

Analisa Pengaruh Perubahan Temperatur terhadap Proses Adsorpsi dan Kapasitas Penyerapan Hidrogen pada Karbon Aktif Granular Berbahan Dasar Batu Bara

(Analysis of the Effect of Temperature to Hydrogen Adsorption Isothermal Process and Adsorption Capacity of Granular Activated Carbon Coal Derived)

Nasruddin,¹⁾ Daniel²⁾

¹⁾ Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, 16424

²⁾ Mahasiswa S-2, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok 16424

Email: ¹⁾ nasruddin@eng.ui.ac.id ²⁾ danieltampubolon91@yahoo.co.id

ABSTRAK

Hidrogen adalah salah satu energi terbarukan yang menjanjikan dan berpotensi menjadi pengganti bahan bakar fosil. Namun, aplikasi hidrogen sebagai bahan bakar memiliki kekurangan, yaitu dalam hal penyimpanannya. Dalam suhu kamar dan tekanan atmosfer, hidrogen memiliki rasio energi yang sangat rendah terhadap volumenya jika disimpan dalam bentuk gas sehingga perlu dilakukan berbagai penelitian yang berkaitan dengan metode dan material untuk menyimpan hidrogen terus dilakukan. Sejauh ini metode penyimpanan hidrogen memakai prinsip adsorpsi dengan karbon aktif berbentuk granular sebagai adsorben sangat menjanjikan karena bisa menurunkan tekanan dalam tangki dengan kapasitas penyimpanan yang relatif sama. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh perubahan temperatur terhadap proses adsorpsi. Pengujian kemampuan adsorpsi hidrogen dilakukan dengan memvariasikan temperatur pada 35°C, 25°C dan 0°C. Tujuan rinci dari penelitian ini adalah melakukan pengujian adsorpsi isothermal gas hidrogen pada karbon aktif granular berbahan dasar batubara untuk tekanan hingga 4 MPa sehingga didapat data kapasitas penyerapannya hidrogen dan dibandingkan hasilnya sehingga di dapat pengaruh dari temperatur terhadap proses adsorpsi serta mengetahui metode persamaan model adsorpsi yang sesuai dengan proses adsorpsi hidrogen. Pada penelitian ini, karbon aktif yang digunakan pada penelitian ini adalah karbon aktif berbahan dasar batu bara. Proses pengambilan data dilakukan dengan metode volumetrik dan tipe adsorpsi yang digunakan adalah adsorpsi isothermal. Penyerapan dilakukan pada tiga temperatur berbeda, pertama pada temperatur 35°C dan tekanan mencapai 40 bar, yang kedua adalah pada temperatur 25°C dan tekanan mencapai 40 bar dan ketiga adalah pada temperatur 0 °C dan tekanan mencapai 40 bar. Pada temperatur 35°C, penyerapan hidrogen sebesar 0.00228995 kg/kg pada tekanan 3935.22 kPa. Pada temperatur 25°C, penyerapan hidrogen sebesar 0.00249057 kg/kg pada tekanan 3939.24 kPa. Pada temperatur 0°C, penyerapan hidrogen sebesar 0.00267156 kg/kg pada tekanan 3939.24 kPa. Data yang didapat selanjutnya dikorelasi dengan menggunakan persamaan model Langmuir, Toth, dan Langmuir-Freudlich. Pada persamaan model Langmuir didapatkan error 22.68%, Toth 22,9% dan Langmuir-Freudlich 14.44%. Dari penelitian ini dapat diketahui bahwa proses adsorpsi hidrogen berbanding lurus dengan tekanan dan berbanding terbalik dengan temperatur. Sedangkan persamaan model proses Adsorpsi yang paling mendekati hasil penelitian adalah Langmuir-Freudlich.

Kata kunci : Karbon Aktif, Adsorpsi Hidrogen, Metode Volumetrik, Adsorpsi Isothermal, Korelasi Adsorpsi

PENDAHULUAN

Konsumsi bahan bakar fosil dalam jumlah besar pada seabad terakhir turut berperan dalam menipisnya cadangan bahan bakar, yang sampai sekarang belum bisa kita hindari. Sementara cadangan bahan bakar fosil semakin menipis, kebutuhan atas energi bukannya turun malah semakin tinggi. Akibatnya sesuai prinsip ekonomi penawaran dan permintaan, maka tanpa bisa dihindari harga bahan bakar inipun semakin hari semakin melambung tinggi.

Hal ini tentu sangat mengkhawatirkan karena sampai saat ini belum ditemukan alternatif lain sebagai sumber energi pengganti bahan bakar fosil sehingga krisis energi yang parah pun tidak dapat dielakkan lagi. Akhir-akhir ini kita melihat mulai banyak usaha manusia untuk mulai mencari sumber energi baru yang bisa dimanfaatkan. Ada beberapa sumber energi baru yang telah ditemukan dan dimanfaatkan. Sumber energi terbarukan itu bisa berupa tenaga matahari, angin, air, panas bumi, bio massa, gelombang laut dan hidrogen.

Namun semua sumber energi itu belum dimanfaatkan secara maksimal dan optimal. Hidrogen, dibandingkan semua energi terbarukan yang lain, memiliki beberapa keunggulan antara lain, bahan bakar hidrogen bersifat mobile seperti bahan bakar fosil yang kita kenal selama ini. Bedanya, tidak seperti bahan bakar fosil, pembakaran hidrogen tidak menyebabkan polusi karbon. Ketika terbakar, hidrogen melepaskan energi berupa panas dan menghasilkan air sebagai bahan buangan ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$). Pemakaian hidrogen sebagai bahan bakar jauh lebih efektif dalam pembakaran hampir 3 kali lipat dari panas yang bisa dihasilkan oleh pembakaran bensin dan solar. Keunggulan lain yang dimiliki hidrogen adalah jumlahnya di alam ini sangat melimpah, 93 % dari seluruh atom yang ada di jagat raya ini adalah hidrogen, unsur yang paling sederhana dari semua unsur yang ada di alam ini. Tiga perempat dari massa jagat raya ini adalah hidrogen. Di bumi sendiri bentuk hidrogen yang paling umum kita kenal adalah air (H_2O).

Hanya saja, selain memiliki keunggulan, aplikasi hidrogen sebagai bahan bakar juga

memiliki kekurangan, yaitu dalam hal penyimpanannya. Dalam suhu kamar dan tekanan atmosfir, hidrogen akan berbentuk fase gas sehingga memiliki rasio energi yang sangat rendah terhadap volumenya jika disimpan dalam bentuk gas sehingga perlu dilakukan berbagai penelitian yang berkaitan dengan metode dan material untuk menyimpan hidrogen terus dilakukan. Sejauh ini metode penyimpanan hidrogen memakai prinsip adsorpsi dengan karbon aktif berbentuk granular sebagai adsorben sangat menjanjikan karena bisa menurunkan tekanan dalam tangki dengan kapasitas penyimpanan yang relatif sama.

LANDASAN TEORI

Adsorpsi merupakan suatu peristiwa dimana molekul-molekul dari suatu senyawa terikat oleh permukaan zat padat. Molekul-molekul pada zat padat atau zat cair memiliki gaya dalam keadaan tidak setimbang dimana gaya kohesi cenderung lebih besar daripada gaya adhesi. Gaya-gaya yang tidak seimbang tersebut menyebabkan zat padat atau cair tersebut cenderung menarik zat lain atau gas yang bersentuhan pada permukaannya. Fenomena konsentrasi zat pada permukaan padatan atau cairan disebut fasa teradsorbat atau adsorbat sedangkan zat yang menyerap atau menariknya disebut adsorben.

Prinsip penyimpanan hidrogen pada beberapa material adsorben ada dua, yaitu:

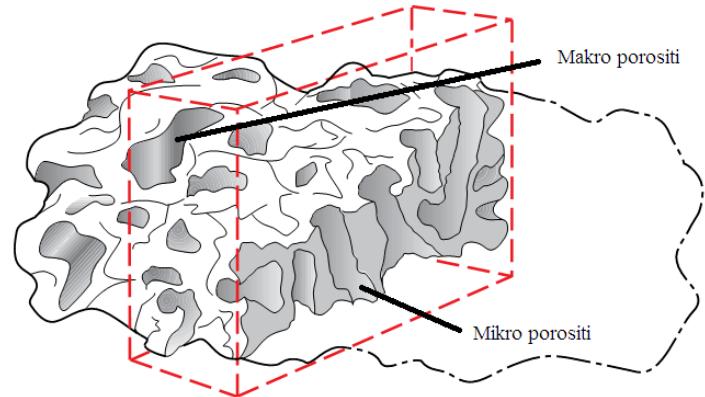
- Penyerapan molekul hidrogen pada permukaan seperti *physisorption* (penyerapan fisika).

Adsorpsi fisika terjadi bila gaya intermolekular lebih besar dari gaya intramolekular. Gaya intermolekular adalah adalah gaya tarik menarik antar molekul-molekul fluida itu sendiri sedangkan gaya intramolekular adalah gaya tarik menarik antara molekul fluida dengan molekul permukaan padatan. Pada proses adsorpsi ini, adsorbat ditahan pada permukaan karbon karena flu ktuasi distribusi uatan listrik yang lemah. Adsorpsi ini berlangsung di bawah temperatur kritis adsorbat yang relatif rendah. Adsorpsi akan menurun ketika temperatur pada prosesnya meningkat. Energi aktivasi yang terjadi untuk adsorpsi biasanya tidak lebih dari 1 kkal/g.mol.

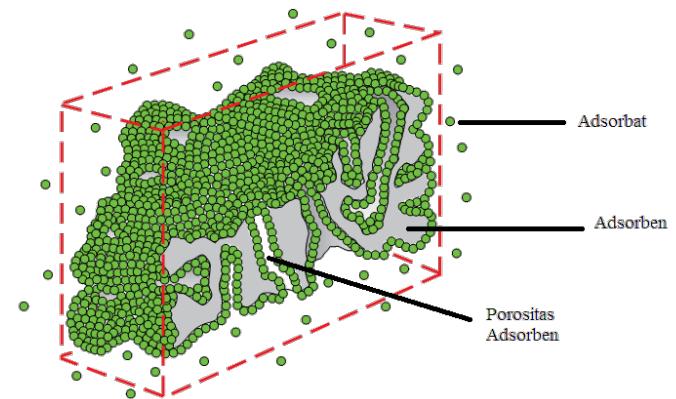
Oleh karena itu gaya yang dilibatkan pada adsorpsi fisika adalah gaya *Van Der Walls* yaitu gaya tarik menarik yang relatif lemah antara permukaan adsorben dengan adsorbat. Dengan demikian adsorbat tidak terikat secara kuat pada permukaan adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan ke bagian permukaan lainnya. Dan pada permukaan yang ditinggalkan oleh adsorbat yang satu dapat digantikan oleh adsorbat lainnya. Bila dalam keadaan kesetimbangan kondisinya diubah misalnya tekanan diturunkan atau temperatur dinaikkan maka sebagian adsorbat akan terlepas dan akan membentuk kesetimbangan baru. Proses adsorpsi fisika terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi sehingga pada proses tersebut akan membentuk lapisan *multilayer* pada permukaan adsorben. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi fisika dapat diputuskan dengan mudah.

- b) Atom-atom hidrogen larut dan membentuk ikatan kimia seperti *chemisorption*(penyerapan kimia).

Adsorpsi ini merupakan adsorpsi yang terjadi karena terbentuknya ikatan kovalen dan ion antara molekul-molekul adsorbat dengan adsorben. Ikatan yang terbentuk merupakan ikatan yang kuat sehingga lapisan yang terbentuk adalah lapisan *monolayer*. Yang paling penting dalam adsorpsi kimia adalah spesifikasi dan kepastian pembentukan *monolayer*. Pendekatannya dengan menentukan kondisi reaksi sehingga hanya adsorpsi kimia yang terbentuk dan hanya terbentuk *monolayer*. Fisisorpsi membatasi rasio hidrogen ke karbon kurang dari satu atom hidrogen perdua atom karbon (4.2 % massa). Berbeda dengan kemisorpsi, rasio pada dua atom hidrogen persatu karbon yang diwujudkan dalam kasus polietilen (Stroebel, R., 2006). Gaya *Van Der Walls* sering terjadi pada atom molekul non-polar (beberapa hidrokarbon adalah molekul non polar). Penyerapan secara fisika memiliki sebuah ikatan energi secara normal biasanya dari urutan 0.1 eV sedangkan penyerapan secara kimia memiliki ikatan kovalen C-H , dengan energi yang meningkat dari 2-3eV.



Gambar 1 Potongan Melintang Material Karbon Aktif



Gambar 2 Proses Adsorbsi Pada Karbon Aktif

Faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi adalah (Hammer, 1977 dikutip petrus, 1996) :

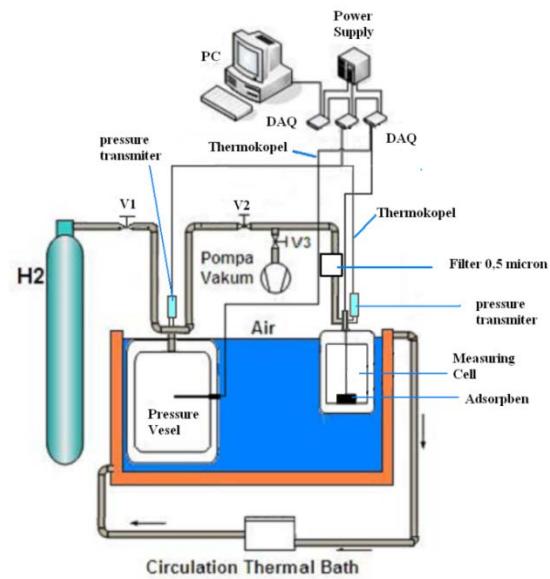
1. Karakteristik fisik dan kimia dari adsorben seperti luas permukaan, ukuran pori-pori, komposisi dan lain-lain.
2. Karakteristik fisik dan kimia dari zat terlarut yang teradsorpsi, seperti ukuran molekul, polaritas molekul, komposisi kimia, PH, suhu dan lain sebagainya.
3. Konsentrasi zat terlarut yang teradsorpsi.
4. Waktu kontak.

METODOLOGI PENELITIAN

Alat uji adsorpsi isothermal pada prinsipnya terdiri atas dua buah silinder yaitu silinder pengisian (charging cell) dan silinder pengukuran (measuring cell) yang terbuat dari stainless steel 304 (SS 304). Kedua tabung tersebut dihubungkan dengan tube stainless steel dimana keduanya terendam dalam fluida yang temperaturnya di kontrol oleh circulating thermal bath merk HUBER dengan

akurasi $0,1^{\circ}\text{C}$. Tekanan pada kedua silinder diukur dengan menggunakan pressure transmitter dengan kisaran pengukuran 0-40 bar absolut (merk WIKA) dengan akurasi 0,25%. Thermocouple kelas A tipe K digunakan untuk mengukur temperatur adsorbat (gas hidrogen) dan adsorben (karbon aktif). Data tekanan dan temperatur direkam melalui data akuisisi dari National Instrument.

Karbon aktif dimasukkan kedalam measuring cell dan antara measuring cell dan charging cell telah terhubung maka proses awal pengujian adalah proses degassing. Proses degassing dimaksudkan untuk mengeluarkan seluruh unsur dan/atau zat pengotor (impurity) yang kemungkinan teradsorpsi oleh karbon aktif selama penyimpanan. Proses degassing berlangsung sampai dengan 8 jam dimana system di vakum dengan pompa vakum satu tingkat ARUKI sampai dengan tekanan mendekati 1 mbar dan selama proses tersebut measuring cell dililiti dengan pemanas (heater) untuk menjaga temperatur karbon aktif pada kisaran $130\text{--}140^{\circ}\text{C}$. Gas Helium (He) dimasukkan ke dalam system pada tekanan sampai dengan 7 bar untuk meningkatkan proses pengeluaran zat pengotor pada karbon aktif. Setelah proses degassing, charging cell dan measuring cell direndam dengan air yang disirkulasikan oleh Circulating Thermal Bath HUBER dengan akurasi $0,1^{\circ}\text{C}$ untuk menjaga agar temperatur pada system konstan pada temperatur tertentu.



Gambar 3 Skema Alat Uji Adsorpsi Isothermal

Setelah temperatur pada system konstan (isothermal), gas hydrogen (H_2) dimasukkan kedalam charging cell dimana sebelumnya katup yang menghubungkan antara charging cell dan measuring cell ditutup. Setelah temperatur pada charging cell kembali ke temperatur isothermal katup penghubung tersebut dibuka, proses ini adalah proses awal adsorpsi isothermal. Gas H_2 kembali diisikan pada tekanan berikutnya kedalam charging cell setelah temperatur pada charging cell kembali pada temperatur semula. Proses tersebut berlangsung sampai dengan tekanan pengisian 40 bar. Proses diatas dilakukan kembali untuk tiap temperatur isothermal yang berbeda.

Pengujian adsorpsi isothermal dilakukan dengan menggunakan metode volumetrik, skema keseimbangan massa adsorpsi isothermal terlihat pada Gambar 4. Dasar pengukuran metode volumetrik adalah tekanan, volume 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 dengan menggunakan persamaan gas ideal.

Kesetimbangan massa uap adsorbat dalam *charging cell* dan *measuring cell* dapat

diasumsikan sebagai berikut (Belal, Dawoud, et al., 2003):

$$m_{d,mc} = |m_{cc}| - m_{ads}$$

dengan:

$dm_{d,mc}$ = massa adsorbat di *measuring cell* (kg)

$$|m_{cc}| = \text{massa adsorbat di } charging \text{ cell (kg)}$$

m_{ads} = massa adsorbat yang diserap oleh adsorben (kg)

Selama proses dari mulai *charging cell* sampai pada *measuring cell* adsorbat tidak bersifat ideal sehingga dibutuhkan parameter Z , dimana Z adalah faktor kompresibilitas, sehingga:

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

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

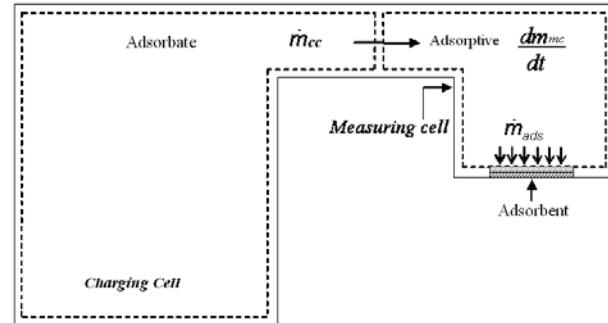
Dengan mensubstitusikan persamaan, maka didapat:

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

Atau

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

Dimana ρ_{cc} dan ρ_{mc} adalah massa jenis adsorbat pada tekanan dan temperatur di *charging cell* dan *measuring cell*. Besaran ρ_{cc} dan ρ_{mc} didapat dengan menggunakan *software* REFPROP Versi 8.



Gambar 4 Skema Keseimbangan Massa pada Proses Penyerapan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut adalah rata-rata penyerapan hidrogen pada suhu 35°C

Tabel 1 Tekanan MC dan Penyerapan Rata-Rata pada Temperatur 35°C

Tekanan MC rata-rata (kPa)	Penyerapan rata-rata (kg/kg)
251.681	0.00005194
493.480	0.00016226
983.637	0.00046956
1954.618	0.00092001
2950.428	0.00166327
3935.217	0.00228995

Dan ini adalah rata-rata penyerapan hidrogen pada temperatur 25°C

Tabel 2 Tekanan MC dan Penyerapan Rata-Rata pada Temperatur 25°C

Tekanan MC rata-rata (kPa)	Penyerapan rata-rata (kg/kg)
241.902	0.00006430
509.177	0.00023728
986.616	0.00055555
1934.274	0.00118327

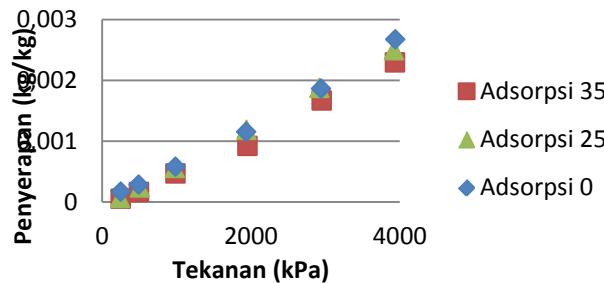
2943.799	0.00187265
3939.237	0.00249057

Dan ini adalah rata-rata penyerapan hidrogen pada temperatur 0°C

Tabel 3 Tekanan MC dan Penyerapan Rata-Rata pada Temperatur 0°C

Tekanan MC rata-rata (kPa)	Penyerapan rata-rata (kg/kg)
249.986	0.00016706
492.225	0.00028529
983.616	0.00057675
1934.274	0.00114800
2943.799	0.00185971
3939.237	0.00267156

Perbandingan Adsorpsi



Gambar 5. Perbandingan Adsorpsi 35, Adsorpsi 25 dan Adsorpsi

Dari grafik dapat dilihat bahwa adsorpsi pada temperatur 0°C memiliki penyerapan lebih baik dibandingkan adsorpsi pada temperatur 35°C. Dari rata-rata penyerapan pada temperatur 0°C dan temperatur 35°C, dapat dilihat fungsi linear pada penyerapan hidrogen. Sedangkan pada adsorpsi pada temperatur 25°C, penyerapan lebih baik daripada adsorpsi pada temperatur 35°C, tetapi masih lebih kecil penyerapannya

dibanding dengan temperatur 0°C, walau penyerapannya hampir sama hingga tekanan 3000 kPa

Hasil percobaan ini kemudian dikorelasikan dengan persamaan model Langmuir, Toth, dan Langmuir-Freudlich:

Tabel 4. Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Langmuir Untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen

Parameter	Granular
$C\mu$ (kg/kg)	0.0061
h_{st} (R.K ⁻¹)	382.23
k_o (kPa ⁻¹)	6.7×10^{-4}
t	1
δ (%)	22.68

Tabel 5 Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Toth Untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen

Parameter	Granular
$C\mu$ (kg/kg)	0.0065
h_{st} (R.K ⁻¹)	279.19
k_o (kPa ⁻¹)	5.1×10^{-4}
t	0.96
δ (%)	22.66

Tabel 6 Besaran yang Digunakan Pada Persamaan Model Langmuir-Freudlich Untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen

Parameter	Granular
$C\mu$ (kg/kg)	0.0032
h_{st} (R.K ⁻¹)	305.71
k_o (kPa ⁻¹)	3.2×10^{-4}

t	0.48
$\delta(\%)$	14.44

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari percobaan ini adalah:

1. Semakin tinggi tekanan akan membuat kapasitas penyerapan semakin besar.
2. Semakin rendah temperatur akan membuat kapasitas penyerapan semakin besar.
3. Pendekatan persamaan adsorpsi isotermal terbaik untuk percobaan adsorpsi isotermal hidrogen pada karbon aktif berbahan dasar batok kelapa granular adalah persamaan Langmuir-Freundlich dengan standar deviasi 14.44.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Tuhan YME, orang tua dan teman-teman yang membantu secara fisik maupun materiil dan doa.

NOMENKLATUR

m = massa (kg)

P = tekanan (kPa)

Z = rasio kompresibilitas

R = konstanta gas (m³. Pa. K⁻¹. mol⁻¹)

T = Temperatur (K)

$C\mu$ = Jumlah adsorbat terserap jenuh(kg/kg)

h_{st} = Isosterik Heat Adsorpsi(R.K⁻¹)

k_o = Konstanta kesetimbangan(kPa⁻¹)

t = Heterogenitas Adsorbent

REFERENSI

Ali, Jauhari (2012) *Pengembangan Adsorben Hydrogen Storage untuk Aplikasi Fuel*

Cell dalam Bentuk Padatan Partikel Nano Karbon Aktif dengan Bahan Pengikat Likuida Lignoselulosa. Tesis FTUI, Depok

Awaludin, M. (2010) *Adsorpsi Isotermal Karbon Dioksida dan Metana pada Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Sub Bituminus Indonesia untuk Pemurnian dan Penyimpanan Gas Alam.* Disertasi FTUI, Depok

Awaludin, M., Suryawan, B., Alhamid, M.I., Nasruddin. Adsorpsi Isothermal CO₂ pada Karbon Aktif dengan Metode Volumetrik. *Jurnal Makara*, submitted.

Bansal, Roop Chand., Meenakshi, Goyal.(2005).*Activated Carbon Adsorption.* USA: Taylor & Francis Group

Belmabkhout, Y., Fr`ere, M., DeWeireld, G.(2004).High Pressure Adsorption Measurements: A Comparative Study of The Volumetric and Gravimetric Methods.*Measurement Science Technology*,15, 848–858

Choi, Byoung-Uk., Choi, Dae-Ki., Lee, Young-Whan., Lee, Byung-Kwon.(2003). Adsorption Equilibria of Methane, Ethane, Ethylene, Nitrogen and Hydrogen onto Activated Carbon. *J.Chem.Eng.*, 48, 603-607

Do, Duong D., (2008). *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics.* Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte

Jiménez, Vicente., Sánchez, Paula., Antonio Díaz, Jose., Luis Valverde Jose., Romero, Amaya. (2010). Hydrogen storage capacity on different carbon materials. *Chemical Physics Letters*, 485, 152–155

Keller, Jürgen U. Staudt, Reiner. (2005). *Gas adsorption equilibria; Experimental methods and Adsorptive Isotherms.* Boston, United States of America: Springer Science & Business Media, Inc.

- Stroebel, R., Garche,J., Moseley,P.T., Joerissen, L., Wolf, G. (2006). Review : Hydrogen Storage by Carbon Materials. *Journal of Power Sources*, 159,781–801.
- Suzuki, Motoyuki. *Adsorption Engineering*. (1990). Tokyo: Kodansha Ltd.
- Xua, W.C., Takahashia, K., Matsuo, Y., Hattoria, Y., Kumagaia, M., Ishiyamab, S., Kanekoc, K., Iijimad, S. (2007). Investigation of hydrogen storage capacity of various carbon materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2504 – 2512