

Simulasi Unjuk Kerja Termal Dan *Pressure Drop* Kolektor Surya Pelat Datar Aliran *Serpentine* Menggunakan Metode-CFD

Ahmad Yonanda¹, Amrizal¹, dan Amrul¹

²Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung
Jl. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung
E-mail: ahmad.yonanda@yahoo.com

Abstract

To investigate the performance of solar thermal collector can be applied CFD (Computational Fluid Dynamic) method. The CFD make it easy to analyze the fluid flow characteristics associated with the distribution of temperature and pressure. The purpose of this research is to analyze the thermal performance and pressure drop of flat plate solar thermal collector using CFD method. The methods required in the CFD simulation process are: design and name selection geometry, meshing, radiation method selection, material selection and boundary input conditions. The simulation iteration process is shown by the convergent "residual" graph with the result of temperature and pressure contour. Then the validation process is done to the simulation result by comparing it with the experimental data. The next step simulates the performance of the solar thermal collector based on the variation of the fluid mass flow rate and the variation of the tubes spacing (W). The results of this study indicate that increase in the fluid mass flow rate of 0.005 kg/s (in the range of 0.005 - 0.02 kg/s) will decrease the outlet of fluid temperature about 2°C. Meanwhile, the solar collector with the tube spacing (W) 40 mm as compared with (W) 80 mm increase the outlet of fluid temperature about 3.9°C.

Keywords: Solar Collector, Thermal, Pressure drop, Method CFD.

Abstrak

Untuk mengetahui karakteristik unjuk kerja kolektor surya ini dapat digunakan metode CFD (Computational Fluid Dynamic). CFD memberikan kemudahan untuk menganalisis karakteristik aliran fluida yang berkaitan dengan distribusi temperatur dan tekanan yang terjadi. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis karakteristik unjuk kerja termal dan pressure drop pada kolektor surya pelat datar menggunakan metode CFD. Langkah-langkah yang dibutuhkan dalam proses simulasi CFD adalah: desain dan name selection geometri, meshing, pemilihan metode radiasi, pemilihan jenis material dan input kondisi batas. Proses iterasi simulasi ditunjukkan oleh grafik "residual" yang konvergen dengan hasil simulasi berupa kontur temperatur dan tekanan. Kemudian proses validasi dilakukan terhadap hasil simulasi dengan cara membandingkannya dengan data eksperimen. Langkah selanjutnya mensimulasikan unjuk kerja kolektor surya berdasarkan variasi laju aliran massa fluida dan variasi jarak antara pipa (W). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran massa fluida sebesar 0,005 kg/s (dalam range 0,005 - 0,02 kg/s) mengakibatkan temperatur keluar fluida kerja akan mengalami penurunan sekitar 2°C. Sementara itu penggunaan jarak antara pipa (W) 40 mm jika dibandingkan dengan jarak antara pipa (W) 80 mm akan meningkatkan temperatur keluar fluida kerja sebesar 3,9°C.

Kata kunci: Kolektor surya, Termal, Pressure drop, Metode CFD.

PENDAHULUAN

Energi merupakan sesuatu yang tidak dapat terpisahkan dari kehidupan manusia saat ini. Energi mempunyai peranan penting dalam kehidupan sosial, ekonomi dan lingkungan. Kebutuhan energi di dunia hingga saat ini cenderung dipenuhi dengan bahan bakar fosil. Pada dasarnya, sumber daya alam energi merupakan jenis sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui dan bersumber dari pertambangan, hal ini mendorong manusia untuk mencari energi alternatif yang baru dan terbarukan.

Energi alternatif adalah energi yang dapat digunakan bertujuan untuk menggantikan bahan bakar konvensional tanpa akibat yang tidak diharapkan dari hal tersebut. Salah satu energi alternatif terbarukan yaitu energi matahari atau energi surya. Energi surya merupakan energi yang ramah lingkungan dan tidak menghasilkan CO₂ dan polutan. Indonesia sangat berpotensi menjadikan energi surya sebagai salah satu sumber energi masa depan, mengingat posisi Indonesia terletak pada garis khatulistiwa [1].

Untuk memanfaatkan potensi energi surya tersebut, ada dua teknologi yang sudah diterapkan yaitu energi termal dan energi *fotovoltaik*. Energi termal memanfaatkan panas atau radiasi matahari dengan menggunakan alat kolektor surya. Kolektor surya ialah salah satu teknologi dengan cara memanfaatkan energi radiasi matahari sebagai sumber pemanas dan diubah menjadi energi kalor yang berguna. Terdapat banyak jenis kolektor surya yang digunakan salah satunya ialah tipe pelat datar. Kolektor surya tipe pelat datar memiliki keuntungan yaitu dapat menyerap dengan baik radiasi matahari yang mengenai kolektor tersebut [2].

Konfigurasi kolektor surya tipe pelat datar seperti jarak pipa, arah aliran, pelat *absorber*, pakai kaca penutup dan tanpa kaca penutup juga sangat mempengaruhi performa kolektor. Jarak antara pipa riser berbanding terbalik dengan faktor efisiensi dari kolektor [3-7]. Distribusi aliran yang tidak seragam dipengaruhi oleh konfigurasi bentuk susunan pipa dan arah aliran, hal ini berpengaruh pada performa dari kolektor [8-11]. Pengujian dengan variasi pelat *absorber* juga telah dilakukan, yang menyarankan penggunaan pelat *absorber* aluminium sebagai pengganti pelat tembaga [12].

Penelitian tentang kolektor surya bukanlah ide baru dalam dunia teknologi rekayasa surya. Banyak peneliti yang meneliti tentang unjuk kerja kolektor surya tipe pelat datar. Unjuk kerja kolektor ditinjau berdasarkan dua parameter yaitu efisiensi termal dan *pressure drop*. Parameter yang paling utama adalah unjuk kerja termal karena termal yang tinggi menunjukkan besar kalor yang dapat diserap oleh kolektor sedangkan *pressure drop* berhubungan dengan pemakaian daya pompa. Pompa berfungsi untuk mengalirkan fluida ke dalam pipa kolektor surya tersebut. *Pressure drop* yang tinggi akan membutuhkan pemakaian daya pompa yang besar sehingga biaya untuk menghidupkan pompa akan menjadi lebih mahal [13].

Untuk mengetahui karakteristik unjuk kerja kolektor surya berdasarkan termal dan *pressure drop* yaitu dengan menggunakan teknologi rekayasa surya salah satunya ialah metode *CFD* (*Computational Fluid Dynamic*). *CFD* adalah suatu cabang dinamika fluida yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk menganalisis masalah yang melibatkan aliran fluida yang berkaitan dengan distribusi temperatur dan tekanan yang terjadi. *CFD* memiliki tujuan memberikan kemudahan untuk memahami karakteristik aliran fluida dengan melihat hasil berupa grafik, vektor, kontur dan animasi [14].

Dari dasar inilah perlu dilakukan simulasi unjuk kerja termal dan *pressure drop* pada kolektor surya pelat datar menggunakan metode *CFD* berdasarkan variasi laju aliran massa fluida dan

variasi jarak antara pipa (W) agar didapatkan karakteristik unjuk kerja termal dan *pressure drop*.

METODELOGI

Pada penelitian ini data eksperimen didapatkan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh ismail (2016) [15]. Data eksperimen ini akan dijadikan acuan untuk validasi hasil simulasi. Adapun data eksperimen yang diperoleh yaitu geometri kolektor surya, intensitas radiasi matahari (S), temperatur fluida masuk (T_{in}), temperatur fluida keluar (T_{out}), laju aliran massa (\dot{m}) dan *pressure drop*.

Geometri kolektor surya menggunakan pipa disusun secara seri dengan jarak antara pipa (W) sebesar 80 mm dan *elbow* 90° . Luas pelat kolektor sebesar $0,45 \text{ m}^2$ dan menggunakan material kuningan.

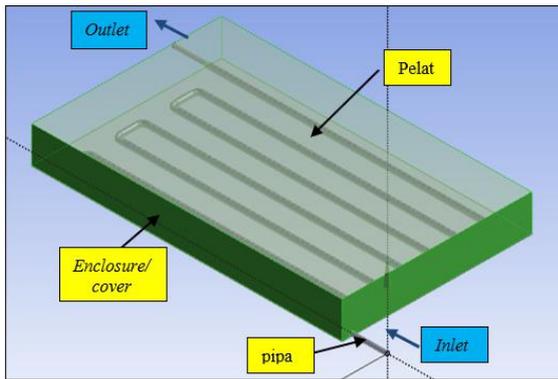


Gambar 1. Geometri kolektor surya dengan *elbow* 90° , $W=80 \text{ mm}$.

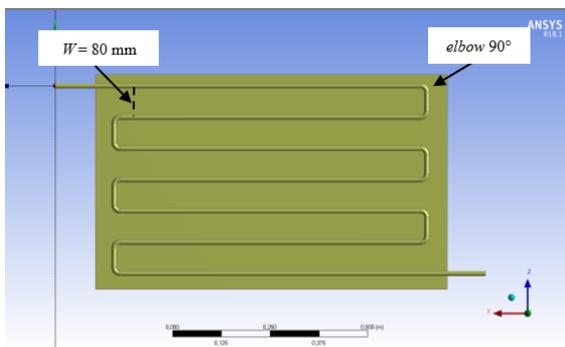
Setelah geometri kolektor surya diketahui maka selanjutnya dilakukan proses simulasi menggunakan metode *CFD*. Sebelum dilakukan simulasi maka harus membuat desain geometri 3 dimensi. Desain geometri menggunakan *software CFD* yaitu *Ansys Fluent* versi 18.1. Langkah-langkah proses simulasi *CFD* meliputi: mendesain geometri, *meshing*, *setup* and *solution*.

1. Desain geometri

Pada penelitian ini, geometri kolektor surya dibuat menggunakan *Ansys fluent versi 18.1*. Geometri pada penelitian ini terbagi atas tiga bagian yaitu: *enclosure* (*cover*), *tube* (pipa-pelat) dan *fluid*. Spesifikasi geometri sebagai berikut: pipa diameter luar 10 mm, pipa diameter dalam 9 mm, sambungan pipa *elbow* 90° dan $W=80 \text{ mm}$.



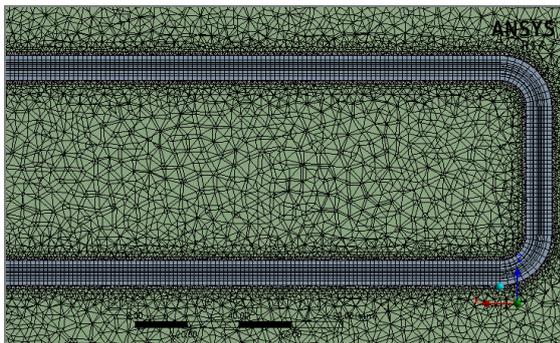
Gambar 2. Desain model kolektor surya (tampak isometri).



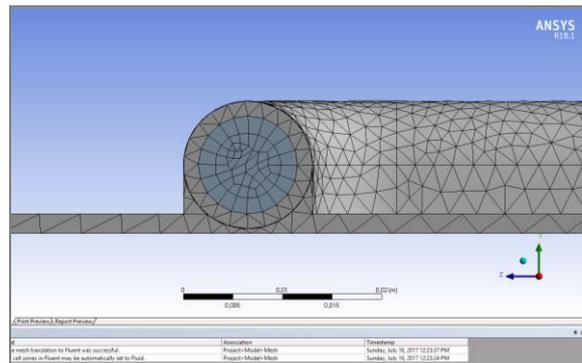
Gambar 3. Desain model kolektor surya (tampak atas).

2. Meshing

Setelah geometri kolektor surya telah dibuat maka tahap selanjutnya ialah tahap membentuk *mesh* (*meshing*). Ukuran *mesh* yang terdapat pada suatu obyek akan mempengaruhi ketelitian analisis *CFD* yang akan dilakukan. Semakin kecil ukuran *mesh* pada suatu obyek, maka hasil yang didapatkan akan semakin teliti. Pada simulasi ini *mesh quality smoothing* ialah *high*.



Gambar 4. Hasil *meshing* pipa bagian dalam.

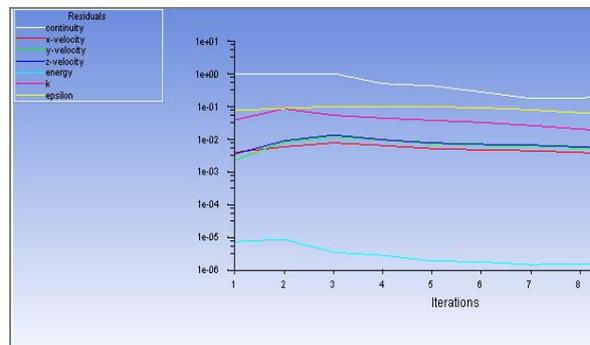


Gambar 5. Hasil *meshing* pipa bagian luar.

3. Setup and Solution

Pada tahap *setup and solution* ada banyak hal yang harus dilakukan kaitannya dengan penentuan kondisi batas dalam sebuah simulasi *CFD*. Proses ini merupakan proses sangat penting karena hampir semua parameter penelitian diproses dalam tahapan ini. Adapun tahapan pada *solution* adalah *general*, *models*, *materials*, *cell zone conditions*, *boundary conditions* dan *iterations*.

Pada proses ini akan dilakukan iterasi atau perhitungan oleh program hingga terjadi konvergensi. Indikator bahwa konvergensi telah tercapai ialah pada grafik "*Residual*" menunjukkan penurunan.



Gambar 6. Hasil *Iterations* dalam bentuk grafik *Residuals*

HASIL DAN PEMBAHASAN

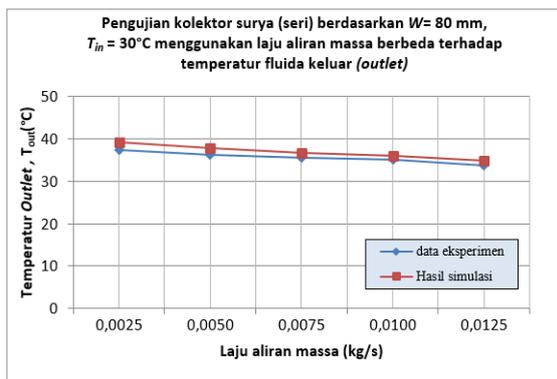
Telah dilakukan penelitian mengenai kolektor surya pelat datar dengan arah aliran seri menggunakan metode *CFD*. Kemudian didapatkan hasil validasi simulasi, hasil simulasi unjuk kerja kolektor dan perhitungan unjuk kerja kolektor. Prosedur memvalidasi dilakukan membandingkan hasil simulasi terhadap data eksperimen dengan melihat perbandingan karakteristik termal dan *pressure drop*. Sedangkan simulasi menggunakan metode *CFD* bertujuan untuk mengetahui unjuk kerja termal dan *pressure drop* berdasarkan pengaruh

variasi laju aliran massa fluida dan variasi jarak antara pipa (W).

A. Validasi Hasil Simulasi

Pada penelitian ini validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data eksperimen berdasarkan termal dan *pressure drop*. Data diperoleh dari pengujian eksperimen yang telah dilakukan oleh Ismail (2016), yaitu temperatur fluida keluar, temperatur permukaan pelat dan *pressure drop*.

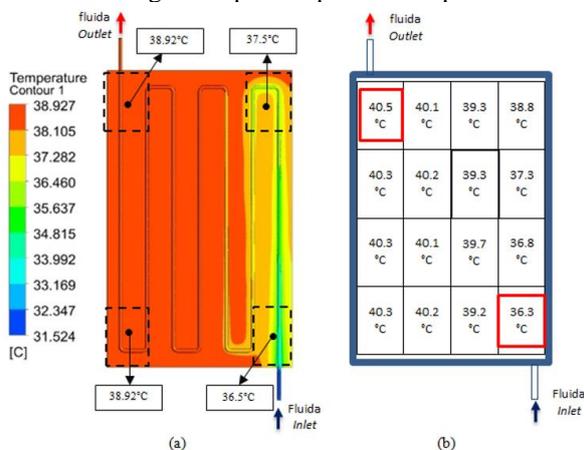
1. Perbandingan temperatur fluida keluar (*outlet*)



Gambar 7. Grafik perbandingan hasil simulasi dan eksperimen terhadap temperatur *outlet* dengan variasi laju aliran massa.

Berdasarkan Gambar 7, nilai temperatur fluida *outlet* pada laju aliran massa 0,0125 kg/s hasil simulasi menunjukkan 34,85 °C dan data eksperimen sebesar 37,4 °C dengan nilai faktor koreksi 0,97. Untuk laju aliran massa 0,0025 kg/s nilai temperatur fluida *outlet* pada simulasi menunjukkan 37,4 °C sedangkan data eksperimen 39,1°C dengan nilai faktor koreksi 0,96.

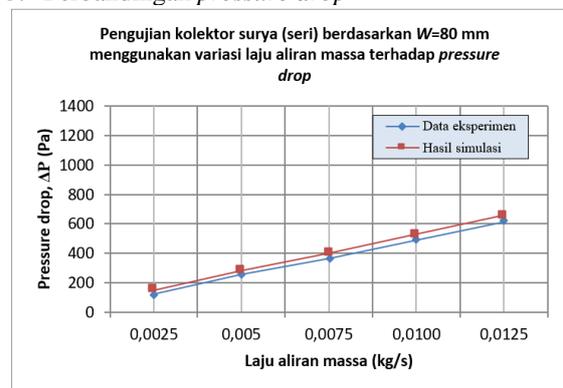
2. Perbandingan temperatur permukaan pelat



Gambar 8. Distribusi temperatur permukaan pelat kolektor surya, hasil (a) simulasi, (b) eksperimen.

Pada Gambar 8, hasil simulasi daerah permukaan *inlet* memperlihatkan kontur warna hijau muda yang artinya bertemperatur 36,5 °C dan *outlet* memperlihatkan warna merah yang bertemperatur 38,92 °C. Pada data eksperimen daerah permukaan *inlet* memperlihatkan temperatur permukaan pelat 36,3 °C dan *outlet* 40,5 °C dengan nilai faktor koreksi masing-masing sebesar 0,97 (*inlet*) dan 0,96 (*outlet*). Hal ini menunjukkan bahwa adanya hasil kedekatan nilai faktor koreksi yang cenderung sama antara hasil simulasi dengan data eksperimen. Dengan demikian model simulasi dapat diandalkan untuk memprediksi karakteristik termal dari kolektor.

3. Perbandingan *pressure drop*



Gambar 9. Grafik perbandingan hasil simulasi dan eksperimen terhadap temperatur *outlet* dengan variasi laju aliran massa.

Berdasarkan Gambar 9 pada laju aliran massa terendah yaitu 0,0025 kg/s nilai *pressure drop* hasil simulasi yaitu 155 Pa sedangkan data eksperimen sebesar 123 Pa dengan nilai faktor koreksi 0,80. Kemudian untuk laju aliran massa terbesar 0,0125 kg/s pada hasil simulasi, nilai *pressure drop* sebesar 655 Pa sedangkan data eksperimen sebesar 603 Pa dengan nilai faktor koreksi 0,86.

Dari data tersebut menunjukkan bahwa hasil simulasi dan eksperimen memiliki kedekatan nilai faktor koreksi yang cenderung sama. Adanya selisih nilai tersebut, pada pengujian simulasi diasumsikan kekasaran permukaan pipa diabaikan dan sambungan pipa *elbow 90°* dan *180°* dianggap sempurna sehingga *pressure drop* pada eksperimen lebih besar dibandingkan hasil simulasi. Dengan demikian model simulasi dapat diandalkan untuk memprediksi karakteristik aliran fluida dari kolektor.

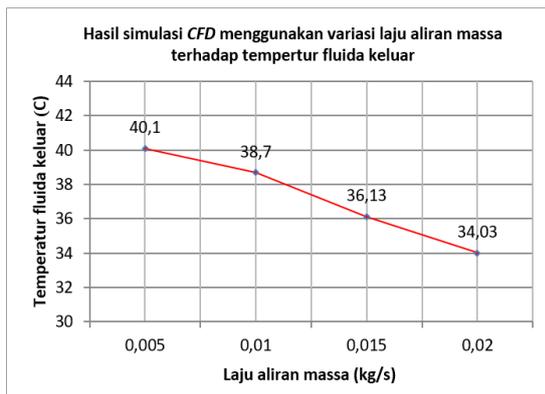
B. Hasil Simulasi Unjuk Kerja Kolektor

Pada ruang lingkup ini, simulasi yang dilakukan bertujuan untuk melihat unjuk kerja dan karakteristik pada kolektor surya. Unjuk kerja yang dimaksud adalah pada termal dan *pressure drop*. Adapun simulasi yang dilakukan ialah variasi laju aliran massa fluida dan variasi jarak antara pipa (*W*). Parameter-parameter yang digunakan dalam pengujian ini yaitu temperatur fluida masuk (T_{in}) sebesar 30°C dan intensitas radiasi matahari sebesar 825 W/m², adapun penjabarannya sebagai berikut.

1. Pengaruh variasi laju aliran massa fluida

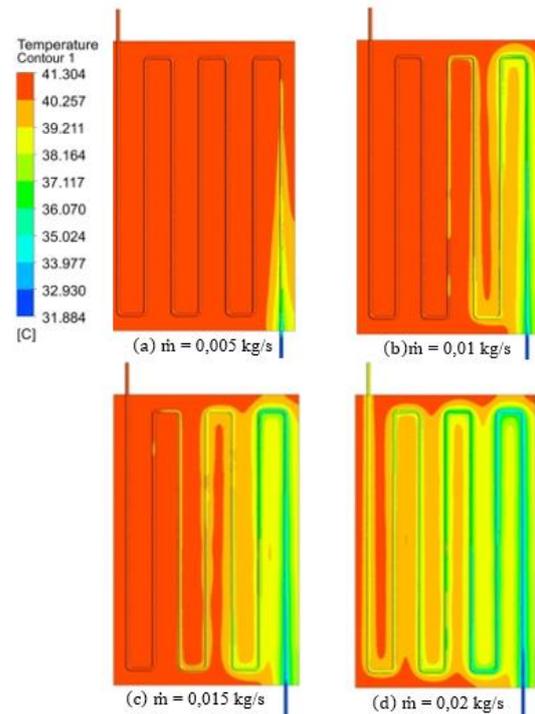
Untuk melihat pengaruh laju aliran massa terhadap termal dan *pressure drop*, maka pengujian dilakukan 4 variasi laju aliran massa yaitu 0.005, 0.01, 0.015, 0.02 kg/s. Parameter yang digunakan dalam simulasi ini meliputi *elbow* 90°, $W = 80$ mm, temperatur fluida inlet 30 °C, radiasi 825 W/m² dan material tembaga. Kemudian hasil simulasi tersebut dibuat dalam bentuk grafik berdasarkan analisis termal dan *pressure drop*.

a. Analisis termal



Gambar 10. Grafik hasil simulasi variasi laju aliran massa terhadap temperatur fluida keluar.

Gambar 10 memperlihatkan penggunaan laju aliran massa 0,005 kg/s menghasilkan temperatur fluida keluar sebesar 40,1 °C sedangkan penggunaan laju aliran massa 0,01 kg/s menghasilkan temperatur keluar sebesar 38,7 °C. Dari penjelasan tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa setiap kenaikan laju aliran massa sebesar 0,005 kg/s (dalam range 0,005-0,02 kg/s) maka temperatur fluida keluar akan mengalami penurunan sekitar 2 °C. Untuk memperjelas analisis termal kolektor maka data hasil simulasi tersebut disajikan dalam bentuk kontur Gambar 11.

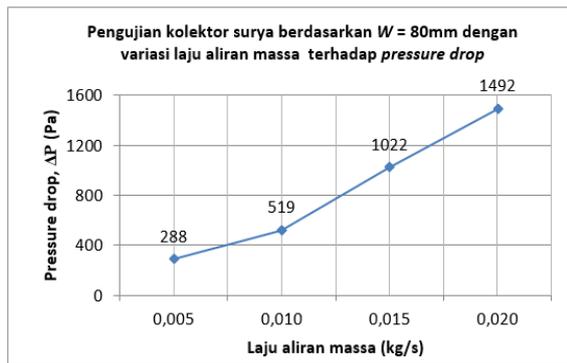


Gambar 11. Perbandingan variasi laju aliran massa terhadap temperatur permukaan pelat

Gambar 11 merupakan gambar hasil simulasi distribusi temperatur pelat kolektor surya berdasarkan variasi laju aliran massa. Pada laju aliran massa terkecil yaitu 0,02 kg/s, warna temperatur 95 % didominasi dengan warna merah. Warna merah menunjukkan temperatur permukaan kolektor sebesar 40 °C. Sedangkan laju aliran massa terbesar yaitu 0,02 kg/s, warna temperatur 85% didominasi dengan warna kuning. Warna kuning menunjukkan temperatur permukaan pelat kolektor sebesar 32 °C sampai 34 °C.

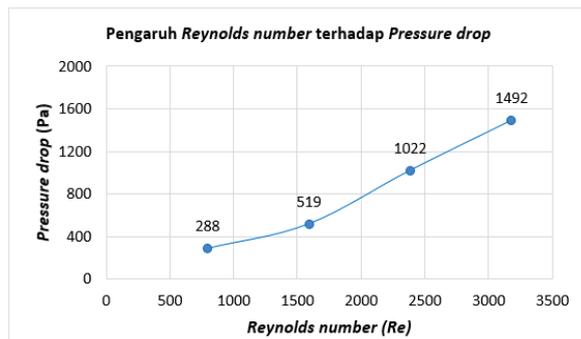
Dari data tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa besarnya temperatur yang dihasilkan oleh kolektor surya tergantung pada laju aliran massa yang diberikan. Penggunaan laju aliran massa yang besar mengakibatkan temperatur fluida keluar semakin kecil dan sebaliknya. Hal ini dikarenakan laju aliran massa yang cepat akan berakibat fluida yang berkontak langsung dengan pipa kolektor akan menyerap panas lebih cepat.

b. Analisis *pressure drop*



Gambar 12. Grafik hasil simulasi variasi laju aliran massa terhadap *pressure drop*

Gambar 12 memperlihatkan grafik kenaikan *pressure drop* fluida berdasarkan penggunaan laju aliran massa terendah (0,005 kg/s) sampai yang terbesar (0,02 kg/s). Hal ini ditunjukkan dengan penggunaan laju aliran massa 0,005 kg/s menghasilkan *pressure drop* sebesar 288 Pa sedangkan penggunaan laju aliran massa 0,02 kg/s menghasilkan *pressure drop* sebesar 1.492 Pa.



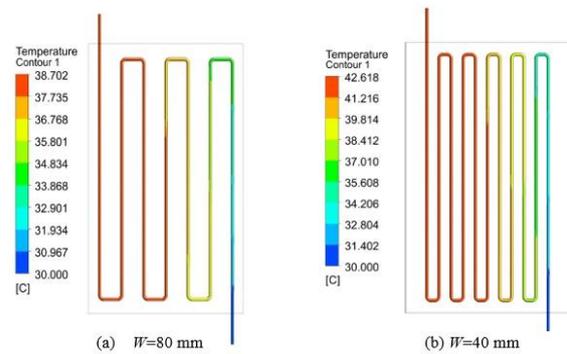
Gambar 13. Grafik pengaruh *Reynolds* terhadap *pressure drop*

Berdasarkan Gambar 13, nilai *Reynolds* didapatkan berdasarkan persamaan 2.18. Pada nilai *Re* sebesar 795, 1590, 2386, 3181 masing-masing *pressure drop* yang dihasilkan sebesar 288 Pa, 519 Pa, 1022 Pa dan 1492 Pa. Hal ini menjelaskan bahwa setiap kenaikan *Re* sebesar 800 pada aliran transisi ($Re > 2000$) maka *pressure drop* yang dihasilkan oleh kolektor menjadi meningkat sekitar 500 Pa.

2. Pengaruh variasi jarak antara pipa (*W*)

Dalam penelitian ini dilakukan dua variasi jarak antara pipa atau *W*= 40 mm dan *W*=80 mm. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jarak antara pipa (*W*) terhadap termal dan *pressure drop*. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi: *elbow* 90°, laju aliran massa 0,01 kg/s, temperatur fluida *inlet* 30 °C, radiasi 825 W/m² dan material tembaga.

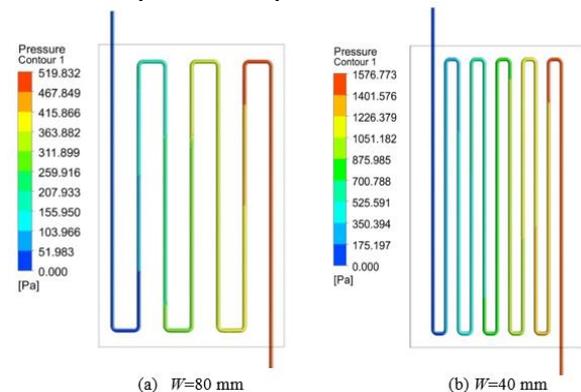
a. Analisis termal



Gambar 14. Perbandingan temperatur fluida keluar berdasarkan jarak antara pipa (*W*)

Pada Gambar 14 memperlihatkan kolektor surya menggunakan *W*=80 mm dan *W*=40 mm kemudian menghasilkan temperatur fluida keluar masing-masing 38,7 °C dan 42,6 °C. Selisih temperatur fluida keluar menggunakan *W*=40 mm dan *W*=80 mm yaitu sebesar 3,9 °C. Hal tersebut menjelaskan bahwa penggunaan *W*=40 mm akan meningkatkan temperatur fluida keluar sebesar 3,9°C dibandingkan penggunaan *W*=80mm tetapi dibutuhkan penambahan panjang pipa sebesar 57 %.

b. Analisis *pressure drop*



Gambar 15. Perbandingan *pressure drop* berdasarkan jarak antara pipa (*W*)

Pada Gambar 15 memperlihatkan pada kondisi pipa kolektor menggunakan *W*=80 mm, besar *pressure drop* fluida 519 Pa sedangkan menggunakan *W*=40 mm sebesar 1576 Pa. Perbedaan nilai *pressure drop* menggunakan *W*=40 mm dan *W*=80 mm yaitu sebesar 1056 Pa atau 67 %. Hal tersebut menjelaskan bahwa penggunaan *W*=80 mm akan mengurangi *pressure drop* sebesar 67 % dari penggunaan *W*=40 mm. *Pressure drop* yang rendah maka akan mengurangi pemakaian daya pompa.

Dari kedua penjelasan tersebut berdasarkan analisis termal dan *pressure drop* maka dapat disimpulkan bahwa penggunaan *W*=40 mm akan

menaikkan temperatur fluida keluar sebesar 3,9 °C tetapi dibutuhkan penambahan panjang pipa sebesar 57 % dari penggunaan $W=80$ mm. Sedangkan penggunaan $W=80$ mm akan mengurangi *pressure drop* sebesar 67 % dari penggunaan $W=40$ mm.

KESIMPULAN

Hasil simulasi menggunakan *CFD Ansys fluent* dapat diandalkan untuk memprediksi karakteristik aliran fluida dan perpindahan panas. Hal ini ditunjukkan dengan hasil simulasi dengan data eksperimen menunjukkan kedekatan nilai yang cenderung sama.

Pengaruh peningkatan laju aliran massa sebesar 0,005 kg/s (dalam *range* 0,005-0,02 kg/s) maka temperatur keluar fluida kerja (T_{out}) akan mengalami penurunan temperatur sekitar 2 °C. Sementara itu kenaikan Re sebesar 800 pada aliran transisi ($Re >2000$) maka *pressure drop* yang dihasilkan oleh kolektor menjadi meningkat sekitar 500 Pa. Untuk penggunaan jarak antara pipa (W) 40 mm akan meningkatkan temperatur keluar fluida kerja (T_{out}) sebesar 3,9 °C dibandingkan penggunaan $W=80$ mm tetapi dibutuhkan penambahan panjang pipa 57 %.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pembimbing beserta rekan-rekan mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung sehingga terlaksananya penelitian ini dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Biro Perencanaan dan Kerja Sama, 2015. *Renstra KESDM 2015-2019*. Kementerian Energi Sumber Daya Mineral.
- [2] Duffie, J.A. dan W.A. Beckman. 1980. *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York: John Wiley and Sons.
- [3] E. Hahne, 1982, "Parameter Effects on Design and Performance of Flat Plate Solar Collectors". *Solar Energy Vol. 34*, No. 6, pp. 497-504.
- [4] Ghamari, D.M., Worth, R.A., 1992, "The effect of tube spacing on the cost effectiveness of a flat-plate solar collector", *Renewable Energy* 2, 603–606.
- [5] Ramli, 2015, "Pemanas Terhadap Kinerja Kolektor Surya Pemanas Air", *Jurnal Ilmiah Teknologi Energi, Vol.1, No.1*.
- [6] S.N. Agbo dan C.E. Okeke, 2007, "Correlations between collector Performance and tube spacing for various absorber plate material in natural circulation solar water heater". *Trends in Applied Sciences Research* 2 (3) : 251-254.
- [7] P. Sivakumar, W. Christraj, M. Sridharan and

- N. Jayamalathi, 2012, "Performance Improvement Study of Solar Water Heating System", *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, VOL. 7, NO. 1.
- [8] X. A. Wang and L.G. Wu, 1990, "Analysis And Performance of Flat-Plate Solar Collector Arrays", *International Journal of Solar Energy* Vol. 45, NO. 2. PP. 71-78.
- [9] Volker Weitbrecht, David Lehmann and Andreas Richter, 2002, "Flow Distribution solar collectors with laminar flow conditions", *Solar Energy*. 73(6): 433-441.
- [10] S. Maharudrayya, S. Jayanti, A.P. Deshpande., 2005, "Flow distribution and pressure drop in parallel-channel configurations of planar fuel cells", *Journal of Power Sources* 144 : 94–106.
- [11] Federico Bava and Simon Furbo., 2016, "A numerical model for pressure drop and flow distribution in a solar collector with U-connected absorber pipes", *Solar Energy* 134 : 264–272.
- [12] N.M.Nahar., 2001, "Capital cost and economic viability of thermosiphonic solar water heaters manufactured from alternate materials in India", *Renewable Energy* 26 : 623–635.
- [13] Allan, James. D. Zahir dan Mauricette. 2015. *Performance Testing Of Thermal and Photovoltaic Thermal Solar Collectors*. Inggris: School of Engineering and Design Brunel University
- [14] Hawwash. 2017. *Numerical Investigation and Experimental Verification of Performance Enhancement of Flat Plate Solar Collector Using Nanofluids*. Tokyo: Elsevier Ltd.
- [15] Ismail. 2016. *Unjuk Kerja Kolektor Surya Pelat Datar Aliran Serpentine Berdasarkan Jenis Elbow dan Jarak Pipa*. Bandar Lampung: Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.