

Adsorption Isothermal Methane Gas With Mass Flow Rate of 10 SLPM and 20 SLPM For Adsorbed Natural Gas Storage

Irfandi Pratama¹, Awaludin Martin², Nasruddin³

Laboratorium, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Riau

¹irfandipratama92@gmail.com, ²awaludinmartin01@gmail.com, ³Nasruddin@eng.ui.ac.id

ABSTRACT

The increase energy needs along with the times resulted in the availability of energy derived from fossil fuels thinning. Utilization of natural gas as a potential replacement for fossil fuels because of national gas production shows increase. Natural gas as a replacement for fossil fuels constrained in the storage process, storage is often used is compressed natural gas (CNG) and liquefied natural gas (LNG). CNG storage constrained at high pressure (20 MPa) and LNG constrained in gas liquefaction process that requires extremely low temperatures (-161.5°C). Adsorbed natural gas (ANG) is a solution to reduce the pressure in the tube of about 3,5 to 4 MPa by utilizing the process of adsorption using activated carbon. Adsorption measurement use volumetric method (isothermal) at temperatures 25°C with 10 bar pressure and variation of the mass flow rate (10 standard liter per minute and 20 standard liter per minute). The purpose of this study was to obtain data of methane (CH₄) stored and out (stuck) on the storage and also to see temperature phenomena that occur in storage. From the test results, the mass of methane stored at 10 SLPM is 33,19 gram and 20 SLPM is 43,63 gram. As for the methane gas that is stuck at 10 slpm is 7,09 gram and 20 slpm is 16,54369 gram.

Keywords: Adsorbed Natural Gas, Volumetric method, Adsorption Isothermal

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya pemakaian bahan bakar fosil dan ketidakstabilan pemasaran minyak menjadi perhatian dunia. Bahan bakar fosil yang juga mengalami penipisan disebabkan oleh tingkat perkembangan jumlah kendaraan yang tidak sebanding dengan bahan bakar fosil yang tersedia. Pada tahun 2005 peranan minyak bumi untuk kebutuhan bahan baku kilang BBM (Bahan Bakar Minyak) hasil impor sudah mencapai 40%, sedangkan peranan BBM impor untuk pemakaian dalam negeri mencapai 32% (Kadiman, 2006). Hal ini membuktikan bahwa Indonesia tidak dapat memenuhi kebutuhan BBM dalam negeri dari hasil produksi kilang dalam negeri sendiri.

Selain bahan bakar fosil mulai menipis akibat konsumsi atau kebutuhan yang meningkat, bumi menerima dampak dari penggunaan bahan bakar fosil. Sehingga tidak heran kalau tahun belakangan ini dunia dihadapi dengan berbagai masalah iklim. Pada saat proses pembakaran motor bakar akan menghasilkan energi, maka bahan bakar fosil akan melepaskan karbon ke udara. Pelepasan karbon ke udara menyebabkan polusi dan berdampak terhadap rusaknya lapisan ozon, hal ini berdampak kepada bumi yang semakin panas.

Permasalahan dari ketersediaan bahan bakar fosil pada saat ini memberikan tantangan bagi peneliti untuk mulai mencari beberapa jenis sumber energi alternatif. Dalam kajian bahan bakar

kendaraan, gas alam dianggap sebagai bahan bakar alternatif dan menghasilkan pembakaran yang lebih baik (Rahman, et al, 2010).

Pemerintah Indonesia telah membuat sebuah program konversi bahan bakar minyak ke bahan bakar gas yang dapat mengurangi besaran subsidi BBM dan mengurangi dampak polusi udara. Berdasarkan grafik *shifting role* antara produksi minyak bumi dengan gas alam, diketahui bahwa produksi gas alam dari tahun 1960 sampai sekarang mengalami peningkatan. Hal ini berbanding terbalik dengan produksi minyak bumi yang mengalami penyusutan dimulai tahun 1996 sampai sekarang (BP Migas, 2012).

Untuk dapat menampung gas alam, terdapat tiga jenis cara penyimpan yang biasa digunakan (Kumar, 2011) :

1. *Compressed natural gas* (CNG), merupakan metode kompresi gas alam yang didistribusikan di dalam wadah khusus dengan tekanan 200-280 bar, biasanya dalam bentuk wadah silinder.
2. *Liquefied natural gas* (LNG), merupakan metode pencairan gas alam dengan tekanan dibawah 10-20 bar pada temperatur $-161,5^{\circ}\text{C}$. LNG membutuhkan penggunaan peralatan *liquefaction* yang kompleks dan mahal, seperti tangki termos serta konsumsi energi yang signifikan (25-35 persen kandungan energi asli dari gas) untuk pencairan dan degasification.
3. *Adsorbed natural gas* (ANG), merupakan teknologi penyimpanan gas alam dengan cara diserap oleh adsorben berpori seperti karbon aktif pada tekanan yang relatif rendah (7-40 bar) dan pada temperatur kamar.

Dari ketiga cara penyimpanan gas alam yang telah dijelaskan, *compressed natural gas* (CNG) yang sering digunakan untuk kendaraan. *Compressed natural gas* (CNG) yang telah dikomersialisasikan di seluruh dunia terkendala dengan tekanan operasi yang tinggi (Bagheri dan Jalal, 2011). Pemakaian CNG pada kendaraan

bermotor diperlukan tabung khusus karena memiliki tekanan sekitar 200 bar, sehingga memerlukan penggunaan tabung dengan material yang harus tahan terhadap tekanan 200 bar. Dari hal tersebut konsumen kurang berminat dikarenakan kekhawatiran terhadap tekanan yang tinggi, ukuran tabung yang cukup besar dan stasiun untuk pengisian bahan bakar yang jarang ada.

Untuk mengatasi penyimpanan gas alam yang tidak bertekanan tinggi dan tidak memerlukan energi yang cukup besar, caranya adalah dengan menggunakan metode adsorpsi (penyerapan). Pada metode ANG, gas alam secara konvensional tersimpan pada bahan karbon berpori pada tekanan gas sekitar 3,5 MPa (Saes, et al, 2009). Pada sistem ANG, media untuk penyerapan gas alam dipilih menggunakan bahan dasar karbon aktif karena memiliki luas permukaan dan volume pori yang besar (Yang, 2003).

Dari beberapa jenis gas alam yang dihasilkan, metana (CH_4) merupakan gas alam yang paling layak untuk digunakan sebagai bahan bakar kendaraan. Hal ini dikarenakan gas alam juga mengandung metana sekitar 90%, harga yang murah dan memiliki pembakaran relatif bersih bila dibandingkan dengan fosil seperti bensin dan solar (Rios, et al, 2009). Penelitian lain menunjukkan komposisi metana sebagian besar 87-96% mol dan memiliki nilai kalor tertinggi per satuan massa ($50,1 \text{ MJ.kg}^{-1}$) dari bahan bakar hidrokarbon (bahan bakar diesel, butana, dan bensin) (Kumar, 2011).

Beberapa penelitian mengenai Adsorpsi isothermal dengan adsorben karbon aktif dan adsorbat metana sudah pernah dilakukan. Wang, et al (2011) melakukan penelitian mengenai adsorpsi isothermal dengan kapasitas penyerapan metana sebesar 0.1337 g/g menggunakan karbon aktif Maxsorb II dengan luas permukaan $2.768 \text{ m}^2/\text{g}$, adsorbat yang digunakan metana (ultra high purity, 99.9995%), temperatur isothermal 281,14 K dan tekanan 1,21749 MPa. Rahman, et al

(2010) melakukan penelitian mengenai adsorpsi isothermal dengan kapasitas penyerapan metana sebesar 0.771 kg/kg menggunakan karbon aktif Maxsorb III dengan luas permukaan $3.140\text{m}^2/\text{g}$, adsorbat yang digunakan metana (ultra high purity, 99.9995%), temperatur isothermal 120,12 K dan tekanan 71,27 KPa. Luo, et al (2011) melakukan penelitian mengenai adsorpsi isothermal dengan kapasitas penyerapan metana sebesar 0.13 kg/kg menggunakan karbon aktif batu bara *anthracite* dengan luas permukaan $2.071\text{m}^2/\text{g}$, adsorbat yang digunakan metana (high purity, 99.999 %), temperatur isothermal 298 K dan tekanan hingga 3,5 MPa. Rios, et al (2009) melakukan penelitian mengenai adsorpsi isothermal dengan kapasitas penyerapan metana sebesar 0.139 g/g menggunakan karbon aktif batok kelapa dengan luas permukaan $1.906\text{m}^2/\text{g}$, adsorbat yang digunakan metana, temperatur isothermal 303 K dan tekanan hingga 3,5 MPa.

Dari uraian di atas didapat bahwa sistem adsorpsi merupakan salah satu metode yang berpotensi untuk pengalihan penggunaan BBM ke BBG, sistem adsorpsi merupakan media penyimpanan bahan bakar gas yang lebih murah dibandingkan dengan CNG karena tekanan yang digunakan sampai dengan 3.5 MPa. Untuk itu perlu dilakukan penelitian adsorpsi dengan adsorbat metana dan adsorben karbon aktif, sehingga dengan penelitian ini akan mendapatkan karakteristik adsorpsi terhadap gas metana.

1.2 Rumusan Masalah

Proses adsorpsi metana (CH_4) pada karbon aktif didalam tabung dilakukan dengan tekanan maksimum sebesar 10 bar. Karbon aktif yang digunakan merupakan karbon aktif komersial. Proses adsorpsi pada karbon aktif juga dipengaruhi oleh temperatur adsorpsi. Untuk dapat melakukan pengambilan data-data yang diperlukan dalam penelitian ini maka harus

dilakukan dengan metode pengukuran volumetrik, dimana pengukuran ini menghitung kapasitas dan laju penyerapan dengan mengubah tekanan persatuan waktu pada temperatur konstan. Proses pengukuran ini disebut dengan pengukuran adsorpsi isothermal. Dengan alat uji adsorpsi-desorpsi kapasitas penyerapan dan karakteristik karbon aktif dalam menyerap metana akan dapat diketahui.

1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam penelitian ini tidak meluas, maka diberi beberapa batasan. Adapun batasan-batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- 1) Adsorben yang digunakan pada pengujian adsorpsi isothermal adalah karbon aktif komersial dan adsorbat yang digunakan adalah metana (CH_4).
- 2) Tekanan maksimum pada pengujian adsorpsi adalah sebesar 10 bar.
- 3) Temperatur isothermal pada pengujian, yaitu 25°C .
- 4) Laju aliran massa gas metana 10 SLPM dan 20 SLPM.

1.4 Tujuan

Tujuan umum penelitian ini adalah mengetahui karakteristik adsorpsi isothermal gas metana (CH_4) dengan kemurnian 99,999 % pada karbon aktif komersial berbahan dasar batu bara dengan metode volumetrik dengan variasi tekanan.

Tujuan khusus dari penelitian ini adalah :

- 1) Mendapatkan total massa gas metana yang tersimpan dan tersangkut pada *storage* yang berisi karbon aktif berbahan dasar batu bara dengan tekanan 10 bar pada temperatur 25°C laju aliran massa gas metana 10 SLPM dan 20 SLPM.
- 2) Mengetahui karakteristik kenaikan dan penurunan temperatur pada tabung saat proses adsorpsi dan desorpsi pada saat temperatur isothermal 25°C .

1.5 Manfaat

Dari hasil penelitian pengujian penyerapan hidrogen pada karbon aktif akan berguna dan bermanfaat pada hal-hal berikut :

- 1) Sebagai data karakteristik penyimpanan gas metana pada karbon aktif yang dapat digunakan untuk mengetahui seberapa besar total massa yang dapat terisi pada *storage*.
- 2) Mengetahui desain tabung yang optimal dan baik untuk digunakan sebagai penyimpanan gas metana menggunakan metode *Adsorbed Natural Gas*.
- 3) Dengan penelitian *adsorbed natural gas* ini pemerintah hendaknya dapat melirik metode penyimpanan gas yang lebih murah dan aman dibandingkan dengan sistem distribusi BBG pada saat ini yang menggunakan *compressed natural gas*.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Gas Alam

Gas alam sering juga disebut sebagai gas bumi atau gas rawa yang mengandung metana sekitar 90% (Rios, et al, 2009). Gas ini ditemukan di ladang minyak, ladang gas bumi dan juga tambang batu bara. Ketika gas yang kaya dengan metana diproduksi melalui pembusukan oleh bakteri *anaerobik* dari bahan-bahan organik selain fosil, maka disebut biogas. Gas alam juga telah menjadi alternatif sebagai pengganti bahan bakar konvensional, hal ini disebabkan harga yang murah dan ramah lingkungan (Bagheri dan Jalal, 2011). Namun, Gas alam bukanlah merupakan energi yang terbarukan, tetapi masih tersedia sangat banyak dan digunakan dalam potensi energi (Rios, et al, 2009).

2.2 Penyimpanan Gas Alam

Pada penyimpanan gas alam terdiri dari tiga metode penyimpanan, yaitu : *liquefied natural gas* (LNG), *compressed natural gas* (CNG), dan *adsorbed natural gas* (ANG) (Salehi, et al, 2007). Dari ketiga jenis metode penyimpanan gas

alam, LNG dan CNG memiliki permasalahan baik dari segi penyimpanan atau biaya yang akan dikeluarkan pengguna. Pada kasus CNG, membutuhkan tekanan diatas 25 Mpa untuk digunakan sebagai bahan bakar gas alam dan transportasi (Salehi, et al, 2007). Selain itu dibutuhkan juga tabung penyimpan gas alam yang mampu menahan tekanan tinggi. Untuk sistem LNG membutuhkan fasilitas kriogenik yang mahal, yang membuatnya tidak ekonomis untuk digunakan sebagai bahan bakar kendaraan (Salehi, et al, 2007).

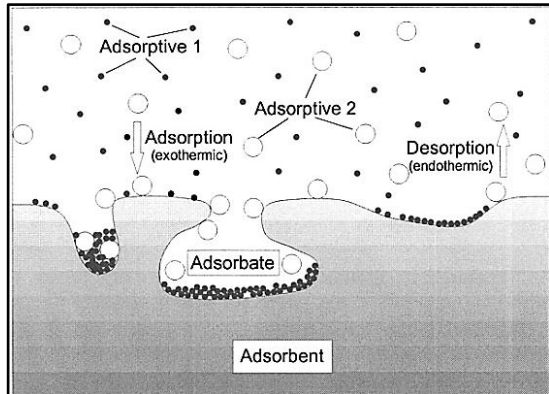
Namun, ANG dapat dijadikan alternatif sebagai penyimpanan gas alam yang aman dan relatif murah. Pada metode ANG, gas alam disimpan pada bahan karbon berpori pada tekanan gas sekitar 3,5 MPa (Saes, et al, 2009). Sehingga dengan metode ANG gas alam disimpan pada kondisi tekanan yang rendah sehingga tidak membutuhkan tabung khusus seperti CNG. Adsorben yang baik untuk penyimpanan gas alam adalah memiliki mikropori yang tinggi dan *packing density* yang tinggi (Bagheri dan Jalal, 2011).

2.3 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan fenomena penempelan molekul gas atau cairan ke permukaan material yang solid (Keller, et al, 2005). Molekul-molekul tersebut mampu menempel pada adsorben akibat adanya gaya kohesif termasuk gaya hidrostatis dan gaya ikatan hidrogen yang bekerja diantara molekul seluruh material di permukaan adsorben dan adanya gaya Van Der Waals pada atom-atom molekul gas alam.

Proses penyerapan diklasifikasikan menjadi dua, yaitu proses penyerapan secara fisika yang disebut dengan "adsorpsi" dan proses penyerapan secara kimia yang disebut dengan "absorpsi". Adsorpsi secara fisika yaitu proses penyerapan dengan menggunakan adsorben karbon aktif, silika gel, atau zeolit pada saat ini banyak digunakan

untuk proses separasi dan pemurnian gas alam (Ruthven, 1984). Sedangkan Adsorpsi adalah molekul gas atau cairan yang larut pada bahan cair atau padat (Keller, et al, 2005).



Gambar 1. Penamaan pada Proses Adsorpsi dan Desorpsi (Keller, et al, 2005)

2.4 Adsorben dan Adsorbat

2.4.1 Adsorben

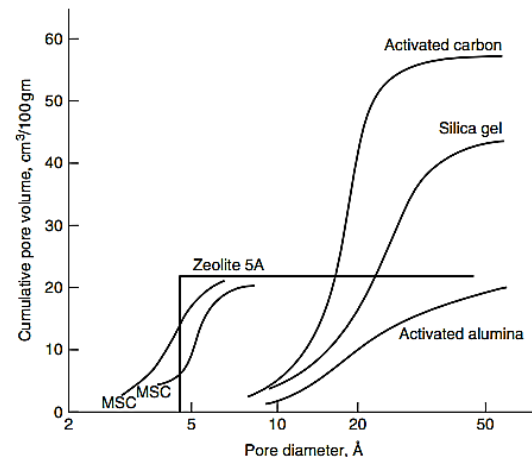
Adsorben atau material penyerap adalah fasa padat yang memiliki permukaan luar dan dalam yang berinteraksi dengan molekul gas atau liquid (Keller, et al, 2005). Menurut Suzuki (1990), adsorben memiliki dua tipe yaitu polar dan non-polar. Adsorben polar disebut juga dengan *hydrophilic*, adsorben yang mengikat molekul polar, seperti air. Jenis adsorben ini adalah silica gel, porous alumina, dan zeolite. Adsorben non-polar lebih dapat mengikat oli atau gas dibandingkan air, disebut dengan *hydrophobic*, contohnya karbon aktif dan adsorben polimer.

Adsorben yang direkomendasikan oleh *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) harus memiliki kriteria sebagai berikut (Do, 2008):

- Memiliki luas permukaan atau volume mikropori yang tinggi.
- Memiliki jaringan pori (mesopori) yang besar sehingga molekul gas atau adsorbat dapat masuk ke bagian dalam adsorben.

Tabel 1. Diameter dan Jenis Pori pada Adsorben

Diameter Pori (nm)	Jenis Pori	Referensi
$d < 2$	Mikropori	Do (2008)
$2 < d < 50$	Mesopori	Do (2008)
$d > 50$	Makropori	Do (2008)



Gambar 2. Distribusi Ukuran Pori pada Karbon Aktif, Silica Gel, Alumina Aktif, 2 Jenis *Molecular-Sieve Carbons* (MSC), Dan Zeolite 5A (Yang, 2003)

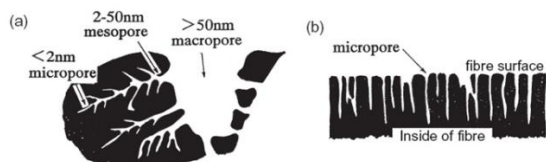
2.4.2 Adsorbat

Adsorbat merupakan molekul-molekul yang menempel pada permukaan adsorben yang berbentuk cairan atau gas. Adsorbat yang biasa digunakan pada sistem pendingin adalah air yang merupakan kelompok *polar substance* dan kelompok non-polar substance seperti methanol, ethanol dan kelompok hidro karbon (Suzuki, 1990).

2.5 Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan suatu padatan karbon amorf yang sebagian besarnya mengandung karbon bebas serta memiliki permukaan dalam sehingga mempunyai daya serap yang baik. Pada dasarnya ada dua metode aktivasi untuk mempersiapkan karbon aktif, yaitu fisika dan kimia. Metode fisika terdiri dari karbonisasi dan aktivasi bahan baku (biasanya bahan lignoselulosa) dengan pemberian aliran fluida pada temperatur tinggi, fluida yang paling umum dalam aktivasi fisika adalah uap air (steam) dan

karbon dioksida (Rios, et al, 2009). Pada aktivasi kimia, bahan baku menyerap bahan kimia seperti ZnCl_2 , H_3PO_4 , KOH dan NaOH yang dipanaskan hingga 450 - 800°C (Rios, et al, 2009). Unsur dari komposisi karbon aktif terbagi menjadi menjadi 88% Karbon, 0,5% Hidrogen, 0,5% Nitrogen, 1% Sulfur, dan 6 sampai 7% Oksigen (Bansal,et al, 2005). Karbon aktif memiliki kandungan karbon dari 85% sampai dengan 95 %, dihasilkan dari bahan-bahan yang mengandung karbon dengan pemanasan pada suhu tinggi (Bansal,et al, 2005). Adsorben karbon aktif yang paling banyak digunakan memiliki luas permukaan spesifik 800 sampai 1500 m^2/g dan volume pori 0,20-0,60 cm^3/g .



Gambar 3. Struktur Karbon Aktif :
(a) *granul*, (b) *fiber* (Manocha, 2003)

2.6 Metana (CH_4)

Metana merupakan komponen terbesar yang terkandung dalam gas alam dan termasuk ikatan hidrokarbon. Produksi gas alam yang dihasilkan adalah 90 % metana, sehingga metana merupakan produk gas alam yang paling banyak digunakan (Rios, et al, 2009). Saat temperatur dan tekanan atmosfer, metana berupa fase gas, tidak berwarna, tidak berbau namun mudah terbakar (*flammable*). Dengan karakteristik yang dimiliki metana berpotensi menjadi bahan bakar pengganti bahan bakar minyak bumi untuk kendaraan, oleh karena itu dikembangkan metode penyimpanan yang efisien seperti ANG. Untuk penyimpanan metana dengan ANG menggunakan padatan anorganik seperti zeolit memiliki kinerja yang lebih rendah dibandingkan karbon aktif (Wang, et al, 2011).

Tabel 2. Karakteristik Metana (CH_4)

Berat Molekul (G/Mol)	Titik Didih (K)	Temperatur Kritis (K)	Tekanan Kritis (MPa)	Massa Jenis Kritis (g/cm^3)	Referensi
16.04	112	191	4.6	0.16	Castello, et al, (2002)

2.7 Adsorpsi Equilibrium

Terdapat 3 pendekatan adsorpsi equilibrium :

1. Adsorpsi Isotermal

Adsorpsi isotermal dilakukan dengan menjaga konstan temperatur, sehingga reaksi antara adsorbat dan adsorben x/m bergantung pada tekanan equilibrium, berikut persamaan yang digunakan (Bansal, et al, 2005).

$$\frac{x}{m} = f(p) \quad [T = \text{konstan}]$$

2. Adsorpsi Isobar

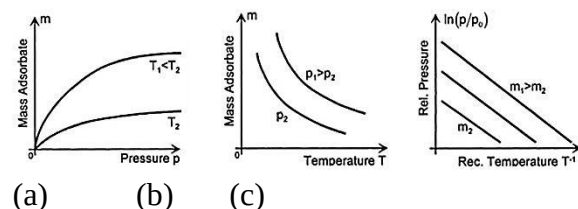
Adsorpsi isobar yang dijaga konstan adalah tekanan, temperatur divariasikan, sehingga x/m adalah (Bansal, et al, 2005).

$$\frac{x}{m} = f(T) \quad [p = \text{konstan}]$$

3. Adsorpsi Isosterik

Adsorpsi isosterik dapat diperoleh ketika x/m konstan, temperatur divariasikan dan tekanan menjadi fungsi esensial untuk menjaga x/m konstan adalah (Bansal, et al, 2005).

$$p = f(T) \quad \left[\frac{x}{m} = \text{konstan} \right]$$



Gambar 4. (a) Grafik Adsorpsi Isotermal
(b) Grafik Adsorpsi Isobar (c) Grafik Adsorpsi Isosterik (Keller, et al, 2005)

2.8 Metode Pengukuran Adsorpsi

Terdapat empat metode pengukuran penyerapan adsorpsi, yaitu : metode *carrier gas*, metode volumetrik, metode

gravimetrik dan kalorimetrik. Empat metode pengukuran penyerapan adsorpsi tersebut telah digunakan diberbagai negara dan telah diakui secara internasional (Keller, et al, 2002). Namun, pengukuran yang sering digunakan yaitu secara volumetrik dan gravimetrik.

2.8.1 Metode volumetrik

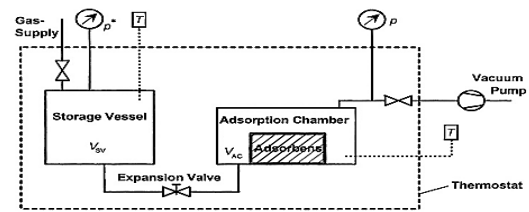
Pengukuran dengan menggunakan metode volumetrik merupakan metode pengukuran yang sering digunakan, hal ini dikarenakan hanya membutuhkan alat ukur tekanan dan temperatur yang dapat memberikan informasi pada saat proses adsorpsi serta dapat memberi informasi dari volume efektif sistem yang digunakan (Rouquerol, et al, 1999).

Dalam metode volumetrik, pengukuran dilakukan untuk mendapatkan temperatur dan tekanan di dalam vessel. Pada skematik Gambar 5 terdapat dua vessel yaitu *storage vessel* dan *adsorption chamber* dihubungkan oleh sebuah katup. *Storage vessel* berguna untuk penyimpanan gas sementara yang tekanan dan temperaturnya dapat diatur. Kemudian *adsorption chamber* terdapat adsorben untuk adsorpsi gas. Katup dibuka gas mengalir dari *storage vessel* ke *adsorption chamber*, terjadi penurunan tekanan dan kenaikan temperatur menandakan terjadinya adsorpsi. Setelah kesetimbangan tercapai, didapatkan temperatur dan tekanan stabil, massa gas teradsorpsi dapat dihitung.

Adapun yang harus diperhatikan pada pengukuran adsorpsi isothermal dengan metode volumetrik adalah, sebagai berikut (Keller, et al, 2002) :

1. Pada pengujian volume efektif dari alat uji harus diketahui.
2. Temperatur gas yang menjadi adsorbat harus dapat terukur oleh alat uji.
3. Keakuratan alat uji untuk mengukur perubahan tekanan pada metode volumetrik adalah hal yang utama.
4. Kesetimbangan adsorpsi terjadi apabila tekanan relatif mencapai $p/p_0 = 1$, maka pengukuran berakhir.

5. Untuk mengetahui adsorbat yang terserap dapat digunakan persamaan gas ideal.

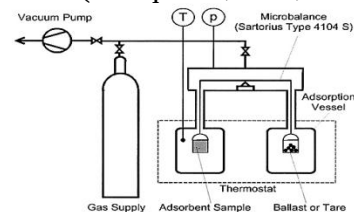


Gambar 5. Set-Up Eksperimen Volumetrik (Keller, et al, 2005)

2.8.2 Metode gravimetrik

Pengukuran adsorpsi dengan metode gravimetrik digunakan untuk menentukan karakteristik pori-pori adsorben, mengukur persamaan adsorpsi gas, dan adsorpsi kinetik (Keller, J.U et al, 2005). Dalam metode gravimetrik, perubahan berat sampel adsorben pada medan gravitasi akibat adsorpsi dari fase gas yang kemudian akan terekam (Kumar, 2011). Alat yang digunakan untuk mengukur adsorpsi isothermal adalah *Thermograph Microbalance Aparatus* (TGA) (Rouquerol, et al, 1998).

Preparasi sampel pengujian menggunakan metode gravimetrik mutlak dilakukan untuk mendapatkan pengujian yang optimum. Preparasi sampel dilakukan dengan *degassing* sampel untuk mendapatkan massa kering sampel serta temperatur, tekanan dan waktu untuk mendapatkan data pengujian yang valid (Keller, et al, 2002). Alat uji adsorpsi menggunakan metode gravimetrik membutuhkan investasi yang cukup besar, karena untuk memiliki TGA dengan keakurasian tinggi harus menyediakan jutaan dollar (Rouquerol, et al, 1998).



Gambar 6. Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Two Beam Balance* (Keller, et al, 2005)

2.9 Aliran Massa Standard Liter Per Minute (SLPM)

Standard Liter Per Minute (SLPM) merupakan pengukuran aliran berdasarkan kondisi temperatur dan tekanan standar, yaitu 1 atm (14,696 psi) dan 294,26 K (70°F). Untuk mendapatkan hasil konversi dari SLPM ke Liter Per Minute (LPM) adalah sebagai berikut :

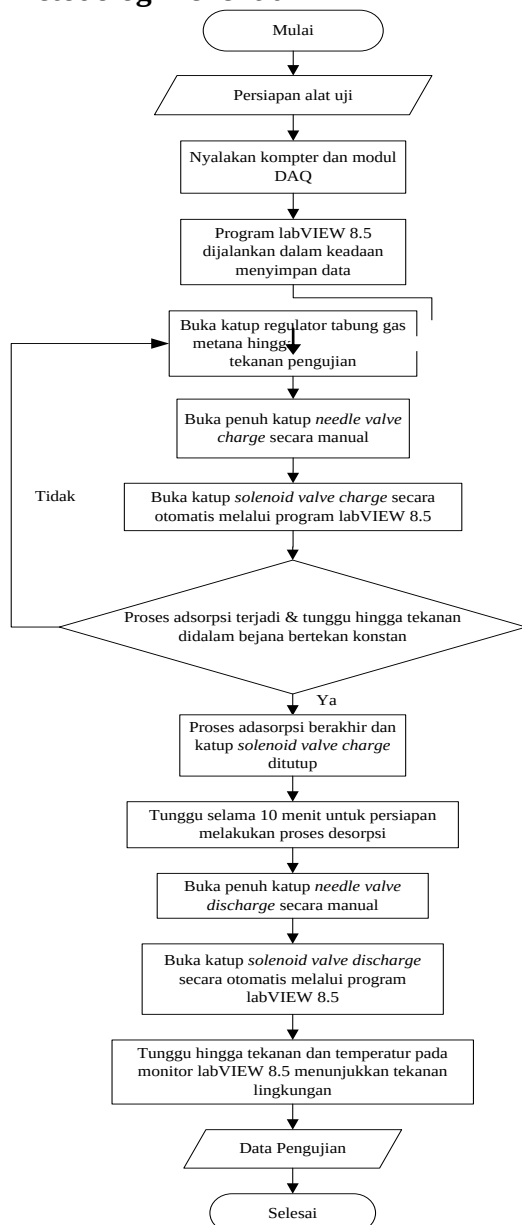
$$F[LPM] = \frac{F[SLPM]}{\left(\frac{294,26}{T_{gas}}\right) \times \left(\frac{P_{gas}}{14,696}\right)}$$

Keterangan:

T_{gas} : Temperatur gas (K)

P_{gas} : Tekanan gas (psi)

3. Metodologi Penelitian



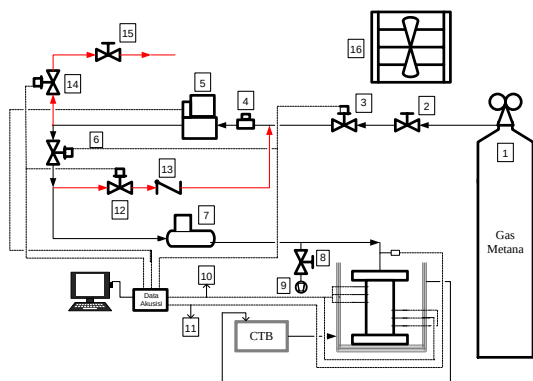
Gambar 7. Diagram Alir Alat Uji Adsorpsi-Desorpsi Metana

Penelitian alat uji adsorpsi-desorpsi metana ini menggunakan adsorben karbon aktif berbahan dasar batubara dan dalam prosesnya dilakukan satu siklus (adsorpsi-desorpsi) yang terbagi menjadi empat tahap, diantaranya :

1. Tahap preparasi, atau tahap persiapan. Pada tahap ini juga dilakukan proses *dry sorbent* dan *degassing* terhadap karbon aktif yang terdapat didalam *pressure vessel*.
2. Tahap adsorpsi, atau tahap *charging*. Pada tahap ini gas metana (CH_4) sebagai adsorbat, dimasukkan ke dalam *pressure vessel* sampai pada tekanan 30 bar. Selama proses adsorpsi terjadi kenaikan temperatur didalam *pressure vessel*. Tahap ini berakhir ketika tekanan pada *pressure vessel* mencapai 30 bar, aliran massa kembali 0 SLPM, dan temperatur pada *pressure vessel* kembali ke keadaan semula sesuai dengan temperatur pada CTB (isothermal).
3. Tahap desorpsi, atau tahap *discharging*. Pada tahap ini gas metana yang ditekan 30 bar didalam *pressure vessel* dibuang ke lingkungan. Selama proses terjadi temperatur akan mengalami penurunan hingga mencapai temperatur dibawah 0°C. Tahap ini berakhir ketika tekanan pada *pressure vessel* kembali ke tekanan awal, $P_0 = 1$ bar, aliran massa kembali 0 SLPM.

Tahap akhir. Jika siklus dilakukan terus menerus secara berkelanjutan, setelah tahap desorpsi selesai kembali ke tahap awal, langsung dilakukan proses *degassing*.

Berikut skematik dari alat uji adsorpsi-desorpsi metana :



Gambar 8. Skematik Sistem Adsorpsi dan Desorpsi

Keterangan Gambar 8:

1. Tabung gas metana
2. Katup pengontrol aliran
3. Solenoid valve
4. Saringan gas (filter)
5. Pengatur laju aliran
6. Solenoid valve
7. Coriolis mass flow meter (CMF)
8. Katup vakum
9. Pompa vakum
10. Termokopel
11. Pressure Transmitter
12. Solenoid valve
13. Check valve
14. Solenoid valve
15. Ball valve
16. Exhaust fan

3.1 Dry Sorbent

Sebelum dilakukan pengujian adsorpsi isothermal, berat kering adsorben atau karbon aktif harus diketahui terlebih dahulu. Proses untuk mengetahui berat kering adsorben disebut juga dengan *dry sorbent*, yaitu karbon aktif yang akan digunakan dihilangkan substansi yang terkandung pada adsorben tersebut dan dalam hal ini kandungan yang dihilangkan adalah uap air.

Berikut prosedur yang digunakan untuk mengetahui berat kering pada proses *dry sorbent*:

1. Karbon aktif yang akan dipanaskan ditimbang dengan timbangan dengan tingkat kepresisian tinggi untuk mendapatkan berat awal sampel.

Timbangan yang digunakan adalah timbangan dengan merk AND tipe FX 4000 dengan ketelitian 0,01 dan maksimum beban 4100 g. Gambar timbangan dapat dilihat pada gambar 1.

2. Heater dan temperatur *controller* digunakan untuk memanaskan karbon aktif serta menjaga temperatur agar terjaga konstan, yaitu sekitar 200 °C, selama dua jam.
3. Selama pemanasan dilakukan pengadukan agar pemanasan merata ke seluruh permukaan karbon aktif.
4. Diharapkan temperatur di permukaan karbon aktif berkisar antara 95 – 100 °C, karena air yang terkandung sudah menguap.
5. Massa karbon aktif yang telah dipanaskan ditimbang untuk mengetahui pengurangan dari massa awal, dan massa akhirnya yang digunakan untuk penelitian.
6. Karbon aktif yang telah dipanaskan & diketahui berat keringnya dimasukkan ke dalam *measuring cell*.

3.2 Degassing

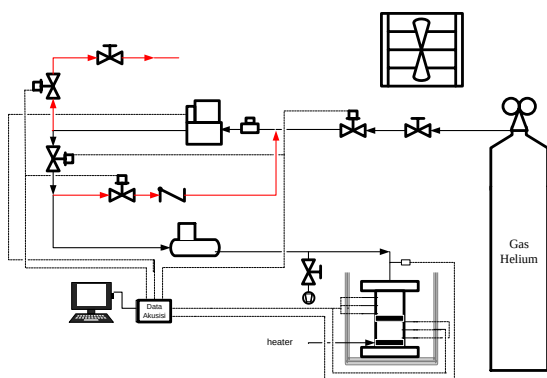
Proses *degassing* adalah suatu proses pengeluaran zat pengotor atau zat yang tidak diinginkan sehingga tidak ada zat yang tersimpan didalam karbon aktif.

Berikut prosedur yang digunakan untuk proses *degassing*:

1. Tangki *measuring cell* dipanaskan dengan dililit pemanas (heater) pada temperatur 140 - 150 °C selama ½ jam (Rahman, et al, 2010).
2. Tangki divakum dengan menggunakan pompa vakum selama 1 ½ jam.
3. Tangki diisi gas Helium hingga tekanan mencapai 0,3 – 0,4 Mpa. Diamkan tangki selama 1 - 1 ½ jam. Molekul helium yang sangat kecil, dapat masuk ke pori-pori adsorben dan mendorong substansi/zat pengotor yang masih terdapat di pori-pori karbon aktif untuk keluar.
4. Tangki divakum kembali hingga tekanan mendekati ≈ 0 mbar dengan menggunakan pompa vakum selama ½

jam. Dalam proses pemvakuman ini semua zat pengotor yang tidak diinginkan termasuk gas Helium akan terbuang ke lingkungan sehingga kondisi didalam tabung dan karbon aktif tidak ada lagi sisa-sisa zat pengotor yang tidak diinginkan.

- Keempat langkah tersebut dilakukan sebanyak empat kali, diharapkan tidak terdapat substansi di seluruh pori-pori adsorben. Selama langkah degassing, tangki terus dipanaskan pada temperatur 150°C .



Gambar 9. Skematik Proses Degassing

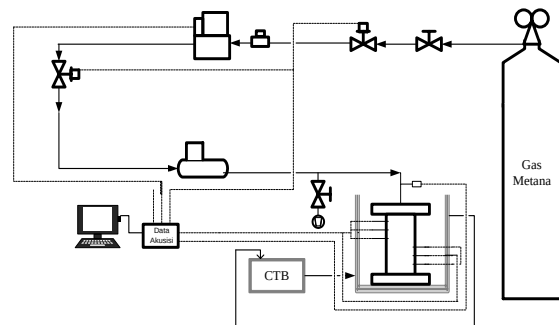
3.3 Proses Adsorpsi

Adapun prosedur pengujian karakteristik adsorpsi isothermal adalah seperti berikut :

- Pengujian adsorpsi isothermal dimulai dengan melakukan proses *degassing*.
- Circulating thermal bath* (CTB) dioperasikan untuk menjaga temperatur *pressure vessel* agar tetap konstan pada temperatur $25 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$.
- Setelah temperatur 25°C pada *pressure vessel* tercapai dan konstan, *solenoid valve charge* dibuka dengan kendali data akuisisi dari komputer sehingga adsorbat (CH_4) masuk menuju *pressure vessel*. Apabila *measuring cell* sudah melebihi batas tekanan 3 Mpa, maka *solenoid valve charge* akan tertutup dengan kendali data akuisisi dari komputer.
- Pengambilan data penyerapan dimulai ketika tekanan dan temperatur pada *pressure vessel* dalam keadaan tidak

stabil karena terjadi kenaikan tekanan disertai dengan kenaikan temperatur. Dan apabila tekanan dan temperatur stabil berarti proses adsorpsi sudah berakhir.

Setelah proses pengujian adsorpsi isothermal selesai dilakukan, data tekanan, dan temperatur ketika pengujian akan tercatat pada komputer berdasarkan data yang ditangkap oleh data akuisisi.

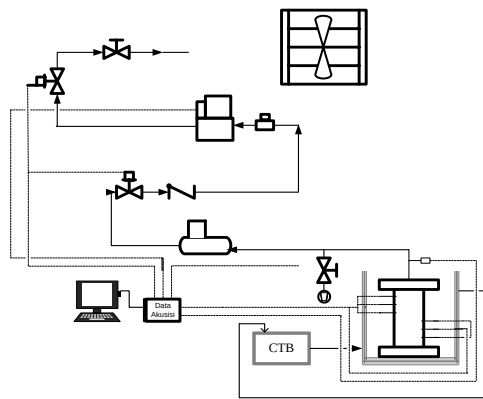


Gambar 10. Skematik Proses Adsorpsi

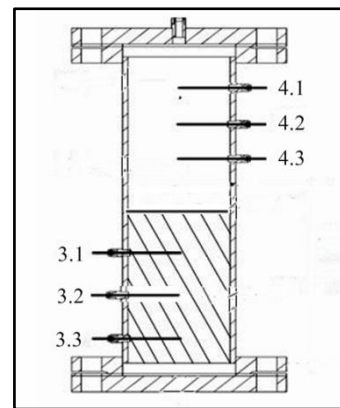
3.4 Proses Desorpsi

Adapun prosedur pengujian karakteristik desorpsi isothermal adalah sebagai berikut :

- Katup *solenoid valve discharging* dibuka dan gas metana (CH_4) akan mengalir dari *pressure vessel* kemudian melewati *coriolis flow meter* sehingga dapat diketahui massa yang keluar dari *pressure vessel*.
- Exhaust fan* yang telah dinyalakan akan membantu proses keluaran gas metana dari pipa *outlet* ke luar ruangan pengujian, gas yang terbuang merupakan gas metana yang tidak terserap oleh karbon aktif.
- Setelah tekanan pada *pressure vessel* turun dan stabil, berarti proses desorpsi sudah selesai. Pada saat proses pembuangan disertai dengan penurunan temperatur, hal ini merupakan proses *endotherm*.



Gambar 11. Skematik Proses Desorpsi



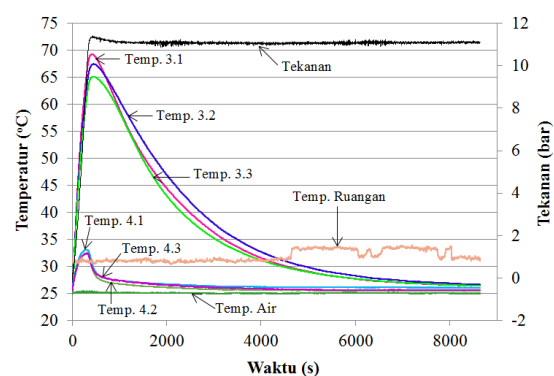
Gambar 12. Tata Letak Termokopel Pada Tabung

4. Hasil dan Pembahasan

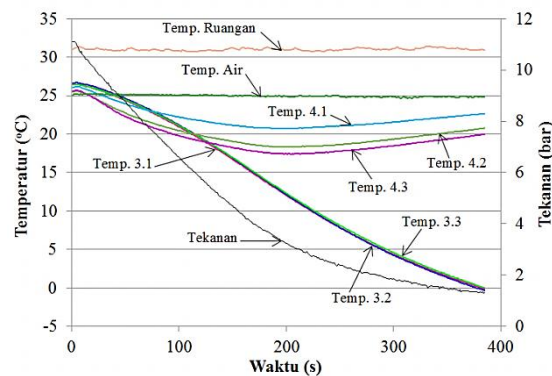
4.1 Hasil

Pada penelitian adsorpsi-desorpsi isothermal gas metana ini, bertujuan untuk mengetahui massa gas metana yang masuk dan yang keluar pada tabung penyimpanan (storage). Pada pengambilan data dilakukan pemvariasian massa gas metana yang mengalir ke tabung penyimpanan, yaitu 10 SLPM dan 20 SLPM. Dengan pemberian perlakuan yang berbeda, nantinya akan diketahui perbedaan antara massa yang masuk ke tabung penyimpanan dan masa yang keluar atau tersangkut dengan adanya pemvariasian aliran massa gas metana.

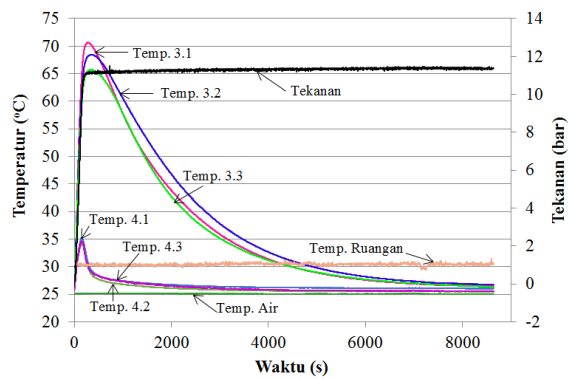
Proses pengambilan data diawali dengan mengkondisikan sistem berada keadaan isothermal pada *pressure vessel* (bejana bertekanan) pada temperatur 25°C dengan nilai toleransi $\pm 0,1^\circ\text{C}$ dan juga pada tekanan pengukuran yang akan dilakukan yaitu 10 bar. Grafik data adsorpsi-desorpsi gas metana dengan pemvariasian laju aliran massa gas metana 10 SLPM dan 20 SLPM ditampilkan pada Gambar 13 hingga Gambar 16.



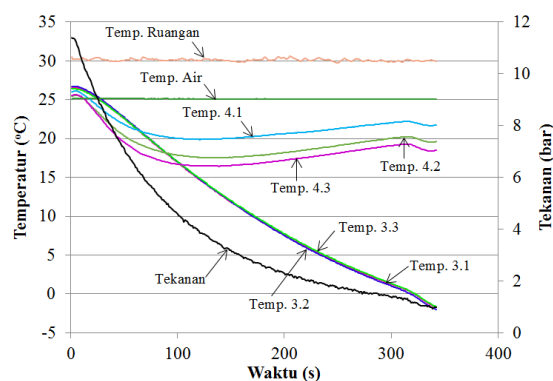
Gambar 13. Grafik Hubungan Antara Waktu dengan Temperatur dan Tekanan Proses Adsorpsi (10 SLPM & 10 bar).



Gambar 14. Grafik Hubungan Antara Waktu dengan Temperatur dan Tekanan Proses Desorpsi (10 SLPM & 10 bar)



Gambar 15. Grafik Hubungan Antara Waktu dengan Temperatur dan Tekanan Proses Adsorpsi (20 SLPM & 10 bar)



Gambar 16. Grafik Hubungan Antara Waktu dengan Temperatur dan Tekanan Proses Desorpsi (20 SLPM & 10 bar)

4.2 Pembahasan

Dari grafik yang didapat maka dapat dianalisis satu per satu untuk mengetahui fenomena yang terjadi. Pada Gambar 13, grafik diatas terlihat bahwa tekanan yang diinginkan tidak sesuai dengan tekanan kerja yang seharusnya 10 bar, melainkan tekanan yang ditunjukkan pada grafik adalah 11 bar. Hal ini dikarenakan faktor dari pengaturan regulator yang sulit untuk mendapatkan tekanan kerja yang diinginkan. Pada proses masuknya gas metana, tekanan cenderung naik lebih besar dari 11 bar yang dikarenakan belum terjadinya penyerapan dan hal ini disebabkan oleh temperatur pada saat awal masuk gas metana yang masih tinggi. Sedangkan kecenderungan turun dikarenakan terjadi proses adsorpsi pada adsorben dimana pada saat itu temperatur perlahan turun ke temperatur

isothermal. Bila tekanan konstan 11 bar menandakan proses adsorpsi berakhir.

Dari gambar 13 juga terlihat bahwa termokopel 3.1, 3.2 dan termokopel 3.3 menunjukkan kenaikan temperatur yang berbeda-beda $\pm 69^{\circ}\text{C}$, $\pm 67^{\circ}\text{C}$ dan $\pm 65^{\circ}\text{C}$ yang menandakan terjadinya pembuangan kalor (eksoterm) akibat adsorpsi, serta penurunan temperatur yang berbeda pula. Kenaikan temperatur yang berbeda pada ketiga termokopel dikarenakan jarak antar termokopel yang berbeda-beda. Termokopel 3.1 mengalami kenaikan temperatur yang paling tinggi yang disebabkan oleh langsungnya terjadi penyerapan. Faktor lainnya adalah karena karbon aktif berada paling atas memudahkan gas metana untuk terjadi proses adsorpsi pada adsorben. Dan penurunan temperatur yang lebih cepat karena termokopel 3.1 berada dekat dengan bagian dalam tabung yang tidak terisi karbon aktif yang temperaturnya lebih rendah. Termokopel 3.2 kenaikan temperaturnya tertinggi kedua, karena jumlah gas metana yang menuju karbon aktif pada termokopel 3.2 lebih sedikit dan terhalang oleh karbon aktif bagian atasnya sehingga penyerapannya tidak sebanyak karbon aktif bagian atas. Untuk penurunan temperatur termokopel 3.2 lebih lambat karena proses adsorpsi yang lebih lambat dibandingkan karbon aktif pada termokopel 3.1 sehingga penurunan temperatur lebih lambat. Termokopel 3.3 mengalami kenaikan temperatur paling kecil karena adsorben yang banyak menumpuk diatas akan menghambat proses adsorpsi, sehingga proses eksoterm tidak terlalu besar dan penurunan temperaturnya lebih cepat dibandingkan termokopel 3.1 dan 3.2.

Pada bagian ruangan tabung yang tidak berisi karbon aktif menunjukkan kenaikan dan penurunan temperatur termokopel 4.1, 4.2, dan 4.3 yang cenderung sama $\pm 33^{\circ}\text{C}$. Kenaikan temperatur pada bagian ini dikarenakan adanya kenaikan tekanan dan kalor yang dikeluarkan karbon aktif pada saat

adsorpsi. Bila temperatur pada setiap termokopel mencapai suatu titik temperatur yang sama/konstan maka menandakan proses adsorpsi berakhir.

Dari Gambar 14 yang merupakan grafik proses desorpsi terlihat bahwa tekanan turun secara perlahan sesuai dengan aliran massa, yakni 10 SLPM. Tekanan turun dari tekanan konstan 11 bar dikarenakan tekanan yang berada didalam tabung dikeluarkan hingga tekanan didalam tabung sama dengan tekanan lingkungan sehingga hal itu menandakan proses desorpsi berakhir.

Dari Gambar 14 terlihat juga bahwa termokopel 3.1, 3.2 dan termokopel 3.3 menunjukkan terjadinya penurunan temperatur karbon aktif yang cenderung sama, dari temperatur $\pm 26^{\circ}\text{C}$ ke temperatur $\pm 0^{\circ}\text{C}$. Hal ini terjadi karena adanya reaksi endoterm atau penyerapan energi dari luar. Termokopel 4.2 dan 4.3 terjadi penurunan temperatur lebih besar dibandingkn termokopel 4.1, ini disebabkan termokopel 4.2 dan 4.3 masih dekat dengan karbon aktif yang temperaturnya lebih rendah dan mempengaruhi kedua termokopel tersebut.

Dari grafik pada Gambar 15 juga terlihat bahwa termokopel 3.1, 3.2 dan termokopel 3.3 menunjukkan kenaikan temperatur yang berbeda-beda $\pm 71^{\circ}\text{C}$, $\pm 68^{\circ}\text{C}$ dan $\pm 65^{\circ}\text{C}$ yang menandakan terjadinya pembuangan kalor (eksoterm) akibat adsorpsi, serta penurunan temperatur yang berbeda pula. Apabila dibandingkan antara grafik pada Gambar 15 dan Gambar 13, kenaikan temperatur karbon aktif pada saat aliran massa 20 SLPM lebih tinggi dibandingkan 10 SLPM. Fenomena ini terjadi karena pada saat alirannya lebih besar, maka semakin banyak adsorbat keluar masuk adsorben hingga mencapai kesetimbangan yang akan menghasilkan kalor. Oleh karena itu temperatur karbon aktif pada saat 20 SLPM lebih tinggi dibandingkan dengan 10 SLPM.

Pada bagian ruangan tabung yang tidak berisi karbon aktif pada Gambar 15 menunjukkan kenaikan dan penurunan temperatur termokopel 4.1, 4.2, dan 4.3 yang cenderung sama $\pm 33^{\circ}\text{C}$. Kenaikan temperatur pada bagian ini dikarenakan adanya kenaikan tekanan dan kalor yang dikeluarkan karbon aktif pada saat adsorpsi. Bila temperatur pada setiap termokopel mencapai suatu titik temperatur yang sama/konstan maka menandakan proses adsorpsi berakhir. Apabila dibandingkan antara grafik pada Gambar 15 dan Gambar 13 kenaikan temperatur ruangan tabung yang tidak berisi karbon aktif pada saat aliran massa 20 SLPM dan 10 SLPM cenderung sama $\pm 33^{\circ}\text{C}$. Bila temperatur pada setiap termokopel mencapai suatu titik temperatur yang sama/konstan maka menandakan proses adsorpsi berakhir.

Pada gambar 16 terlihat bahwa termokopel 3.1, 3.2 dan termokopel 3.3 menunjukkan terjadinya penurunan temperatur karbon aktif yang cenderung sama, dari temperatur $\pm 26^{\circ}\text{C}$ ke temperatur $\pm -2^{\circ}\text{C}$. Hal ini terjadi karena adanya reaksi endoterm atau penyerapan energi dari luar. Termokopel 4.2 dan 4.3 terjadi penurunan temperatur lebih besar dibandingkn termokopel 4.1, ini disebabkan termokopel 4.2 dan 4.3 masih dekat dengan karbon aktif yang temperaturnya lebih rendah dan mempengaruhi kedua termokopel tersebut. Pada saat detik ke 320 terjadi penurunan temperatur kembali, fenomena ini terjadi karena pada awal desorpsi katup discharge kurang sempurna terbuka. Tekanan yang besar menyebabkan arus yang berfungsi untuk membuka katup solenoid tidak mampu membuka sempurna, namun ketika tekanan sudah 1,5 bar solenoid kembali terbuka sempurna.

Selain mendapatkan grafik hubungan antara waktu dengan temperatur dan tekanan proses adsorpsi dan desorpsi, penelitian ini juga mendapatkan data massa total metana yang masuk ke *storage* dan tersangkut) pada karbon aktif. berikut

data total massa yang dapat dilihat pada Tabel 4.1 :

Tabel 3. Total Massa Yang Masuk dan Tersangkut Pada *Storage*.

P (bar)	T (°C)	Laju Aliran (SLPM)	Total Massa (g)	Massa Tersangkut (g)	g/g
11	25	10	33,196	7,092	0,049
11,2	25	20	43,631	16,543	0,064

g/g : Massa adsorbat/massa karbon aktif

Dari data diatas terlihat bahwa massa metana yang masuk ke tabung lebih banyak dengan laju aliran 20 SLPM. Dengan laju aliran massa metana 20 SLPM merupakan hal yang wajar massa yang masuk ke *storage* lebih banyak dibandingkan dengan 10 SLPM. Hal ini dikarenakan 20 SLPM mengalir metana sebanyak 20 liter per menit pada tekanan dan temperatur standar, sedangkan 10 SLPM hanya 10 liter per menit pada tekanan dan temperatur standar. Namun dapat dilihat selisih total massa dan massa tersangkut diantara kedua jenis laju aliran hanya berbeda ± 1 gram. Jadi dengan membedakan laju aliran pada saat desorpsi tidak mempengaruhi banyaknya massa yang keluar. Hal ini dibuktikan dari selisih total massa yang masuk dan massa yang tersangkut hanya berbeda ± 1 gram, untuk 10 SLPM 26,1 gram dan 20 SLPM 27,09 gram. Fenomena ini terjadi karena kondisi karbon aktif yang berada di dalam tabung sama, sehingga sama-sama sulit untuk mengeluarkan gas yang terserap pada karbon aktif pada bagian bawah. Apabila karbon aktif didalam *storage* dimasukkan pada selongsong yang berpori akan memungkinkan massa yang tersangkut lebih kecil, hal ini dikarenakan adsorbat dapat keluar melalui sekeliling selongsong ketika desorpsi.

5. Kesimpulan

5.1 Simpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Total Massa CH_4 yang tersimpan pada *storage* saat tekanan 10 bar dan temperatur 25°C.
 - Pada laju aliran massa 10 SLPM : 33,19 gram
 - Pada laju aliran massa 20 SLPM : 43,63125 gram
- Total Massa CH_4 yang tersangkut pada *storage* saat tekanan 10 bar dan temperatur 25°C.
 - Pada laju aliran massa 10 SLPM : 7,09 gram
 - Pada laju aliran massa 20 SLPM : 16,54 gram
- Kenaikan temperatur pada saat laju aliran massa 20 SLPM kenaikannya lebih tinggi dibandingkan laju aliran massa 10 SLPM.
- Penurunan temperatur pada saat laju aliran massa 20 SLPM lebih rendah dibandingkan laju aliran massa 10 SLPM.

5.2 Saran

Saran yang dapat penulis berikan untuk memaksimalkan massa metana yang masuk ke dalam *storage*, yaitu: sebaiknya karbon aktif dibuat menggunakan selongsong yang berpori. Dengan menggunakan metode ini diharapkan adsorbat dapat masuk dari segala sisi selongsong dan tidak terhambat seperti pada penelitian ini, dimana karbon aktif hanya ditumpuk di dalam *storage*. Dan dengan metode penggunaan selongsong berpori juga akan mempermudah gas metan yang berada pada bagian bawah karbon aktif untuk keluar.

Daftar Pustaka

- Bagheri, N, dan Jalal, A. 2011. Adsorption of Methane on Corn Cobs Based Activated Carbon. *Chemical Engineering Research and Design* 89 : 2038–2043.

2. Bansal, R.C, Meenakshi, G. 2005. *Activated Carbon Adsorption*. USA: Taylor & Francis Group.
3. Castello, D.L, Alcaniz, M, M.A. de la Casa-Lillo, D. Cazorla-Amoros, A. Linares Solano. 2002. *Advances in the Study of Methane Storage in Porous Carbonaceous Materials*, Fuel. 81 : 1777 : 1803.
4. Do, Duong.D. 2008. *Adsorption Analysis Equilibria and Kinetics*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
5. Kadiman, K. 2006. *Buku Putih Penelitian, Pengembangan dan Penerapan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Energi Baru dan Terbarukan untuk Mendukung Keamanan Ketersediaan Energi Tahun 2005 – 2025*, Jakarta.
6. Keller, J.U, Erich, R, dan Cedric du Fresne von Hohenesche. 2002. Thermo gravimetric and Sorption Measurement Techniques/Instruments. Journal of Universität Siegen Germany GH, D - 57068 Siegen.
7. Keller, J.U, Reiner S. 2005. *Gas adsorption equilibria; Experimental methods and Adsorptive isotherms*. Boston:Springer Science + Business Media, Inc.
8. Kumar, A. 2011. *Adsorption Of Methane On Activated Carbon By Volumetric Method*. Rourkela: Department Of Chemical Engineering National Institute Of Technology.
9. Luo, J, Yuefeng, L, Chengfa, J, Wei, C, Wen, J, dan Heping, X. 2011. Experimental and Modeling Study of Methane Adsorption on Activated Carbon Derived from Anthracite, *J. Chem. Eng. Data* 56 : 4919-4926.
10. Manocha, Satish, M. 2003. Porous Carbons, *Sadhana* volume 28 part 1 & 2p 335-348. India: Elsevier Science & Technology Books.
11. Rahman, K.A, Wai, S.L, Hideharu, Y, Anutosh, C, Bidyut B.S, Won, G.C, dan Kim, C.N. 2010. Experimental Adsorption Isotherm of Methane onto Activated Carbon at Sub and Supercritical Temperatures. *Chemical & Engineering data* 55 : 4961-4967.
12. Rios, R.B, Wilton, M.S, Eurico, B.T, Diana, C.S.A, Celio, L.C.J. 2009. Adsorption of Methane in Activated Carbons Obtained From Coconut Shells Using H₃PO₄ Chemical Activation, *Adsorption* 15 : 271–277.
13. Rouquerol, F, Jean, R, Kenneth, S. 1999. *Adsorption By Powders And Porous Solids*. Great Britain: MPG Books Ltd.
14. Ruthven, D. M. 1984. *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. New York: John Wiley & Sons.
15. Saes, A, Mario, T. 2009. Thermal Effect of The Adsorption Heat on An Adsorbed Natural Gas Storage and Transportation Systems. *Applied Thermal Engineering* 29 : 2617–2623.
16. Salehi, E, V, Taghikhani, C, Ghotbi, E, Nematilay, dan A, Shoeji. 2007. Theoretical and Experimental Study on the Adsorption and Desorption of Methane by Granular Activated Carbon at 25°C. *Journal of Natural Gas Chemistry* 16 : 415–422.
17. Suryawan, B. 2004. *Karakteristik Zeolit Indonesia sebagai Adsorben Uap Air*. Depok: FT UI.
18. Wang, X, Benjamin, L, Hui, T.C. 2012. Methane Desorption and Adsorption Measurements on Activated Carbon in 281–343 K and Pressures to 1.2 MPa. *Journal Therm Anal Calorim* 110 : 1475–1485.
19. Suzuki, M. 1990. *Adsorption Engineering*. Tokyo: Kodansha Ltd.
20. Yang, R. T. 2003. *Adsorbents: Fundamentals and Applications*. New Jersey: John Wiley and Sons.