

## Pemanfaatan CLPHP Untuk Konservasi Energi Gedung dan Solar Water Heater Dengan Fluida Kerja Acetone

Imansyah Ibnu Hakim<sup>a,1</sup>, Raden Muhammad Rafi Jati Kusumo<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, 16424

<sup>1</sup>imansyah@eng.ui.ac.id

### ABSTRACT

The rapid development of building construction and population growth significantly impact energy consumption. Of course, energy needs will also increase. Currently, energy needs are still commonly using conventional sources that produce greenhouse gases, causing global warming and climate change. In order to participate in achieving the Sustainable Development Goals (SDGs), point seven is regarding the use of clean energy, and point 13 is overcoming the impacts of climate change. Clean and renewable energy conservation needs to be developed. The solar energy that enters the building through the roof is 60%. Of course, this will impact energy consumption for room cooling. Thermal energy conservation in this building is a must. This study was conducted to see the performance of the Closed Loop Pulsating Heat Pipe (CLPHP) for thermal energy conservation in buildings. By utilizing the CLPHP installed on the roof of the building, heat from the sun will be absorbed by the CLPHP in the evaporator section. The heat absorbed in the evaporator section will be forwarded to the condenser section. The thermal energy successfully conserved by the CLPHP in the condenser section can be applied as a water heater (solar water heater). This CLPHP is a heat exchanger but does not require energy to transfer heat. The study used acetone as the working fluid with variations in filling ratios of 40%, 50%, 60%, 70%, and 80%, and the heat input value according to solar irradiation of 1,322 W/m<sup>2</sup>. Experiments were conducted to determine the thermal resistance of the CLPHP system and its achievement in heating water in the condenser tank. The experimental results showed that a filling ratio of 60% had the most optimal performance with the lowest thermal resistance and could increase the water temperature to 36.55.

Keywords: Closed Loop Pulsating Heat Pipe, Filling Ratio, Acetone, Energy conservation

Received 2 September 2024; Presented 2 Oktober 2024; Publication 20 Januari 2025

DOI: 10.71452/590794

### PENDAHULUAN

Secara geografis, Indonesia terletak di garis khatulistiwa yang akan menerima sinar matahari dengan intensitas tinggi. Diketahui bahwa setidaknya 60% energi termal dari sinar matahari akan memasuki bangunan gedung melalui atap. Energi termal yang masuk ke dalam bangunan gedung akan meningkatkan suhu dalam bangunan gedung. Dengan demikian beban pendinginan akan semakin meningkat, begitu juga dengan konsumsi energi listrik dan emisi karbon pun meningkat. Tentu problematika ini menarik untuk diteliti khususnya terkait dengan konservasi energi termal pada bangunan gedung. Dalam rangka turut berpartisipasi dalam capaian Sustainable Development Goals (SDGs) poin 7 mengenai pemanfaatan energi bersih dan poin 13 dalam mengatasi dampak perubahan iklim, konservasi energi bersih dan terbarukan perlu dikembangkan. Penelitian tentang heat pipe sebelumnya menunjukkan bahwa pemasangan *Closed Loop Pulsating Heat Pipe* (CLPHP) pada atap

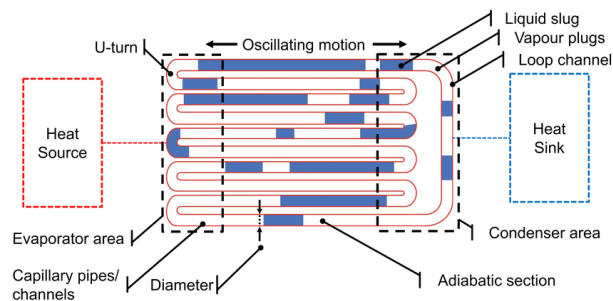
bangunan gedung mampu mereduksi jumlah energi termal yang masuk ke dalam gedung, dengan penurunan suhu mencapai 12,94% [1]. *Closed Loop Pulsating Heat Pipe* (CLPHP) merupakan salah satu jenis komponen perpindahan panas (*heat exchanger*) dua-fasa yang bekerja secara pasif dan mampu menerima aliran panas dengan baik [2]. Panas yang diserap oleh *Closed Loop Pulsating Heat Pipe* dapat dimanfaatkan kembali untuk aplikasi alat pemanasan tepat guna, seperti *solar water heater* [3].

Terdapat beberapa parameter yang dapat memengaruhi kinerja *Closed Loop Pulsating Heat Pipe*, yaitu geometri, material, fluida kerja, orientasi, dan *filling ratio* [4]. Penelitian ini dilakukan terkait dengan pemanfaatan *Closed Loop Pulsating Heat Pipe*. CLPHP memiliki dimensi diameter dalam 3 mm, diameter luar 4 mm, dan ada 5 jumlah lekukan. Bahan yang digunakan pipa tembaga dengan fluida kerja asetone. *Filling ratio* akan dijadikan sebagai variabel bebas dengan variasi 40%, 50%, 60%, 70% dan 80%, variabel ini dilakukan untuk mendapatkan nilai

optimum CLPHP pada sistem *solar water heater*. Selain itu nilai resistansi termal juga akan dijadikan tolak ukur kinerja CLPHP.

## REVIEW LITERATUR

*Heat pipe* umumnya merupakan perangkat pemulihan panas otomatis yang digunakan untuk mentransfer panas dari satu ujung ke ujung lainnya dengan perbedaan suhu minimum dan juga untuk menghantarkan panas melintasi permukaan internal [5]. *Heat pipe* dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu bagian evaporator, adiabatik, dan kondensor. Saat bagian evaporator menyerap panas, fluida kerja yang digunakan menguap dan uap yang terbentuk mengalir ke kondensor karena adanya perbedaan tekanan. Uap melepaskan panas dan berubah kembali menjadi cairan saat berada di kondensor, lalu cairan ini mengalir kembali ke evaporator sepanjang sumbu pipa melalui gaya kapiler [6]. *Heat pipe* dengan desain *closed loop* dapat bekerja secara kontinu dan pasif sehingga menjadi bagian yang sangat handal dalam sistem perpindahan termal [5].



Gambar 1. Closed loop pulsating heat pipe dan pola alirannya (Dan Zab, 2016)

Studi terus dilakukan untuk meningkatkan performa dari *heat pipe* dengan mengubah konfigurasi sehingga memiliki efisiensi yang lebih baik, salah satunya yaitu *pulsating heat pipe* (PHP). Konsep PHP pertama kali diusulkan oleh Smyrnov dan Savchenkov pada tahun 1971 untuk menyelidiki pola perpindahan panasnya. Kemudian, pada tahun 1990, pulsating heat pipe diperkenalkan dan dipatenkan oleh Hisateru Akachi [7]. Pulsating heat pipe terdiri dari pipa berkeluk-keluk berdimensi kapiler dengan beberapa putaran (u-turn) seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1. Struktur PHP berbeda dengan struktur *heat pipe* konvensional dimana tidak menggunakan struktur wick. Dalam pengoperasiannya, pipa diisi oleh fluida kerja dan fluida kerja akan terdistribusi secara sendirinya dalam bentuk liquid-vapor slugs atau plugs di dalam pipa kapiler [5]. Tegangan permukaan yang menyebabkan fluida kerja dapat terdistribusi dengan sendirinya. Fluida kerja mendidih di bagian evaporator karena

menyerap panas dan membentuk gelembung uap. Hal ini mengakibatkan peningkatan tekanan secara tiba-tiba yang mendorong fluida bergerak ke bagian kondensor. Karena bagian kondensor relatif lebih dingin, lalu gelembung uap mengembun menjadi cairan sehingga tekanannya berkurang. Fluida kerja akan kembali ke bagian evaporator, begitu seterusnya.

PHP memiliki keunggulan dalam beberapa karakteristiknya diantaranya yaitu kinerja termal yang tinggi, respon cepat terhadap beban panas yang tinggi, dan desain sederhana. Oleh karena itu, PHP menjadi suatu teknologi yang menjanjikan untuk sistem pendinginan termal, penukar panas, pengawetan kriogenik sel, serta penerapan anti-gravitasi pada sistem kontrol pesawat luar angkasa [8]. Keunggulan diatas menjadi alasan mengapa penelitian dan studi terus dilakukan dalam pengembangan performa pulsating heat pipe dengan mengubah beberapa parameter. Beberapa parameter yang berpengaruh terhadap performa PHP yaitu parameter geometri, operasional dan fluida kerja. Parameter geometri seperti material, panjang bagian evaporator, adiabatik, dan kondensor, jumlah lekukan, diameter, dan ketebalan pipa. Parameter operasional seperti inclination angle dan variasi heat input. Parameter fluida kerja mencakup jenis fluida kerja, besar filling ratio, serta *mixing ratio*-nya [6].

Parameter kinerja termal pada sistem CLPHP dapat diukur melalui resistansi termal dan koefisien perpindahan panasnya, dimana nilai tersebut didapatkan dari perbedaan temperatur antara evaporator dan kondensor lalu diplot menggunakan grafik. Dari grafik tersebut, pengaruh dari berbagai konfigurasi parameter dengan kinerja termal terbaik akan teridentifikasi. Resistansi termal ( $R$ ) dapat diperoleh menggunakan persamaan (1) [7].

$$R = \frac{T_e - T_c}{Q} \quad (1)$$

Persamaan (1) merupakan perbedaan antara suhu evaporator rata-rata dan kondensor rata-rata ( $T_e - T_c$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ ). terhadap *heat input* ( $Q$  (watt)). Parameter ini membantu dalam menandakan hambatan yang dihadapi oleh aliran panas yang melintasi fluida kerja dari ujung evaporator ke ujung kondensor [7]

Desain geometris memiliki pengaruh yang besar dalam performa termal dimana kerumitan dari pola aliran bergantung pada variasi geometris [9]. Salah satu pendekatan pada parameter geometri adalah dengan variasi luas penampang yang asimetris [10]. Penelitian serupa mengenai perubahan rasio luas penampang dilakukan pada beberapa konfigurasi PHP [11]. Alasan dasarnya adalah terkait dengan perubahan kesetimbangan gaya yang terjadi tergantung pada geometri konfigurasi dari CLPHP [9].

Penelitian lain mengenai pengaruh parameter geometri terhadap performa termal yaitu menyelidiki bagaimana aliran pada *Flat Plate Pulsating Heat Pipe* (FPPHP) dan *Capillary Tube Pulsating Heat Pipe* (CTPHP), dimana CTPHP menunjukkan performa termal yang lebih baik karena adanya konduksi lateral di FPPHP, yang memiliki efek buruk pada osilasi slug-plug [12].

CLPHP tersusun dari rangkaian pipa kapiler, sehingga internal diameter akan memengaruhi pergerakan fluida kerja di dalam pipa. Internal diameter ( $D_i$ ) CLPHP disarankan untuk lebih kecil dibandingkan diameter kritis pipa yang diketahui berdasarkan bilangan non-dimensi fluida kerja, yaitu Bond Number pada persamaan (2).

$$Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \times D_i^2 \quad (2)$$

$$D_i < 2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (3)$$

Di mana  $\rho$  adalah massa jenis [ $\text{kg/m}^3$ ] dan  $g$  adalah gravitasi ( $\text{m/s}^2$ ). Ukuran diameter juga berhubungan pada *surface tension* ( $\sigma$  (N/m)) pada fluida kerja, dimana dengan diameter yang relatif kecil fluida kerja dengan *surface tension* rendah mampu menghasilkan banyak gelembung. Hal tersebut terjadi karena *surface tension* berhubungan langsung dengan dinamika gelembung dan nukleasi. Akan tetapi, penurunan ukuran diameter akan meningkatkan gaya viskos, oleh karena itu penurunan diameter saluran yang terus menerus belum tentu menghasilkan kinerja termal yang lebih baik [9].

Pengaruh dari perubahan jumlah lekukan pada PHP memengaruhi dua aspek. Aspek yang pertama yaitu meningkatkan ketidakteraturan aliran internal sehingga mengurangi kemungkinan pemberhentian total pada aliran fluida. Aspek lainnya adalah kehilangan tekanan lokal pada lekukan *u-turn* tidak dapat diabaikan, hal tersebut mampu mengurangi perpindahan panas. Dari hasil studi, dengan heat flux yang sama, resistansi termal PHP dengan jumlah lekukan lebih sedikit lebih besar dibandingkan PHP dengan jumlah lekukan yang lebih banyak [13]. Dengan bertambahnya putaran, tekanan internal PHP berubah-ubah secara drastis. Meskipun jumlah lekukan berpengaruh dengan perpindahan panas di PHP, beberapa studi belum dapat menentukan jumlah lekukan yang optimal. Namun jumlah lekukan tidak boleh kurang dari tiga sehingga dapat mengoptimalkan proses start-up dan osilasi [6].

Penelitian akan variasi parameter fluida kerja dibagi menjadi empat kelompok yaitu fluida murni, surfaktan, nanofluida, dan campuran dua jenis fluida murni.

Informasi dari studi yang berhubungan dengan fluida kerja memberikan gambaran mengenai sifat termofisik dan efeknya yang terus berubah tergantung pada kondisi operasionalnya. Pemanfaatan surfaktan sebagai fluida kerja digunakan untuk mengurangi *surface tension* dimana hal tersebut berpengaruh terhadap pergerakan gelembung dan proses nukleasi. Selanjutnya studi mengenai nanofluida juga terus dikembangkan seperti penerapan nanofluida magnetik untuk meningkatkan performa pendinginan. Namun penambahan surfaktan dan nanofluida untuk meningkatkan sifat termofisik fluida memungkinkan terjadinya aglomerasi, peningkatan viskositas, dan penurunan masa operasional yang mampu menjadi permasalahan dalam penggunaan bahan aditif. Oleh karena itu, banyak peneliti yang berfokus pada penerapan campuran biner dari dua fluida murni untuk mendapatkan karakteristik positif dari masing-masing fluida [9].

Investigasi akan perubahan parameter fluida kerja menjadi perhatian utama peneliti dalam meningkatkan performa kerja CLPHP. Jenis dan *filling ratio* fluida kerja yang mempengaruhi sifat termofisika fluida menjadi parameter yang perlu dipertimbangkan.

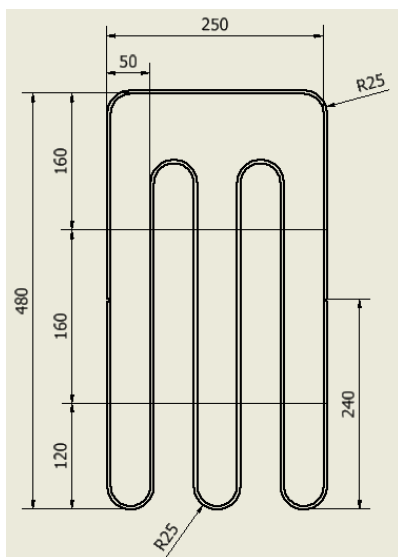
Fluida kerja dengan titik didih rendah dan nilai ( $dp/dT$ ) yang tinggi memiliki keunggulan dalam inisialisasi PHP yang cepat. Fluida kerja dengan panas spesifik dan panas laten yang tinggi dapat lebih banyak menyerap kalor dan secara efisien mentransfer panas ke sisi dingin. Berdasarkan Tabel 1., karena aseton murni memiliki titik didih yang lebih rendah dan nilai ( $dp/dT$ ) yang lebih tinggi hal tersebut dapat membantu mengaktifkan PHP dengan heat input yang relatif lebih rendah atau performa start-up yang lebih optimal. Sifat kalor spesifik dan kalor laten yang tinggi dari air murni memberikan karakteristik termodinamika yang menguntungkan untuk menyerap dan membawa energi secara efisien. Pada penelitian ini menggunakan aseton sebagai fluida kerjanya.

Tabel 1. Sifat termofisik air dan aseton saat temperatur 20°C (Zhu et al., 2014)

Properties	Air	Aseton
Titik Didih (°C)	100	56,2
Densitas ( $\text{g/cm}^3$ )	998	792
Kalor Spesifik ( $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )	4,18	2,35
Konduktivitas ( $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ )	0,599	0,170
Kalor Laten ( $\text{kJ/kg}$ )	2257	523
$(dp/dT)_{\text{sat}}$ ( $\text{Pa}/^\circ\text{C}$ )	$0,14 \times 10^{-3}$	$1,11 \times 10^{-3}$
Viskositas Dinamik (Pa.s)	$1,01 \times 10^{-6}$	$0,32 \times 10^{-6}$
Surface Tension (N/m)	$72,8 \times 10^{-3}$	$23,7 \times 10^{-3}$

## METODOLOGI

Desain dari rancangan CLPHP dipertimbangkan dari berbagai parameter diantaranya parameter geometri. Dimulai dari ukuran inner diameter yang perlu disesuaikan dengan diameter kritis dari fluida kerja agar fluida tersebut mampu bergerak karena adanya efek kapilaritas [6]. Berdasarkan persamaan (3), diameter kritis fluida kerja aseton sebesar 3,5 mm, sehingga inner diameter untuk desain CLPHP harus lebih kecil dari nilai tersebut agar fluida dapat terosilasi dengan baik. Oleh karena itu, inner diameter dan outter diameter CLPHP yang ditentukan yaitu 3 mm dan 4 mm. Secara dimensi keseluruhan, panjang masing-masing bagian baik evaporator, adiabatik, maupun kondenser secara berurutan yaitu 160 mm, 160 mm, dan 120 mm. Panjang bagian kondenser dipertimbangkan lebih panjang dari bagian evaporator untuk meningkatkan efektivitas kondensasi fluida [14]. Sedangkan panjang adiabatik dipertimbangkan tidak lebih kecil dibandingkan bagian lain agar sistem diharapkan dapat menerima nilai beban panas yang lebih tinggi [15]. Jumlah lekukan yang digunakan sebanyak 5 buah *u-turn* dimana 3 pada bagian evaporator dan 2 pada bagian kondenser, jarak antar pipa dirancang sebesar 50 mm. Panjang pipa CLPHP secara keseluruhan sepanjang 2725 mm. Dimensi lebih lengkap sesuai pada Gambar 2.

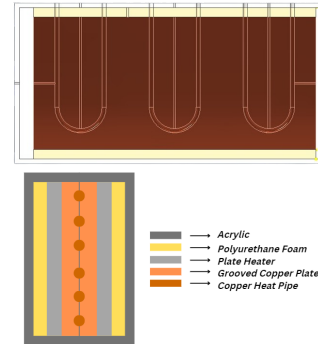


Gambar 2. Dimensi CLPHP

Penelitian ini menggunakan fluida kerja aseton dengan beberapa variasi *filling ratio* sebagai variabel penelitian. Variasi *filling ratio* yang digunakan yaitu 40%, 50%, 60%, 70%, dan 80%. Volume CLPHP secara keseluruhan sebesar 12 ml.

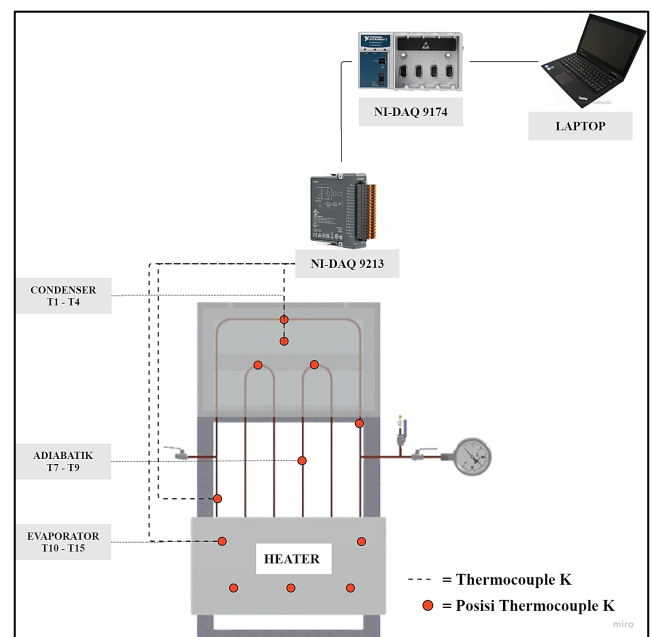
Sebagai representasi energi termal dari sinar matahari, eksperimen akan menggunakan *sandwich plate heater* sebagai solar simulator. Sandwich plate heater

dapat pada Gambar 3. *Sandwich plate heater* akan terhubung dengan sebuah Voltage Regulator untuk mengatur besaran panas yang akan dijadikan sebagai heat input pada eksperimen. Iradiansi matahari optimum pada Satellit GI Ciawi sebesar  $1.322 \text{ W/m}^2$  atau setara dengan 55 Watt akan dijadikan besar *heat input* pada eksperimen.



Gambar 3. Skema sandwich plate heater

Skema set-up eksperimen seperti dapat dilihat pada Gambar 4., dirancang secara vertikal atau dengan *inclination angle* sebesar  $90^\circ$ . Tangki kondenser akan terisi oleh air sebanyak 1,5 liter dengan suhu awal air sebesar  $28^\circ\text{C}$ . Penelitian ini akan fokus terhadap nilai resistansi termal sistem dan suhu yang mampu dicapai di dalam tangki kondenser, sehingga sebanyak 12 Thermocouple Type K sebagai alat ukur suhu dan ditempatkan pada beberapa titik yaitu pada permukaan bagian kondenser CLPHP (3), air di dalam tangki kondenser (1), bagian evaporator (5) dan bagian adiabatik (3) CLPHP.

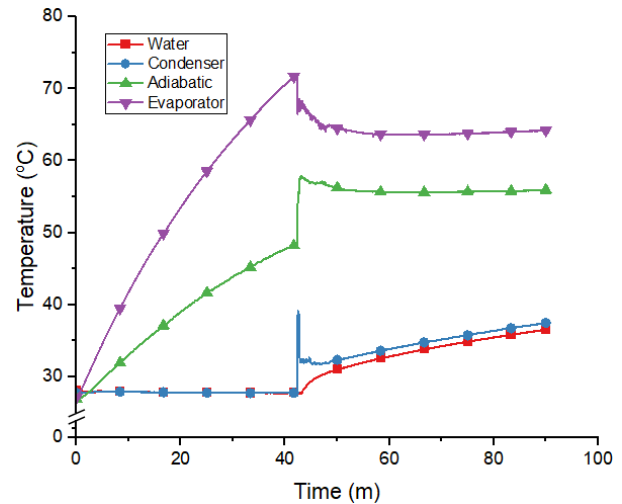


Gambar 4. Experimental set up Closed Loop Pulsating Heat Pipe

Suhu yang dibaca oleh termokopel akan diteruskan ke rangkaian data logger, yaitu NI-DAQ 9213 dan NI-DAQ 9174 National Instrument. Rangkaian data logger akan dihubungkan dengan laptop untuk pengambilan data dan akan ditampilkan melalui software LabVIEW di dalam laptop. Eksperimen akan dilangsungkan selama kurang lebih 90 menit untuk masing-masing variabel. Data yang didapatkan kemudian akan divisualisasikan melalui grafik menggunakan software ORIGIN, dan dilakukan proses analisis untuk mendapatkan kesimpulan eksperimen.

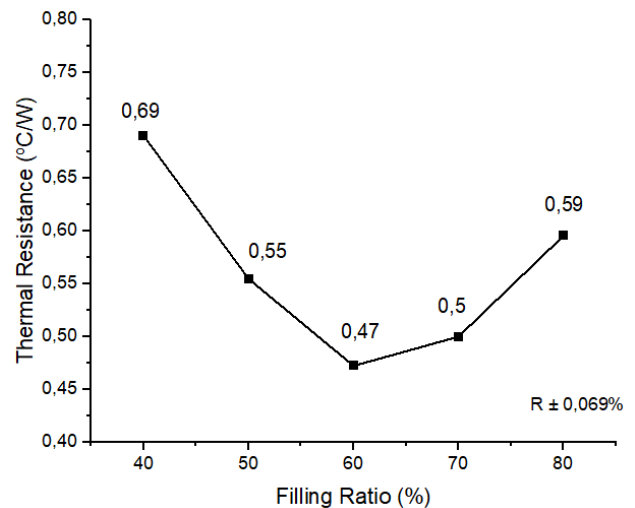
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil distribusi temperatur yang menggambarkan performa start-up dapat mengevaluasi bagaimana respons termal dan kinerja perpindahan panas yang terjadi pada sistem CLPHP pada beban panas tertentu. Secara garis besar, pada Gambar 5 memperlihatkan perubahan temperatur terhadap waktu. Pada menit awal eksperimen berjalan, temperatur evaporator naik sesuai dengan kalor yang diberikan oleh sistem pemanas dan diikuti oleh perubahan temperatur pada bagian adiabatik yang semakin tinggi disebabkan oleh konduksi yang terjadi pada pipa tembaga. Berdasarkan titik didih aseton pada tekanan vakum berada pada temperatur 45,4 °C, selanjutnya terjadi pergerakan uap yang mulai bergerak diindikasikan dengan perubahan temperatur yang semakin tinggi pada bagian adiabatik. Lalu saat temperatur dinding evaporator cukup tinggi, kalor yang diberikan mulai membuat sistem mengalami osilasi yang menyebabkan temperatur dinding pipa evaporator tidak mengalami kenaikan atau kenaikan yang sangat kecil pada beberapa kasus. Hal tersebut disebabkan vapor slug yang berhasil dipanaskan oleh bagian evaporator kemudian melepas kalor pada bagian kondenser dan terkondensasi kembali menjadi liquid, sehingga temperatur liquid slug yang masih berada pada kondisi subcooled bergerak kembali ke bawah dikarenakan gravitasi dan menyebabkan temperatur evaporator cenderung lebih stabil [16]. Selanjutnya siklus tersebut terus berlangsung dan terus beresilasi selama *heat input* terus diberikan.



Gambar 5. Profil distribusi temperatur CLPHP menggunakan aseton dengan variasi filling ratio 50%

Resistansi termal merupakan parameter yang dapat digunakan untuk mengevaluasi performa pada sistem CLPHP [9]. Nilai resistansi termal dari masing-masing eksperimen dapat dihitung menggunakan persamaan (1), dengan parameter yang memengaruhinya yaitu temperatur evaporator, temperatur kondenser, dan juga besar heat input. Resistansi termal dari setiap eksperimen didapatkan dari selisih antara temperatur evaporator dan temperatur kondenser saat sistem sudah dalam kondisi steady. Hasil pengolahan resistansi termal sesuai disajikan melalui grafik yang ditunjukkan pada Gambar 6.

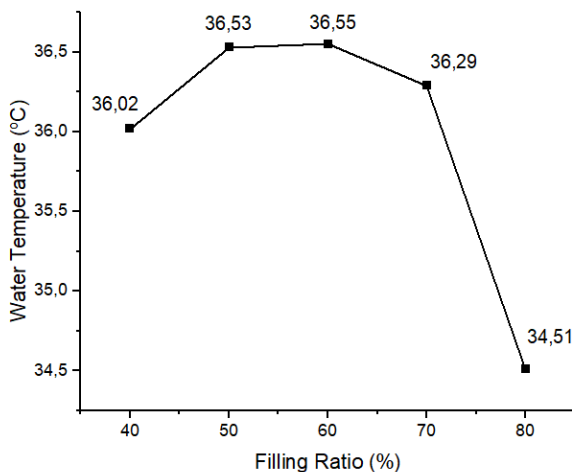


Gambar 6. Resistansi termal CLPHP dengan variasi filling ratio

Dalam mengevaluasi performa dari sistem CLPHP, semakin rendah nilai resistansi termal maka semakin baik kinerja dari sistem tersebut [17]. Berdasarkan Gambar 6. dapat disimpulkan bahwa variasi filling ratio yang paling optimal yaitu pada filling ratio 60% dan 70% dengan resistansi termal sebesar 0,47 °C/W dan 0,5 °C/W, sedangkan variasi filling ratio dengan performa terburuk dibandingkan dengan variasi

lainnya atau resistansi termal tertinggi yaitu pada filling ratio 40%. Pada Gambar 6., terlihat kecenderungan pola filling ratio terhadap resistansi termal yang tergambar tidak berbentuk linear. Terdapat beberapa alasan mengapa filling ratio 60% memiliki resistansi termal paling rendah. Hal tersebut disebabkan oleh pengaplikasian filling ratio atau volume fluida kerja rendah memungkinkan terjadinya kekurangan kondensat dalam menerima panas secara keseluruhan sehingga perubahan fasa kondensat yang semakin cepat menyebabkan temperatur evaporator terus meningkat. Oleh karena itu selisih antara temperatur evaporator dan kondenser semakin meningkat menyebabkan resistansi termal yang semakin tinggi. Begitu pula sebaliknya dengan menerapkan filling ratio yang tinggi, semakin tinggi volume fluida kerja maka semakin tinggi juga “pumping power” yang dibutuhkan fluida untuk bersilasi. Hal tersebut menyebabkan thermal driving force yang rendah pada fluida kerja sehingga liquid slug sulit untuk berubah fasa menjadi vapor plug dan waktu start-up akan menjadi lebih lama [18].

Dalam pengimplementasiannya sebagai *solar water heater*, pencapaian utama dari sistem ini yaitu mendapatkan temperatur air hangat yang ideal digunakan untuk kebutuhan rumah tangga. Sistem pemanasan air pada eksperimen ini yaitu dengan menerapkan sistem kondenser statis tanpa adanya sirkulasi masuk keluar air pada tangki kondenser. Gambar 6. menunjukkan grafik korelasi antara ketercapaian suhu air pada kondenser dengan kapasitas 1,5 liter dalam waktu 90 menit terhadap filling ratio. Pada grafik tersebut, filling ratio 60% berhasil mendapatkan temperatur air tertinggi dibandingkan yang lainnya yaitu mencapai 36,55 °C, sedangkan filling ratio 80% mendapatkan temperatur terendah yaitu 34,51°C.



Gambar 6. Temperatur air pada kondenser yang tercapai dengan variasi filling ratio

Ketercapaian temperatur air pada kondenser pada umumnya berbanding lurus dengan resistansi termal pada masing-masing filling ratio, hal tersebut disebabkan temperatur pipa kondenser yang tinggi maka akan melepaskan kalor ke air lebih tinggi pula. Namun pernyataan tersebut kurang tepat dikarenakan pada eksperimen kali ini tidak sesuai dimana temperatur yang dicapai air pada filling ratio 70% lebih rendah dibandingkan dengan filling ratio 50% sedangkan resistansi termal atau performa sistem pada filling ratio 70% lebih baik dibandingkan 50%, begitu juga dengan filling ratio 40% dan 80%. Hal tersebut disebabkan faktor lain seperti temperatur evaporator dan juga waktu yang berbeda untuk mencapai kondisi steady. Pernyataan tersebut dibuktikan oleh temperatur evaporator saat kondisi steady pada filling ratio 40% mencapai 71°C, lebih tinggi dibandingkan filling ratio 80% yang hanya mencapai 64 °C. Begitu pula dengan waktu yang cukup singkat yaitu hanya 20 menit pada filling ratio 70% untuk memanaskan air dikarenakan waktu mencapai kondisi steady lebih lama jika dibandingkan filling ratio 50%.

## KESIMPULAN

Dari hasil eksperimen pemanfaatan *Closed Loop Pulsating Heat Pipe (CLPHP)* untuk konservasi energi pada gedung dan sebagai *solar water heater*, didapatkan beberapa kesimpulan :

Sistem CLPHP berada pada performa paling optimal ketika menggunakan filling ratio 60% dengan resistansi termal paling rendah yaitu 0,47 °C/W dan berhasil start-up pada menit ke-47. Sedangkan performa terendah ketika menggunakan filling ratio 40% dikarenakan volume fluida yang terlalu sedikit sehingga tidak mampu mendinginkan dinding pipa evaporator yang menyebabkan perbedaan temperatur evaporator dan kondenser semakin signifikan.

Waktu yang dibutuhkan air pada tangki kondenser untuk mencapai temperatur yang diinginkan tidak hanya tergantung pada resistansi termal dari sistem CLPHP, melainkan juga dipengaruhi oleh waktu sistem mencapai kondisi steady dan temperatur evaporator hingga menit terakhir. Pada eksperimen ini, temperatur yang berhasil dicapai 1,5 liter air dalam waktu 90 menit paling tinggi pada filling ratio 60% mencapai suhu 36,55 °C dan terendah pada filling ratio 80% mencapai suhu 34,51°C.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] L.H. Saw. (2021). Development of the closed loop pulsating heat pipe cool roof . Case Studies in Thermal Engineering

- [2] Marco Marengo, V. S. (2023). Pulsating Heat Pipes: Experimental Analysis, Design and Applications.
- [3] Rittidech, S. (2009). Experimental study of the performance of a circular tube solar collector with closed-loop oscillating heat ouoe with check valve. *Renewable Energy*.
- [4] Khandekar. (2003). On The Definition of Pulsating Heat Pipe: an Overview. Minsk International Seminar
- [5] Suresh, J. V., Bhramara, P., & Nagasri, K. (2020). Effect of Pure and Binary Fluids on Thermal Performance of Closed Loop Pulsating Heat Pipe. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(3), 1716–1721. <https://doi.org/10.35940/ijeat.C5612.029320>
- [6] Xu, Y., Xue, Y., Qi, H., & Cai, W. (2021). An updated review on working fluids, operation mechanisms, and applications of pulsating heat pipes. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 144). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110995>.
- [7] Pradeep, G. V., & Rama Narasimha, K. (2018). Experimental investigations on the thermal performance of a vertical closed loop pulsating heat pipe using binary mixture of fluids. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 31(5), 805–811. <https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.05b.16>
- [8] Pachghare, P. R., & Mahalle, A. M. (2013). Effect of pure and binary fluids on closed loop pulsating heat pipe thermal performance. *Procedia Engineering*, 51, 624–629. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.088>
- [9] Markal, B., & Varol, R. (2020). Thermal investigation and flow pattern analysis of a closed-loop pulsating heat pipe with binary mixtures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(10). <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02618-6>
- [10] Chien, K.-H., Lin, Y.-T., Chen, Y.-R., Yang, K.-S., & Wang, C.-C. (2012). A novel design of pulsating heat pipe with fewer turns applicable to all orientations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(21–22), 5722–5728. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.068>
- [11] Jang, D. S., Lee, J. S., Ahn, J. H., Kim, D., & Kim, Y. (2017). Flow patterns and heat transfer characteristics of flat plate pulsating heat pipes with various asymmetric and aspect ratios of the channels. *Applied Thermal Engineering*, 114, 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.189>
- [12] Takawale, A., Abraham, S., Sielaff, A., Mahapatra, P. S., Pattamatta, A., & Stephan, P. (2019). A comparative study of flow regimes and thermal performance between flat plate pulsating heat pipe and capillary tube pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 149, 613–624. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.119>
- [13] Sun, X., Li, S., Jiao, B., Gan, Z., Pfothauer, J., Wang, B., Zhao, Q., & Liu, D. (2020). Experimental study on hydrogen pulsating heat pipes under different number of turns. *Cryogenics*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.10.3174>
- [14] Bastakoti, D., Zhang, H., Li, D., Cai, W., & Li, F. (2018). An overview on the developing trend of pulsating heat pipe and its performance. *Applied Thermal Engineering*, 141, 305–332. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.121>
- [15] Czajkowski, C., Nowak, A. I., Błasiak, P., Ochman, A., & Pietrowicz, S. (2020). Experimental study on a large scale pulsating heat pipe operating at high heat loads, different adiabatic lengths and various filling ratios of acetone, ethanol, and water. *Applied Thermal Engineering*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114534>
- [16] Adi Winarta. (2018). Studi eksperimental pengembangan oscillating heat pipe sebagai aplikasi pendingin fluks kalor tinggi disertasi
- [17] Babu, E. R., & Gnanendra Reddy, G. V. (2016). Effect of working fluid and filling ratio on performance of a closed loop pulsating heat pipe. In *Article in Journal of Engineering Science and Technology* (Vol. 11, Issue 6). <https://www.researchgate.net/publication/304890936>

- [18] Wang, W. W., Zhang, H. L., Song, Y. J., Song, J. W., Shi, D. K., Zhao, F. Y., & Cai, Y. (2022). Fluid flow and thermal performance of the pulsating heat pipes facilitated with solar collectors: Experiments, theories and GABPNN machine learning. *Renewable Energy*, 200, 1533–1547. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.062>
- [19] Raden Muhammad Rafi Jati Kusumo, "Konservasi Energi Gedung Menggunakan Closed Loop Pulsating Heat Pipe sebagai Solar Water Heater dengan Fluida Kerja Acetone", Skripsi 2024.
- [20] Arifa Shelina Adjani, "Konservasi Energi Gedung Menggunakan Closed Loop Pulsating Heat Pipe sebagai Solar Water Heater dengan Fluida Kerja De-Ionized (DI) Water De-Ionized (DI) Water", Skripsi 2024
- [21] Salsabila, R. (2022). Kinerja Closed-Loop Pulsating Heat Pipe dengan Fluida Kerja Air-Etanol pada Heat Gain Atap Bangunan. Universitas Indonesia