂ (mixed coal)	0,352	0,091	1	0,0051	3,5
CO ₂ (mixed coal)	0,779	0,654	1	0,0219	2,0

2.2.2 Model Adsorpsi Isotermis BET

Penjelasan pada kurva isotermis tipe II hingga III bahwa adsorpsi yang terjadi adalah pada lapisan molekular. Adsorpsi tersebut terdiri dari formasi dari banyak layer molekul pada permukaan. Pada postulat BET bahwa tipe II dan III memiliki relasi sebagai berikut:

$$\frac{P}{v(P^0 - P)} = \frac{1}{V_m c} + \frac{(c-1) P}{V_m c P^0} \quad (2.10)$$

dimana: v = volume di bawah keadaan *standard* dari adsorpsi gas

P = tekanan

T = temperatur

P^0 = tekanan uap jenuh dari adsorbat pada suhu T

v_m = volume dari gas di bawah keadaan *standard* yang diadsorpsi ketika permukaan dilapisi dengan layer unimolekuler

c = konstanta pada temperatur tertentu.

$$c = e^{(E_1 - E_L)/RT} \quad (2.11)$$

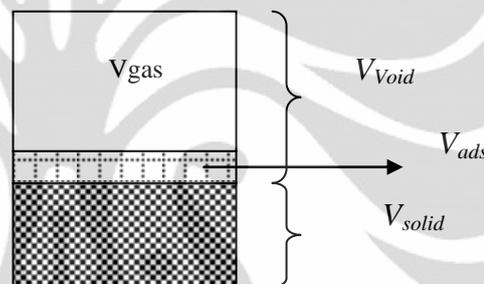
dimana: E_1 = panas yang digunakan untuk adsorpsi pada layer pertama

E_L = panas dari *liquefaction* gas

Pada kurva isotermis tipe IV dan V, selain terjadi adsorpsi pada lapisan multilayer tetapi juga terjadi pada kondensasi gas pada pori – pori dan kapiler dari adsorben. Kedua kurva tipe ini juga dipengaruhi oleh E_1 dan E_L . Ketika $E_1 > E_L$ maka yang terjadi isotermis tipe IV, sedang $E_1 < E_L$ maka yang terjadi isotermis tipe V.

2.2.3 Model Adsorpsi Isotermis Gibbs

Adsorpsi Isotermis Gibbs merupakan kurva adsorpsi yang diperoleh langsung dari data eksperimen yang didapat. Perbedaan mendasar antara adsorpsi Gibbs dan absolut terletak pada pendekatan perhitungan dari jumlah zat yang tidak teradsorpsi pada suatu adsorben. Gambar 2.5 mengilustrasikan keadaan fasa teradsorpsi serta fasa yang tidak teradsorpsi yang digunakan dalam perhitungan jumlah zat teradsorpsi. Dalam eksperimen, n_{unads} dihitung dengan mengabaikan nilai dari volume gas fasa teradsorpsi pada permukaan adsorben (V_{ads}) karena sulitnya mengetahui volume gas dalam fasa teradsorpsi tersebut sehingga dalam eksperimen digunakan keseluruhan V_{void} .



Gambar 2. 5 Ilustrasi Keadaan Fasa Teradsorpsi pada Suatu Pori Adsorben

Jumlah gas yang teradsorpsi dalam adsorpsi Gibbs dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$n_{ads}^{Gibbs} = n_{inj} - n_{unads}^{Gibbs} - n_{solute} \quad (2.12)$$

Jumlah gas yang diinjeksikan dapat dihitung dari pengukuran tekanan, temperatur, dan volume dari *pump section*.

$$n_{inj} = \left(\frac{P\Delta V}{ZRT} \right)_{pump} \quad (2.13)$$

Jumlah gas yang tidak teradsorpsi dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$n_{unads}^{Gibbs} = \left(\frac{PV_{void}}{ZRT} \right)_{cell} \quad (2.14)$$

dimana:

$$V_{void} = \frac{\left(\frac{P\Delta V}{ZT} \right)_{pump}}{\left(\frac{P_2}{Z_2 T} - \frac{P_1}{Z_1 T} \right)_{cell}} \quad (2.15)$$

dengan:

$n_{adsorpsi}^{Gibbs}$: jumlah gas yang teradsorpsi

$n_{injeksi}$: jumlah gas yang diinjeksikan ke dalam dozing cylinder

$n_{unadsorpsi}^{Gibbs}$: jumlah gas yang tak teradsorpsi

V_{void} : volum kosong yang terdapat pada adsorption cell

P : tekanan adsorpsi

T : temperatur adsorpsi/operasi

Z : faktor kompresibilitas

R : konstanta gas ideal

Hubungan antara Adsorpsi Gibbs dan Adsorpsi Absolut

Berdasarkan Gambar 2.5 dimana terdapat dua fasa homogen, yaitu fasa gas dan fasa teradsorpsi, maka total volume sistem adalah penjumlahan dari volume adsorben, volume gas, dan volume fasa teradsorpsi.

$$V_{total} = V_{solid} + V_{gas} + V_{ads} \quad (2.16)$$

Volume kosong (V_{void}) dapat diukur dengan kalibrasi Helium dan memiliki hubungan sebagai berikut:

$$V_{void} = V_{gas} + V_{ads} = V_{total} - V_{solid} \quad (2.17)$$

Jumlah gas yang teradsorpsi dalam satuan molar:

$$n_{ads} = n_{total} - n_{unads} \quad (2.18)$$

$$n_{ads}^{Gibbs} = n_{total} - \frac{V_{void}\rho_{gas}}{Mr_{gas}} \quad (2.19)$$

$$n_{ads}^{Abs} = n_{total} - \frac{V_{gas}\rho_{gas}}{Mr_{gas}} \quad (2.20)$$

Substitusi persamaan 2.19 dan 2.20 untuk mengeliminasi n_{total} menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$n_{ads}^{Gibbs} = n_{ads}^{Abs} - V_{ads}\rho_{gas} \quad (2.21)$$

dimana:

$$V_{ads} = n_{ads}^{Abs} / \rho_{ads} \quad (2.22)$$

Substitusi persamaan 2.21 dan 2.22 menghasilkan persamaan berikut:

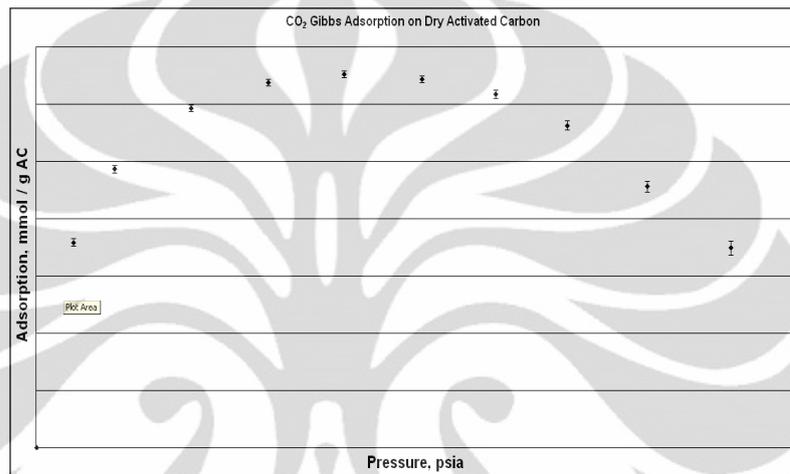
$$n_{ads}^{Gibbs} = V_{ads}(\rho_{ads} - \rho_{gas}) \quad (2.23)$$

Substitusi persamaan 2.22 dan 2.23 menghasilkan persamaan 2.24 yang menggambarkan hubungan antara adsorpsi Gibbs dan adsorpsi absolut.

$$n_{ads}^{Abs} = n_{ads}^{Gibbs} \left(\frac{\rho_{ads}}{\rho_{ads} - \rho_{gas}} \right) \quad (2.24)$$

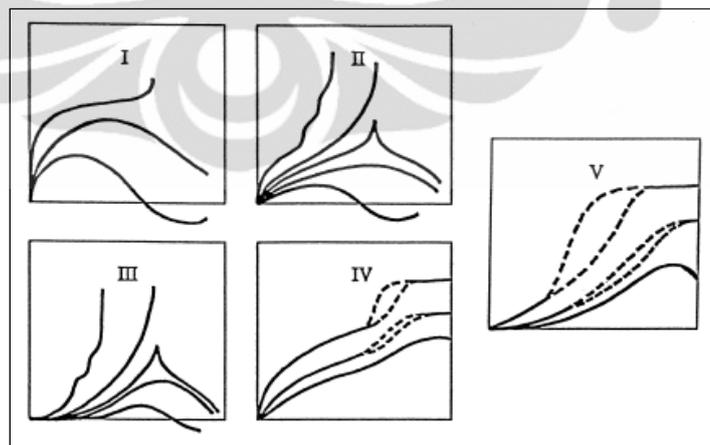
Pada tekanan rendah, densitas gas sangat kecil (jauh lebih kecil daripada

densitas adsorpsi) sehingga $\frac{\rho_{gas}}{\rho_{ads}}$ bisa dianggap 0 dan n_{ads}^{Gibbs} sama dengan n_{ads}^{Abs} sehingga n_{ads}^{Gibbs} akan menurun seiring dengan kenaikan tekanan walaupun harga n_{ads}^{Abs} naik. Hal tersebut dapat dibuktikan dari Gambar 2.6 sebagai berikut:



Gambar 2. 6 Grafik Adsorpsi Gibbs CO2 pada Karbon Aktif Kering

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



Gambar 2. 7 Tipe-tipe Adsorpsi Isotermis Gibbs

Pada Gambar 2.7, tekanan merupakan absis dan jumlah zat yang teradsorpsi merupakan ordinatnya, pada klasifikasi ini, tipe I menunjukkan adsorpsi isotermis pada adsorben mikropori untuk kondisi subkritis, dekat dengan dengan titik kritis,

dan super kritis. Pada kondisi superkritis, adsorpsi isothermis tidak monoton. Tipe II dan III menunjukkan adsorpsi isothermis pada adsorben makopori dengan afinitas kuat dan lemah. Pada temperatur rendah, tipe II dan tipe III mempunyai *step*, tetapi dengan temperatur yang lebih tinggi, kurva tersebut menjadi monoton (seperti pada tipe II dan tipe III adsorpsi isothermis BET), tetapi didekat temperatur kritis, adsorpsi isothermis tipe II dan 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 Aranovic, 1999).

2.2 Batubara

Penimbunan lanau (lumpur) dan sedimen lainnya, bersama dengan pergeseran kerak bumi mengubur rawa dan gambut yang seringkali sampai ke kedalaman yang sangat dalam. Dengan penimbunan tersebut, material tumbuhan tersebut terkena suhu dan tekanan yang tinggi. Suhu dan tekanan yang tinggi tersebut menyebabkan tumbuhan tersebut mengalami proses perubahan fisika dan kimiawi dan mengubah tumbuhan tersebut menjadi gambut dan kemudian batubara (World Coal Institute, 2009).

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

2.2.1 Klasifikasi Batubara

Berikut ini klasifikasi batubara menurut sistem ASTM berdasarkan kuantitas fraksi karbon dan *heating value*-nya

- *Lignite*

Memiliki kadar karbon yang paling rendah diantara ke-empat jenis batubara lainnya. Hal tersebut mengakibatkan rendahnya *heating value*

dari *lignite*. Selain itu, lignit adalah batubara yang sangat lunak yang mengandung air 35-75% dari beratnya (KESDM, 2010).

- *Sub-bituminous*

Batubara jenis ini merupakan hasil dehidrogenasi dan metanogenesis *lignite*. Batubara ini memiliki tingkat maturitas organik yang lebih tinggi, lebih keras, dan lebih gelap daripada *lignite*.

- *Bituminous*

Batubara ini merupakan batubara yang mengalami reaksi lanjutan dari dehidrogenasi pada pembentukan dan pemisahan gas metana dan gas hidrokarbon lebih tinggi seperti etana, propana, dan lainnya akan membentuk batubara jenis ini. Bituminus mengandung 68-86% unsur karbon (C) dan berkadar air 8-10% dari beratnya (KESDM, 2010)

- *Anthracite*

Merupakan batubara yang lebih sempurna karena memiliki *heating value* yang paling besar dan *water content* yang terendah di antara lainnya. Oleh sebab itu, batubara jenis ini merupakan batubara yang paling tinggi mutunya.

2.2.2 Struktur Batubara

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

- Lithotype region*, tersusun atas hidrokarbon organik yang memiliki perbedaan dalam densitas, reflektivitas, kekuatan dan volatilitas.
- Lithotype boundaries*, tersusun atas komposisi non-hidrokarbon yang memiliki densitas 50% lebih besar dari komposisi yang terdapat pada *lithotype*.
- Microscope organic region*, merupakan bahan pembangun *lithotype*, dengan ukuran 10^{-6} - 10^{-4} m ; dikenal sebagai maceral. Maceral batubara dibagi menjadi tiga, yaitu:
 - *Exinite (Liptinite)*
Terbentuk dari daun, kulit pohon, serbuk sari, biji, dan resin pada pohon. Tingkat pantulannya sangat rendah.

- *Vitrinite*
Terbentuk dari jaringan kayu. Semakin besar kandungan *Vitrinite* pada batubara, semakin besar pula volume Langmuir dan BET serta jumlah mikropori yang terdapat pada batubara. Selain itu, kandungan *vitritine* juga berbanding lurus dengan *kesetimbangan moisture content* dari batubara (Clarckson & Bustin, 1996)
 - *Inertinite*
Terbentuk dari jaringan kayu yang mengalami oksidasi kuat. Penelitian yang dilakukan Clarkson pada tahun 1996, menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan *Inertinite* pada batubara maka semakin kecil volume Langmuir dan BET.
- d. Pori-pori di antara matriks organik dengan ukuran dan bentuk yang bervariasi. Pori-pori mempengaruhi kekuatan, densitas, properti perpindahan molekular, serta kapasitas adsorpsi batubara.

2.2.3 Kandungan Batubara

Batubara yang dihasilkan dari setiap lokasi tambang yang berbeda tidaklah sama. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan kandungan pada batubara tersebut. Beberapa kandungan yang dimiliki oleh batubara adalah: (Belkin, 2007)

- *Fixed Carbon*
Fixed carbon merupakan kandungan utama dari batubara. Kandungan inilah yang paling berperan dalam menentukan besarnya *heating value* suatu batubara. Semakin banyak *fixed carbon*, maka semakin besar *heating value*-nya.
- Kandungan Air (*Mositure Content*)
Mositure content merupakan kuantitas kandungan air pada batubara. Besarnya kandungan air pada batubara dapat menurunkan *heating value*-nya. Oleh sebab itu, semakin besar *moisture content*, maka semakin kecil *heating value*-nya. Hal ini disebabkan oleh panas yang dihasilkan oleh pembakaran *fixed carbon* digunakan terlebih dahulu untuk menguapkan kandungan air ini. *Mositure content* pada batubara dibedakan menjadi dua, yaitu: (Pan et al, 2010)

- *Free moisture*

Merupakan kandungan air yang terdapat pada *cleat sytem*. *Free moisture* tidak mempengaruhi kapasitas adsorpsi dari batubara tetapi mempengaruhi permeabilitas gas.

- *Inherent Moisture*

Inherent moisture merupakan kandungan air yang terikat atau teradsorpsi didalam *matrix* batubara dan mempengaruhi kapasitas adsorpsi gas.

- *Volatile matter*

Volatile matter merupakan kuantitas sejumlah senyawa-senyawa yang mudah menguap. Senyawa *volatile* ini berperan sebagai pemantik dari proses terbakarnya batubara. Semakin sedikit senyawa *volatile* pada batubara, maka semakin sulit batubara terbakar meskipun batubara tersebut memiliki *fixed carbon* yang besar.

- *Ash*

Ash (abu) merupakan komponen yang terkandung pada batubara yang tidak dapat terbakar. Pada umumnya *ash* ini berupa mineral yang berasal dari dalam tanah.

2.2.4 Karakteristik Cekungan Coal di Indonesia

Cekungan coal di Indonesia memiliki karakteristik yang berbeda dengan cekungan-cekungan lain di dunia. Tabel 2.3 menunjukkan karakteristik coal di Indonesia:

Tabel 2. 3 Karakteristik Cekungan Coal di Indonesia

Parameter	Perkiraan Data
Coal Thickness	25-50 ft
Depth	250-3000 ft

Indonesia memiliki cadangan batubara dan CBM yang besar. Tabel 2.4 menunjukkan perkiraan potensi batubara yang mengandung gas metana.

Tabel 2. 4 Perkiraan Potensi CBM di Indonesia

Provinsi	Basin	Prospective Area, sq Km
Sumatera	Sumatera bagian tengah	15.000
	Sumatera Selatan	20.000
	Bengkulu	3000
	Ombilin	130
Jawa Barat	Jatibarang	500
Kalimantan	Barito	16.000
	Berau	2000
	Kutai	10.000
	Tarakan Utara	6.500
	Pasir/asem asem	1000
Sulawesi	Sengkang	1000
Total		74.000

2.2.5 Batubara Ombilin dan Batubara Barito

Batubara memiliki struktur yang kompleks dan memiliki karakteristik yang berbeda-beda untuk setiap lokasi (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). Oleh karena itu, kapasitas adsorpsi metana pada batubara Ombilin dan batubara Barito akan berbeda pula.

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 pirolisis), 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 elemen mikro lainnya.

Pada Tabel 2.5 menunjukkan analisa *proximate* dan *ultimate* dari kedua sampel batubara Ombilin dan Barito beserta rank batubaranya.

Tabel 2. 5 Analisa *Proximate* dan *Ultimate* Batubara Ombilin dan Barito
(Belkin, 2007)

Unit	Batubara Ombilin	Batubara Barito
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>

Terlihat dari Tabel 2.5 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 %). Penelitian Pabhassaro pada tahun 2008 juga menghasilkan informasi mengenai kandungan air kesetimbangan pada batubara Ombilin dan batubara Barito yaitu masing-masing sebesar 3% dan 7%.

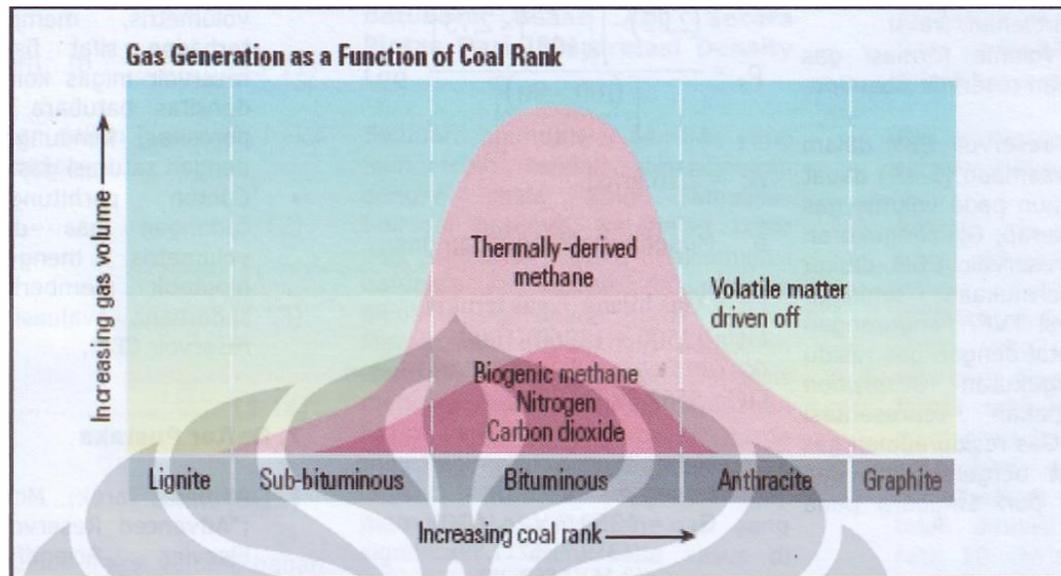
Penelitian yang dilakukan oleh Pabhassaro pada tahun 2008 menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi metana pada batubara Barito lebih besar 22 % daripada kapasitas adsorpsi batubara Ombilin. Namun, penelitian tersebut hanya dilakukan pada batubara kering dan batubara basah saja, belum mempertimbangkan kandungan air di bawah dan di atas titik kesetimbangannya.

2.3 Coalbed Methane (CBM)

Coalbed methane adalah gas metana yang terkandung dalam batubara yang terperangkap dalam mikropori atau pori-pori batubara melalui proses *microbial (biogenic)* atau panas (*thermogenic*) selama proses pembentukan batubara. *Coalbed methane* ini merupakan salah satu sumber daya energi bersih lingkungan yang telah dimanfaatkan diberbagai Negara. Indonesia memiliki cadangan CBM yang cukup besar untuk dikelola, yaitu sebesar 450 TCF yang tersebar dalam 11 *coal basin* dengan konsentrasi terbesar terdapat pada cekungan Sumatera Selatan sebesar 183 TCF dan cekungan Barito sebesar 101,6 TCF (Stevens, 2003).

Coalbed methane terbentuk dengan beberapa tahapan. Selama tahap awal pembentukan batubara, metana *biogenic* terbentuk dari *by-product* respirasi bakteri. Bakteri *aerobic* terlebih dahulu memetabolisme 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 *anaerobic* kemudian mengurangi karbondioksida dan menghasilkan gas metana melalui pernapasan anaerobik (Rice & Claypool, 1981). Ketika batubara mencapai temperatur sekitar 122°F, dan setelah beberapa lama, gas metana *biogenic* terbentuk. Pada waktu yang hampir bersamaan, sekitar dua pertiga kelembabannya dikeluarkan dan batubara telah mencapai tingkatan *sub-bituminous* (Rightmare, 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 gas metana. Produksi termogenik tidak melebihi produksi karbondioksida pada tingkatan batubara *volatile* tinggi hingga mencapai temperatur 250°F. pembentukan maksimum gas metana pada batubara *bituminous* terjadi pada temperature 300°F (Rightmire, 1984). Hubungan volume gas yang terbentuk dengan rank batubara dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Hubungan Volume Gas yang terbentuk sebagai Fungsi Rank Batubara
(Anderson, 2003)

Jumlah gas metana yang teradsorpsi dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu: (Pophare, 2008)

1. Karakteristik adsorben
2. Sifat fisika dan kimia gas yang teradsorpsi
3. Volume dan jumlah mikropori, serta total luas permukaan.
4. Tekanan dan temperatur kritis adsorben dan adsorbat.
5. *Moisture content* dan kandungan abu.

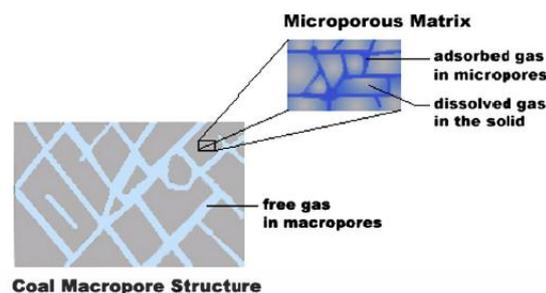
2.3.1 Reservoir Coalbed methane

Karakteristik reservoir CBM berbeda dari gas konvensional pada berbagai tempat. Perbedaan tersebut bisa dilihat pada Tabel 2.6

Tabel 2. 6 Karakteristik Reservoir CBM dengan Gas Konvensional

Karakteristik	Konvensional	CBM
Produksi gas	Gas dihasilkan pada sumber batuan dan bermigrasi ke reservoir	Gas dihasilkan dan terperangkap dibatubara
Struktur	Rekahan/retakan yang tak beraturan	Cleats yang sama besar
Mekanisme penyimpanan gas	Kompresi	Adsorpsi
Mekanisme Transportasi	Gradient tekanan (Hukum Darcy)	Gradient konsentrasi (Hukum Fick) dan gradient tekanan (hukum Darcy)
Performansi produksi	Laju gas meningkat kemudian menurun, awalnya terdapat sedikit atau tidak ada air. GWR(gas/water ratio)	Laju gas meningkat dengan waktu kemudian menurun. Awalnya terdapat banyak air. GWR meningkat seiring dengan waktu

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 seperti pada gambar 2.9. 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 bersifat menerus sepanjang pelapisan dan *butt cleat* yang merupakan jalur rekahan bersifat tidak menerus. Uniknya, *face cleat* dan *butt cleat* saling tegak lurus.

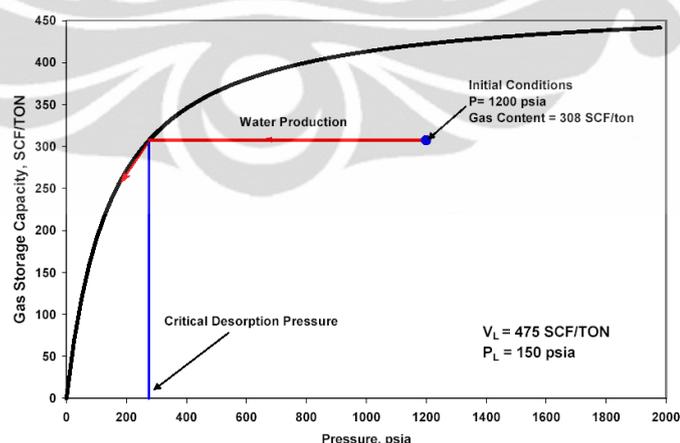


Gambar 2. 9 Makropori dan Mikropori Batubara (Yi & Akkutlu, 2009)

2.3.2 Penyimpanan

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

Gas content pada batubara diukur dengan tes desorpsi yang meliputi inti batubara, menempatkannya pada wadah, dan mengukur gas yang terkandung. Jika *gas content* tersebut berada di bawah kesetimbangan dengan isotherm, seperti yang digambarkan pada Gambar 2.10, maka tidak akan ada gas dan cleat yang terisi dengan air.

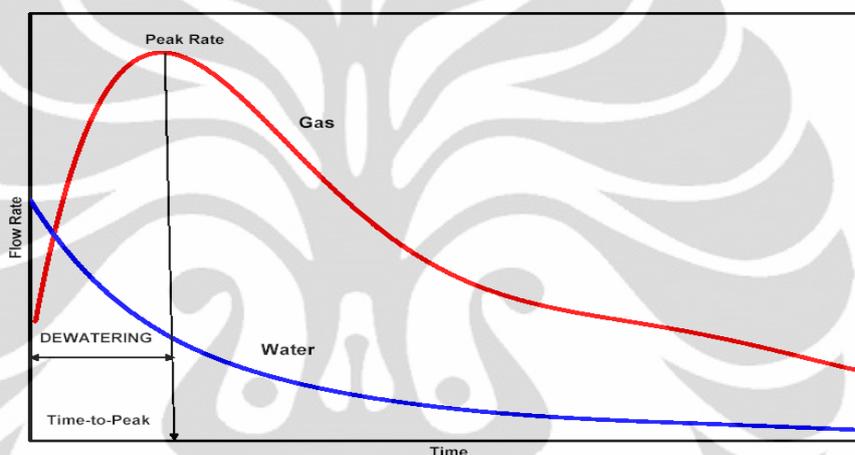


Gambar 2.10 Langmuir Isotherm (Aminian, 2003)

2.3.3 Produksi

Perilaku produksi CBM 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 dan dua fasa

aliran gas dan cair melalui system karopori, yang keduanya melalui proses desorpsi sehingga teknik pada *reservoir* konvensional tidak dapat digunakan untuk memprediksi produksi CBM. Cara yang terbaik untuk memprediksi performasin *reservoir* CBM adalah simulator *reservoir numeric* yang menggabungkan aliran dan karakteristik penyimpanan (kapasitas adsorpsi) serta pehitungan 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 2.11 menunjukkan kecendrungan produksi sebuah *reservoir* CBM.



Gambar 2.11 Produksi Sebuah *Reservoir* CBM (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, tetapi 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. Selain itu, penelitian juga akan dilakukan di luar kampus untuk melakukan permodelan.

3.2 Bahan-bahan dan Alat-alat Penelitian

Adapun alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah :

1. Toples dan gelas beaker
2. Pengontrol suhu, AC, dan kipas angin.
3. Pemanas (*furnace*)
4. Alat uji adsorpsi, meliputi *dozing cylinder*, *sampling cylinder* dan *pressure transducer*.
5. Kompresor vakum
6. *USB Data Acquisition (Advantech USB 4718)*
7. *Power Supply Regulator*
8. Perangkat komputer
9. Timbangan

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

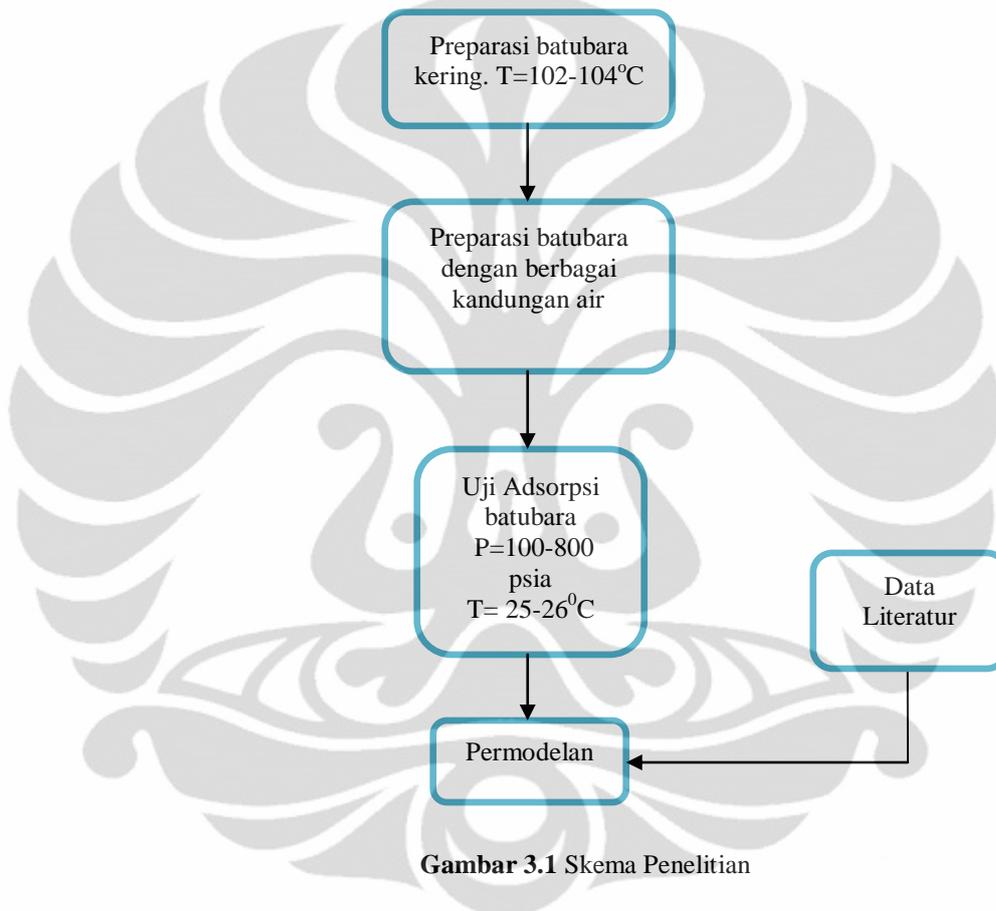
1. Batubara Ombilin dan Barito
2. Helium (He)
3. Metana (CH₄)
4. *Glass Woll*

3.3 Rancangan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan informasi mengenai kapasitas adsorpsi gas metana pada batubara Indonesia dengan berbagai kandungan air. Prinsip yang digunakan adalah prinsip adsorpsi dengan menggunakan batubara Barito dan Ombilin sebagai adsorben. Dalam hal ini akan diuji kapasitas adsorpsi batubara Ombilin kering dan dengan kandungan air 1%, 3%, 7%, serta batubara

Barito kering dan dengan kandungan air 3%, 7%, 10%, dengan tujuan untuk mengetahui kapasitas adsorpsi batubara pada kondisi yang 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.



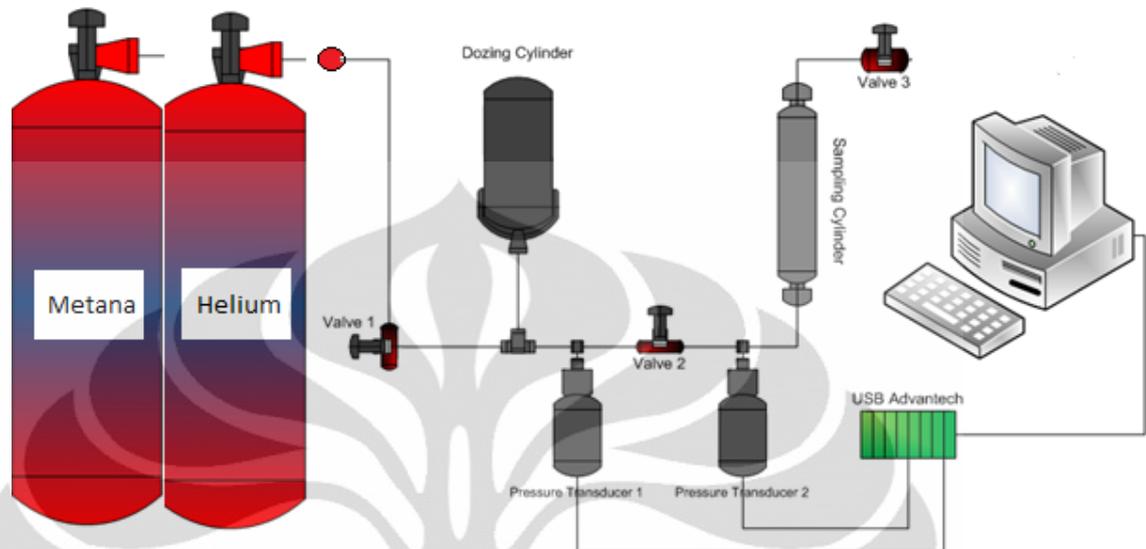
Gambar 3.1 Skema Penelitian

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yaitu persiapan alat, preparasi batubara, preparasi batubara kering dan batubara dengan kandungan air yang berbeda-beda, pengujian adsorpsi tekanan tinggi batubara, dan permodelan.

3.4.1 Persiapan Peralatan

Adapun persiapan peralatan seperti pada gambar 3.2 di bawah ini :



Gambar 3.2 Skema Alat untuk Analisa Daya Adsorpsi Batubara

Skema pada Gambar 3.2 dan gambar 3.3 merupakan alat uji adsorpsi yang terdiri dari *dozing cylinder* dan *sampling cylinder* yang dilengkapi dengan *pressure transducer* pada pipa penyalurnya. Sinyal keluaran *Pressure transducer* selanjutnya dihubungkan dengan komputer dengan *software Adam View* dan *USB Data Acquisition* yang akan diterjemahkan menjadi parameter tekanan pada *dozing* dan *sampling cylinder* serta temperatur. Pembacaan parameter tekanan dan temperatur merupakan suatu kalibrasi tegangan listrik yang dihasilkan dari *pressure transducers* dan diterjemahkan sebagai besaran tekanan dan temperatur oleh komputer dengan bantuan *USB Data Acquisition*.



Gambar 3.3 Alat Uji Adsorpsi

Sampling cylinder merupakan pipa vakum yang bisa dimodifikasi dan dilepas untuk diletakkan adsorben didalamnya sehingga alat ini sangat riskan untuk mengalami kebocoran. Oleh karena itu, selalu dilakukan tes kebocoran sebelum melakukan uji adsorpsi. *Sampling cylinder* ditunjukkan seperti pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 *Sampling cylinder*

3.4.2 Preparasi Batubara

Sampel batubara dari Ombilin dan Barito hasil *milling* disaring dengan saringan ukuran 200 mesh. Butiran batubara ini kemudian disimpan dalam wadah dan ditutup rapat untuk kemudian dipakai sebagai sampel induk.

3.4.3 Preparasi Batubara Kering

Dari sampel induk, diambil sekitar 36 gram batubara dan ditaruh di atas wadah ceper kering yang sudah ditimbang. wadah dan batubara ini kemudian dimasukkan ke dalam oven pada temperatur 102-104°C hingga diperoleh berat yang konstan. Perubahan berat tersebut merupakan kandungan air yang hilang (*moisture loss*) (Fitzgerald & Pan, 2005).

3.4.4 Preparasi Batubara dengan Berbagai Kandungan Air

1. Preparasi Batubara Basah (Kandungan Air Kesetimbangan)

Dari sampel yang telah dikeringkan, diambil lagi sekitar 30 gram batubara dan ditaruh di atas wadah ceper kering yang sudah ditimbang. wadah dan batubara ini kemudian dimasukkan ke dalam wadah tertutup (*humidifier*) yang dikelilingi air. Sebelumnya, wadah tersebut beserta isinya dipanaskan dengan *hot plate stirrer*, lalu didiamkan. Setelah itu, baru wadah beserta batubaranya dimasukkan

ke *humidifier* hingga diperoleh berat yang konstan (Fitzgerald J.E, Z. Pan, et al, 2005). Skema alatnya dapat dilihat pada Gambar 3.3. Besarnya persentase kandungan air kesetimbangan di dalam batubara dihitung sebagai berikut :

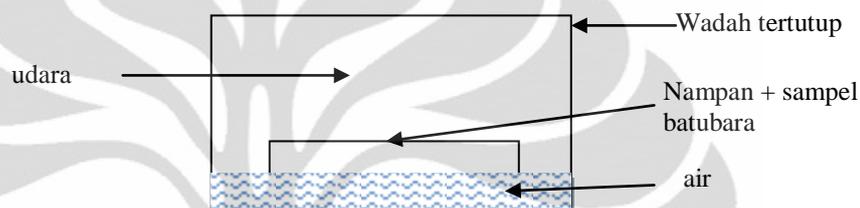
$$\frac{m_f - m_i}{m_{bb}} \times 100 \% \quad (3.1)$$

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



Gambar 3.5 Skema Alat Preparasi Batubara Basah

2. Preparasi Batubara dengan Kandungan Air di Atas Titik Kesetimbangannya

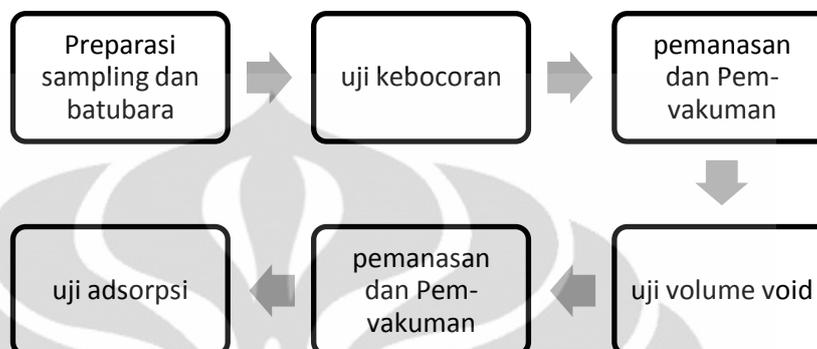
Dari sampel batubara basah, diambil lagi sekitar 10 gram dan diletakkan di atas cawan kering. Setelah itu, batubara basah tersebut disemprotkan air dengan spray hingga diperoleh persentase kandungan air yang diinginkan. Besarnya persentase kandungan air di dalam batubara dihitung dari perbandingan perubahan berat sampel batubara basah sebelum dan sesudah disemprotkan air dengan massa sampel batubara basah yang dipreparasi.

3. Preparasi Batubara dengan kandungan Air di Bawah titik Kesetimbangannya

Dari sampel batubara basah, diambil lagi sekitar 10 gram dan diletakkan di atas cawan kering. Setelah itu, cawan dan sampel batubara dimasukkan ke dalam oven pada temperatur 102-104°C pada selang waktu tertentu hingga diperoleh persentase kandungan air yang diinginkan. Besarnya persentase kandungan air di dalam batubara dihitung dari perbandingan perubahan berat sampel batubara basah sebelum dan sesudah dimasukkan ke dalam oven dengan massa sampel batubara basah yang dipreparasi.

3.4.5 Uji Adsorpsi Tekanan Tinggi Batubara

Langkah-langkah pengujian adsorpsi dapat dilihat pada gambar 3.6 berikut ini:



Gambar 3.6 Diagram Alir Uji Adsorpsi

1. Preparasi *Sampling Cylinder* dan Batubara

- a. Batubara dan *sampling* beserta bautnya ditimbang.
- b. *Glass woll* dimasukkan ke dalam *sampling cylinder*.
- c. *Sampling* yang sudah terisi *glass woll* dan batubara ditimbang.
- d. *Glass woll* dimasukkan ke *sampling cylinder*
- e. *Sampling* dengan bautnya ditutup
- f. *Sampling* dipasang ke konektor

2. Uji Kebocoran

- a. Valve 1 dan 2 dibuka
- b. Gas helium dialirkan ke *dozing* dan *sampling cylinder*.
- c. Uji kebocoran di *sampling cylinder* dengan air
- d. Jika terdapat gelembung, cek dimana letak gelembungnya.
- e. Jika gelembung terdapat di konektor, kencangkan konektornya.
- f. Jika gelembung terdapat di baut, maka buang helium dengan membuka valve 1 dan 2, dan lepas kembali *sampling cylinder*.
- g. Kencangkan baut kembali dengan kunci pas
- h. Jika tidak terdapat gelembung, lakukan tes kebocoran dengan melihat perubahan tekanan di monitor komputer.

- i. Jika perubahan tekanan tidak lebih dari 1 psia, alat uji adsorpsi sudah siap digunakan.

3. Pemanasan Alat dan Pevakuman

- alat uji adsorpsi dipanaskan dengan menyalakan lampu selama 2 jam untuk adsorpsi batubara kering.
- Pipa divakum selama 1 jam.

4. Kalibrasi volume void *sampling cylinder*

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

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

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

- Gas He dialirkan kedalam *dozing cylinder* dengan cara membuka valve V-1. Sementara itu, valve V-2 dalam keadaan tertutup. Valve V-1 ditutup ketika pada tekanan tertentu di *dozing cylinder*. Setelah itu, tekanan *dozing cylinder* awal (P_{di}) dan tekanan awal *sampling cylinder* (P_{si}) dicatat. Dengan data ini, maka jumlah mol He yang terdapat pada *dozing cylinder* dapat diketahui menurut persamaan berikut ini :

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

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

- Gas He dialirkan ke dalam *sampling cylinder* dengan membuka valve-2. Kemudian tekanan (P_{df}) dari *dozing cylinder* dicatat. Dengan data ini, maka kita jumlah mol (n_i) dari gas He yang dimasukkan ke *sampling cylinder* dapat diketahui dengan persamaan :

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

- Temperatur (T_{sf}) dan tekanan akhir *sampling cylinder* (P_{sf}) dicatat setelah 15 menit agar stabil. Void Volume *Sampling Cylinder* dihitung dengan persamaan :

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

- d. Membuka kembali valve 2 untuk menguji *void volume sampling cylinder* dengan tekanan yang lebih tinggi.
- e. Gas He dari *sampling cylinder* dikeluarkan dengan membuka valve 1 dan valve 2.

5. Uji adsorpsi gas CH₄

- a. Gas CH₄ dialirkan ke dalam *dozing cylinder* dengan membuka valve V-1. Setelah terisi, valve V-1 ditutup dan mencatat tekanan awal *dozing cylinder* (P_{di}) dan *sampling cylinder* (P_{si}).
- b. Gas CH₄ dialirkan ke *sampling cylinder* dengan membuka valve V-2 hingga tekanan di *sampling* mencapai kurang lebih 116 psia. Ketika gas CH₄ telah masuk ke dalam *sampling cylinder*, valve V-2 ditutup.
- c. Tekanan akhir dari *sampling cylinder* (P_{sf}) dicatat setelah 15 menit.
- d. Jumlah mol zat yang teradsorpsi dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$n_{CH_4 \text{ teradsorp}} = n_{CH_4,i} - n_{CH_4,tidak \text{ teradsorp}}$$

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

- e. Membuka kembali valve 2 perlahan untuk menaikkan tekanan *sampling cylinder* hingga 216 psia.
 - f. Prosedur e dilakukan untuk tekanan akhir *sampling cylinder* (P_{sf}) sekitar, 316 psia, 416 psia, 516 psia, dan 616 psia, 716 psia, dan 816 psia.
 - g. Mengeluarkan gas metana dengan membuka valve 1 dan 2.
6. **Prosedur 1 dan 2 dilakukan untuk variasi batubara dengan berbagai kandungan air 1%, 3%, 7%, untuk batubara Ombilin dan 3%, 7%, dan 10% untuk batubara Barito.**

3.5 Permodelan

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan model Langmuir untuk batubara kering dan model Langmuir yang dimodifikasi untuk permodelan batubara dengan kandungan air dibawah, diatas dan pada titik kesetimbangannya.

Untuk batubara kering, permodelan menggunakan persamaan 3.7, dengan mengoptimasi nilai b dan n_{maks} untuk mendapatkan nilai %AAD yang minimum. %AAD adalah nilai deviasi absolut rata-rata yang menunjukkan besarnya penyimpangan data sebenarnya dai perobaan terhadap model Langmuir.

$$n = n_{maks} \frac{bP}{1+bP} \quad (3.7)$$

Dimana:

n = jumlah gas teradsorpsi per satuan massa

n_{maks} = jumlah kapasitas adsorpsi maksimum per satuan massa

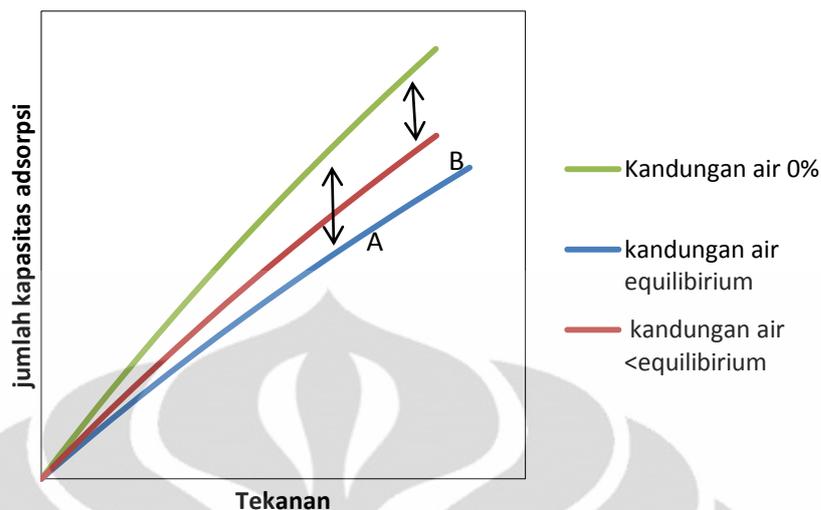
P = tekanan sistem

b = konstanta Langmuir

Selanjutnya, permodelan untuk batubara dengan kandungan air kesetimbangan, serta diatas dan dibawah titik kesetimbangannya, menggunakan model Langmuir yang telah dimodifikasi pada nilai n_{maks} -nya. Jika kapasitas adsorpsi maksimum batubara basah adalah n_{maks}^c , maka n_{maks}^c dapat dituliskan sebagai berikut:

$$n_{maks}^c = n_{maks} \left(1 - A \left(\frac{X}{X_E} \right)^B \right) \quad (3.8)$$

X merupakan kandungan air yang teradsorpsi didalam batubara sedangkan X_E merupakan kandungan air pada titik kesetimbangan. A dan B merupakan konstanta, dan didefinisikan pada Gambar 3.7



Gambar 3. 7 Konstanta A dan B pada Model Langmuir Modifikasi

Permodelan batubara dengan kandungan air pada titik kesetimbangan, serta dibawah dan diatas titik kesetimbangan menggunakan model Langmuir modifikasi dengan mengestimasi nilai A dan B.

3.6 Analisa

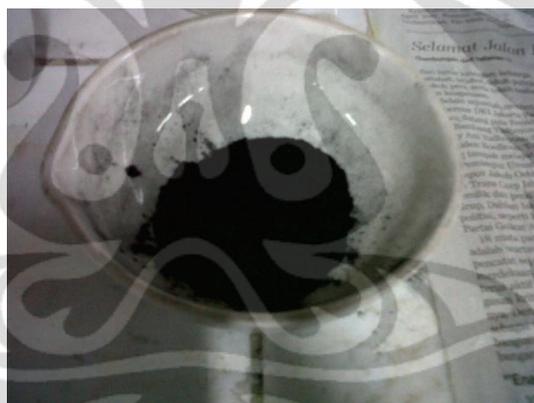
Pada penelitian ini akan dianalisa kapasitas adsorpsi gas metana pada sampel induk batubara dengan berbagai kandungan air pada tekanan antara 116-816 psia. Setelah itu akan dibandingkan dengan data literatur dan akan dibuat pemodelan adsorpsi tekanan tinggi yang sesuai dengan karakterisasi batubara Indonesia

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Preparasi Batubara

Batubara yang digunakan merupakan batubara Barito dan Ombilin yang sudah dihaluskan dengan lumpang dan mortar sebelumnya. Batubara Barito dan Ombilin yang sudah dihaluskan dapat dilihat pada Gambar 4.1. Selanjutnya, kedua jenis batubara tersebut disaring dengan saringan 200 mesh. Hal ini bertujuan untuk memperoleh ukuran sampel batubara yang lebih kecil sehingga memperbesar luas permukaan dan mempermudah proses adsorpsi. Selain itu, Penyaringan diperlukan agar kedua jenis batubara yang diujikan mempunyai ukuran yang sama. Ukuran partikel yang berbeda dapat menyebabkan hasil uji yang berbeda karena adanya kemungkinan luas permukaan yang berbeda.



Gambar 4.1 Batubara Barito Setelah Dihaluskan dan Disaring

4.1.1 Preparasi Batubara Kering

Sampel batubara Barito dan Ombilin yang digunakan merupakan batubara kering yang sebelumnya sudah dihilangkan kadar airnya dengan pemanasan. Namun, untuk menghilangkan sisa-sisa air yang masih terkandung dalam batubara tersebut dan pengotor lainnya, maka dilakukan pemanasan dengan suhu 102-104°C selama kurang lebih 2 jam hingga diperoleh berat yang konstan. Sampel yang dipanaskan masing-masing seberat 36 gram. Setelah pemanasan, terdapat pengurangan berat sekitar 2,1 % untuk batubara Barito dan 3,8% untuk batubara Ombilin. Kemungkinan sampel batubara Ombilin yang digunakan sudah tidak

sepenuhnya kering, tetapi sudah terkontaminasi uap air dari luar akibat tempat penyimpanan yang sering dibuka.

4.1.2 Preparasi Batubara Basah

Proses preparasi berikutnya adalah membuat adsorben batubara dengan kandungan air kesetimbangan. Batubara Barito dan Ombilin sebanyak 36 gram yang telah dikeringkan diletakkan di wadah tertutup yang berisi air dengan kelembaban relatif sekitar 99%. Wadah tertutup berisi air tersebut dipanaskan hingga air didalamnya menguap, lalu didinginkan. Batubara diletakkan didalam wadah tersebut hingga selama kurang lebih 3-4 hari hingga diperoleh berat yang konstan. Kandungan air equilibrium untuk setiap jenis batubara dapat dilihat pada Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4. 1 Persentase Kandungan Air Kesetimbangan Sampel Batubara

Jenis Batubara	Berat Sampel Kering (gr)	Berat Sampel Setelah Preparasi (gr)	% Kandungan Air Kesetimbangan
Ombilin	30	30,92	3,06% ~ 3%
Barito	30	32,09	6,96% ~ 7%

Kandungan air kesetimbangan pada batubara Ombilin berbeda dengan batubara Barito. Batubara Ombilin memiliki kandungan air kesetimbangan sebesar 3%, sedangkan kandungan air kesetimbangan batubara Barito sebesar 7%. Yee (1993) menyebutkan bahwa kandungan air kesetimbangan batubara dipengaruhi oleh *rank*-nya, semakin tinggi *rank*nya maka semakin besar kandungan air kesetimbangannya. Namun Clarkson (1998), Lamberson dan Bustin (1993) menyebutkan bahwa kandungan air kesetimbangan tidak bergantung pada *rank* batubara dan kandungan maceralnya. Hal tersebut sesuai dengan hasil penelitian ini yang mendapatkan bahwa kandungan air kesetimbangan batubara Barito lebih besar dibandingkan dengan batubara Ombilin, walaupun *rank* batubara Barito lebih rendah dibandingkan *rank* batubara Ombilin, seperti pada Tabel 2.5.

Besarnya kandungan air kesetimbangan tergantung dari jumlah kandungan oksigen pada batubara. Semakin tinggi kandungan oksigennya maka semakin besar kandungan air kesetimbangan pada batubara. Pada Tabel 2.5 terlihat bahwa

kandungan oksigen batubara Barito (11,2%) lebih besar dibandingkan batubara Ombilin (9,14%), sehingga kandungan air kesetimbangan batubara Barito lebih besar dibandingkan batubara Ombilin. Hal tersebut disebabkan terjadi ikatan yang kuat antara air yang bersifat polar dengan struktur permukaan oksigen yang kompleks (Crosdale & Moore, 2008).

Untuk mendapatkan batubara dengan kandungan air dibawah titik kesetimbangannya, maka dilakukan pemanasan pada suhu 102-104°C, sedangkan untuk mendapatkan batubara dengan kandungan air diatas titik kesetimbangannya dilakukan penyemprotan air hingga diperoleh berat yang konstan (Crosdale & Moore, 2008).

Pemanasan untuk mengurangi kandungan air dilakukan sekitar 20-30 menit tergantung dari jumlah kandungan air yang akan dihilangkan. Kandungan air pada batubara dibedakan menjadi dua, yaitu air yang terikat pada batubara dan air bebas (Pan et al, 2010). Air yang terikat pada batubara teradsorpsi didalam pori batubara. Pemanasan untuk menghilangkan kandungan air tersebut lebih lama dan sulit dibandingkan dengan menghilangkan kandungan air yang tidak terikat. Hal ini disebabkan adanya gaya adhesi antara air terikat dan partikel batubara, sehingga air terikat akan memerlukan energi lebih besar untuk mengalami penguapan.

Penyemprotan dengan air untuk mendapat batubara diatas titik kesetimbangan dilakukan dengan perlahan-lahan dan tidak terlalu banyak menggunakan air. Pemberian air harus hati-hati agar air yang ditambahkan tidak berlebih dan merata keseluruh bagian batubara. Air pada batubara ini merupakan *free water* yang tidak terikat pada pori batubara. Kandungan air dibawah dan diatas titik equilibrium untuk setiap jenis batubara dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Persentase Kandungan Air dibawah dan diatas Titik Kesetimbangan

Berat	Jenis Batubara	
	Barito	Ombilin
Sampel Kesetimbangan	10 gr	10 gr
Sampel Setelah pemanasan	9,69 gr	9,89 gr
% Kandungan air (dibawah Kesetimbangan)	3,1 %	1,1 %
Sampel Kesetimbangan	10 gr	10 gr
Sampel Setelah Penyemprotan Air	11,02 gr	10,72 gr
% Kandunga air (diatas Kesetimbangan)	10,2 %	7,2 %

4.1.3 Massa Batubara Untuk Uji Adsorpsi

Setelah mendapatkan batubara Ombilin dan Barito dengan berbagai kandungan air, secepat mungkin harus segera dimasukkan kedalam *sampling cylinder*. Hal ini di sebabkan agar tidak terjadi pengurangan kandungan air yang signifikan pada batubara akibat perubahan kelembaban relatif antara wadah dengan ruangan.

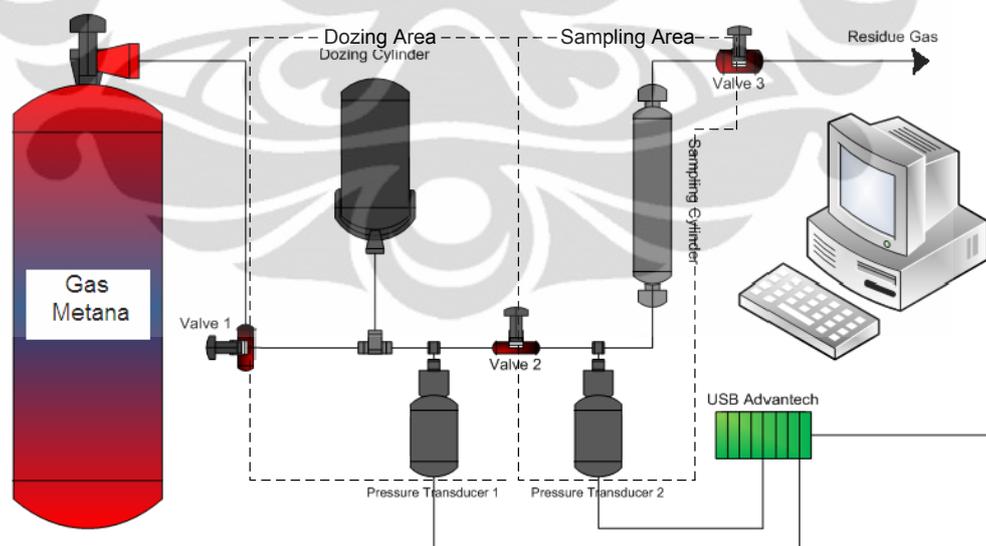
Massa batubara yang dimasukkan kedalam *sampling cylinder* akan menjadi basis massa dalam perhitungan kapasitas adsorpsi CH₄ pada batubara. Kapasitas Adsorpsi dinyatakan sebagai banyaknya mol CH₄ yang teradsorpsi per gram batubara, sehingga kapasitas dari adsorpsi ini dapat dibandingkan dengan baik. Basis massa ini penting karena akan mempengaruhi hasil uji adsorpsi yang menggunakan basis mol per gram batubara. Tabel 4.3 merupakan massa aktual yang dimasukkan kedalam *sampling cylinder*.

Tabel 4. 3 Tabulasi Massa Batubara Aktual pada Sampling Cylinder

Sampel	Massa Sampling Cylinder + Glass woll (gr)	Massa Sampling Cylinder + batubara + Glass woll (gr)	Massa aktual (gr)
Ombilin			
0%	103,36	105,33	1,97
1%	121,21	123,25	2,04
3%	103,56	105,6	1,99
7%	121,2	123,24	2,04
Barito			
0%	121,57	123,56	1,99
3%	121,18	123,24	2,06
7%	121,31	123,37	2,06
10%	121,34	123,40	2,01

4.2 Hasil Preparasi Peralatan Uji Adsorpsi

Dalam pengujian adsorpsi pada penelitian ini, Alat adsorpsi terangkai seperti Gambar 4.2.

**Gambar 4.2** Pembagian Daerah Alat Uji Adsorpsi

Alat uji ini terletak didalam boks kayu dengan penutup yang terbuat dari kaca sehingga temperatur pada saat pengujian dapat terjaga dengan cukup baik. Namun seringkali temperatur tidak stabil dan melebihi suhu 26°C atau kurang dari

25°C. Hal tersebut diantisipasi dengan mengatur suhu Air Conditioner (AC) didalam laboratorium dan menggunakan kipas angin jika suhu terlalu tinggi. Indikator temperatur pada alat uji adsorpsi tersebut menggunakan termokopel yang terletak diantara dozing dan sampling.

Indikator tekanan pada alat ini menggunakan *pressure transducer Omegadyne* dengan rentang tekanan optimum mulai dari 0-1000 psi. Prolessara (2010) telah mengkalibrasi *pressure transducer Omegadyne* dengan alat Duck DPI milik Departemen Teknik Mesin FTUI sehingga didapatkan suatu persamaan kalibrasi :

$$P_{dozing} = 34,22 \times \text{Voltase Pressure Transducer} + 61,33$$

$$P_{sampling} = 33,38 \times \text{Voltase Pressure Transducer} + 16,05$$

Volume *Dozing cylinder* yang digunakan pada alat uji yang digunakan kira-kira dua kali lebih besar dari volume *sampling cylinder*, hal ini dimaksudkan agar perubahan tekanan pada area dozing setelah injeksi tidak terlalu kecil atau terlalu besar. Bila perubahan terlalu kecil, maka kesalahan pembacaan tekanan yang kecil menghasilkan error yang besar sehingga akurasi hasil uji rendah, sedangkan bila terlalu besar, maka dibutuhkan tekanan awal area dozing yang jauh lebih tinggi untuk injeksi ke *Sampling Cylinder* (Prolessara, 2010)

Volume area *dozing cylinder* diukur menggunakan air yang dimasukkan, sehingga didapatkan volume area dozing sebesar 23 ml (Prolessara, 2010). Volume ini akan dipergunakan untuk menghitung jumlah *excess adsorption (Adsorpsi Gibbs)* yang diukur dengan metode volumetrik.

Sebelum alat uji dipakai, perlu dilakukan pemanasan dan pemvakuman terutama untuk uji adsorpsi batubara kering. Hal tersebut dilakukan agar tidak ada air dan sisa gas yang terdapat pada alat uji terutama pada area dozing, sampling dan pipa-pipa konektor. Sumber panas berasal dari 3 buah lampu 100 watt yang terdapat pada alat uji tersebut. Untuk batubara basah, pemanasan tidak dilakukan untuk menghindari menguapnya kandungan air yang terdapat pada batubara. Namun, pemvakuman tetap dilakukan dengan menutup *valve 2*, sehingga keadaan *sampling cylinder* tempat batubara yang akan diuji tidak berubah kondisinya dan tidak merubah kondisi batubara yang akan diuji.

4.3 Hasil Uji Kebocoran

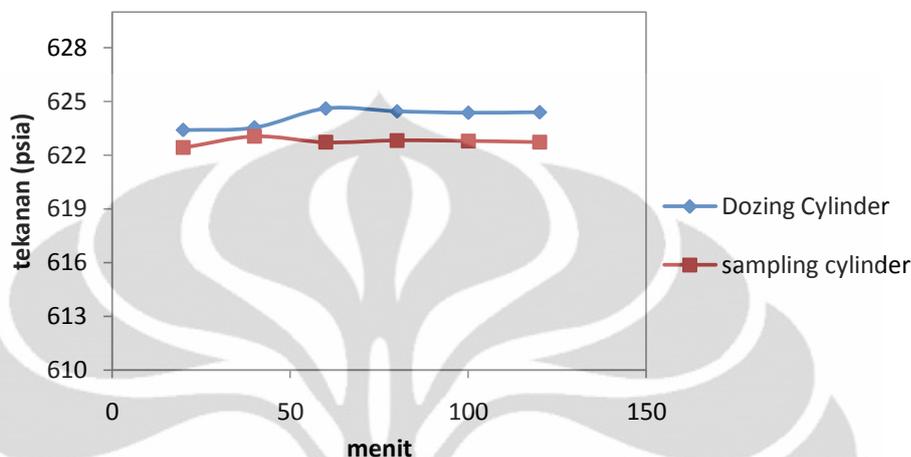
Uji kebocoran harus dilakukan terlebih dahulu sebelum melakukan uji adsorpsi pada batubara. Uji kebocoran sangat penting dilakukan untuk memastikan bahwa tidak ada massa gas yang keluar dari alat uji adsorpsi. Apabila kebocoran terjadi maka akan mempengaruhi hasil perhitungan kapasitas adsorpsi yang menggunakan metode volumetrik. Selain itu, uji kebocoran juga dilakukan untuk menghindari bahaya yang mungkin terjadi di sekitar peneliti dan orang-orang yang berada di laboratorium, karena pada adsorpsi ini menggunakan gas bertekanan tinggi dan mudah terbakar yaitu metana.

Uji kebocoran dilakukan sebelum pengambilan data pada masing-masing batubara dengan kandungan air yang berbeda-beda. Uji dilakukan dengan 3 cara yaitu:

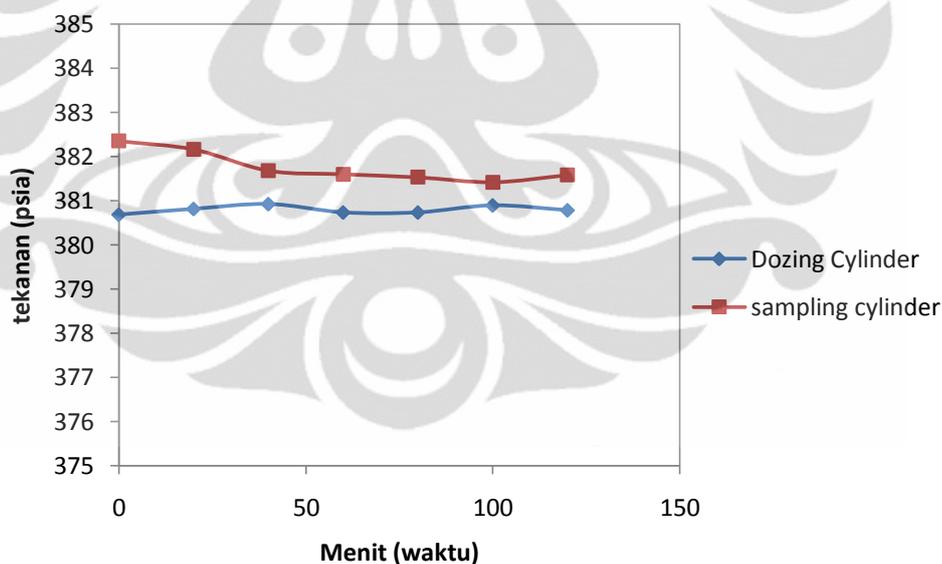
- Menguji kebocoran pada *sampling cylinder* dengan memasukkan sampling kedalam wadah persegi panjang yang berisi penuh air. Apabila terjadi kebocoran maka akan timbul gelembung-gelembung air disekitar baut dan konektor. Apabila kebocoran terjadi pada baut *sampling cylinder*, maka alat harus dibongkar dan dikencangkan ulang. Jika kebocoran terjadi disekitar konektor, maka tidak perlu membongkar sampling cylinder, hanya perlu mengencangkan konektornya saja dengan kunci pas.
- Menguji kebocoran pada pipa konektor, sambungan alat dan valve dengan gelembung sabun. Jika terjadi kebocoran, gelembung sabun akan bergerak atau terjadi bubble sehingga daerah yang bocor akan terlihat dan dapat diatasi dengan mudah.
- Melihat kebocoran dengan melihat trend pembacaan tekanan pada alat data acquisition. Jika terjadi kebocoran tekanan cenderung terus menurun.

Apabila sudah tidak ada gelembung yang terjadi, baik di *sampling cylinder* dan pipa-pipa konektor, maka selanjutnya adalah melakukan uji dengan melihat tekanan pada komputer. Uji kebocoran dilakukan selama sekitar 2 jam. Jika dalam selang waktu tersebut tidak terjadi perubahan tekanan pada *sampling* dan *dozing cylinder* > 1 psia, maka alat uji adsorpsi siap digunakan untuk prosedur

selanjutnya. Perubahan tekanan sebesar 1 psia tersebut dapat mempengaruhi hasil uji adsorpsi sebesar 3%. Grafik uji kebocoran pada batubara Ombilin dan Barito kering dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.



Gambar 4. 3 Hasil Uji Kebocoran pada Batubara Ombilin kering



Gambar 4. 4 Hasil Uji Kebocoran pada Batubara Ombilin kering

Berdasarkan Gambar 4.3 dan Gambar 4.4, tekanan *sampling cylinder* cenderung stabil dan konstan. Walaupun ada sedikit penurunan tetapi hal tersebut masih dapat ditoleransi. Hal tersebut mengindikasikan bahwa tidak terjadi kebocoran pada *sampling cylinder*. Pada Gambar 4.3, tekanan pada *dozing cylinder* menunjukkan adanya peningkatan. Hal tersebut menunjukkan bahwa

perubahan tekanan yang terjadi juga dipengaruhi oleh suhu ruang dan stabilitas listrik yang diterima *pressure transducer*, oleh karena itu pada grafik terlihat sedikit deviasi. Namun, hal tersebut masih dapat ditoleransi jika deviasinya kecil.

Dari hasil Uji kebocoran, perubahan tekanan yang terjadi kurang lebih sekitar 1 Psia. Hal tersebut menunjukkan bahwa alat uji adsorpsi tersebut tidak bocor dan siap digunakan untuk proses uji adsorpsi. Uji kebocoran dilakukan sebanyak 8 kali sesuai jumlah sampel batubara dan hasilnya dapat dilihat pada lampiran 1.

4.4 Hasil pengukuran Volume Void Area Sampling

Pengukuran volume void hanya dilakukan untuk *sampling cylinder* saja, karena pengukuran volume void *dozing Cylinder* sudah dilakukan sebelumnya oleh Prolesara pada tahun 2009. Pengukuran volume dozing dilakukan dengan cara memasukkan air ke *dozing cylinder* hingga penuh. Setelah penuh, air dari *dozing cylinder* dimasukkan ke dalam gelas ukur untuk mengetahui volume total yang masuk ke *dozing cylinder*. Volume total *dozing cylinder* yang didapat adalah 23 ml (Prolessara, 2010).

Volume void pada area *sampling cylinder* pada saat diisi adsorben perlu diketahui dengan cara mengalirkan gas Helium ke dalam *sampling cylinder*, dengan perhitungan sebagai berikut:

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

dengan

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

Dimana n_i = Jumlah mol gas He yang diinjeksikan ke *sampling cylinder* (mol)

i = keadaan awal *dozing cylinder*

f = keadaan akhir *dozing cylinder*

sf = keadaan akhir *sampling cylinder*

T = temperatur (°R)

P = tekanan (psi)

Z_{He} = kompresibilitas gas He

R = 669,954 (psi cm³)/(mol.°R)

Berapapun tekanan yang diberikan, perhitungan volume *void* harus menghasilkan nilai yang sama atau memiliki deviasi yang sangat kecil pada setiap perhitungan volume *void* diberbagai tekanan. Namun, perlu dilakukan pemvariasian tekanan untuk memastikan volume void yang terhitung, sehingga tidak ada kesalahan perhitungan volumetrik pada saat pengujian adsorpsi tekanan tinggi.

Gas inert yang digunakan dalam pengukuran volume *void* pada penelitian ini adalah gas helium. Menurut Mayor, *et al* (1990) Helium dapat memberikan hasil yang sangat presisi untuk pengukuran volume *void*, karena diameter molekul yang kecil dan tidak adanya reaksi dengan karbon. Oleh karena itu, Helium sangat cocok digunakan untuk pengukuran volume *void* walaupun harganya lebih mahal dibandingkan dengan gas inert lain seperti nitrogen. Hal tersebut dikarenakan helium memiliki diameter yang lebih kecil dibandingkan dengan nitrogen, seperti yang tertera pada Tabel 4.4. Selain itu, nitrogen juga memiliki kemungkinan teradsorpsi pada pori-pori permukaan CNT (Yim, *et al*, 1999), yang dapat menyebabkan hasil perhitungan pengukuran volume *void* dengan nitrogen kurang akurat.

Tabel 4. 4 Diameter Molekul Gas Penguji Volume Void

Gas Murni	Formula	Diameter Molekul (nm)
Helium	He	0,186
Nitrogen	N ₂	0,3 – 0,41
Karbon dioksida	CO ₂	0,51 – 0,35

Tabel berikut ini menunjukkan hasil kalibrasi atau uji Helium Volume *Void* pada area *sampling cylinder* untuk batubara Ombilin dan Barito dengan berbagai kandungan air. Tabel perhitungan yang lebih terperinci dari masing-masing sampel dicantumkan pada lampiran 2.

Tabel 4. 5 Tabulasi Hasil Uji Volume Void Menggunakan Gas Helium

Batubara		Ombilin				Barito			
Kandungan Air		0%	1%	3%	7%	0%	3%	7%	10%
Massa (gram)		1,97	2,04	1,99	2,04	1,99	2,06	2,06	2,01
Percobaan	1	13,17	13,11	12,9	13,11	13,2	13,09	13,79	13,27
	2	13,67	13,4	13,29	13,42	13,5	13,4	13,97	13,79
	3	13,84	13,62	13,57	13,62	13,65	13,59	14,01	13,91
	4	-	-	-	-	13,8	13,8	14,04	14,06
Rata-Rata		13,54	13,38	13,25	13,38	13,54	13,47	13,95	13,76
Deviasi		0,29	0,26	0,33	0,26	0,26	0,30	0,11	0,35

Besarnya volume *void* berhubungan erat dengan bentuk dan distribusi pori-pori batubara tersebut. Pada Tabel 4.5 diatas, terlihat bahwa perbedaan volume *void* masing-masing sampel, baik antara batubara Ombilin dengan batubara Barito, tidak berbeda jauh. Hal tersebut kemungkinan disebabkan bentuk dan pori-pori antara batubara Ombilin dan batubara Barito yang tidak berbeda jauh karakteristiknya. Hal tersebut juga bisa dibuktikan dengan hasil uji adsorpsi batubara Barito dan Ombilin kering yang tidak berbeda jauh. Perbedaan Volume *void* pada Tabel 4.5 diatas, dipengaruhi oleh massa *glass woll* dan massa batubara yang dimasukkan ke dalam *sampling cylinder*. Oleh karena itu, sulit untuk mengetahui pengaruh kandungan air pada batubara terhadap volume *void sampling cylinder*.

Pada tabel 4.5 terdapat nilai *error* volume *void* masing-masing sampel batubara Ombilin dan Barito. Deviasi 0,35ml dari volume *void* akan mempengaruhi deviasi pengukuran adsorpsi sekitar 4%.

4.5 Hasil Uji Kapasitas Adsorpsi Tekanan Tinggi Batubara

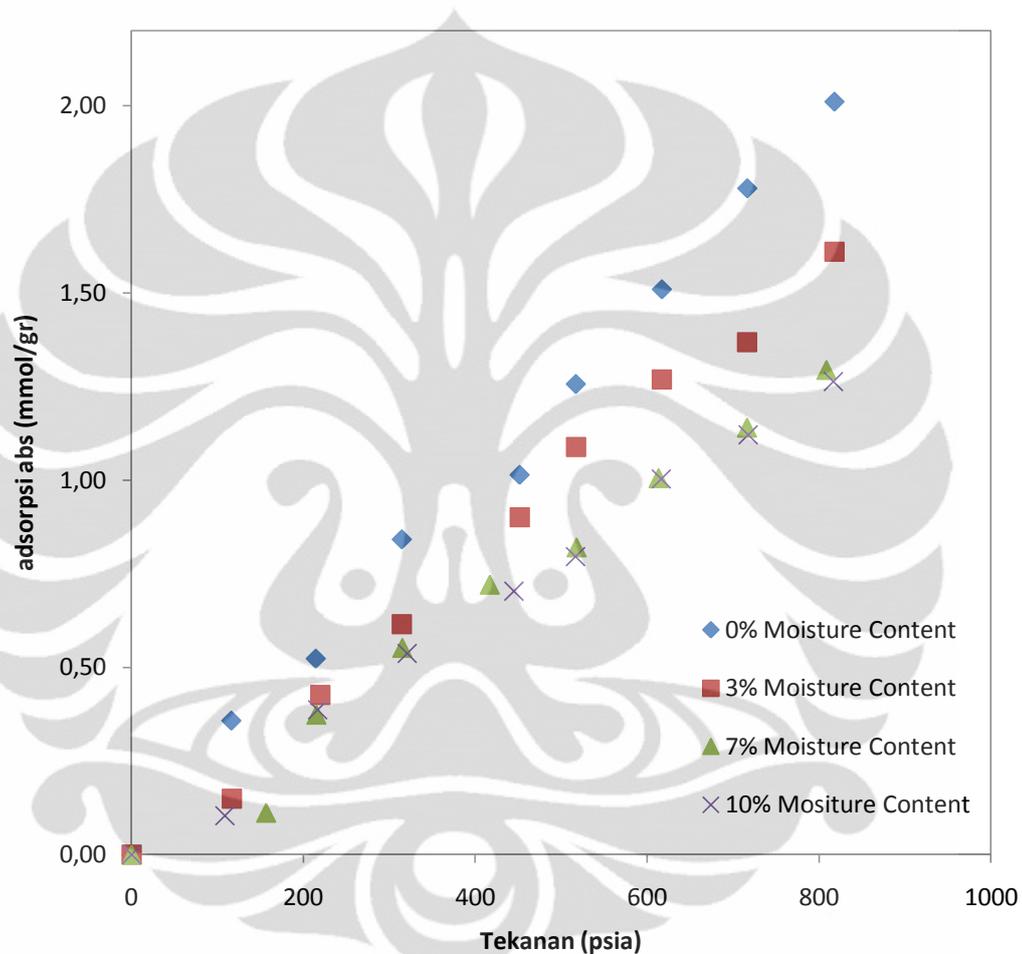
Salah satu tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh kandungan air terhadap kapasitas adsorpsi gas metana pada batubara Indonesia. Dari hasil penelitian dan pengolahan data yang dilakukan dapat dilihat kapasitas adsorpsi batubara Ombilin dan Barito kering serta kapasitas adsorpsi batubara dengan kandungan air kesetimbangan, diatas serta dibawah titik kesetimbangannya.

Adsorpsi yang terjadi pada penelitian ini merupakan adsorpsi fisik, dimana tidak ada reaksi kimia yang terjadi selama proses uji adsorpsi berlangsung. Proses adsorpsi fisik ini hanya dipengaruhi oleh sifat fisik gas Metana sebagai adsorbat dan karakteristik adsorben, yaitu batubara Barito dan batubara Ombilin. Karakteristik adsorben yang dimaksud antara lain, jumlah pori-pori, kadar karbon, kandungan air, dan lain-lain.

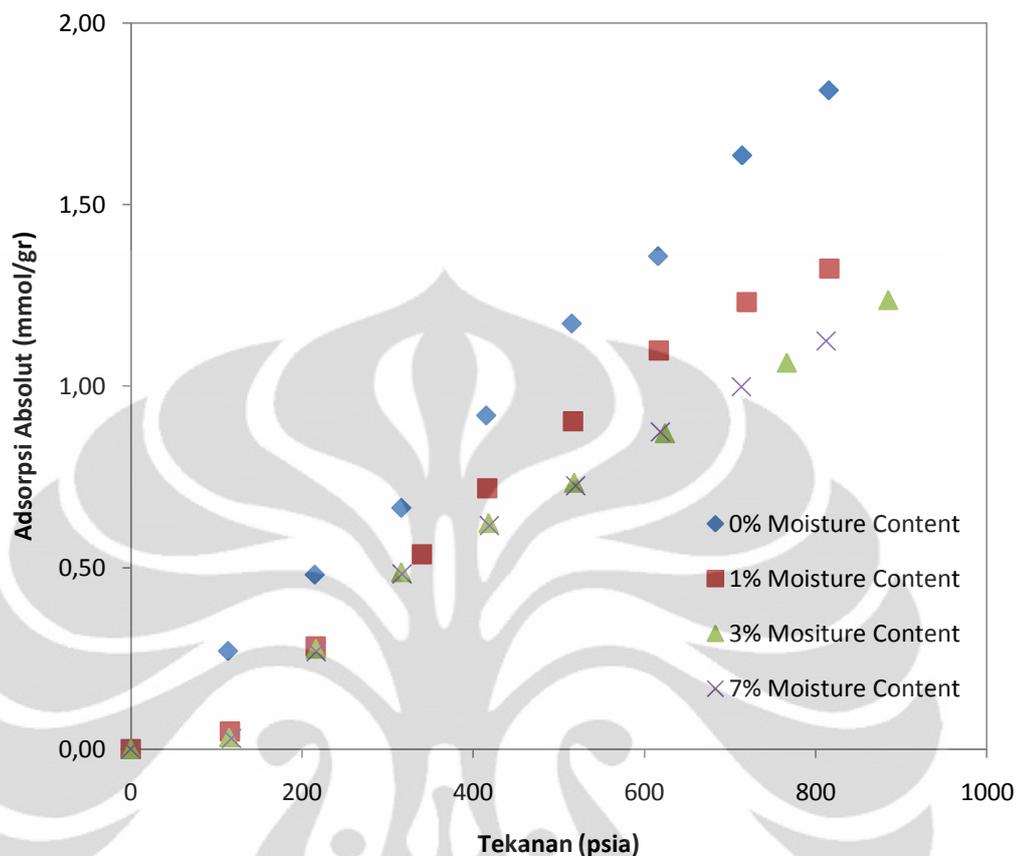
Penelitian ini dilakukan pada temperatur *isothermal*, sehingga temperatur operasi harus dijaga konstan pada suhu 25°C, dengan variasi tekanan dari 116 psia hingga 816 psia. Sampel yang diujikan yaitu batubara Barito dengan kandungan air 0%, 3%, 7% dan 10% serta batubara Ombilin dengan kandungan air 0%, 1%, 3%, dan 7%.

4.5.1 Pengaruh Kandungan Air Terhadap Adsorpsi Tekanan Tinggi Metana pada Batubara Ombilin dan Barito

Gambar 4.5 dan 4.6 merupakan grafik hasil uji adsorpsi batubara Barito dan batubara Ombilin dengan berbagai kandungan air.



Gambar 4. 5 Perbandingan kapasitas Adsorpsi CH₄ pada Batubara Barito dengan Berbagai Kandungan Air



Gambar 4. 6 Perbandingan kapasitas Adsorpsi CH_4 pada Batubara Ombilin dengan Berbagai Kandungan Air

Pada Gambar 4.5 dan 4.6, terlihat bahwa kapasitas adsorpsi gas metana pada batubara Ombilin dan Barito meningkat seiring dengan bertambahnya tekanan. Hal ini disebabkan, peningkatan tekanan akan mengakibatkan pergerakan molekul adsorbat yaitu gas metana 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 sehingga kapasitas adsorpsinya pun meningkat seiring dengan kenaikan tekanan.

Berdasarkan Gambar 4.5, kapasitas adsorpsi metana pada batubara Barito kering lebih besar 20,96% dibandingkan dengan batubara Barito dengan kandungan air 3%, dan terjadi penurunan kapasitas adsorpsi sebesar 18,3% dengan peningkatan kandungan air sebesar 4%. Pada kandungan air kesetimbangan yaitu pada kandungan air 7%, terjadi penurunan kapasitas adsorpsi sebesar 35,45% dibandingkan dengan batubara Barito kering. Untuk batubara

Barito dengan kandungan air diatas titik kesetimbangannya yaitu kandungan air 10%, tidak terjadi penurunan kapasitas adsorpsi yang signifikan.

Untuk batubara Ombilin, berdasarkan Gambar 4.6, kapasitas adsorpsi metana pada batubara Ombilin kering lebih besar 27% dibandingkan dengan batubara Ombilin dengan kandungan air 1%. Peningkatan kandungan air hingga 3% yaitu pada kandungan air kesetimbangan menurunkan kapasitas adsorpsi sebesar 14,1% dibandingkan dengan kapasitas adsorpsi batubara Ombilin dengan kandungan air 1% dan terjadi penurunan kapasitas adsorpsi sebesar 37,3% dibandingkan dengan kapasitas adsorpsi batubara Ombilin kering. Peningkatan kandungan air diatas titik equilibirumnya, yaitu 7% untuk batubara Ombilin, tidak mempengaruhi kapasitas adsorpsi secara signifikan. Penurunan kapasitas adsorpsi batubara Ombilin dan Barito basah tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.6

Tabel 4. 6 % Penurunan Kapasitas Adsorpsi terhadap Batubara kering

Jenis Batubara & % Kandungan Air	% Penurunan Kapasitas Adsorpsi Pada Tekanan 800 psia Terhadap Batubara Kering
Barito	
3 %	20,96 %
7 %	35,45 %
10%	37,3 %
Ombilin	
1%	26,9 %
3%	37,76 %
7%	37,77 %

Kecenderungan penurunan kapasitas adsorpsi batubara dengan kandungan air tersebut juga pernah diindikasikan oleh Zhejun dkk pada batubara Australia pada tahun 2010. Kandungan air 3,3% dan 8,5% pada batubara Australia dapat mengurangi kapasitas adsorpsi sebesar 30% dan 67% dibandingkan dengan batubara kering Australia.

Peningkatan kandungan air diatas titik kesetimbangannya yaitu 7% untuk batubara Ombilin dan 10% untuk batubara Barito, tidak mempengaruhi kapasitas adsorpsi secara signifikan. Kecenderungan tersebut juga pernah diindikasikan

dengan hasil percobaan yang dilakukan Zhou dkk pada batubara Fruitland pada tahun 1994 dan percobaan yang dilakukan oleh Crosdale pada batubara Australia pada tahun 2008.

Penurunan kapasitas adsorpsi batubara basah dibandingkan dengan batubara kering disebabkan adanya molekul-molekul air yang juga mengisi pori-pori batubara sehingga adsorbat gas metana sulit teradsorpsi batubara. 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). Semakin banyak air yang mengisi pori-pori batubara, semakin sedikit luas permukaan kontak antara gas metana dan adsorben.

Air yang mengisi pori-pori batubara memiliki diameter molekul yang lebih kecil dibandingkan dengan metana. Molekul air memiliki diameter $< 3 \text{ \AA}$ lebih kecil dibandingkan molekul gas metana dengan diameter $> 3 \text{ \AA}$ (Yang, 1997). Oleh karena itu, air lebih mudah masuk ke dalam mikropori batubara sehingga lebih mudah teradsorpsi dibandingkan dengan metana. Selain itu, air pada batubara menutup jalan masuk bagi adsorbat ke dalam sistem mikropori (Laxminarayana & Crosdale, 1999; Yee, 1993). Akses bagi adsorbat untuk masuk ke dalam mikropori merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi daya adsorpsi, karena sebagian besar proses adsorpsi berlangsung pada sistem mikropori (Ding & Bhatia, 2003).

Selain itu, air juga bersifat polar sehingga lebih mudah terikat pada batubara dibandingkan dengan metana yang bersifat non-polar. Hal tersebut disebabkan adsorpsi yang terjadi merupakan adsorpsi fisik sehingga adsorpsi terjadi karena adanya ikatan-ikatan antara adsorbat dan adsorben baik berupa gaya london, gaya Van Der Waals, dan lain-lain. Hal tersebut menyebabkan air yang bersifat polar memiliki ikatan yang lebih kuat dengan adsorbat dibandingkan dengan metana. Molekul-molekul air yang bersifat polar akan menempel pada pori-pori batubara yang memiliki kandungan yang bersifat polar seperti gugus hidroksil (Day, 2008).

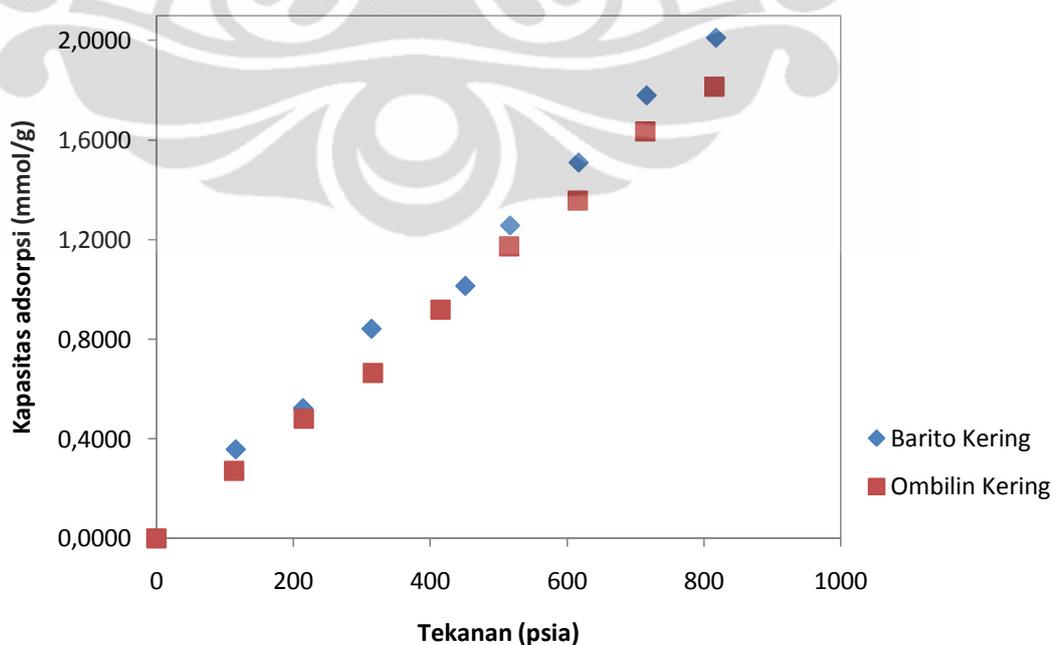
Kandungan air kesetimbangan merupakan kapasitas maksimum air yang dapat teradsorpsi pada batubara (Bustin dan Clarkson, 1998). Kandungan air pada

batubara diatas titik kesetimbangannya tidak memiliki efek yang signifikan terhadap kapasitas adsorpsi. Hal ini disebabkan sudah tidak ada lagi tempat memungkinkan pada pori-pori batubara yang tersedia untuk air teradsorpsi. Kandungan air diatas titik kesetimbangannya tergolong sebagai air bebas pada cleat system yang mempengaruhi laju alir gas pada proses produksi CBM.

Kandungan air pada batubara, baik kandungan air yang terikat ataupun air bebas mempengaruhi *coal swelling* atau pembengkakan batubara. Semakin banyak air yang terkandung pada batubara, semakin besar tingkat *swelling*-nya sehingga memperbesar laju produksi gas. Semakin sedikit air yang terkandung pada batubara, kapasitas adsorpsi gas semakin besar tetapi mengurangi jumlah gas yang dapat diproduksi (Pan et al, 2010)

4.5.2 Pengaruh Jenis Batubara Terhadap kapasitas Adsorpsi Tekanan Tinggi Gas Metana

Jenis batubara juga mempengaruhi kapasitas adsorpsi gas metana. Hal tersebut dapat dilihat dari kapasitas adsorpsi batubara Barito kering dan batubara Ombilin kering yang berbeda, walaupun perbedaannya tidak terlalu jauh. Gambar 4.7 merupakan grafik perbandingan batubara Ombilin kering dan Barito kering.



Gambar 4. 7 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Batubara Ombilin dan Barito

Berdasarkan Gambar 4.7, terdapat sedikit perbedaan kapasitas adsorpsi antara batubara Ombilin dan Barito. Kapasitas adsorpsi batubara Barito lebih besar 9,5% dibandingkan dengan batubara Ombilin. Perbedaan tersebut disebabkan jumlah mikropori batubara Barito yang sedikit lebih banyak dibandingkan dengan batubara Ombilin. Namun pada penelitian ini, belum bisa dibuktikan bahwa batubara Barito mempunyai distribusi permukaan mikropori yang lebih baik sehingga menyebabkan kapasitas adsorpsinya lebih tinggi, namun hal tersebut dapat diindikasikan dari besarnya kandungan air kesetimbangan pada batubara Barito yang lebih besar daripada batubara Ombilin.

Sampai saat ini, masih terjadi perdebatan mengenai pengaruh komposisi batubara terhadap kapasitas adsorpsi. Levine dkk pada tahun 1993 menyebutkan bahwa kapasitas adsorpsi gas pada batubara meningkat seiring dengan peningkatan *rank* batubara. Namun, menurut Clarkson dan Bustin (1996) peningkatan *rank* batubara tidak berlaku secara umum pada kapasitas adsorpsi gas.

Tabel 2.5 menunjukkan bahwa batubara Ombilin dan Barito merupakan batubara dengan kategori *rank* Bituminous. Namun, kandungan karbon batubara Ombilin sebesar 46,73 % lebih besar dibandingkan pada batubara Barito dengan kandungan karbon sebesar 39,50 %. Hal tersebut menunjukkan bahwa walaupun sama-sama tergolong dari *rank* Bituminous, batubara Ombilin memiliki *rank* yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan batubara Barito berdasarkan kandungan karbonnya.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi batubara Barito dengan *rank* yang lebih rendah dari batubara Ombilin, ternyata memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih besar 9,5% dibandingkan dengan batubara Ombilin. Hal tersebut mengindikasikan bahwa kapasitas adsorpsi batubara secara umum tidak bergantung dari *rank* dan komposisi batubara, melainkan dari perkembangan struktur mikropori pada batubara tersebut (Crosdale, 1998).

4.6 Representasi Data Adsorpsi Dengan Permodelan Langmuir

Pada masing-masing grafik data adsorpsi metana pada batubara Ombilin dan barito dibuat plot berdasarkan persamaan isoterm adsorpsi Langmuir yang dimodifikasi. Model Langmuir dipilih karena persamaannya masih tergolong sederhana dan data adsorpsi yang didapat pada penelitian ini menunjukkan pula kurva adsorpsi gas Metana pada batubara berpola kurva adsorpsi isoterm tipe I sehingga diasumsikan membentuk lapisan monolayer.

Pada permodelan Langmuir, digunakan parameter berupa kapasitas adsorpsi maksimum atau n_{maks} (q_s) dan konstanta Langmuir (b). Parameter-parameter tersebut dipengaruhi oleh tekanan, temperatur, jenis adsorbat dan jenis adsorben. Persamaan model Langmuir yang digunakan terdapat pada persamaan 2.7, 2.8, dan 2.9.

$$n = n_{maks} \frac{bP}{1+bP} \quad (2.7)$$

dengan

$$b = b_0 e^{\left(\frac{-\Delta H_0}{RT}\right)} = b_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.8)$$

dan

$$b_0 = \frac{\alpha}{k_{d\infty} \sqrt{2\pi MRT}} \quad (2.9)$$

Jumlah kapasitas adsorpsi maksimum (mmol/gr) berbanding lurus dengan tekanan, sehingga semakin besar tekanan maka nilai kapasitas adsorpsi maksimum akan terus meningkat seiring dengan kenaikan tekanan. Jumlah kapasitas adsorpsi maksimum (n_{maks}) dipengaruhi oleh karakteristik adsorben yaitu ukuran pori, jumlah pori atau luas permukaan, distribusi jumlah pori pada suatu adsorben dan temperatur operasi. Pada persamaan 2.8, n_{maks} berbanding terbalik dengan temperatur. Temperatur yang tinggi akan menurunkan nilai kalor adsorpsi, sehingga akan menurunkan nilai kapasitas adsorpsi.

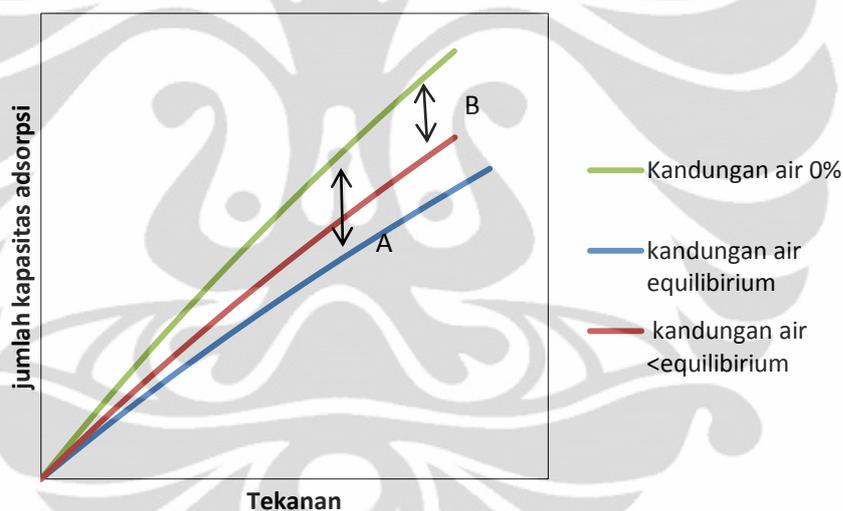
Konstanta Langmuir (b) menunjukkan seberapa kuat energi interaksi antara molekul gas dengan permukaan adsorben. Konstanta b dipengaruhi oleh temperatur. Pada persamaan 2.8, konstanta b berbanding terbalik dengan temperatur, sehingga semakin tinggi temperatur maka akan menurunkan energi interaksi antara molekul gas dengan permukaan adsorben. peningkatan temperatur

akan menyebabkan difusivitas molekul adsorbat ke permukaan adsorben menjadi lebih rendah, sehingga nilai konstanta b akan menurun (Hasan, 2009).

Untuk permodelan kapasitas adsorpsi batubara basah, digunakan persamaan Langmuir modifikasi dimana nilai n_{maks} dikembangkan sehingga nilai tersebut tergantung dari jumlah kandungan air yang teradsorpsi. Jika kapasitas adsorpsi maksimum batubara basah adalah n_{max}^c , maka n_{max}^c dapat dituliskan sebagai berikut:

$$n_{max}^c = n_{maks} \left(1 - A \left(\frac{X}{X_E} \right)^B \right)$$

X merupakan kandungan air yang teradsorpsi didalam batubara sedangkan X_E merupakan kandungan air pada titik kesetimbangan. A dan B merupakan konstanta, dan didefinisikan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Konstanta A dan B pada model Langmuir Modifikasi

Permodelan batubara dengan kandungan air pada titik kesetimbangan, serta dibawah dan diatas titik kesetimbangan menggunakan model Langmuir modifikasi dengan mengestimasi nilai A dan B . Nilai A ditentukan terlebih dahulu untuk permodelan kapasitas adsorpsi batubara dengan kandungan air kesetimbangan, dan setelah itu nilai B diestimasi untuk memodelkan kapasitas adsorpsi batubara dengan kandungan air dibawah titik kesetimbangan.

Pada batubara kering, X bernilai 0 sehingga Q_c akan bernilai 0 dan $n_{max}^c = n_{maks}$. Pada batubara dengan kandungan air kesetimbangan, X akan bernilai sama dengan X_E sehingga $Q_c =$ konstanta A . Untuk batubara diatas titik

kesetimbangannya, nilai X diasumsikan sebagai kandungan air kesetimbangan. Tabel 4.7 merupakan data representasi percobaan dan kesesuaiannya dengan isoterm Langmuir dan modifikasi langmuir. Nilai %AAD (*Absolute Average Deviation*) menggambarkan deviasi yang terjadi antara nilai pada permodelan dan nilai pada eksperimen.

Tabel 4. 7 Model Persamaan Isotermis Langmuir

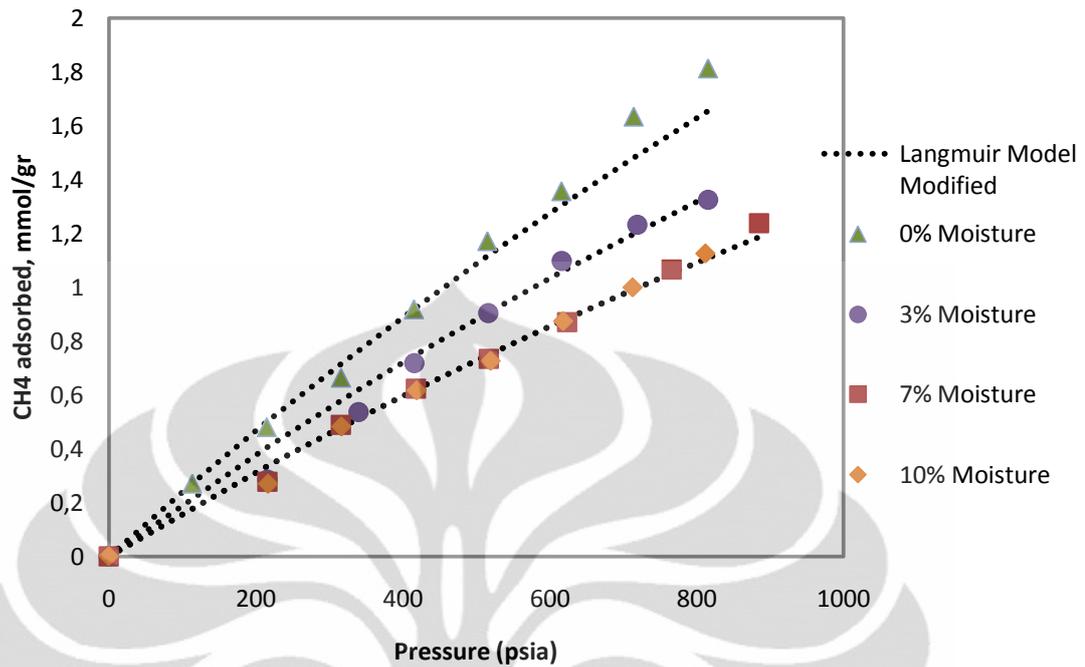
Adsorben	Parameter Langmuir		%AAD
	n_{maks}	b	
Ombilin Kering	9,74	0,000251	4,29
Barito Kering	10,79	0,000262	4,72

Setelah mengoptimasi nilai b dan n_{maks} , nilai n_{max}^c akan didapat dan selanjutnya adalah mengestimasi nilai konstanta A dan B. Tabel 4.8 berikut merupakan data representasi model Langmuir modifikasi untuk batubara Barito dan batubara Ombilin.

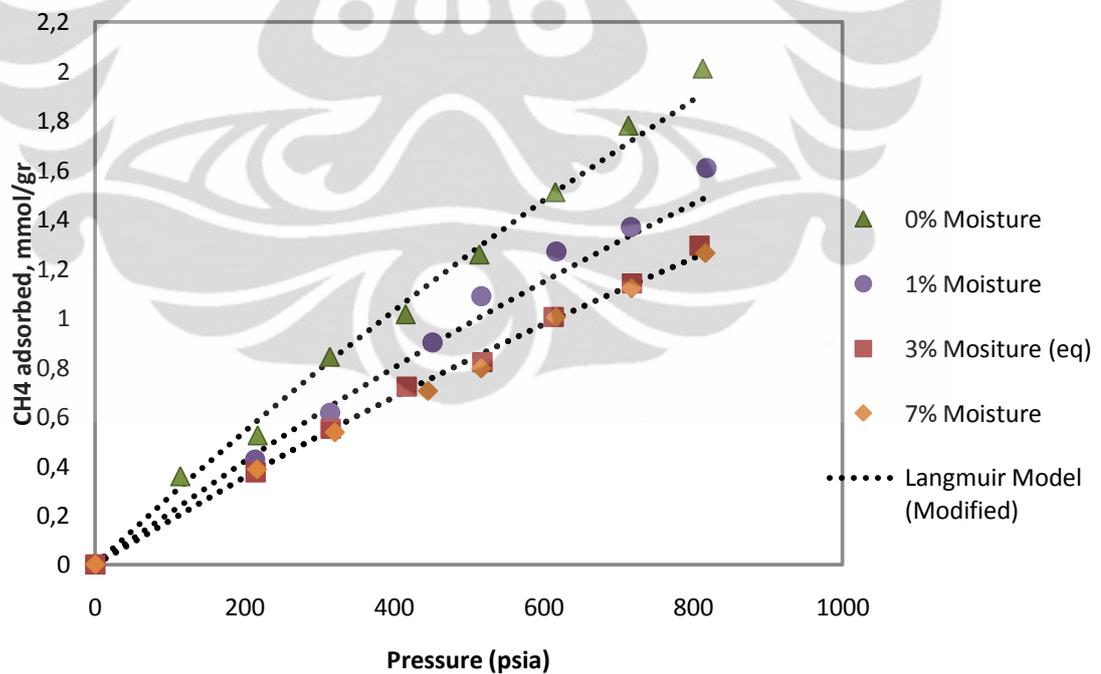
Tabel 4. 8 Model Langmuir Modifikasi untuk Batubara Barito dan Batubara Ombilin.

Adsorben	A	B	n_{max}^c	%AAD
Barito				
3%	0,34	0,5	8,46	4,4
7%			7,18	1,8
10%			7,18	2,5
Ombilin				
1%	0,33	0,5	7,88	8,17
3%			6,5	4,06
7%			6,5	4,13

Representasi data adsorpsi metana dengan model Langmuir modifikasi dalam bentuk grafik pada batubara Ombilin dan Barito dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9.



Gambar 4. 8 Model Langmuir Modifikasi Data Adsorpsi Batubara Ombilin



Gambar 4. 9 Model Langmuir Modifikasi Data Adsorpsi Batubara Barito

Nilai adsorpsi maksimum pada batubara Barito sedikit lebih besar daripada batubara Ombilin. Hal ini merepresentasikan bahwa jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada permukaan batubara Barito lebih banyak daripada batubara Ombilin. Jumlah pori dan luas permukaan pada batubara Barito sedikit lebih banyak dibandingkan dengan batubara Ombilin. Perbedaan tersebut tidak terlalu jauh karena batubara Ombilin dan Barito merupakan batubara sejenis dengan kategori *rank* bituminous, walaupun *rank* batubara Ombilin sedikit lebih tinggi dibandingkan batubara Barito.

Nilai konstanta Langmuir, b , batubara Barito lebih besar dibandingkan batubara Ombilin. Hal tersebut menunjukkan kemampuan adsorpsi yang dipengaruhi oleh interaksi molekul adsorbat dan adsorben pada batubara Barito lebih kuat dibandingkan interaksi adsorbat-adsorben pada batubara Ombilin.

%AAD model adsorpsi batubara kering dan Ombilin dibawah 4,8% (Lampiran 4), sehingga cukup valid untuk merepresentasikan kapasitas adsorpsi batubara. Persamaan model Langmuir modifikasi pada batubara Ombilin (Gambar 4.8) terdapat sedikit deviasi pada tekanan tinggi, namun masih saling berhimpit sehingga dapat disimpulkan bahwa pengujian adsorpsi gas Metana pada batubara Ombilin dan Barito kering merupakan adsorpsi fisik dengan lapisan monolayer.

Untuk permodelan dengan Langmuir modifikasi, pada Tabel 4.8 nilai konstanta A dan B tidak berbeda jauh. Hal tersebut mengindikasikan bahwa trend fraksi perbandingan kapasitas adsorpsi dengan kandungan air dibawah dan pada titik kesetimbangan pada batubara Ombilin dan Barito hampir sama. Nilai n_{max}^c pada batubara Ombilin dan Barito dibawah titik kesetimbangan lebih besar dibandingkan dengan n_{max}^c pada batubara dengan kandungan air kesetimbangan. Hal tersebut dikarenakan terdapat air yang lebih banyak pada pori-pori batubara pada kandungan air kesetimbangan yang mengurangi kapasitas adsorpsi metana pada batubara, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

Persentase AAD rata-rata batubara Barito dan Ombilin basah yaitu 4,2%. Mengingat ketelitian percobaan sekitar 4,8% (Lampiran 4), maka deviasi dibawah nilai tersebut masih tergolong representatif. Hal tersebut mengindikasikan bahwa persamaan Langmuir yang dimodifikasi tersebut cukup valid untuk merepresentasikan kapasitas adsorpsi batubara pada kandungan air kesetimbangan, dibawah serta diatas titik kesetimbangannya.



BAB V

KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapatkan dari hasil penelitian, pengolahan data, dan analisa yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Kapasitas adsorpsi metana batubara kering Barito pada tekanan 816 psia adalah 2,01 mmol/gr, lebih besar 9,5% dibandingkan dengan batubara kering Ombilin (1,82 mmol/gr).
2. Secara umum, kapasitas adsorpsi metana pada batubara berkurang dengan penambahan kandungan air sampai pada kandungan air kesetimbangannya. Kandungan air pada batubara diatas kesetimbangannya tidak berpengaruh signifikan terhadap pengurangan kapasitas adsorpsi lebih lanjut.
3. Kapasitas adsorpsi batubara Barito dengan kandungan air 3% serta 7% (kesetimbangan) turun sebesar 20,96% dan 35,45% dibandingkan dengan batubara Barito kering.
4. Kapasitas adsorpsi batubara Ombilin dengan kandungan air 1% serta 3% (kesetimbangan) turun sebesar 26,9% dan 37,76% dibandingkan dengan batubara Barito kering.
5. Data adsorpsi isothermal gas Metana pada batubara Ombilin dan Barito dapat direpresentasikan dengan baik oleh permodelan adsorpsi isothermis Langmuir modifikasi dengan rata-rata %AAD sebesar 4,2%.

DAFTAR PUSTAKA

- Aminian, K. (2003). *Coalbed Methane Fundamental Concept*. Petroleum & Natural gas Engineering Department West Virginia University.
- Bahl, B. S., & Tuli, G. D. (1997). *Essential of Physical Chemistry*. New Delhi: S Chand and Company, Ltd.
- Belkin, H. (2007). *Geochemistry of Selected Coal Sample From Sumatra, Sulawesi, and Papua*. US Geological Survey, Virginia.
- Clarckson, C., & Bustin, R. M. (1996). Variation in Micropore Capacity and Size Distribution with Compositin in Bituminous Coal of the western Canadian Sedimentary Basin. *Fuel* , 75, 1483-1498.
- Clarkson, C. (1998). Geological Controls on Coalbed Methanes Reservoir Capacity and Gas Content. *International Journal of Coal Geology* , 3-26.
- Crosdale, P., & Moore, T. (2008). Influence of moisture content and temperature on methane adsorption isotherm analysis for coals from a low-rank,. *International Journal of Coal Geology* , 166-174.
- Ding, L. P., & Bhatia, S. K. (2003). Analysis of Multicomponent Adsorption Kinetics on Activated Carbon. *AIChE Journal* , 49 (4), 883-895.
- Donohue, M. D., & Aranovich, G. L. (1999). A New Classification of Isotherms for Gibbs Adsorption of gases on Solids. *Fluid Phase Equilibria Journal* , 158, 557-563.
- ESDM. (2005). *Potensi CBM Cukup Besar dan Siap Dimanfaatkan*. Retrieved April 18, 2010, from www.esdm.go.id/index.php?option=com_content&task=view&id=336&itemid=94
- Fitzgerald, J. E., & Pan, Z. (2005). Adsorption of Methane, Nitrogen, Carbon Dioxide, and their Mixtures on Wet Tiffany Coal. 5323-5331.
- Lama, R. D., & Bodziony, J. (1996). *Outburst of gas Coal and Rock in Underground Coal Mine*. Wollongong: Lama and Associates.
- Lamberson, M. N., & Bustin, R. M. (1993). *Coalbed Methanes Characteristic of gates Formation Coals*. AAPG.

- Laxminarayana, C., & Crosdale, P. J. (1999). Role of Coal Type and Rank on Methane Sorption Characteristics of Bower Basin, Australia Coal. *International Journal of Coal Geology* , 309-325.
- Maron, S. H., & Lando, J. (1974). *Fundamental of Physical Chemistry*. New York: MacMilan Publishing Co, Inc.
- Meyers, R. A. (1982). *Coal Structure*. New York: Academic Press.
- Pabhassaro, D. (2007). *Permodelan Adsorpsi Tekanan Tinggi Terhadap Gas Metana untuk Prediksi Potensi Coalbed Methane Indonesia sebagai Energi Baru*. Skripsi, Universitas Indonesia, Teknik Kimia.
- Pan et al, Z. (2010). Effects of Matrix Moisture on gas Diffusion and Flow in Coal. *Fuel* , 3207-3217.
- Prolessara, P. (2010). *Studi kapasitas adsorpsi serta dinamika adsorpsi dan desorpsi dari nanotube karbon sebagai penyimpan hidrogen*. Depok: Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- Rice, D., & Claypool, G. (1981). Generation, Accumulation, and Resource Potential of Biogenic Gas. *American Association of petroleum Geologists Bulletin* , 65, 5-25.
- Rightmare, C. (1984). Coalbed Methane resources. (G. Eddy, & J. Kirr, Eds.) *American Association of Petroleum Geologists Explorer* , 21, 18-20.
- Ruthven, D. M. (1993). *Adsorption, Encyclopedia of Chemical Technology* (4th Edition ed., Vol. 1). Wiley Inter Science.
- Ruthven, D. M. (1984). *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. Canada: Wiley-Interscience.
- Stevens. (2003). *Indonesia: Coalbed Methane Indicators and Basin Evaluation*. Paper SPE 88630.
- Sudibandriyo, M. (2003). *A Generalized Ono-Kondo Lattice Model for High Pressure Adsorption on Carbon Adsorbents*. Oklahoma State University.
- Sundstrom, D. W., & Herbert, E. K. (1993). *Waste Water Treatment*. Prentice Hall Englewood Cliffs.
- Treybal, R. (1980). *Mass Transfer Operation*. Singapore: McGraw Hill.
- Yang, R. (1997). *Gas Separation by Adsorption Process*. London: Imperial College Press.

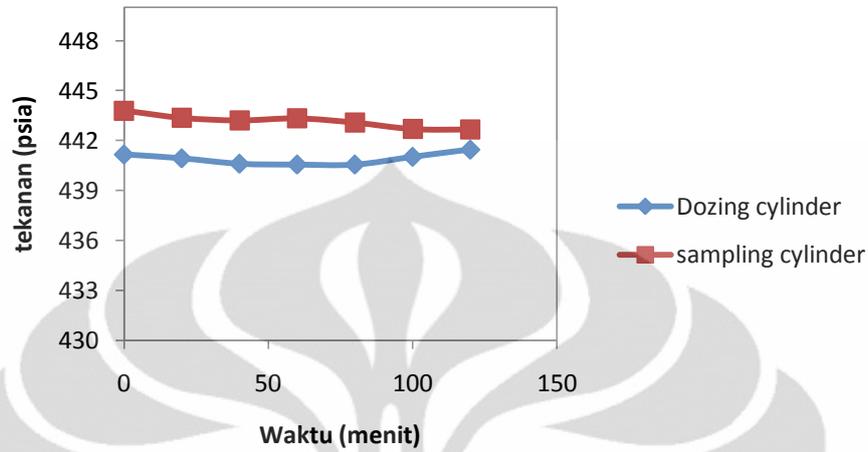
Yee, D. (1993). *Gas Sorption on Coal and Measurement of Gas Content*. AAPG Studies in Geology.

Yi, J., & Akkutlu, Y. (2009). *Gas Sorption and Transport in Coals: A Poroelastic Medium Approach*.

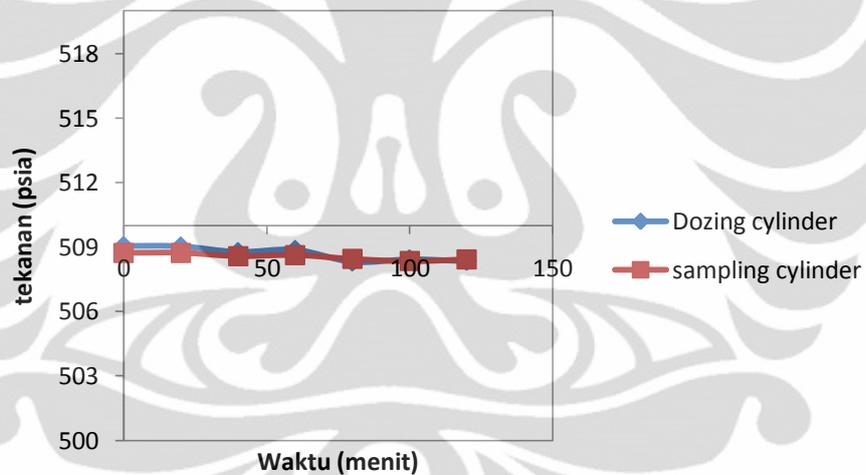


LAMPIRAN A

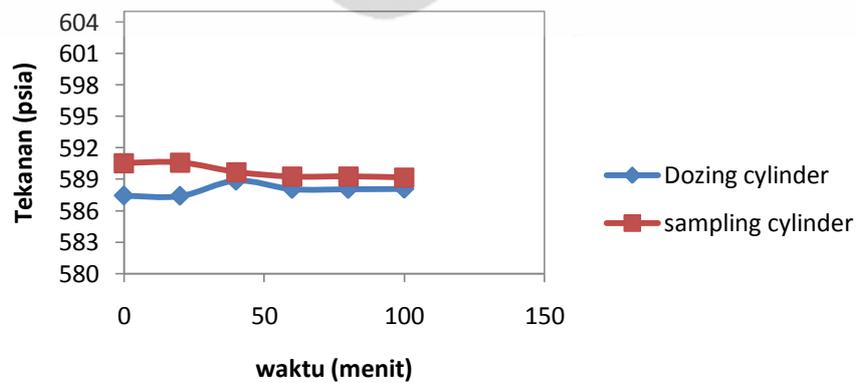
HASIL TES KEBOCORAN



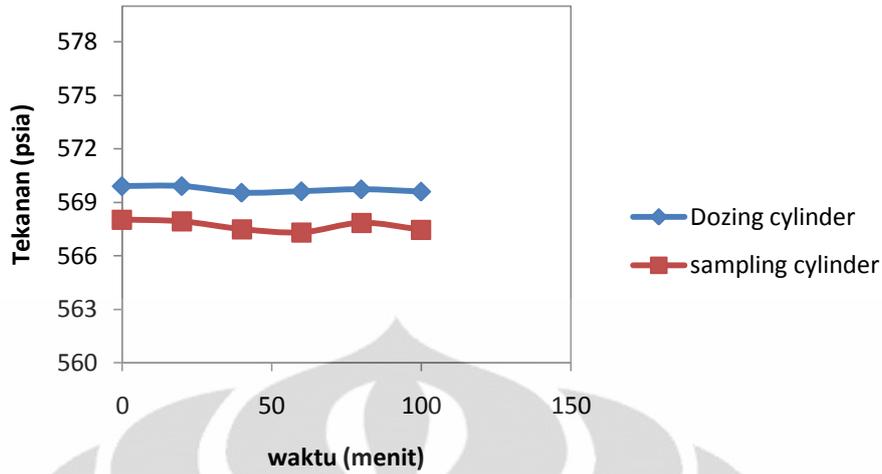
Gambar 1. Hasil Uji Kebocoran Ombilin 1 %



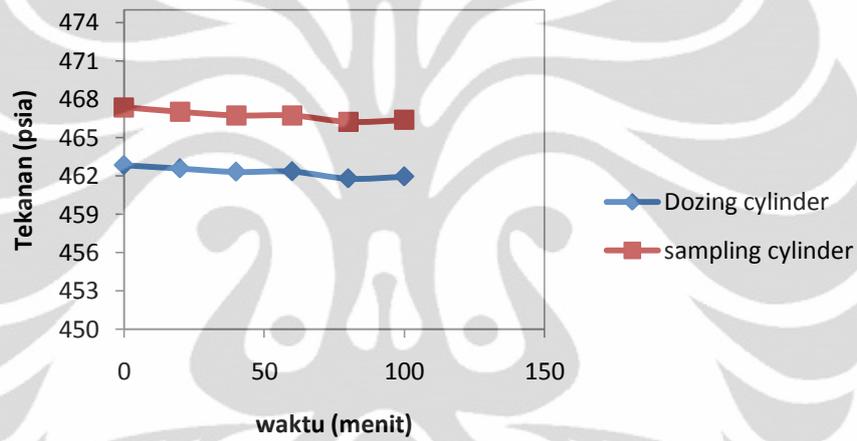
Gambar 2. Hasil Uji Kebocoran Ombilin 3%



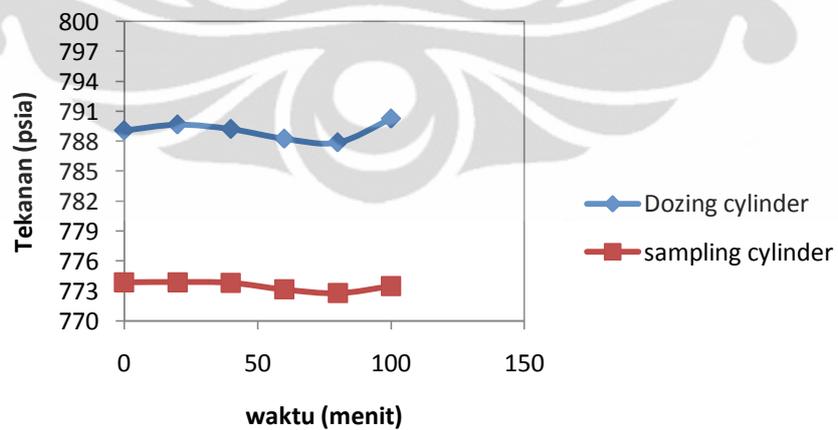
Gambar 3. Hasil Uji Kebocoran Ombilin 7 %



Gambar 4. Hasil Uji Kebocoran Barito 3 %



Gambar 5. Hasil Uji Kebocoran Barito 7 %



Gambar 6. Hasil Uji Kebocoran Barito 10 %

Batubara	Ombilin							
Kandungan air	0%		1%		3%		7%	
Waktu	Tekanan (psia)		Tekanan (psia)		Tekanan (psia)		Tekanan (psia)	
	Dozing	Sampling	Dozing	Sampling	Dozing	Sampling	Dozing	Sampling
0	-	-	441,17	443,79	509,05	508,73	587,43	590,53
20	623,4	622,42	440,94	443,36	509,03	508,73	587,4	590,58
40	623,54	623,05	440,62	443,21	508,77	508,58	588,84	589,67
60	624,61	622,72	440,57	443,33	508,87	508,63	588,05	589,23
80	624,45	622,83	440,57	443,08	508,32	508,45	588,04	589,25
100	624,37	622,8	441,03	442,7	508,43	508,35	588,07	589,15
120	624,4	622,73	441,46	442,67	508,35	508,43	-	-

Batubara	Barito							
Kandungan air	0%		3%		7%		10%	
Waktu	Tekanan (psia)		Tekanan (psia)		Tekanan (psia)		Tekanan (psia)	
	Dozing	Sampling	Dozing	Sampling	Dozing	Sampling	Dozing	Sampling
0	380,68	382,35	569,91	568,02	462,84	467,37	773,84	789,08
20	380,81	382,16	569,91	567,92	462,58	467,02	773,87	789,66
40	380,92	381,68	569,54	567,49	462,32	466,74	773,79	789,22
60	380,73	381,6	569,62	567,31	462,35	466,74	773,13	788,25
80	380,73	381,53	569,73	567,84	461,8	466,25	772,77	787,88
100	380,89	381,42	569,6	567,46	461,95	466,38	773,46	790,26
120	380,78	381,58	-	-	-	-	-	-

LAMPIRAN B
PERHITUNGAN VOLUME VOID SAMPLING CYLINDER

Volume Void Barito Kering

Ini Press	116,54	166,48	216,55	267,13
Fin Press	166,48	216,55	267,13	316,89
Cal Ini Pre	116,5	166,5	216,6	267,1
Cal Fin Pre	166,5	216,6	267,1	316,9
P Dozing ini	562,52	562,52	562,52	563,52
Cal P Dozing ini	562,52	562,52	562,52	563,52
P Dozing fin	464,33	432,19	400,55	369,95
Cal P Dozing fin	464,33	432,19	400,55	369,95
Helium Sol	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
V (mL)	23,0	23,0	23,0	23,0
T dozing	78,4	78,4	78,4	78,4
T sampling ini	78,4	78,7	78,7	79,2
T sampling fin	78,7	78,7	79,2	79,8
Z dozing ini	1,018451231	1,018451231	1,018451231	1,018484032
Z dozing fin	1,015230499	1,014176274	1,01313845	1,012134738
Z sampling init	1,003822809	1,005457501	1,007098882	1,008747718
Z sampling final	1,005457501	1,007098882	1,008747718	1,01036466
Vvoid				
	13,20	13,50	13,65	13,80
	0,3418	0,0363	-0,1133	-0,2648
Exp. Error	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	13,54	Average		#DIV/0!
	0,258908764	Std. Dev		#DIV/0!
	0,333452	99% Confidence		

Volume Void Barito 3 % Moisture Content

				Water, grams	0,00618
TempPmp				R	669,9542893
86,0	Calibrated			Pump _{Dead}	52,92
86	Readout @equilibrium			Pressure	
Ini Press	0	165,95	216,88	266,29	
Fin Press	165,95	216,88	266,85	368	
Cal Ini Pre	0,0	166,0	216,9	266,3	
Cal Fin Pre	166,0	216,9	266,9	368,0	
P Dozing ini	626,15	626,15	626,15	626,15	
Cal P Dozing ini	626,15	626,15	626,15	626,15	
P Dozing fin	528,53	495,95	464,17	400,42	
Cal P Dozing fin	528,53	495,95	464,17	400,42	
Helium Sol	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	
V (mL)	23,0	23,0	23,0	23,0	
T dozing	78,8	78,8	78,8	78,8	
T sampling ini	78,8	78,4	78,5	78,6	
T sampling fin	78,4	78,5	78,6	78,4	
Z dozing ini	1,020524102	1,020524102	1,020524102	1,020524102	
Z dozing fin	1,017324289	1,016256373	1,015214681	1,013125067	
Z sampling init	1	1,005443583	1,007112711	1,008731293	
Z sampling final	1,005443583	1,007112711	1,008749654	1,012071339	
Vvoid					
	13,09	13,40	13,59	13,80	
	#DIV/0!	0,0697	-0,1178	-0,3293	
Exp. Error	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
	13,47	Average		#DIV/0!	Weighted Average
	0,299797038	Std. Dev		#DIV/0!	expected Std.Dev
	0,386113	99% Confidence			

Volume Void Barito 7 % Moisture Content

Volume Dozing					
23,0	Calibrated				
			Helium		
				Water, grams	0,0206
TempPmp				R	669,9542893
86,0	Calibrated			Pump _{Dead}	52,92
86	Readout @equilibrium			Pressure	
Ini Press	16,05	162,26	222,84	265,29	
Fin Press	162,26	222,84	265,29	336,68	
Cal Ini Pre	16,1	162,3	222,8	265,3	
Cal Fin Pre	162,3	222,8	265,3	336,7	
P Dozing ini	606,85	606,85	606,85	606,85	
Cal P Dozing ini	606,85	606,85	606,85	606,85	
P Dozing fin	510,2	469,5	442,29	396,37	
Cal P Dozing fin	510,2	469,5	442,29	396,37	
Helium Sol	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	
V (mL)	23,0	23,0	23,0	23,0	
T dozing	77,8	77,8	77,8	77,8	
T sampling ini	77,8	77,3	77,7	77,8	
T sampling fin	77,3	77,7	77,8	77,5	
Z dozing ini	1,019931544	1,019931544	1,019931544	1,019931544	
Z dozing fin	1,016757145	1,015420383	1,014526691	1,013018482	
Z sampling init	1,00052715	1,005334961	1,007320567	1,008713256	
Z sampling final	1,005334961	1,007320567	1,008713256	1,01106504	
Vvoid					
	13,27	13,79	13,91	14,06	
	#DIV/0!	-0,0295	-0,1516	-0,3063	
Exp. Error	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
	13,76	Average		#DIV/0!	Weighted Average
	0,344137569	Std. Dev		#DIV/0!	expected Std.Dev
	0,443220	99% Confidence			

Volume Void Barito 10 % Moisture Content

Volume Dozing					
23,0	Calibrated				
			Helium		
				Water, grams	0,1442
TempPmp				R	669,9542893
86,0	Calibrated			Pump _{Dead}	52,92
86	Readout @equilibrium			Pressure	
Ini Press	0	180,89	267,64	316,13	
Fin Press	185,89	267,64	316,13	350,69	
Cal Ini Pre	0,0	180,9	267,6	316,1	
Cal Fin Pre	185,9	267,6	316,1	350,7	
P Dozing ini	605,2	605,2	605,2	605,2	
Cal P Dozing ini	605,2	605,2	605,2	605,2	
P Dozing fin	490,44	438,46	408,25	386,5	
Cal P Dozing fin	490,44	438,46	408,25	386,5	
Helium Sol	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	
V (mL)	23,0	23,0	23,0	23,0	
T dozing	79,4	79,4	79,4	79,4	
T sampling ini	79,4	79,5	79,4	79,4	
T sampling fin	79,5	79,4	79,4	79,2	
Z dozing ini	1,019810126	1,019810126	1,019810126	1,019810126	
Z dozing fin	1,016053665	1,014352194	1,013363324	1,012651377	
Z sampling init	1	1,005919854	1,008760711	1,010347943	
Z sampling final	1,006083485	1,008760711	1,010347943	1,011484061	
Vvoid					
	13,79	13,97	14,01	14,04	
	#DIV/0!	-0,0195	-0,0552	-0,0897	
Exp. Error	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
	13,95	Average		#DIV/0!	Weighted Average
	0,113305475	Std. Dev		#DIV/0!	expected Std.Dev
	0,145928	99% Confidence			

Volume Void Ombilin Kering

Volume Dozing				
23,0	Calibrated			
			Helium	
				Water, grams
TempPmp				R
86,0	Calibrated			Pump _{Dead}
86	Readout @equilibrium			Pressure
Ini Press	116,0	165,62	215,94	266,98
Fin Press	165,62	215,94	266,98	315,67
Cal Ini Pre	116,0	165,6	215,9	267,0
Cal Fin Pre	165,6	215,9	267,0	315,7
P Dozing ini	564,8	564,8	564,8	564,8
Cal P Dozing ini	564,8	564,8	564,8	564,8
P Dozing fin	467,31	434,93	402,61	371,02
Cal P Dozing fin	467,31	434,93	402,61	371,02
Helium Sol	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
V (mL)	23,0	23,0	23,0	23,0
T dozing	77,5	77,5	77,5	77,5
T sampling ini	77,9	77,7	77,2	77,8
T sampling fin	77,7	77,2	77,8	77,8
Z dozing ini	1,018560665	1,018562239	1,018562239	1,018562239
Z dozing fin	1,015356913	1,014294041	1,013231839	1,012193629
Z sampling init	1,003809456	1,00544082	1,007101415	1,008768762
Z sampling final	1,00544082	1,007101415	1,008768762	1,01036795
Vvoid				
	13,17	13,48	13,67	13,84
	#DIV/0!	0,0614	-0,1270	-0,3064
Exp. Error	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	13,54	Average		#DIV/0!
	0,289905335	Std. Dev		#DIV/0!
	0,373373	99% Confidence		

Volume Void Ombilin 1% Moisture Content

Volume Dozing					
23,0	Calibrated				
			Helium		
				Water, grams	0,02
TempPmp				R	669,9542893
86,0	Calibrated			Pump _{Dead}	52,92
86	Readout @equilibrium			Pressure	
Ini Press	119,11	0	218,5		
Fin Press	169,18	218,5	268,05		
Cal Ini Pre	119,1	0,0	218,5		
Cal Fin Pre	169,2	218,5	268,1		
P Dozing ini	552,3	501,82	501,82		
Cal P Dozing ini	552,3	501,82	501,82		
P Dozing fin	453,47	371,91	340,24		
Cal P Dozing fin	453,47	371,91	340,24		
Helium Sol	0,00000	0,00000	0,00000		
V (mL)	23,0	23,0	23,0		
T dozing	78,0	79,1	79,1		
T sampling ini	79,1	79,1	79,1		
T sampling fin	79,6	79,6	79,8		
Z dozing ini	1,018132204	1,016436391	1,016436391		
Z dozing fin	1,01488758	1,012181376	1,011144071		
Z sampling init	1,003901276	1	1,007156653		
Z sampling final	1,005535552	1,007149297	1,008767229		
Vvoid					
	13,11	13,40	13,62		
	0,2654	-0,0196	-0,2458		
Exp. Error	13,38	Average	#DIV/0!		
	0,25614835	Std. Dev	#DIV/0!		
	0,466545	99% Confidence	#DIV/0!		

Volume Void Ombilin 3 % Moisture Content

Volume Dozing					
23,0	Calibrated				
			Helium		
				Water, grams	0,06
TempPmp				R	669,9542893
86,0	Calibrated			Pump _{Dead}	52,92
86	Readout @equilibrium			Pressure	
Ini Press	116,44	166,51	216,53		
Fin Press	166,51	216,53	265,93		
Cal Ini Pre	116,4	166,51	216,5		
Cal Fin Pre	166,5	216,5	265,9		
P Dozing ini	500,78	500,78	500,78		
Cal P Dozing ini	500,78	500,78	500,78		
P Dozing fin	405,14	372,69	340,71		
Cal P Dozing fin	405,14	372,69	340,71		
Helium Sol	0,00000	0,00000	0,00000		
V (mL)	23,0	23,0	23,0		
T dozing	79,8	79,8	79,8		
T sampling ini	79,4	80,0	7,7		
T sampling fin	80,0	78,7	79,0		
Z dozing ini	1,016378608	1,016378608	1,016378608		
Z dozing fin	1,013250587	1,012189271	1,011143327		
Z sampling init	1,003811211	#VALUE!	1,008277814		
Z sampling final	1,00544349	1,007098076	1,008711482		
Vvoid					
	12,90	13,29	13,57		
	#DIV/0!	-0,0377	-0,3145		
Exp. Error	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		
	13,25	Average			
	0,334923697	Std. Dev			
	0,498084	99% Confidence			

Volume Void Ombilin 7 % Moisture Content

Volume Dozing					
23,0	Calibrated				
			Helium		
				Water, grams	0,14
TempPmp				R	669,9542893
86,0	Calibrated			Pump _{Dead}	52,92
86	Readout @equilibrium			Pressure	
Ini Press	116,26	166,56	216,96		
Fin Press	166,56	216,96	266,87		
Cal Ini Pre	116,3	166,6	217,0		
Cal Fin Pre	166,6	217,0	266,9		
P Dozing ini	540,62	540,62	540,62		
Cal P Dozing ini	540,62	540,62	540,62		
P Dozing fin	443,23	411,12	379,45		
Cal P Dozing fin	443,23	411,12	379,45		
Helium Sol	0,00000	0,00000	0,00000		
V (mL)	23,0	23,0	23,0		
T dozing	79,1	79,1	79,1		
T sampling ini	79,1	79,1	79,1		
T sampling fin	79,6	79,6	79,8		
Z dozing ini	1,017707229	1,017707229	1,017707229		
Z dozing fin	1,01451736	1,013465643	1,012428338		
Z sampling init	1,003807929	1,005455433	1,007106212		
Z sampling final	1,005449826	1,007098908	1,008728634		
Vvoid					
	13,11	13,42	13,62		
	#DIV/0!	-0,0366	-0,2354		
Exp. Error	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		
	13,38	Average			
	0,255693816	Std. Dev			
	0,380257	99% Confidence			

LAMPIRAN C
PERHITUNGAN KAPASITAS ADSORPSI METANA PADA BATUBARA

BARITO 0% MOISTURE

	Uncalibrated*	Calibrated							
Vvoid	13,54				CH4		Adsorption on	Barito	
V dozing	23			MW	16,00				
Dozing Temp	78,422	86		Ads.phase dens	0,354				
Mass NTC	1,99			g/cm ³					
%moisture sample, mol H2O	0	0,0000							
R, gas constant	669,9542893	(psi cm ³)/ (mol °R)							
Density Pump, mol/cc	0		56,10	Dead Pump Volume					
Urutan	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		0,981297	0,944264	0,906456	0,829290	0,796356	0,716391	0,716391	0,716391
Final Sampling Press*	0	113,79	217,26	313,89	415,24	513,93	615,62	713,46	812,86
Calibrated	-1,5	112,5	216,2	313,0	414,5	513,3	615,1	713,1	812,6
Initial P dozing	829,87	829,87	764,33	706,64	647,01	586,64	693,4	923,96	889,97
Final P dozing	829,87	764,33	706,64	647,01	586,64	523,78	629,38	863,2	827,44
Cal Final P dozing	830,7122027	765,1416715	707,4170127	647,743528	587,321571	524,3989889	630,09918	864,0541208	828,2812386
Sampling Temp*	79,21	77,94	77,86	78,10	78,10	77,81	78,260	78,100	77,612
Calibrated	79,21	77,94	77,86	78,10	78,10	77,81	78,260	78,100	77,612
density _{cell} , (g/cm ³)	0,00E+00	5,11E-03	9,90E-03	1,45E-02	1,94E-02	2,43E-02	2,94E-02	3,45E-02	3,98E-02
Z dozing awal	0,90636	0,90636	0,91325	0,91944	0,92595	0,93265	0,92088	0,89676	0,90021
Z dozing final	0,90636	0,91325	0,91944	0,92595	0,93265	0,93972	0,92790	0,90293	0,90662
Z _{cell}	1,00000	0,98960	0,97487	0,96370	0,95198	0,94056	0,92934	0,91851	0,90758
n _{inj} (mol)	0,00000	0,00502	0,00939	0,01385	0,01830	0,02287	0,02764	0,03239	0,03724
n _{unads} (mol)	-0,00006	0,00432	0,00838	0,01224	0,01639	0,02055	0,02489	0,02919	0,03369
n _{solub} (mol)	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
n _{ads} (mol)	0,00000	0,00070	0,00101	0,00161	0,00191	0,00233	0,00275	0,00320	0,00355
n _{ads} gibbs (mmol/gr CNT)	0,0000	0,3524	0,5085	0,8072	0,9585	1,1703	1,3839	1,6056	1,7842
n _{absolute} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,3576	0,5232	0,8416	1,0140	1,2564	1,5093	1,7789	2,0103

BARITO 3 % MOISTURE

Vvoid	13,47				CH4		Adsorption on	Barito	
V dozing	23			MW	16,00				
Dozing Temp	78,44	86		Ads.phase dens	0,354				
Mass NTC	2,06			g/cm ³					
%moisture sample, mol H2O	0,03	0,0034							
R, gas constant	669,9542893	(psi cm ³)/(mol °R)							
Density Pump, mol/cc	0		56,10	Dead Pump Volume					
Urutan	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		0,981297	0,944264	0,906456	0,829290	0,796356	0,716391	0,716391	0,716391
Final Sampling Press*	0	116,64	219,9	314,44	451,57	517,01	617,17	716,57	818,03
Calibrated	-1,5	115,4	218,8	313,6	450,9	516,4	616,7	716,2	817,7
Initial P dozing	823,63	823,63	763,37	706,82	648,7	783,16	742,7	992,59	930,9
Final P dozing	823,63	763,37	706,82	648,7	567,22	742,7	680,7	930,9	868,9
Cal Final P dozing	824,469701	764,1811544	707,5971322	649,4348677	567,8831606	743,4995308	681,4590531	931,7708392	869,7559153
Sampling Temp*	79,21	78,15	78,26	77,86	78,08	78,04	77,790	77,900	77,800
Calibrated	79,21	78,15	78,26	77,86	78,08	78,04	77,790	77,900	77,800
density _{cell} , (g/cm ³)	0,00E+00	5,25E-03	1,00E-02	1,45E-02	2,12E-02	2,44E-02	2,95E-02	3,47E-02	4,01E-02
Z dozing awal	0,90702	0,90702	0,91337	0,91943	0,92578	0,91127	0,91557	0,89008	0,89612
Z dozing final	0,90702	0,91337	0,91943	0,92578	0,93481	0,91557	0,92227	0,89612	0,90236
Z _{cell}	1,00000	0,98658	0,97464	0,96357	0,94780	0,94032	0,92892	0,91805	0,90717
n _{inj} (mol)	0,00000	0,00461	0,00889	0,01324	0,01923	0,02231	0,02698	0,03186	0,03671
n _{unads} (mol)	-0,00006	0,00442	0,00843	0,01221	0,01781	0,02056	0,02485	0,02919	0,03373
n _{solub} (mol)	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
n _{ads} (mol)	0,00000	0,00019	0,00046	0,00103	0,00142	0,00175	0,00213	0,00266	0,00297
n _{adsqibbs} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,0971	0,2289	0,5156	0,7101	0,8770	1,0645	1,3334	1,4874
n _{absolute} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,0986	0,2356	0,5376	0,7552	0,9420	1,1613	1,4782	1,6773

BARITO 7 % MOISTURE

Vvoid	13,95				CH4		Adsorption on	barito	
V dozing	23			MW	16,00				
Dozing Temp	79,1	86		Ads.phase dens	0,354				
Mass NTC	2,06			g/cm ³					
%moisture sample, mol H2O	0,07	0,0080							
R, gas constant	669,9542893	(psi cm ³)/(mol °R)							
Density Pump, mol/cc	0		56,10	Dead Pump Volume					
Urutan	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		0,981297	0,944264	0,906456	0,829290	0,796356	0,716391	0,716391	0,716391
Final Sampling Press*	0	156,53	215,04	315,08	416,8	517,85	613,26	718,16	808,61
Calibrated	-1,5	155,4	214,0	314,2	416,1	517,3	612,8	717,8	808,3
Initial P dozing	908,93	908,93	826,68	829,73	771,67	711,18	816,78	968,84	903,95
Final P dozing	908,93	826,68	795,05	771,67	711,18	650,85	757,49	903,95	846,24
Cal Final P dozing	909,7965139	827,5209345	795,8771534	772,4855586	711,9600045	651,5865629	758,2979431	904,8153865	847,0883603
Sampling Temp*	79,10	79,30	79,40	79,00	79,20	79,60	79,400	79,400	79,000
Calibrated	79,10	79,30	79,40	79,00	79,20	79,60	79,400	79,400	79,000
density _{cell} , (g/cm ³)	0,00E+00	7,06E-03	9,77E-03	1,45E-02	1,94E-02	2,44E-02	2,92E-02	3,46E-02	3,94E-02
Z dozing awal	0,8987	0,89882	0,90718	0,90686	0,91292	0,91936	0,90820	0,89292	0,89932
Z dozing final	0,8987	0,90718	0,91046	0,91292	0,91936	0,92590	0,91442	0,89932	0,90509
Z _{cell}	1,00000	0,98211	0,97540	0,96379	0,95218	0,94090	0,93019	0,91879	0,90898
n _{inj} (mol)	0,00000	0,00637	0,00879	0,01323	0,01780	0,02230	0,02681	0,03190	0,03637
n _{unads} (mol)	-0,00006	0,00616	0,00852	0,01264	0,01691	0,02125	0,02547	0,03019	0,03439
n _{solub} (mol)	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00001	0,00001
n _{ads} (mol)	0,00000	0,00021	0,00027	0,00059	0,00088	0,00104	0,00134	0,00170	0,00198
n _{adsqibbs} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,1094	0,1422	0,3082	0,4600	0,5425	0,7009	0,8889	1,0331
n _{absolute} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,1117	0,1462	0,3214	0,4867	0,5826	0,7640	0,9852	1,1627

BARITO 10 % MOISTURE

	Uncalibrated*	Calibrated							
Vvoid	13,76				CH4		Adsorption on	Barito	
V dozing	23			MW	16,00				
Dozing Temp	77,2	86		Ads.phase dens	0,354				
Mass NTC	2,06			g/cm ³					
%moisture sample, mol H2O	0,1	0,0114							
R, gas constant	669,9542893	(psi cm ³)/ (mol °R)							
Density Pump, mol/cc	0		56,10	Dead Pump Volume					
Urutan	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		0,981297	0,944264	0,906456	0,829290	0,796356	0,716391	0,716391	0,716391
Final Sampling Press*	0	108,72	216,35	320,59	445,23	516,5	616,59	717,79	816,6
Calibrated	-1,5	107,4	215,3	319,7	444,5	515,9	616,1	717,4	816,3
Initial P dozing	794,73	794,73	738,87	679,43	618,24	773,45	728,91	992,67	930,93
Final P dozing	794,73	738,87	679,43	618,24	543,23	728,98	669,48	930,93	869,13
Cal Final P dozing	795,5570028	739,6672743	680,188136	618,9497628	543,8692775	729,7712988	670,2308284	931,8008444	869,9859863
Sampling Temp*	77,20	77,40	77,40	77,00	77,10	77,40	77,900	77,180	77,500
Calibrated	77,20	77,40	77,40	77,00	77,10	77,40	77,900	77,180	77,500
density _{cell} , (g/cm ³)	0,00E+00	4,90E-03	9,87E-03	1,48E-02	2,09E-02	2,44E-02	2,95E-02	3,48E-02	4,00E-02
Z dozing awal	0,9092	0,9092	0,91520	0,92169	0,92849	0,91148	0,91267	0,88902	0,89513
Z dozing final	0,9092	0,91520	0,92169	0,92849	0,93696	0,91267	0,92279	0,89513	0,90142
Z _{cell}	1,00000	0,98744	0,97490	0,96263	0,94816	0,94009	0,92904	0,91748	0,90710
n _{inj} (mol)	0,00000	0,00427	0,00875	0,01331	0,01882	0,02201	0,02668	0,03158	0,03642
n _{unads} (mol)	-0,00006	0,00421	0,00849	0,01275	0,01797	0,02101	0,02536	0,02993	0,03442
n _{solub} (mol)	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
n _{ads} (mol)	0,00000	0,00006	0,00026	0,00056	0,00085	0,00099	0,00131	0,00164	0,00199
n _{adsqibbs} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,0301	0,1423	0,3046	0,4565	0,5328	0,7079	0,8822	1,0736
n _{absolute} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,0305	0,1464	0,3179	0,4851	0,5723	0,7722	0,9784	1,2104

OMBILIN 0 % MOISTURE

Vvoid	13,54				CH4		Adsorption on	Ombilin	
V dozing	23			MW	16,00				
Dozing Temp	77,648	86		Ads.phase dens	0,354				
Mass NTC	1,99			g/cm ³					
%moisture sample, mol H2O	0	0,0000							
R, gas constant	669,9542893	(psi cm ³)/(mol °R)			0,004358851				
Density Pump, mol/cc	0		56,10	Dead Pump Volume					
Urutan	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		0,981297	0,944264	0,906456	0,829290	0,796356	0,716391	0,716391	0,716391
Final Sampling Press*	0	113,59	214,95	316,02	415,27	515,2	616	714,23	815,44
Calibrated	-1,5	112,3	213,9	315,1	414,5	514,6	615,5	713,9	815,1
Initial P dozing	1006	1006	944,79	889,29	832,66	773,86	952,15	892,81	1023,33
Final P dozing	1006	944,79	889,29	832,66	773,86	713	892,81	830,9	962,9
Cal Final P dozing	1006,877642	945,6630284	890,1517524	833,5032936	774,6766955	713,7811911	893,6726679	831,7426074	963,7752481
Sampling Temp*	77,80	77,80	77,90	77,63	77,60	78,10	78,100	77,500	77,500
Calibrated	77,80	77,80	77,90	77,63	77,60	78,10	78,100	77,500	77,500
density _{cell} , (g/cm ³)	0,00E+00	5,11E-03	9,79E-03	1,46E-02	1,94E-02	2,43E-02	2,94E-02	3,46E-02	4,00E-02
Z dozing awal	0,88811	0,88811	0,89410	0,89969	0,90533	0,91173	0,89377	0,89933	0,88644
Z dozing final	0,88811	0,89410	0,89969	0,90533	0,91173	0,91828	0,89933	0,90571	0,89231
Z _{cell}	1,00000	0,98691	0,97515	0,96333	0,95180	0,94055	0,92921	0,91806	0,90723
n _{inj} (mol)	0,00000	0,00486	0,00922	0,01361	0,01814	0,02276	0,02739	0,03221	0,03702
n _{unads} (mol)	-0,00006	0,00433	0,00829	0,01234	0,01641	0,02059	0,02491	0,02927	0,03382
n _{solub} (mol)	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
n _{ads} (mol)	0,00000	0,00053	0,00093	0,00127	0,00173	0,00217	0,00248	0,00294	0,00320
n _{adsqibbs} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,2661	0,4670	0,6368	0,8683	1,0913	1,2444	1,4751	1,6092
n _{absolute} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,2701	0,4803	0,6641	0,9187	1,1718	1,3573	1,6349	1,8140

OMBILIN 1 % MOISTURE

	Uncalibrated*	Calibrated					Adsorption on	Ombilin	
Vvoid	13,38				CH4				
V dozing	23			MW	16,00				

Dozing Temp	78,5	86		Ads.phase dens	0,354				
Mass NTC	2,04			g/cm ³					
%moisture sample, mol H2O	0,01	0,0011							
R, gas constant	669,9542893	(psi cm ³)/(mol °R)			0,004324383				
Density Pump, mol/cc	0		56,10	Dead Pump Volume			733,89		
Urutan	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		0,981297	0,944264	0,906456	0,829290	0,796356	0,716391	0,716391	0,716391
Final Sampling Press*	0	116,03	216,19	340,14	416,11	516,3	616,48	719,5	816,04
Calibrated	-1,5	114,8	215,1	339,3	415,4	515,7	616,0	719,1	815,7
Initial P dozing	933	933	875,92	820	749,48	703,92	860	800,62	900,87
Final P dozing	933	875,92	820	749,48	703,92	643,75	800,62	739,4	842,93
Cal Final P dozing	933,8711973	876,7780277	820,8382065	750,2834466	704,6951987	644,4809262	801,4497392	740,1975885	843,7771625
Sampling Temp*	78,40	78,40	78,50	78,70	78,00	77,70	77,700	78,000	78,000
Calibrated	78,40	78,40	78,50	78,70	78,00	77,70	77,700	78,000	78,000
density _{cell} , (g/cm ³)	0,00E+00	5,22E-03	9,84E-03	1,57E-02	1,94E-02	2,44E-02	2,95E-02	3,48E-02	4,01E-02
Z dozing awal	0,89596	0,89596	0,90169	0,90745	0,91488	0,91978	0,90322	0,90947	0,89917
Z dozing final	0,89596	0,90169	0,90745	0,91488	0,91978	0,92636	0,90947	0,91596	0,90507
Z _{cell}	1,00000	0,98668	0,97511	0,96082	0,95185	0,94025	0,92895	0,91779	0,90497
n _{inj} (mol)	0,00000	0,00446	0,00879	0,01417	0,01761	0,02211	0,02670	0,03136	0,03587
n _{unads} (mol)	-0,00006	0,00436	0,00823	0,01313	0,01624	0,02041	0,02466	0,02912	0,03349
n _{solub} (mol)	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
n _{ads} (mol)	0,00000	0,00010	0,00056	0,00104	0,00137	0,00170	0,00203	0,00224	0,00237
n _{adsqibbs} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,0476	0,2761	0,5129	0,6791	0,8411	1,0059	1,1101	1,1742
n _{absolute} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,0483	0,2840	0,5367	0,7186	0,9034	1,0973	1,2312	1,3240

OMBILIN 3% MOISTURE

Vvoid	13,259				CH4		Adsorption on	Ombilin	
V dozing	23				MW	16,00			
Dozing Temp	77,6	86			Ads.phase dens	0,354			
Mass NTC	1,99				g/cm ³				
%moisture sample, mol H2O	0,03	0,0033							
R, gas constant	669,9542893	(psi cm ³)/ (mol °R)				0,004344461			
Density Pump, mol/cc	0		56,10	Dead Pump Volume					
Urutan	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		0,981297	0,944264	0,906456	0,829290	0,796356	0,716391	0,716391	0,716391
Final Sampling Press*	0	114,86	216,16	315,92	417,99	516,93	624,02	766,43	884,96
Calibrated	-1,5	113,6	215,1	315,0	417,3	516,3	623,6	766,1	884,7
Initial P dozing	909,62	909,62	853,91	797,7	741,49	684,03	736	940,61	980,98
Final P dozing	909,62	853,91	797,7	741,49	684,03	627	673,04	857,86	910,74
Cal Final P dozing	910,4866658	854,7610434	798,5283921	742,2888214	684,7914411	627,7171909	673,7934679	858,712375	911,6069102
Sampling Temp*	77,60	77,60	77,20	77,50	77,50	77,65	77,470	77,800	77,600
Calibrated	77,60	77,60	77,20	77,50	77,50	77,65	77,470	77,800	77,600
density _{cell} , (g/cm ³)	0,00E+00	5,17E-03	9,86E-03	1,46E-02	1,95E-02	2,44E-02	2,99E-02	3,73E-02	4,37E-02
Z dozing awal	0,89759	0,89759	0,90329	0,90917	0,91517	0,92142	0,91576	0,89488	0,89050
Z dozing final	0,89759	0,90329	0,90917	0,91517	0,92142	0,92772	0,92263	0,90288	0,89748
Z _{cell}	1,00000	0,98674	0,97489	0,96331	0,95146	0,94016	0,92799	0,91262	0,90009
n _{inj} (mol)	0,00000	0,00435	0,00869	0,01299	0,01732	0,02157	0,02632	0,03277	0,03831
n _{unads} (mol)	-0,00006	0,00429	0,00817	0,01208	0,01619	0,02025	0,02478	0,03092	0,03622
n _{solub} (mol)	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
n _{ads} (mol)	0,00000	0,00006	0,00052	0,00090	0,00114	0,00132	0,00154	0,00184	0,00209
n _{adsqibbs} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,0317	0,2691	0,4678	0,5887	0,6837	0,7972	0,9530	1,0851
n _{absolute} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,0322	0,2768	0,4879	0,6231	0,7344	0,8708	1,0653	1,2379

OMBILIN 7% MOISTURE

Vvoid	13,38				CH4		Adsorption on	Ombilin	
V dozing	23				MW	16,00			
Dozing Temp	79,628	86			Ads.phase dens	0,354			
Mass NTC	2,04				g/cm ³				
%moisture sample, mol H2O	0,073	0,0083							
R, gas constant	669,9542893	(psi cm ³)/ (mol °R)				0,004276509			
Density Pump, mol/cc	0		56,10	Dead Pump Volume					
Urutan	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		0,981297	0,944264	0,906456	0,829290	0,796356	0,716391	0,716391	0,716391
Final Sampling Press*	0	117,48	216,86	316,64	419,01	519,78	618,5	712,95	812,12
Calibrated	-1,5	116,2	215,8	315,8	418,3	519,2	618,0	712,6	811,8
Initial P dozing	922,42	922,42	864,93	809,4	752,5	694,5	842,1	784,31	877,9
Final P dozing	922,42	864,93	809,4	752,5	694,5	636,05	784,31	727,9	818,7
Cal Final P dozing	923,289295	865,7846729	810,2336772	753,3051584	695,268791		785,1319758	728,6906333	819,5376643
Sampling Temp*	79,63	78,94	78,64	77,95	78,10	78,31	78,188	78,350	78,350
Calibrated	79,63	78,94	78,64	77,95	78,10	78,31	78,188	78,350	78,350
density _{cell} , (g/cm ³)	0,00E+00	5,28E-03	9,87E-03	1,46E-02	1,96E-02	2,45E-02	2,96E-02	3,44E-02	3,97E-02
Z dozing awal	0,89789	0,89789	0,90364	0,90933	0,91528	0,92147	0,90596	0,91194	0,90232
Z dozing final	0,89789	0,90364	0,90933	0,91528	0,92147	0,92781	0,91194	0,91789	0,90837
Z _{cell}	1,00000	0,98656	0,97511	0,96334	0,95155	0,94012	0,92899	0,91872	0,90817
n _{inj} (mol)	0,00000	0,00447	0,00875	0,01309	0,01746	0,02181	0,02624	0,03052	0,03509
n _{unads} (mol)	-0,00006	0,00442	0,00825	0,01221	0,01635	0,02052	0,02472	0,02881	0,03319
n _{solub} (mol)	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
n _{ads} (mol)	0,00000	0,00006	0,00050	0,00087	0,00110	0,00128	0,00151	0,00170	0,00189
n _{adsqibbs} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,0291	0,2618	0,4623	0,5821	0,6754	0,8004	0,9015	0,9984
n _{absolute} (mmol/gr CNT)	0,0000	0,0296	0,2693	0,4822	0,6161	0,7257	0,8734	0,9987	1,1245

LAMPIRAN D

Representasi : $\%AAD < 1 \times \sigma \text{ exp}$
 Prediksi : $\%AAD < 2 \times \sigma \text{ exp}$ \longrightarrow Baik

$\sigma \text{ exp} = \text{error eksperimen}$ (Fitzgerald, 2005) Adsorption of methane, nitrogen, Carbondioxide, and their mixtures on wet Tiffany Coal.

Error Experiment

1. Tes Kebocoran

Hasil dari tes kebocoran, terjadi perubahan tekanan ± 1 psia. Dengan perubahan tekanan tersebut, dapat menyebabkan rata-rata error sebesar 3%.

sampel	Om-0%	Om-1%	Om-3%	Om-7%	Bar-0%	Bar-3%	Bar-7%	Bar-10%
Error (%)	3	2,9	3	3,1	2,9	3	2,8	3,2

2. Uji Volume Void

Tabel 4. 9 Tabulasi Hasil Uji Volume Void Menggunakan Gas Helium

Batubara	Ombilin				Barito				
Kandungan Air	0%	1%	3%	7%	0%	3%	7%	10%	
Massa (gram)	1,97	2,04	1,99	2,04	1,99	2,06	2,06	2,01	
Percobaan	1	13,17	13,11	12,9	13,11	13,2	13,09	13,79	13,27
	2	13,67	13,4	13,29	13,42	13,5	13,4	13,97	13,79
	3	13,84	13,62	13,57	13,62	13,65	13,59	14,01	13,91
	4	-	-	-	-	13,8	13,8	14,04	14,06
Rata-Rata	13,54	13,38	13,25	13,38	13,54	13,47	13,95	13,76	
Deviasi	0,29	0,26	0,33	0,26	0,26	0,30	0,11	0,35	

$$\text{Dimana : } s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^2}$$

Dari tabel 4.5, dapat diketahui nilai deviasi dari volume void. Dengan deviasi tersebut, dapat menyebabkan rata-rata-error sebesar

sampel	Om-0%	Om-1%	Om-3%	Om-7%	Bar-0%	Bar-3%	Bar-7%	Bar-10%
deviasi	0,29	0,26	0,33	0,26	0,26	0,30	0,11	0,35
Error(%)	4	3,7	4,2	3,7	3,6	4	3	4,3

Dari hasil percobaan:
Dengan rumus

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$$

Didapat rata-rata error experiment yaitu:

sampel	Om-0%	Om-1%	Om-3%	Om-7%	Bar-0%	Bar-3%	Bar-7%	Bar-10%
Error 1 (%)	3	2,9	3	3,1	2,9	3	2,8	3,2
Error 2 (%)	4	3,7	4,2	3,7	3,6	4	3	4,3
Error	5	4,7	5,2	4,8	4,6	5	4,1	5,4

Rata-rata error = 4,85%

Representasi : %AAD < 1 x σ_{exp}
4,2% < 4,85% Representatif

