

PERHITUNGAN WAKTU PEMANASAN AIR DALAM BAK UNTUK EKSPERIMEN LOOP HEAT PIPE

Arya Kondana¹, Khoiri Rozi¹, Mukhsinun Hadi Kusuma^{2*}, Afifa Pramesywar¹

¹Departemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275

²Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, Organisasi Riset Tenaga Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Kawasan Sains Terpadu B.J. Habibie Serpong, Tangerang Selatan, 15314, Indonesia

*E-mail: mhad001@brin.go.id

Abstrak

Pemanasan air dalam bak eksperimen merupakan tahap awal penting dalam pengujian *Loop Heat Pipe* (LHP), karena suhu awal air memengaruhi kestabilan termal sistem. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung dan membandingkan waktu pemanasan air secara teoritis dan eksperimen, dengan pendekatan konservasi energi dan pengukuran aktual menggunakan sistem pemanas 18.000 W. Air dipanaskan dari suhu 27°C hingga 65°C dalam bak berdimensi 135×63×52 cm dengan volume air 40 cm. Hasil perhitungan menunjukkan waktu teoritis sebesar 50.10 menit, sedangkan hasil eksperimen menunjukkan waktu aktual 43.63 menit. Perbedaan ini mengindikasikan efisiensi termal sistem pemanas yang lebih tinggi dalam kondisi nyata, dipengaruhi oleh isolasi termal, distribusi panas yang merata, dan minimnya kehilangan energi ke lingkungan. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan eksperimental lebih representatif dalam menggambarkan performa sistem pemanas untuk eksperimen LHP.

Kata kunci: efisiensi termal; eksperimen lhp; konservasi energi; pemanasan air; waktu pemanasan

Abstract

Water heating in the experimental tank is a critical initial stage in Loop Heat Pipe (LHP) testing, as the initial water temperature affects the system's thermal stability. This study aims to calculate and compare the theoretical and experimental heating time using an energy conservation approach and actual measurements with an 18,000 W heating system. Water was heated from 27°C to 65°C in a tank measuring 135×63×52 cm with a water height of 40 cm. The theoretical calculation yielded a heating time of 50.10 minutes, while the experimental result showed a shorter duration of 43.63 minutes. This discrepancy indicates higher thermal efficiency under real conditions, influenced by thermal insulation, uniform heat distribution, and minimal energy loss to the surroundings. These findings suggest that the experimental approach provides a more representative depiction of heating system performance for experiment LHP applications.

Keywords: energy conservation; heating time; lhp experiment; thermal efficiency; water heating

1. Pendahuluan

Pemanasan air dalam sistem eksperimen termal merupakan tahap awal yang krusial untuk memastikan kondisi awal sesuai dengan kebutuhan operasional perangkat. Dalam eksperimen yang melibatkan sirkulasi fluida secara pasif, seperti sistem berbasis kapilaritas dan konduksi, suhu awal air berperan sebagai pemicu kestabilan termal. Proses pemanasan ini bergantung pada massa fluida, kapasitas kalor jenis, dan daya pemanas yang digunakan [1]. Distribusi temperatur yang seragam dalam fluida sangat dipengaruhi oleh konfigurasi pemanas dan geometri wadah. Penggunaan sistem dengan dua input panas, desain elemen pemanas yang optimal, dan distribusi aliran yang seragam adalah beberapa strategi yang dapat meningkatkan efisiensi pemanasan dalam sistem terbuka [2].

Estimasi pemanasan air secara teoritis dilakukan melalui pendekatan konservasi energi, dengan menganggap bahwa seluruh energi listrik yang disuplai oleh elemen pemanas dikonversi secara penuh menjadi energi panas dalam medium fluida. Proses ini melibatkan pengembangan model matematis yang memanfaatkan parameter termofisika air serta besaran daya input untuk memprediksi waktu yang dibutuhkan hingga suhu target tercapai [3]. Dalam eksperimen *Loop Heat Pipe*, suhu air dalam bak pemanas digunakan untuk mengatur suhu lingkungan sekitar evaporator, sehingga waktu pemanasan harus dikalkulasi secara presisi agar sistem mencapai titik kerja tanpa keterlambatan. Bulnes dkk. menunjukkan bahwa simulasi pemanasan air dapat dilakukan secara efisien dengan model dinamik yang mempertimbangkan stratifikasi temperatur [4]. Penelitian oleh Abdelsalam dkk. juga mengembangkan model kontrol termal tangki air dengan heat exchanger terendam, yang relevan untuk sistem LHP berbasis pemanasan awal [5].

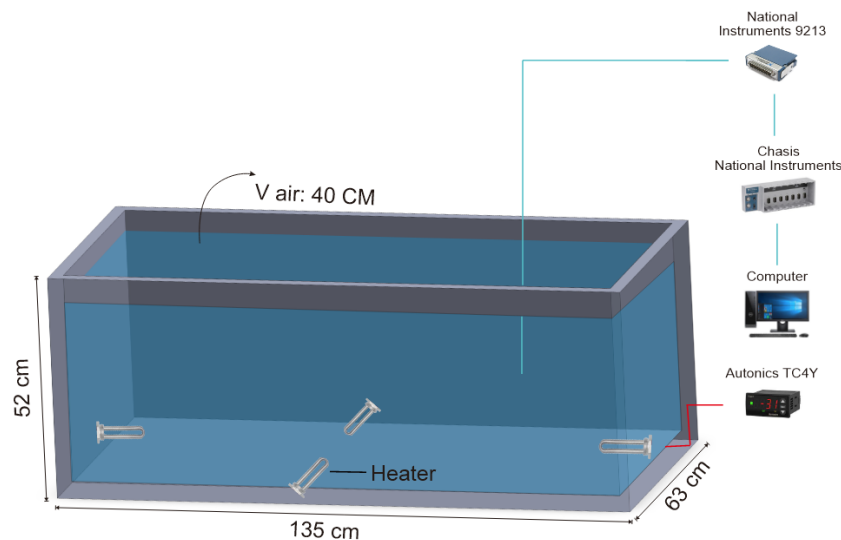
Geometri bak dan konfigurasi elemen pemanas turut memengaruhi distribusi energi dan efisiensi pemanasan. Penempatan heater yang optimal dapat mempercepat pencapaian suhu target dan mengurangi gradien temperatur yang tidak diinginkan. Wang dkk. menunjukkan bahwa variasi posisi pemanas dalam wadah fluida berdampak signifikan terhadap waktu pemanasan dan kestabilan suhu [6]. Penelitian oleh Lazzaretto et al. menambahkan bahwa efisiensi sistem pemanas dapat ditingkatkan melalui optimasi geometri dan kontrol daya input [7]. Pengembangan ini digunakan simulasi numerik 3D untuk stratifikasi temperatur dalam tangki air, yang dapat digunakan untuk memprediksi distribusi panas dalam bak eksperimen LHP[8].

Efisiensi aktual dari elemen pemanas perlu diperhitungkan dalam analisis waktu pemanasan, mengingat adanya potensi kehilangan energi melalui konduksi ke dinding dan radiasi ke lingkungan. Hassan et al. (2021) melaporkan bahwa efisiensi pemanas listrik dalam sistem eksperimen berkisar antara 70% hingga 95%, tergantung pada desain dan kondisi operasi. Analisis energi dan eksergi pada sistem pemanas air domestik dengan penyimpanan termal, menunjukkan bahwa efisiensi energi dapat mencapai 96% namun efisiensi eksergi hanya 60% karena adanya irreversibilitas [9]. Selain itu, dokumen teknis dari Departemen Energi Inggris menyajikan metodologi perhitungan kebutuhan energi untuk pemanasan air domestik, yang dapat diadaptasi untuk eksperimen laboratorium [10].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi waktu pemanasan air dalam bak eksperimen yang digunakan sebagai sistem pendukung awal pada pengujian LHP. Dengan fokus utama pada perbandingan antara hasil perhitungan teoritis berdasarkan pendekatan konservasi energi dan hasil eksperimen yang diperoleh melalui proses pemanasan.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian yang dilakukan oleh Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir (PRTRN), Badan Riset dan Inovasi Nasional BRIN sebagai bagian dari upaya pengembangan penelitian terkait sistem pendingin pasif berbasis LHP. Dalam teori ini menunjukkan model uji yang digunakan untuk perhitungan waktu air dalam bak untuk eksperimen pada LHP. Gambar 1 menampilkan model uji bak air pada eksperimen untuk LHP.



Gambar 1. Model uji bak air pada eksperimen

Gambar 1 bak air memiliki dimensi 135 cm (panjang), 63 cm (lebar), dan 52 cm (tinggi), dengan tinggi volume air 40 cm untuk memberikan ruang udara di bagian atas sebagai zona ekspansi termal. Pemanasan dilakukan dengan menggunakan heater dengan total daya 18.000 W, dipasang pada 4 sisi bagian bak untuk memastikan distribusi panas berlangsung secara konduktif dan konvektif. Air dipanaskan dari temperatur 27°C hingga temperatur 65°C.

Sensor suhu yang digunakan dalam sistem ini adalah termokopel tipe K, yang terhubung ke modul akuisisi data National Instruments 9213. Termokopel ini dipasang di beberapa titik yang merendam di air bak untuk memantau distribusi suhu secara real-time. Modul NI 9213 mendukung hingga 16 kanal input termokopel dengan resolusi tinggi dan kompensasi cold junction internal, sehingga memungkinkan pencatatan suhu yang akurat dan stabil selama eksperimen berlangsung.

Untuk menjaga kestabilan suhu selama proses pemanasan, digunakan Autonics TC4Y sebagai kontroler suhu digital. Alat ini mengatur kerja heater berdasarkan input suhu aktual dan target, dengan mode kontrol yang dapat disesuaikan (*on-off* atau PID). Kombinasi antara sistem pemanas, kontrol suhu, dan akuisisi data ini memungkinkan analisis termal yang akurat, serta validasi terhadap model teoritis perpindahan panas dan efisiensi sistem LHP.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Teori Perhitungan Waktu

Perhitungan waktu pemanasan air dalam bak eksperimen dilakukan berdasarkan prinsip konservasi energi, dengan menggunakan energi listrik yang diberikan ke heater yang sepenuhnya digunakan untuk menaikkan suhu air. Proses ini dilakukan untuk eksperimen pada LHP. Waktu yang dibutuhkan untuk memanaskan air dari suhu awal 27°C hingga suhu akhir 65°C dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini.

$$t = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{Q}$$

Nilai perhitungan waktu air dalam bak untuk LHP memiliki parameter seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1. Nilai Perhitungan Waktu

Parameter	Keterangan
Massa air kg ($P \times L \times T_{air}$)	135 x 63 x 40 = 340,20 kg
Kapasitas jenis kalor air	4186 J/kg°C
Perubahan suhu air	65°C – 27°C = 38°C
Daya pemanas	18.000 Watt

Perhitungan waktu air dalam bak

$$t = \frac{340,20 \times 4186 \times 38}{18.000}$$

$$t = \frac{54114933,6}{18.000}$$

$$t = 3006,3852 \text{ detik}$$

Nilai hasil perhitungan waktu pemanasan air kemudian dikonversi ke satuan menit untuk memudahkan interpretasi yang dapat dilihat perhitungan dibawah ini.

$$t = \frac{3006,3852}{60 \text{ menit}}$$

$$t = 50.10642 \text{ menit}$$

Demikian waktu teoritis yang dibutuhkan untuk memanaskan air dari suhu awal 27°C hingga suhu akhir 65°C adalah selama 50.10 menit. Kemudian waktu pemanasan teoritis dan hasil eksperimen ditampilkan pada Tabel 2 berikut untuk menunjukkan perbandingan antara hasil perhitungan dan kondisi aktual.

Tabel 2. Perbandingan waktu teoritis dan waktu eksperimen

Waktu Teoritis	Waktu Eksperimen
50.10 menit	43.63 menit

Tabel 2 menunjukkan bahwa waktu pemanasan air secara eksperimen (43,63 menit) lebih singkat dibandingkan hasil perhitungan teoritis (50,10 menit). Perbedaan ini mencerminkan bahwa proses aktual memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan asumsi ideal dalam perhitungan. Secara teoritis, estimasi waktu pemanasan didasarkan pada asumsi bahwa seluruh volume air mengalami kenaikan suhu secara seragam dan merata, tanpa mempertimbangkan dinamika perpindahan panas aktual seperti konveksi internal, distribusi suhu lokal, maupun pengaruh lingkungan sekitar.

Salah satu faktor utama yang menyebabkan waktu eksperimen lebih singkat adalah penggunaan isolasi termal pada bak air. Isolasi ini berfungsi mengurangi kehilangan panas ke lingkungan, sehingga energi dari pemanas lebih efektif diserap oleh air. Selain itu, distribusi panas yang lebih merata akibat konveksi alami dalam bak turut mempercepat pencapaian suhu target. Oleh karena itu, hasil eksperimen menunjukkan bahwa kondisi aktual sistem pemanas dapat menghasilkan waktu pemanasan yang lebih efisien dibandingkan prediksi teoritis berbasis asumsi ideal.

4. Kesimpulan

Waktu pemanasan air dari suhu awal 27°C hingga 65°C secara teoritis adalah 50.10 menit, sedangkan hasil eksperimen menunjukkan waktu aktual sebesar 43,63 menit. Perbedaan ini menunjukkan bahwa sistem pemanas bekerja lebih efisien dalam kondisi nyata pada eksperimen dibandingkan dengan asumsi teoritis, efisiensi hasil tersebut dipengaruhi karena adanya isolasi termal pada bak eksperimen, distribusi panas yang lebih merata, serta minimnya kehilangan energi panas ke lingkungan. Hasil ini dapat dilihat bahwa pendekatan eksperimental lebih mencerminkan performa sistem pemanas secara aktual dan dapat menjadi acuan yang lebih representatif dalam analisis termal *Loop Heat Pipe*.

5. Daftar Pustaka

- [1] S. Abidin *et al.*, “Experimental Study on Natural Circulation flow Based on Temperature Variation Heating Tank Section in FASSIP-03 NT Loop,” in *AIP Conference Proceedings*, 2024. doi: 10.1063/5.0229076.
- [2] J. Wang *et al.*, “Investigation Of Fluid Dynamics in the Case of Two Higher-Temperature Fluid Inputs to Effectively Heat the Vessels,” *Chem Eng Trans*, vol. 114, pp. 271–276, 2024, doi: 10.3303/CET24114046.
- [3] R. Hovsapien, F. G. Dias, J. V. C. Vargas, T. S. Sensoy, and J. C. Ordonez, “Experimental adjustment and validation of a generalized solar-assisted cogeneration system model,” *Int J Energy Res*, vol. 43, no. 10, pp. 5319–5332, 2019, doi: 10.1002/er.4590.
- [4] F. K. Bulnes, K. R. Gluesenkamp, and J. Rendall, “Comparison of plug flow and multi-node stratified tank modeling approaches regarding computational efficiency and accuracy,” in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2020. doi: 10.1115/IMECE2020-23369.
- [5] M. Y. Abdelsalam, M. F. Lightstone, and J. S. Cotton, “A novel approach for modelling thermal energy storage with phase change materials and immersed coil heat exchangers,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 136, pp. 20–33, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.047.
- [6] Z. Wang, H. Zhang, B. Dou, G. Zhang, and W. Wu, “Influence of inlet structure on thermal stratification in a heat storage tank with PCMs: CFD and experimental study,” *Appl Therm Eng*, vol. 162, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114151.
- [7] A. Lazzaretto and A. Toffolo, “A method to separate the problem of heat transfer interactions in the synthesis of thermal systems,” *Energy*, vol. 33, no. 2, pp. 163–170, 2008, doi: 10.1016/j.energy.2007.07.015.
- [8] L. Kong, W. Yuan, and N. Zhu, “CFD Simulations of Thermal Stratification Heat Storage Water Tank with an Inside Cylinder with Openings,” in *Procedia Engineering*, 2016, pp. 394–399. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.419.
- [9] H. Zhao, N. Yan, Z. Xing, L. Chen, and L. Jiang, “Thermal calculation and experimental investigation of electric heating and solid thermal storage system,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 20, Oct. 2020, doi: 10.3390/en13205241.
- [10] “Calculating water heating energy demand within the Home Energy Model A technical explanation of the methodology,” 2023.