

ADSORPSI ISOTHERMAL HIDROGEN PADA KARBON AKTIF BERBAHAN DASAR CANGKANG SAWIT PADA TEMPERATUR 45 °C

Fakhru Rozi Z ¹, Awaludin Martin ¹², Nasruddin ²²

Laboratorium Teknik Pendingin dan Pengkondisian Udara, Departemen Teknik Mesin
Universitas Indonesia

[¹fakhrurozi91@gmail.com](mailto:fakhrurozi91@gmail.com), [²awaludinmartin01@gmail.com](mailto:awaludinmartin01@gmail.com), [³nasruddin@eng.ui.ac.id](mailto:nasruddin@eng.ui.ac.id)

Abstrak

Hydrogen is one of the promising renewable energy and potential substitute for fossil fuels in the future. Hydrogen has short comings in its application as fuel is in storage. The study resulted in the capacity of hydrogen adsorption on activated carbon made from palm shells. Data were collected by volumetric method in the isothermal adsorption process. Adsorption isotherm temperature is performed at 45°C at pressures up to 30 bar. The maximum adsorption capacity at isotherm temperatures 45°C is 2.03×10^{-3} kg/kg mass of adsorbent at a pressure of 30.13 bar. Subsequently correlated the data obtained using the Langmuir model equation, Toth and Langmuir-Freundlich. Deviation from the Langmuir equation, Toth and Langmuir-Freundlich obtained was 16.72.77%, 15.97% and 9.79%.

Keywords: Hydrogen Adsorption, Volumetric Method, Isotherm Adsorption

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Saat ini Indonesia masih sepenuhnya bergantung pada bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batubara dan gas. Bahan bakar fosil di Indonesia digunakan oleh penduduk maupun pelaku industri yang semakin meningkat, sedangkan cadangan bahan bakar fosil semakin menurun. Bahan bakar fosil menghasilkan emisi yaitu berupa CO₂ yang dapat memicu terjadinya pemanasan global. Selain itu bahan bakar fosil jelas merupakan energi yang tidak bisa diperbaharui. Jika terus digunakan, tentu persediaan bahan bakar akan habis, sementara sumber-sumber energi alternatif yang notabene jauh lebih banyak dibanding bahan bakar fosil belum dimanfaatkan secara optimal. Indonesia harus segera menggeser penggunaan energi fosil menjadi energi terbarukan (renewable energy) yang jauh lebih bersih dan ramah lingkungan.

Hidrogen merupakan salah satu energi alternatif pengganti bahan bakar fosil yang sangat menjanjikan. Hidrogen melepaskan energi berupa panas dan menghasilkan air sebagai bahan buangan ($2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$). Ketika terbakar, pemakaian hidrogen sebagai bahan bakar jauh lebih efektif dalam pembakarannya karena hampir 3 kali lipat dari panas yang bisa dihasilkan oleh pembakaran bensin dan solar. Di bumi sendiri bentuk hidrogen yang paling umum kita kenal adalah air (H₂O) [1]. Akibatnya energi hidrogen dan aplikasinya telah menarik banyak peneliti. Namun, kendala penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar saat ini adalah dalam hal penyimpanannya. Sistem adsorpsi adalah salah satu sistem penyimpanan hidrogen yang paling tepat karena pada kondisi yang sama, yaitu temperatur 77 °C dan tekanan 50 bar, hidrogen dapat disimpan dalam metode adsorpsi sebesar 35 kg/m³ sedangkan dalam metode gas bertekanan sebesar 17 kg/m³[2]. *The US Department of Energy* (DOE) baru-baru ini menetapkan target penyimpanan hidrogen

dari 6wt % untuk tahun 2010 dan 9wt % untuk tahun 2015. Tiga klasifikasi adsorben untuk penyimpanan hidrogen yang sedang diteliti, di antaranya[3]:

1. Dalam bentuk hidrida logam (misalnya, LaNi_5 , Mg_2Ni).
2. Hidrida kimia (misalnya: *chemical hydrides slurry*), dimana hidrogen dilepaskan melalui reaksi kimia (biasanya dengan air).
3. Bahan berbasis karbon (misalnya, karbon *nanotube* (CNT) dan serat karbon dan luas permukaan karbon aktif yang tinggi).

Saat ini, berbagai penelitian telah dilakukan untuk penyimpanan hidrogen dengan metode adsorpsi yang aman, mudah dan murah. Zhao [3] melakukan penelitian pada *Amorphous carbon nanotubes* (ACNTs) dengan memadukan *Co-Ni* (1:1wt%) sebagai katalisnya. Sistem pengukuran menggunakan metode volumetrik. Kapasitas penyerapan yang di hasilkan dari ACNTs yaitu 1.1wt% pada tekanan 2.45 MPa dan temperatur ruangan. Shindo, et al [4] dalam penelitiannya menggunakan karbon aktif sebagai adsorben dengan luas permukaan $1470\text{m}^2/\text{g}$ menghasilkan kapasitas penyerapan 0.36 wt% pada tekanan 9 MPa dan temperatur 20 °C dengan menggunakan metode grafimetrik. Minoda, et al [5] meneliti pada beberapa jenis karbon aktif dengan luas permukaan yang berbeda. Pengukuran dilakukan dengan metode volumetrik pada tekanan mulai dari 0 hingga 12 MPa dan temperatur 303 K. Kapasitas penyerapan terbesar yang dihasilkan 0.78 wt% pada karbon aktif dengan luas permukaan $2491\text{m}^2/\text{g}$ pada tekanan 12 MPa.

1.2 Rumusan Masalah

Salah satu hambatan teknis yang paling menantang dalam perkembangan teknologi dan pengaplikasian energi hidrogen adalah untuk penyimpanan hidrogen yang aman, handal, kompak, dan hemat biaya serta untuk menyebarluaskan

penggunaan hidrogen sebagai salah satu bentuk energi. Hambatan itu dikarenakan karakteristik fisik hidrogen yang membuatnya sulit untuk disimpan dalam jumlah besar pada ruang yang kecil. Hidrogen adalah berupa gas pada temperatur dan tekanan atmosfer maka kendala terbesar penggunaannya selama ini adalah penyimpanannya dimana membutuhkan konstruksi tangki kuat untuk menahan tekanannya yang bisa mencapai 2000 Psi, maka kemungkinan untuk disimpan dengan menggunakan metode adsorpsi semisal karbon aktif menjadi sangat menarik karena menjanjikan penurunan tekanan yang cukup signifikan dengan kapasitas yang sama.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian yang dilakukan adalah:

1. Adsorpsi *isothermal* dilakukan pada kondisi lingkungan Laboratorium Pendingin dan Pengkondisian Udara Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia dengan tekanan adsorpsi mulai dari 1 bar sampai dengan 30 bar dengan kenaikan setiap 5 bar pada temperatur isothermal 45°C (288K, 298K dan 318 K).
2. Adsorpsi *Isothermal* H_2 dilakukan pada jenis karbon aktif granular berbahan dasar cangkang kelapa sawit.
3. Uji Adsorpsi *Isothermal* dilakukan dengan menggunakan metode volumetrik.
4. Regresi dilakukan dengan menggunakan persamaan model Langmuir, Toth dan Langmuir-Freundlich.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini antara lain:

1. Melakukan pengujian adsorpsi isothermal gas hidrogen pada karbon aktif granular berbahan dasar cangkang kelapa sawit dan menghitung kapasitas penyerapan maksimum dari pengujian

kemampuan adsorpsi hidrogen pada temperatur 45°C hingga tekanan 30 bar.

2. Melakukan regresi data adsorpsi isothermal dengan menggunakan persamaan Langmuir, Toth, dan Langmuir Freundlich.

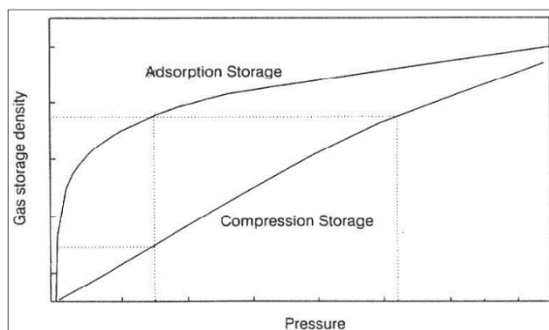
1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat memberikan suatu kontribusi terhadap penelitian tentang bahan penyimpanan hidrogen, khususnya dalam rangka pemanfaatan hidrogen sebagai pengganti bahan bakar fosil.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Penyimpanan Hidrogen

Hidrogen berbentuk gas dalam temperatur dan tekanan atmosfer, maka kemungkinan untuk disimpan dengan menggunakan metode adsorpsi semisal karbon aktif menjadi sangat menarik. Material karbon aktif dapat dengan mudah mengikat dan melepas *hydrogen* melalui mekanisme adsorpsi dan desorpsi. Dengan mengadsorpsi hidrogen pada karbon aktif, hidrogen akan berubah dari fasa gas ke fasa mendekati cair sehingga memungkinkan untuk menurunkan tekanan pada kapasitas penyimpanan yang sama atau meningkatkan kapasitas penyimpanan dengan tekanan yang sama seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Komparasi Adsorption Storage dan Compression Storage [6]

Masalah utama dalam menyimpan hidrogen adalah karena hidrogen berbentuk gas pada temperatur kamar dan tekanan atmosfer. Satu kilogram hidrogen menempati 12.2 m³ pada temperatur dan tekanan kamar karena dibutuhkan sedikitnya 5 kg hidrogen untuk memiliki kemampuan jarak tempuh yang sama dengan mobil berbahan bakar minyak. Maka diperlukan usaha untuk mengurangi volume 5 kg hidrogen dari 60 m³ menjadi 0.06-0.1 m³ yang mana merupakan volume yang diperbolehkan untuk tangki bahan bakar [7].

Berbagai teknologi penyimpanan gas hidrogen telah dikembangkan dengan mempertimbangkan biaya, berat dan volume, efisiensi, keawetan, waktu pengisian dan pengosongan (*charge and discharge*), temperatur kerja serta efisiensinya.

1. Tangki bertekanan tinggi (*Compressed Hydrogen*)

Semakin tinggi tekanan, semakin besar energi per unit volume. Hidrogen tidak terkompresi mempunyai densitas energi 10.7 kJ/L, pada saat dikompresi pada tekanan 750 bar, densitas energinya meningkat menjadi 4.7 MJ/L.

2. Tangki hidrogen cair (*Cryogenic*)

Gas hidrogen dicairkan pada temperatur yang sangat rendah. Pada tekanan 1 atm, dibutuhkan temperatur hingga 22 K.

3. Adsorpsi Storage

Pada metode ini, hidrogen diadsorpsi pada permukaan bahan berpori seperti nanofiber grafit, nanotube karbon, karbon aktif, zeolit dan *Metal Organic Framework* (MOF).

2.2 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses dimana komponen-komponen tertentu dari suatu fasa fluida berpindah ke permukaan zat padat yang digunakan sebagai material berpori (adsorben). Fenomena konsentrasi

zat pada permukaan padatan disebut fasa teradsorb atau adsorbat, sedangkan zat yang akan menyerap atau menariknya disebut adsorben.

2.2.1 Mekanisme adsorpsi hidrogen

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 seimbang dimana gaya kohesi cenderung lebih besar dari pada gaya adhesi. Gaya-gaya yang tidak seimbang menyebabkan zat padat atau cair tersebut cenderung menarik zat lain atau gas yang bersentuhan pada permukaannya.

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

a. Adsorpsi Fisis

Adsorpsi fisis adalah adsorpsi yang terjadi karena adanya gaya Van Der Waals (gaya tarik-menarik yang relatif lemah) antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi fisis dapat diputuskan dengan mudah, yaitu dengan cara pemanasan pada temperatur 150 – 200 °C selama 2 – 3 jam.

b. Adsorpsi Kimia

Adsorpsi kimia adalah adsorpsi yang terjadi karena terbentuknya ikatan kovalen dan ion antara molekul-molekul adsorbat dengan adsorben. Lapisan yang terbentuk adalah lapisan monolayer. Adsorpsi kimia bersifat tidak reversible dan umumnya terjadi pada temperatur tinggi di atas temperatur kritis adsorbat, sehingga panas adsorpsi yang dilepaskan juga tinggi (10 – 100 kkal/g.mol). Sedangkan untuk dapat terjadinya peristiwa desorpsi dibutuhkan energi aktivasi berkisar antara 10 – 60 kkal/g.mol.

Pada sistem adsorbat-adsorben, jumlah adsorbat yang terserap oleh adsorben pada kondisi equilibrium merupakan fungsi dari tekanan dan temperatur [8]:

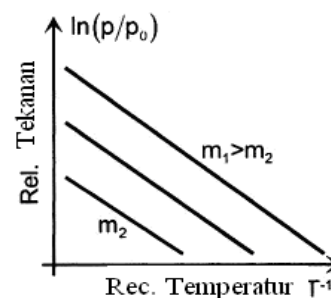
$$\frac{x}{m} = f(P, T) \quad (1)$$

dimana, x/m adalah jumlah adsorbat yang terserap.

Adsorpsi equilibrium dapat didekati dalam tiga cara, yaitu adsorpsi isosterik, isobar, dan isothermal.

2.2.2.1 Adsorpsi Isosterik

Pada adsorpsi isosterik jumlah adsorbat yang terserap konstan dan temperatur adsorpsi divariasikan:



Gambar 2. Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isosterik[8]

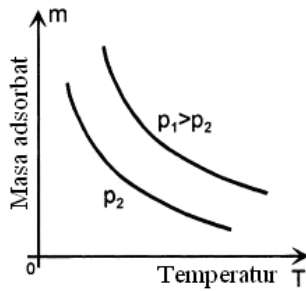
$$P = f(T) \left[\frac{x}{m} = \text{konstan} \right] \quad (2)$$

2.2.2.2 Adsorpsi Isobar

Pada adsorpsi isobar, tekanan adsorpsi konstan sehingga x/m merupakan fungsi dari variasi temperatur:

$$\frac{x}{m} = f(T) [P = \text{konstan}] \quad (3)$$

2.2.2 Kesetimbangan adsorpsi

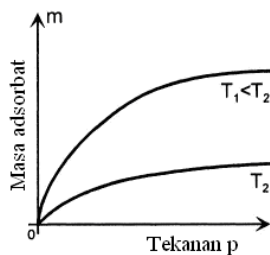


Gambar 3. Grafik Data yang Diperoleh Pada Adsorpsi Isobar [8]

2.2.2.3 Adsorpsi Isotermal

Pada adsorpsi isotermal, temperatur adsorpsi dijaga konstan. Sehingga dengan demikian x/m merupakan fungsi dari tekanan equilibrium:

$$\frac{x}{m} = f(P) [T = \text{konstan}] \quad (4)$$



Gambar 4. Grafik Data yang Diperoleh pada Adsorpsi Isotermal [8]

2.2.3 Persamaan adsorpsi isotermal

2.2.3.1 Persamaan Isotermal Langmuir

Asumsi model Langmuir adalah bahwa permukaan adsorben homogen, dimana energi adsorpsi adalah konstan pada seluruh permukaan adsorben. [9].

Jika C_μ adalah jumlah penyerapan dalam satuan mol per satuan massa atau volume dan $C_{\mu s}$ adalah jumlah penyerapan maksimum, sehingga persamaan menjadi [9]:

$$C_\mu = C_{\mu s} \frac{b.P}{1+b.P} \quad (5)$$

dengan:

P = Tekanan adsorpsi
 b = Konstanta Langmuir.

$$b = \frac{\alpha \exp\left(\frac{Q}{R_g.T}\right)}{k_{d\infty} \sqrt{2 \pi m.R_g T}} \quad (6)$$

2.2.3.2 Persamaan Isotermal Toth

Asumsi permukaan adalah heterogen. Pada persamaan isotermal Toth terdapat parameter t yang merupakan parameter karakteristik heterogenitas permukaan adsorben. Persamaan isotermal Toth adalah sebagai berikut [9]):

$$C_\mu = C_{\mu s} \frac{b.P}{[1+(b.P)^t]^{1/t}} \quad (7)$$

2.2.3.3 Persamaan Isotermal Langmuir-Freundlich

Persamaan model Langmuir-Freundlich juga digunakan pada permukaan adsorben yang heterogen seperti karbon aktif dan juga digunakan untuk tekanan rendah dan tinggi.

Persamaan isotermal Langmuir-Freundlich adalah sebagai berikut (Do, 2008):

$$C_\mu = C_{\mu s} \frac{(b.P)^{1/n}}{1+(b.P)^{1/n}} \quad (8)$$

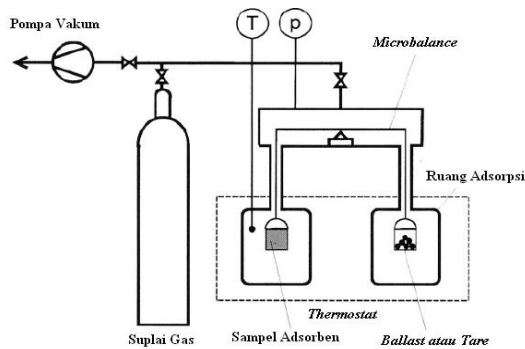
2.2.4 Metode pengujian adsorpsi

Metode pengukuran penyerapan adsorpsi yang paling sering digunakan yaitu metode gravimetrik dan metode volumetrik.

2.2.4.1 Metode Gravimetrik

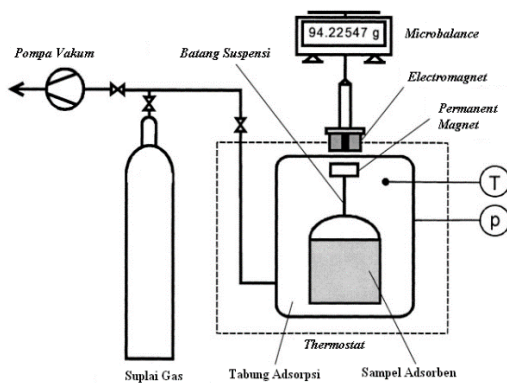
Pengujian dengan menggunakan metode gravimetrik memiliki akurasi pengukuran paling tinggi. Adsorpsi isotermal menggunakan metode gravimetrik dapat mengukur massa yang terserap pada adsorben, tekanan gas dan temperatur. Alat yang digunakan untuk mengukur adsorpsi isotermal adalah *Thermograph Microbalance Apparatus* (TMA) [10].

Pada Gambar 5 terlihat skema metode gravimetrik dengan menggunakan *Two Beam Balance*, di mana sampel adsorben diletakkan di dalam tabung. Skematik *Thermograph Microbalance Aparatus* sebagai berikut:



Gambar 5. Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Two Beam Balance*

Pada Gambar 6 terlihat skema metode gravimetrik dengan menggunakan *Magnetic Suspension Balance*. Medan magnet akan berubah disebabkan karena adanya perubahan jarak antara *permanent magnet* dengan *electromagnet* yang hasilnya langsung bisa dilihat pada *microbalance*.

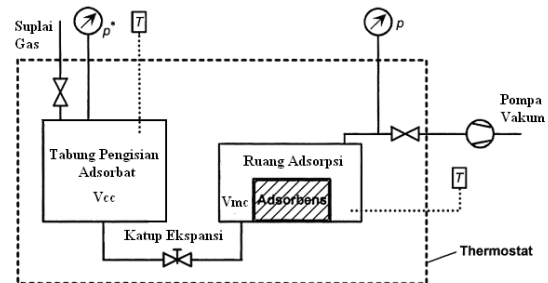


Gambar 6. Skema Metode Gravimetrik dengan Menggunakan *Magnetic Suspension Balance*

2.2.4.2 Metode Volumetrik

Dasar pengukuran dengan menggunakan metode volumetrik adalah

tekanan, volume dan temperatur. Pengukuran adsorpsi dengan metode volumetrik ini lebih sering digunakan, karena lebih sederhana dan efektif. [10]. Skematik metode volumetrik terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Skema Metode Volumetrik

Peralatan yang digunakan untuk pengukuran adsorpsi equilibrium dengan menggunakan metode volumetrik pada dasarnya terdiri atas *storage vessel* dan *adsorption chamber* yang keduanya dihubungkan dengan menggunakan *tube*. Kedua tabung tersebut harus ditempatkan dalam sebuah wadah yang dilengkapi dengan *thermostat*. Selain itu juga dilengkapi dengan termometer dan *pressure gauge*, sehingga temperatur dan tekanan di dalam *vessel* dapat diukur.

Hal yang terpenting dalam pengukuran adsorpsi isothermal menggunakan metode volumetrik adalah, sebagai berikut [11]):

1. Volume efektif alat uji harus diketahui.
2. Alat uji harus dapat mengukur temperatur dari gas yang menjadi adsorbat.
3. Keakuratan alat uji untuk mengukur perubahan tekanan pada metode volumetrik adalah hal yang utama.
4. Perhitungan adsorbat yang terserap dapat diukur menggunakan persamaan gas ideal.

Kelebihan dengan metode volumetrik adalah dapat mengukur beberapa jenis sampel dan memiliki *sensitivity* yang tinggi.

2.3 Adsorben

Material penyerap atau adsorben adalah zat atau material yang mempunyai kemampuan untuk mengikat dan mempertahankan cairan atau gas di dalamnya [12]. Kemampuan adsorpsi dari adsorben tergantung pada beberapa parameter fisik sebagai berikut:

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

Untuk memenuhi kriteria yang pertama adsorben harus memiliki ukuran pori yang kecil. Dengan demikian adsorben yang bagus harus memiliki dua kombinasi ukuran pori yaitu mesopori dan mikropori.

Adapun pembagian ukuran diameter dan jenis pori pada adsorben dibagi atas 3 yaitu (Do, 2008):

- a. Mikroporositas < 2.0 nm.
- b. Mesoporositas $2.0 - 50$ nm
- c. Makroporositas > 50 nm

3. Metode

3.1 Alat Uji

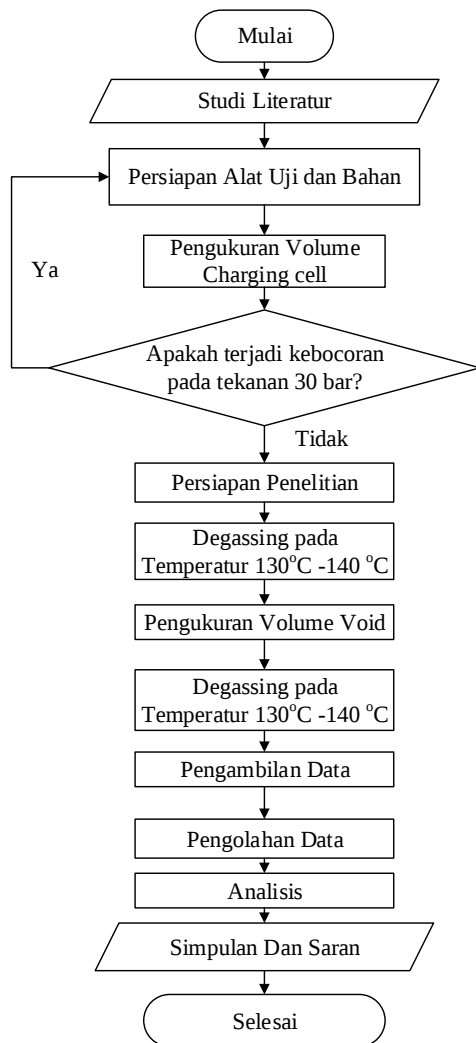
Adsorpsi isothermal pada prinsipnya terdiri atas dua buah silinder yaitu silinder pengisian (*charging cell*) dan silinder pengukuran (*measuring cell*) yang terbuat dari *stainless steel* 304 (SS 304). Kedua tabung tersebut dihubungkan dengan *tube stainless steel* dimana keduanya terendam dalam fluida yang temperaturnya dikontrol oleh *Circulating Thermal Bath* (merk HÜBER) dengan akurasi $0,1^{\circ}\text{C}$. Tekanan pada kedua silinder diukur dengan menggunakan *pressure transmitter* dengan kisaran pengukuran $0-40$ bar absolut (merk AceZ) dengan akurasi $0,15\%$. *Thermocouple* kelas A tipe K digunakan untuk mengukur temperatur adsorbat (H_2) dan adsorben (karbon aktif). Data tekanan dan temperatur direkam melalui data akuisisi dari *National Instrument*.

3.2 Bahan

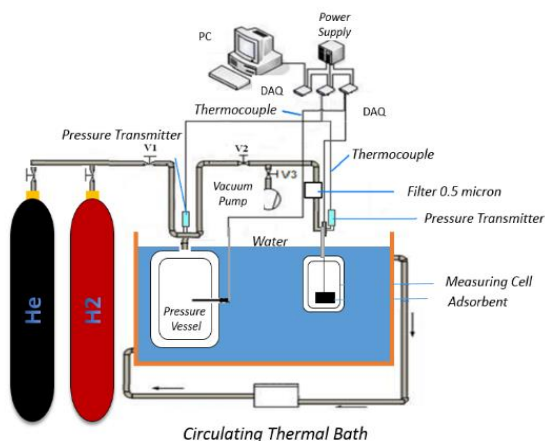
Bahan yang digunakan sebagai adsorben adalah karbon aktif granular ukuran $1\text{ mm s/d } 2\text{ mm}$ yang terbuat dari cangkang sawit dengan *iodine number* 603 g/g produksi Lab Pendingin Universitas Indonesia. Gas Hidrogen yang digunakan sebagai adsorbat dalam penelitian ini dengan *Ultra High Purity* 99.9999%.

3.3 Persiapan penelitian

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 5 jam dimana sistem 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 $130-140^{\circ}\text{C}$. Gas Helium (He) dimasukkan ke dalam sistem 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 sistem konstan pada temperatur tertentu. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar 8 dan skema alat uji dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 8. Diagram Alir Penelitian



Gambar 9 Skema Alat Uji Adsorpsi Isothermal

3.4 Pengambilan Data

Setelah temperatur pada sistem konstan (isothermal), gas hidrogen (H₂)

dimasukan 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 H₂ kembali diisikan pada tekanan berikutnya kedalam *charging cell* setelah temperatur pada *charging cell* kembali pada temperatur semula. Proses tersebut berlangsung sampai dengan tekanan pengisian 30 bar.

Pengujian adsorpsi isothermal dilakukan dengan menggunakan metode volumetrik, skema keseimbangan massa adsorpsi isothermal terlihat pada Gambar 10. Dasar pengukuran metode volumetrik adalah tekanan, volume dan temperatur, di mana 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.

3.5 Pengolahan Data

Kesetimbangan massa uap adsorbat dalam *charging cell* dan *measuring cell* dapat diasumsikan sebagai berikut:

$$dm_{a,mc} = |m_{cc}| - m_{ads} \quad (9)$$

dengan:

$dm_{a,mc}$ = Massa adsorbat di *Measuring cell* (kg)

$|m_{cc}|$ = Massa adsorbat di *Charging 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:

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

$$= \frac{(P_{cc}(t) - P_{cc}(t + \Delta t)) \cdot V_{cc}}{Z \cdot R_{cc} \cdot T_{cc}} \quad (10)$$

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

$$= \frac{(P_{mc}(t + \Delta t) - P_{mc}(t)) \cdot V_{mc}}{Z \cdot R_{mc} \cdot T_{cc}} \quad (11)$$

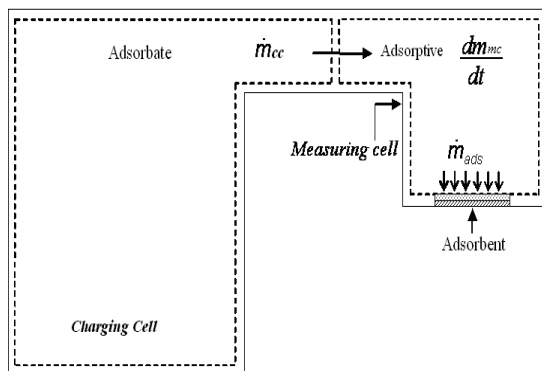
Dengan mensubstitusikan persamaan (10) dan (11) ke dalam pers (9), maka didapat:

$$\begin{aligned} m_{ads} &= \Delta m_{ads}(t) \\ &= \frac{(P_{cc}(t) - P_{cc}(t + \Delta t)) \cdot V_{cc}}{Z \cdot R_{cc} \cdot T_{cc}} - \frac{(P_{mc}(t + \Delta t) - P_{mc}(t)) \cdot V_{mc}}{Z \cdot R_{mc} \cdot T_{cc}} \end{aligned} \quad (12)$$

atau

$$m_{ads} = \rho_{cc}(P, T) \cdot V_{cc} - (P, T) \cdot V_{mc} \quad (13)$$

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 10. Skema Keseimbangan Massa pada Proses Penyerapan

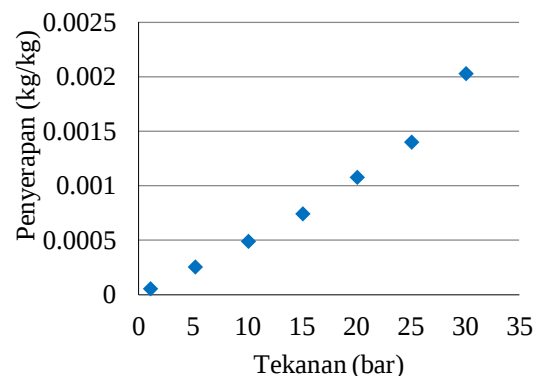
Perhitungan besaran persamaan adsorpsi isothermal menggunakan data analisis *solver* pada *Microsoft office excel* hingga didapatkan deviasi paling minimum.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Data adsorpsi cangkang sawit pada temperatur 45°C

Tabel 1 menunjukkan data adsorpsi pada temperatur 45°C dan gambar 11 menunjukkan grafik dari data yang didapatkan:

Tekanan MC (bar)	Penyerapan (kg/kg)
1.08	5.21812E-05
5.19	0.000251294
10.11	0.000487828
15.09	0.000740621
20.11	0.001074537
25.12	0.001397518
30.13	0.00202727



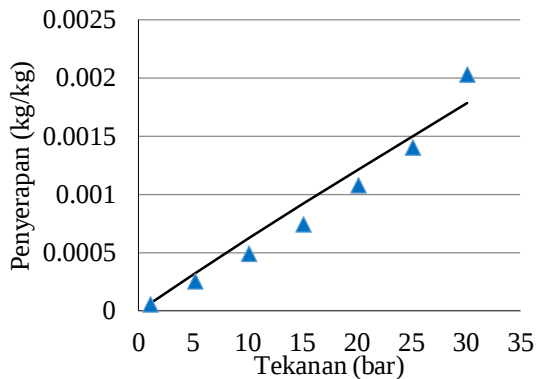
Gambar 11. Adsorpsi isothermal H₂ Pada Karbon Aktif Temperatur 45 °C

Gambar 11 menjelaskan bahwa semakin besar tekanan maka kapasitas penyerapan hidrogen pada karbon aktif akan semakin besar. Hal tersebut terjadi dikarenakan pada proses adsorpsi, adsorbat yang dialirkan dan menumbuk permukaan karbon aktif sangat bergantung kepada tekanan yang diberikan. Jika tekanan yang diberikan semakin besar, maka kecepatan aliran gas adsorbat yang menumbuk karbon aktif akan semakin besar sehingga jumlah adsorbat yang menempel pada permukaan karbon aktif semakin besar.

Setelah didapatkan data hasil pengujian, selanjutnya dilakukan korelasi dengan beberapa persamaan model.

4.2 Persamaan model Langmuir

Gambar 12 menunjukkan grafik hasil persamaan model Langmuir dan Tabel 2 menunjukkan besaran yang digunakan pada persamaan model Langmuir.



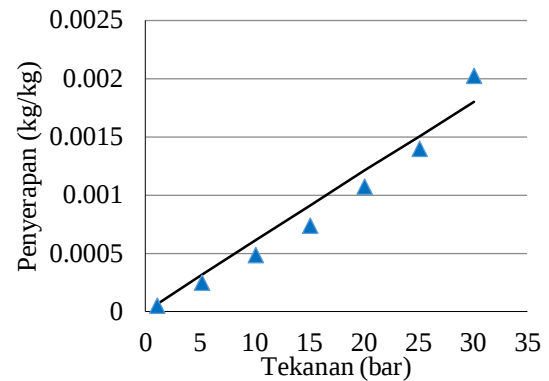
Gambar 12. Korelasi Pendekatan Kapasitas Penyerapan H_2 dengan Persamaan Langmuir; ▲ 45°C Garis tebal adalah regresi dengan persamaan Langmuir

Tabel 2. Besaran Yang Digunakan Pada Persamaan Langmuir Untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen

Parameter	Nilai
C_μ (kg/kg)	0.03
Q/R (K)	795.62
k_∞	1430.17
α	0.31
$\delta(\%)$	16.72

4.3 Persamaan Model Toth

Gambar 13 menunjukkan grafik hasil persamaan model Toth dan Tabel 3 menunjukkan besaran yang digunakan pada persamaan model Toth.



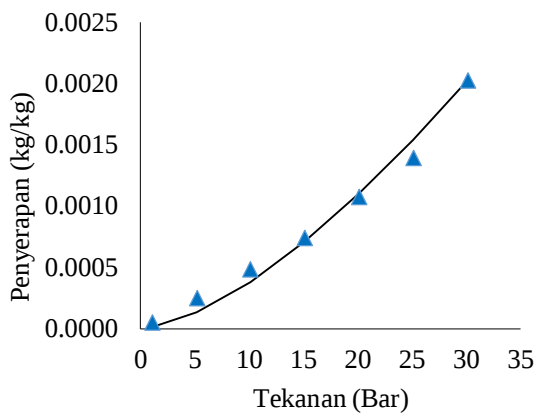
Gambar 13. Korelasi Pendekatan Kapasitas Penyerapan H_2 dengan Persamaan Toth; ▲ 45°C Garis tebal adalah regresi dengan persamaan Toth

Tabel 3. Besaran Yang Digunakan Pada Persamaan Toth Untuk Adsorpsi Isotermal Hidrogen

Parameter	Nilai
C_μ (kg/kg)	0.09
Q/R (K)	770.75
k_∞	159.61
α	0.01
t	0.95
$\delta(\%)$	15.97

4.4 Persamaan model Langmuir-Freundlich

Gambar 14 menunjukkan grafik hasil persamaan model Langmuir-Freundlich dan Tabel 4 menunjukkan besaran yang digunakan pada persamaan model Langmuir-Freundlich.



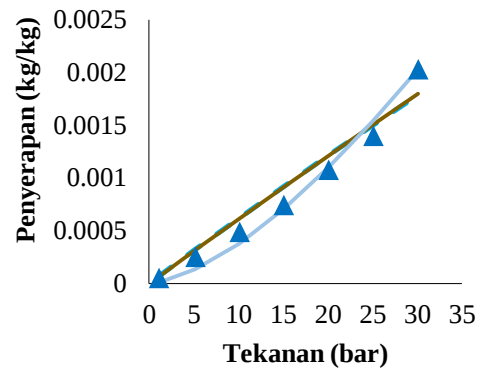
Gambar 14. Korelasi Pendekatan Kapasitas Penyerapan H₂ dengan Persamaan Langmuir-Freundlich; ▲ 45°C Garis tebal adalah regresi dengan persamaan Langmuir-Freundlich

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

Parameter	Nilai
C_{μ} (kg/kg)	0.04
Q/R (K)	469.47
k_{∞}	26.85
n	0.64
α	0.04
δ (%)	9.79

Gambar 15 menunjukkan korelasi pendekatan kapasitas penyerapan hidrogen pada temperatur 45 °C dengan persamaan

model langmuir, toth dan langmuir-freundlich



Gambar 15 Korelasi Pendekatan Kapasitas Penyerapan H₂; ▲ 45°C, — Langmuir Freundlich 45 °C, — Toth 45°C, - - - Langmuir 45°C

Zheng [13] dalam penelitiannya menggunakan 3 persamaan model yang sama yaitu Langmuir, Toth, dan Langmuir-Freundlich yang membuat suatu akumulasi error dari 2 buah jenis karbon aktif jenis GS dengan luas permukaan 300 m²/g dan SAC-02 dengan luas permukaan 2074 m²/g pada Temperatur 77.15 K. Akumulasi relative error dapat dilihat pada tabel 7. Dari 3 persamaan model untuk tekanan 0.1-1 MPa persamaan yang memiliki deviasi paling kecil adalah toth untuk karbon aktif GS dan SAC-02. Pada tekanan 1-6 MPa persamaan yang memiliki deviasi paling kecil adalah Langmuir-Freundlich untuk kedua jenis karbon aktif.

Tabel 7. *Acumulated relative errors of predicted results of adsorption models at 77.15 K within different pressure regions.*[13]

Adsorption Model	Acumulated relative error ε /%							
	0-0.025 MPa		0.025-0.1Mpa		01-1.0 MPa		1.0-6.0 MPa	
	GS	SAC-02	GS	SAC-02	GS	SAC-02	GS	SAC-02
Langmuir	6.45	5.85	2.9	3.1	0.38	0.42	4.9	0.51
Toth	0.91	1.24	0.16	0.22	0.03	0.05	0.37	0.41
L-Freundlich	7.92	8.2	0.14	0.22	0.06	0.057	0.16	0.13

5. Kesimpulan

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis data hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Kapasitas penyerapan hidrogen maksimum pada temperatur 45 °C adalah 2.03×10^{-3} kg/kg tekanan 30.13.
2. Deviasi yang diperoleh dari Persamaan Langmuir, Toth, dan Langmuir-Freundlich adalah 16.72%, 15.97 %, dan 9.78 %.

5.2 Saran

Saran yang dapat penulis berikan adalah sebagai berikut:

1. Proses Adsorpsi Isotermal Hidrogen diharapkan dapat dilakukan pada temperatur yang lebih rendah agar kapasitas penyerapan lebih tinggi lagi.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik mesin Universitas Indonesia atas bantuan selama proses penelitian berlangsung.

Daftar Pustaka

- [1] Prasodjo, Prolessara (2010). Studi Kapasitas Adsorpsi Serta Dinamika Adsorpsi Dan Desorpsi Dari Nanotube Karbon Sebagai Penyimpan Hidrogen. Thesis FTUI, Depok
- [2] Poirier, E et al. (2004). Storage of Hydrogen on Single-walled Carbon Nanotube and Other Carbon Structures. *Appl. Phys. A*, 78, 961-967.
- [3] Zhao, Tingkai, Guangmin Li, Lehao liu, Li Du, Yongning Liu, Tiehu Li. 2011. Hydrogen Storage Behavior of Amorphous Carbon Nanotubes at Low Pressure and Room Temperature. *Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures*, 19: 677-683, 2011.
- [4] Shindo, K, T. Kondo, Y. Sakurai. 2011. H NMR study of hydrogen stored in activated carbon powder prepared by mechanical milling. *Journal of Alloys and Compounds* 509 (2011) 4534-4537.
- [5] Minoda, Ai, Shinji Oshima, Hideshi Iki, Etsuo Akiba. 2014. Hydrogen storage capacity of lithium-doped KOH activated carbons. *Journal of Alloys and Compounds* 606 (2014) 112-116.
- [6] Langohr, David, 2004. *A Study On Hydrogen Storage Through Adsorption In Nanostructured Carbons*. Ecole Des mines de Paris.
- [7] Yan, Sun et al. (2007). Impact of Supercritical Adsorption Mechanism on Research of Hydrogen Carrier. *Chinese Science Bulletin*, 52 (8), 11461152.
- [8] Keller, Jürgen U. Staudt, Reiner. 2005. *Gas adsorption equilibria; Experimental methods and Adsorptive Isotherms*. Boston, United States of America: Springer Science & Business Media, Inc
- [9] Do, Duong D., 2008. *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte.
- [10] Rouquerol, Jean, François Rouquerol, Kenneth Sing, 1998, *Adsorption By Powders And Porous Solids*, Elsevier.
- [11] Keller, J. U., Robens E., du Fresne von Hohenesche, C. (2002). Thermogravimetric and Sorption Measurement Techniques / Instruments. Proceedings of 6th Int. Symposium on the Characterization of Porous Solids (COPS VI), Alicante, Spain, May 8-11, 2002, *Studies in Surface Sciences and Catalysis*, Vol. 144, F. Rodriguez-Reinoso et al., Eds., p. 387-394, Elsevier, New York etc., 2003
- [12] Suryawan, Bambang, 2004. Karakteristik Zeolit Indonesia sebagai Adsorben Uap Air, Desertasi, FT-UI, Depok
- [13] Zheng, Qingrong, Xiaohua Wang, Shuai Gao Adsorption equilibrium of hydrogen on graphene sheets and

activated carbon *Cryogenics*, 61 (2014)
143–148