

Analisis Kemampuan Pendinginan *Water Cooling Tank* (WCT) Berdasarkan Perubahan Daya *Heater* pada Untai FASSIP-6S

Rangga Aditya Faturahman¹, Roy Waluyo¹, Dwi Yulijai¹, Putut Hery Setiawan², Shendy Akbar Maryadi³, Mulya Juarsa²

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Sains

Universitas Ibn Khaldun Bogor, Jl. K.H. Soleh Iskandar, Kedung Badak, Kota Bogor 16162

²Kelompok Riset Sistem Termofluida Reaktor Nuklir, Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir,
Organisasi Riset Tenaga Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN),
Gd.80, KST. B.J. Habibie, Setu, Tangerang Selatan 15314, Banten

³Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 55281

Email korespondensi: roy.waluyo@uika-bogor.ac.id

Abstrak

Penelitian mengenai fenomena sirkulasi alami merupakan aspek penting dalam pengembangan sistem keselamatan pasif pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Untuk mendukung studi ini, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) telah merancang dan membangun fasilitas uji FASSIP-6S (Fasilitas Simulasi Sistem Pasif-6S), yang berfungsi untuk mengamati perilaku sistem pendingin pasif. Sistem tersebut dirancang untuk beroperasi tanpa daya eksternal dalam upaya menurunkan temperatur reaktor, menghilangkan panas peluruhan, dan mencegah pelepasan zat radioaktif ke lingkungan. Penelitian ini difokuskan pada evaluasi kemampuan pendinginan *Water Cooling Tank* (WCT) terhadap variasi daya pemanas. Eksperimen dilakukan pada untai rektanguler berskala menengah (tinggi 2,5 m dan lebar 0,85 m) dengan pengukuran temperatur menggunakan termokopel tipe-K. Parameter yang diamati meliputi daya pemanas, suhu masuk dan keluar fluida, laju aliran sirkulasi alami, serta laju aliran massa. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan daya pemanas meningkatkan kemampuan perpindahan panas WCT dan memperkuat sirkulasi alami, sebagaimana tercermin dari peningkatan bilangan Reynolds.

Kata kunci: FASSIP-6S, Perpindahan kalor, sirkulasi alami, sistem pendingin pasif, *Water Cooling Tank*,

Abstract

Research on natural circulation phenomena is a crucial aspect in the development of passive safety systems for Nuclear Power Plants (NPPs). To support this study, the National Research and Innovation Agency (BRIN) has designed and constructed the FASSIP-6S (Passive System Simulation Facility-6S), a test facility intended to observe the behavior of passive cooling systems. This system is designed to operate without external power, aiming to reduce reactor temperature, remove decay heat, and prevent the release of radioactive materials into the environment. This research evaluates the cooling performance of the water-cooling tank (WCT) at varying heater power inputs. Experiments were conducted in a medium-scale rectangular loop (2.5 m high and 0.85 m wide), with temperature measurements taken with Type-K thermocouples. Observed parameters include heater power, inlet and outlet fluid temperatures, natural circulation flow rate, and mass flow rate. The results indicate that increasing the heater power enhances the WCT's heat transfer capability and strengthens natural circulation, as evidenced by the corresponding rise in the Reynolds number.

Keywords: FASSIP-6S, heat transfer, natural circulation, passive cooling system, *Water Cooling Tank*

I. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi listrik tidak hanya dipengaruhi oleh pertumbuhan jumlah penduduk,

tetapi juga oleh meningkatnya aktivitas ekonomi masyarakat dalam memenuhi kebutuhan hidup [1]. Kondisi ini menuntut perencanaan energi yang tepat untuk memastikan ketersediaan pasokan listrik guna

mendukung pembangunan daerah di masa depan [2]. Namun, ketergantungan terhadap sumber energi konvensional tak terbarukan, terutama bahan bakar fosil, semakin tidak berkelanjutan karena ketersediaannya terbatas dan proses pembentukannya memerlukan waktu sangat lama. Oleh karena itu, transisi dari sumber energi tak terbarukan ke energi terbarukan menjadi suatu keharusan, sejalan dengan semangat *from unrenewable to renewable energy resources* [3]. [4]. Meskipun demikian, pemanfaatan energi nuklir sebagai alternatif tidak lepas dari risiko besar, terutama terkait potensi kebocoran radiasi yang membahayakan lingkungan, manusia, hewan, tanah, air, dan udara [5].

Bencana Fukushima pada tahun 2011 menjadi simbol krisis legitimasi energi nuklir, di mana kegagalan sistem pendingin aktif akibat station blackout yang dipicu tsunami setinggi 30 meter menyebabkan kerusakan teras reaktor dan ledakan gas hidrogen, sehingga melepaskan radiasi ke lingkungan [6], [7]. Peristiwa tersebut menegaskan pentingnya sistem keselamatan reaktor yang andal, khususnya dalam mengelola sisa panas (*decay heat*) setelah reaktor dimatikan. Salah satu solusi yang terus dikembangkan adalah sistem keselamatan pasif (*passive safety system*), yang bekerja tanpa ketergantungan pada peralatan aktif atau intervensi operator, serta mampu memenuhi tiga fungsi utama: memadamkan reaktor dengan aman, menghilangkan panas peluruhan, dan mengandung zat radioaktif agar tidak terlepas ke lingkungan [8]. Dalam konteks ini, penelitian dan pengembangan di bidang termohidrolika reaktor menjadi sangat penting, terutama yang berbasis pada hukum alam [9].

Salah satu prinsip dasar sistem keselamatan pasif adalah sirkulasi alami (*natural circulation*), yaitu pergerakan fluida yang terjadi secara spontan akibat perbedaan densitas yang disebabkan oleh gradien temperatur, tanpa bantuan pompa atau perangkat mekanis lainnya [10]. Penerapan sirkulasi alami dalam PLTN melalui *Passive Cooling System* (PCS) dapat meningkatkan keandalan dan keamanan operasi instalasi nuklir [11],[12]. Sistem ini telah terbukti efektif dalam berbagai aplikasi, terutama pada sistem pendinginan pasif PLTN [13].

Sirkulasi alami dapat terjadi dalam dua regime aliran: satu fase (cair atau uap) dan dua fase (campuran cair-uap), di mana sistem satu fase umumnya digunakan pada reaktor bertekanan tinggi, sedangkan dua fase diterapkan pada boiler, *thermosyphon*, dan reaktor seperti PWR, VVER, dan PHWR [14].

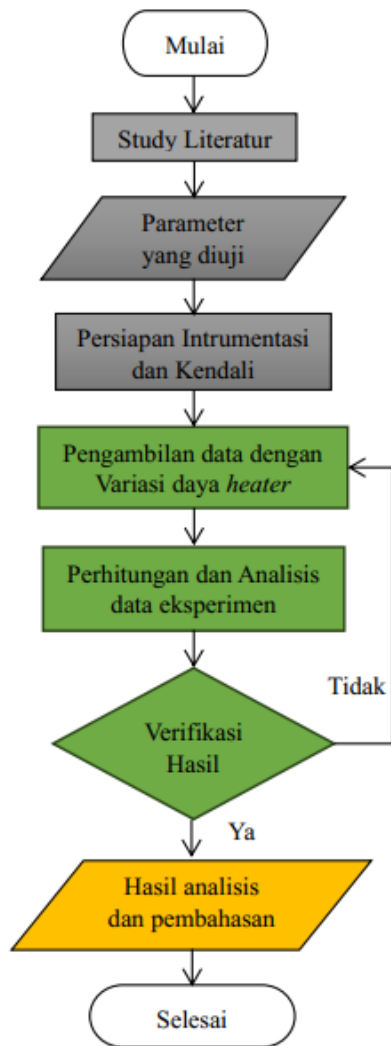
Faktor-faktor seperti geometri sistem, temperatur, dan daya pemanas sangat memengaruhi kinerja sirkulasi alami. Penelitian sebelumnya

menunjukkan bahwa variasi diameter pipa dan kenaikan temperatur berdampak langsung terhadap aliran fluida, dengan peningkatan gaya apung akibat penurunan densitas fluida [15]. Namun, masih diperlukan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh daya pemanas terhadap parameter kunci seperti laju aliran sirkulasi alami, bilangan Reynolds, dan laju pemindahan kalor dalam sistem berbentuk untai rektanguler (*rectangular loop*).

Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk menginvestigasi pengaruh daya pemanas pada *Water Heating Tank* (WHT) terhadap laju aliran sirkulasi alami, bilangan Reynolds, dan perpindahan kalor pada untai rektanguler (*rectangular loop*). Penelitian ini difokuskan pada analisis kemampuan pengambilan kalor oleh *Water Cooling Tank* (WCT) sebagai bagian integral dari sistem sirkulasi alami, dengan memvariasikan daya pemanas pada WHT untuk mengevaluasi respons termohidrolik sistem. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kinerja pendinginan pasif, serta memberikan kontribusi bagi pengembangan sistem pendinginan yang lebih efisien dan andal dalam desain sistem keselamatan reaktor nuklir masa depan.

II. METODE PENELITIAN

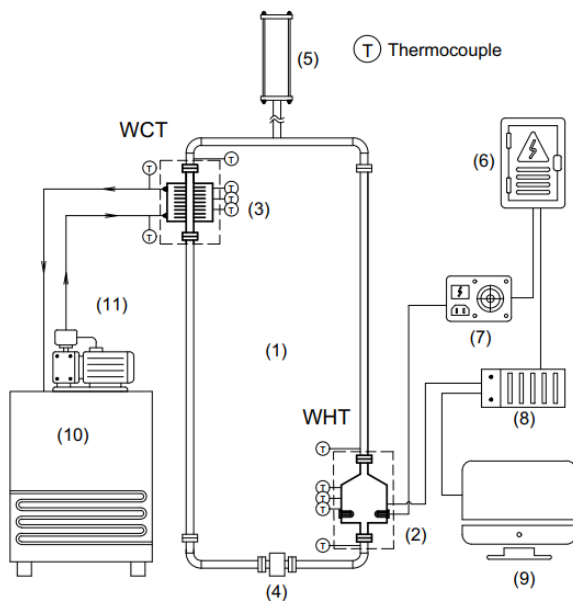
Penelitian ini dilakukan secara eksperimental yang dirancang untuk menginvestigasi fenomena sirkulasi alami dalam sistem pendingin pasif. Diagram alir penelitian seperti terlihat pada Gambar 1. Sistem instrumentasi selama eksperimen diintegrasikan dengan sistem akuisisi data berbasis NI-cDAQ yang memungkinkan pengukuran parameter termohidrolik seperti temperatur dan aliran secara *real-time*. Data yang diperoleh ditampilkan dan dikontrol melalui komputer menggunakan perangkat lunak monitoring display yang dikembangkan secara khusus. Analisis dilakukan melalui perhitungan menggunakan persamaan perpindahan panas dan analisis bilangan non-dimensional. Set-up eksperimen seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Tabel 1. Alat utamapada untai rektangular FASSIP-6S

No	Alat	Fungsi
1	Untai rectangular FASSIP-06S	Mensirkulasikan fluida
2	WHT	Memanaskan fluida kerja
3	WCT	Mendinginkan fluida kerja
4	Elektromagnetik Flowmeter	Mengukur debit aliran natural sirkulasi
5	Ekspansion tank	Menjaga tekanan sistem agar tetap pada tekanan atmosfer
6	Control panel	Mengatur operasi peralatan listrik
7	Power control	Pengendali daya listrik
8	National Instrument-cDAQ 9178	Mengontrol dan melakukan pembacaan data pengukuran pada setiap modul NI dan dihubungkan dengan computer
9	Cooling Thermal Bath (CTB)	Mengontrol temperatur fluida kerja pendinginan berdasarkan kebutuhan tangki pendingin
9	Komputer	Monitoring eksperimen
10	Cooling Thermal Bath (CTB)	Mengontrol temperatur fluida kerja pendinginan berdasarkan kebutuhan tangki pendingin
11	Pompa	Mensirkulasikan fluida pendingin dari CTB ke WHT

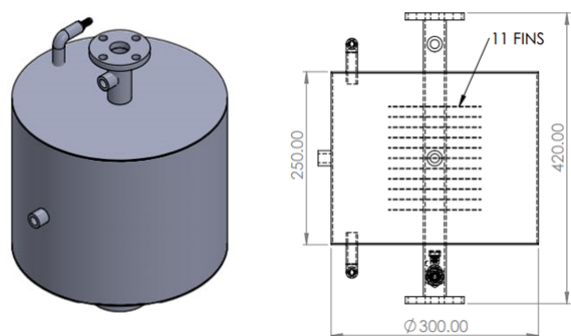


Gambar 2. Eksperimental set-up FASSIP-6S

Fluida kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah air. Adapun peralatan utama yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

A. Water Cooling Tank

Water Cooling Tank (WCT) berfungsi untuk mendinginkan fluida kerja yang ada didalam untai rektangular, tujuannya adalah untuyk menciptakan perbedaan temperatur sehingga menghasilkan sirkulasi alami akibat perbedaan tekanan yang disebabkan oleh perbedaan fluida kerja yang ada didalam untai tektangular. Detail konfigurasi WCT ditampilkan pada Gambar 3, dengan spesifikasinya tercantum dalam Tabel 1.



Gambar 3. Tangki pendingin

Tabel 3. Spesifikasi tangki pendingin

No	Deskripsi	Spesifikasi
1	Tipe	Non direct
2	Material	Stainless Steel (SUS304)
3	Diameter	300mm
4	Tinggi	250mm

B. Rugi Kalor

Rugi kalor adalah energi panas yang hilang dari suatu sistem ke lingkungan sekitar. Rugi kalor umumnya terjadi karena ketidaksempurnaan sistem isolasi termal atau adanya perpindahan panas yang tidak terkontrol antara komponen sistem dengan lingkungan. Dalam konteks eksperimen pada fasilitas FASSIP-6S, rugi kalor perlu diperhitungkan untuk mengevaluasi akurasi neraca energi dan efisiensi sistem pendingin pasif, terutama pada WCT. Besarnya rugi kalor dihitung berdasarkan perbedaan antara input kalor ke sistem dan kalor efektif diserap atau dibuang oleh fluida pendingin, dengan mempertimbangkan gradien temperatur dinding tangki, luas permukaan, serta konduktivitas termal material dan isolasi yang digunakan. .

$$Q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

Dimana:

- Q : Rugi kalor [J]
 $\dot{m}$: Massa benda [kg]
 C : Kapasitas kalor [J/kg·K]
 ΔT : perubahan suhu [K].

Laju aliran masa diperoleh melalui perhitungan yang dilakukan berdasarkan data laju aliran fluida yang didapat dalam satuan LPM dengan persamaan berikut:

Konversi dari LPM ke m^3/s :

$$Q = \text{LPM}/60000$$

Perhitungan laju aliran massa :

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (2)$$

Dimana :

- $\dot{m}$: Laju aliran massa [kg/s].
 Q : Volume air per satuan waktu [m^3/s]
 ρ : Massa jenis [kg/m^3]

C. Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan bilangan nondimensional yang merupakan rasio antara gaya inersia (μsp) terhadap gaya viskos (μ/L) yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan Reynolds berbanding lurus dengan kecepatan rata rata fluida, diameter dalam pipa, dan massa jenis

fluida dan berbanding terbalik dengan viskositas [16]. Diketahui rumus bilangan Reynolds yaitu:

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3)$$

Dimana:

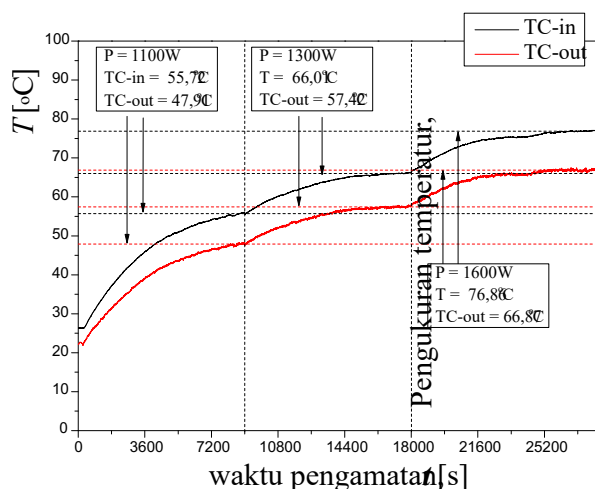
- Re : Bilangan Reynolds
 v : Kecepatan Aliran [m/s]
 μ : Viskositas Dinamis [m^2/s]
 ρ : Massa Jenis [kg/m^3]
 (D) : diameter dalam pipa pengujian [m]

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan studi eksperimental pemindahankalor pada tangki pendingin atau WCT, untuk pengamatan aliran sirkulasi alami selama kondisi tunak memberikan hasil berupa karakteristik perubahan temperatur dan debit aliran. Perhitungan pemindahan kalor akan dilakukan berdasarkan variasi setting daya pada WHT dengan seting eksperimen yaitu, 1100W, 1300W, dan 1600W. Setiap Eksperimen dilakukan selama 9000 detik dimana terdapat kondisi transien panas, tunak dan transien pendinginan, namun hasil pembahasan pada bab ini hanya menganalisis pada kondisi tunak.

A. Karakteristik Temperatur

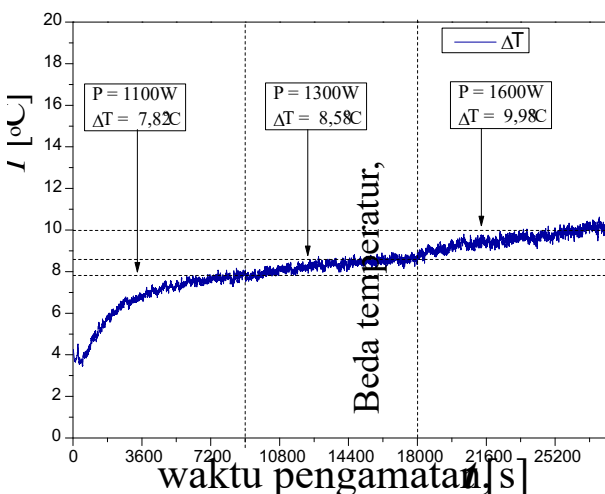
Karakteristik pengukuran temperatur selama pelaksanaan eksperimen ini diperoleh melalui pengukuran menggunakan termokopel yang telah terkalibrasi. Variasi data pengukuran pada berbagai variasi daya didapatkan berdasarkan perekaman instrumen dari modul pengukuran NI 9214. Data temperatur yang diambil dari untai rektangular FASSIP-6S kemudian dikonversi ke dalam format Excel dan dipindahkan ke software grafik untuk diproses menjadi visualisasi grafik perubahan temperatur terhadap waktu, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Karakteristik temperatur berdasarkan variasi daya TC_{in} & TC_{out}

Gambar 4 menampilkan karakteristik temperatur pada Water Cooling Tank (WCT) dalam bentuk grafik, dengan parameter TC_{in} , TC_{out} , dan ΔTC (selisih temperatur). Garis merah menunjukkan TC_{out} , garis hitam mewakili TC_{in} , dan garis biru menunjukkan ΔTC . Pada daya 1100 W (selama 9000 detik), rata-rata TC_{in} dan TC_{out} berturut-turut adalah $55,72^{\circ}\text{C}$ dan $47,91^{\circ}\text{C}$, dengan nilai puncak mencapai $56,06^{\circ}\text{C}$ dan $48,24^{\circ}\text{C}$. Saat daya dinaikkan ke 1300 W (9000 detik berikutnya), rata-rata TC_{in} dan TC_{out} meningkat menjadi $66,01^{\circ}\text{C}$ dan $57,42^{\circ}\text{C}$ (puncak: $66,26^{\circ}\text{C}$ dan $57,94^{\circ}\text{C}$). Pada peningkatan daya ke 1600 W, rata-rata TC_{in} dan TC_{out} mencapai $76,86^{\circ}\text{C}$ dan $66,87^{\circ}\text{C}$ (puncak: $77,00^{\circ}\text{C}$ dan $67,44^{\circ}\text{C}$).

Terjadi kenaikan temperatur yang konsisten seiring peningkatan daya: selisih rata-rata TC_{in} antara 1100 W dan 1300 W adalah $10,29^{\circ}\text{C}$, serta $10,85^{\circ}\text{C}$ antara 1300 W dan 1600 W. Untuk TC_{out} , kenaikan rata-rata sebesar $9,51^{\circ}\text{C}$ dan $9,45^{\circ}\text{C}$. Secara keseluruhan, dari daya 1100 W ke 1600 W, TC_{in} meningkat $21,14^{\circ}\text{C}$ dan TC_{out} sebesar $18,96^{\circ}\text{C}$, menunjukkan respons termal sistem yang proporsional terhadap kenaikan beban pemanasan.



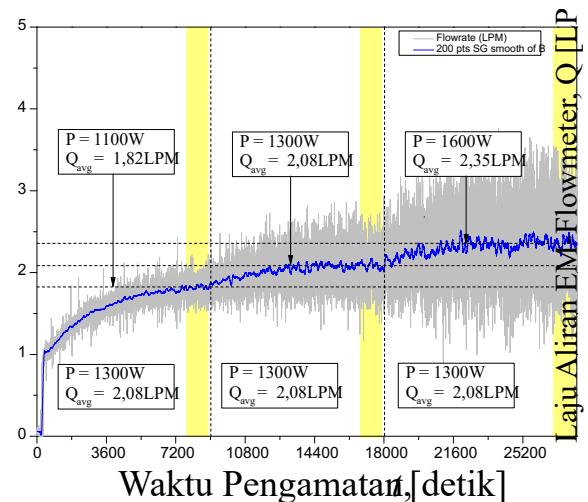
Gambar 5. Karakteristik temperatur berdasarkan selisih TC_{in} & TC_{out}

Gambar 5 menunjukkan nilai ΔTC untuk setiap variasi daya serta secara keseluruhan selama penelitian. Pada daya 1100 W, ΔTC rata-rata mencapai $7,82^{\circ}\text{C}$, meningkat menjadi $8,58^{\circ}\text{C}$ pada daya 1300 W, dan mencapai $9,98^{\circ}\text{C}$ pada daya 1600 W. Kenaikan ini menunjukkan bahwa semakin besar daya pemanas, semakin besar pula perbedaan temperatur dalam sistem pendinginan. Selisih ΔTC antara 1100 W dan 1300 W adalah $0,76^{\circ}\text{C}$, antara 1300 W dan 1600 W sebesar $1,40^{\circ}\text{C}$, serta $2,16^{\circ}\text{C}$ antara 1100 W dan 1600 W, mengindikasikan peningkatan gradien termal yang proporsional terhadap kenaikan daya. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian terdahulu oleh Bejjam & Kumar [17] dan Misale dkk. [18], yang menyatakan

bahwa peningkatan daya pemanas berdampak positif terhadap efisiensi perpindahan panas dalam sistem sirkulasi alami.

B. Laju Aliran Sirkulasi Alami

Hasil perhitungan dikonversi ke dalam format Excel dan diolah menggunakan program pengolah grafik untuk menyajikan analisis laju aliran sirkulasi alami selama eksperimen. Gambar 6 menampilkan grafik laju aliran sirkulasi alami untuk setiap variasi kondisi penelitian yang telah ditentukan.



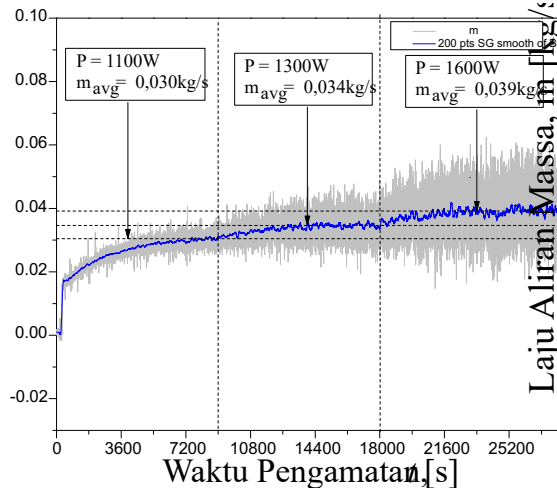
Gambar 6. Laju aliran natural sirkulasi

Gambar 6 menampilkan laju aliran sirkulasi alami pada variasi daya 1100 W, 1300 W, dan 1600 W. Pada daya 1100 W, laju aliran maksimum mencapai 2,43 LPM dengan rata-rata 1,82 LPM. Pada daya 1300 W, nilai maksimum mencapai 2,93 LPM dan rata-rata sebesar 2,08 LPM. Sedangkan pada daya 1600 W, laju aliran maksimum mencapai 3,75 LPM dengan rata-rata 2,35 LPM. Dapat dilihat bahwa peningkatan daya pemanas menyebabkan peningkatan baik pada laju aliran maksimum maupun rata-rata, menunjukkan respons positif sirkulasi alami terhadap kenaikan beban termal.

C. Laju Aliran Massa

Laju aliran massa untuk setiap variasi daya diperoleh dengan mengalikan debit aliran air dalam unit rectangular terhadap massa jenis air, di mana massa jenis ditentukan berdasarkan fungsi temperatur air yang diukur pada bagian pipa rectangular di dalam WCT. Variasi temperatur menyebabkan perubahan massa jenis, sehingga perhitungan laju aliran massa mempertimbangkan kondisi termal aktual selama eksperimen. Hasil perhitungan dikonversi ke dalam lembar kerja Excel dan selanjutnya diolah menggunakan perangkat lunak pengolah grafik untuk menyajikan data dalam bentuk grafik. Gambar 7 menampilkan dinamika laju aliran massa selama eksperimen, terlihat tren peningkatan seiring kenaikan daya pemanas akibat

perubahan densitas dan gradien temperatur yang lebih besar.



Gambar 7. Laju aliran massa

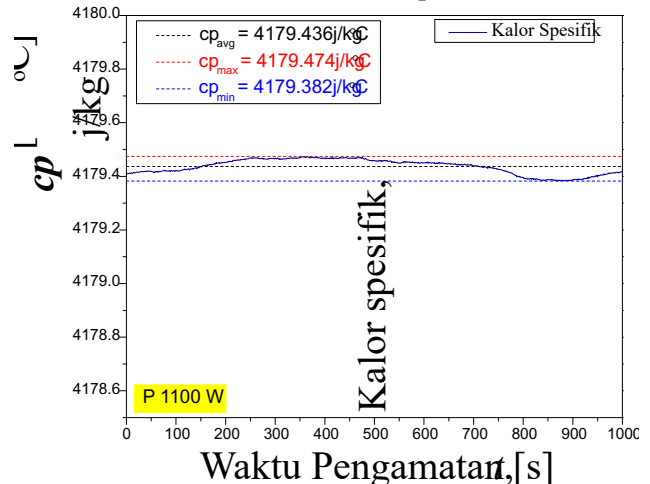
Gambar 7 menampilkan grafik laju aliran massa pada variasi daya 1100 W, 1300 W, dan 1600 W. Pada daya 1100 W, laju aliran massa maksimum mencapai 0,041 kg/s dengan nilai rata-rata 0,025 kg/s. Pada daya 1300 W, nilai maksimum mencapai 0,048 kg/s dan rata-rata sebesar 0,033 kg/s. Sedangkan pada daya 1600 W, laju aliran massa maksimum mencapai 0,062 kg/s dengan rata-rata 0,038 kg/s.

Dari data tersebut terlihat bahwa peningkatan daya pemanas berbanding lurus dengan peningkatan laju aliran massa, baik pada nilai maksimum maupun rata-rata. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan daya meningkatkan gradien temperatur dan perbedaan densitas dalam sistem, sehingga mendorong sirkulasi alami yang lebih kuat. Dengan demikian, besar daya yang digunakan secara langsung memengaruhi performa aliran massa dalam sistem pendinginan.

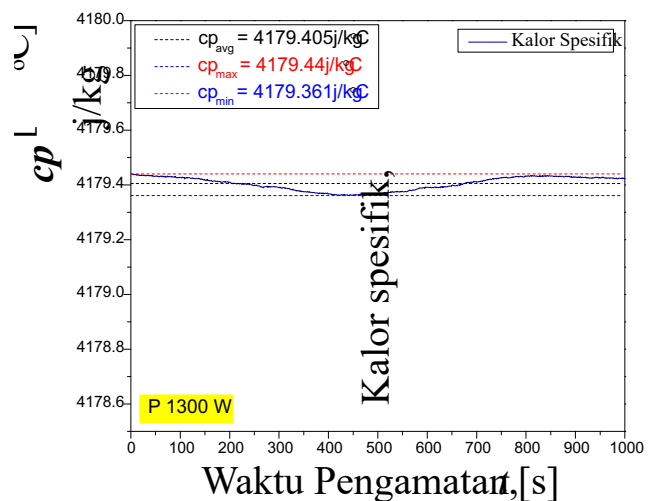
D. Kalor Spesifik Daya 1100W

Kalor spesifik dianalisis pada WCT untuk variasi daya 1100 W, 1300 W, dan 1600 W, ditampilkan pada Gambar 8(a), 8(b), dan 8(c). Pada daya 1100 W (Gambar 8a), nilai kalor spesifik meningkat secara bertahap hingga mencapai puncak sebesar 4179,474 J/kg°C, kemudian mengalami penurunan perlahan disertai fluktuasi kecil hingga mencapai nilai terendah 4179,382 J/kg°C, dengan nilai rata-rata sebesar 4179,436 J/kg°C. Perubahan ini diduga dipengaruhi oleh perpindahan panas antara elemen pemanas dan fluida pendingin, di mana peningkatan awal terjadi akibat penyerapan energi panas yang menyebabkan kenaikan temperatur fluida. Penurunan setelah titik maksimum kemungkinan disebabkan oleh perubahan karakteristik termal fluida akibat kenaikan temperatur rata-rata fluida selama eksperimen. Meskipun variasi nilai sangat kecil, tren yang konsisten menunjukkan respons

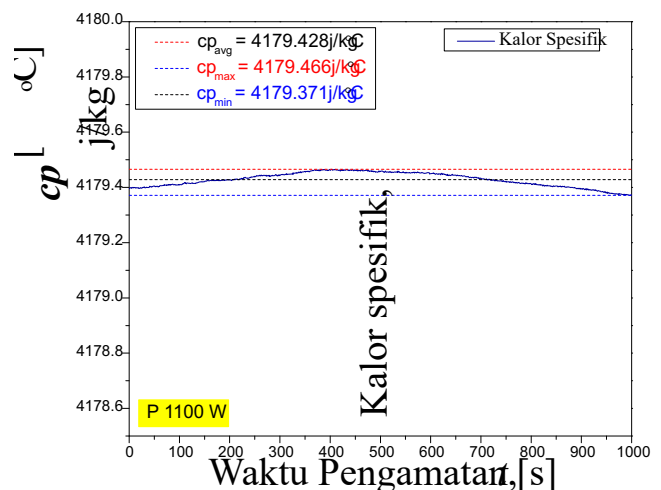
termal fluida terhadap beban pemanasan yang dinamis. Kenaikan suhu selama eksperimen.



(a)



(b)



(c)

Gambar 8, Kalor spesifik (a) Setting daya 1100W (b) Setting daya 1300W (c) Setting daya 1600W

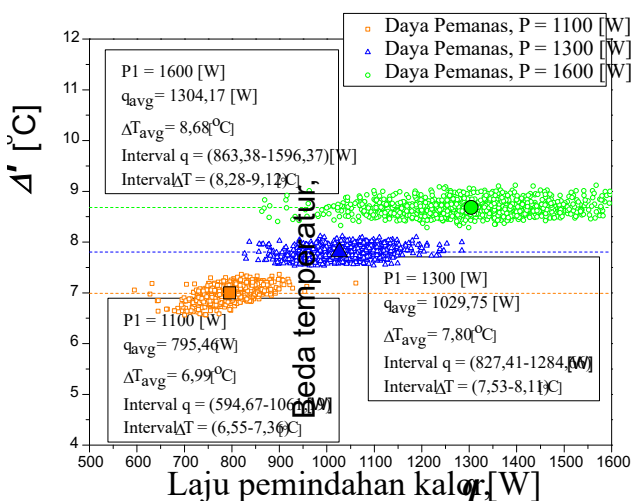
Pada daya 1300 W (Gambar 8b), kalor spesifik menurun terlebih dahulu hingga mencapai nilai terendah 4179,361 J/kg°C, kemudian meningkat

kembali hingga puncak 4179,44 J/kg°C, dengan nilai rata-rata 4179,405 J/kg°C. Penurunan awal diduga akibat ketidakstabilan perpindahan panas saat sistem mulai beradaptasi, sedangkan kenaikan berikutnya menunjukkan kondisi menuju kestabilan termal. Pola ini menggambarkan proses adaptasi sistem menuju keadaan tunak, di mana penyerapan panas oleh fluida mulai seimbang dengan beban pemanasan. Perubahan kalor spesifik mencerminkan respons termal fluida.

Pada daya 1600 W (Gambar 8c), kalor spesifik meningkat bertahap hingga mencapai puncak 4179,466 J/kg°C, menunjukkan kondisi perpindahan panas yang intensif dan penyerapan panas yang efektif oleh fluida di dalam WCT. Setelah puncak, nilai kalor spesifik menurun secara konsisten hingga titik terendah 4179,371 J/kg°C, dengan rata-rata 4179,428 J/kg°C. Penurunan ini diduga akibat kenaikan suhu rata-rata fluida seiring waktu, yang mengubah karakteristik termal dan menyebabkan penurunan kapasitas panas tampak meskipun daya pemanas konstan. Pola ini menggambarkan dinamika respons termal fluida menuju kondisi tunak dalam sistem pendinginan.

E. Pemindahan kalor WCT berdasarkan variasi daya

Perpindahan kalor menggambarkan jumlah kalor yang ditransfer dari sistem loop ke tangki pendingin, dipengaruhi oleh variasi daya pemanas dan fluktuasi laju aliran fluida selama eksperimen. Hasil perpindahan kalor untuk variasi daya 1100 W, 1300 W, dan 1600 W disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 9.



Gambar 9. Pemindahan kalor variasi daya

Berdasarkan Gambar 9, terlihat hubungan antara perbedaan temperatur (ΔT) dan laju pemindahan kalor (q) dalam watt (W) pada tiga variasi daya pemanas: 1100 W, 1300 W, dan 1600 W. Setiap titik pada grafik merepresentasikan nilai rata-rata q dan ΔT pada masing-masing kondisi. Pada daya 1100 W,

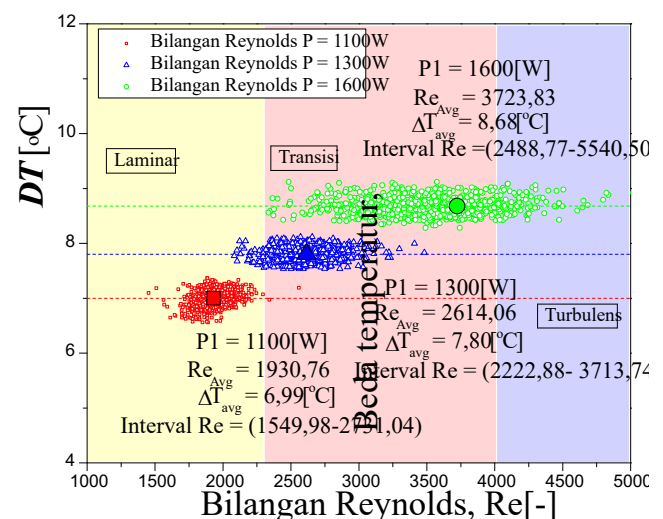
diperoleh ΔT rata-rata 6,99°C dan q rata-rata 795,46 W (simbol persegi, garis putus-putus oranye). Pada 1300 W, ΔT rata-rata mencapai 7,80°C dengan q rata-rata 1029,75 W (simbol segitiga, garis biru). Sedangkan pada 1600 W, ΔT rata-rata 8,68°C dan q rata-rata 1304,17 W (simbol lingkaran, garis hijau). Grafik menunjukkan tren peningkatan laju pemindahan kalor seiring kenaikan daya pemanas, yang menandakan peningkatan efektivitas pendinginan WCT pada beban termal lebih tinggi. Data rata-rata pemindahan kalor untuk masing-masing variasi daya disajikan secara ringkas dalam Tabel 4.

Tabel 4. Nilai pemindahan kalor variasi daya 1100W,1300W,1600W

Daya (W)	Pemindahan Kalor (W)	Efisiensi (%)	Selisih (%)
1100	795,46	72,3	27,7
1300	1029,75	79,2	20,8
1600	1304,17	81,5	18,5

F. Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds (Re) diperoleh untuk variasi daya 1100 W, 1300 W, dan 1600 W, dengan analisis dilakukan pada bagian WCT dan hasilnya ditampilkan pada Gambar 10. Gambar tersebut menunjukkan hubungan antara bilangan Reynolds dan perbedaan temperatur (ΔT) dalam °C. Setiap variasi daya direpresentasikan dengan simbol berbeda: kotak merah untuk 1100 W, segitiga biru untuk 1300 W, dan lingkaran hijau untuk 1600 W.



Gambar 10. Bilangan Reynolds variasi daya

Peningkatan daya pemanas berdampak langsung terhadap kenaikan bilangan Reynolds, yang menunjukkan peningkatan laju aliran fluida. Pada daya 1100 W, bilangan Reynolds rata-rata mencapai 1930,76 (rentang 1549,98–2731,04) dengan ΔT rata-rata 6,99°C; pada 1300 W, Re rata-

rata sebesar 2614,06 (rentang 2222,88–3713,74) dan ΔT rata-rata 7,80°C; serta pada 1600 W, Re rata-rata mencapai 3723,83 (rentang 2488,77–5540,50) dengan ΔT rata-rata 8,68°C. Kenaikan bilangan Reynolds menandakan aliran menjadi lebih cepat, yang mendukung perpindahan panas yang lebih efektif. Berdasarkan nilai Re, aliran pada daya 1100 W tergolong laminar, sedangkan pada daya 1300 W dan 1600 W berada dalam regime transisi. Hasil ini memiliki kesesuaian yang baik dengan penelitian yang dilakukan Juarsad dkk [19]. Nilai rata-rata bilangan Reynolds untuk masing-masing variasi daya disajikan secara ringkas dalam Tabel 5.

Tabel 5. Hasil perhitungan bilangan Reynolds

Daya (W)	Interval Bilangan Re (-)	Rata-rata Bilangan Re (-)
1100	(1549,98-2731,04)	1930,76
1300	(2222,88-3713,74)	2614,06
1600	(2488,77-5540,50)	3723,83

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis terhadap kemampuan pendinginan WCT pada untai FASSIP-6S dengan variasi daya heater pada WHT, dapat disimpulkan bahwa karakteristik temperatur dan laju aliran dipengaruhi secara signifikan oleh peningkatan daya heater. Peningkatan daya dari 1100 W menjadi 1300 W dan 1600 W menyebabkan kenaikan temperatur dan laju aliran fluida, menunjukkan hubungan positif antara daya input dan performa termal sistem. Kemampuan pendinginan WCT juga meningkat seiring dengan peningkatan daya pemanas, yang tercermin dari kenaikan laju pemindahan kalor rata-rata, menandakan efektivitas sistem pendinginan dalam merespons beban termal yang lebih tinggi. Analisis bilangan Reynolds menunjukkan bahwa pada daya 1100 W, aliran berada dalam regime laminar dengan rentang Re sebesar 1549,98–2731,04 dan rata-rata 1930,76; sedangkan pada daya 1300 W (Re = 2222,88–3713,74, rata-rata 2614,06) dan 1600 W (Re = 2488,77–5540,50, rata-rata 3723,83), aliran memasuki regime transisi, mengindikasikan perubahan pola aliran yang berpotensi meningkatkan perpindahan panas konvektif. Namun, belum tercapainya aliran turbulen penuh pada kondisi uji menunjukkan adanya ruang untuk optimasi lebih lanjut. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk memperluas variasi daya di atas 1600 W guna mengamati transisi menuju aliran turbulen dan efeknya terhadap efisiensi pendinginan. Selain itu, disarankan pula untuk melakukan pemodelan

numerik guna memprediksi distribusi temperatur dan aliran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir (PRTRN), BRIN, juga kepada NRTFSys. Research Group atas dukungannya dan keterlibatan dalam kegiatan penelitian ini. Penelitian ini sepenuhnya didanai dan merupakan bagian dari Program Riset Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM) batch-1 LPDP Mandatori BRIN nomor kontrak B-811/II.7.5/FR/6/2022 dan B-2103/III.2/HK.04.03/7/2022 untuk tahun anggaran 2022-2023.

REFERENSI

- [1] K. Kaygusuz, "Energy for sustainable development: A case of developing countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1116–1126, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.11.013.
- [2] Andre Cosirof Koloay, Hans Tumaliang, and Marthinus Pakiding, "Perencanaan Dan Pemenuhan Kebutuhan Energi Listrik Di Kota Bitung," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 7, no. 3, pp. 285–294, 2018.
- [3] H. Susiati *et al.*, *Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Indonesia (Upaya Berkelanjutan Menuju Net Zero Emission)*, no. May. 2023. doi: 10.5281/zenodo.7905583.
- [4] I. Bastori and M. D. Birmano, "Analisis Ketersediaan Uranium di Indonesia untuk Kebutuhan PLTN Tipe PWR 1000 MWe," vol. 19, no. 2, 2017.
- [5] S. dan Sunaryo, "Keuntungan dan Potensi Bahaya PLTN," 1993.
- [6] P. Gaio, "Krisis Legitimasi Energi Nuklir Dalam Ekonomi Politik Internasional: Studi Kasus Fukushima," *Jurnal Ilmu Politik dan Komunikasi*, vol. 7, no. 1, pp. 47–62, 2017.
- [7] T. Hutomo Putra, "Estimasi Pengukuran Laju Aliran Sirkulasi Alam Pada Simulasi Sistem Pendingin Pasif Reaktor Nuklir Pre-FASSIP 02," *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, vol. 3, no. 2, pp. 122–127, 2019, doi: 10.24198/jiif.v3i2.22458.
- [8] B. G. Limbaran, A. W. Harto, and S. Sihana, "Analisis Sistem Pendingin Pasif Pasca Shutdown Dengan Skenario Severe Accident pada Innovative Molten Salt Reactor (IMSR)," *Teknofisika*, vol. 24, no. 1, pp. 29–34, 2021.
- [9] M. Juarsa, "Passive system simulation facility (FASSIP) loop for natural circulation study," 2016.
- [10] H. Adrian *et al.*, "Perhitungan Estimasi Laju Aliran Sirkulasi Alami Pada Untai Bertekanan FASSIP-05," vol. M, no. 2, pp. 86–92, 2023.
- [11] D. Haryanto, G. Giarno, A. E. Pamungkas, A. Rosidi, G. B. H. Kusnugroho, and M. Juarsa, "Analisis Kekuatan Mekanik pada Struktur Cooling Tank Section Untai FASSIP-03 NT Berbasis

- Simulasi Software,” *Semesta Teknika*, vol. 25, no. 1, pp. 24–32, 2022, doi: 10.18196/st.v25i1.13470.
- [12] P. H. Setiawan, A. S. Pamitran, D. Yuliaji, R. Irwansyah, and M. Juarsa, “Jurnal Polimesin,” vol. 22, no. 5, 2025.
- [13] P. K. Vijayan, “Introduction to instabilities in natural circulation systems”.
- [14] D. Yuliaji *et al.*, “Thermal-hydraulics performance and stability two-phase flow using Al₂O₃ nanofluids in an open natural circulation loop,” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 218, no. February, 2025, doi: 10.1016/j.anucene.2025.111424.
- [15] I. Roswandi and A. S. Pamitran, “Experimental investigation of the impact of non-uniform pipe diameters on natural circulation and dimensionless flow in in a rectangular loop,” vol. 22, no. 5, pp. 383–389, 2025.
- [16] J. M. Johanes, P. P. Moniaga, E. P. Ariesta, D. R. B. Syaka, R. Sukarno, and U. MJuarsa, “Analisis Efek Perubahan Termal Terhadap Aliran Air Paksa Dan,” *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 9, no. 2, pp. 93–101, 2023.
- [17] R. B. Bejjam and K. Kiran Kumar, “Numerical investigation to study the effect of loop inclination angle on thermal performance of nanofluid-based single-phase natural circulation loop,” *International Journal of Ambient Energy*, vol. 40, no. 8, pp. 885–893, Nov. 2019, doi: 10.1080/01430750.2018.1432502.
- [18] M. Misale, P. Garibaldi, J. C. Passos, and G. G. De Bitencourt, “Experiments in a single-phase natural circulation mini-loop,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 31, no. 8, pp. 1111–1120, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2006.11.004.
- [19] M. Juarsa, A. R. Antariksawan, M. H. Kusuma, D. Haryanto, and N. Putra, “Estimation of natural circulation flow based on temperature in the FASSIP-02 large-scale test loop facility,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 105, p. 012091, Jan. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/105/1/012091.

