

EFISIENSI *HEATING TANK SECTION* PADA KONDISI TUNAK BERDASARKAN VARIASI DAYA PEMANAS

Dedy Haryanto¹, Ainur Rosidi², Putut Hery Setiawan³, Mulya Juarsa⁴

^{1,2,3,4}*Pusat Riset dan Teknologi Reaktor Nuklir (PRTRN), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)*

Gedung 80, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan, 15314, Indonesia

[1dedy004@brin.go.id](mailto:dedy004@brin.go.id), [2ainu001@brin.go.id](mailto:ainu001@brin.go.id), [3putu003@brin.go.id](mailto:putu003@brin.go.id), [4mulya.juarsa@brin.go.id](mailto:mulya.juarsa@brin.go.id)

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 mengetahui unjuk kerja *Heating Tank Section* (HTS) yang dilengkapi dengan keterbaruan berupa *helical heat exchanger*. Penelitian dilakukan secara eksperimental berdasarkan variasi *setting* temperatur air dalam tangki pemanas dan daya listrik di *heater* (variasi tegangan regulator). Berdasarkan hasil perhitungan efisiensi pada HTS (ϵ_H) dengan keterbaruan yang dimilikinya memiliki rentang 45,48% - 99,41% dengan efisiensi rata-rata 82,58%. Efisiensi yang cukup tinggi pada HTS ini menunjukkan bahwa adanya keterbaruan penukar kalor *helical* meningkatkan unjuk kerja pemanasan HTS pada fasilitas Untai FASSIP-03 NT.

Kata kunci: FASSIP-03 NT, *Heating Tank Section*, *Helical Heat Exchanger*.

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 passive cooling system 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) a long inside the loop. The purpose of the study was to determine the performance of the *Heating Tank Section* (HTS) which is equipped with a renewable *helical heat exchanger*. 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). Based on the results of the calculation of the efficiency of the bycatch (ϵ_H) with its renewability, it has a range of 45.48% - 99.41% with an average efficiency of 82.58%. The high efficiency of this bycatch indicates that the novelty of the *helical heat exchanger* improves the heating performance of the bycatch at the FASSIP-03 NT strand facility.

Keywords: FASSIP 03 NT, *Heating Tank Section*, *Helical Heat Exchanger*

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) (Juarsa, 2011) (Kusuma, 2017).

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 (Sun, 2017) (Antariksawan 2000) (Wang, 2013) (Tjahjono, 2017). Beberapa fasilitas uji simulasi telah dibuat oleh PTKRN untuk melakukan 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 untai 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 Section* (HTS) dan *Cooling Tank Section* (CTS) (Juarsa, 2018).

Penelitian ini dilakukan dengan mengoperasikan untai FASSIP-03 NT sehingga dapat diperoleh data hasil pengoperasian berupa temperatur, laju alir fluida kerja tegangan dan arus pada pemanas listrik. Berdasarkan data yang telah diperoleh dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan besar laju perubahan energi yang diterima oleh *helical heating heat exchanger* dan besar daya listrik yang digunakan oleh pemanas listrik. Penelitian bertujuan untuk mengetahui efisiensi pada HTS dilakukan bertujuan untuk mengetahui unjuk kerja HTS yang telah dilengkapi dengan *helical heating heat exchanger*. *Helical heating heat exchanger* berfungsi memperluas permukaan fluida kerja sehingga perpindahan kalor dari sisi sekunder HTS lebih mudah terjadi. Akibatnya HTS menjadi lebih efisien dalam memindahkan energi kalor yang dihasilkan oleh pemanas listrik ke fluida kerja. Dengan HTS yang lebih efisien diharapkan fasilitas ini dapat lebih mudah menghasilkan sirkulasi alami pada fluida kerja tanpa memerlukan daya listrik untuk memompa fluida kerja.

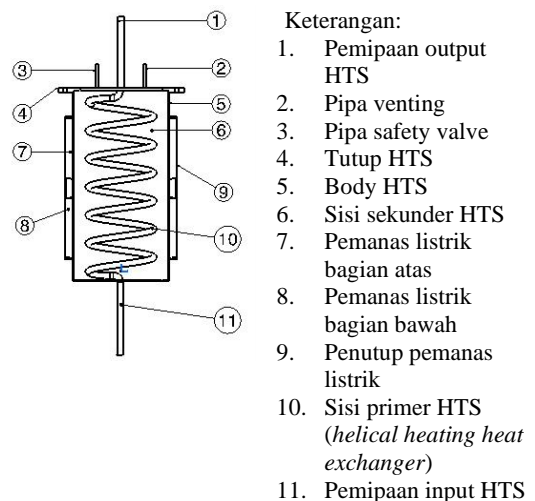
METODOLOGI PENELITIAN

Untai FASSIP-03 NT juga 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*, *Expatation 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 (Haryanto, 2022).



Gambar 1. Untai FASSIP-03 NT
Heating Tank Section (HTS) merupakan salah satu komponen pada fasilitas untai FASSIP-03 NT yang berfungsi sebagai simulator reaktor. Komponen HTS terdiri dari tabung berdiameter 400 mm dengan tebal 3mm, *helical heating heat exchanger* berupa pipa berdiameter 1 inchi berbentuk helical dan pemanas listrik tipe *belt* dengan daya maksimal 12 kW seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Desain Heating Tank Section untai FASSIP 03 NT

Pada HTS seperti ditunjukkan pada Gambar 2, terjadi proses konversi energi dari energi listrik menjadi energi kalor. Energi listrik

digunakan oleh pemanas listrik untuk menghasilkan kalor, dimana kalor yang dihasilkan akan merambat ke sisi sekunder HTS dan menaikkan temperatur air sekunder HTS. Kenaikkan temperatur pada air sekunder dibatasi hingga 90 °C, sehingga tidak terjadi pendidihan dan penguapan atau dipertahankan dalam kondisi saturasi. Kenaikkan temperatur di sisi sekunder HTS akan menyebabkan kenaikan temperatur pada fluida kerja HTS (sisi primer) yang menyebabkan terjadi perubahan densitas pada fluida kerja tersebut. Perhitungan efisiensi perlu dilakukan dikarenakan adanya keterbaruan pada fasilitas untai FASSIP 03 NT pada komponen HTS dengan adanya *helical heating heat exchanger* yang berfungsi untuk memperluas permukaan fluida kerja sehingga fluida kerja pada HTS mudah menerima energi kalor yang dihasilkan oleh pemanas listrik. Pada awalnya dilakukan perhitungan untuk mengetahui laju perubahan energi yang diterima oleh *helical heating heat exchanger* dilakukan dengan Persamaan (1) (Holman, 1997):

$$q_H = \dot{m} c_p (T_{H-out} - T_{H-in}), \quad (1)$$

dengan,

- q_H = laju perubahan energi yang diterima oleh *helical heating heat exchanger* (kW),
- \dot{m} = laju massa aliran (kg/s),
- c_p = kalor jenis fluida (J/kgK),
- T_{H-out} = temperatur output HTS (°C)
- T_{H-in} = temperatur input HTS (°C).

Laju alir yang telah terukur (\bar{Q}) diperoleh dari hasil konversi laju alir dari satuan Liter Per Menit (LPM) menjadi satuannya menjadi m^3/s . Menghitung laju aliran massa (\dot{m}) menggunakan Persamaan (2):

$$\dot{m} = \rho \times \bar{Q}, \quad (2)$$

dengan,

- \dot{m} = laju massa aliran pada sistem (kg/s),
- \bar{Q} = laju alir fluida yang terukur (m^3/s),
- ρ = densitas fluida yang dihitung menggunakan korelasi berdasarkan temperatur fluida (kg/m^3).

Persamaan (3) digunakan untuk menghitung korelasi densitas adalah sebagai berikut (Marietta, 1993):

$$\rho = (A + BT_F + CT_F^2). \quad (3)$$

dengan,

- $T_F = 1,8T + 32,$
- $A = 1004,789042,$
- $B = -0,046283,$
- $C = -7,9738 \times 10^{-4},$
- T = temperatur (°C),
- ρ = densitas fluida (kg/m^3).

Persamaan (4) digunakan untuk menghitung korelasi kalor jenis air adalah sebagai berikut (Marietta, 1993):

$$c_p = \sqrt{\frac{A + CT}{1 + BT + DT^2}}. \quad (4)$$

dengan,

- $A = 17,48908904,$
- $B = -1,67507,$
- $C = -0,03189591,$
- $D = -2,8748 \times 10^{-6},$
- T = temperatur (°C),
- c_p = kalor jenis air (kJ/kg K).

Selanjutnya dilakukan perhitungan daya yang digunakan oleh pemanas listrik pada HTS menggunakan Persamaan (5) berikut ini (Sunarno, 2005):

$$q_s = V \times I, \quad (5)$$

dengan,

- q_s = daya listrik yang digunakan oleh pemanas listrik (kW),
- V = tegangan listrik (volt)
- I = arus listrik (ampere)

Maka perhitungan efisiensi pada komponen HTS dapat dihitung menggunakan Persamaan (6) (Darmawan, 2020):

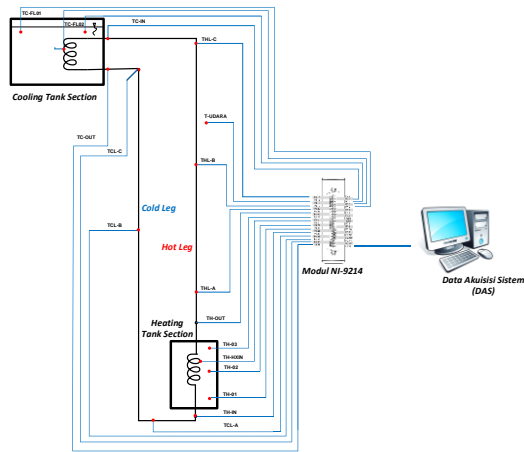
$$\varepsilon_H = \frac{q_H}{q_s} \times 100\% \quad (6)$$

dengan,

- ε_H = Efisiensi HTS (%),
- q_H = laju perubahan energi pada HTS (kW),
- q_s = daya pemanas listrik pada HTS (kW),

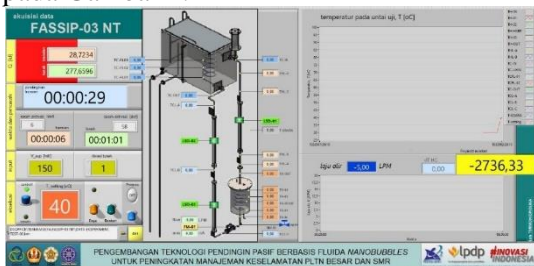
Data untuk mendukung perhitungan seperti temperatur output HTS (T_{H-out}) dan temperatur input HTS (T_{H-in}) diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan termokopel yang terpasang di untai FASSIP-03 NT seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Data laju alir terukur menggunakan alat ukur flowmeter

yang terpasang pada sistem pemipaan sebelum komponen HTS.



Gambar 3. Pemasangan termokopel pada untai FASSIP 03 NT

Data tersebut terekam dan tersimpan secara langsung pada perangkat Data Akuisisi Sistem (DAS). Sedangkan data berupa tegangan (V) dan arus listrik (I) diukur secara manual pada setiap kenaikan daya pada pemanas listrik. Pengoperasian untai FASSIP-03 NT menggunakan *software LabView*, setelah catu daya listrik tersedia dan terhubung ke pemanas listrik. Pengoperasian dilakukan dengan mengatur (*setting*) temperatur operasional untai FASSIP-03 NT, sehingga pemanas listrik akan memberikan kalor ke fluida kerja hingga mencapai temperatur operasional. Tampilan pemrograman untuk pengoperasian untai FASSIP-03 NT menggunakan *software LabView* ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Tampilan pemrograman menggunakan *software LabView*

Tampilan pemrograman selama pengoperasian untai FASSIP-03 NT selalu terlihat pada monitor DAS dan grafik beberapa temperatur dan laju alir secara *real time* akan terlihat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

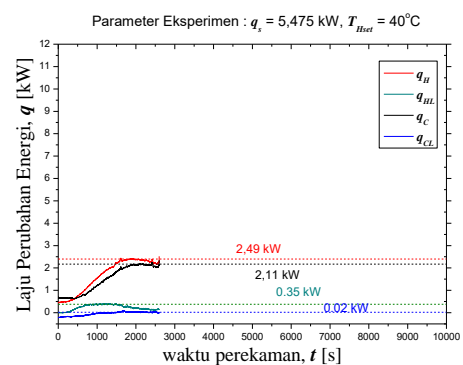
Pengoperasian berdasarkan matriks penelitian untuk pengambilan data untai FASSIP-03 NT

dilakukan dengan memvariasikan tegangan input bagi pemanas listrik pada HTS. Arus listrik diukur secara manual dan dicatat pada *log book* pengoperasian. Data kelistrikan diperoleh seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1., dari data tersebut dapat dihitung besarnya daya listrik yang digunakan oleh pemanas listrik menggunakan Persamaan (5):

Tabel 1. Data kelistrikan pemanas listrik HTS

Tegangan Listrik (V)	Arus listrik (A)	Daya Listrik (kW)
150	36,50	5,475
160	38,50	6,160
170	41,20	7,004
180	43,70	7,866
190	46,30	8,797
200	51,25	10,250

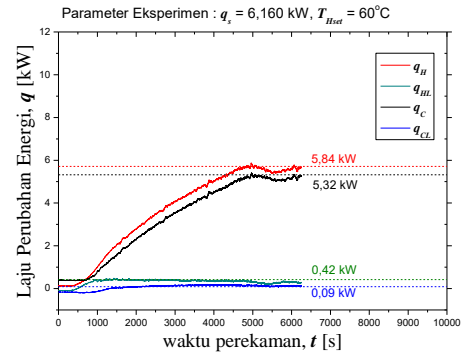
Pemanas listrik pada HTS berdaya total 12 kW, sedangkan daya yang digunakan menurut hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 4.1. Daya listrik dalam satuan kilowatt (kW) selanjutnya digunakan untuk pengolahan data. Hasil perhitungan laju perubahan energi pada bagian-bagian untai FASSIP-03 NT dengan menggunakan Persamaan (1), Persamaan (2), Persamaan (3) dan Persamaan (4) untuk setiap *setting* daya dan *setting* temperatur ditampilkan dalam bentuk grafik. Grafik laju perubahan energi pada *setting* daya 5,475 kW dan *setting* temperatur 40 °C ditunjukkan pada Gambar 5.



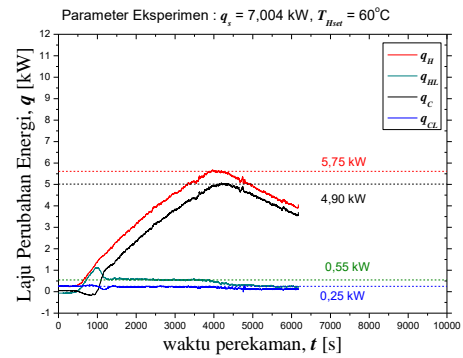
Gambar 5. Laju perubahan energi pada daya 5,475 kW dan *setting* temperatur 40 °C.

Berdasarkan Gambar 5, laju perubahan energi yang terjadi pada bagian HTS mencapai 2,49 kW (q_H) pada kondisi tunak. Laju perubahan energi ini disebabkan adanya peningkatan temperatur fluida kerja akibat adanya energi kalor dari pemanas listrik dengan daya 5,475 kW, sehingga mengakibatkan laju perubahan energi pada bagian HTS relatif besar. Pada sisi *hot-leg* laju perubahan energi mencapai 0,35

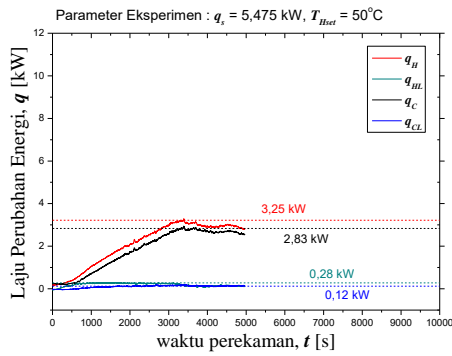
kW (q_{HL}) pada kondisi tunak, laju perubahan energi tersebut relatif kecil menunjukkan kehilangan energi kalor kelingkungan akibat belum dilengkapinya pemipaan dengan isolator panas. Sementara pada bagian Cooling Tank Section (CTS) laju perubahan energi mencapai 2,11 kW (q_C) pada kondisi tunak. Laju perubahan energi pada bagian CTS disebabkan adanya pengambilan energi kalor pada fluida kerja oleh air pendingin sekunder pada CTS sehingga mengakibatkan perubahan energi relatif besar. Sedangkan pada bagian sisi *cold-leg* laju perubahan energi mencapai 0,02 kW (q_{CL}) pada kondisi tunak. Pada bagian *cold-leg* seperti pada bagian *hot-leg*, laju perubahan energi yang terjadi relatif kecil. Hal ini menunjukkan adanya kehilangan energi kalor ke lingkungan akibat belum dilengkapinya pemipaan dengan isolator panas relatif kecil. Grafik hasil perhitungan laju perubahan energi pada bagian-bagian untai FASSIP 03 NT untuk *setting* daya dan *setting* temperatur lainnya diperlihatkan pada Gambar 6 sampai Gambar 14 dibawah ini.



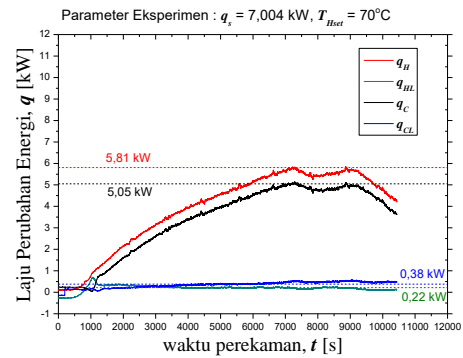
Gambar 8. Laju perubahan energi pada daya 6,160 kW dan *setting* temperatur 60 °C.



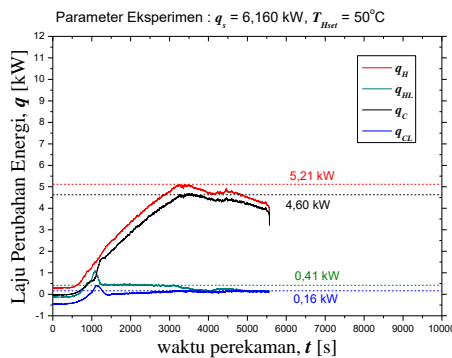
Gambar 9. Laju perubahan energi pada daya 7,004 kW dan *setting* temperatur 60 °C.



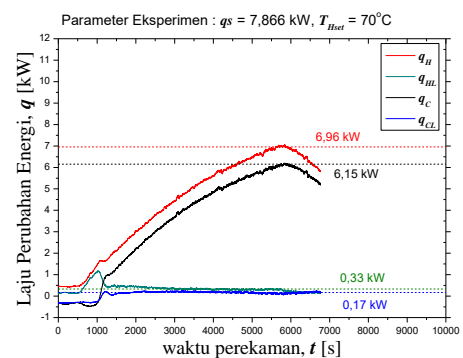
Gambar 6. Laju perubahan energi pada daya 5,475 kW dan *setting* temperatur 50 °C.



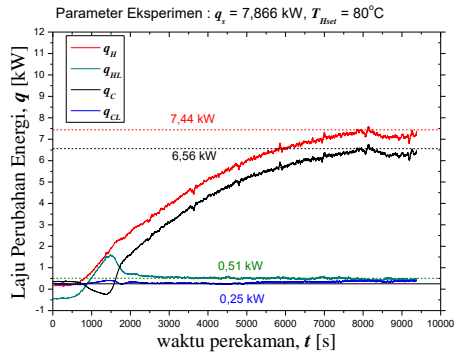
Gambar 10. Laju perubahan energi pada daya 7,004 kW dan *setting* temperatur 70 °C.



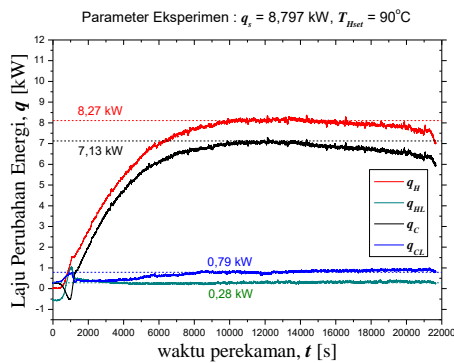
Gambar 7. Laju perubahan energi pada daya 6,160 kW dan *setting* temperatur 50 °C.



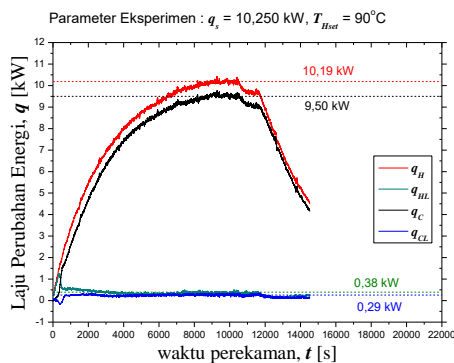
Gambar 11. Laju perubahan energi pada daya 7,866 kW dan *setting* temperatur 70 °C.



Gambar 12. Laju perubahan energi pada daya 7,866 kW dan setting temperatur 80 °C.



Gambar 13. Laju perubahan energi pada daya 8,797 kW dan setting temperatur 90 °C.



Gambar 14. Laju perubahan energi pada daya 10,250 kW dan setting temperatur 90 °C.

Keterbaruan pada Fasilitas untai FASSIP-03 NT pada komponen HTS dengan adanya *helical heating heat exchanger* yang berfungsi untuk memperluas permukaan fluida kerja sehingga fluida kerja pada HTS mudah menerima energi kalor yang dihasilkan oleh pemanas listrik. Efisiensi pada komponen HTS dihitung menggunakan Persamaan (6). Hasil perhitungan efisiensi komponen HTS (ϵ_H) Tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. Efisiensi komponen HTS pada kondisi tunak

No.	Setting Temperatur (°C)	q_s (kW)	q_H (kW)	ϵ_H (%)
1	40	5,475	2,49	45,48
2	50	5,475	3,25	59,36
3	50	6,160	5,21	84,58
4	60	6,160	5,84	94,81
5	60	7,004	5,75	82,10
6	70	7,004	5,81	82,95
7	70	7,866	6,96	88,48
8	80	7,866	7,44	94,66
9	90	8,797	8,27	94,01
10	90	10,250	10,19	99,41

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah diperoleh dan ditampilkan pada Tabel 2 diatas, efisiensi pada HTS (ϵ_H) dengan keterbaruan yang dimilikinya memiliki rentang 45,48% - 99,41% dengan efisiensi rata-rata 82,58%. Efisiensi yang dimiliki HTS memiliki kecenderungan meningkat dengan meningkatnya pemakaian daya pada pemanas listrik dan temperatur pada fluida kerja. Efisiensi yang cukup tinggi pada HTS ini menunjukkan bahwa adanya keterbaruan *helical heating heat exchanger* meningkatkan unjuk kerja pemanasan pada fasilitas untai FASSIP-03 NT.

KESIMPULAN

Perhitungan efisiensi termal untuk penukar kalor (*heat exchanger*) *helical* di dalam tangki pemanas dilakukan untuk menentukan unjuk kerja pertukaran kalor. Berdasarkan hasil perhitungan efisiensi pada HTS (ϵ_H) dengan keterbaruan yang dimilikinya memiliki rentang 45,48% - 99,41% dengan efisiensi rata-rata 82,58%. Efisiensi yang cukup tinggi pada HTS ini menunjukkan bahwa adanya keterbaruan penukar kalor *helical* meningkatkan unjuk kerja pemanasan HTS pada fasilitas Untai FASSIP-03 NT.

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” dengan nomor kontrak 3/E1/III/PRN/2021 yang telah mendanai penelitian. Kepala Pusat Riset dan Teknologi Reaktor Nuklir, Kepala Kelompok Riset Sistem Termofluida Reaktor Nuklir dan teman-teman Peneliti dan Pengembang Teknologi Nuklir atas diskusi teknis.

DAFTAR PUSTAKA

- A. R. Antariksawan (2000), Accident Analysis of PWR Station Blackout with Pump Seal Leak Using Melcor 1.8. 4.
- A. Darmawan, A. Rosidi, Giarno, G. B. H. Kusnugroho, D. Haryanto, D. Yuliaji, M. Juarsa, (2020), Analisis Perubahan Energi Internal dan Rugi Kalor pada Water Heating Tank Berdasarkan Variasi Temperatur Air, Proseding Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya, Departemen Fisika FMIPA, Universitas Padjadjaran.
- D. Haryanto, Giarno, G. B. H. Kusnugroho, A. Rosidi, A. E. Pamungkas, M. Juarsa (2022), Pengaruh Jenis Restraint pada Kekuatan Mekanik Support Untai FASSIP 03 NT, ELKOMIKA Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika, Vol. 10 No. 2 Halaman 394 – 404.
- Holman, J. P.,. 1997. *Perpindahan Kalor, Edisi Keenam*. Jl. Baping Raya No. 100 Ciracas, Jakarta 13740: Penerbit Erlangga.
- Marietta, M.,. 1993. *Thermophysical Properties of Saturated Light and Heavy Water for Advanced Neutron Source Application*. INC for The United State Department of Energy: Oak Ridge National Laboratory, Martin Marietta Energy System,.
- H. Tjahjono(2017), Comprehensive prediction of thermosyphon characteristics in reactor passive cooling system simulation loop FASSIP-01, Atom Indones., vol. 43, no. 3, pp. 157–166.
- M. H. Kusuma, N. Putra, S. Ismarwanti, and S. Widodo (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, vol. 7, pp. 836-842.
- M. Juarsa, A. R. Antariksawan, M. H. Kusuma, D. Haryanto, and N. Putra (2018), Estimation of natural circulation flow based on temperature in the FASSIP-02 large-scale test loop facility, in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 105, no. 1, p. 12091.
- M. Juarsa, 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, Universitas Padjadjaran, vol. 1, pp. 22-30.
- Sunarno, 2005, Mekanikal Elektrikal, Jl. Beo 38-40 Yogyakarta 55281, Penerbit ANDI
- 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.
- Y. Wang (2013), Preliminary Study for the Passive Containment Cooling System Analysis of the Advanced PWR, Energy Procedia, vol. 39, no. 0, pp. 240–247, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.210>.