

## ADSORPSI ISOTERMAL CO<sub>2</sub> BERTEKANAN TINGGI PADA KARBON AKTIF DENGAN METODA VOLUMETRIK

Awaludin Martin<sup>\*)</sup>, Bambang Suryawan, Muhammad Idrus Alhamid, dan Nasruddin

Laboratorium Teknik Pendingin dan Pengkondisian Udara, Departemen Teknik Mesin,  
Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

<sup>\*)</sup>E-mail: awaludin\_martin@yahoo.com

---

### Abstrak

Sistem adsorpsi adalah salah satu cara atau metoda yang paling efektif untuk memisahkan CO<sub>2</sub> dengan zat lainnya yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil. Pada rancangan untuk aplikasi tersebut, disamping data karakteristik material berpori (adsorben), data penyerapan CO<sub>2</sub> pada adsorben (kinetik dan termodinamika) juga dibutuhkan. Penelitian ini bertujuan menghasilkan data adsorpsi isotermal pada tekanan sampai dengan 3,5 MPa dengan menggunakan metoda tak langsung (metoda volumetrik) pada temperatur isotermal 300, 308, 318 dan 338 K. Adsorben yang digunakan adalah karbon aktif berbahan dasar batubara Kalimantan Timur yang diproduksi dengan menggunakan metode aktivasi fisika (CO<sub>2</sub>) dengan luas permukaan karbon aktif (karbon aktif KT) adalah 668 m<sup>2</sup>/g dan volume porinya 0,47 mL/g. Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang digunakan adalah karbon dioksida *high purity* dengan kemurnian 99,9%. Data yang diperoleh dari hasil eksperimen kemudian dikorelasi dengan menggunakan model persamaan Langmuir dan Toth. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Kapasitas penyerapan maksimum adalah 0,314 kg/kg pada temperatur 300 K dan tekanan equilibrium 3384,69 kPa. Hasil regresi data eksperimen dengan menggunakan model Langmuir dan Toth adalah 3,4% dan 1,7%.

### Abstract

**High Pressure Adsorption Isotherm of CO<sub>2</sub> on Activated Carbon using Volumetric Method.** Adsorption system is one of the most effective methods for CO<sub>2</sub> separating with other substances that produced from the burning of fossil fuels. In the design for that application, beside of characteristics of porous material (adsorbent) data, CO<sub>2</sub> adsorption data on the adsorbent (kinetic and thermodynamic) are also needed. The aim of this research is resulting isothermal adsorption data at pressures up to 3.5 MPa by indirect methods (volumetric method) at isothermal temperature of 300, 308, 318 and 338 K. Adsorbent that used in this research is activated carbon made from East of Kalimantan coals by physical activation method (CO<sub>2</sub>) which is the surface area of activated carbon is 668 m<sup>2</sup>/g and pore volume is 0.47 mL/g. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) that used in this research is high purity carbon dioxide with a purity of 99.9%. Data from the experiment results then correlated using the Langmuir and Toth equations model. The results showed that the maximum adsorption capacity is 0.314 kg/kg at 300 K and 3384.69 kPa. The results of regression of experiment data using Langmuir and Toth models were 3.4% and 1.7%.

*Keywords: adsorption isothermal, adsorption capacity, Langmuir equation, Toth equation*

---

### 1. Pendahuluan

Sistem adsorpsi banyak sekali digunakan baik dalam kehidupan sehari-hari maupun dalam dunia industri seperti pada sistem penyerapan limbah, sebagai katalis reaksi, gas storage (penyimpan gas), sistem pendingin, pemurnian gas alam dan lain-lain [1].

Salah satu aplikasi sistem penyerapan adalah pada sistem penyerapan CO<sub>2</sub>. Emisi gas CO<sub>2</sub> dari hasil

pembakaran bahan bakar fosil pada kendaraan, industri, pembangkit listrik dan lain-lain yang terakumulasi di atmosfer akan mengakibatkan terjadinya pemanasan global [2]. Sistem adsorpsi adalah salah satu cara atau metoda yang paling efektif untuk memisahkan CO<sub>2</sub> dengan zat lainnya yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil [2].

Pada rancangan untuk aplikasi tersebut diatas, disamping data karakteristik material berpori (adsorben)

data penyerapan (kinetik dan termodinamika) juga dibutuhkan [3]. Paling tidak terdapat dua metoda untuk mendapatkan data penyerapan (*adsorption equilibrium*), pertama adalah metoda langsung (metoda gravimetrik/*gravimetric method*) dan yang kedua metoda tak langsung (metoda volumetrik/*volumetric method*).

Penelitian ini akan menghasilkan data adsorpsi isothermal pada tekanan sampai dengan 3,5 MPa dengan menggunakan metoda tak langsung (metoda volumetrik) dengan menggunakan karbon aktif pada temperatur isothermal 300, 308, 318 dan 338 K. Data eksperimen juga akan dikorelasi dengan menggunakan model persamaan Langmuir dan Toth.

**2. Metode Penelitian**

Ada empat metoda pengukuran adsorpsi isothermal, yaitu metoda *carrier gas*, metoda volumetrik, metoda gravimetrik dan metoda kalorimetrik. Keempat metoda pengukuran penyerapan adsorpsi tersebut telah digunakan di berbagai negara dan telah diakui secara internasional [4]. Dalam penelitian ini metoda adsorpsi isothermal yang digunakan adalah metoda volumetrik.

**Adsorpsi Isothermal dengan Metoda Volumetrik.** Dasar pengukuran metoda volumetrik adalah tekanan, volume dan temperatur. Data pengukuran pada metoda 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 (lihat Gambar 1).

Kesetimbangan massa uap adsorbat dalam *measuring cell* dapat diasumsikan sebagai berikut [5]:

$$\frac{dm_{d,ms}}{dt} = |\dot{m}_{vv}| - \dot{m}_{ads} \tag{1}$$

dengan:  $dm_{d,ms}/dt$  = laju aliran massa adsorbat di *measuring cell* (kg/s)

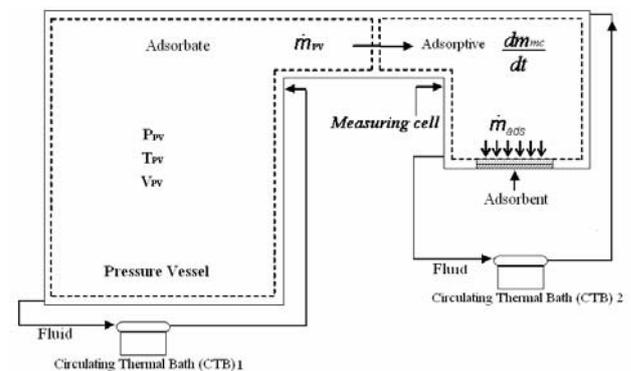
$|\dot{m}_{vv}|$  = laju aliran massa adsorbat di *vapour vessel* (kg/s)

$\dot{m}_{ads}$  = laju aliran massa adsorbat yang diserap oleh adsorben (kg/s)

Selama proses dari mulai *vapour vessel* sampai pada *measuring cell* jika adsorbat diasumsikan mempunyai sifat gas ideal maka  $Z$  yang merupakan faktor kompresibilitas adalah 1. Namun dalam penelitian ini adsorbat yang digunakan tidak diasumsikan sebagai gas ideal sehingga nilai  $Z$  sangat bergantung pada besar tekanan dan temperatur. Nilai  $Z$  didapat dengan menggunakan *software* REFPROP versi 8.

$$|\dot{m}_{vv}| = \left| \frac{\Delta m_{vv}}{\Delta t} \right| = \frac{m_{vv}(t) - m_{vv}(t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{(p_{vv}(t) - p_{vv}(t + \Delta t)) \cdot V_{vv}}{Z \cdot R_{vv} \cdot T_{vv} \cdot \Delta t} \tag{2}$$

$$\frac{dm_{d,ms}}{dt} = \frac{(m_{d,ms}(t + \Delta t) - m_{d,ms}(t))}{\Delta t} = \frac{(p_{ms}(t + \Delta t) - p_{ms}(t)) \cdot V_{ms}}{Z \cdot R_d \cdot T_{ms} \cdot \Delta t} \tag{3}$$



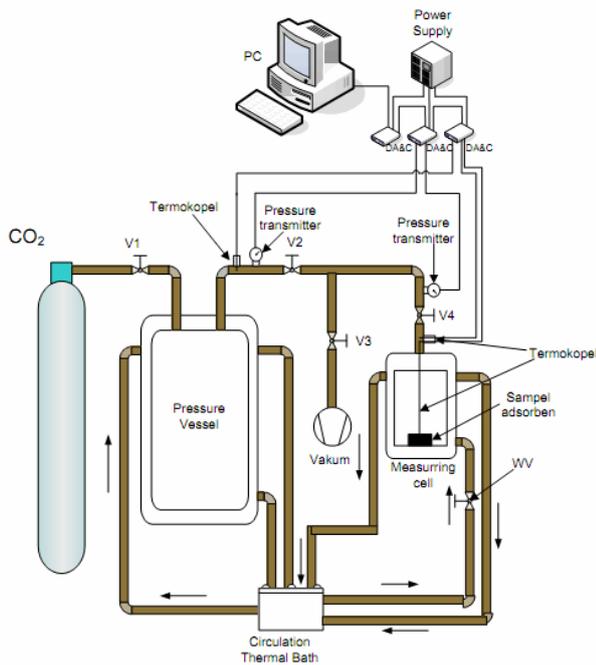
**Gambar 1. Skema Keseimbangan Massa pada Proses Penyerapan**

Dengan mensubstitusikan persamaan (2) dan (3) ke dalam pers (1), maka didapat:

$$\dot{m}_{ads} = \frac{\Delta m_{ads}(t)}{\Delta t} = \frac{(p_{vv}(t) - p_{vv}(t + \Delta t)) \cdot V_{vv}}{Z \cdot R_{vv} \cdot T_{vv} \cdot \Delta t} - \frac{(p_{ms}(t + \Delta t) - p_{ms}(t)) \cdot V_{ms}}{Z \cdot R_d \cdot T_{ms} \cdot \Delta t} \tag{4}$$

**Bahan dan Alat Uji.** Adsorben yang digunakan pada penelitian ini adalah karbon aktif berbahan dasar batubara Kalimantan Timur yang diproduksi dengan menggunakan metode aktivasi fisika (CO<sub>2</sub>). Luas permukaan karbon aktif (karbon aktif KT) adalah 668 m<sup>2</sup>/g dan volume porinya 0,47 mL/g. Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang digunakan adalah karbon dioksida *high purity* dengan kemurnian 99,9%.

**Alat Uji Adsorpsi Isothermal.** Alat uji adsorpsi Isothermal pada prinsipnya terdiri atas dua buah silinder yaitu silinder pengisian (*charging cell*) dan silinder pengukuran (*measuring cell*) dengan volume masing-masing adalah 1173 mL dan 83,4 mL yang terbuat dari *stainless steel* 304 (SS 304) seperti terlihat pada Gambar 2. Kedua tabung tersebut dihubungkan dengan *tube stainless steel* dimana keduanya terendam dalam fluida yang temperaturnya dikendalikan oleh *circulating thermal bath* (merk HUBER) dengan akurasi 0,1 °C.



Gambar 2. Skema Alat Uji

Tekanan pada kedua silinder diukur dengan menggunakan *pressure transmitter* dengan kisaran pengukuran 0-40 bar absolut (DRUCK PTX 1400) dengan akurasi 0,15%. *Thermocouple* kelas A tipe K digunakan untuk mengukur temperatur adsorbat (gas CO<sub>2</sub>) dan adsorben (karbon aktif). Data tekanan dan temperatur direkam melalui data akuisisi (merk National Instrument).

Proses awal pengujian adalah proses *degassing* dimana *measuring cell* yang telah berisi karbon aktif dihubungkan dengan *charging cell* kemudian dililiti dengan pemanas (*heater*). Proses *degassing* dimaksudkan untuk mengeluarkan seluruh unsur atau zat pengotor (*impurity*) yang kemungkinan terserap oleh karbon aktif selama penyimpanan. Proses *degassing* berlangsung sampai dengan 8 jam dan selama proses sistem di vakum dengan pompa vakum satu tingkat (merk ARUKI) sampai dengan tekanan mendekati 0,01 mbar. Selama proses tersebut *measuring cell* dipanaskan dengan cara dililiti dengan pemanas (*heater*) untuk menjaga temperatur karbon aktif pada kisaran 130–140 °C. Gas Helium (He) dimasukkan kedalam sistem pada tekanan sampai dengan 7 bar untuk meningkatkan proses pengeluaran zat pengotor pada karbon aktif.

Setelah proses *degassing*, kemudian *charging cell* dan *measuring cell* direndam dengan air yang disirkulasikan oleh *circulating thermal bath* (merk HUBER) dengan akurasi 0,1 °C untuk menjaga agar temperatur pada sistem konstan pada temperatur tertentu yang diinginkan. Setelah temperatur pada sistem konstan

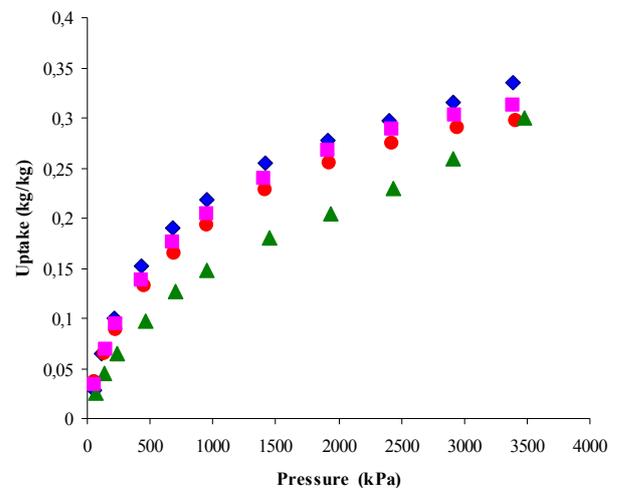
(isotermal), gas CO<sub>2</sub> dimasukkan kedalam *charging cell* dimana sebelumnya katup yang menghubungkan antara *charging cell* dan *measuring cell* ditutup. Setelah temperatur pada *charging cell* kembali ke temperatur isotermal katup penghubung tersebut dibuka, proses ini adalah proses awal adsorpsi isotermal. Gas CO<sub>2</sub> kembali diisikan pada tekanan berikutnya kedalam *charging cell* setelah temperatur pada *charging cell* kembali pada temperatur semula. Proses tersebut berlangsung sampai dengan tekanan pengisian 3,5 MPa. Proses di atas dilakukan kembali untuk temperatur isotermal yang berbeda.

### 3. Hasil dan Pembahasan

**Adsorpsi Isotermal.** Data adsorpsi isotermal CO<sub>2</sub> pada karbon aktif telah dilakukan pada temperatur 27, 35, 45, dan 65 °C (300, 308, 318 dan 338 K) sampai dengan tekanan 3,5 MPa dengan menggunakan metoda volumetrik. Gambar 3 adalah grafik adsorpsi isotermal CO<sub>2</sub> pada karbon aktif, dan dari gambar tersebut terlihat bahwa adsorpsi Isotermal CO<sub>2</sub> pada karbon aktif masuk dalam klasifikasi penyerapan IUPAC tipe I [6].

Gambar 3 juga menjelaskan bahwa kapasitas penyerapan CO<sub>2</sub> semakin besar dengan semakin besarnya tekanan *equilibrium* dan semakin rendahnya temperatur isotermal. Dengan demikian didapat bahwa kapasitas penyerapan adsorbat terhadap adsorben tergantung pada besarnya tekanan dan temperatur.

Data adsorpsi isotermal CO<sub>2</sub> pada karbon aktif yang diperoleh dibandingkan dengan data adsorpsi isotermal yang dilakukan oleh Karl Berlier dan Marc Fre're seperti terlihat pada Gambar 4. Karbon aktif yang digunakan oleh Karl Berlier dan Marc Fre're adalah



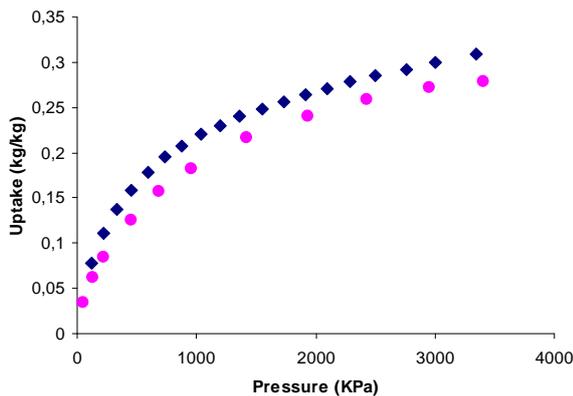
Gambar 3. Adsorpsi Isotermal Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>) pada Karbon Aktif KT pada Suhu 27 °C (◆), 35 °C (■), 45 °C (●), dan 65 °C (▲)

karbon aktif (F30/470) dengan luas permukaan 1150 m<sup>2</sup>/g dengan volume pori 0,62 mL/g [7].

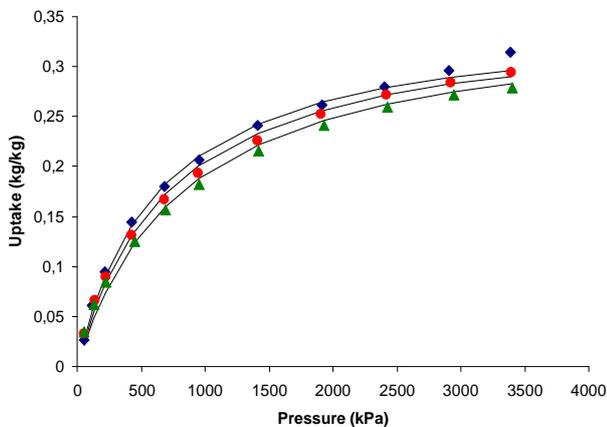
Kapasitas penyerapan yang diperoleh oleh Karl Berlier dan Marc Fre're lebih besar dibandingkan dengan kapasitas penyerapan CO<sub>2</sub> pada karbon aktif KT hal tersebut dikarenakan luas permukaan dan volume pori karbon aktif yang digunakan Karl Berlier dan Marc Fre're lebih besar dibanding dengan karbon aktif KT.

**Korelasi Adsorpsi Isotermal.** Model Langmuir dan Toth digunakan untuk merepresentasikan data keseimbangan adsorpsi. Asumsi model Langmuir adalah bahwa permukaan adsorben homogen dimana energi adsorpsi konstan pada seluruh permukaan adsorben. Model ini juga mengasumsikan bahwa adsorpsi dilokalisasi dan tiap lokasi hanya dapat mengakomodasi satu molekul atau atom [8]. Model Langmuir adalah sebagai berikut [9]:

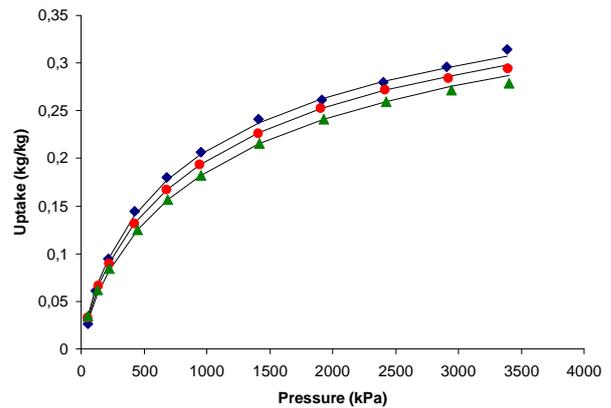
$$\frac{C}{C_0} = \frac{k_0 \cdot \exp(h_{st} / RT)P}{[1 + k_0 \exp(h_{st} / RT)P]} \quad (5)$$



**Gambar 4.** Adsorpsi Isotermal CO<sub>2</sub> pada Karbon Aktif pada Temperatur 45 °C, Karbon Aktif F30/470 (♦), Karbon Aktif KT (●)



**Gambar 5.** Adsorpsi Isotermal CO<sub>2</sub> pada Karbon Aktif KT pada Suhu 27 °C (♦), 35 °C (●), 45 °C (▲), dengan Persamaan Langmuir



**Gambar 6.** Adsorpsi Isotermal CO<sub>2</sub> pada Karbon Aktif KT pada Suhu 27 °C (♦), 35 °C (●), 45 °C (▲), dengan Persamaan Toth

**Tabel 1.** Besaran-besaran yang Digunakan

Parameter	Model Langmuir	Model Toth
C <sub>0</sub> (kg/kg)	0,352	0,491
h <sub>st</sub> /R (K)	1409,449	1409,353
k <sub>0</sub> (1/kPa)	1,43.10 <sup>-5</sup>	1,82.10 <sup>-5</sup>
t	-	0,59
Deviasi	3,4%	1,7%

Dengan C adalah kapasitas adsorpsi per unit massa adsorben pada kondisi *equilibrium*, C<sub>0</sub> adalah kapasitas penyerapan maksimum, h<sub>st</sub> adalah panas adsorpsi isosterik, k<sub>0</sub> adalah konstanta *equilibrium*. Gambar 5 adalah grafik data adsorpsi isotermal yang diregresikan dengan menggunakan model persamaan Langmuir. Pada regresi yang dilakukan diperoleh nilai deviasi antara data eksperimen dengan persamaan adalah 3,49%.

Model persamaan Toth biasanya digunakan pada permukaan adsorben yang heterogen seperti pada karbon aktif dan juga persamaan tersebut dapat digunakan pada tekanan rendah dan tekanan tinggi [10]. Model persamaan Toth adalah sebagai berikut [9,11]:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{k_0 \cdot \exp(h_{st} / RT)P}{[1 + k_0 \exp(h_{st} / RT)P]^t} \quad (6)$$

Dimana t adalah parameter yang mengindikasikan heterogenitas adsorben.

Persamaan Toth menghasilkan nilai regresi yang lebih akurat dibandingkan dengan persamaan Langmuir dimana deviasi antara data eksperimen dengan persamaan Toth adalah 1,7% (Gambar 6) sementara persamaan Langmuir adalah 3,49%. Selain karena persamaan Toth memiliki parameter yang lebih banyak, persamaan Langmuir memiliki keterbatasan pada tekanan yang relatif tinggi dan juga dikarenakan asumsi

bahwa permukaan adsorben adalah homogen. Tabel 1 adalah besaran-besaran yang digunakan pada penyelesaian model persamaan Langmuir dan Toth.

#### 4. Simpulan

Pada penelitian ini adsorpsi isothermal CO<sub>2</sub> pada karbon aktif telah dilakukan pada tekanan sampai dengan 3,5 MPa dengan kisaran temperatur 300, 308, 318, dan 338 K dengan menggunakan metoda volumetrik. Kapasitas penyerapan maksimum adalah 0,314 kg/kg pada temperatur 27 °C dan tekanan *equilibrium* 3384,69 kPa.

Data eksperimen dikorelasikan dengan menggunakan model persamaan Langmuir dan Toth, dari hasil regresi yang dilakukan antara data eksperimen dan model persamaan Langmuir dan Toth didapat penyimpangannya sebesar 3,49% dan 1,7%.

#### Ucapan Terima kasih

Penelitian ini didanai oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional melalui Proyek Penelitian Hibah Bersaing dengan nomor kontrak 239AT/DRPM-UI/N14/2008.

#### Daftar Acuan

- [1] H. Marsh, F. Rodriguez-Reinoso, Activated Carbon, Elsevier Ltd, Oxford, UK, 2006, p. 52.
- [2] J-S Lee, J-H Kim, J-T Kim, J-K Suh, J-M Lee, and C-H Lee, J. Chem. Eng. Data 47 (2002) 1237.
- [3] Y. Belmabkhout, M. Fr`ere, G. DeWeireld, Meas. Sci. Technol. 15 (2004) 848.
- [4] U. Jürgen, Keller, Erich Robens, Cedric du Fresne von Hohenesche, Stud. Surf. Sci. Catal. 144 (2002) 387.
- [5] B. Dawoud, Y. Aristov, Int. J. Heat Mass Transfer. 46 (2003) 273.
- [6] R.C. Bansal, M. Goyal, Activated Carbon Adsorption, Taylor & Francis Group, New York, 2005, p. 97.
- [7] K. Berlier, M. Fr`ere, J. Chem. Eng. Data 42 (1997) 533.
- [8] D.D. Do, Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 2008.
- [9] K.A. Rahman, W.S. Loh, A. Chakraborty, B.B. Saha, K.C. Ng, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Annual Gas Processing Symposium, Elsevier, Qatar, 2009, p1-8.
- [10] S. Himeno, T. Komatsu, S. Fujita, J. Chem. Eng. Data 50 (2005) 369.
- [11] X. Wang, J. French, S. Kandadai, H.T. Chua, J. Chem. Eng [Internet]. 2010 [2010 March 10]. Available from: <http://pubs.acs.org>.