

ADSORPSI ISOTERMAL HIDROGEN PADA KARBON AKTIF GRANULAR BERBAHAN DASAR BATUBARA UNTUK APLIKASI PENYIMPANAN BAHAN BAKAR PADA TEKNOLOGI FUEL CELL

Jossy Kolata¹, Awaludin Martin², Nasruddin³

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Riau

³Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia

¹jossykolata@gmail.com, ²awaludinmartin01@gmail.com, ³nasruddin@eng.ui.ac.id

ABSTRACT

The limited fossil energy resources and high levels of air pollution led to increased exploration of new and renewable energy sources. Hydrogen has the potential to replace fossil fuels because there is abundant in natural and pollution-free air. The greatest problem in hydrogen is storage methods. Hydrogen storage by adsorption on activated carbon is the best method. Adsorption isotherms of hydrogen on granular activated carbon made from coal with a surface area of 885 m²/g has been implemented by using a volumetric method. Adsorption experiment has been tested at temperature of 45°C and the pressure up to 30 bar. Experiment data in the form of isotherms temperature and variations pressure were calculated to determine the adsorption capacity. Adsorption capacity data were correlated using adsorption isotherms equation of Langmuir and Toth. Adsorption isotherms equation that have result the smallest deviation is the best equation. From the experiment results, the maximum adsorption capacity is 100,91×10⁻⁵ kg/kg at isotherm temperature of 45,4°C and a pressure is 29,99 bar. The maximum adsorption capacity occurs at the maximum pressure. Correlation data of adsorption isotherms using the Toth equation has the smallest deviation of 11,73%.

Keywords : Adsorption isotherms, volumetric method, adsorption capacity, adsorption isotherms equation.

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya polusi udara dari bahan bakar fosil dan ketidakstabilan pemasaran minyak menjadi perhatian dunia. Bahan bakar fosil merupakan sumber energi yang tidak dapat diperbaharui dan saat ini jumlahnya semakin sedikit. Penggunaan bahan bakar fosil akan menghasilkan polusi udara dan emisi CO₂ serta dapat menimbulkan dampak yang akan merusak lingkungan dan iklim global (Koh, et al, 2012). Akibat permasalahan ini, perlahan-lahan beberapa jenis sumber energi alternatif mulai diteliti.

Salah satu energi alternatif yang paling menjanjikan adalah hidrogen. Hal ini dikarenakan sumber hidrogen sangat

berlimpah, memiliki energi kimia yang besar, dan bebas polusi udara (Wang, et al, 2009). Penggunaan gas hidrogen sebagai pembangkit energi tidak menghasilkan polusi seperti debu, nitrogen oksida, sulfur oksida, hidrokarbon, dan karbon monoksida (Jiménez, et al 2010).

Permasalahan dalam penggunaan hidrogen sebagai *energy carrier* adalah sulitnya menyimpan hidrogen kedalam tabung penyimpanan (Wang, et al, 2009, Jiménez, et al, 2010, dan Vorgelegt, 2011). Apabila digunakan metode penyimpanan hidrogen dengan cara kompresi maka dibutuhkan tekanan hingga 700 bar. Penyimpanan dengan metode hidrogen tercairkan juga harus diterapkan pada temperatur dibawah -252,8°C (20,3 K) (Broom, 2011).

Solusi untuk mengatasi permasalahan penyimpanan hidrogen adalah dengan cara menyimpan hidrogen kedalam suatu material padatan berpori (Wang, et al, 2009, Jimenéz, et al, 2010, dan Broom, 2011). Hasil penelitian adsorpsi isothermal menyebutkan bahwa dari beberapa jenis material berpori, karbon aktif memiliki kelebihan yaitu memiliki massa yang ringan, proses adsorpsi kinetik yang cepat, mudah dalam pengisian, biaya murah, dan memiliki luas permukaan yang tinggi (Wang, et al, 2009, dan Jimenéz, et al, 2010).

Proses adsorpsi hidrogen pada karbon aktif, dapat diukur dengan menggunakan metode pengujian adsorpsi secara isothermal berbasis metode volumetrik. Metode ini dikenal sebagai metode paling mudah untuk dilakukan dan biaya peralatan yang murah (Keller, et al, 2005).

1.2 Rumusan Masalah

Metode penyimpanan hidrogen dengan cara adsorpsi pada material karbon berpori merupakan metode yang paling efektif dari metode lainnya. Dengan melakukan penyerapan hidrogen dapat disimpan pada tekanan yang lebih rendah dari metode kompresi. Dari uraian ini perlu dilakukan penelitian adsorpsi hidrogen pada karbon aktif. Metode adsorpsi yang paling mudah untuk dilakukan adalah dengan cara adsorpsi isothermal berbasis pengukuran volumetrik. Pengujian adsorpsi isothermal dilakukan pada temperatur isothermal 45°C sampai tekanan 30 bar. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kapasitas penyerapan hidrogen didalam karbon aktif. data adsorpsi isothermal dapat dimodelkan dengan menggunakan model persamaan adsorpsi isothermal Langmuir dan Toth.

1.3 Batasan Masalah

Dalam melaksanakan penelitian adsorpsi isothermal hidrogen pada karbon aktif, penulis membatasi permasalahan yang akan diteliti agar dapat terselesaikan dengan baik, yaitu :

1. Pengujian adsorpsi isothermal menggunakan metode volumetrik.
2. Temperatur isothermal pada saat pengujian yaitu 45°C dengan tekanan maksimum sebesar 30 bar.
3. Karbon aktif yang digunakan adalah karbon aktif komersial berbahan dasar batubara dengan bentuk granular berukuran 1-2 mm.
4. Persamaan adsorpsi isothermal yang digunakan untuk regresi data uji adsorpsi adalah persamaan Langmuir dan Toth.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dan keutamaan penelitian adsorpsi isothermal hidrogen pada karbon aktif adalah sebagai berikut :

1. Melakukan pengujian adsorpsi isothermal hidrogen pada karbon aktif komersial berbentuk granular berbahan dasar batubara pada temperatur isothermal 45°C sampai tekanan 30 bar dengan menggunakan metode pengukuran volumetrik untuk diketahui kapasitas penyerapannya.
2. Melakukan regresi data uji adsorpsi isothermal dengan menggunakan model persamaan Langmuir dan Toth.

1.5 Manfaat

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

1. Sebagai data karakteristik penyerapan hidrogen pada karbon aktif komersial yang dapat digunakan untuk mengetahui seberapa besar kapasitas penyerapannya.
2. Mengetahui parameter yang dapat mempengaruhi kapasitas penyerapan hidrogen pada karbon aktif sehingga dapat dipilih parameter yang terbaik untuk digunakan pada aplikasi penyimpanan hidrogen dalam kondisi teradsorpsi.
3. Data kapasitas penyerapan pada metode penyimpanan hidrogen teradsorpsi dapat menjadi bahan pembanding metode penyimpanan hidrogen terkompresi ataupun keadaan cair.

4. Referensi dalam mengembangkan ilmu pengetahuan dan teknologi *adsorption engineering* dibidang penyimpanan gas alam.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Energi Hidrogen

Hidrogen merupakan sumber energi masa depan yang bebas polusi udara dan efek rumah kaca karena proses pembakarannya tidak membangkitkan polusi seperti debu, nitrogen oksida, sulfur oksida, hidrokarbon, dan karbon monoksida (Jiménez, et al, 2009). Hidrogen mengandung sejumlah besar energi kimia per satuan massa, tetapi pada kondisi dibawah tekanan lingkungan hidrogen berbentuk gas dengan massa jenis yang sangat rendah (Broom, 2010). Hidrogen memiliki nilai pembakaran atas (high heating value) paling besar dari semua bahan bakar kimia (Paggiaro, 2008). Hidrogen menyimpan energi kimia sebesar 142 MJ/kg dibandingkan dengan cairan hidrokarbon yang menyimpan energi kimia sebesar 47 MJ/kg (Broom, 2010). Energi yang tersimpan oleh hidrogen ini dapat di transformasikan menjadi energi mekanik ataupun listrik dengan efisiensi lebih dari 50-60% apabila digunakan sebagai *fuel cell* (Vorgelegt, 2007).

2.2 Metode Penyimpanan Hidrogen

Sampai saat ini terdapat empat metode penyimpan gas hidrogen, yaitu dengan cara sistem penyimpanan gas terkompresi (compressed storage gas system), penyimpanan gas hidrogen cair (liquid hydrogen storage system), penyimpanan pada material hidrida (hydride storage system), dan penyimpanan dalam kondisi terserap (adsorptive storage system) (Broom, 2010, dan Paggiaro, 2008).

Penyimpanan hidrogen dengan cara kompresi akan mengkonsumsi 15% energi apabila disimpan pada tekanan 70 MPa (Broom, 2010). Pada tekanan atmosfer, hidrogen memiliki titik didih sebesar

-253°C (Broom, 2010 dan Paggiaro, 2008). Sehingga untuk menyimpan hidrogen dalam kondisi cair dibutuhkan suatu sistem pendingin yang dapat menjaga temperatur tabung dibawah titik didih hidrogen. Konsumsi energi yang akan dibutuhkan untuk melakukan proses ini adalah sekitar 30% (Broom, 2010) atau 35% (Paggiaro, 2008). Penyimpanan hidrogen pada material hidrida merupakan penyimpanan dengan cara kimia. Hidrida adalah ikatan kimia yang terjadi ketika hidrogen bereaksi dengan material hidride. Pada sistem penyimpanan hidrogen dengan cara penyerapan merupakan suatu cara mengikat molekul hidrogen pada permukaan material penyerap hanya dengan menggunakan gaya penyerapan secara fisika. Oleh karena itu material adsorben secara umum adalah material berpori dengan luas permukaan yang besar (Paggiaro, 2008).

2.3 Proses Adsorpsi

Adsorpsi adalah sebuah fenomena pada permukaan material padatan dimana proses berlangsungnya di pengaruhi oleh tekanan dan temperatur. Sedangkan pada saat molekul adsorbat meninggalkan permukaan material padatan dan kembali menjadi fasa gas disebut dengan desorpsi (Keller, et al, 2005). Ketika gas bersentuhan dengan permukaan padat, konsentrasi molekul yang dekat dengan permukaan menjadi lebih besar dari pada fasa gas bebas. Pada saat terjadinya adsorpsi, ikatan antar molekul hidrogen tetap ada. Proses adsorpsi dapat terjadi disebabkan interaksi antara molekul dengan permukaan padatan, karena atom-atom pada permukaan padatan (adsorben) memiliki gaya yang mampu menarik molekul gas (adsorbat) (Paggiaro, 2008).

2.4 Karbon Aktif Sebagai Adsorben

Menurut Yang, 2003 menyatakan bahwa karbon aktif memiliki luas permukaan dari 300 m²/g sampai dengan 4000 m²/g. Menurut Keller, et al, 2005 menyatakan bahwa luas permukaan karbon aktif sebesar 2300 ± 1400 m²/g. Dengan

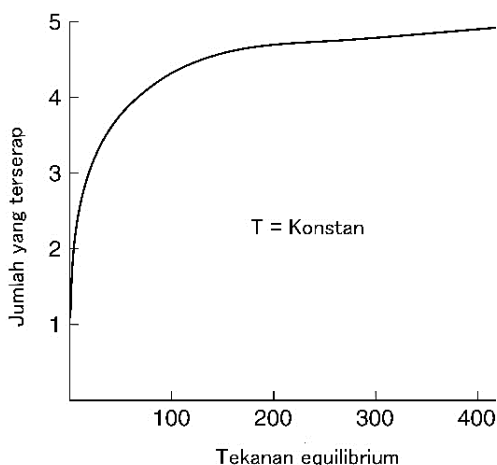
luas permukaan yang besar ini karbon aktif sangat cocok digunakan sebagai adsorben pada proses penyerapan gas alam.

2.5 Mekanisme Keseimbangan Adsorpsi

Proses adsorpsi terjadi pada kondisi equilibrium. Sehingga kapasitas penyerapan merupakan fungsi waktu dan tekanan. Apabila temperatur dijaga konstan, maka proses adsorpsi dapat diukur secara isothermal. Kapasitas penyerapan akan tergantung pada tekanan yang diberikan (Bansal, et al, 2005). Fungsi yang menyatakan adsorpsi isothermal dapat dilihat pada Persamaan (1).

$$\frac{x}{m} = f(p) \quad [T = \text{konstan}] \quad (1)$$

Hasil grafik pengujian adsorpsi isothermal adalah membandingkan kapasitas penyerapan/jumlah penyerapan dengan tekanan seperti terlihat pada Gambar 1.



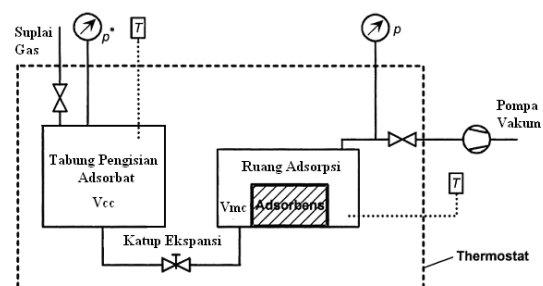
Gambar 1. Grafik Adsorpsi Isothermal (Bansal, et al, 2005)

2.6 Pengukuran Adsorpsi Isothermal

Terdapat empat metode pengukuran penyerapan adsorpsi, yaitu: metode *carrier gas*, metode gravimetrik, metode volumetrik dan metode kalorimetrik (Keller, et al, 2005). Penggunaan metode volumetrik relatif lebih mudah untuk mengukur gas yang terserap apabila diketahui volume dimana tekanan dan

temperatur di ukur dengan sangat akurat (Broom, 2010).

Data pengukuran pada metode volumetrik adalah tekanan dan temperatur, dimana data diukur saat adsorbat masuk ke tempat diletakkannya adsorben (adsorption bulb). Setelah keseimbangan adsorpsi terjadi, jumlah adsorbat yang terserap dihitung dari perubahan tekanan yang terjadi. Skema alat uji volumetrik ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Alat Uji Adsorpsi Isothermal Dengan Metode Volumetrik (Keller, et al, 2005)

2.7 Persamaan Adsorpsi Isothermal

Adsorpsi isothermal hidrogen pada karbon aktif merupakan jenis adsorpsi tipe I. Persamaan adsorpsi isothermal yang dapat digunakan untuk melihat karakteristik hidrogen dengan karbon aktif adalah Langmuir, Toth, dan Langmuir-Freundlich (L-F) (Broom, 2010, dan Zheng, et al, 2014). Akan tetapi dalam pengujian ini digunakan persamaan adsorpsi isothermal Langmuir dan Toth.

Langmuir merupakan teori adsorpsi isothermal pertama dengan asumsi bahwa permukaan adsorben homogen dan setiap daerah permukaan hanya dapat mengisi satu molekul atau atom (Bansal, et al, 2005). Persamaan langmuir dapat dilihat pada persamaan (2).

$$C_{\mu} = C_{\mu s} \frac{b \cdot P}{1 + b \cdot P} \quad (2)$$

Dimana C_{μ} adalah jumlah penyerapan dalam satuan mol persatuan massa atau volume. $C_{\mu s}$ adalah jumlah

penyerapan maksimum dimana seluruh permukaan telah tertutup oleh lapisan monolayer molekul. b adalah konstanta daya tarik menarik atau konstanta langmuir. P adalah tekanan adsorpsi.

Toth mengasumsikan bahwa permukaan adsorben adalah heterogen yang dinyatakan dengan parameter t . Dengan persamaan toth dapat memprediksi lebih baik pada tekanan rendah maupun tinggi (Bansal, et al, 2005). Rumus Toth dapat dilihat pada persamaan (3).

$$C_{\mu} = C_{\mu s} \frac{b \cdot P}{\left[1 + (b \cdot P)^t\right]^{1/t}} \quad (3)$$

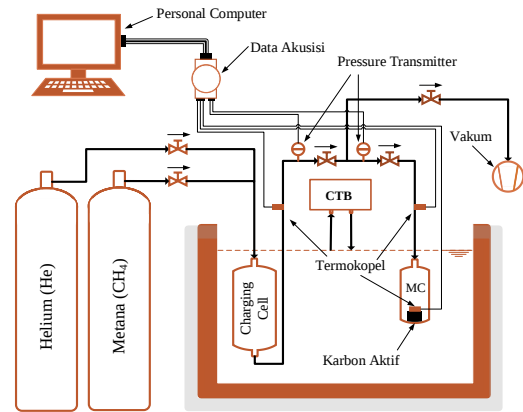
3. Metodologi

2.1 Alat Uji Adsorpsi Isotermal

Pengujian adsorpsi isotermal menggunakan metode volumetrik dengan skema alat seperti pada Gambar 3. Prinsipnya adalah menggunakan dua buah silinder yaitu silinder pengisian (*charging cell*) dan silinder pengukuran (*measuring cell*) yang terbuat dari *stainless steel* 304 (SS 304). Agar dapat dilakukan pengujian secara isotermal maka kedua tabung ini direndam didalam sebuah wadah yang berisi air yang temperaturnya dikontrol oleh *circulating thermal bath* (CTB) merek HÜBER dengan akurasi 0,2°C.

Proses pengujian gas di alirkan dari tabung penyimpanan menuju silinder *charging cell* dan *measuring cell* sehingga digunakan *tube stainless steel* untuk menghubungkan tabung penyimpanan gas dengan kedua tabung pengujian adsorpsi.

Tekanan pada kedua silinder diukur dengan menggunakan *pressure transmitter* yang mampu membaca tekanan dari 0-40 bar absolut (Druck, PTX 1400) dengan akurasi 0,15%. Temperatur kedua silinder diukur menggunakan termokopel kelas A tipe K. Data pengujian direkam oleh data akusisi merek *National Instrument* (NI DaQ). Hasil pembacaan data akusisi ditampilkan pada layar komputer.



Gambar 3. Skema Alat Uji Adsorpsi Isotermal Berbasis Metode Volumetrik

2.2 Bahan Dasar Pengujian Adsorpsi Isotermal

Dalam pengujian adsorpsi isotermal digunakan adsorben yang berupa karbon aktif komersial dengan luas permukaan 885 m²/g. Bahan dasar karbon aktif dapat dilihat pada Gambar 4. Adsorbat yang digunakan adalah hidrogen dan gas degassing yang digunakan adalah helium dengan kemurnian 99,9999% (ultra high purity). Kedua gas ini dapat dilihat pada Gambar 5.



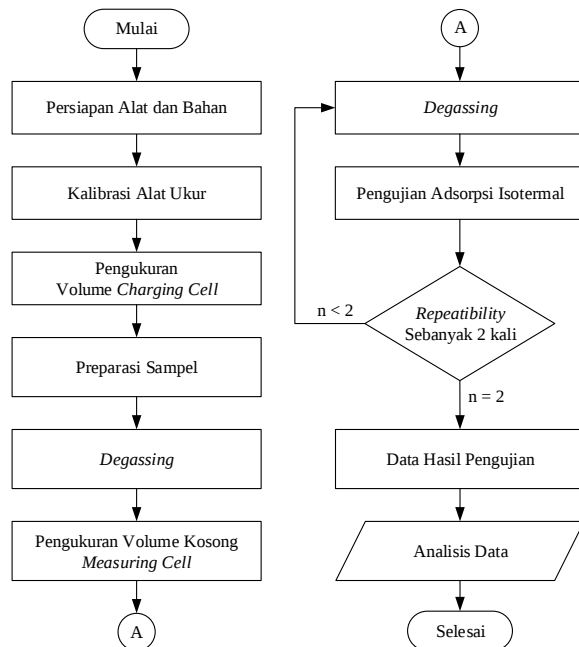
Gambar 4. Karbon Aktif Komersial



Gambar 5. Tabung Hitam Gas Helium dan Tabung Merah Gas Hidrogen

2.3 Pengujian Adsorpsi Isotermal

Tahapan pengujian adsorpsi isotermal yang dilakukan sesuai dengan diagram alir pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram Alir Pengujian Adsorpsi Isotermal

Sebelum dilakukan pengujian adsorpsi isotermal, karbon aktif perlu diketahui massa keringnya terlebih dahulu. Pengeringan karbon aktif dilakukan dengan cara dipanaskan sampai temperatur diatas 100°C selama ± 3 jam. Hal ini bertujuan agar air dan gas yang terserap dalam karbon aktif dapat hilang.

Proses adsorpsi bertujuan agar gas hidrogen dapat terserap sebanyak-banyaknya didalam pori karbon aktif. Sehingga tidak diharapkan adanya kotoran-kotoran yang terdapat pada pori. Proses *degassing* perlu dilakukan untuk membuang semua kotoran-kotoran dan material *volatile matter* lainnya agar dapat keluar dari pori. Tahapan proses *degassing* adalah dengan memanaskan tabung berisi karbon aktif pada temperatur *degassing* sekitar $\pm 130-140^\circ\text{C}$. Lalu tabung divakum sampai tekanan 0,01 mbar selama ± 30 menit. Setelah itu gas helium dimasukkan sampai tekanan 7 bar selama

± 30 menit. Hal ini dilakukan sampai empat kali.

Pengukuran adsorpsi menggunakan tiga parameter yaitu volume, tekanan, dan temperatur. Temperatur dijaga konstan untuk proses pengujian isotermal. Gambar 7 menjelaskan bahwa adsorpsi terjadi karena adanya kesetimbangan massa di antara dua tabung (*measuring cell* dan *charging cell*).

Laju perpindahan uap di *measuring cell* dan *charging cell* dan adsorben merupakan bentuk dari kesetimbangan massa uap, sehingga dibentuk persamaan berikut:

$$m_{d,mc} = |m_{cc}| - m_{ads} \quad (4)$$

Dimana $|m_{d,mc}|$ adalah laju aliran massa adsorbat di MC, $|m_{cc}|$ adalah laju aliran massa adsorbat di *charging cell*, dan $|m_{ads}|$ adalah laju aliran massa adsorbat yang diserap oleh adsorben.

Dalam proses adsorpsi isotermal, kondisi hidrogen tidak ideal sehingga dibutuhkan nilai faktor kompresibilitas gas hidrogen. Faktor nilai ini bisa didapatkan menggunakan REFROP versi 8. Dengan menganalisis kondisi ideal gas hidrogen pada *charging cell* dan *measuring cell*, maka akan didapatkan perkembangan dari persamaan (4) yaitu :

$$|m_{cc}| = \Delta m_{cc} = m_{cc}(t) - m_{vcc}(t + \Delta t)$$

$$|m_{cc}| = \frac{(p_{cc}(t) - p_{cc}(t + \Delta t)) \cdot V_{cc}}{Z \cdot R_{cc} \cdot T_{cc}} \quad (5)$$

$$dm_{d,mc} = m_{d,mc}(t + \Delta t) - m_{d,mc}(t)$$

$$dm_{d,mc} = \frac{(p_{mc}(t + \Delta t) - p_{mc}(t)) \cdot V_{mc}}{Z \cdot R_{mc} \cdot T_{mc}} \quad (6)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (5) dan (6) kedalam persamaan (4), maka akan terbentuk persamaan (7) berikut :

$$m_{ads} = \rho_{cc}(p, T) \cdot V_{cc} - \rho_{mc}(p, T) \cdot V_{mc} \quad (7)$$

4. Hasil dan Pembahasan

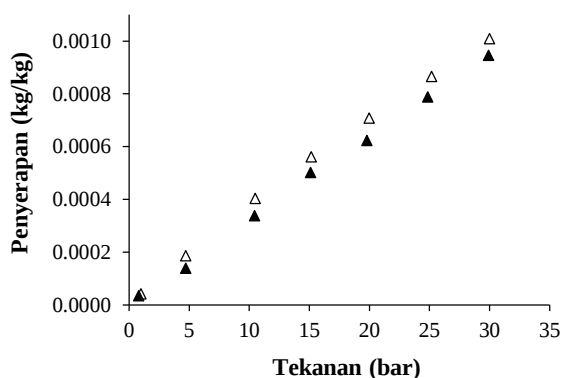
4.1 Hasil Pengujian Adsorpsi Isotermal

Pengujian adsorpsi isotermal hidrogen pada karbon aktif telah selesai dilaksanakan dengan menggunakan metode volumetrik. Data hasil pengujian adsorpsi pada temperatur isotermal 45°C dan sampai tekanan 30 bar dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Pengujian Adsorpsi Isotermal Temperatur 45°C (*10⁻⁵)

T (°C)	P (bar)	*C _μ (kg/kg)	T (°C)	P (bar)	*C _μ (kg/kg)
Pengujian Pertama			Pengujian Kedua		
45,2	0,81	3,49	45,4	0,99	4,19
45,2	4,71	13,91	45,4	4,71	18,67
45,2	10,45	33,79	45,4	10,51	40,35
45,3	15,10	50,21	45,4	15,15	56,19
45,3	19,79	62,33	45,4	19,99	70,87
45,3	24,86	78,83	45,4	25,19	86,56
45,1	29,91	94,63	45,4	29,99	100,91

Pengujian adsorpsi isotermal hidrogen pada karbon aktif dengan temperatur isotermal 45°C memiliki kapasitas penyerapan maksimum sebesar 94,63×10⁻⁵ kg/kg pada tekanan 29,91 bar dan temperatur 45,1°C pada pengujian pertama. Pengujian kedua menghasilkan kapasitas penyerapan maksimum sebesar 100,91×10⁻⁵ kg/kg pada tekanan 29,99 bar dan temperatur 45,4°C. Grafik data hasil pengujian adsorpsi pada temperatur 45°C dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Adsorpsi Isotermal Hidrogen pada Karbon Aktif pada Temperatur 45°C; × Pengujian Pertama; Δ Pengujian Kedua

4.2 Pembahasan

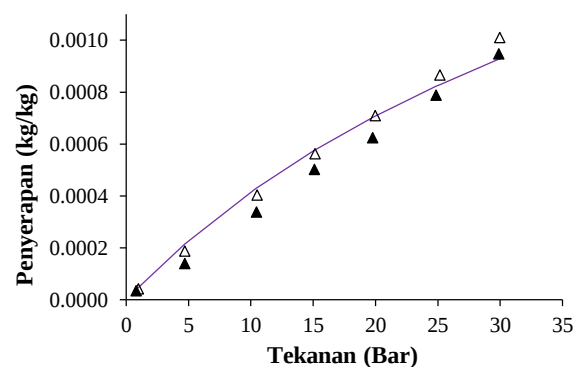
Pengujian adsorpsi isotermal pada temperatur 45°C menghasilkan kapasitas penyerapan yang paling besar yaitu 100,91×10⁻⁵ kg/kg pada tekanan 29,99 bar. Hal ini sesuai dengan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya bahwa kapasitas penyerapan hidrogen pada beberapa material karbon termasuk karbon aktif dan karbon nanofiber yang terukur merupakan fungsi dari tekanan dan temperatur (Jiménez, et al, 2010).

Pada tekanan pengujian yang dilakukan, kapasitas penyerapan terjadi pada tekanan maksimum. Oleh karena itu, kapasitas penyerapan pada proses adsorpsi akan meningkat dengan meningkatkan tekanan didalam tabung (Wu, 2012).

4.2.2 Korelasi data adsorpsi isotermal

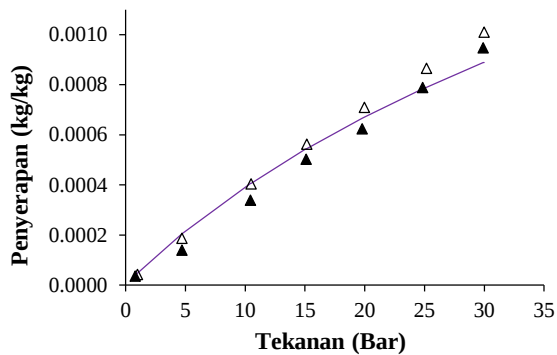
Karakteristik yang terjadi antara hidrogen sebagai adsorbat dengan karbon aktif sebagai adsorben merupakan kelompok adsorpsi tipe I sesuai dengan klasifikasi UIPAC (Zheng, et al, 2014). Model adsorpsi isotermal untuk memprediksi data pengujian digunakan persamaan Langmuir dan Toth.

Gambar 8 memperlihatkan grafik data hasil pengujian adsorpsi isotermal data hasil regresi model adsorpsi isotermal Langmuir. Proses regresi dilakukan dengan menggunakan metode iterasi pada *software Microsoft Excel*. Dari hasil regresi persamaan Langmuir ini memiliki simpangan sebesar 11,82%.



Gambar 8. Adsorpsi Isotermal Hidrogen pada Karbon Aktif; □ 45°C; Garis Tebal Adalah Regresi Persamaan Langmuir

Lalu pada Gambar 9 merupakan grafik hasil regresi model persamaan adsorpsi isothermal Toth. Dari hasil perhitungan, garis persamaan adsorpsi isothermal Toth didapatkan simpangan sebesar 11,73%.



Gambar 9. Adsorpsi Isothermal Hidrogen pada Karbon Aktif; □ 45°C; Garis Tebal Adalah Regresi Persamaan Toth

Tabel 2. Hasil Regresi Persamaan Adsorpsi Isothermal Langmuir dan Toth

Parameter	Langmuir	Toth
C_{μ} (kg/kg)	0.00243	0.00324
Q/R (K)	1099.72	1254.99
b_{∞}	6.9×10^{-6}	3.1×10^{-6}
$K_{d\infty}$	0.00156	0.00176
α	1.3×10^{-6}	6.8×10^{-6}
t	1	0.8245
Deviasi (%)	11.82	11.73

5. Simpulan dan Saran

5.1 Simpulan

Beberapa simpulan yang dihasilkan dari pengujian adsorpsi isothermal adalah:

1. Kapasitas penyerapan maksimum pada pengujian adsorpsi isothermal hidrogen pada karbon aktif granular berbahan dasar batubara adalah $100,91 \times 10^{-5}$ kg/kg pada tekanan 29,99 bar dan temperatur 45,4°C.
2. Persamaan adsorpsi isothermal yang menghasilkan simpangan paling kecil untuk melakukan regresi data pengujian adalah persamaan Toth yaitu 11,73%.

5.2 Saran

Penelitian adsorpsi isothermal hidrogen pada karbon aktif merupakan penelitian yang sedang berkembang. Karena penyimpanan hidrogen dalam kondisi terserap pada material berpori seperti karbon aktif merupakan metode yang sangat menjanjikan untuk mengatasi permasalahan penyimpanan hidrogen yang sampai saat ini belum teratasi.

Untuk mendapatkan kapasitas penyerapan hidrogen yang besar maka dibutuhkan kualitas karbon aktif yang baik dan disimpan pada temperatur yang rendah dan tekanan yang tinggi. Akan tetapi untuk aplikasi hidrogen secara komersial, kualitas karbon aktif yang menjadi salah satu penunjang keberhasilan metode ini. Karbon aktif dengan luas permukaan yang tinggi, memiliki gaya serap yang besar, dan bahan dasarnya mudah untuk didapatkan adalah karbon aktif yang sangat berpotensi mewujudkan teknologi adsorpsi hidrogen.

Daftar Pustaka

1. Broom, Darren P., 2011, *Hydrogen Storage Materials The Characterisation of Their Storage Properties*, Springer, London.
2. Bansal, Roop Chand & Meenakshi Goyal, 2005, *Activated Carbon Adsorption*, Taylor & Francis Group, USA
3. Jiménez, Vicente, Paula Sánchez, José Antonio Díaz, José Luis Valverde, and Amaya Romero, 2009, *Hydrogen Storage Capacity on Different Carbon Materials*, Chemical Physics Letters 485 (2010) 152-155
4. Keller, Jürgen U, Reiner Staudt, 2005, *Gas Adsorption Equilibria; Experimental Methods and Adsorptive Isotherms*, Springer Science + Business Media, Inc., Boston, USA
5. Koh, Guangyong, Yong-Wei Zhang, dan Hui Pan, 2012, *First-Principles Study on Hydrogen Storage by Graphitic Carbon Nitride Nanotubes*, International Journal of Hydrogen

- Energy 37 (2012) 4170-4178, Elsevier Ltd.
6. Paggiaro, Ricardo Gaspar, 2008, *Investigation of Cryogenic Hydrogen Storage on High Surface Area Activated Carbon: Equilibrium and Dynamics*. Dissertation of der Fakultat für Maschinenwesen der Technischen Universität München, Munich.
 7. Vorgelegt, 2011, *Hydrogen Storage in Nanostructured Materials*, Dissertation of der Fakultat Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität Dresden, Syria
 8. Wang, Huanlei, Qiuming Gao, dan Juan Hu, 2009, *High Hydrogen Storage Capacity of Porous Carbons Prepared by Using Activated Carbon*, Journal of The American Chemical Society 131 7016-7022
 9. Wu, Cheng-Da, Te-Hua Fang, dan Jian-Yuan Lo, 2012, *Effect of Pressure, Temperature, and Geometric Structure of Pillared Graphene on Hydrogen Storage Capacity*, International Journal of Hydrogen Energy 37 (2012) 14211-14216, Elsevier Ltd.
 10. Zheng, Qingrong, Xiaohua Wang, Shuai Gao, 2014, *Adsorption Equilibrium of Hydrogen on Graphene Sheets and Activated Carbon*, Cryogenics 61(2014) 143-148.