

ANALISIS KEMAMPUAN PERTUKARAN KALOR TANGKI COOLER BERDASARKAN PERBEDAAN ARAH ALIRAN UNTAI HEAT SINK SYSTEM

Giarno, Joko Prasetyo Witoko, Mulya Juarsa, Deswandri, Geni Rina Sunaryo
PTKRN-BATAN, Kawasan Puspiptek Serpong, Gedung 80, 15310
email: giarno@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS KEMAMPUAN PERTUKARAN KALOR TANGKI COOLER BERDASARKAN PERBEDAAN ARAH ALIRAN UNTAI HEAT SINK SYSTEM. Kebutuhan energi listrik di Indonesia sudah saatnya didukung oleh energi nuklir, sesuai dengan rencana BATAN untuk membangun Reaktor Daya Eksperimental (RDE). Teknologi keselamatan pasif pada generasi reaktor lanjut sangat diprioritaskan untuk keselamatan operasi kondisi normal maupun tidak normal. Penelitian tentang sistem pasif telah dilakukan dengan eksperimen sirkulasi alam menggunakan untai Fasilitas Simulasi Sistem Pasif (untai FASSIP) di laboratorium Termohidrolika, Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN). Untai FASSIP terdiri dari untai rektangular dan untai *Heat Sink System (HSS)*. Untai HSS berfungsi untuk menyerap kalor dari untai rektangular dan membuang ke lingkungan. Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis kemampuan pertukaran kalor di tangki cooler berdasarkan perbedaan aliran untai HSS. Metodologi yang digunakan adalah melakukan eksperimen sirkulasi alam, membuat grafik, melakukan perhitungan jumlah kalor yang diserap HSS dan melakukan analisis kemampuan pertukaran kalor di tangki cooler berdasarkan perbedaan aliran HSS. Data hasil eksperimen dan perhitungan diperoleh analisis kemampuan pertukaran kalor di tangki cooler oleh untai HSS aliran berlawanan arah (*counter flow*) lebih besar dibandingkan dengan untai HSS aliran searah (*parallel flow*). Nilai jumlah kalor yang diserap di tangki cooler paling besar adalah 16,585 kW yaitu terjadi pada daya pemanas di tangki heater sebesar 4,24 kW dan laju aliran volumetrik rata-rata di untai HSS sebesar 42,70 LPM pada HSS aliran berlawanan arah.

Kata Kunci : untai FASSIP, *Heat Sink System*, laju aliran volumetrik, perpindahan kalor

ABSTRACT

ANALYSIS OF HEAT TRANSFER CAPABILITY OF COOLER TANK BASED ON DIFFERENCES IN FLOW DIRECTION OF THE HEAT SINK SYSTEM LOOP. Indonesia needs the electricity energy supported by nuclear energy. In line with nuclear energy program, BATAN plan to build Experimental Power Reactor (RDE). The passive safety technology in advanced reactor generation is a priority in the safety both for normal and abnormal conditions. Research on passive system has been done with natural circulation experiment using the Passive Systems Simulation Facility loop (FASSIP loop) in the Thermohydraulics Laboratory, BPFKR, PTKRN. The FASSIP loop consists of a rectangular loop and Heat Sink System loop (HSS). The HSS loop serves to absorb heat transfer from the rectangular loop and dissipate it to the environment. The purpose of the research is to analyze the capability of heat transfer in the cooler tank based on differences in flow direction of the HSS loop. The methodology applied is to perform experiments in natural circulation, make a chart, doing the calculations of heat transfer rate, and analysis of the heat transfer capability of the cooler tank based on differences in flow direction of the HSS loop. The data and calculation from the experiment show that the heat transfer capability in the cooler tank of the HSS loop with counter flow is greater than in the parallel flow. The maximum amount of heat absorbed is 16.585 kW at electricity voltage of 160 V and average volumetric flow rate of 42.70 LPM in the counter flow of the HSS loop.

Keywords: FASSIP loop, *Heat Sink System*, volumetric flowrate, heat transfer

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia masih dipenuhi oleh batubara dan bahan bakar minyak, untuk mengimbangi keterbatasan sumber daya alam maka sumber energi nuklir sudah saatnya ikut mendukung pemenuhan energi tersebut. Program kerja BATAN yang mempunyai rencana strategis 2015-2019 akan membangun Reaktor Daya Eksperimental (RDE) sebagai titik awal menuju pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) [1].

Kemajuan teknologi harus didukung oleh teknologi keselamatan, termasuk pada industri nuklir, sehingga faktor keselamatan PLTN menjadi persyaratan mutlak [2]. Sistem keselamatan PLTN di Fukushima masih menggunakan sistem aktif yaitu menggunakan sumber listrik untuk mengoperasikan pompa pendingin. Ketika terjadi gempa bumi diikuti tsunami semua listrik padam dan pompa mengalami kegagalan untuk mendinginkan panas peluruhan setelah reaktor *shutdown*, sehingga teknologi keselamatan reaktor nuklir saat ini dan masa mendatang menggunakan sistem keselamatan pasif [3]. Teknologi keselamatan secara pasif dapat melakukan salah satu atau lebih dari ketiga fungsi keselamatan reaktor nuklir yaitu memadamkan/*shutdown* reaktor dengan selamat, mengambil panas peluruhan setelah *shutdown* dan mengungkung zat radioaktif agar tidak keluar ke lingkungan [4].

Untuk memperdalam studi sistem pasif di laboratorium Termohidrolika PTKRN-BATAN saat ini telah dibuat fasilitas eksperimen untuk mempelajari sirkulasi alam (*natural circulation*) yang disebut untai FASSIP (untai Fasilitas Simulasi Sistem Pasif) [5]. Eksperimen sirkulasi alam menggunakan untai FASSIP kondisi untai rektangular tanpa isolasi dan untai *Heat Sink System (HSS)* terisolasi dengan aliran searah di *HSS* telah dilakukan pada kegiatan penelitian tahun 2016 [5]. Tangki cooler merupakan alat penukar kalor tipe *tube-and-shell* dimana fluida panas dan fluida dingin terpisah yang dapat mengalir searah (*parallel flow*) atau berlawanan arah (*counter flow*) [6]. Eksperimen sirkulasi alam dengan kedua aliran berbeda di untai *HSS* telah dilakukan untuk mendapatkan karakterisasi *precooler* dan hasilnya *precooler* berfungsi baik sebagai komponen untai *HSS* yang berfungsi menyerap kalor di tangki *cooler* dan membuang ke lingkungan oleh sistem refrigerasi [7].

Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis kemampuan pertukaran kalor di tangki *cooler* berdasarkan perbedaan aliran di untai *HSS*. Berdasarkan data hasil eksperimen dan grafik hubungan temperatur selama eksperimen serta perhitungan jumlah kalor yang diserap *HSS* di tangki *cooler*, maka akan diperoleh analisis kemampuan pertukaran kalor di tangki *cooler*.

TEORI

Untai FASSIP adalah fasilitas eksperimen untuk mempelajari sistem pendinginan secara pasif yang terdiri dari untai rektangular dan untai *HSS*. Untai rektangular adalah *section* pemipaan SS304 dilengkapi dengan sensor temperatur yang dihubungkan menjadi suatu untai (*loop*) segi empat dilengkapi sumber pemanas (tangki *heater*) dan sumber pendingin (tangki *cooler*) [7]. Konsep dasar sistem pasif adalah fenomena aliran fluida yang bergerak dengan sendirinya tanpa adanya gaya dari luar, dari temperatur tinggi ke temperatur rendah karena terjadi perbedaan densitas dan gaya apung (*buoyancy force*) [8]. Banyaknya kalor yang diserap oleh untai *HSS* di tangki *cooler* kemudian dibuang ke lingkungan oleh sistem refrigerasi dapat dihitung dengan persamaan (1) [9]:

$$q = \dot{m} \cdot c_{p \text{ air}} \cdot (T_{\text{outlet-Cooler-HSS}} - T_{\text{inlet-Cooler-HSS}}) \quad (1)$$

dengan :

q = perpindahan kalor [kW]

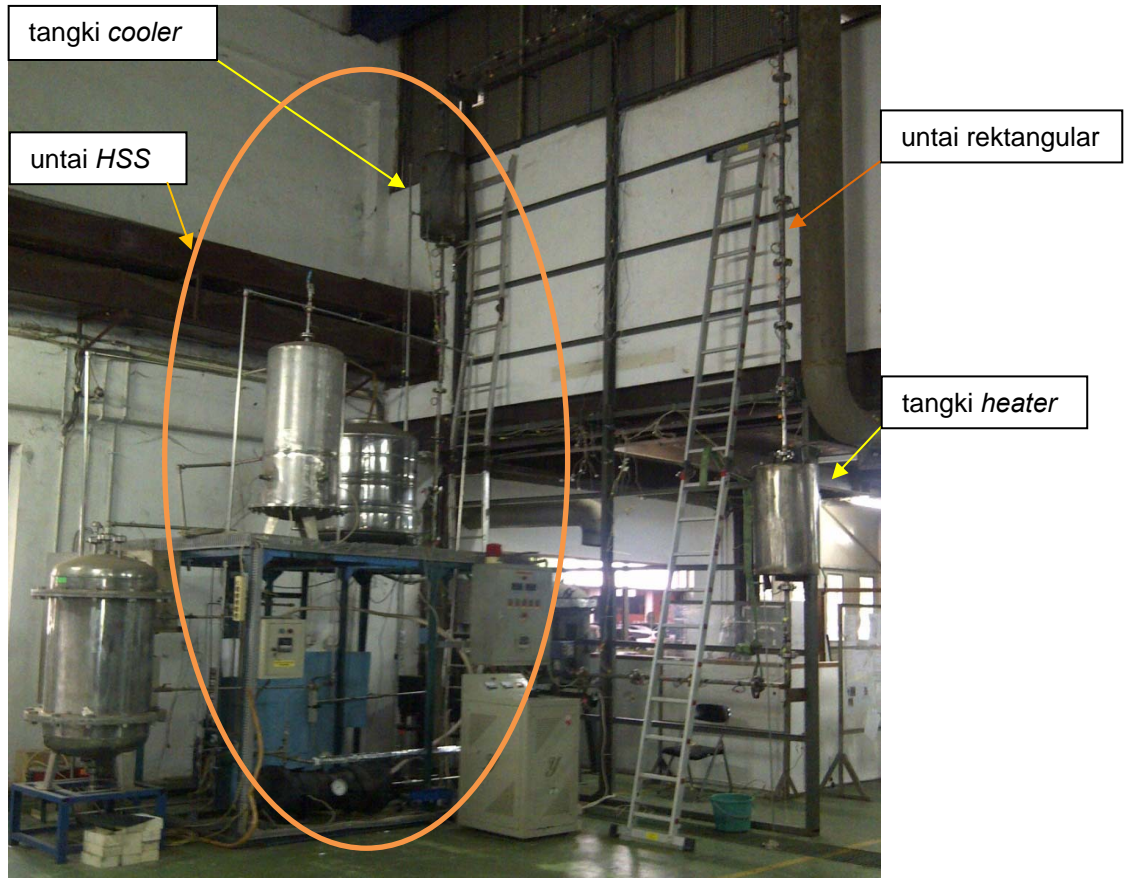
\dot{m} = laju aliran massa air *HSS* [kg/det]

$c_{p \text{ air}}$ = kapasitas jenis air di tangki *cooler* (*) [kJ/kg. °C]

$T_{\text{outlet-cooler}} - T_{\text{inlet-cooler}}$ = temperatur *inlet* dan *outlet* tangki *cooler* [°C]

(*) Nilai kapasitas jenis air berdasarkan temperatur *HSS* rata-rata di tangki *cooler* yang diperoleh dari *software Steam Table water 97_v13* [10].

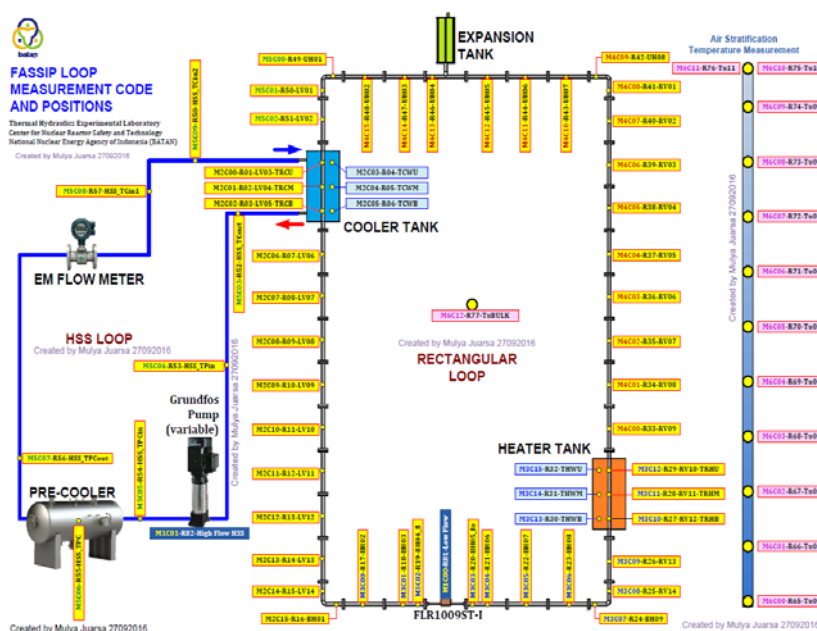
Gambar untai FASSIP kondisi untai rektangular tanpa isolasi dan untai *HSS* beserta komponennya seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Untai FASSIP

Untai HSS terdiri dari pompa sentrifugal, *precooler*, tangki cooler, tangki reservoir dan *refrigerator* dengan dilengkapi pengukur temperatur, tekanan dan laju alir volume. Untai rektangular terdiri dari tangki heater, tangki cooler dan tangki ekspansi dengan dilengkapi pengukur temperatur, tekanan dan laju aliran volumetrik.

Pengambilan data temperatur *inlet* dan *outlet* di tangki cooler menggunakan sensor termokopel yang terhubung ke modul Ni-DAQ dan dibaca dan direkam di komputer dengan program LabVIEW.



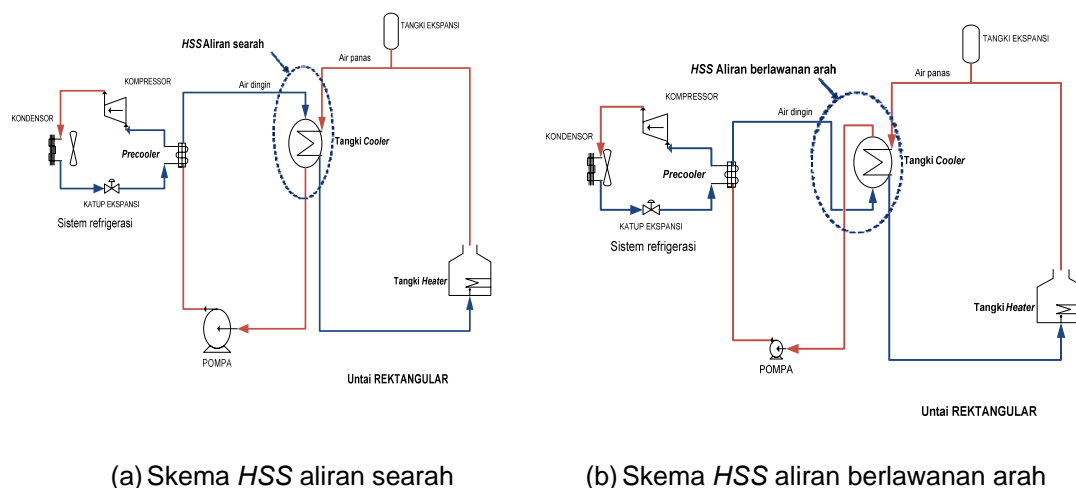
Gambar 2. Konfigurasi termokopel untai FASSIP [created by Mulya Juarsa]

Gambar 2 menunjukkan konfigurasi letak sensor temperatur (termokopel) untai FASSIP yang terpasang di *section* pipa untai rektangular dan setiap *inlet* & *outlet* komponen untai HSS. Pergerakan fluida yang disebabkan sirkulasi alam dapat diamati dengan melihat distribusi temperatur di komputer.

TATA KERJA

Persiapan eksperimen

Persiapan eksperimen untuk HSS aliran searah dilakukan dengan mengisi air ke pemipaan untai rektangular sampai tangki ekspansi terisi setengah. Mengisi air ke tangki *heater* dan *cooler* sampai penuh. Menyiapkan untai HSS dengan mengatur katup-katup di instalasi pemipaan, mengatur frekuensi pompa sesuai matriks eksperimen dan menyiapkan *refrigerator* posisi *stand-by*. Menghidupkan komputer dan menjalankan program *Data Acquisition System (DAS)* untuk perekaman data pengukuran. Mengatur tegangan listrik pada trafo untuk mensuplai daya pada elemen pemanas di tangki *heater* sesuai matriks eksperimen. Sedangkan persiapan eksperimen untuk HSS aliran berlawanan arah dilakukan dengan mengubah arah aliran HSS dari searah menjadi berlawanan arah yaitu dengan menukar pipa *inlet* ke tangki *cooler* mejadi pipa *outlet* dari tangki *cooler*, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema HSS aliran searah dan berlawanan arah

Gambar 3a menunjukkan air dingin dari untai HSS mengalir searah dengan air panas dari untai rektangular, sedangkan gambar 3b menunjukkan perubahan arah air dingin dari untai HSS menjadi berlawanan arah dengan air panas dari untai rektangular.

Prosedur eksperimen

Melakukan eksperimen selama 7 jam untuk HSS aliran searah dan aliran berlawanan arah dengan mengoperasikan DAS, pompa HSS, suplai tegangan listrik elemen pemanas dan *refrigerator*, secara bersamaan.

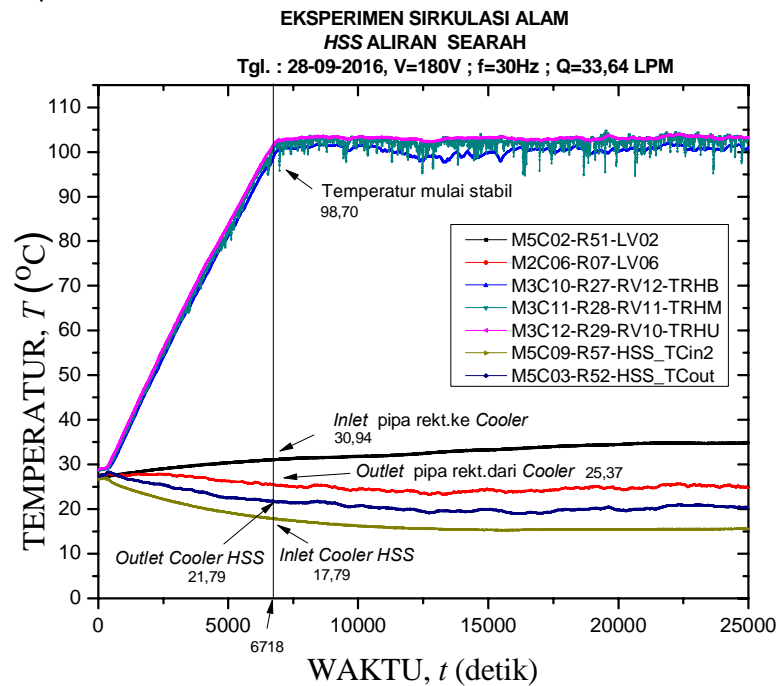
Pembuatan grafik, perhitungan dan analisis

Data temperatur di tangki *cooler* dan *heater* hasil eksperimen digunakan untuk membuat grafik hubungan antara temperatur selama eksperimen menggunakan *software Origin Pro 8.0* [11]. Kurva temperatur di tangki *heater* mulai stabil, akan digunakan untuk memulai perhitungan banyaknya kalor yang diserap atau diambil di tangki *cooler* dan dibuang ke lingkungan oleh untai HSS yaitu dengan persamaan (1). Nilai laju aliran massa (\dot{m}) untai HSS diperoleh dari laju aliran volumetrik rata-rata selama eksperimen (Q). Berdasarkan perhitungan terhadap data hasil eksperimen sirkulasi alam kondisi untai rektangular tanpa isolasi dengan HSS aliran searah dan berlawanan arah akan dilakukan analisis kemampuan pertukaran kalor di tangki *cooler*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil eksperimen sirkulasi alam menggunakan untai FASSIP kondisi untai rektangular tanpa isolasi dengan HSS aliran searah, dibuat grafik hubungan temperatur

selama eksperimen sesuai dengan matriks eksperimen menggunakan software Origin 8.0 seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva temperatur selama eksperimen HSS aliran searah

Gambar 4 menunjukkan kurva temperatur selama eksperimen HSS aliran searah pada tegangan listrik pemanas 180 V dan frekuensi pompa HSS 30 Hz dengan laju aliran volumetrik rata-rata 33,64 LPM=33,64 dm³/min. Berdasarkan data nilai laju aliran volumetrik rata-rata akan diperoleh nilai laju aliran massa air (\dot{m}) sebesar 0,561 kg/det. Nilai kapasitas jenis air (c_p) pada temperatur rata-rata di tangki cooler, diperoleh 4,185 kJ/kg. C. Temperatur mulai stabil pada 98,7 C dengan waktu selama 6.718 detik, kemudian menarik garis secara vertikal dari titik temperatur stabil hingga memotong sumbu X, diperoleh temperatur air pendingin inlet HSS sebesar 17,79 C dan temperatur outlet HSS sebesar 21,79 C serta selisih temperaturnya (ΔT_{HSS}) sebesar 4,00 C. Untuk mengetahui kemampuan untai HSS dalam mengambil atau menyerap kalor dari untai rektanguler, dilakukan perhitungan jumlah kalor yang diserap di tangki cooler dengan menggunakan persamaan (1) yaitu :

$$q_{pf} = \dot{m} \cdot c_{p\text{air}} \cdot (\Delta T_{HSS}) \quad (2)$$

$$q_{pf} = 0,561 \times 4,185 \times 4,00 = 9,386 \text{ kW}$$

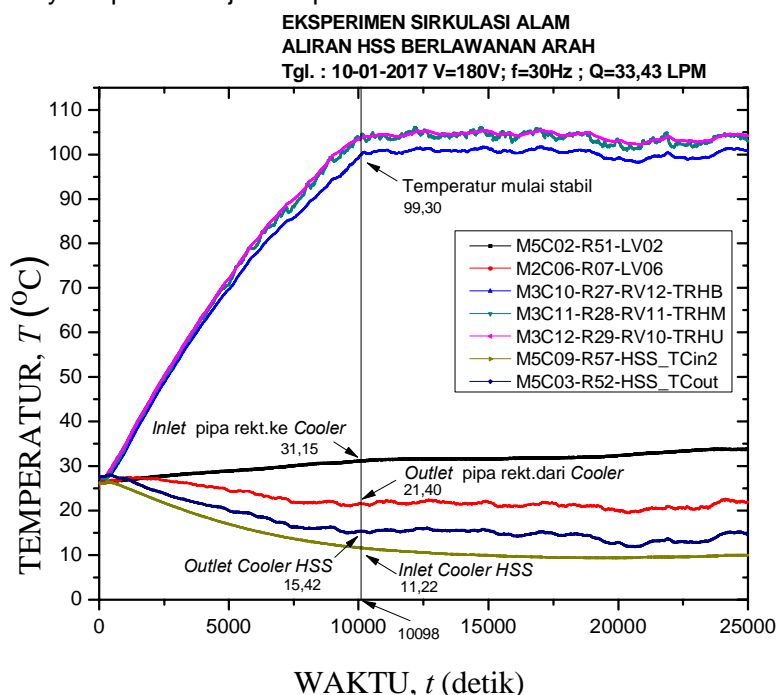
Dengan cara dan langkah yang sama diperoleh nilai jumlah kalor yang diserap di tangki cooler untuk tegangan listrik pemanas 170 V dan 160 V dengan tiga variasi frekuensi pompa HSS, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil perhitungan perpindahan kalor (q_{pf}) HSS aliran searah

No. Tanggal	Tegangan elektrik heater, V	Frekuensi pompa, f	Laju aliran volumetrik rata-rata, Q	Laju aliran massa air, \dot{m}	Kapasitas jenis air, C_p	Temperatur inlet cooler HSS, T_i	Temperatur outlet cooler HSS, T_o	Selisih temperatur, ΔT_{HSS}	Jumlah Kalor yang diserap HSS, q_{pf} (kW)
	(V)	(Hz)	(dm ³ /min)	(kg/det)	(kJ/kg. C)	(C)	(C)	(C)	
1. 28-09-16	180	30	33,64	0,561	4,185	17,79	21,79	4,00	9,385
2. 29-09-16	180	40	43,01	0,717	4,184	19,80	23,80	4,00	11,996
3. 03-10-16	180	50	45,02	0,750	4,182	23,40	27,37	3,97	12,457

4.	06-10-16	170	30	33,41	0,557	4,185	17,45	21,65	4,20	9,788
5.	10-10-16	170	40	43,60	0,727	4,183	19,86	24,63	4,77	14,500
6.	11-10-16	170	50	44,88	0,748	4,183	21,36	26,07	4,71	14,735
7.	17-10-16	160	30	33,54	0,559	4,187	15,25	19,66	4,41	10,321
8.	18-10-16	160	40	42,99	0,717	4,187	15,45	20,06	4,61	13,828
9.	19-10-16	160	50	44,43	0,741	4,183	20,20	24,97	4,77	14,776

Data hasil eksperimen sirkulasi alam menggunakan untai FASSIP kondisi untai rectangular tanpa isolasi dengan HSS aliran berlawanan arah, dibuat grafik hubungan temperatur selama eksperimen, seperti cara dan langkah yang sama dengan HSS aliran searah dan hasilnya seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Kurva temperatur selama eksperimen HSS berlawanan arah

Gambar 5 menunjukkan kurva temperatur selama eksperimen HSS aliran berlawanan arah pada tegangan listrik pemanas 180 V dan frekuensi pompa HSS 30 Hz dengan laju aliran volumetrik rata-rata 33,43 LPM=33,43 dm³/min. Berdasarkan data nilai laju aliran volumetrik rata-rata akan diperoleh nilai laju aliran massa air (\dot{m}) sebesar 0,557 kg/det. Nilai kapasitas jenis air (c_p) pada temperatur rata-rata di tangki cooler, diperoleh 4,191 kJ/kg.°C. Temperatur mulai stabil pada 99,3°C dengan waktu selama 10.098 detik, kemudian menarik garis secara vertikal dari titik temperatur stabil hingga memotong sumbu X, diperoleh temperatur air pendingin inlet HSS sebesar 11,22°C dan temperatur outlet HSS sebesar 15,42°C serta selisih temperaturnya (ΔT_{HSS}) sebesar 4,20°C. Untuk mengetahui kemampuan untai HSS dalam mengambil atau menyerap kalor dari untai rectangular, dilakukan perhitungan jumlah kalor yang diserap di tangki cooler dengan menggunakan persamaan (1) yaitu :

$$q_{cf} = \dot{m} \cdot c_{p_{air}} \cdot (\Delta T_{HSS}) \quad (3)$$

$$q_{cf} = 0,557 \times 4,191 \times 4,20 = 9,807 \text{ kW}$$

Dengan cara dan langkah yang sama diperoleh nilai jumlah kalor yang diserap di tangki cooler untuk tegangan listrik pemanas 170 V dan 160 V dengan tiga variasi frekuensi pompa HSS, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 2. Hasil perhitungan perpindahan kalor (q_{cf}) HSS aliran berlawanan arah

No.	Tanggal	Tegangan elektrik heater, V	Frekuensi pompa, f	Laju aliran volumetrik rata-rata, Q	Laju aliran massa air, \dot{m}	Kapasitas jenis air, C_p	Temperatur inlet cooler HSS, T_i	Temperatur outlet cooler HSS, T_o	Selisih temperatur, ΔT_{HSS}	Jumlah Kalor yang diserap HSS, q
		(V)	(Hz)	(dm ³ /min)	(kg/det)	(kJ/kg, °C)	(°C)	(°C)	(°C)	(kW)
1.	10-1-17	180	30	33,43	0,557	4,191	11,22	15,42	4,20	9,807
2.	11-1-17	180	40	40,23	0,671	4,188	13,42	17,83	4,41	12,385
3.	12-1-17	180	50	41,50	0,692	4,186	16,49	20,86	4,37	12,652
4.	16-1-17	170	30	23,85	0,398	4,192	9,31	15,68	6,37	10,614
5.	17-1-17	170	40	40,20	0,670	4,189	12,22	17,82	5,60	15,717
6.	18-1-17	170	50	42,21	0,704	4,185	17,09	22,45	5,36	15,780
7.	19-1-17	160	30	33,20	0,553	4,192	9,71	15,08	5,37	12,456
8.	23-1-17	160	40	41,20	0,687	4,186	15,28	20,66	5,38	15,465
9.	24-1-17	160	50	42,70	0,712	4,184	18,43	24,00	5,57	16,585

Berdasarkan hasil perhitungan jumlah kalor yang diserap untai HSS seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2, maka diperoleh hasil perbandingan antara kedua macam aliran HSS yaitu aliran searah dan berlawanan arah dalam penyerapan kalor dari untai rektangular, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan jumlah kalor yang diserap dari kedua macam arah aliran HSS

No.	Tegangan listrik heater, V	Frekuensi pompa, f	Jumlah Kalor yang diserap HSS aliran searah (<i>parallel flow</i>), q_{pf}	Jumlah Kalor yang diserap HSS aliran berlawanan arah (<i>counter flow</i>), q_{cf}	Selisih Kalor yang diserap ($q_{cf} - q_{pf}$)
	(V)	(Hz)	(kW)	(kW)	(kW)
1.	180	30	9,386	9,807	0,422
2.	180	40	11,996	12,385	0,389
3.	180	50	12,457	12,652	0,195
4.	170	30	9,788	10,614	0,827
5.	170	40	14,500	15,717	1,217
6.	170	50	14,735	15,780	1,045
7.	160	30	10,321	12,456	2,135
8.	160	40	13,828	15,465	1,637
9.	160	50	14,776	16,585	1,810

Pada Tabel 3 terlihat jumlah kalor yang diserap oleh untai HSS aliran berlawanan arah (*counter flow*) lebih besar dibandingkan dengan jumlah kalor yang diserap oleh untai HSS aliran searah (*parallel flow*). Tegangan listrik dari trafo yang diberikan ke elemen pemanas pada tangki heater ada 3 variasi tegangan listrik yaitu 180, 170 dan 160 V dan 3 variasi frekuensi pompa di untai HSS yaitu 30, 40 dan 50 Hz, terlihat untuk setiap tegangan listrik yang sama, semakin besar frekuensi pompa HSS, maka semakin besar jumlah kalor yang diserap untai HSS. Perbedaan jumlah kalor yang diserap untai HSS paling besar adalah 2,135 kW, ketika tegangan listrik 160 V, dan frekuensi pompa HSS 30 Hz. Sedangkan perbedaan jumlah kalor yang diserap untai HSS paling kecil adalah 0,195 kW,

ketika tegangan listrik 180 V, dan frekuensi pompa HSS 50 Hz. Berdasarkan jumlah kalor yang diserap pada kedua macam aliran HSS, terlihat semakin besar laju aliran volumetrik HSS dari ketiga variasi tegangan listrik pemanas, maka semakin besar juga jumlah kalor yang diserap. Nilai jumlah kalor yang diserap paling besar adalah 16,585 kW terjadi pada tegangan listrik 160 V yang disuplai ke elemen pemanas untuk memanaskan air di tangki heater dengan arus listrik yang mengalir rata-rata sebesar 26,5 A, dan laju aliran volumetrik rata-rata di untai HSS sebesar 42,70 LPM pada HSS aliran berlawanan arah.

KESIMPULAN

Banyaknya kalor yang diserap di tangki cooler oleh untai HSS aliran berlawanan arah (*counter flow*) lebih besar dibandingkan dengan untai HSS aliran searah (*parallel flow*) yaitu terjadi pada daya pemanas di tangki heater sebesar 4,24 kW dan laju aliran volumetrik rata-rata di untai HSS sebesar 42,70 LPM pada HSS aliran berlawanan arah, pada eksperimen sirkulasi alam menggunakan fasilitas untai FASSIP kondisi untai rektanguler tanpa isolasi. Semakin besar laju aliran volumetrik HSS, maka semakin besar juga jumlah kalor yang diserap di tangki cooler.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh DIPA-PTKRN tahun anggaran 2015-2016 dan ucapan terimakasih kepada rekan-rekan Subbidang Fasilitas Termohidrolika – BPFKR atas terselenggaranya kegiatan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

1. BATAN, "Rencana Strategik BATAN tahun 2015-2019", BATAN, Jakarta (2015).
2. IAEA-TECDOC-1264, "Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants", IAEA, November, Vienna (2009).
3. WANG YAN, "Preliminary Study for The Passive Containment Cooling System Analysis of The Advanced PWR", Energy Procedia 39, pp,240-247 (2013).
4. MULYA JUARSA, GIARNO, G.B. HERU K., DEDY HARYANTO, JOKO PRASETIO, "Passive system simulation facility (FASSIP) loop for natural circulation study", Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir (2016).
5. GIARNO, MULYA JUARSA, G.B.HERU K, JOKO PRASETIO W, "Perancangan sistem *heat-sink* untai FASSIP-01 menggunakan *software Cycle-Tempo*", Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir (2015).
6. HILARY D, BREWSTER, "Fluid Mechanics", Oxford Book Company, Jaipur, India (2009).
7. GIARNO, G.B.HERU K, JOKO PRASETIO W, MULYA JUARSA, "Karakterisasi *Pre-cooler* sebagai Sistem *Heat Sink* Pada Untai Fassisip-01", Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir (2016).
8. J. VIKAS et al., "Experimental investigation on the flow instability behavior of a multichannel boiling natural circulation loop at low-pressures", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 34, pp.776–787 (2010).
9. YUNUS A.CENGEL, MICHAEL A, "Thermodynamics An Engineering Approach", 6th Edition, McGraw-Hill Book, New York, USA (2007).
10. Software Water 97_v13, Steam Table (1997).
11. Software Origin Pro 8.0, OriginLab Corporation, USA (2010).