

Simulasi unjuk kerja kolektor surya hybrid PV/T berdasarkan jarak susunan pipa absorber berbentuk spiral

Ahmad Yonanda^{1*}, Amrizal², Harmen³, Hadi Prayitno⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung
Jl. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145
*Corresponding author: ahmad.yonanda@eng.unila.ac.id

Abstract

The performance of the solar collector can be reviewed based on several parameters, namely thermal and large fluid drop (pressure drop). This study aims to compare the thermal and pressure drop performance of plate-type solar collectors based on a spiral-shaped pipe arrangement using the distance between the pipes. The comparison of performance analyzed in each study for the distance between the pipes is 25 mm and 50 mm. The approach or stage of research on the performance of the data plate type solar collector is through CFD simulation testing. The simulation stages that will be carried out include: making the geometric design of the solar collector and selecting the mesh method used by the polyhedral type. The results of the solar collector test carried out by CFD simulation show that the use of a 50 mm absorber pipe arrangement has a higher thermal efficiency when compared to the 75 mm absorber pipe arrangement and also a 49.45% increase in pressure drop.

Keywords: *absorber pipe range, PV/T hybrid solar collector, pressure drop, spiral, thermal.*

Abstrak

Unjuk kerja kolektor surya dapat ditinjau berdasarkan beberapa parameter yaitu termal dan besar penurunan tekanan fluida (*pressure drop*). Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan unjuk kerja baik secara termal dan presure drop kolektor surya jenis pelat datar berdasarkan susunan pipa berbentuk spiral dengan penggunaan jarak antara pipa yang berbeda. Perbandingan unjuk kerja yang dianalisis dalam penelitian ini masing-masing untuk jarak antara pipa yaitu 25 mm dan 50 mm. Pendekatan atau tahapan penelitian unjuk kerja kolektor surya tipe pelat datar adalah melalui metode pengujian secara simulasi CFD. Tahapan simulasi yang akan dilakukan meliputi: pembuatan desain geometri kolektor surya, pemilihan metode *mesh* yang digunakan jenis *polyhedral*. Hasil pengujian kolektor surya yang dilakukan secara simulasi CFD menunjukkan penggunaan jarak susunan pipa absorber 50 mm memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan penggunaan jarak susunan pipa absorber 75 mm dan juga kenaikan *pressure drop* sebesar 49.45 %.

Kata kunci: jarak pipa absorber, kolektor surya hybrid PV/T, *pressure drop*, spiral, termal.

Pendahuluan

Kolektor surya hybrid PV/T memiliki keuntungan yaitu akibat penurunan temperatur permukaan PV oleh kolektor termal sehingga dihasilkan efisiensi listrik yang stabil. Kemudian keuntungan yang lain yaitu dihasilkan fluida kerja (air) yang mempunyai temperatur cukup tinggi sehingga dapat digunakan untuk berbagai keperluan seperti proses pemanasan pada

industri, bidang kesehatan, keperluan rumah tangga serta kebutuhan lainnya.

Banyak peneliti yang meneliti tentang unjuk kerja kolektor surya tipe pelat datar, diantaranya pengembangan metode pengujian kolektor surya pelat datar baik secara eksperimental dan simulasi numerik [1-3]. Dalam penelitian tersebut simulasi menggunakan konsep aliran piston untuk memprediksi nilai temperatur fluida keluar kolektor dan divalidasi dengan nilai parameter yang diperoleh dari

eksperimental. Pengujian eksperimental tersebut menggunakan radiasi paksa untuk menciptakan efek dinamik sehingga waktu pengujian dapat dilakukan lebih cepat dibandingkan dengan beberapa standar pengujian lainnya. Penelitian berikutnya adalah mengaplikasikan metode aliran piston untuk bagian termal pada kolektor surya jenis hybrid PV/T sedangkan bagian elektrik menggunakan metode single diode dengan memasukkan secara eksklisit fungsi termal radiasi matahari yang diterapkan [4-5].

Sementara itu, beberapa penelitian telah dilakukan untuk membuat pengembangan dan karakteristik untuk meningkatkan performa terhadap thermal dan photovoltaic thermal (PVT) kolektor surya menggunakan solar simulator [6]. Pada penelitiannya telah dibandingkan antara aliran serpentine (seri) dan *header riser* (paralel) untuk memperoleh metodologi yang dapat dipergunakan untuk menguji karakteristik unjuk kerja dari sebuah kolektor surya. Pada kasus pertama telah diuji antara kolektor surya tipe serpentine dengan tipe paralel dengan laju aliran yang sama. Hasil yang diperoleh untuk kolektor surya tipe paralel dengan konstruksi pipa riser dan header memiliki efisiensi lebih kecil dengan koefisien kehilangan menyeluruh meningkat 34%. Nilai koefisien kehilangan panas diperoleh secara eksperimental dan kemudian ditentukan sebagai parameter tetap dalam simulasi CFD. Pada penelitiannya didapatkan perbedaan +2,9% dan -0,70% antara hasil eksperimen dan simulasi untuk riser header dan serpentine kolektor masing-masing.

Terdapat beberapa penelitian pendahuluan yang telah dilakukan oleh peneliti yaitu unjuk kerja kolektor surya pelat datar aliran serpentine menggunakan simulasi CFD [7]. Pada penelitian tersebut dianalisis unjuk kerja kolektor surya aliran *serpentine* berdasarkan jenis material, variasi laju aliran massa fluida, variasi jarak antara pipa (W) dan bentuk sambungan pipa (*elbow*) menggunakan simulasi CFD. Hasil

penelitian menunjukkan bahwa penggunaan material absorber tembaga menghasilkan temperatur keluar fluida kerja (T_{out}) lebih tinggi 0,9°C dan 1,9°C jika dibandingkan dengan penggunaan material aluminium dan kuningan. 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. 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. Sementara itu penggunaan elbow 180° akan mengurangi nilai pressure drop sebesar 30 % jika dibandingkan dengan penggunaan *elbow* 90°.

Pemodelan secara numerik juga telah dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem kolektor PV/T [8]. Meningkatkan laju aliran massa fluida kerja akan menurunkan suhu panel PV sehingga dapat meningkatkan efisiensinya. Dua model sistem PV/T dengan air sebagai fluida kerja diteliti secara eksperimental dan teoritis. Terdapat penemuan baru bahwa susunan pipa kolektor berbentuk spiral dibandingkan dengan tipe konvensional (*header*) dengan mode pengujian paksa, didapatkan peningkatan efisiensi termal dicapai sebesar 21,94 % [9].

Berdasarkan tinjauan di atas, sebagian besar penelitian yang telah dilakukan dalam sistem desain PV/T dengan menambahkan pelat dan pipa penyerap di bagian belakang panel PV konvensional. Selain itu, bentuk susunan pipa *absorber* pada umumnya berbentuk konvensional (*riser* dan *serpentine*). Karena kenaikan suhu sel PV menyebabkan penurunan efisiensi listrik, desain dengan metode pendinginan yang efisien dapat meningkatkan efisiensi termal dan listrik.

Berdasarkan informasi literatur yang ada, masih sedikit referensi yang menjelaskan pengaruh terhadap jarak susunan pipa *absorber* terhadap unjuk kerja baik untuk termal dan *pressure drop* yang dihasilkan. *Pressure drop* diperlukan untuk menentukan besarnya daya pompa yang

akan digunakan. Dalam penelitian ini, perbandingan desain susunan jarak antara pipa *absorber* panel PV/T disimulasikan menggunakan metode *Computing Fluid Dynamic (CFD)* dan dievaluasi karakteristiknya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui sekaligus membandingkan unjuk kerja kolektor surya hybrid PV/T secara termal dan *pressure drop* berdasarkan susunan jarak antara pipa *absorber* berbentuk spiral.

Tinjauan Pustaka

Model termal yang digunakan dalam pengujian ini adalah seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$Q_u = A \left[(\tau\alpha)_{en} G - U_L (T_{pm} - T_a) \right] \quad (1)$$

Persamaan (1) dapat diubah menjadi persamaan berikut :

$$Q_u = A F' \left[(\tau\alpha)_{en} G - U_L (T_m - T_a) \right] \quad (2)$$

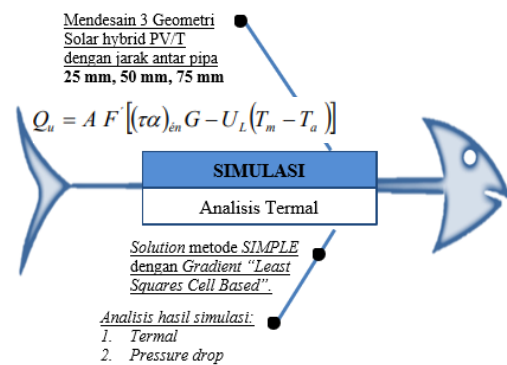
Dimana Q_u adalah energi berguna, adalah panas spesifik dari fluida, adalah *zero loss efficiency* untuk radiasi global normal terhadap permukaan, G adalah intensitas radiasi matahari, F' adalah faktor efisiensi dari kolektor, U adalah koefisien rugi termal menyeluruh, T_a adalah temperatur lingkungan, T_m adalah temperatur fluida rata-rata dari T_i dan T_o adalah temperatur fluida dibagian masuk dan keluar dari segmen kolektor dan A adalah luas kolektor [10-13]. Persamaan (1) merupakan energi berguna berdasarkan perbedaan antara nilai energi radiasi yang diserap oleh permukaan kolektor dengan rugi termal perpindahan panas konveksi ke lingkungan. Temperatur rata-rata permukaan pelat (T_{pm}) pada persamaan (1) dapat diwakili oleh temperatur rata-rata dari temperatur fluida masuk dan keluar (T_m) dengan menambahkan faktor koreksi F' [14].

Sementara itu secara umum untuk aliran fluida dalam simulasi program *Ansys Fluent* dengan metode CFD menggunakan persamaan dasar yaitu persamaan kontinuitas, persamaan momentum dan

persamaan energi. Beberapa kondisi batas diberikan dalam simulasi ini diantaranya laju aliran fluida dalam saluran adalah konstan dan rugi-rugi panas pada bagian bawah kolektor diabaikan. Pengaturan kondisi batas menyesuaikan kebutuhan simulasi yang diinginkan seperti kondisi kecepatan dan laju aliran fluida. Sementara itu dalam tahap terakhir disajikan hasil akhir dari proses simulasi dengan menampilkan kontur warna agar dapat dianalisis [15-18].

Metode Penelitian

Secara umum langkah-langkah penelitian yang akan dilakukan dapat digambarkan dalam bentuk diagram *Fish bone* seperti terlihat dalam Gambar 1 berikut.



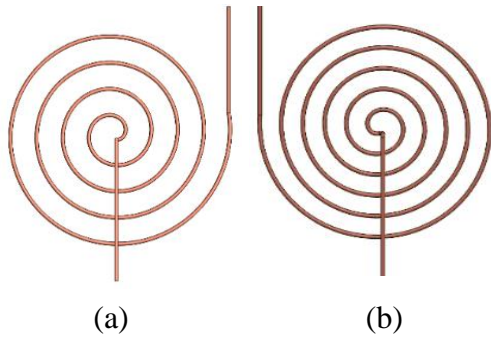
Gambar 1. *Fish-bone* diagram penelitian

Adapun tahapan proses simulasi meliputi:

Pre-processing. *Pre-processing* adalah tahap awal yang perlu dilakukan sebelum melakukan simulasi meliputi: membuat geometri, mesh, mendefinisikan bidang batas pada geometri. Untuk geometri yang dibuat dalam penelitian ini yaitu disajikan dalam tabel 1.

Tabel 1. Sfesifikasi geometri kolektor surya *hybrid PV/T*.

No	Parameter	Nilai
1	Dimensi PV/T (Panjang x lebar)	670 mm x 670 mm
3	Jarak antara pipa (W)	25 mm dan 50 mm
4	Material, tebal pelat	Tembaga, 1 mm
5	Diameter pipa luar, dalam	10 mm, 9 mm

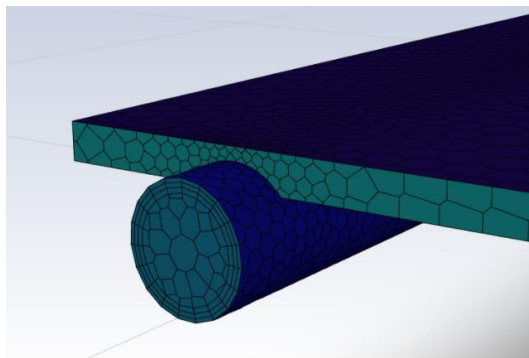


Gambar 2. Variasi jarak antara pipa (a) 75 mm dan (b) 50 mm

Setelah geometri dibuat maka tahap selanjutnya ialah tahap *meshing*, rincian *meshing* dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Parameter mesh pada masing-masing geometri

Geometri	Jenis mesh	Cells	Nodes
1 Jarak susunan pipa 50 mm	<i>Poly-</i>	1.100.	3.47
	<i>Hexcore</i>	476	8.99
			9
2 Jarak susunan pipa 75 mm	<i>Poly-</i>	706.02	2.76
	<i>Hexcore</i>	1	0.92
			0



Gambar 3. *mesh* jenis *Poly-Hexcore*

Processing dan Result. Pada tahap 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*. Adapun *boundary conditions* disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Parameter pengujian simulasi

No	Parameter	Nilai
1	Heat Flux (radiasi)	825 W/m ²
2	Temperatur fluida masuk (T _{in})	27,32,37,42 °C
3	Temperatur lingkungan	30 °C
4	Laju aliran massa (<i>m</i>)	0,0125 kg/s

Hasil dan Pembahasan

Variasi temperatur fluida masuk yang digunakan dalam simulasi unjuk kerja kolektor PV/T ini adalah 27°C, 32°C, 37°C, 42°C dengan intensitas radiasi sebesar 825 W/m². Temperatur udara lingkungan dan laju aliran massa fluida kerja masing-masing adalah 30°C dan 0.0125 kg/s. Seluruh kondisi pengujian ini diterapkan secara sama dalam simulasi CFD terhadap ketiga jenis geometri kolektor.

Selanjutnya hasil simulasi tentang perbedaan unjuk kerja termal masing-masing dapat dilihat pada Tabel 1 berdasarkan temperatur fluida keluar (T_o) dan temperatur rata-rata permukaan PV (T_{PV}) pada Tabel 3. Sedangkan pada Gambar 5 mengilustrasikan distribusi temperatur fluida sepanjang saluran untuk ketiga jenis bentuk geometri jarak antar pipa yang berbeda, sedangkan pada Gambar 6 menggambarkan distribusi temperatur permukaan panel PV (T_{PV}). Selanjutnya pada Gambar 7 menjelaskan distribusi tekanan fluida sepanjang saluran untuk kedua jenis susunan jarak antar pipa.

Pada ruang lingkup ini, hasil simulasi yang dilakukan bertujuan untuk melihat unjuk kerja dan karakteristik kinerja pada kolektor surya aliran spiral. Unjuk kerja yang dimaksud adalah pada termal, pressure drop dan efisiensi.

Analisis termal. Pada penelitian ini diambil data temperatur melalui distribusi atau plot kontur warna pada permukaan kolektor surya dan fluida kerja. Dari simulasi pada Tabel 4 menggambarkan perbandingan

antara temperatur fluida keluar berdasarkan jarak susunan pipa absorber 50 dan 75 mm. Terlihat perbedaan temperatur antara fluida masuk dan keluar untuk kedua jenis variasi jarak berdasarkan jarak susunan pipa absorber semakin berkurang seiring dengan kenaikan temperature fluida masuk. Hal ini di akibatkan oleh itensitas radiasi yang konstan selama pengujian sehingga dengan fluida lebih rendah akan mampu menyerap panas lebih tinggi dibandingkan dengan fluida masuk yang bersuhu tinggi. Pada temperatur fluida keluar untuk jarak susunan pipa absorber 50 mm menunjukkan lebih tinggi akan tetapi perbedaanya tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan fluida keluar pada jarak susunan pipa absorber 75 mm. Perbedaan temperature yang tertinggi pada pengujian secara simulasi ini adalah 0.4 °C yang terjadi pada temperatur fluida masuk (T_i) 27 °C.

Tabel 4. Perbandingan temperatur fluida keluar (T_o) antara jarak susunan pipa absorber 50 mm dan 75 mm.

	T_i	T_o		$T_o_{50mm} - T_o_{75}$
		50mm	75 mm	
1	27	34.25	33.85	0.4
2	32	38.42	38.12	0.3
3	37	42.77	42.57	0.2
4	42	46.80	46.50	0.3

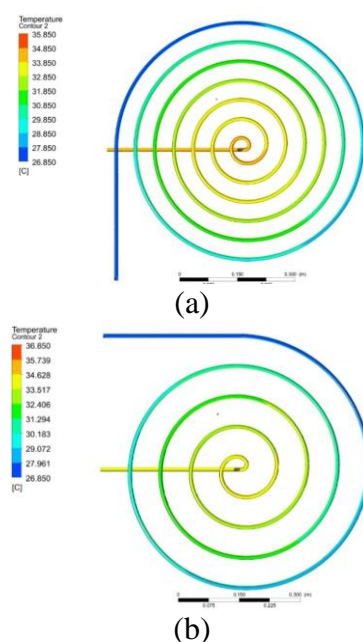
Tabel 5. Perbandingan permukaan panel PV(T_{pv}) antara jarak susunan pipa absorber 50 mm dan 75 mm.

	T_i	T_o		$T_o_{50mm} - T_o_{75}$
		50mm	75 mm	
1	27	36.5	38.1	1.6
2	32	40.4	42.3	1.9
3	37	44.2	46.6	2.4
4	42	48.3	50.5	2.2

Sementara itu pada Tabel 5 terdapat perbedaan temperatur permukaan panel PV dari kolektor *hybrid PV/T* untuk kedua jenis kolektor. Didapatkan kolektor *hybrid PV/T* dengan jarak susunan pipa absorber 50 mm memberikan nilai temperature permukaan PV lebih rendah dibandingkan penggunaan jarak susunan pipa absorber 75 mm. Hal ini akan berdampak terhadap efisiensi listrik

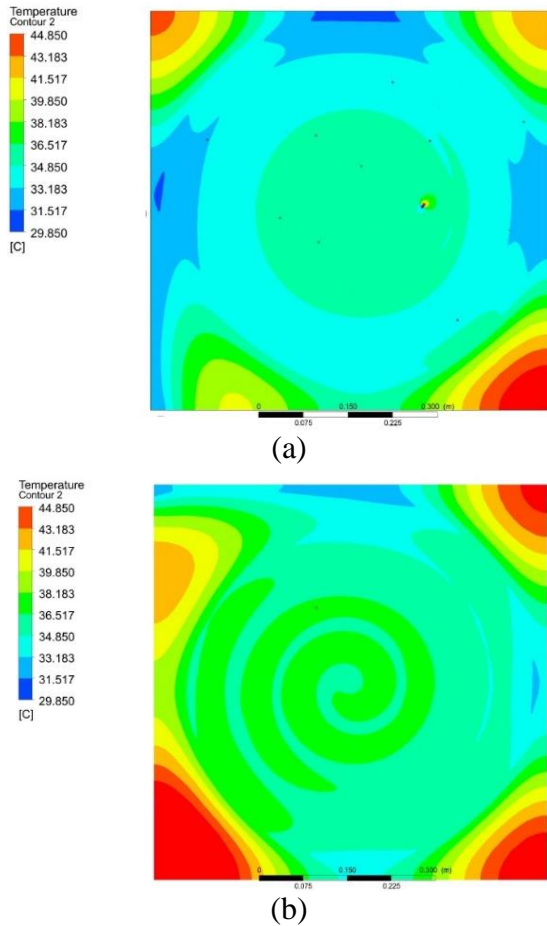
yang lebih baik. Temperatur permukaan PV yang lebih rendah ini bisa jadi di sebabkan oleh bentuk geometri pada jarak susunan pipa absorber 50 mm lebih panjang dibandingkan penggunaan jarak susunan pipa absorber 75 mm sehingga area perpindahan panas lebih luas diantara pipa dan pelat absorber. Dengan demikian terjadi peningkatan laju perpindahan panas yang ditandai dengan adanya peningkatan perbedaan temperature permukaan panel PV antara penggunaan jarak susunan pipa absorber 50 dan 75 mm. Perbedaan temperatur tertinggi adalah 2.4 °C pada temperature fluida masuk 37 °C.

Distribusi temperatur fluida kerja secara lebih detail dapat dilihat pada Gambar 5a dan 5b masing-masing untuk penggunaan jarak susunan pipa absorber 50 dan 75 mm. Distribusi ini berkaitan dengan persamaan 2 yang diwakilili oleh temperature rata-rata fluida masuk dan keluar (T_m). Semakin medekati daerah keluar dari fluida kerja maka terjadi peningkatan suhu fluida karena kolektor menerima pancaran dari sinar radiasi dalam waktu yang lebih lama. Sedangkan distribusi temperature dari permukaan panel PV diwakilili oleh temeperatur rata-rata pelat T_{pm} dari persamaan 1.



Gambar 4. Perbandingan distribusi temperatur fluida pada penggunaan jarak susunan pipa absorber (a) 50 mm dan (b) 75 mm.

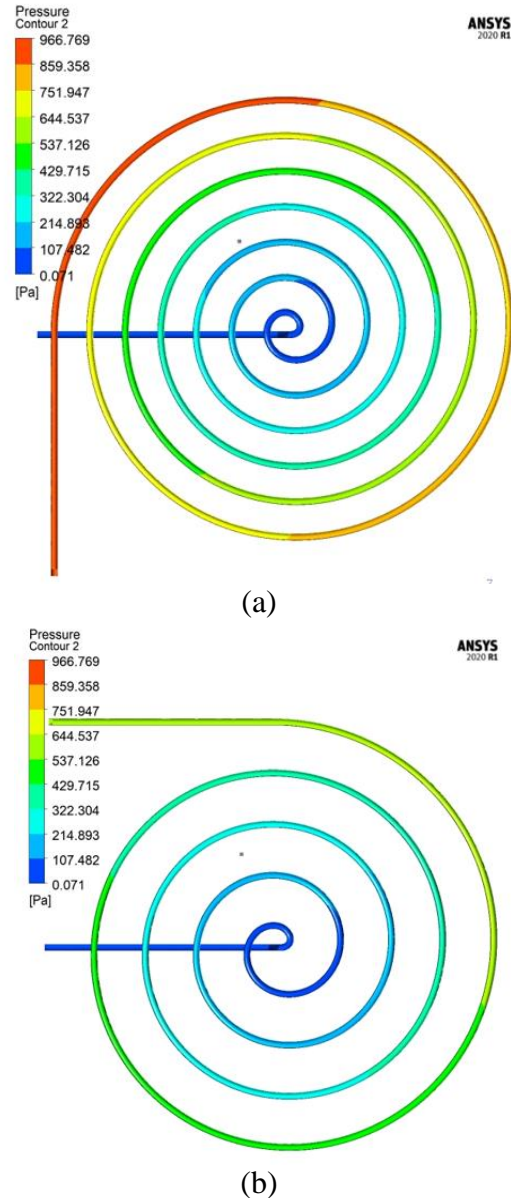
Distribusi temperatur permukaan panel PV dapat dilihat secara detail pada Gambar 5a dan 5b dimana mempunyai kecenderungan yang sama dengan distribusi temperatur aliran fluida.



Gambar 5. Distribusi temperatur permukaan PV jarak susunan pipa absorber (a) 50 mm dan (b) 75 mm.

Selanjutnya simulasi yang dilakukan untuk menggambarkan tekanan fluida kerja secara detail juga dapat dilihat pada Gambar 6a dan 6b. Dengan menggunakan fluida air terdapat peningkatan *pressure drop* sebesar 49.45% untuk penggunaan jarak susunan pipa absorber 50 mm jika dibandingkan dengan penggunaan jarak susunan pipa absorber 75 mm. Perbedaan *pressure drop* ini bisa jadi dimungkinkan karena pada penggunaan jarak susunan pipa absorber 50 mm ukuran panjang pipanya lebih panjang sebesar 40% dan juga semakin banyak belokkan pada pipa sehingga menyebabkan gesekan fluida dengan dinding lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan jarak

susunan pipa absorber 75 mm. Dengan demikian daya pompa yang dibutuhkan untuk mengalirkan fluida kerja pada penggunaan jarak susunan pipa absorber 50 mm akan lebih besar.



Gambar 6. *Pressure drop* pada penggunaan jarak susunan pipa absorber (a) 50 mm dan (b) 75 mm.

Kesimpulan

Hasil simulasi CFD ini mengindikasikan penggunaan jarak susunan pipa absorber 50 mm memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan penggunaan jarak susunan pipa absorber 75 mm dan juga kenaikan *pressure drop* sebesar 49.45 %. Hasil ini juga menunjukkan bahwa penggunaan jarak

susunan pipa *absorber* berpengaruh terhadap unjuk kerja dari sebuah kolektor surya *hybrid* PV/T. Simulasi ini bermanfaat dalam membantu proses optimalisasi kinerja sebuah kolektor karena prosesnya lebih mudah, cepat dan murah. Biaya yang lebih besar terhadap proses eksperimental seperti kebutuhan material, pembuatan alat uji, penyediaan alat ukur dan tenaga pengujian dapat dieliminasi melalui proses simulasi ini. Berdasarkan hasil simulasi dari kedua bentuk penggunaan jarak susunan pipa *absorber* memberikan peluang baru dalam pengembangan kolektor *hybrid* PV/T dimana desain dengan bentuk penampang persegi ini perlu untuk diimplementasikan pada sebuah kolektor. Dengan demikian perlu adanya pengujian secara eksperimen lebih lanjut untuk mengetahui dan menganalisa kinerja dari jenis kolektor *hybrid* PV/T baik secara termal maupun elektrik berdasarkan bentuk penggunaan jarak susunan pipa *absorber*.

Ucapan terimakasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada berbagai pihak yang telah memberikan kontribusi dalam penyelesaian artikel ini. Penelitian ini dapat terwujud melalui dana hibah DIPA FT Universitas Lampung untuk Penelitian Dosen Pemula Universitas Lampung tahun 2021.

Referensi

- [1] Abdul Hamid, S., Yusof Othman, M. Sopian, K., Zaidi, S.H., (2014) *An overview of photovoltaic thermal combination (PV/T combi) technology*. Renew. Sustain. Energy Rev. 38, 212-222.
- [2] Allan, James. D. Zahir dan Mauricette (2015) *Performance Testing of Thermal and Photovoltaic Thermal Solar Collectors*. Inggris: School of Engineering and Design Brunel University.
- [3] Amrizal (2014). *Simulasi unjuk kerja termal kolektor surya pelat datar dengan pendekatan temperature fluida kerja*. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin, (SNTTM) XIII, Teknik Mesin Universitas Indonesia, ISBN 978-602-9841-23-7
- [4] Duffie, J.A. dan W.A. Beckman (1980) *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York: John Wiley and Sons.
- [5] European Standard EN 12975, 2006. CEN European Committee for Standardisation.
- [6] Incropera, Frank P. (2007) *Fundamentals of Heat and Heat Mass Transfer*. Edisi ke-6. United States of America: John Willey & Sons, Inc.
- [7] Kumaresan, G., Sudhakar, P., Santosh, R., Velraj, R. (2017) *Experimental and numerical studies of thermal performance enhancement in the receiver part of solar parabolic trough collector*. Renew. Sustain. Energy Rev. 77 (January), 1363-1374.
- [8] N. Amrizal, D. Chemisana, J.I. Rosell, J. Barrau (2012) *A dynamic model based on the piston flow concept for the thermal characterization of solar collectors*. Applied Energy, 94, 244-250.
- [9] N. Amrizal, D. Chemisana, and J. I. Rosell (2013) *Hybrid Photovoltaic-Thermal Solar Collector Dynamic Modelling*, Applied Energy, 101, 797-807.
- [10] S. Dubey, A.A. Tay, "Testing of two different types of photovoltaic-thermal (PV/T) modules with heat flow pattern under tropical climatic conditions", Energy for Sustainable Development, 2013, Vol. 17, pp. 1-12.
- [11] R. Santbergen, et al. (2014) *Detailed analysis of the energy yield of systems with covered sheet-and-tube PV/T collectors*, Solar Energy, Vol. 54, pp. 517-575. [17] M. Rosli, et al, 2014, "Parametric Analysis on Heat Removal Factor for a Flat Plate Solar Collector of Serpentine Tube", World Applied Sciences Journal, 2010, Vol. 28, pp. 154-157.

- [12] Oyieke, A.Y.A., Inambao, F.L., (2013) *Water based hybrid photovoltaic and thermal (PV/T) flat plate solar collectors: Status and opportunities*. BIE Bienn. 23 (44), 35-44.
- [13] Verma, dkk. (2019) *Performance comparison of innovative spiral shaped solar collector design with conventional flat plate solar collector*. India: Elsevier Ltd.
- [14] Yonanda, A., Amrizal, Amrul (2019) *Simulasi Unjuk Kerja Termal Dan Pressure Drop Kolektor Surya Pelat Datar Aliran Serpentine Menggunakan Metode CFD*. Universitas Lampung: Journal Mechanical Vol 10, No,1.
- [15] Yonanda, A., Amrizal (2021) *Karakteristik Kolektor Surya Pelat Datar Aliran Spiral dan Serpentine Menggunakan Metode Simulasi CFD*. Universitas Lampung: Journal Mechanical.
- [16] Zondag, H.A., Vries, de D.W., Helden, van W.G.J., Zolingen, van R.J.C., Steenhoven van, A.A. (2002) *The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector*. Solar energy, 2002, 72(2), pp. 113-128.
- [17] Zondag, H.A., Vries, D.W. de, Helden, W.G.J. van, Zolingen, R.J.C. van, Steenhoven, A.A. van (2003) *The yield of different combined PV thermal collector designs*. Solar energy, 2003, 74, pp. 253-269
- [18] Rudawin. La, Nurlaila Rajabiah dan Dwi Irawan , 2020, “Analisa sistem kerja photovoltaic berdasarkan sudut kemiringan menggunakan *monocrystalline* dan *polycrystalline*”, Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro, TURBO Vol. 9 No. 1. 2020,
<http://dx.doi.org/10.24127/trb.v9i1.1221>