

Investigasi Laju Penyerapan Kalor Tangki Pendingin dalam Untai Sirkulasi Alami Rektangular Atap-U dengan Variasi Temperatur Operasi Pemanas

Investigation of Heat Removal Rate of Cooling Tank in Natural Circulation U-Top Rectangular Loop under varied heater operating temperatures

Nabra Irawan¹, Roy Waluyo^{1*}, Dwi Yuliaji¹, Putut Hery Setiawan³, Sunandi Kharisma², Shendy Akbar Maryadi², Mulya Juarsa³

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Ibn Khaldun Bogor, Jl. KH. Sholeh Iskandar KM.2, Kedungbadak, Kec. Tanah Sereal, Kota Bogor, Jawa Barat 16162, Indonesia

² Departmen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jalan Grafika No.2, Yogyakarta 55281, Indonesia

³ Kelompok Riset Sistem Termofluida Reaktor Nuklir (NRTFSys), Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), KST B.J. Habibie, Setu, Tangerang Selatan Banten 15314, Indonesia

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi laju penyerapan kalor pada water cooling tank (WCT) dalam sebuah untai sirkulasi alami rektangular dengan konfigurasi atap-U pada berbagai temperatur operasi pemanas. Variasi temperatur Water Heater Tank (WHT) yang digunakan adalah 35°C, 45°C, 55°C, dan 66°C. Pengukuran dilakukan pada aliran untai rektangular yang melewati komponen pemanas dan pendingin, sedangkan karakteristik termofisik fluida ditentukan sebagai fungsi temperatur. Parameter utama yang dianalisis meliputi laju penyerapan kalor oleh WCT ($\dot{q}_C$), laju pelepasan kalor oleh WHT ($\dot{q}_H$), rugi kalor sepanjang hot-leg ($\dot{q}_{hl}$), dan efektivitas perpindahan kalor (ϵ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi temperatur operasi pemanas mempengaruhi besarnya gaya penggerak sirkulasi alami, sehingga semakin tinggi temperatur pada WHT maka laju perpindahan kalor yang diserap WCT semakin meningkat. Laju penyerapan kalor meningkat dari 166,47 W pada 35°C menjadi 463,31 W pada 66°C. Namun demikian, peningkatan temperatur juga menaikkan rugi kalor sepanjang loop yang menyebabkan efektivitas WCT menurun dari 0,98 menjadi 0,86. Analisis ini menegaskan bahwa perbedaan temperatur antara WHT dan WCT merupakan penentu utama besar kecilnya aliran sirkulasi alami dan kinerja perpindahan kalor sistem. Temuan ini memberikan gambaran jelas mengenai hubungan temperatur operasi, perilaku aliran, dan performa pendinginan pasif pada konfigurasi sirkulasi alami rektangular atap-U.

Kata kunci: Sirkulasi alami; Laju penyerapan kalor; Water cooling tank; Efektivitas perpindahan kalor.

Abstract. This study aims to investigate the heat absorption rate of the water cooling tank (WCT) in a U-top rectangular natural circulation loop under various heater operating temperatures. The Water Heating Tank (WHT) was operated at four temperature setpoints: 35°C, 45°C, 55°C, and 66°C. Measurements were performed on the rectangular loop traversing both heating and cooling sections, while the thermophysical properties of the working fluid were evaluated as temperature dependent functions. The key parameters analyzed include the heat removed by the WCT ($\dot{q}_C$), the heat released by the WHT ($\dot{q}_H$), the heat loss along the hot-leg ($\dot{q}_{hl}$), and the overall heat-transfer effectiveness (ϵ). The results show that increasing the heater operating temperature strengthens the buoyancy-driven flow, which in turn

* Penulis korespondensi: roy.waluyo@uika-bogor.ac.id

enhances the heat transfer rate to the WCT. The heat removal rate rises significantly from 166.47 W at 35°C to 463.31 W at 66°C. However, higher operating temperatures also intensify thermal losses along the loop, leading to a reduction in effectiveness from 0.98 to 0.86. These findings confirm that the temperature difference between the WHT and WCT is the dominant factor governing the magnitude of natural circulation flow as well as the thermal performance of the cooling process. Overall, this study provides a clear and quantitative understanding of how heater temperature influences flow behavior and passive cooling performance in a U-top rectangular natural circulation loop.

Keywords: Natural circulation; Heat removal rate; Water cooling tank; Heat transfer effectiveness.

1. Pendahuluan

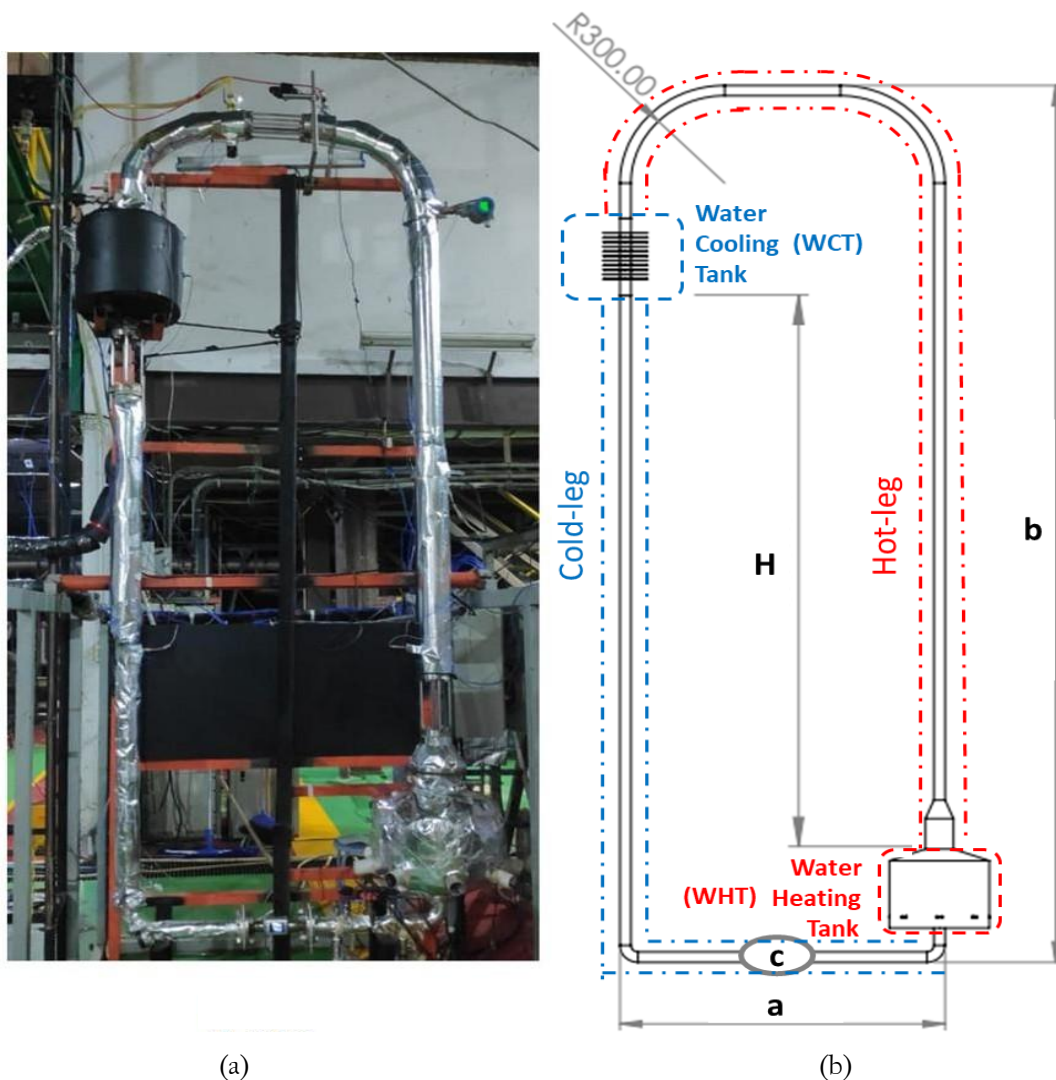
Sistem pendinginan pasif berbasis sirkulasi alami merupakan salah satu mekanisme transport panas yang banyak digunakan pada berbagai aplikasi termal, mulai dari sistem penukar kalor berskala laboratorium, sistem pendingin reaktor, hingga perangkat elektronik berdaya tinggi [1,2]. Keunggulan utama metode ini terletak pada kemampuannya mengalirkan fluida tanpa bantuan pompa, melainkan mengandalkan gaya apung (*buoyancy force*) yang timbul akibat perbedaan temperatur. Oleh karena itu, kinerja sistem sangat dipengaruhi oleh distribusi temperatur, rugi panas sepanjang jalur aliran, serta karakteristik termofisik fluida kerja [3,4]. Pemahaman mendalam mengenai keterkaitan parameter-parameter tersebut menjadi kunci dalam meningkatkan performa perpindahan kalor dan stabilitas operasi. Dalam konfigurasi sirkulasi alami berbentuk loop, interaksi antara komponen pemanas, komponen pendingin, dan karakteristik geometrik menentukan besarnya laju aliran dan kapasitas penyerapan kalor [5–8]. Water Cooling Tank (WCT) sebagai komponen pelepas kalor memegang peranan penting dalam mempertahankan kestabilan temperatur sistem. Namun demikian, berbagai penelitian menunjukkan bahwa perubahan temperatur operasi pemanas dapat mempengaruhi efektivitas pendinginan melalui dua mekanisme utama: peningkatan gaya apung yang mendorong laju aliran, dan peningkatan rugi kalor sepanjang jalur panas (*hot-leg*) yang menurunkan kemampuan relatif WCT dalam menyerap energi [9,10]. Hal ini menjadikan studi terhadap hubungan temperatur pemanas, perilaku aliran, dan efektivitas perpindahan kalor sebagai aspek penting dalam perancangan dan optimasi sistem pendinginan pasif.

Meskipun sejumlah penelitian sebelumnya telah mengkaji karakteristik sirkulasi alami pada berbagai konfigurasi loop, kajian mengenai pengaruh temperatur operasi pemanas pada konfigurasi rektanguler atap-U khususnya terhadap performa WCT masih terbatas. Perubahan temperatur pemanas tidak hanya mempengaruhi gaya penggerak aliran, tetapi juga memodifikasi sifat termofisik fluida seperti densitas, viskositas, dan kapasitas panas, yang semuanya berkontribusi pada dinamika perpindahan kalor [11,12]. Kesenjangan pengetahuan ini mendorong perlunya penelitian terukur untuk mengetahui bagaimana variasi temperatur pemanas mengubah laju aliran, laju penyerapan kalor, rugi kalor pada *hot-leg*, serta efektivitas WCT sebagai komponen pendingin. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh variasi temperatur Water Heater Tank (WHT) terhadap karakteristik termal dan hidrodinamik pada sistem sirkulasi alami rektanguler dengan konfigurasi atap-U. Analisis difokuskan pada laju penyerapan kalor oleh WCT, laju pelepasan kalor oleh pemanas, rugi kalor sepanjang *hot-leg*, serta efektivitas perpindahan kalor. Melalui pemetaan hubungan antara temperatur operasi dan respons termal sistem, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai batas performa pendinginan pasif serta menjadi acuan bagi pengembangan dan optimasi desain WCT maupun sistem loop termal pada berbagai aplikasi di masa mendatang.

2. Metode

2.1 Deskripsi fasilitas eksperimen

Fasilitas eksperimen untai rektanguler dengan bagian atas berbentuk U diilustrasikan pada Gambar 1. Fasilitas ini dinamai FASSIP-06 Ver.04 U-top Rectangular Loop yang merupakan fasilitas penelitian mengenai aliran sirkulasi alami fase tunggal eksperimental dengan radius elbow yang besar pada bagian atas. Terdapat komponen pemanas yang disebut dengan water heating tank (WHT) dan komponen pendingin yaitu Water Cooling Tank (WCT) yang saling terhubung dengan sistem perpipaan 1 inch. Dalam WHT terdapat delapan pemanas imersi dengan sistem pemanasan secara langsung untuk menaikkan temperatur fluida, sedangkan dalam WCT terdapat pipa penukar kalor tipe fin berjumlah sebelas fin dengan sistem pendingin aliran berlawanan arah untuk menurunkan temperatur fluida. Perubahan temperatur antara WHT dan WCT menghasilkan gradien densitas yang menimbulkan aliran sirkulasi alami. Orientasi pemanas dan pendingin mengikuti konfigurasi VHVC (*Vertical Heater Vertical Cooler*) dengan dimensi geometris yang dirangkum dalam Tabel 1.



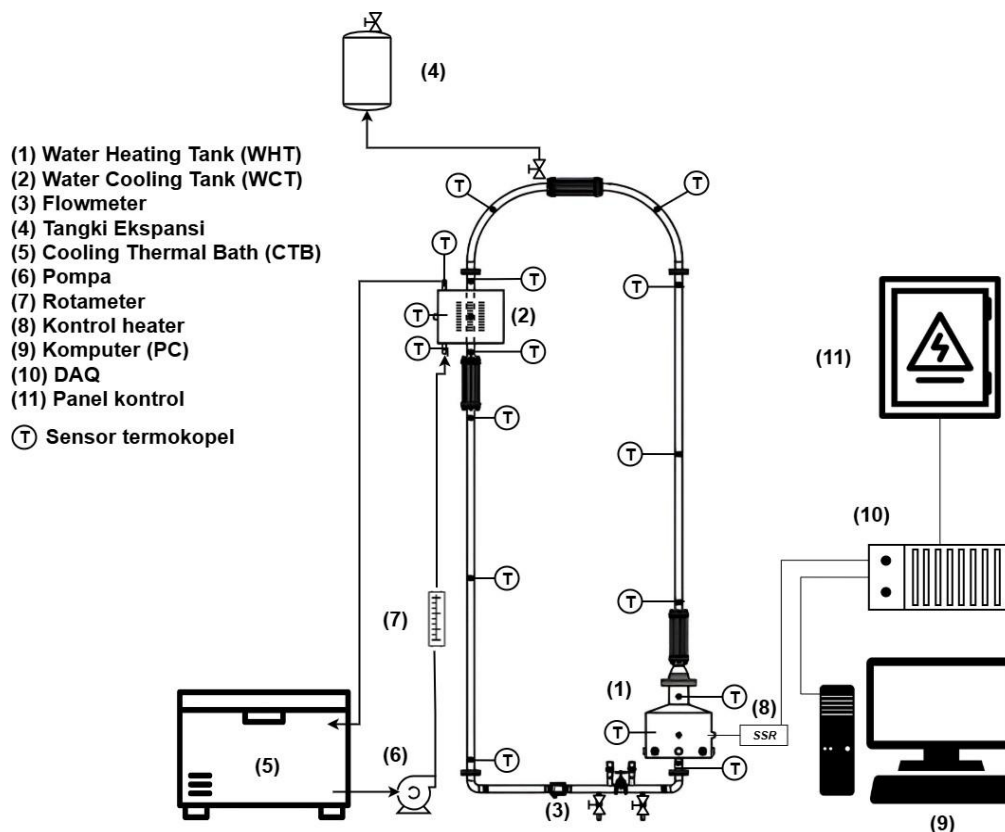
Gambar 1. FASSIP-06 Ver.04 U-Top Rectangular Loop (a) foto aktual, (b) diagram skematik

Tabel 1. Data geometri apparatus eksperimen

Komponen	Simbol	spesifikasi
Lebar untai	a	960 mm
Tinggi untai	b	2780 mm
Beda ketinggian	H	1930 mm
Panjang total untai	L	8260 mm
Diameter pipa	D	34.15 mm (OD) 28.4 mm (ID)
Flowmeter	c	Elektromagnetik flowmeter
Material untai	-	Stainless steel 304

2.2 Setup dan prosedur eksperimen

Eksperimen dilakukan dengan variasi temperatur operasi pemanas 35°C, 45°C, 55°C, dan 65°C. Kemudian temperatur pada tangki pendingin dijaga konstan pada temperatur 10°C dengan laju aliran pendingin 10 L/min. Setiap pengujian berlangsung selama dua jam, dimulai sejak pemanas diaktifkan dan dilanjutkan hingga sistem mencapai kondisi steady-state, yang ditentukan berdasarkan kestabilan pembacaan temperatur dan laju aliran. Pengukuran temperatur dilakukan menggunakan termokopel Tipe-K yang dipasang di beberapa titik loop untuk memantau temperatur fluida, dinding pipa, dan lingkungan. Pada diagram skematik, seluruh sensor temperatur diberi simbol (T). Berdasarkan data kalibrasi, termokopel tipe-K yang digunakan memiliki ketidakpastian sebesar $\pm 0.14^\circ\text{C}$. Akuisisi data dilakukan oleh sistem National Instruments cDAQ 9188, yang dilengkapi dengan modul NI 9214 untuk termokopel dan modul NI 9203 untuk sinyal arus dari flowmeter elektromagnetik dengan ketidakpastian pembacaan laju aliran sebesar $\pm 0.8\%$. Setup eksperimen keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Setup eksperimen FASSIP-06 Ver.04 U-Top Rectangular Loop

Pengoperasian eksperimen dikendalikan melalui komputer dengan menggunakan program LabVIEW yang mengatur batasan temperatur, melakukan perekaman data, dan memantau setiap pembacaan alat ukur secara *real-time*. Data-data sensor terekam dan tersimpan pada data akuisisi sistem (DAQ). Selanjutnya data yang telah tersimpan dapat diolah dan dianalisa lebih lanjut.

2.3 Landasan teoritis dan persamaan

Analisis perpindahan kalor pada sistem sirkulasi alami memerlukan pendekatan yang menggabungkan karakteristik aliran, sifat termofisika fluida, serta interaksi termal antara komponen pemanas dan komponen pendingin. Perhitungan laju aliran massa merupakan langkah awal yang penting karena menjadi dasar bagi seluruh perhitungan energi sistem. Laju aliran massa ditentukan melalui hubungan antara debit aliran sirkulasi alami dan densitas fluida, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (1).

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (1)$$

Karena densitas air berubah terhadap temperatur, maka diperlukan model empiris untuk menggambarkan hubungan tersebut. Persamaan (2) digunakan untuk menentukan nilai $\rho(T)$ sebagai fungsi temperatur dalam satuan °C.

$$\rho(T) = 1004.789042 - 0.046283(1.8T + 32) - 7.9738 \times 10^{-4}(1.8T + 32)^2 \quad (2)$$

Selain densitas, sifat penting lainnya adalah kapasitas panas spesifik (C_p), yang menggambarkan jumlah energi panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur satu satuan massa fluida sebesar satu derajat. Persamaan (3) digunakan untuk menentukan $C_p(T)$ sebagai fungsi temperatur, di mana model empiris ini menyesuaikan variasi kapasitas panas air terhadap temperatur.

$$\sqrt{\frac{17.48908904 - 0.03189591(T)}{1 - 1.67507 \times 10^{-3}(T) - 2.8748 \times 10^{-6}(T)^2}} \quad (3)$$

Setelah sifat termofisika diperoleh, laju perpindahan kalor dihitung berdasarkan perbedaan temperatur antara sisi masuk dan keluar WHT dan WCT. Laju kalor yang diserap oleh WCT, ditunjukkan oleh Persamaan (4).

$$\dot{q}_C = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{C-in} - T_{C-out}) \quad (4)$$

Besarnya energi kalor yang diperoleh fluida dari WHT dihitung dengan menggunakan Persamaan (5).

$$\dot{q}_H = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{H-out} - T_{H-in}) \quad (5)$$

Sementara itu, sebagian energi kalor juga hilang ke lingkungan sebelum mencapai WCT akibat perpindahan kalor melalui dinding pipa sepanjang hot-leg. Laju rugi panas tersebut dihitung menggunakan Persamaan (6).

$$\dot{q}_{hl} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{H-out} - T_{C-in}) \quad (6)$$

Untuk menilai performa sistem pendinginan, efektivitas penyerapan kalor WCT dihitung

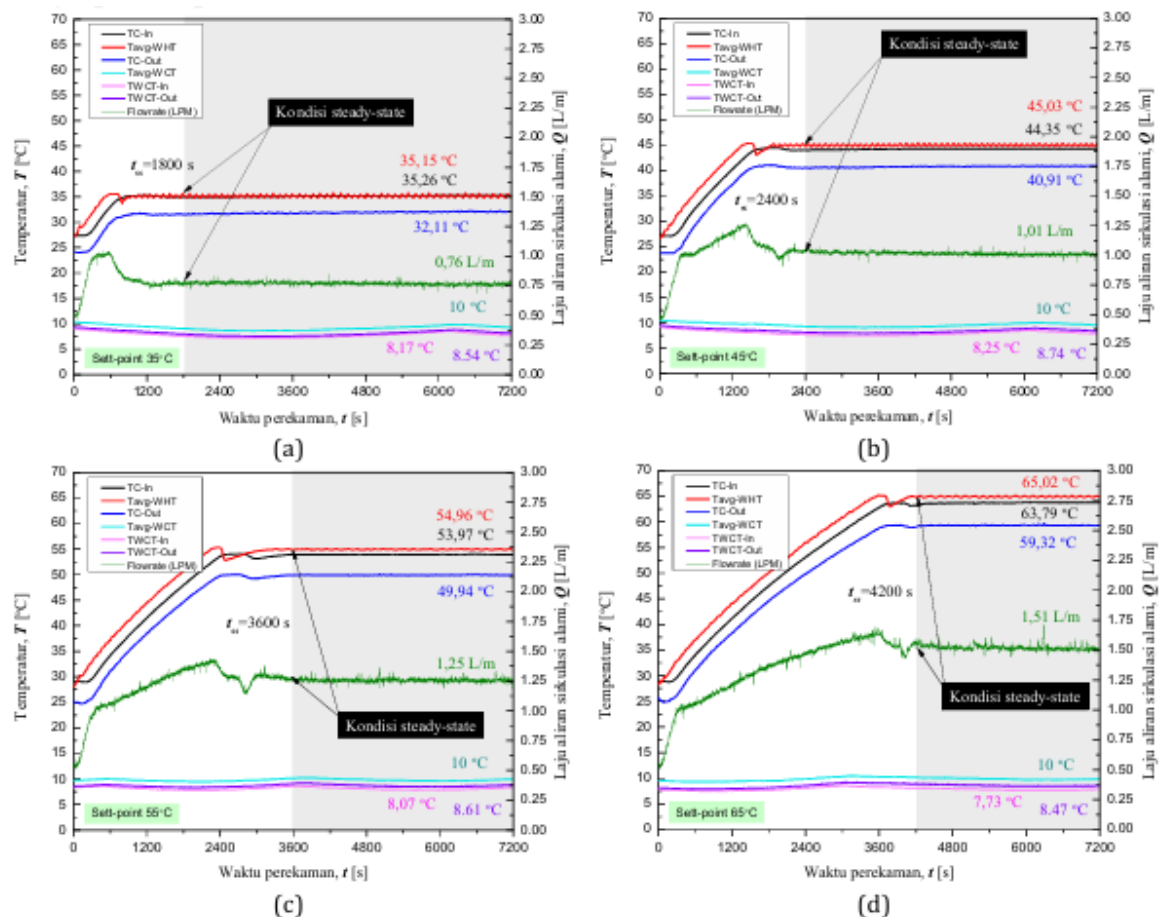
menggunakan Persamaan (7). Nilai efektivitas memberikan gambaran kuantitatif tentang seberapa efisien WCT bekerja sebagai penyerap kalor dalam sistem sirkulasi alami.

$$\varepsilon = \frac{\dot{q}_c}{\dot{q}_H - \dot{q}_{hl}} \quad (7)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik temperatur dan laju aliran sirkulasi alami

Karakteristik temperatur dan laju aliran pada untai sirkulasi alami sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya temperatur operasi pemanas sebagai penggerak utama gaya apung. Gambar 3 secara berturut-turut menunjukkan karakteristik temperatur dan laju aliran sirkulasi alami untuk variasi temperatur operasi pemanas 35°C, 45°C, 55°C, dan 65°C. Pada variasi temperatur pemanas 35°C, fluida pada sisi hot-leg mencapai kondisi stabil di sekitar 35,15– 35,26°C. Peningkatan temperatur pada fase awal menyebabkan laju aliran naik secara bertahap hingga mencapai 0,76 L/min. Kondisi steady-state ditandai dengan tercapainya kestabilan temperatur serta laju aliran pada detik 1800. Pada kondisi ini, temperatur masuk tangki pendingin (TC-in) tercatat sebesar 35,26°C, sedangkan temperatur keluar tangki pendingin (TC-out) menurun hingga 32,11°C akibat proses pelepasan kalor saat melewati tangki pendingin. Perbedaan temperatur ini menunjukkan bahwa tangki pendingin bekerja efektif sebagai penyerap kalor.



Gambar 3. Karakteristik temperatur dan laju aliran berdasarkan variasi temperatur operasi pemanas (a) 35°C, (b) 45°C, (c) 55°C, dan (d) 65°C

Ketika temperatur operasi pemanas dinaikkan menjadi 45°C, gradien temperatur di sepanjang loop meningkat sehingga gaya apung menjadi lebih besar. Hal ini dapat dilihat dari kenaikan laju aliran saat kondisi steady-state mencapai 1,01 L/min, meskipun sistem membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai kondisi steady-state, yaitu sekitar 2400 detik. Pada kondisi steady-state, nilai TC-in mencapai 44,35°C dan TC-out turun menjadi 40,91°C, mengindikasikan peningkatan laju penyerapan kalor oleh tangki pendingin seiring bertambahnya beban panas masuk.

Peningkatan temperatur operasi pemanas ke 55°C semakin memperbesar gaya penggerak sirkulasi alami, ditunjukkan oleh kenaikan laju aliran saat kondisi steady-state menjadi 1,25 L/min. Namun, energi kalor yang lebih besar membuat proses transien berlangsung lebih panjang, sehingga kondisi steady-state baru tercapai pada detik 3600. Pada kondisi ini, TC-in stabil di sekitar 53,97°C dan TC-out berada pada 49,94°C. Selisih temperatur yang tetap signifikan menunjukkan bahwa mekanisme pelepasan kalor di tangki pendingin tetap berlangsung efektif meskipun menerima beban kalor yang jauh lebih besar dari variasi sebelumnya.

Pada variasi tertinggi, yaitu temperatur operasi 65°C, fenomena penguatan gaya apung mencapai titik maksimum pada rentang pengujian ini. Laju aliran saat kondisi steady-state meningkat hingga 1,51 L/min, tertinggi di antara seluruh variasi. Namun, kondisi tunak baru tercapai pada waktu paling lama, yaitu 4200 detik, karena sistem memerlukan waktu lebih panjang untuk mencapai keseimbangan termal. Pada kondisi tunak, nilai TC-in mencapai 63,79°C dan TC-out menurun menjadi 59,32°C. Kestabilan kinerja tangki pendingin tetap terlihat dari kemampuan sistem mempertahankan perbedaan temperatur meskipun beban kalor primer mencapai nilai paling besar.

Secara keseluruhan, peningkatan temperatur operasi pemanas menghasilkan pola yang konsisten. Semakin tinggi temperatur pemanas, semakin besar laju aliran sirkulasi alami akibat penguatan gaya apung. Akan tetapi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi steady-state semakin lama. Sementara itu, perbedaan temperatur TC-in dan TC-out pada seluruh variasi menunjukkan bahwa tangki pendingin berfungsi sebagai penyerap kalor yang efektif dan mampu mempertahankan performa penyerapan kalor meskipun beban panas yang diterima meningkat secara signifikan.

3.2 Analisis laju penyerapan kalor WCT terhadap kenaikan temperatur WHT

Analisis laju penyerapan kalor oleh WCT dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem pendingin dalam menyerap energi kalor dari fluida kerja sepanjang variasi temperatur operasi. Peningkatan temperatur WHT (TWHT) akan memengaruhi karakteristik termofisika fluida, seperti laju aliran massa ($\dot{m}$) dan kapasitas panas spesifik (C_p), yang pada akhirnya berdampak langsung pada besarnya energi kalor yang diserap. Laju aliran massa dihitung menggunakan persamaan (1) dan kapasitas panas spesifik dihitung menggunakan persamaan (3) kemudian untuk mendapatkan laju penyerapan kalor WCT dihitung melalui persamaan (4). Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 2 dan grafik laju penyerapan kalor WCT ditunjukkan pada Gambar 4.

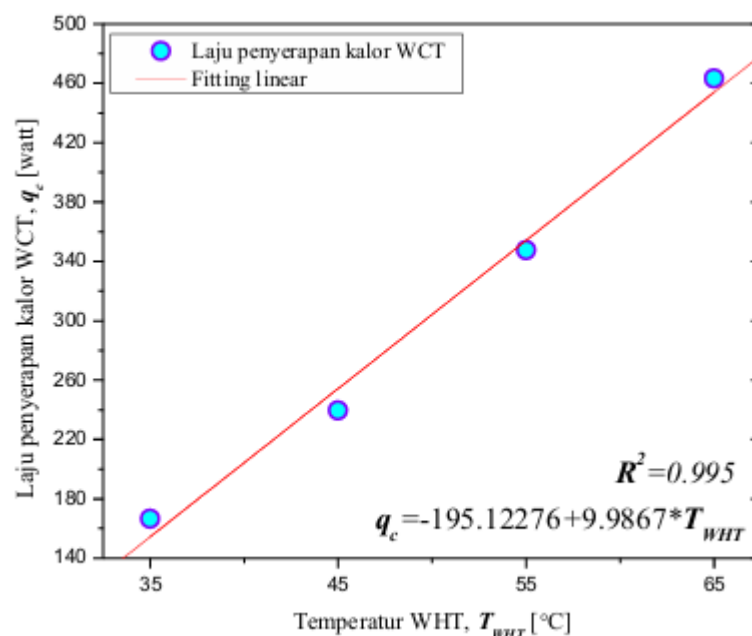
Tabel 2. Laju penyerapan kalor WCT saat kondisi steady-state.

T_{WHT} [°C]	$\dot{m}$ [kg/s]	C_p [J/kg.°C]	ΔT_c [°C]	$\dot{q}_c$ [watt]
35	0.0126	41780	3.15	166.47
45	0.0166	41791	3.44	239.46
55	0.0206	41813	4.03	347.61
65	0.0248	4.1848	4.46	463.31

Pada kondisi TWHT = 35°C, laju aliran massa sebesar 0.0126 kg/s dengan perubahan temperatur pendingin sebesar 3.15°C menghasilkan laju penyerapan kalor sebesar 166.47 watt. Nilai ini merupakan titik awal yang menggambarkan bahwa pada temperatur rendah, kemampuan penyerapan kalor masih terbatas karena massa yang mengalir relatif kecil. Ketika temperatur dinaikkan menjadi 45°C, aliran massa meningkat menjadi 0.0166 kg/s dengan ΔT mencapai 3.44°C, sehingga laju penyerapan kalor naik cukup signifikan menjadi 239.46 watt. Peningkatan ini menunjukkan bahwa kenaikan temperatur menyebabkan densitas air berkurang dan gaya apung meningkat, sehingga debit aliran pendingin bertambah dan proses pemindahan kalor menjadi lebih efektif.

Tren ini berlanjut pada temperatur 55°C, di mana laju aliran massa mencapai 0.0206 kg/s dan ΔT meningkat menjadi 4.03°C. Kombinasi kedua parameter ini memicu kenaikan laju penyerapan kalor hingga 347.61 watt. Pada kondisi ini, sistem pendingin bekerja lebih optimal karena gradien temperatur antara inlet dan outlet tangki pendingin semakin besar, mempercepat difusi termal dari fluida panas menuju fluida dingin. Peningkatan temperatur fluida menyebabkan viskositas berkurang sehingga hambatan aliran menurun dan mempercepat sirkulasi alami dalam loop.

Pada temperatur tertinggi, yaitu 65°C, laju aliran massa mencapai nilai maksimum sebesar 0.0248 kg/s dengan ΔT sebesar 4.46°C, menghasilkan laju penyerapan kalor sebesar 463.31 watt. Hal ini menunjukkan performa puncak dari sistem pendingin WCT. Kenaikan laju aliran dan perbedaan temperatur yang besar mendorong peningkatan efisiensi pemindahan kalor. Secara keseluruhan, fenomena ini menegaskan bahwa semakin tinggi temperatur operasi sistem, semakin besar energi kalor yang dapat diserap oleh WCT, terutama karena kontribusi peningkatan jumlah massa yang mengalir dan gradien termal yang lebih besar.



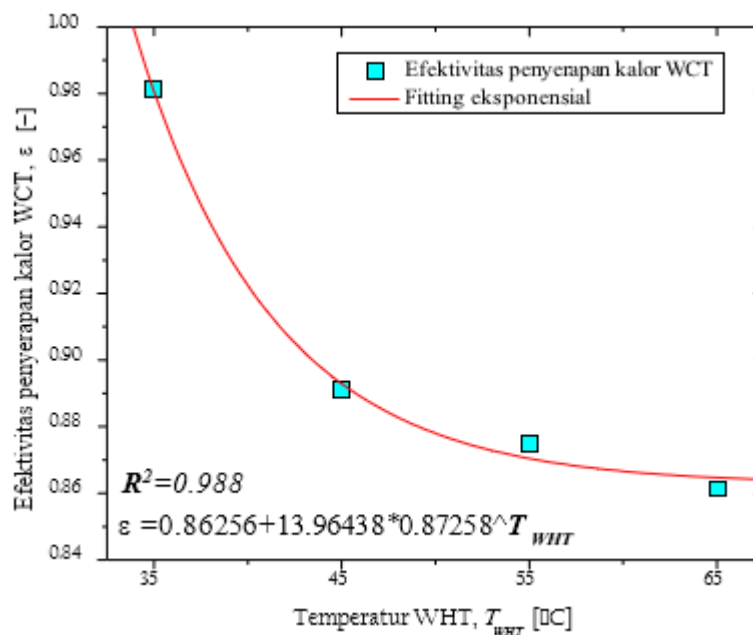
Gambar 4. Laju penyerapan kalor WCT terhadap kenaikan temperatur WHT

Selain itu, Gambar 4 menunjukkan hubungan linier antara kenaikan temperatur WHT dan laju penyerapan kalor oleh WCT bahwa semakin tinggi temperatur operasi WHT, semakin besar pula energi kalor yang dapat diserap oleh sistem pendingin. Korelasi linear didapatkan yaitu $q_c = -195.12276 + 9.9867 * T_{WHT}$ dengan koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0.995$ menunjukkan bahwa model linier mampu merepresentasikan hubungan antara variabel

temperatur dan laju penyerapan kalor dengan akurasi yang baik. Kemudian, slope 9.9867 menunjukkan bahwa setiap kenaikan temperatur WHT sebesar 1°C akan meningkatkan laju penyerapan kalor sekitar 10 watt. Hal ini menegaskan sensitivitas WCT terhadap perubahan temperatur operasi. Intersep negatif pada persamaan linear menunjukkan bahwa pada temperatur rendah mendekati 20°C, sistem cenderung belum mampu menyerap kalor secara efektif karena gaya apung sangat kecil, sehingga sirkulasi belum terbentuk secara penuh. Namun, pada rentang temperatur eksperimen (35–65°C), hubungan linier sangat kuat dan menunjukkan performa pendinginan yang meningkat secara stabil.

3.3 Analisis efektivitas perpindahan kalor pada WCT terhadap kenaikan temperatur WHT

Untuk mengetahui efektivitas perpindahan kalor pada WCT terhadap kenaikan temperatur WHT dilakukan perhitungan laju kalor yang diserap oleh WCT ($\dot{q}_c$) menggunakan Persamaan (4), laju kalor yang diberikan oleh WHT ($\dot{q}_H$) menggunakan Persamaan (5), dan laju kalor yang melalui hot-leg ($\dot{q}_{hl}$) menggunakan Persamaan (6). Sehingga efektivitas penyerapan kalor WCT (ε_c) dapat dihitung menggunakan Persamaan (7). Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 3 dan grafik efektivitas perpindahan kalor pada WCT terhadap kenaikan temperatur WHT ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. efektivitas perpindahan kalor pada WCT terhadap kenaikan temperatur WHT

Efektivitas perpindahan kalor pada WCT merepresentasikan kemampuan sistem dalam menyerap kalor dari aliran untai sirkulasi alami berdasarkan total energi kalor yang tersedia. Variasi temperatur WHT sebesar 35°C menunjukkan kinerja paling tinggi, dengan nilai efektivitas mencapai 0.98. Laju penyerapan kalor oleh WCT sebesar 166.47 watt hampir menyamai laju kalor yang diberikan WHT mencapai 171.50 watt, sementara rugi panas sepanjang pipa hot-leg hanya 1.83 watt. Kondisi ini menandakan bahwa hampir seluruh energi kalor yang mengalir menuju bagian atas loop dapat diserap secara efektif oleh WCT sehingga proses pelepasan kalor berlangsung sangat efisien.

Kenaikan temperatur WHT menjadi 45°C menyebabkan penurunan efektivitas menjadi 0.89. Bertambahnya temperatur pemanas meningkatkan laju kalor yang diberikan WHT hingga 289.15 watt serta menaikkan rugi panas sepanjang pipa hot-leg menjadi 20.40 watt. Walaupun

laju penyerapan kalor oleh WCT juga meningkat menjadi 239.46 watt, proporsi energi kalor yang berhasil diserap menjadi lebih kecil karena sebagian kalor hilang di sepanjang hot-leg sebelum mencapai tangki pendingin. Kondisi ini menggambarkan bahwa peningkatan temperatur operasi memperbesar beban termal sistem, tetapi peningkatan kapasitas penyerapan kalor WCT tidak lagi mampu menjaga efektivitas setinggi kondisi temperatur rendah.

Peningkatan temperatur menjadi 55°C memperlihatkan penurunan efektivitas lanjutan menjadi 0.88. Laju kalor yang diberikan WHT meningkat sebesar 456.93 watt, sedangkan rugi kalor hot-leg meningkat menjadi 59.68 watt. Meskipun WCT menyerap kalor lebih besar, yaitu 347.61 watt, proporsinya terhadap total energi kalor yang tersedia kembali menurun.

Fenomena ini mengindikasikan bahwa bertambahnya temperatur operasi menyebabkan interaksi kalor dengan lingkungan meningkat sehingga semakin banyak energi hilang sebelum mencapai WCT. Dengan demikian, peningkatan kapasitas penyerapan kalor tidak lagi diikuti oleh peningkatan efektivitas secara proporsional.

Variasi temperatur tertinggi, yaitu 65°C, menghasilkan efektivitas terendah sebesar 0.86. Laju kalor yang diberikan WHT mencapai 604.35 watt dan rugi panas hot-leg meningkat menjadi 66.51 watt, sehingga energi panas yang benar-benar tersedia untuk diserap WCT berkurang secara relatif. WCT tetap menyerap kalor terbesar dari seluruh variasi, yaitu 463.31 watt, namun meningkatnya $\dot{q}_H$ dan $\dot{q}_{hl}$ dengan laju lebih cepat dibandingkan $\dot{q}_C$ menyebabkan efektivitas menurun. Performa ini menunjukkan bahwa meskipun WCT masih berfungsi sebagai penyerap kalor yang kuat, keterbatasan perpindahan kalor seperti penurunan beda temperatur efektif, peningkatan rugi panas, serta perubahan sifat termofisika fluida mulai membatasi efisiensi sistem.

Secara keseluruhan, tren penurunan efektivitas menunjukkan bahwa beban termal yang semakin besar menyebabkan proporsi energi yang mampu diserap WCT menurun meskipun kapasitas penyerapan kalor meningkat secara absolut. Analisis fitting memperkuat temuan ini melalui model eksponensial $\varepsilon = 0.86256 + 13.96438 * 0.87258^{TWHT}$ dengan $R^2 = 0.988$ menggambarkan kecocokan yang sangat baik terhadap data. Penurunan efektivitas berlangsung cepat pada temperatur rendah lalu melambat pada temperatur tinggi karena bagian fungsi eksponensial 0.87258^{TWHT} nilainya semakin kecil seiring naiknya temperatur WHT sehingga kontribusinya terhadap nilai efektivitas melemah. Secara fisik, sistem bergerak menuju batas efektivitas minimum, yang mencerminkan keterbatasan perpindahan kalor pada kondisi beban termal tinggi.

Tabel 3. Hasil perhitungan efektivitas perpindahan kalor pada WCT saat kondisi steady-state.

T_{WHT} [°C]	$\dot{q}_C$ [watt]	$\dot{q}_H$ [watt]	$\dot{q}_{hl}$ [watt]	ε_C [-]
35	166.47	171.50	1.83	0.98
45	239.46	289.15	20.40	0.89
55	347.61	456.93	59.68	0.88
65	463.31	604.35	66.51	0.86

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa peningkatan temperatur operasi pemanas memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik termal dan hidrodinamik sistem sirkulasi alami. Semakin tinggi temperatur pemanas, gaya apung yang terbentuk semakin kuat sehingga laju aliran sirkulasi meningkat dari 0.76 L/min pada 35°C menjadi 1,51

L/min pada 65°C. Namun demikian, peningkatan energi sistem membuat waktu transien semakin panjang, di mana kondisi steady-state bergeser dari 1800 detik pada 35°C hingga 4200 detik pada 65°C. Meskipun beban termal meningkat, kinerja tangki pendingin tetap efektif, ditunjukkan oleh perbedaan temperatur TC-in dan TC-out yang stabil dan signifikan pada seluruh variasi, menandakan bahwa proses pelepasan kalor berlangsung konsisten.

Laju penyerapan kalor oleh WCT menunjukkan peningkatan yang kuat seiring naiknya temperatur operasi. Nilai q_c meningkat dari 166.47 watt pada 35°C menjadi 463.31 watt pada 65°C, dipengaruhi oleh kenaikan laju aliran massa serta perbedaan temperatur yang semakin besar. Hubungan antara temperatur WHT dengan laju penyerapan kalor bersifat linier dan menunjukkan bahwa setiap kenaikan 1°C pada temperatur WHT meningkatkan laju penyerapan kalor sekitar 10 watt. Namun, meskipun kapasitas penyerapan kalor meningkat secara absolut, efektivitas perpindahan kalor WCT justru menurun dari 0.98 pada 35°C menjadi 0.86 pada 65°C. Penurunan ini terjadi karena meningkatnya rugi panas pada hot-leg dan bertambahnya total energi kalor yang harus diserap sehingga proporsi kalor yang dapat ditangani WCT berkurang.

Model eksponensial efektivitas menunjukkan bahwa penurunan efektivitas berlangsung cepat pada temperatur rendah dan cenderung melambat pada temperatur tinggi akibat mengecilnya kontribusi komponen eksponensial terhadap nilai akhir. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa peningkatan temperatur pemanas meningkatkan kapasitas sirkulasi alami dan laju penyerapan kalor, tetapi menurunkan efektivitas perpindahan kalor secara relatif. Temuan ini memberikan dasar penting dalam memahami batas performa sistem pendinginan berbasis sirkulasi alami dan dapat menjadi acuan dalam optimasi desain WCT dan sistem loop pada aplikasi termal di masa mendatang.

Daftar Pustaka

- [1] P.K. Vijayan, Experimental observations on the general trends of the steady state and stability behaviour of single-phase natural circulation loops, *Nuclear Engineering and Design* 215 (2002) 139–152. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(02\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00047-X).
- [2] P.K. Vijayan, H. Austregesilo, Scaling laws for single-phase natural circulation loops, *Nuclear Engineering and Design* 152 (1994) 331–347. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)90095-7](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90095-7).
- [3] A. Adtyas Budiman, G.B. Heru, M. Juarsa, Analisis Sistem Pengendalian Temperatur WHT dalam Operasi Tunak Untai Uji FASSIP-02, 2019.
- [4] P. Brahmanda Sudarsana, W. Nata Septiadi, M. Juarsa, Jurnal Pengembangan Energi Nuklir Kajian Performa Passive Residual Heat Removal System (PRHRS) pada System-Integrated Advanced Modular Reactor (SMART), 2021.
- [5] A.R. Antariksawan, S. Widodo, M. Juarsa, D. Haryanto, M.H. Kusuma, N. Putra, Numerical study on natural circulation characteristics in FASSIP-02 experimental facility using RELAP5 code, in: *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, Institute of Physics Publishing, 2018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/105/1/012090>.
- [6] M. Juarsa, A.R. Antariksawan, M.H. Kusuma, N. Putra, P.P. Moniaga, Preliminary Investigation on Natural Circulation Flow using CFD and Calculation Base on Experimental Data Pre-FASSIP-02, in: *J Phys Conf Ser*, Institute of Physics Publishing, 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022073>.
- [7] D. Yuliaji, R. Waluyo, G.E. Pramono, M.G. Putra, N.R. Budiyanto, S.A. Mariadi, S. Kharisma, R. Oktaviandi, Deendarlianto, Indarto, M. Juarsa, Thermal-hydraulics performance and stability two-phase flow using Al₂O₃ nanofluids in an open natural circulation loop, *Ann Nucl Energy* 218 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111424>.
- [8] V.I. Sri Wardhani, I.M. Joni, C. Panatarani, E.S. Hanam, S. Kharisma, S.A. Maryadi, A. Rosidi, A.A. Budiman, S. Ismarwanti, P.H. Setiawan, I. Roswandi, E.P. Ariesta, R. Akbar, H.A. Gunawan, A.E. Pamungkas, M. Juarsa, Enhancing the natural circulation flow using ultrafine bubbles: Simulation and experimental, *International Journal of Thermal Sciences* 218 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025.110181>.
- [9] A.R. Antariksawan, M. Juarsa, T. Sundari, S. Ismarwanti, S. Widodo, M.H. Kusuma, M. Subekti, N. Putra, Study of heat transfer in a water cooling tank with c-shaped heat exchanger and straight heat pipe under natural circulation, in: *AIP Conf Proc*, American Institute of Physics Inc., 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5086554>.
- [10] D. Haryanto, G. Giarno, A.E. Pamungkas, A. Rosidi, G.B.H. Kusnugroho, M. Juarsa, Analisis Kekuatan Mekanik pada Struktur Cooling Tank Section Untai FASSIP-03 NT Berbasis Simulasi Software, *Semesta Teknik* 25 (2022) 24–32. <https://doi.org/10.18196/st.v25il.13470>.

- [11] S. Kharisma, D. Yuliaji, A.E. Pamungkas, A.A. Budiman, M. Rafel, S.A. Maryadi, R. Oktaviandi, N.R. Budiyanto, P.H. Setiyawan, W.N. Septiadi, M. Juarsa, Impact of Cooler Temperature Variations on Flow Boiling Phenomena in a Natural Circulation Rectangular Loop, in: J Phys Conf Ser, Institute of Physics, 2025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2972/1/012020>.
- [12] R. Waluyo, Deendarlianto, Indarto, D. Yuliaji, V.I. Sri Wardhani, A. Afandi, M.G. Putra, R. Oktaviandi, S. Kharisma,
- [13] S.A. Maryadi, A.H. Astyanto, M. Juarsa, Design of rectangular single-phase natural circulation loop based on working fluid and geometry parameters to enhancement stability and mass flow rates: A research review, Progress in Nuclear Energy 191 (2026) 106037. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.106037>.