

SIMULASI CFD ANG STORAGE DENGAN METANA SEBAGAI ADSORBAT DAN KARBON AKTIF SEBAGAI ADSORBENNYA

Jufrianto ¹, Awaludin Martin ^{1,2}, Nasruddin ^{2,3}

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

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

ABSTRACT

Increased air pollution and fuel price volatility to the attention of the world that began to study alternative energy sources. Natural gas is an alternative that can replace fuel, natural gas used was methane. There are 3 natural gas storage process LNG, CNG and ANG. LNG requires extremely low temperatures to liquefy the methane gas whereas CNG requires a very high pressure of 200 bar for storing methane, both of these processes require a very expensive cost, whereas ANG only requires a pressure of 4 bar for storing methane so that ANG is an excellent alternative possible. ANG process has been studied experimentally, while the simulation is still very rare. This study uses the simulation computational fluid dynamics (CFD) for the ANG. This modeling using Fluent. From this simulation can be obtained the distribution of temperature, pressure, adsorption capacity and adsorption rate of capacity during the adsorption process occurs. The study was conducted at a pressure of 30 bar and a temperature of 300 K, in order to obtain the result of pressure and temperature distribution are influenced by the UDF equation source terms and methane gas adsorption capacity at the time of 54000 seconds is 0.069797 kg/kg, and the rate of adsorption at the time of 54000 seconds is 5.1×10^{-9} kg/kg.s.

Keywords: Simulasi, CFD, Fluent, Adsorpsi, ANG, Karbon aktif

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya polusi udara dari bahan bakar fosil dan ketidakstabilan harga minyak menjadi perhatian dunia, perlahan-lahan beberapa jenis sumber energi alternatif mulai diteliti. Dalam kajian bahan bakar kendaraan, gas alam merupakan salah satu bahan bakar alternatif yang dianggap layak digunakan untuk kendaraan sebagai pengganti bahan bakar motor bensin ataupun diesel. Dengan menggunakan bahan bakar yang berasal dari gas alam akan menghasilkan pembakaran yang bersih [1,2]. Selain itu dengan menggunakan bahan bakar gas, maka biaya operasi menjadi lebih murah serta menurunkan potensi pemanasan global

[3,4]. Keuntungan lainnya dapat diperoleh yaitu apabila digunakan sebagai bahan bakar kendaraan, maka gas alam akan menghasilkan pembakaran yang bersih dari kandungan polusi, sehingga emisi gas buang menjadi rendah [2,5].

Dari beberapa jenis gas alam yang dihasilkan, metana (CH_4) merupakan gas alam yang paling layak untuk digunakan sebagai bahan bakar kendaraan. Hal ini dikarenakan ketersediaan metana sangat besar dibanding dengan campuran gas bumi lainnya. Gas metana terdiri dari 70-95% dari total kandungan gas alam [6]. Akan tetapi gas alam memiliki kekurangan yaitu memiliki kerapatan energi volumetrik yang rendah apabila dibandingkan dengan bahan bakar cair [1,4]. Untuk mengatasi

permasalahan ini adalah dengan menggunakan sistem penyimpanan adsorpsi gas alam [1,4].

Karena karakteristik *lower critical temperature* dari CH₄ (191 K), gas ini tidak dapat di cairkan hanya dengan tekanan pada temperatur ruangan sehingga CNG (compressed natural gas) merupakan solusi alternatif yang baik untuk digunakan di dunia (lebih dari 1 juta kendaraan CNG digunakan). Namun, CNG memerlukan resistansi tekanan tinggi pada tabung penyimpanan yang umumnya sulit untuk di integrasikan dengan ruangan yang terbatas sehingga tabung penyimpanan CNG mahal [7]. Pada aplikasinya penyimpanan LNG (liquefied natural gas) umumnya digunakan untuk bahan bakar kendaraan muatan besar seperti kereta api, truk, atau bus. Sedangkan CNG umumnya digunakan sebagai bahan bakar kendaraan penumpang dengan tekanan yang diterapkan sampai 20 MPa [1,2]. Penyimpanan gas alam menggunakan sistem adsorpsi atau dikenal dengan ANG (adsorbed natural gas) saat sekarang ini menjadi metode yang paling baik dan dipilih dibandingkan dengan dua metode lainnya yaitu LNG dan CNG [1]. Dimana ANG, menerapkan tekanan yang rendah yaitu 3 - 4,5 MPa sehingga memiliki keuntungan yaitu memudahkan dalam perancangan tabung penyimpanan yang lebih murah dan tabung yang dirancang memungkinkan untuk dapat dipindahkan (tidak permanen) serta memiliki tingkat keamanan yang lebih tinggi [1,3,4]. Hal ini yang menjadikan ANG mampu bersaing dengan CNG sebagai aplikasi penyimpanan gas alam.

Penelitian mengenai ANG telah banyak dilakukan, untuk melakukan penelitian ini secara eksperimental membutuhkan waktu yang cukup lama dan biaya cukup mahal. Oleh karena itu penelitian ini dapat dilakukan dengan cara simulasi. Sahoo, dkk [8,9], telah melakukan penelitian ANG secara simulasi menggunakan *software* COMSOL MULTIPHYSICS 3.5a. dengan

model geometri 2D aksis-simetrik untuk mengetahui distribusi temperatur dan tekanan saat adsorpsi serta variasi ukuran *bed*. Nouh, dkk [10], melakukan simulasi menggunakan *software* Fluent untuk mengetahui kapasitas penyerapan dengan variasi kecepatan dan porositas, penelitian ini dilakukan pada campuran gas CO₂ dan CH₄ dengan model 3D. Xiao, dkk [11], melakukan simulasi menggunakan *software* Fluent untuk mengetahui kapasitas penyerapan serta distribusi tekanan dan temperatur, penelitian ini dilakukan pada gas hidrogen dengan model 2D aksis-simetrik.

Oleh karena itu peneliti melakukan simulasi CFD untuk proses adsorpsi isothermal gas metana pada karbon aktif. CFD memudahkan analisis temperatur, tekanan, dan proses penyerapan selama proses adsorpsi berlangsung.

1.2 Rumusan Masalah

Proses adsorpsi isothermal gas metana merupakan salah satu sistem alternatif yang dapat digunakan sebagai penyimpanan gas alam. Sistem adsorpsi ini sangat bergantung pada temperatur dan tekanan. Sehingga perlu dilakukan analisis penyerapan gas metana pada sistem adsorpsi ini serta dilakukan analisis temperatur dan tekanan selama proses adsorpsi terjadi menggunakan CFD dengan *software* Fluent.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, masalah akan dibatasi pada :

1. Adsorben yang digunakan adalah karbon aktif komersial (carbotech).
2. Temperatur isothermal pada temperatur 27°C.
3. Tekanan adsorpsi pada tekanan 30 bar.
4. Laju aliran massa gas metana 10 slpm.

5. Simulasi menggunakan *software* Fluent.
6. Simulasi dilakukan hanya pada tabung yang berisi adsorben (ANG *Storage*) dengan model 2D aksis simetris.
7. Tebal dinding diabaikan.

1.4 Tujuan

Penelitian ini dilakukan untuk mengamati fenomena yang terjadi pada proses adsorpsi isothermal gas metana menggunakan fluent, sehingga dapat dilihat distribusi temperatur dan tekanannya.

Tujuan spesifik dari simulasi ini adalah :

1. Memprediksi distribusi tekanan selama proses adsorpsi berlangsung.
2. Memprediksi distribusi temperatur selama proses adsorpsi berlangsung.
3. Memprediksi kapasitas penyerapan per waktu selama proses adsorpsi berlangsung.
4. Memprediksi laju kapasitas penyerapan selama proses adsorpsi berlangsung.

1.5 Manfaat

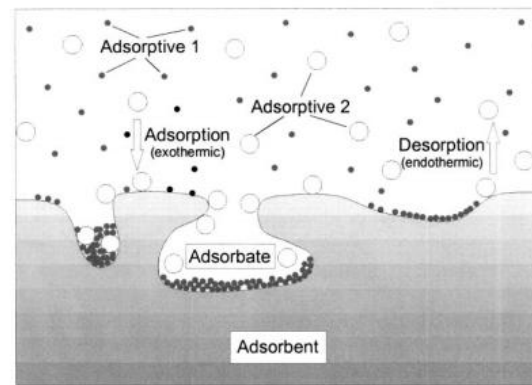
Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui distribusi temperature selama proses adsorpsi berlangsung dengan proses simulasi.
2. Mengetahui distribusi tekanan selama proses adsorpsi berlangsung dengan proses simulasi.
3. Dapat menghemat biaya dan waktu karena proses simulasi tidak membutuhkan biaya dan waktu yang banyak untuk pembuatan alat uji serta pengambilan data.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Pengertian Adsorpsi

Adsorpsi merupakan suatu fenomena fisik dimana molekul-molekul fluida menyentuh dan melekat pada permukaan padatan [12].



Gambar 1. Sistem Adsorpsi [13]

Padatan berpori yang menyerap (*adsorption*) dan melepaskan (*desorption*) suatu fluida disebut adsorben. Molekul yang terserap tetapi tidak menempel ke permukaan adsorben disebut *adsorptive*, sedangkan yang menempel disebut *adsorbate*. Berbagai fenomena ini dapat dilihat pada gambar 1.

2.2 CFD (Computational Fluid Dynamics)

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah suatu analisa sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan kalor dan fenomena-fenomena yang terkait di dalamnya seperti reaksi kimia yang dilakukan dengan simulasi berbasis komputer [14].

Pada umumnya terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan saat simulasi CFD [15] :

1. *Preprocessing*

Merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisis sebuah model CFD. Teknisnya adalah membuat model benda kerja, membuat *mesh*, kemudian menerapkan kondisi batas dan sifat-sifat fluidanya.

2. *Solving*

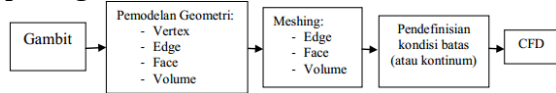
Merupakan langkah untuk menghitung kondisi-kondisi yang diterapkan pada saat *preprocessing*.

3. *Postprocessing*

Merupakan langkah terakhir dalam analisis CFD. Hal yang dilakukan pada langkah ini adalah mengorganisasi dan menginterpretasi data hasil simulasi CFD berupa gambar, kurva dan animasi.

2.2.1 GAMBIT (Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit)

GAMBIT merupakan alat *preprocessor* yang digunakan untuk membuat model dan *meshing* yang selanjutnya dianalisis menggunakan program CFD. Proses pada GAMBIT secara garis besar dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Proses GAMBIT – CFD

2.2.2 Fluent

Fluent merupakan program yang digunakan untuk mensimulasikan perpindahan kalor dan aliran fluida dengan berbagai bentuk geometri. Permasalahan diselesaikan dengan menggunakan bantuan *mesh*, dimana *mesh* yang didukung oleh Fluent adalah 2D *triangular-quadrilateral*, 3D *tetrahedral - hexahedral - pyramid - wedge*, dan *mesh* campuran [16]. Langkah-langkah penyelesaian masalah menggunakan Fluent adalah sebagai berikut [17]:

1. Membuat geometri dan *mesh* pada model.
2. Memilih model yang tepat (2D atau 3D).
3. Mengimpor *mesh* model.
4. Melakukan pemeriksaan pada *mesh* model.
5. Memilih model yang sesuai dengan permasalahan seperti formulasi *solver*, energi, viskositas, dan lain-lain.
6. Menentukan sifat material yang terdapat dalam permasalahan.
7. Menentukan kondisi batas.

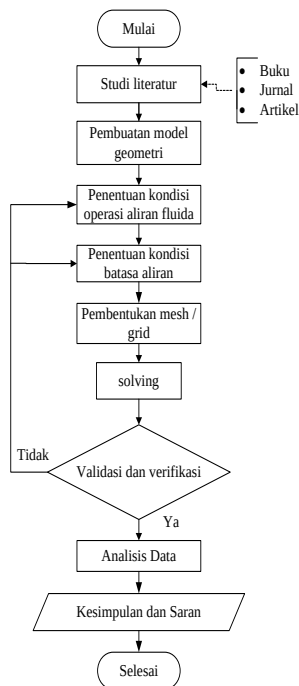
8. Mengatur parameter kontrol solusi.
9. Melakukan *initialize*.
10. Melakukan iterasi.
11. Hasil iterasi dapat ditampilkan dalam bentuk kontur, vektor, *pathline*, dan lain-lain.

User-Define Function (UDF) merupakan fungsi yang diprogram sendiri yang dapat dijalankan pada *solver* Fluent menggunakan bahasa program C, UDF menggunakan *DEFINE macros* yang telah ditentukan oleh Fluent, setiap UDF harus mengandung *udf.h* (`#include "udf.h"`). Langkah-langkah membuat UDF adalah sebagai berikut [18]:

1. Menentukan fungsi untuk permasalahan yang ingin diselesaikan.
2. Membuat fungsi *solver* dalam bentuk bahasa program C.
3. Menjalankan Fluent dan membaca *case file* yang telah dibuat.
4. Melakukan *interpret* atau *compile* fungsi *solver* yang telah dibuat.
5. Masukkan UDF yang telah dibuat ke dalam Fluent kemudian lakukan iterasi.

3. Metode

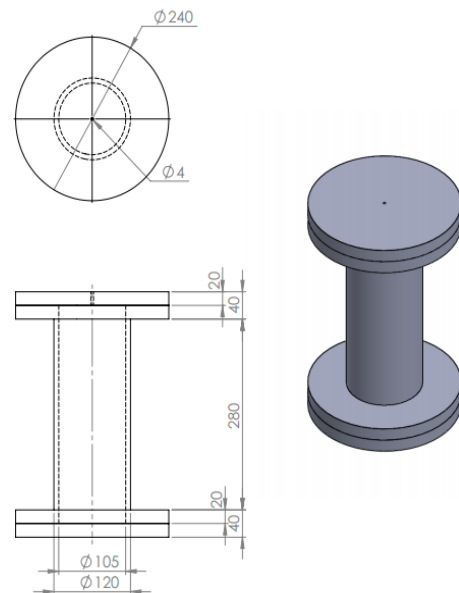
Simulasi ini menggunakan *software* Fluent dengan bantuan GAMBIT. Simulasi ini dilakukan hanya pada bagian tabung yang berisi adsorben, tekanan 3 Mpa dan temperatur isothermal pada 27°C dengan laju aliran 10 SLPM. Langkah-langkah penelitian dapat dilihat pada gambar 1. Skematik pengujian dapat dilihat pada gambar 3.



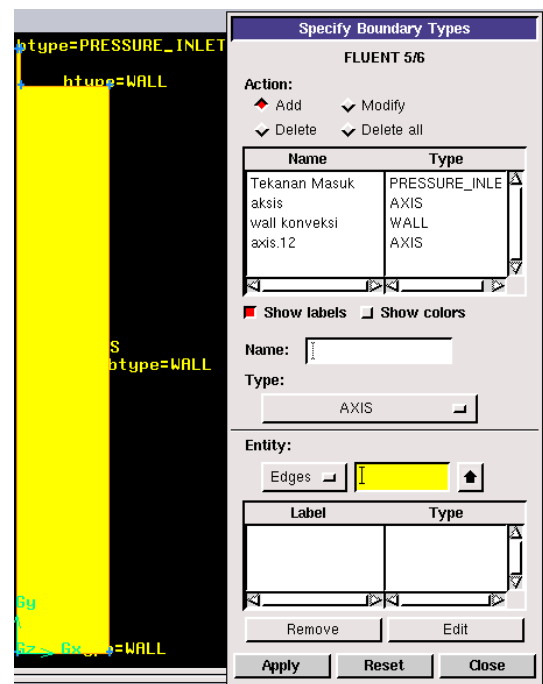
Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Simulasi dilakukan dengan model 2D aksis-simetrik jadi pemodelan tabung hanya setengah dari gambar 4, dapat dilihat pada gambar 5. *Meshing* yang digunakan *triangular* dengan *type pave* dan *interval count* 450 yang dapat dilihat pada gambar 5. Penentuan kondisi batas pada model ini yaitu tekanan masuk, aksis dan *wall* yang dapat dilihat pada gambar 5.

Beberapa data yang diperlukan dalam proses simulasi dapat dilihat pada tabel 1, data-data berupa propertis material karbon aktif dan metana serta nilai untuk penyerapan ekuilibriumnya.



Gambar 4. Skematik Pengujian



Gambar 5. Model GAMBIT

Tabel 1. Data Simulasi

Karbon Aktif (AC) [8]	
Densitas Karbon Aktif (kg/m ³)	500
Specific Heat Karbon Aktif, Cps (J/kg K)	650
Konduktivitas Termal AC (W/m K)	0.54
Porositas	0.65
Metana [8]	
Specific Heat Metana, Cpg (J/kg K)	2450
Konduktivitas Termal Metana (W/m K)	0.0343
Viskositas Metana (kg/m s)	1.25x10 ⁻⁵
Massa Molar Metana (kg/mol)	16.03x10 ⁻³
Adsorpsi [19]	
Panas Isosterik Adsorpsi, E (J/mol)	720.9272
Konstanta ideal gas, R (J/mol K)	0.5196
Pre-eksponensial factor, k ₀	0.0143
Kapasitas maksimum, q _s (kg/kg)	0.07

Beberapa persamaan yang digunakan dalam simulasi sebagai berikut :

Persamaan Equilibrium

Persamaan kapasitas penyerapan ekuilibrium menggunakan persamaan Langmuir, yaitu [20] :

$$q_e = \frac{q_s K P}{1 + K P} \quad (1)$$

Dimana K merupakan korelasi Vant Hoff, konstanta daya tarik menarik antara adsorbat dengan adsorben yang berfungsi untuk menyatakan kemampuan adsorbat menempel pada adsorben, yaitu [20] :

$$K = K_0 \exp(-E/RT) \quad (2)$$

Kapasitas Penyerapan per Waktu

Persamaan kapasitas penyerapan perwaktu adalah :

$$q \text{ awal} = 0 \quad (3)$$

$$\text{turunan } q = \frac{\partial q}{\partial t} = K (q_e - q) \quad (4)$$

$$q = q + \text{turunan } q * \Delta t \quad (5)$$

Pada persamaan 4, nilai q yang digunakan adalah nilai q pada persamaan 3, kemudian hitung nilai q baru pada persamaan 5, setelah itu hitung kembali persamaan 4 tetapi nilai q yang digunakan adalah nilai q dari persamaan 5 atau q yang kedua, ini merupakan proses *looping*.

Persamaan Continuity

Pada sistem adsorpsi persamaan *continuity* adalah [10] :

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u}_g) = S_m \quad (6)$$

$$S_m = - \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) \frac{\partial q}{\partial t} \rho_c \quad (7)$$

Source terms pada persamaan *continuity* digunakan karena aliran melalui media berpori atau dapat dikatakan suatu massa akan hilang atau terserap ke dalam media berpori tersebut. Dimana, ε menyatakan porositas, ρ_g merupakan densitas gas, ρ_c merupakan densitas karbon aktif dan $\mathbf{u}_g$ merupakan kecepatan gas.

Persamaan Momentum

Persamaan momentum yaitu [8] :

$$\frac{\rho_g}{\varepsilon_t} \frac{\partial \mathbf{u}_g}{\partial t} + \frac{\rho_g}{\varepsilon_t^2} \mathbf{u}_g \cdot \nabla \mathbf{u}_g = -\nabla P + \mu_g \nabla^2 \mathbf{u}_g - \frac{\mu_g}{K} \mathbf{u}_g + S_i \quad (8)$$

Dimana, K merupakan permeabilitas dari adsorben yaitu 3,7x10⁻¹⁰ m², μ_g merupakan viskositas gas, dan t adalah waktu. Nilai K diperoleh dari persamaan Kozeny-Carman yaitu [8] :

$$K = \frac{4\varepsilon_b^3 R_p^2}{150(1-\varepsilon_b)^2} \quad (9)$$

Dimana, R_p merupakan radius partikel adsorben. Untuk penyerapan gas, efek inersia dan viskositas kecil sehingga hukum Darcy merupakan pendekatan yang bagus [8]. Hukum Darcy dapat ditulis dengan persamaan [9] :

$$\mathbf{u}_g = - \frac{K}{\mu_g} \nabla P \quad (10)$$

Dimana, S_i merupakan *momentum source terms*, yaitu :

$$S_i = -\frac{\partial q}{\partial t} \rho_c u_i \quad (11)$$

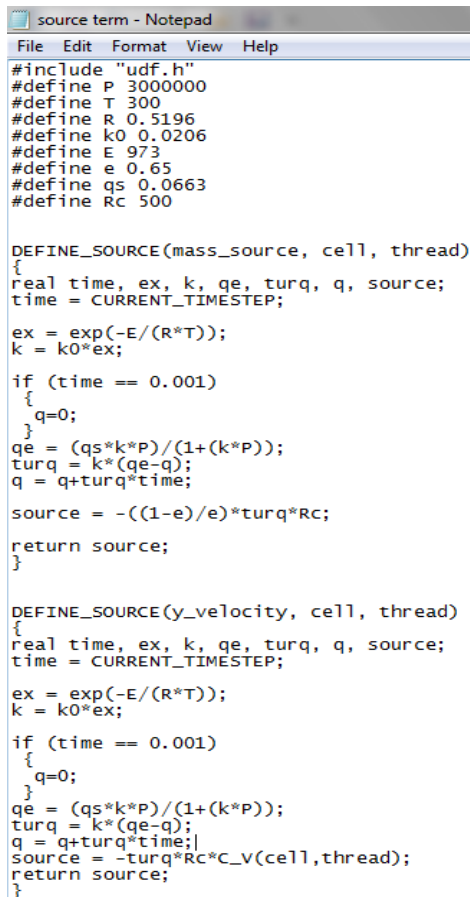
Persamaan Energi

Persamaan energi yaitu [8] :

$$C_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g C_{pg} \mathbf{u}_g \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) + S_h \quad (12)$$

Dimana, S_h merupakan energi *source terms*, yaitu :

$$S_h = -\rho_c \Delta H \frac{\partial q}{\partial t} \quad (13)$$



```

#include "udf.h"
#define P 3000000
#define T 300
#define R 0.5196
#define k0 0.0206
#define E 973
#define e 0.65
#define qs 0.0663
#define Rc 500

DEFINE_SOURCE(mass_source, cell, thread)
{
    real time, ex, k, qe, turq, q, source;
    time = CURRENT_TIMESTEP;

    ex = exp(-E/(R*T));
    k = k0*ex;

    if (time == 0.001)
    {
        q=0;
    }
    qe = (qs*k*P)/(1+(k*P));
    turq = k*(qe-q);
    q = q+turq*time;

    source = -((1-e)/e)*turq*Rc;

    return source;
}

DEFINE_SOURCE(y_velocity, cell, thread)
{
    real time, ex, k, qe, turq, q, source;
    time = CURRENT_TIMESTEP;

    ex = exp(-E/(R*T));
    k = k0*ex;

    if (time == 0.001)
    {
        q=0;
    }
    qe = (qs*k*P)/(1+(k*P));
    turq = k*(qe-q);
    q = q+turq*time;
    source = -turq*Rc*C_V(cell,thread);
    return source;
}

```

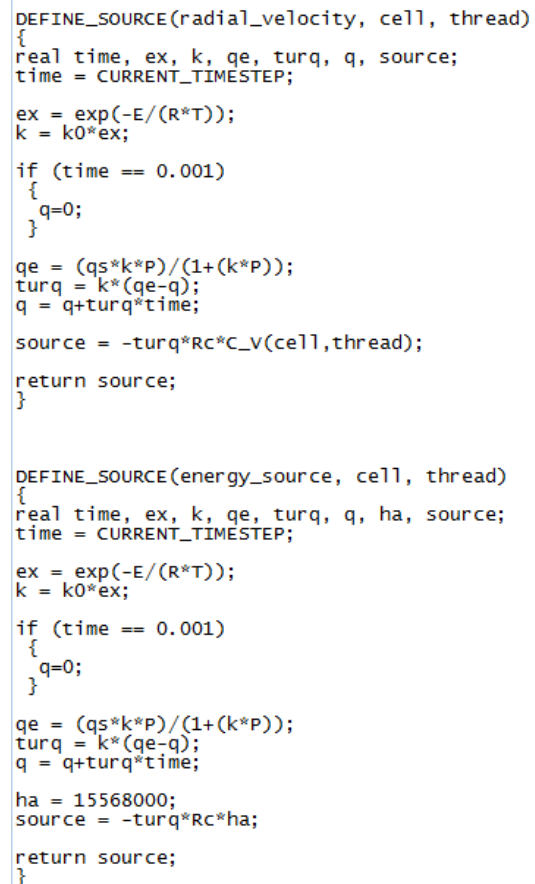
Gambar 6. Mass Source dan Axial Source

Initial Conditions

Initial conditions yaitu tekanan pada 1 bar dan temperatur 300K.

User-Defined Function

Source terms pada persamaan 6 hingga persamaan 7 dilakukan dengan bantuan UDF pada Fluent. UDF merupakan fungsi yang diprogram sendiri yang dapat dijalankan pada solver Fluent menggunakan bahasa program C, UDF menggunakan *DEFINE macros* yang telah ditentukan oleh Fluent, setiap UDF harus mengandung *udf.h* (*#include "udf.h"*) [18]. Pada gambar 6 dan gambar 7 merupakan UDF yang menyatakan *source terms* masing-masing persamaan.



```

DEFINE_SOURCE(radial_velocity, cell, thread)
{
    real time, ex, k, qe, turq, q, source;
    time = CURRENT_TIMESTEP;

    ex = exp(-E/(R*T));
    k = k0*ex;

    if (time == 0.001)
    {
        q=0;
    }
    qe = (qs*k*P)/(1+(k*P));
    turq = k*(qe-q);
    q = q+turq*time;

    source = -turq*Rc*C_V(cell,thread);

    return source;
}

DEFINE_SOURCE(energy_source, cell, thread)
{
    real time, ex, k, qe, turq, q, ha, source;
    time = CURRENT_TIMESTEP;

    ex = exp(-E/(R*T));
    k = k0*ex;

    if (time == 0.001)
    {
        q=0;
    }
    qe = (qs*k*P)/(1+(k*P));
    turq = k*(qe-q);
    q = q+turq*time;

    ha = 15568000;
    source = -turq*Rc*ha;

    return source;
}

```

Gambar 7. Radial Source dan Energy Source

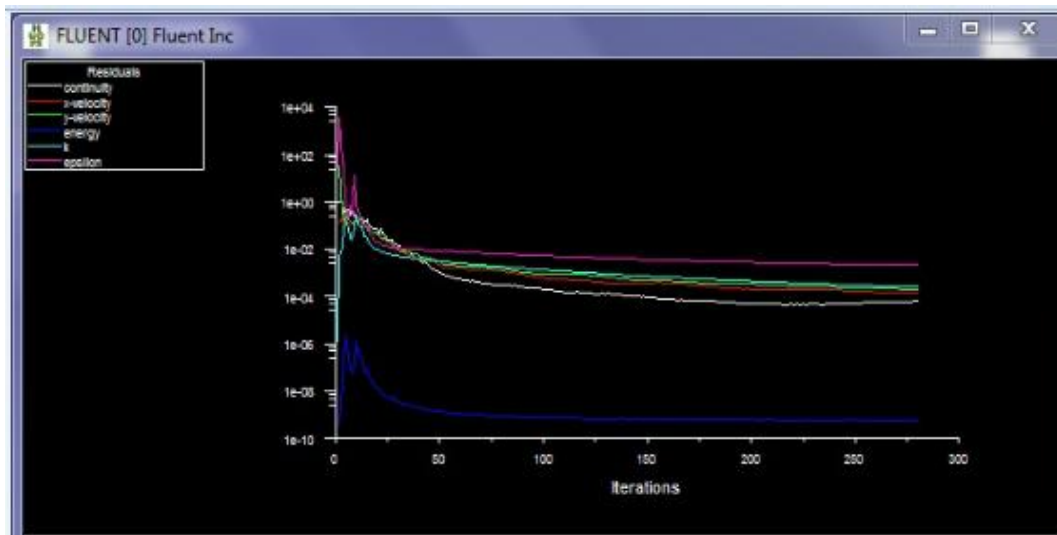
4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil

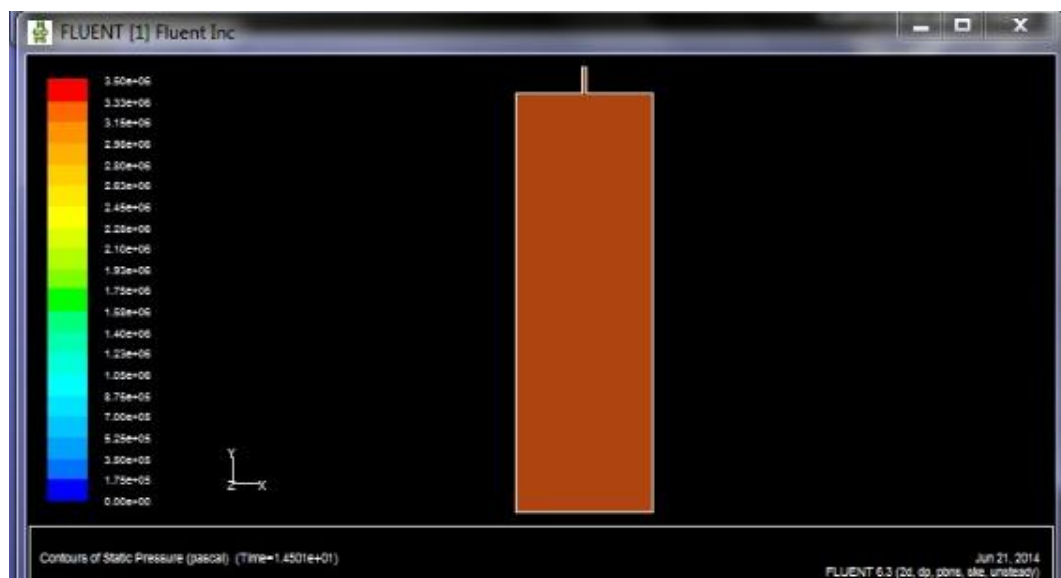
Gambar 8 merupakan hasil residual setelah melakukan proses iterasi, terdapat residual *continuity*, *velocity*, *energy*, *k* dan *epsilon*. Grafik berupa jumlah iterasi pada sumbu x dan *convergent criteria* pada

sumbu y yang menyatakan batasan residual tersebut konvergen.

Gambar 9 dan 10 merupakan hasil distribusi tekanan dan temperatur setelah proses iterasi.



Gambar 8. Residual



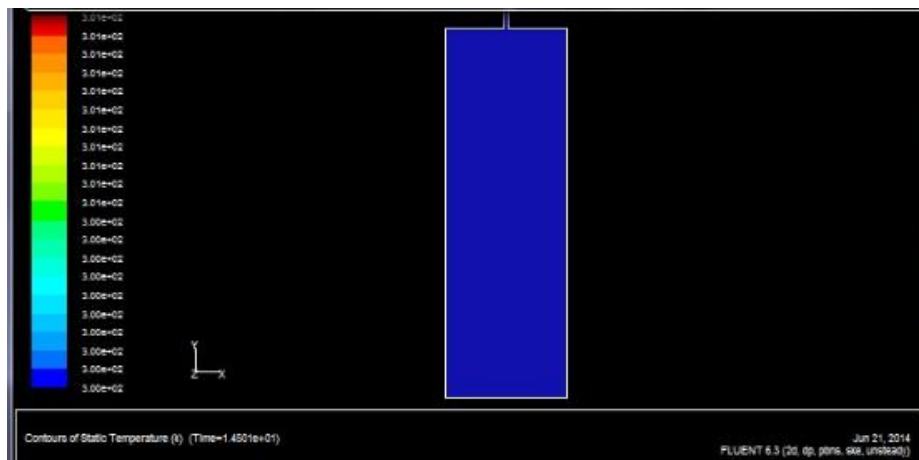
Gambar 9. Kontur Tekanan

Gambar 11 merupakan grafik kapasitas penyerapan per waktu. Waktu yang diambil adalah 54000 detik (15 jam) karena

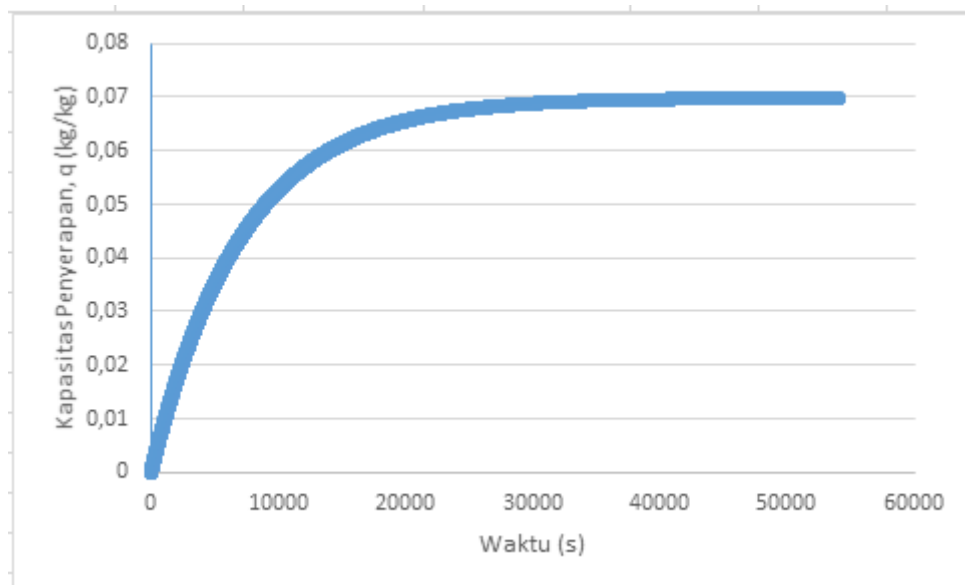
penyerapan pada waktu 54000 detik telah konstan.

Gambar 12 merupakan grafik laju penyerapan per waktu. Waktu yang diambil

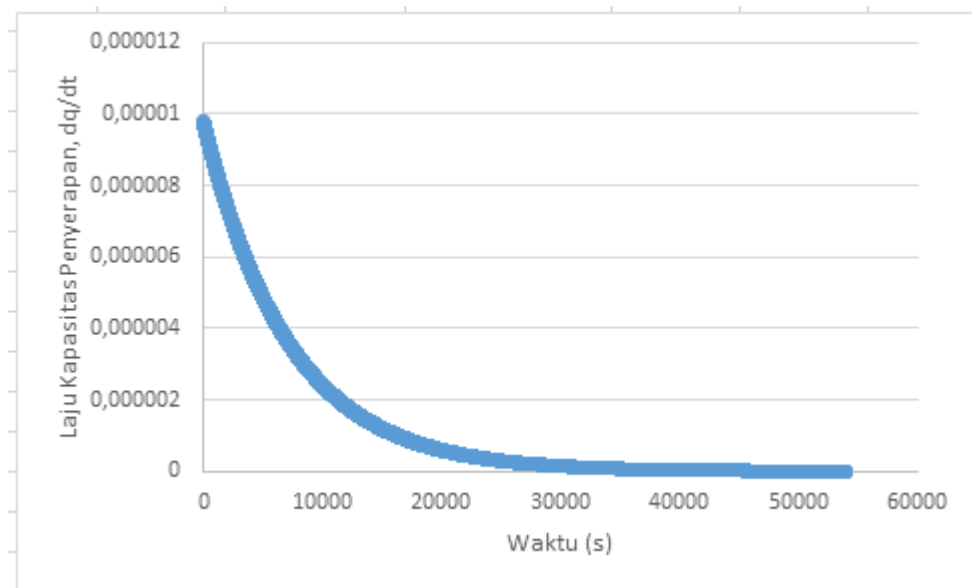
sama dengan waktu kapasitas penyerapan karena kedua grafik ini berjalan seiringan.



Gambar 10. Kontur Temperatur



Gambar 11. Kapasitas Penyerapan



Gambar 12. Laju Penyerapan

4.2 Pembahasan

Gambar 8 merupakan residual setelah proses iterasi, dari grafik residual dapat dilihat bahwa grafik tidak mengalami konvergen hal ini dikarenakan proses yang dilakukan merupakan proses transien. Gambar 9 dan 10 merupakan distribusi tekanan dan temperatur, tekanan mengalami peningkatan dimulai dari 1 bar yang merupakan *initial condition* hingga tekanan 30 bar yang merupakan tekanan pada *boundary condition* dan untuk temperatur konstan pada 300 K sesuai dengan *initial condition* dan *boundary condition*.

Gambar 11 menunjukkan hasil kapasitas penyerapan per waktu. Kapasitas penyerapan awal adalah 0 sesuai dengan nilai q pada persamaan 3 dan diinput ke dalam persamaan UDF *source term*. Kapasitas penyerapan diambil hingga waktu 54000 detik atau 15 jam, pada waktu ini penyerapan telah konstan, dengan nilai 0.069797 kg/kg.

Gambar 12 menunjukkan laju kapasitas penyerapan per waktu, dari grafik dapat dilihat bahwa laju penyerapan semakin lama akan semakin kecil karena penyerapan yang terjadi dapat dikatakan telah mencapai

titik jenuh. Laju penyerapan awal adalah 9.77384×10^{-6} kg/kg.s dan laju penyerapan akhir pada waktu 54000 detik adalah 5.1003×10^{-9} kg/kg.s.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan pembahasan yang telah dilakukan maka didapat beberapa simpulan yaitu :

- Distribusi tekanan dan temperatur dapat dilihat dari kontur pada Fluent, tekanan dan temperatur sesuai dengan *initial condition* dan *boundary condition*.
- Kapasitas penyerapan awal adalah 0 dan setelah detik ke 54000 kapasitas penyerapan akhir menjadi 0.069797 kg/kg.
- Laju kapasitas penyerapan awal adalah 9.77384×10^{-6} kg/kg.s dan laju kapasitas penyerapan akhir setelah 54000 detik adalah 5.1003×10^{-9} kg/kg.s.

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian ini terdapat beberapa saran yaitu :

- Diharapkan lebih teliti pada bagian persamaan *continuity*, momentum dan energi karena persamaan ini sangat

penting saat melakukan iterasi, termasuk juga persamaan *source terms* pada setiap persamaan tersebut.

2. Saat membuat UDF, pelajari apa yang diinginkan program agar apa yang kita inginkan dapat diterima dan dijalankan oleh program.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Departemen Teknik Mesin UI yang telah memberikan fasilitas dan membantu dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Pupier, O., V. Goetz, R. Fiscal, 2004, Effect of Cycling Operations on an Adsorbed Natural Gas Storage, Chemical Engineering and Processing 44 (2005) 71-79.
- [2] Wegrzyn, J., Gurevich, M., 1996, Adsorbent Storage of Natural Gas, Elsevier Science. USA.
- [3] Vasiliev, L.L., L.E. Kanonchik, D.A. Mishkinis, M.I. Rabetsky, 2000, Adsorbed Natural Gas Storage and Transportation Vessels, Heat and Mass Transfer Institute, Belarus.
- [4] Ridha, Firas N., Rosli M. Yunus, Mohd.Rashid, Ahmad F. Ismail, 2007, Thermal Analysis of Adsorptive Natural Gas Storage During Dynamic Charge Phase at Room Temperature, Experimental Thermal and Fluid Science 32 (2007) 14-22..
- [5] Sudibandriyo, Mahmud, 2011, High Pressure Adsorption of Methane and Hidrogen at 25°C on Aktivated Carbons Prepared from Coal and Coconut Shell, 119002-6363 IJET-IJENS Vol: 11 No. 02.
- [6] S. Kumar, 1987, Gas Engineering Production, The Gulf Publishing Company, New York.
- [7] A., Babuponnusami, et al, 2011, Effect of Pore Size Distribution on Methane Storage at Low Pressure: Preparation of Activated Carbon for ANG Storage, Int. J. Res. Chem. Environ. Vol. 1, ISSN 2248-9649.
- [8] Sahoo, Pradeepta K., et al, 2011, Filling Characteristics for an Activated Carbon Based Adsorbed Natural Gas Storage System, Industrial & Engineering Chemistry Research, 50, 13000-13011.
- [9] Sahoo, P. K., et al, 2014, Influence of Exhaust Gas Heating and L/D Ratios on The Discharge Efficiencies for An Activated Carbon Natural Gas Storage System, Applied Energy 119 (2014) 190-203.
- [10] Nouh, S.A., K. K. Lau and A. M. Shariff, 2010, Modelling and Simulation of Fixed Bed Adsorption Column using Integrated CFD Approach, Journal of Applied Sciences 10 (24) : 3229-3235.
- [11] Xiao, Jinsheng., Rong Peng, Daniel Cossement, Pierre Benard, Richard Chahine, 2013, CFD model for charge and discharge cycle of adsorptive hydrogen storage on activated carbon, International Journal of Hydrogen Energy 38 (2013) 1450-1459.
- [12] Nasruddin, 2005, *Dynamic Modeling and Simulation of a two Bed Silica gel Water Adsorption Chille*, Disertasi, Rheinisch - Westfälische Technische Hochschule, Aachen.
- [13] Keller, Jürgen U, Reiner Staudt, 2005, *Gas adsorption equilibria; Experimental methods and Adsorptive isotherms*, Springer Science + Business Media, Inc., Boston, United States of America.
- [14] Versteeg, H. K., dan Malalasekera W., 2007, An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method Second Edition, Pearson : Prentice Hall, England.
- [15] Tuakia, Firman, 2008, Dasar-Dasar CFD Menggunakan Fluent, Informatika Bandung, Bandung.

- [16]“FLUENT 6.2, User’s Guide” 2005.
Fluent Inc. Lebanon
- [17]“FLUENT 6.2, Tutorial Guide” 2005.
Fluent Inc. Lebanon
- [18]“FLUENT 6.2, UDF Manual” 2005.
Fluent Inc. Lebanon
- [19] Martin, Awaludin., Wai S. L., Kazi A.
R., Kyaw .T., Bambang S., M. Idrus A.,
Nasruddin., Kim C. Ng., 2011.
Adsorption Isotherms of CH₄ on
Activated Carbon from Indonesian
Low Grade Coal. Journal of Chemical
and Engineering Data, 56, 361-367.
- [20]Suzuki, M., 1989. Adsorption
Engineering, Elsevier, New York.