

## **KESETIMBANGAN TERMAL PADA FASILITAS UNTAI FASSIP-03 NT BERDASARKAN PERBEDAAN TEMPERATUR PADA HEATING TANK SECTION DAN COOLING TANK SECTION**

Dedy Haryanto<sup>1</sup>, Ainur Rosidi<sup>1</sup>, G. Bambang Heru K.<sup>1</sup>, Giarno<sup>1</sup>, Mulya Juarsa<sup>1</sup>, Totok Dermawan<sup>2</sup>, Rio Natanael Wijaya<sup>2</sup>, Yadi Yunus<sup>2</sup>

Organisasi Tenaga Nuklir-Pusat Riset dan Teknologi Reaktor Nuklir-BRIN<sup>1</sup>  
Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia-BRIN<sup>2</sup>

email : [dedy004@brin.go.id](mailto:dedy004@brin.go.id)

### **ABSTRACT**

*The station blackout (SBO) incident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011 in Japan became an important background for research activities on the passive cooling systems in nuclear reactor safety technology. The effect of changes in fluid density in hot areas causes a buoyancy force and the effect of changes in fluid density in cold conditions causes a gravitational force so that natural circulation occurs in the working fluid (water) along inside the loop. The research aimed to determine the operating limits for the experiment based on the results of the thermal energy balance analysis during commissioning. The research was carried out experimentally based on variations in water temperature settings in the heating tank and electric power in the heater (voltage regulator variations). The analysis was carried out based on the graph of temperature data and the calculation of the thermal energy balance that occurred in the FASSIP 03 NT Loop during commissioning. The results of the thermal energy balance analysis provide data on the quantity of energy rate changes in each part of the FASSIP-03 NT Loop, such as in the cooler, heater, and piping during the commissioning process. The analysis value shows that the percentage of temperature difference in The helical heat exchanger inside The heating tank ( $\Delta T_{HTS}$ ) and inside The cooling tank ( $\Delta T_{CTS}$ ) is in the range of 7.61% - 15.14% with an average of 10.31%. The temperature difference between bycatch ( $\Delta T_{HTS}$ ) and CTS ( $\Delta T_{CTS}$ ) is not so large that it almost reaches the attainment of thermal energy in the FASSIP-03 NT strand.*

**Keywords:** FASSIP-03 NT Loop, nuclear reactor safety, passive cooling, thermal energy balance.

### **ABSTRAK**

Kejadian *station blackout* (SBO) pada PLTN Fukushima Daiichi pada Maret 2011 di Jepang menjadi latar belakang yang penting untuk kegiatan penelitian tentang sistem pendinginan pasif pada teknologi keselamatan reaktor nuklir. Pengaruh perubahan densitas fluida di daerah panas menimbulkan gaya apung (*buoyancy force*) dan pengaruh perubahan densitas fluida pada keadaan dingin menimbulkan gaya gravitasi (*gravitational force*) sehingga terjadi sirkulasi alam pada fluida kerja (air) di sepanjang untai. Tujuan penelitian dilakukan untuk menentukan batasan operasi untuk eksperimen berdasarkan hasil analisis kesetimbangan energi termal selama komisioning. Penelitian dilakukan secara eksperimental berdasarkan variasi *setting* temperatur air dalam tangki pemanas dan daya listrik di *heater* (variasi tegangan regulator). Analisis dilakukan berdasarkan grafik data temperatur dan perhitungan kesetimbangan energi termal yang terjadi pada untai FASSIP 03 NT selama komisioning. Hasil analisis kesetimbangan energi termal memberikan data kuantitas perubahan energi pada setiap bagian dari Untai FASSIP-03 NT, yaitu di pendingin, pemanas dan pemipaan selama proses komisioning berlangsung. Nilai analisis menunjukkan bahwa prosentase perbedaan selisih temperatur di penukar kalor *helical* dalam tangki pemanas ( $\Delta T_{HTS}$ ) dan di dalam tangki pendingin ( $\Delta T_{CTS}$ ) pada rentang 7,61% - 15,14% dengan rata-rata 10,31%. Selisih temperatur antara HTS ( $\Delta T_{HTS}$ ) dan CTS ( $\Delta T_{CTS}$ ) tidak begitu besar yang mengindikasikan hampir mencapai kesetimbangan energi termal pada untai FASSIP-03 NT.

**Kata kunci:** untai FASSIP-03 NT, keselamatan reaktor nuklir, pendingin pasif, kesetimbangan energi termal.

## PENDAHULUAN

Kegiatan penelitian yang akan dilakukan dilatarbelakangi oleh kejadian kecelakaan pada PLTN Fukushima Daiichi, Maret 2011 di Jepang. Kecelakaan terjadi karena adanya tsunami dan luapan air laut melebihi batas ketinggian tembok penghalang sehingga air laut merendam generator cadangan. Akibatnya generator rusak sehingga catu daya listrik untuk pompa pendingin mati. Berdasarkan kecelakaan tersebut diperlukan suatu sistem keselamatan yang dapat menyelamatkan reaktor dari kecelakaan akibat gagal pendinginan. Pemanfaatan sistem pendingin pasif pada sistem pengambilan kalor pada teras reaktor sebagai sistem keselamatan bantu ketika terjadi kecelakaan menjadi salah satu pilihan. Sistem pendingin pasif diharapkan dapat beroperasi ketika seluruh sistem reaktor mengalami kejadian *station blackout* (SBO) [1]-[2].

Untai uji Fasilitas Simulasi Sistem Pasif (FASSIP) merupakan fasilitas uji eksperimen sistem pendingin pasif untuk pengambilan panas sisa hasil peluruhan yang dihasilkan oleh teras reaktor selama kondisi kecelakaan [3]-[6]. Beberapa fasilitas uji simulasi telah dibuat untuk penelitian tentang pendinginan pasif. Fasilitas-fasilitas tersebut adalah fasilitas uji FASSIP-01 kemudian dikembangkan dengan membangun fasilitas uji FASSIP-02 dan dilanjutkan dengan FASSIP-02 mod.1. Pada tahun 2021 mulai dibuat desain untaian uji Fasilitas Simulasi Sistem Pasif-03 *Nanobubble Transparent* (FASSIP-03 NT) yang menggunakan fluida *Nanobubbles*. Fasilitas penelitian ini mempunyai keterbaruan dibandingkan dengan fasilitas yang telah dibuat sebelumnya. Keterbaruan dengan dilengkapinya *helical heat exchanger* pada *Heating Tank System* (HTS) dan *Cooling Tank System* (CTS) menjadikan fasilitas ini lebih mudah terjadi perpindahan kalor pada fluida kerja. Sehingga fasilitas ini dapat lebih mudah menghasilkan sirkulasi alami pada fluida kerja tanpa memerlukan daya listrik untuk memompa fluida kerja.

Kegiatan penelitian ini dilakukan saat komisioning untaian FASSIP-03 NT, dimana komisioning perlu dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja fasilitas penelitian ini [7]. Pada penelitian kali ini dilakukan pengoperasian dan perekaman data temperatur yang bertujuan untuk mengetahui kesetimbangan termal pada untaian FASSIP-03 NT. Diharapkan kesetimbangan termal dapat terjadi walaupun pada pemipaan dan komponen untaian FASSIP-03 NT belum dilengkapi dengan isolator termal.

## TEORI

Kesetimbangan energi termal pada untaian FASSIP-03 NT akan diperoleh jika kalor yang diterima oleh *helical heating heat exchanger* sama dengan kalor yang dilepaskan oleh *helical cooling heat exchanger* ( $q_H \approx q_C$ ) [8]. Beberapa laju perubahan energi kalor yang terjadi pada untaian FASSIP-03 NT adalah laju perubahan energi kalor yang dilepaskan oleh catu daya listrik ( $q_S$ ), laju perubahan energi kalor yang diterima oleh *helical heating heat exchanger* ( $q_H$ ), laju perubahan energi kalor pada fluida disisi *hot-leg* ( $q_{Hot-Leg}$ ), laju perubahan energi kalor yang dilepaskan oleh *helical cooling heat exchanger* ( $q_C$ ), laju perubahan energi kalor yang diterima oleh air pendingin CTS ( $q_{CTS}$ ) dan laju perubahan energi kalor pada fluida kerja disisi *cold-leg* ( $q_{Cold-Leg}$ ). Besar laju perubahan energi dipengaruhi oleh perbedaan temperatur ( $\Delta T$ ) pada masing-masing bagian di sistem fasilitas untaian FASSIP-03 NT. Perhitungan laju perubahan energi kalor menggunakan Persamaan (1) [9]:

$$q = \dot{m} \cdot c_p (T_2 - T_1), \quad (1)$$

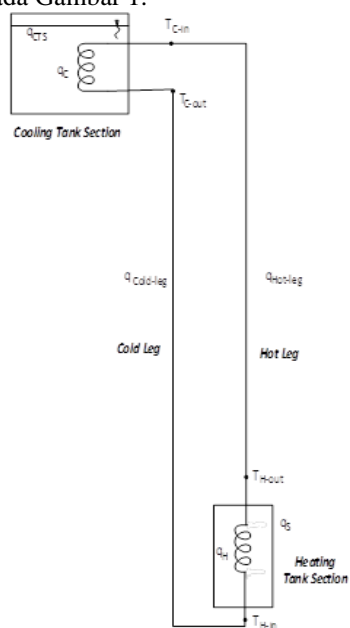
$$T_2 - T_1 = \Delta T$$

$$q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T,$$

dengan,  $q$  = laju perubahan energi kalor (kW),  
 $\dot{m}$  = laju masa aliran (kg/s),

$cp$  = kalor jenis air (kJ/kg K),  
 $T_2$  dan  $T_1$  = temperatur dengan  $T_2 > T_1$ .

Penyebaran laju perubahan energi dan temperatur pada untai FASSIP-03 NT ditunjukkan pada Gambar 1.



Keterangan;

- $q_{CTS}$  = Laju perubahan energi yang diterima oleh air pendingin CTS
- $q_C$  = Laju perubahan energi yang dilepaskan oleh *helical cooling heat exchanger*
- $q_{Cold-Leg}$  = Laju perubahan energi pada fluida kerja disisi *cold-leg*
- $q_H$  = Laju perubahan energi yang diterima oleh *helical heating heat exchanger*
- $q_S$  = Daya yang digunakan oleh pemanas listrik
- $q_{Hot-Leg}$  = Laju perubahan energi pada fluida disisi *hot-leg*
- $T_{C-in}$  = temperatur input *Cooling Tank Section* (CTS)
- $T_{C-out}$  = temperatur output *Cooling Tank Section* (CTS)
- $T_{H-in}$  = temperatur input *Heating Tank Section* (HTS)
- $T_{H-out}$  = temperatur output *Heating Tank Section* (HTS)

Gambar 1. Skema penyebaran laju perubahan energi dan temperature pada untai FASSIP-03 NT

Perhitungan selisih temperatur pada HTS dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2):

$$\Delta T_{HTS} = T_{H-out} - T_{H-in} , \quad (2)$$

dengan,  $\Delta T_{HTS}$  = selisih temperatur pada HTS (°C),  
 $T_{H-out}$  = temperatur output HTS (°C),  
 $T_{H-in}$  = temperatur input HTS (°C).

Perhitungan selisih temperatur pada sisi *hot-leg* dapat ditentukan menggunakan Persamaan (3):

$$\Delta T_{Hot-Leg} = T_{H-out} - T_{C-in} , \quad (3)$$

dengan,  $\Delta T_{Hot-leg}$  = selisih temperatur pada *hot-leg* (°C),  
 $T_{H-out}$  = temperatur output HTS (°C),  
 $T_{C-in}$  = temperatur input CTS (°C).

Perhitungan selisih temperatur pada CTS dapat ditentukan menggunakan Persamaan (4):

$$\Delta T_{CTS} = T_{C-in} - T_{C-out} , \quad (4)$$

dengan,  $\Delta T_{CTS}$  = selisih temperatur pada CTS (°C),  
 $T_{C-in}$  = temperatur input CTS (°C),  
 $T_{C-out}$  = temperatur output CTS (°C).

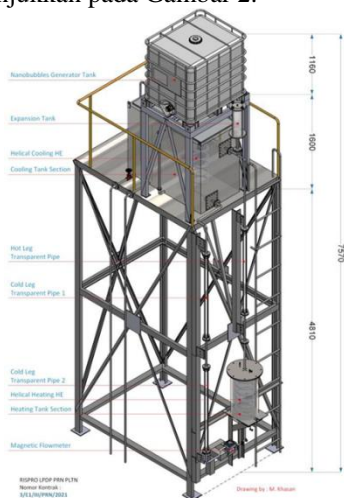
Perhitungan selisih temperatur pada sisi *cold-leg* dapat ditentukan menggunakan Persamaan (5):

$$\Delta T_{Cold-Leg} = T_{C-out} - T_{H-in} , \quad (5)$$

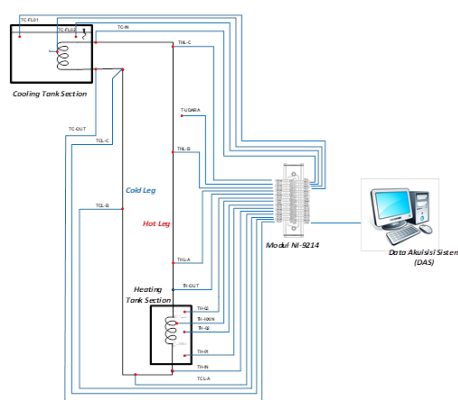
dengan,  $\Delta T_{Cold-Leg}$  = selisih temperatur pada *cold-leg* (°C),  
 $T_{C-out}$  = temperatur output CTS (°C),  
 $T_{H-in}$  = temperatur input HTS (°C).

## METODOLOGI PENELITIAN

Untai FASSIP-03 NT merupakan fasilitas penelitian sistem pendingin pasif menggunakan *Heating Tank* kontak tak langsung dan menggunakan *nanobubbles* sebagai fluida kerja. FASSIP-03 NT terdiri dari komponen *Nanobubbles Generator Tank*, *Expansion Tank*, *Cooling Tank Section* (CTS) yang dilengkapi dengan *helical cooling heat exchanger*, *hot-leg transparent pipe*, *cold-leg transparent pipe 1 dan 2*, *Heating Tank Section* (HTS) yang dilengkapi dengan *helical heating heat exchanger* serta *hot-leg transparent pipe* dimana seluruh komponen tersebut dihubungkan menggunakan pipa 1 inchi sch. 40 sehingga menjadi suatu untai/loop, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Sedangkan pengambilan data temperatur pada fasilitas untai FASSIP-03 NT ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Untai FASSIP-03 NT

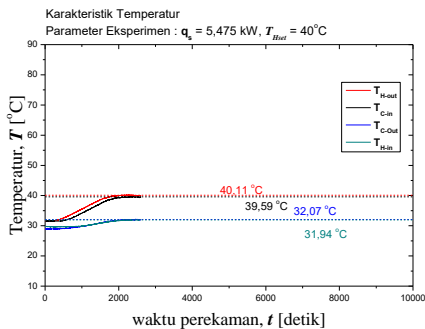


Gambar 2. Pemasangan termokopel

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian menggunakan fasilitas untai FASSIP-03 NT ini secara umum adalah mengoperasikan fasilitas tersebut dan melakukan perekaman data meliputi data temperatur dan data laju alir. Data temperatur diukur menggunakan termokopel yang telah terpasang pada untai FASSIP-03 NT seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Sedangkan data laju alir diukur menggunakan alat ukur flowmeter yang terpasang pada sistem pemipaan untai FASSIP-03 NT. Data-data tersebut terekam dan tersimpan pada Data Akuisisi Sistem (DAS), disamping itu DAS berfungsi untuk melakukan penyettingan temperatur dalam pengoperasian untai FASSIP-03 NT.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

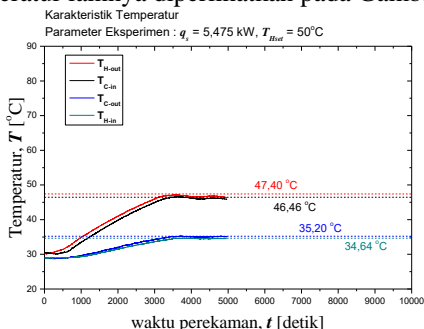
Berdasarkan eksperimen dengan matriks penelitian yang sudah diselesaikan dimana eksperimen dilakukan berdasarkan variasi daya pada *heater* dan *setting* temperatur di HTS untai FASSIP-03 NT. Hasil eksperimen berupa grafik karakteristik temperatur pada daya 5,475 kW dan *setting* temperatur 40 °C ditunjukkan pada Gambar 3.



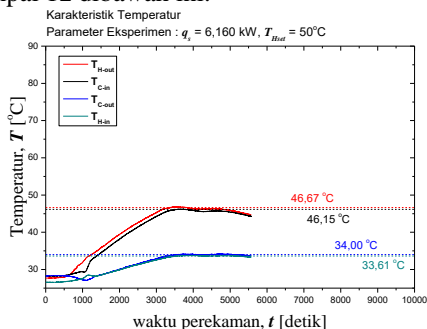
Gambar 3. Daya 5,475 kW dan  $T_{setting}$  40 °C

Gambar 3 menunjukkan besaran  $T_{H-out}$  sebesar 40,11 °C pada kondisi tunak, kemudian  $T_{H-out}$  mengalami penurunan temperatur disepanjang sisi *hot-leg* hingga mencapai 39,59 °C pada  $T_{C-in}$  dengan selisih 0,52 °C. Penurunan ini terjadi karena kebocoran kalor ke lingkungan sepanjang sisi *hot-leg* yang disebabkan belum dilengkapinya pemipaan dengan isolator panas. Sedangkan pengambilan kalor yang terjadi pada CTS mengakibatkan penurunan temperatur menjadi 32,07 °C pada  $T_{C-out}$ . Sementara di sepanjang sisi *cold-leg* terjadi penurunan temperatur karena kebocoran kalor ke lingkungan karena kondisi pemipaan yang belum dilengkapi dengan isolator panas, sehingga temperatur fluida kerja menjadi 31,94 °C pada  $T_{H-in}$  dengan selisih 0,13 °C.

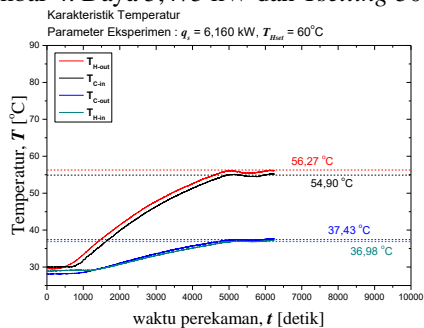
Proses yang sama terjadi pada karakteristik temperatur pada *setting* daya dan *setting* temperatur lainnya di untai FASSIP-03 NT. Grafik hasil karakteristik pada *setting* daya dan *setting* temperatur lainnya diperlihatkan pada Gambar 4 sampai 12 dibawah ini.



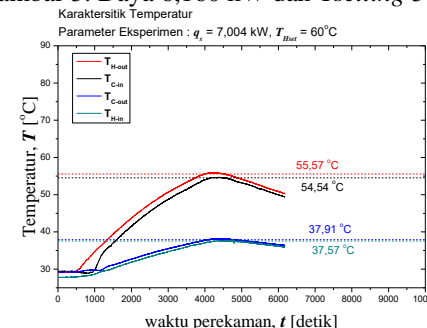
Gambar 4. Daya 5,475 kW dan  $T_{setting}$  50 °C



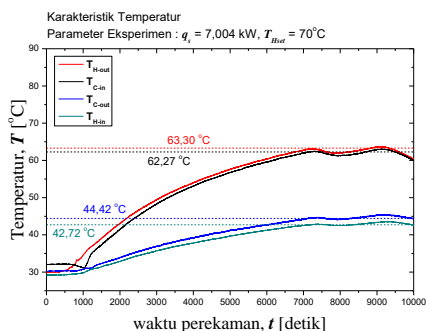
Gambar 5. Daya 6,160 kW dan  $T_{setting}$  50 °C



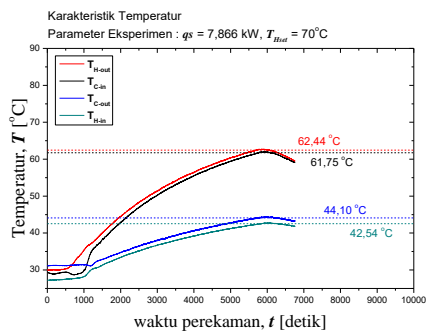
Gambar 6. Daya 6,160 kW dan  $T_{setting}$  60 °C



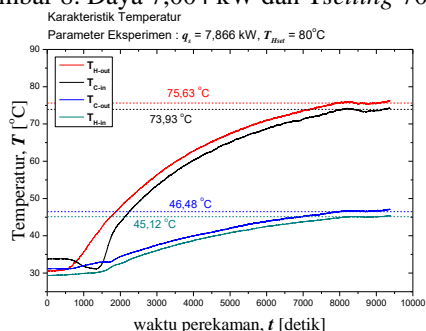
Gambar 7. Daya 7,004 kW dan  $T_{setting}$  60 °C



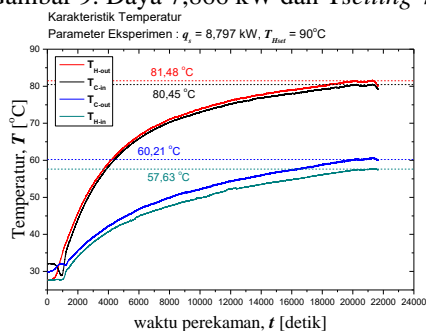
Gambar 8. Daya 7,004 kW dan  $T_{setting}$  70 °C



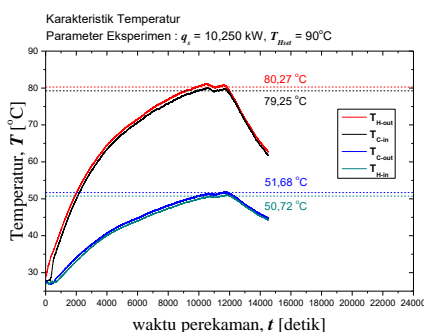
Gambar 9. Daya 7,866 kW dan  $T_{setting}$  70 °C



Gambar 10. Daya 7,866 kW dan  $T_{setting}$  80 °C.



Gambar 11. Daya 8,977 kW dan  $T_{setting}$  90 °C



Gambar 12. Daya 10,250 kW dan  $T_{setting}$  90 °C.

Selisih temperatur pada bagian-bagian untai FASSIP-03 NT terdiri dari selisih temperatur pada HTS ( $\Delta T_{HTS}$ ) dihitung menggunakan Persamaan (2), selisih temperatur pada sisi *hot-leg* ( $\Delta T_{Hot-Leg}$ ) dihitung menggunakan Persamaan (3), selisih temperatur pada CTS ( $\Delta T_{CTS}$ ) dihitung menggunakan Persamaan (4), dan selisih temperatur pada sisi *cold-leg* ( $\Delta T_{Cold-Leg}$ ) dihitung menggunakan Persamaan (5). Perhitungan selisih temperatur pada bagian-bagian untai FASSIP 03 NT berdasarkan *setting* daya listrik pemanas dan *setting* temperatur pemanas ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Selisih temperatur pada bagian-bagian untai FASSIP-03 NT berdasarkan *setting* daya listrik pemanas dan *setting* temperatur pemanas pada kondisi tunak

$T_{Setting}$ (°C)	$q_{Setting}$ (kW)	$T_{H-out}$ (°C)	$T_{H-in}$ (°C)	$T_{C-in}$ (°C)	$T_{C-out}$ (°C)	$\Delta T_{HTS}$ (°C)	$\Delta T_{Hot-Leg}$ (°C)	$\Delta T_{CTS}$ (°C)	$\Delta T_{Cold-Leg}$ (°C)
40	5,475	40,11	31,94	39,59	32,07	8,17	0,52	7,52	0,13
50	5,475	47,40	34,64	46,46	35,20	12,76	0,94	11,26	0,56

50	6,160	46,67	33,61	46,15	34,00	13,06	0,52	12,15	0,39
60	6,160	56,27	36,98	54,90	37,43	19,29	1,37	17,47	0,45
60	7,004	55,57	37,57	54,54	37,91	18,00	1,03	16,63	0,34
70	7,004	63,30	42,72	62,27	44,42	20,58	1,03	17,85	1,70
70	7,866	62,44	42,54	61,75	44,10	19,90	0,69	17,65	1,56
80	7,866	75,63	45,12	73,93	46,48	30,51	1,70	27,45	1,36
90	8,797	81,48	57,63	80,45	60,21	23,85	1,03	20,24	2,58
90	10,250	80,27	50,72	79,25	51,68	30,70	1,02	27,57	0,96

Berdasarkan hasil perhitungan Tabel 1, selisih temperatur pada bagian *hot leg* ( $\Delta T_{\text{Hot-Leg}}$ ) dan *cold leg* ( $\Delta T_{\text{Cold-Leg}}$ ) tidak besar, dengan rentang 0,13 – 2,58 °C. Kondisi ini menunjukkan bahwa kerugian kalor ke lingkungan (*heat loss*) tidak besar meskipun pemipaan belum dilengkapi dengan isolator panas. Selisih temperatur pada komponen CTS ( $\Delta T_{\text{CTS}}$ ) pada rentang 7,52 – 27,57 °C. Selisih temperatur ini terjadi karena adanya pengambilan kalor oleh fluida sekunder di CTS. Selisih temperatur terbesar pada bagian untai FASSIP-03 NT adalah pada komponen HTS ( $\Delta T_{\text{HTS}}$ ) dengan rentang 8,17 – 30,70 °C, hal ini akibat adanya pemanas listrik yang berfungsi menaikkan temperatur fluida kerja agar densitasnya menurun dan sirkulasi alamiah terjadi. Rentang kenaikan temperatur pada HTS dan CTS besar hal ini juga dipengaruhi adanya keterbaruan pada kedua komponen tersebut. Pada HTS dilengkapi dengan *helical heating heat exchanger* dan pada CTS dilengkapi dengan *helical cooling heat exchanger* yang berfungsi untuk memperluas permukaan kontak sehingga perpindahan panas lebih mudah terjadi. Dimana ukuran *geometrical* kedua *helical heat exchanger* adalah sama.

Tabel 2. Prosentase perbedaan temperature pada  $\Delta T_{\text{HTS}}$  dan  $\Delta T_{\text{CTS}}$

$T_{\text{setting}}$ (°C)	$q_{\text{setting}}$ (kW)	$\Delta T_{\text{HTS}}$ (°C)	$\Delta T_{\text{CTS}}$ (°C)	Perbedaan temperatur (%)
40	5,475	8.17	7.52	7.96
50	5,475	12.76	11.26	11.76
50	6,160	13.06	12.15	6.97
60	6,160	19.29	17.47	9.43
60	7,004	18	16.63	7.61
70	7,004	20.58	17.85	13.27
70	7,866	19.9	17.65	11.31
80	7,866	30.51	27.45	10.03
90	8,797	23.85	20.24	15.14
90	10,250	30.7	27.57	10.20

Selisih temperatur di HTS ( $\Delta T_{\text{HTS}}$ ) dan CTS ( $\Delta T_{\text{CTS}}$ ) tidak begitu besar yang mengindikasikan hampir mencapai kesetimbangan energi termal. Prosentase perbedaan selisih temperatur di HTS ( $\Delta T_{\text{HTS}}$ ) dan CTS ( $\Delta T_{\text{CTS}}$ ) pada rentang 7,61% - 15,14% dengan rata-rata 10,31%. Perbedaan ini mengakibatkan perbedaan kalor yang diterima oleh *helical heating heat exchanger* hampir sama dengan kalor yang dilepaskan oleh *helical cooling heat exchanger* ( $q_H \approx q_C$ ). Sehingga kesetimbangan energi pada fasilitas untai FASSIP-03 NT diindikasikan hampir tercapai.

## KESIMPULAN

Karakteristik perubahan temperatur pada untai FASSIP-03 NT berdasarkan variasi daya pemanas listrik HTS didapatkan rentang kenaikan temperatur pada HTS dan CTS besar karena dipengaruhi adanya keterbaruan pada kedua komponen sehingga mempermudah terjadinya perpindahan kalor. Pada HTS dilengkapi dengan *helical heating heat exchanger* dan pada CTS

dilengkapi dengan *helical cooling heat exchanger* yang berfungsi untuk memperluas permukaan kontak sehingga perpindahan panas lebih mudah terjadi. Selisih temperatur antara HTS ( $\Delta T_{HTS}$ ) dan CTS ( $\Delta T_{CTS}$ ) tidak begitu besar yang mengindikasikan hampir mencapai kesetimbangan energi termal. Presentase perbedaan selisih temperatur di HTS ( $\Delta T_{HTS}$ ) dan CTS ( $\Delta T_{CTS}$ ) pada rentang 7,61% - 15,14% dengan rata-rata 10,31%.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ucapkan terima kasih atas dukungan yang diberikan oleh; Riset Inovatif Produktif (RISPRO) Mandatori Prioritas Riset Nasional Produk PLTN Komersial 2020-2021 dengan judul "Pengembangan Teknologi Pendingin Pasif Berbasis Fluida *Nanobubbles* Untuk Peningkatan Manajemen Keselamatan PLTN Tipe Besar dan SMR" yang telah membiayai penelitian. Kepala Pusat Riset dan Teknologi Reaktor Nuklir, Kepala Kelompok Riset Sistem Termofluida Reaktor Nuklir selaku atasan langsung dan teman-teman Peneliti dan Pranata Nuklir atas diskusi teknis yang telah dilakukan

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Juarsa, M., dkk. 2011. "Studi Eksperimental laju Aliran Massa Air Berdasarkan Perubahan Sudut kemiringan Untai pada Kasus Sirkulasi Alamiah Menggunakan Untai Sirkulasi Alamiah (USSA-FT01)." *Jurnal Material dan Energi Indonesia, Jurusan Fisika FMIPA*, 22-30.
- [2]. Kusuma, M. H., Putra, N., Ismarwanti, S., and Widodo S. 2017. "Simulation of Wickless-Heat Pipe as Passive Cooling System in Nuclear Spent Fuel Pool Using RELAP5/MOD3. 2." *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology (International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology) VII (836-842): 836-842.*
- [3]. Antariksawan, A. R. 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.*
- [4]. Tjahjono, H. 2017. "Comprehensive Prediction of Thermosyphon Characteristics in Reactor Passive Cooling System Simulation Loop FASSIP-01." *Atom Indonesia* 157-166.
- [5]. Sun, D. C., Li, Y., Xi, Z., Zan, Y. F., Li, P. Z., Zhou, W. B., 2017. "Experimental Evaluation of Safety Performance of Emergency Passive Residual Heat Removal System in HPR1000." *Nuclear Engineering Design* 54-60.
- [6]. Wang, Y. 2013. "Preliminary Study for the Passive Containment Cooling System Analysis of the Advanced PWR." *Energy Procedia* 240–247.
- [7]. Juarsa, M., Giarno, Rohman, A. N., Kusnugroho, G. B. H., Witoko, J. P., Tjahyani, D. T. S., 2017. "Flow Rate and Temperature Characteristics in Steady State Condition on FASSIP-01 Loop during Commissioning," *International Conference on Nuclear Technologies and Sciences (ICoNETS 2017)*,. IOP Conf. Series: Journal of Physics.
- [8]. Ningsih, L. F., Sofyan, A. R., Giarno, Haryanto, D., Witoko, J. P., Juarsa, M., 2018. "Estimasi Perhitungan Kalor dan Laju Aliran Kalor pada Untai FASSIP-02,." *Sigma Epsilon*, Mei: 22 (1) 26-34.
- [9]. Holman, J. P., 1997. *Perpindahan Kalor, Edisi Keenam*. Jl. Baping Raya No. 100 Ciracas, Jakarta 13740: Penerbit Erlangga.