

Investigasi keandalan *heater* dan *cooler* fasilitas simulasi sistem pasif-05 (FASSIP-05) berdasarkan hasil komisioning tahap pertama

Iwan Roswandi¹, Hyundianto Arif Gunawan¹, Arif Adtyas Budiman¹, Hilman Adrian², Sanda¹, Mulya Juarsa¹

¹Reactor Thermal-Fluids System Development (RTFSyDev.) Research Group, Pusat Riset dan Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) KST. B.J. Habibie, Setu, Tangerang Selatan, Banten 14314

²Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta Kampus A UNJ, Gedung L, Jl. Rawamangun Muka Raya, Kec. Pulo Gadung, Kota Jakarta Timur, DKI Jakarta 13220
Email Koresponding: iwan032@brin.go.id

Abstrak

Kecelakaan PLTN Daiichi, Fukushima, Jepang pada tahun 2011 memberikan urgensi pengembangan sistem pendingin pasif reaktor nuklir, khususnya pada inovasi manajemen termal. Laboratorium telah melakukan pengkajian dan pengembangan sistem pendingin pasif dengan membangun beberapa fasilitas eksperimen dari skala kecil hingga besar, salah satunya yang terbaru adalah Untai Rektangular Bertekanan FASSIP-05. Sebelum digunakan, perlu dilakukan komisioning fasilitas untuk menentukan batasan operasi. Tujuan kajian ini dilakukan adalah untuk menentukan keandalan heater dan cooler. Metode dilakukan dengan menghidupkan heater pada daya maksimal 4000 W, kemudian dihentikan ketika mencapai set point pada 60°C, 70°C, 80°C, dan 90°C. Hasil komisioning menunjukkan bahwa heater mampu mencapai kondisi set point dengan baik, mengubah 26°C menjadi 90°C dalam 2282 detik dengan tingkat kepercayaan data (R^2) sebesar 0,9965 dan overshoot terendah 1,1% pada kondisi tunak. Kemampuan menjaga suhu set point selama 3 jam ditemukan sangat baik dengan rata-rata 60,16 °C, 70,10°C, 80,09 °C, dan 89,92°C. Hasil penyerapan kalor masih memerlukan adanya peningkatan, dengan nilai terendah mencapai 217,71 W (5,4%) dan tertinggi 465,56 W (11,64%) yang disebabkan besarnya rugi kalor. Keandalan cooler perlu ditingkatkan, di mana proses pendinginan tangki dari 27,26°C ke 16,69°C membutuhkan 4501 detik, dengan rata-rata kenaikan 0,0023°C/detik. Keandalan pengambilan panas pada kondisi tunak adalah 4,06°C dan daya penyerapan kalor tertinggi hanya 0,37 W.

Kata kunci: PLTN, FASSIP-05, komisioning, heater, cooler, fluks kalor.

Abstract

The Daiichi Nuclear Power Plant accident in Fukushima, Japan 2011 gave urgency to developing a passive nuclear reactor cooling system, especially in terms of thermal management innovation. The laboratory has conducted research and development of passive cooling systems by building several small to large-scale experimental facilities, one of which is the FASSIP-05 Pressure Rectangular Strand. It is necessary to commission the facility to define operating limits before use. This research aimed to determine the reliability of the heater and cooler components. The commissioning method is carried out by turning on the heater at a maximum power of 4000 W, then stopping when it reaches the temperature set points at 60°C, 70°C, 80°C, and 90°C. The commissioning results show that the heater can reach the set point conditions well, changing the initial temperature of 26°C to 90°C in 2282 seconds with a data confidence level (R^2) of 0.9965 and the lowest overshoot of 1.1% when it reaches steady state. The ability of the system to maintain the temperature set point for 3 hours was found to be very good with an average of 60.16°C, 70.10°C, 80.09°C and 89.92°C. The results of heat absorption still require improvement, with the lowest value reaching 217.71 W (5.4%) and the highest at 465.56 W (11.64%), which causes a significant heat loss. Cooling reliability needs to be improved. Cooling the tank from 27.26°C to 16.69°C takes 4501 seconds, with an average temperature increase of 0.00235°C/second. The reliability of heat absorption at steady state is 4.0617°C and the highest heat absorption capacity is only 0.37 W.

Keywords: NPP, FASSIP-05, commissioning, heater, cooler, heat flux.

1. Pendahuluan

FASSIP adalah singkatan dari Fasilitas Sistem Simulasi Pasif, merupakan fasilitas yang dibangun di Laboratorium Eksperimen Termalhidraulika, bagian dari Reactor Thermal-Fluids System Development (RTFSyDev) yang berada di bawah naungan Pusat Riset dan Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), Badan

Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). FASSIP berfungsi sebagai fasilitas eksperimen sistem pendingin pasif yang bertujuan mengelola panas sisa yang dihasilkan oleh inti reaktor selama kondisi kecelakaan [1], sehingga meningkatkan keselamatan reaktor nuklir dan menghindari paparan radiasi ke lingkungan [2]. Keberadaan pendingin pasif pada reaktor menjadi semakin penting, dan urgensi ini semakin diperkuat oleh kejadian kecelakaan di

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Daiichi, Fukushima, Jepang pada tahun 2011. Kecelakaan ini dipicu oleh tsunami yang mencapai lebih dari 10 meter setelah gempa bumi dengan magnitudo 9,1 SR, yang menyebabkan generator darurat terendam dan memicu pemadaman listrik atau yang dikenal sebagai keadaan *station blackout* (SBO) yang mengakibatkan pompa pendingin tidak dapat beroperasi untuk mendinginkan reaktor [3].

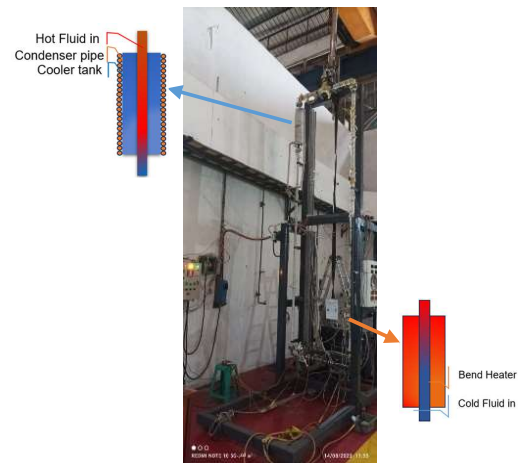
Sistem kerja pendingin pasif memanfaatkan prinsip dasar sifat fisik fluida, di mana massa jenis fluida akan berkurang seiring dengan peningkatan suhu, dan akan naik yang diakibatkan gaya apung (*buoyancy force*). Penelitian mengenai pendingin pasif untuk reaktor terus berkembang di seluruh dunia, termasuk di Indonesia, dengan fokus pada Laboratorium RTFSyDev. Laboratorium ini telah berhasil membangun beberapa fasilitas simulasi yang signifikan. Pada tahun 2014, Laboratorium RTFSyDev membangun NC-Queen, sebuah fasilitas simulasi yang terbuat dari pipa SS316L berdiameter $\frac{3}{4}$ inch dengan panjang 2,7 m dan lebar 0,5 m. Jarak antara pendingin dan pemanas sekitar 1,4 m, menghasilkan peningkatan laju aliran massa air rata-rata sebesar 81,03% [4]. Kemudian, pada tahun 2016, mereka membangun FASSIP-01 mod 1, fasilitas dengan bentuk *loop* persegi panjang vertikal berukuran sedang, menggunakan material SS304 berdiameter 1 inci, lebar 3,5 m, dan tinggi 6 m. Fasilitas ini terbagi menjadi 32 bagian dan menghasilkan peningkatan laju aliran sirkulasi dari 0,04 menjadi 0,06 kg/s dengan peningkatan daya pemanas dari 1000 W menjadi 2000 W [5].

Mulai tahun 2018, sebuah fasilitas dengan skala besar bernama FASSIP-02 dibangun. Fasilitas ini memiliki total panjang pipa sekitar 43,7 meter dengan diameter 1 inci dan terbuat dari bahan SS304. FASSIP-02 menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu dalam tangki pemanas, maka semakin besar perbedaan temperatur (ΔT) antara pipa masuk dan keluar. Faktor ini didukung oleh kehadiran penukar kalor berbentuk *U-Shape* [6]. Kemudian, pada tahun 2021, RTFSyDev membangun FASSIP-03 NT yang menggunakan fluida *nanobubble*. Fasilitas ini dilengkapi dengan penukar kalor *helical heat exchanger* pada *Heating Tank System* (HTS) dan *Cooling Tank System* (CTS), sehingga perpindahan kalor lebih efisien oleh fluida [7]. Kemudian, tahun berikutnya yakni tahun 2022, FASSIP-04 dibangun. Dalam hasil komisioningnya, FASSIP-04 mengalami peristiwa pembentukan gelembung dari *heater* berdaya 5,6 kW pada suhu 105°C [8]. Kegiatan pengembangan dilanjutkan dengan pembangunan FASSIP-05 pada tahun 2021, namun hingga tahun 2022, fasilitas ini belum digunakan untuk eksperimen. Hal ini dikarenakan masih dalam tahap penyempurnaan. FASSIP-05 memiliki tinggi 4 meter dan lebar 1 meter dengan bahan SS304 Sch 160 berdiameter 1 inci yang memiliki ketahanan akan korosi yang sangat baik [9].

Berdasarkan desain, fasilitas ini akan dapat beroperasi pada suhu dan tekanan tinggi [10]. Pada tahap komisioning pertama, investigasi akan difokuskan pada keandalan *heater* dan *cooler* FASSIP-05.

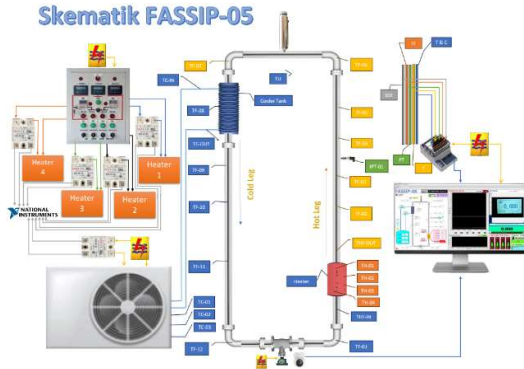
2. Metode

Heater pada FASSIP-05 menggunakan empat buah pemanas Elstein FSR sebesar 1000 W yang dibentuk menjadi *bend heater* dan ditempatkan di bagian bawah *loop* vertikal (*hot leg*), sehingga dalam *apparatus* ini menyerupai reaktor daya. Panel *heater* ini akan menghasilkan kalor, meningkatkan suhu air dalam pipa dan akan menyebabkan adanya gaya apung (*buoyancy force*) akibat berkurangnya massa jenis air, sehingga air bergerak naik. Sedangkan *cooler* berada pada sisi berlawanan dengan *heater* yaitu di sisi atas vertikal *loop* (*cold leg*). *Cooler* ini berfungsi sebagai sistem penukar panas, di mana tangki air didinginkan oleh kondensor 2 HP melalui pipa tembaga yang melilit di sekitar bagian luar tangki. Hal ini mengakibatkan penurunan suhu air panas yang mengalir dalam pipa, sehingga massa jenisnya meningkat, dan air bergerak turun. Gambar 1 berikut ditunjukkan *apparatus* FASSIP-05.



Gambar 1. Aparatus FASSIP-05.

Proses komisioning FASSIP-05 dilakukan untuk memperoleh data distribusi suhu dalam fluida yang mengalir melalui *heater* dan *cooler*. Langkah awal melibatkan penurunan suhu *cooler* hingga batas maksimal sebelum mengaktifkan *heater*, kemudian *heater* dinyalakan dalam kondisi daya maksimal (4000 W) tanpa dilakukan pengaturan, di mana *heater* akan terus menyala sampai suhu air keluar dari *heater* mencapai *set point* 60°C, 70°C, 80°C, dan 90°C. Pembacaan data suhu menggunakan termokopel tipe *k rugged pipe plug probe* dengan ulir $\frac{1}{2}$ inci yang terpasang sepanjang *loop*, *heater* dan *cooler*. Termokopel juga terhubung dengan data akuisisi National Instruments 9213 dan 9214, kemudian divisualisasikan dengan *software* LabView, seperti terlihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Skematik FASSIP-05.

Setelah memperoleh distribusi suhu air dari hasil eksperimen, langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan untuk menentukan sifat fisik air dan perpindahan kalor dengan menggunakan Persamaan (1)-(3) berikut [11]-[13].

$$\rho = A + BT_F + CT_F^2 \quad (1)$$

Persamaan (1) merumuskan bahwa ρ adalah massa jenis (kg/m^3), T adalah suhu ($^{\circ}\text{C}$), T_F adalah $1,8T+32$, A adalah 1004,789042, B adalah -0,046283, dan C adalah $-7,9739 \times 10^{-4}$.

$$C_p = 1000 \times \left[\frac{A+C}{1+BT+DT^2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Persamaan (2) merumuskan bahwa C_p adalah kalor spesifik (J/kg. K), T adalah suhu ($^{\circ}\text{C}$), A adalah 17,48908904, B adalah $-1,67507 \times 10^{-3}$, C adalah $-0,03189591$, dan D adalah $-2,8748 \times 10^{-6}$.

$$Q = \Delta U = mC_p \Delta T \quad (3)$$

Persamaan (3) merumuskan bahwa Q adalah kalor yang dipindahkan (J), m adalah massa air (kg), dan ΔT adalah interval suhu ($^{\circ}\text{C}$). Nilai perpindahan kalor paralel dengan berjalannya waktu, maka dihitung rata-rata persatuan waktu dengan Persamaan (4) dan Persamaan (5) berikut.

$$\dot{Q}_{avg} = \frac{Q}{\Delta t} \quad (4)$$

Persamaan (5) menunjukkan bahwa \dot{Q}_{avg} adalah perpindahan kalor rata-rata ($\text{J/s} = \text{W}$) dan Δt adalah interval waktu (s).

$$\dot{q}_{avg} = \frac{\dot{Q}_{avg}}{A} \quad (5)$$

Persamaan (5) menunjukkan bahwa \dot{q}_{avg} adalah *heat flux* (W/m^2) dan A adalah luas permukaan (m^2).

3. Hasil dan Pembahasan

Heater mulai dihidupkan setelah suhu pada *cooling* tank mencapai maksimal. *Heater* tidak dilakukan pengaturan daya, namun akan *on-off* ketika telah mencapai suhu *set point*. Hasil distribusi suhu dan sifat fisik air pada kondisi *transient heating* ditunjukkan pada Tabel 1-4 di bawah ini, di mana nilai untuk setiap parameter mengalami kenaikan hingga

tercapai *set point*, namun berbanding terbalik dengan perpindahan kalor rata-rata dan *heat flux* rata-rata, di mana keduanya dipengaruhi oleh lamanya waktu yang dibutuhkan untuk menuju suhu *set point*.

Tabel 1. Distribusi suhu dan sifat fisik air 60 $^{\circ}\text{C}$.

t (s)	T _{rata-rata} ($^{\circ}\text{C}$)	ρ _{rata-rata} (kg/m^3)	C_p _{rata-rata} (J/kg. K)
0-200	30,61	994,70	4177,88
201-400	36,94	992,49	4178,48
401-600	43,04	990,16	4179,56
601-800	49,47	987,50	4181,25
801-1045	56,34	984,42	4183,74

Tabel 2. Distribusi suhu dan sifat fisik air 70 $^{\circ}\text{C}$.

t (s)	T _{rata-rata} ($^{\circ}\text{C}$)	ρ _{rata-rata} (kg/m^3)	C_p _{rata-rata} (J/kg. K)
0-300	32,57	994,04	4178,01
301-600	42,07	990,54	4179,35
601-900	51,74	986,50	4182,00
901-1200	61,14	982,12	4185,89
1201-1356	67,82	978,72	4189,50

Tabel 3. Distribusi suhu dan sifat fisik air 80 $^{\circ}\text{C}$.

t (s)	T _{rata-rata} ($^{\circ}\text{C}$)	ρ _{rata-rata} (kg/m^3)	C_p _{rata-rata} (J/kg. K)
0-400	36,16	992,77	4178,38
401-800	49,00	987,70	4181,11
801-1200	61,69	981,85	4186,16
1201-1400	70,05	977,54	4190,87
1401-1715	76,40	974,02	4195,23

Tabel 4. Distribusi suhu dan sifat fisik air 90 $^{\circ}\text{C}$.

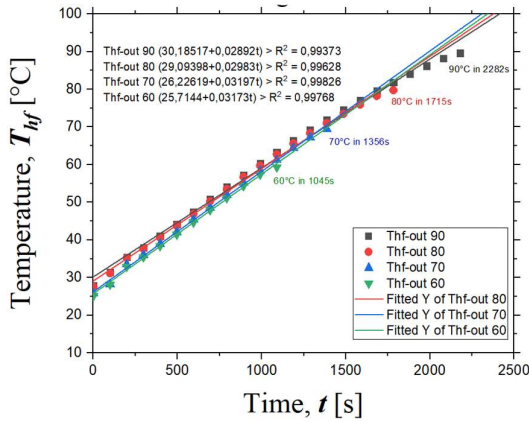
t (s)	T _{rata-rata} ($^{\circ}\text{C}$)	ρ _{rata-rata} (kg/m^3)	C_p _{rata-rata} (J/kg. K)
0-500	35,93	992,85	4178,35
501-1000	52,14	986,33	4182,14
1001-1500	67,41	978,94	4189,26
1501-2000	80,05	971,90	4198,05
2001-2282	87,72	967,24	4204,77

Dengan hasil tabel distribusi suhu di atas, maka perpindahan kalor dan *heat flux* rata-rata yang terjadi di *heater* dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Perpindahan kalor dan *heat flux*.

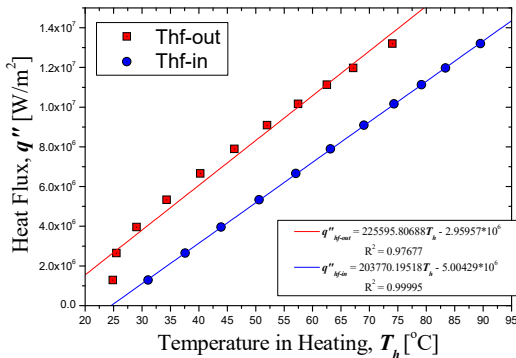
Set Point ($^{\circ}\text{C}$)	Q (J)	\dot{Q}_{avg} (W)	\dot{q}_{avg} (W/m^2)
60	486040,2	465,55	28624,42
70	487591,6	359,58	22108,62
80	487708,9	284,37	17484,84
90	496814,6	217,71	13385,78

Gambar 3 dan 4 di bawah ini, memberikan gambaran linieritas kenaikan suhu air terhadap waktu yang dibutuhkan.



Gambar 3. Transient heating characteristic.

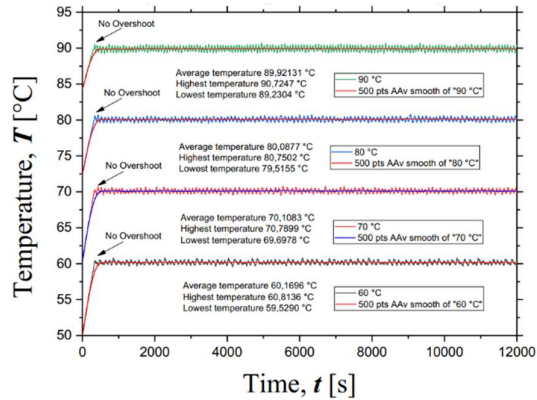
Pada kondisi *transient heating* yang ditunjukkan pada Gambar 3, *heater* dapat mencapai kondisi *set point* dari suhu awal rata-rata 26°C menuju 60°C dalam 1045 detik, 70°C dalam 1356 detik, 80°C dalam 1715 detik dan 90°C dalam 2282 detik, nilai ini menunjukkan hasil yang lebih baik dari FASSIP-02, di mana untuk mencapai *set point* 60°C membutuhkan 3178 detik [14]. Hasil linieritas *heater* dalam *transient heating* menunjukkan performa yang baik dengan nilai R² rata – rata sebesar 0,9965. Dengan demikian, hasil *transient heating* pada *heater* FASSIP-05 berbanding lurus dengan *heater* serupa pada FASSIP-03 [15].



Gambar 4. Heat flux in heater section.

Hubungan suhu air masuk (*Thf-in*) yang melawati *heater* dengan *heat flux* yang diberikan oleh *heater* menunjukkan hasil linieritas R² sebesar 0,97677 dan air yang keluar setelah *heater* (*Thf-out*) dengan R² sebesar 0,99995. Keandalan *heater* juga perlu dilihat pada kondisi keadaan tunak, di mana kondisi ini akan mempertahankan suhu *set point Thf-out* selama 3 jam setelah *transient heating*. Gambar 5 di bawah ini, menunjukkan grafik perbandingan *Thf-out* 60°C, 70°C, 80°C, dan 90°C dalam kondisi keadaan tunak, ketiga suhu tersebut menampilkan deviasi yang bagus terhadap nilai *set-point* dengan nilai rata-rata suhu yang dipertahankan selama 3 jam ialah 60,16°C, 70,10°C, 80,08°C, dan 89,92°C, selain itu dalam perpindahan kondisi *transient heating* ke keadaan tunak menunjukkan kenaikan suhu yang *smooth*, dengan nilai *overshot* semakin tinggi suhu *set point*

semakin kecil nilainya, seperti ditunjukkan pada Tabel 6 berikut.

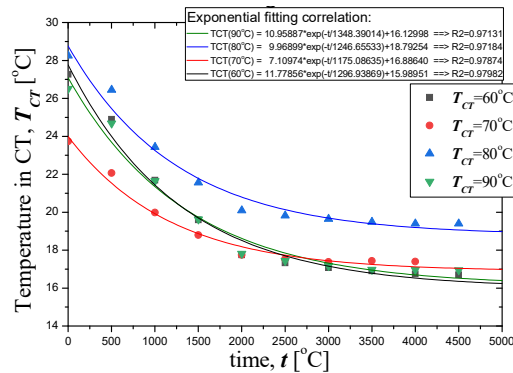


Gambar 5. Steady state temperature stability.

Tabel 6. Nilai overshoot.

Set Point (°C)	Overshot tertinggi (°C)	Persentase (%)
60	60,81	2,4
70	70,78	1,8
80	80,75	1,4
90	90,71	1,1

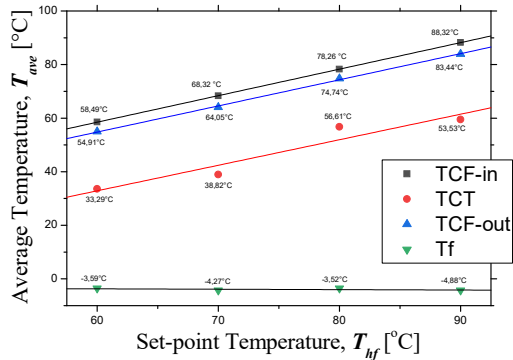
Cooler sebagai *heat exchanger* pada FASSIP-05 memiliki peranan yang sangat penting dalam pendinginan pasif. Keandalan *cooler* ditunjukkan dengan seberapa besarnya kalor yang dapat diambil dari aliran fluida panas yang melewatinya. Pada awal pendinginan, *cooler* dioperasikan hingga mencapai suhu maksimalnya, Gambar 6 menunjukkan suhu terendah yang dapat dicapai pada *cooling tank* adalah 16,69801°C dari suhu 27,2616°C dalam 4501 detik, dengan linieritas R² sebesar 0,97.



Gambar 6. Pre-cooler cooling tank characteristics.

Komisioning *cooler* juga diamati pada kondisi operasi keadaan tunak, di mana pada kondisi ini *cooler* akan terus dihidupkan untuk menjaga fluida panas yang melewatinya menjadi lebih dingin dan kembali ke *heater*. Gambar 7 di bawah ini, memberikan informasi di mana suhu fluida masuk (*Tcf-in*) dengan keluar (*Tcf-out*) memiliki deviasi sebesar 3,58°C, 4,26°C, 3,51°C, dan 4,87°C dengan rata-rata keandalan *cooler*

dalam mengambil panas dari fluida sebesar 4,06°C dan suhu air dalam *cooling tank* (*Tct*) terus naik, tidak dapat dipertahankan dalam suhu kamar (28-29°C), kondisi ini masih di bawah hasil *cooler* FASSIP-01 yang mana pengambilan panas mencapai 7°C.



Gambar 7. Steady state cooling tank reliability.

Berdasarkan data distribusi suhu di bagian *cooler* (ditunjukkan oleh Tabel 7), maka dapat dihitung sifat fisik air dan kalornya dengan Persamaan (1)-(5) di atas, sehingga hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 8 di bawah ini.

Tabel 7. Distribusi suhu dan sifat fisik air cooler.

Tcf-in (°C)	Tcf-out (°C)	$\rho_{rata-rata}$ (kg/m ³)	$C_{p,rata-rata}$ (J/kg. K)
58,49	54,91	984,25	4183,89
68,32	64,05	979,58	4188,55
78,26	74,74	973,97	4195,30
88,32	83,44	968,39	4203,06

Tabel 8. Perpindahan kalor dan heat flux.

Set Point (°C)	Q (J)	\dot{Q}_{avg} (W)	\dot{q}_{avg} (W/m ²)
60	2985,97	0,28	821,54
70	3540,50	0,33	974,11
80	3943,41	0,36	1084,97
90	4013,22	0,37	1104,18

4. Kesimpulan

Investigasi hasil komisioning FASSIP-05 telah dilakukan, di mana *heater* menunjukkan keandalan yang cukup baik dengan waktu yang dibutuhkan mencapai kondisi *set point* dari suhu awal rata-rata 26°C menuju 60°C dalam 1045 detik, 70°C dalam 1356 detik, 80°C dalam 1715 detik, dan 90°C dalam 2282 detik secara *smooth* dengan nilai kepercayaan data R^2 rata-rata mencapai 0,9965 dan nilai *overshot* terendah 1,1% saat beralih ke kondisi tunak. Selain itu, kestabilan menahan suhu *setpoint* juga terbilang baik dengan nilai rata-rata 60,17°C, 70,11°C, 80,09°C, dan 89,92°C. Sedangkan daya serap kalor menunjukkan nilai yang perlu ditingkatkan, di mana nilai terendahnya 217,71 W (5,4%) dan tertinggi

465,55 W (11,64%) dari 4000 W sumber *heater*. Keandalan *cooler* perlu ditingkatkan, di mana proses pendinginan tangki dari 27,26°C ke 16,69°C memerlukan waktu 4501 detik, dengan rata-rata kenaikan suhu 0,00235°C/detik. Keandalan pengambilan panas (ΔT) pada kondisi tunak adalah 4,06°C dan daya penyerapan kalor tertinggi hanya 0,37 W, serta kemampuan mempertahankan suhu air dalam *cooling tank* juga menunjukkan nilai yang kurang baik, di mana suhu air terus naik melebihi suhu kamar (28-29 °C).

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM) Gelombang 1 LPDP Mandatori KEMENKEU-BRIN periode 2022-2025 (3 tahun) dengan nomor kontrak B-811/II.7.5/FR/6/200 dan B 2103/III.2/HK.04.03/7/2022. Terima kasih disampaikan kepada Pendanaan dari Rumah Program PRTRN-BRIN dengan kode proposal riset D1463. Terima kasih juga disampaikan kepada Kepala Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir ORTN-BRIN dan Mahasiswa MBKM UNJ Gelombang 1 tahun 2023 atas dukungannya.

Daftar Pustaka

- [1] A. R. Antariksawan. 2000, Accident Analysis of PWR Station Blackout with Pump Seal Leak Using Melcor 1.8. 4. Proceeding Semonar on Technology and Safety of Nuclear Power Plant and Nuclear Facilities
- [2] M. Juarsa, A. R. Antariksawan, M. H. Kusuma, S. Widodo, N. Putra. 2019, The effect of power and cooler flow on time responds of flow stability in natural circulation phenomenon using FASSIP-01 loop. AIP Conference Proceedings, 2062. <https://doi.org/10.1063/1.5086555>
- [3] J. Ahn, C. Carson, M. Jensen, Kohta, J. Shinya, N. Satoru. 2015, Reflections on the Fukushima Daiichi Nuclear Accident Toward Social-Scientific Literacy and Engineering Resilience. New York. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12090-4>
- [4] M. Juarsa, J. H. Purba, H. M. Kusuma, T. Setiadipura, S. Widodo. 2014, Preliminary Study on Mass Flow Rate in Passive Cooling Experimental Simulation During Transient Using NC-Queen Apparatus INTRODUCTION. Vol. 40, Issue 3.
- [5] H. Tjahjono. 2017, Comprehensive prediction of thermosyphon characteristics in reactor passive cooling system simulation loop FASSIP-01. Atom Indonesia, 43(3), 157-166. <https://doi.org/10.17146/aij.2017.777>
- [6] A. S. Alamin. 2022, Analisis Perubahan Energi Termal Berdasarkan Variasi Temperatur Air di dalam Tangki Heater Untai Uji FASSIP-02. Diploma thesis, Universitas Andalas.

- [7] D. Haryanto, A. Rosidi, K. G. B. Heru, G. Giarno, M. Juarsa, T. Dermawan, R. N. Wijaya, Y. Yunus. 2022, Perhitungan dan Penentuan Jenis Aliran pada Untai FASSIP-03 NT Saat Komisioning Berdasarkan Variasi Daya Heater. *Prosiding Sains Nasional Dan Teknologi*, 12(1), 90.
<https://doi.org/10.36499/psnst.v12i1.7196>
- [8] D. Yuliaji, R. Waluyo, G. E. Pramono, P. H. Setiawan, M. Juarsa. 2023, Uji Komisioning Fasilitas Sistem Simulasi Pasif 04 Versi 2 (FASSIP 04 Ver.2) Untuk Studi Kemampuan Pendinginan Pasif Pada Sistem Keselamatan Reaktor Nuklir. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Vol.9, No.1
- [9] M. A. Basyit, J. Triyono, E. Surojo. 2020. Analisis laju korosi dan keausan spesifik pada artificial hip joint Cr coated SS304. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, Vol. 15 No. 2 Hal. 39-42.
<https://doi.org/10.36289/jtmi.v15i2.167>
- [10] H. Adrian, I. Roswandi, H. A. Gunawan, Sanda, R. Sukarno, D. R. B. Syaka, M. Juarsa. 2023, Perhitungan Estimasi Laju Aliran Sirkulasi Alami Pada Untai Bertekanan Fassip-05. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* Vol. 9 No. 2 Hal. 86 – 92.
<https://doi.org/10.32832/ame.v9i2>
- [11] Crabtree, Siman-Tov. 1993, Thermophysical properties of saturated light and heavy water for advanced neutron source applications.
- [12] R. Asfaranda, R. I. Mainil, A. Aziz. 2021, Kaji Eksperimental Direct-Expansion Solar-Assisted Heat Pump Water Heater Kapasitas 60 Liter Dengan Menggunakan Refrigeran R134A. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, Vol. 6 No. 2 Hal. 45 – 49.
<https://doi.org/10.36289/jtmi.v16i2.240>
- [13] Y. A. Cengel, A. J. Ghajar. 2015, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*, Fifth Edition (5 ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- [14] G. Giarno, K. G. B. Heru, A. Rosidi, D. Haryanto, E. P. Andhika, M. Juarsa. 2022, Karakteristik Energi Internal Penukar Kalor Berdasarkan Variasi Suhu Pemanas Sirkulasi Alam Untai Uji FASSIP-02. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, Vol. 17 No. 1 Hal. 48-51.
<https://doi.org/10.36289/jtmi.v17i1.283>
- [15] D. Haryanto, A. Rosidi, K. Prayogo, M. Juarsa. 2023, Investigasi Kinerja Ceramic Band Heater Pada Heating Tank Section Untai FASSIP-03 NT. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* Vol. 9 No. 2. Hal. 64 - 72.
<https://doi.org/10.32832/ame.v9i2>