

Analisis Aliran Sirkulasi Alami di Bagian Pendingin Berdasarkan Variasi Temperatur Air Pemanas pada Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2

Asri Wahyuni¹, Dwi Yulijaji^{1,4}, Putut Hery Setiawan^{2,3}, Nur Rochman Budiyo⁴,
Shendy Akbar Maryadi⁴, Andhika Enggar Pamungkas², Arif Adtyas Budiman², Sunandi Kharisma⁴,
Roy Waluyo^{1,4}, Mulya Juarsa^{1,2*}

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Ibn Khaldun Bogor,
Jl. KH. Sholeh Iskandar KM.2, Kedungbadak, Kec. Tanah Sereal, Kota Bogor, Jawa Barat 16162, Indonesia

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

³Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Kampus UI, Kota Depok 16424 – Indonesia

⁴Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada,
Jalan Grafika No.2, Yogyakarta 55281 - Indonesia

*E-mail: mulya.juarsa@brin.go.id

Diajukan: 22-07-2023; Diterima: 09-04-2024; Diterbitkan: 29-04-2024

Abstrak

Sistem pendingin pasif berbasis mekanisme sirkulasi alami menjadi topik hangat dalam sistem keselamatan PLTN karena tidak membutuhkan pasokan listrik dan juga lebih ekonomis, maka perlu dilakukan penelitian untuk memperoleh karakteristik pendinginan pada bagian tangki pendingin perlu dipelajari mengingat proses pendinginan dilakukan dengan model tidak langsung. Tujuan penelitian yang dilakukan adalah untuk menganalisis aliran sirkulasi alami di bagian pendingin berdasarkan variasi temperatur air pemanas pada Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2. Penelitian dilakukan untuk memperoleh karakteristik perubahan temperatur pada bagian tangki pendingin berdasarkan variasi temperatur air pemanas serta bilangan Reynold dan laju aliran yang terjadi terhadap variasi temperatur. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental dengan memvariasi temperatur air pemanas dari 50°C, 60°C, dan 70°C dengan daya pemanas 4,2 kW dan temperatur air pendingin ditetapkan pada 20°C. Pengolahan data menghasilkan grafik karakteristik temperatur dan laju aliran yang terjadi. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa berdasarkan laju aliran sirkulasi alami yang terjadi pada bagian tangki pendingin Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2 untuk variasi temperatur air pemanas 50°C sebesar 1,32 LPM berada pada rejim aliran laminar dengan bilangan Reynold bernilai 1851 sedangkan pada temperatur air pemanas 60°C dan 70°C sebesar 1,61 LPM dan 1,94 LPM berada pada rejim aliran transisi yang secara berturut-turut bilangan Reynold bernilai 2624 dan 3716. Kenaikan gradien temperatur antara sisi panas dan sisi dingin telah meningkatkan laju aliran sirkulasi alami dan mempengaruhi rejim aliran yang terbentuk.

Kata kunci: bilangan Reynold; FASSIP-04 Ver.2; rejim aliran; sirkulasi alami; sistem pendingin pasif

Abstract

Passive cooling systems based on natural circulation mechanisms are a hot topic in nuclear power plant safety systems because they do not require electricity supply and are also more economical, it is necessary to conduct research to obtain cooling characteristics in the cooling tank section. The purpose of the research conducted was to analyze the flow of natural circulation in the cooling section based on variations in heating water temperature on the FASSIP-04 Ver.2 TP Rectangular Loop. The research was conducted to obtain the characteristics temperature in the cooling tank section based on variations in heating water temperature and the Reynolds number and flow rate that occurs with temperature variations. The research method was carried out experimentally by varying the temperature of the heating water from 50°C, 60°C and 70°C with a heating power of 4.2 kW and the cooling water temperature set at 20°C. Data processing produces graphs of temperature characteristics and flow rates. The experimental results show based on the natural circulation flow rate that occurs in the cooling tank section of FASSIP-04 Ver.2 TP Rectangular Loop for heating water temperature variations of 50°C of 1.32 LPM it is in the laminar flow regime with the Reynolds number being 1851 while at heating water temperature 60°C and 70°C of 1.61 LPM and 1.94 LPM are in the transient flow regime where the Reynolds number is 2624 and 3716 respectively. The increase in the temperature gradient between the hot side and the cold side has increased the natural circulation flow rate and affected the different flow regime formed.

Keywords: Reynold number; FASSIP-04 Ver.2; flow regime; natural circulation; passive cooling system

1. Pendahuluan

Kemajuan teknologi semakin meningkat yang menyebabkan peningkatan kebutuhan sumber energi. Namun penggunaan sumber energi berbahan dasar fosil menyebabkan naiknya emisi gas rumah kaca sehingga berdampak pada

perubahan iklim yang tidak stabil serta meningkatnya suhu bumi dan permukaan air laut. Visi tersebut yaitu dengan mengelola energi global ke depan diarahkan pada koridor pengurangan emisi, seperti peningkatan kapasitas dan pemanfaatan pembangkit Energi Baru Terbarukan (EBT) [1]. Salah satu EBT yang dapat dikembangkan saat ini yaitu Energi nuklir. Energi nuklir sudah menjadi energi alternatif bahkan sumber energi utama bagi beberapa negara dalam penyediaan listrik dari PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir).

Kejadian kecelakaan Fukushima Dai-ichi pada Maret 2011 membuat masyarakat semakin khawatir akan rencana pembangunan PLTN. Kecelakaan tersebut terjadi karena satu penyebab utama yaitu gempa dan gelombang tsunami yang menyebabkan seluruh sistem reaktor mengalami kejadian *Station Black Out* (SBO), dimana sistem pendingin aktif yang digerakkan menggunakan pompa primer tidak mampu beroperasi karena terendamnya generator diesel oleh air laut akibat tsunami, akibat kegagalan sistem tersebut menyebabkan terjadinya kelebihan panas di teras reaktor, kemudian teras reaktor mengalami pelelehan (*melt-down*) yang berdampak pada kerusakan bejana tekan reaktor (*reactor pressure vessel*) dan terlepasnya radiasi ke lingkungan [2] [3]. Berdasarkan peristiwa tersebut riset terkait manajemen termal terus ditingkatkan secara signifikan, terutama untuk keamanan PLTN. Penggunaan sistem pendingin pasif (*Passive Cooling System*, PCS) baik saat kecelakaan maupun operasi menjadi andalan dalam sistem keselamatan reaktor tingkat lanjut. Oleh karena itu perlu ditingkatkan melalui studi eksperimental untuk menyelidiki fenomena perpindahan panas dari peluruhan panas dalam kondisi pendinginan sementara [4] [5].

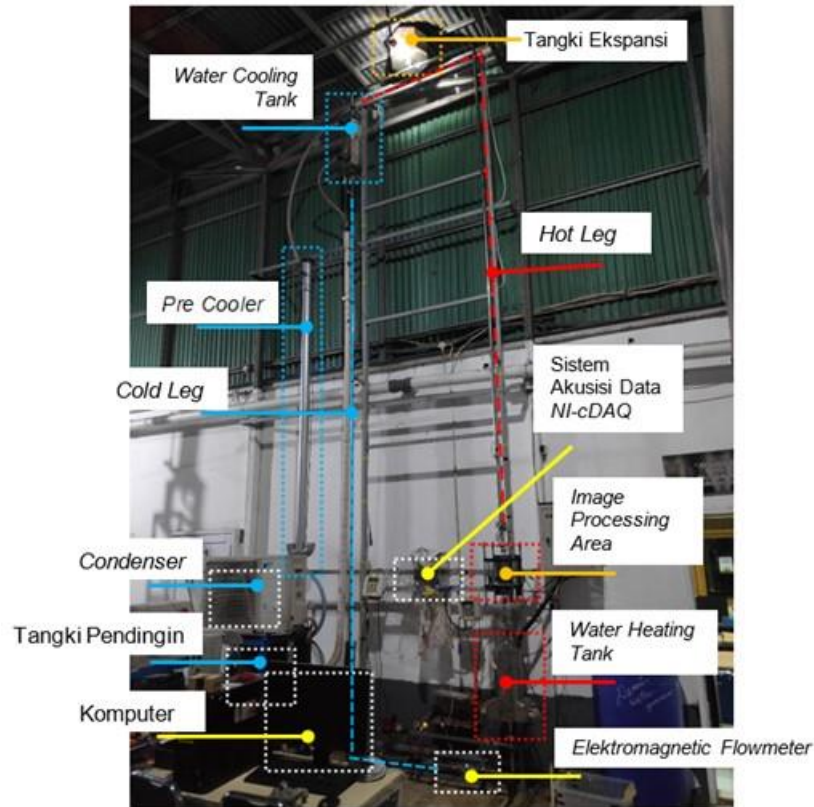
Sistem pendingin pasif berbasis mekanisme sirkulasi alami menjadi topik yang hangat diperbincangkan dalam sistem yang berhubungan dengan keselamatan PLTN karena tidak membutuhkan pasokan listrik dan juga lebih ekonomis. Berdasarkan inovasi tersebut telah melahirkan desain-desain reaktor nuklir baru, khususnya yang berdaya rendah (di bawah 300 MWe) yang disebut *Small Modular Reactor* (SMR) [6] [7]. SMR juga dilengkapi dengan fitur keselamatan yang dapat menekan resiko kecelakaan menggunakan prinsip sirkulasi alami. Konsep sederhana sirkulasi alami pada untai rektanguler disebabkan oleh adanya gaya apung (*Bouyancy force*) yang terjadi karena penurunan densitas fluida dan adanya gaya gesek perlambatan (*Retarding frictional force*) yang terjadi karena kenaikan densitas fluida dengan wilayah dingin di bagian atas dan wilayah panas di bagian bawah untai rektanguler [8] [9].

Berdasarkan uraian di atas, selanjutnya dilakukan penelitian guna mempelajari dan menguasai sistem pendingin pasif berbasis fenomena sirkulasi alami pada manajemen termal reaktor maju seperti *Small Modular Reactor* (SMR) dan reaktor berskala besar untuk peningkatan sistem keselamatan PLTN melalui kegiatan eksperimen. Kegiatan eksperimen menggunakan fasilitas Untai *Rektanguler Two Phase* Fasilitas Simulasi Sistem Pasif-04 Versi 2 disingkat Untai Rektanguler TP FASSIP-04 Ver.2 yang terdiri dari beberapa komponen utama seperti tangki pemanas dengan model pemanasan langsung, tangki pendingin dengan model pendinginan tidak langsung, tangki ekspansi, dan bagian transparan untuk pengamatan. Karakteristik pendinginan pada bagian tangki pendingin perlu dipelajari mengingat proses pendinginan dilakukan dengan model tidak langsung, sehingga tujuan penelitian yang dilakukan untuk menganalisis aliran sirkulasi alami di bagian pendingin berdasarkan variasi temperatur air pemanas pada Untai Rektanguler TP FASSIP-04 Ver.2.

2. Material dan metodologi

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental untuk mengetahui laju aliran sirkulasi alami berdasarkan temperatur air pemanas yang divariasikan. Eksperimen dilakukan menggunakan Untai Rektanguler TP FASSIP-04 Ver.2 sebagai fasilitas eksperimen mengenai fenomena aliran sirkulasi alami dengan kondisi aliran satu fase dan dua fase yang bekerja pada tekanan rendah. Alat ini dibuat dengan konsep untai rektanguler atau bentuk segi empat dengan panjang 6 meter dan lebar 1,32 meter menggunakan pipa SS 201 (Stainless Steel 201) dengan diameter 1 inch. FASSIP merupakan singkatan dari

FAasilitas Simulasi Sistem Pasif dengan penomoran 04 dimaksudkan sebagai nomor urut sesuai dengan generasi pembuatannya. Keterangan TP merupakan singkatan *Two Phase* yang berarti alat ini ditunjukkan untuk fenomena aliran dua fase dan Ver.2 merupakan keterangan versi kedua. Fasilitas eksperimen tersebut dapat dilihat pada Gambar 1. Data parameter geometri Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2 dijelaskan melalui Tabel 1.



Gambar 1. Untai Rektangular TP FASSIP-04 Versi 2

Tabel 1. Parameter geometri Untai Rektangular TP FASSIP-04 Versi 2

Deskripsi	Spesifikasi
Material pipa	SS 201
Diameter luar pipa (Do)	25,4 mm
Diameter dalam (Di)	23,4 mm
Lebar untai (L)	1320 mm
Tinggi untai (H)	6000 mm
Total panjang untai (Lt)	14640 mm
Volume total fluida kerja pada untai	30 liter
Fluida kerja	Air demineralisasi
Daya pemanas	4,2 kW
Daya pendingin	2 PK
Sensor temperature	Termokopel tipe-K
Flowmeter	Elektromagnetic flowmeter Endress Hauser
Data Acquisition System (DAS)	National Instruments

Sebanyak 15 termokopel telah terpasang dan telah dikalibrasi dengan tingkat error hanya 1% pada Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2. Penamaan dan penempatan termokopel pada modul *National Instuments* (NI) ditunjukkan pada Tabel 2.

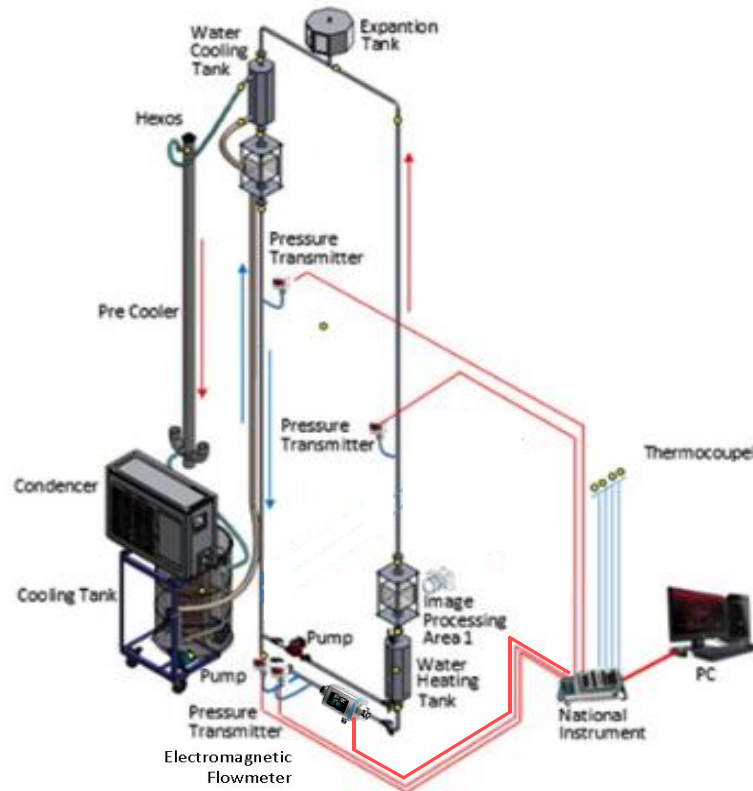
Tabel 2. Konfigurasi Termokopel

No	NI Module	Channel Number	Thermocuple Name Position
1		TC00	TH-in
2		TC01	T-WHT
3		TC02	TH-out
4		TC03	TH-IPP out
5		TC04	T-Leg 01
6		TC05	T-Leg 02
7		TC06	TC-in
8		TC07	TC-out
9	NI 9214	TC08	X
10		TC09	T-Leg 03
11		TC10	T-CTB in
12		TC11	T-CTB out
13		TC12	T-CYC
14		TC13	T-CTB
15		TC14	T-POM
16		TC15	T-Udara

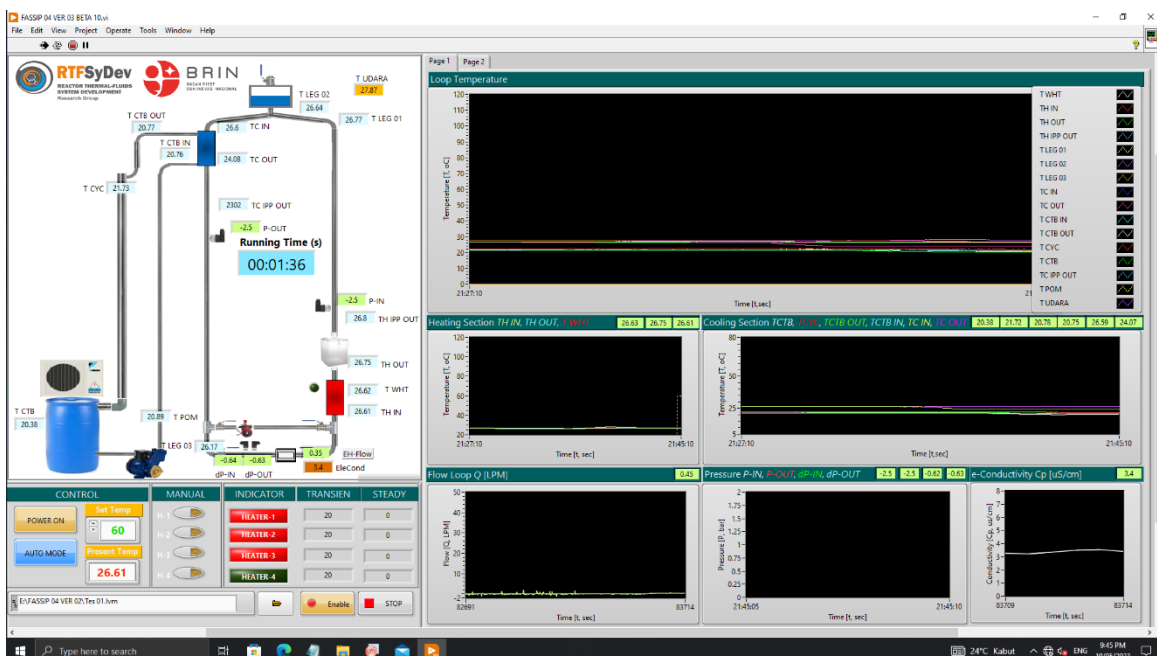
Keterangan: X = tidak digunakan

Setup eksperimen terdiri atas Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2 yang memiliki beberapa komponen utama seperti *Water Heating Tank* (WHT), *Water Cooling Tank* (WCT), tangki ekspansi, *image processing area*, *hot leg* dan *cold leg*. Selain itu, terdapat komponen sistem pendingin untuk menyuplai air dalam WCT seperti *condenser*, *pre cooler*, dan tangki pendingin. Terdapat juga sistem pengukuran seperti *thermocouple*, *electromagnetic flowmeter* dan *pressure transmitter* yang terhubung melalui sistem akuisisi data NI-cDAQ. Semua data komponen akan terbaca melalui NI-cDAQ setiap 1 detik dan ditampilkan melalui program LabVIEW pada komputer. Semua sumber daya listrik komponen pada Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2 terhubung melalui panel listrik. Langkah awal eksperimen diawali dengan menghidupkan sumber listrik pada panel listrik. Kemudian penentuan variasi temperatur pada WHT beserta jumlah *heater* yang akan dihidupkan sesuai daya pemanas yang dibutuhkan dalam penelitian. Untuk temperatur WCT diatur melalui kontrol sistem pendingin pada *condenser*. Pengoperasian Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2 dikendalikan melalui komputer dengan menggunakan program LabVIEW yang mengatur batasan temperatur, melakukan perekaman data, dan memantau setiap pembacaan alat ukur. Setup eksperimen dapat dilihat pada Gambar 2.

Fluida dipanaskan oleh WHT secara langsung (*direct*) dan didinginkan oleh WCT secara tidak langsung (*non direct*). Untai rektangular merupakan tempat terjadinya sirkulasi alami dan terdapat *Image Processing Area* sehingga fenomena aliran sirkulasi alami dapat dilihat secara langsung ketika eksperimen. Sistem pendinginan WCT diproses oleh air yang disalurkan oleh pompa *cooler* dengan mengambil air yang telah didinginkan oleh *condenser* pada tangki pendingin, air tersebut telah didinginkan sesuai dengan temperatur yang diinginkan melalui kontrol temperatur pada *condenser*. Laju aliran pada sistem pendingin diatur melalui katup dan dibantu sistem *by pass* pada keluaran pompa *cooler*. Laju aliran sistem pendingin dapat dilihat pada rotameter yang telah dipasang. Kemudian Air pada WCT yang telah menyerap panas akan mengalir menuju tabung *pre cooler* dan terjadi pembuang sisa panas yang dibantu oleh *hexos*, setelah itu air mengalir menuju tangki pendingin untuk didinginkan kembali oleh *condenser*. Ketika eksperimen berjalan, *electromagnetic flowmeter* menunjukkan laju aliran pada untai rektangular dan *pressure transmitter* menunjukkan perubahan tekanan pada untai rektangular serta *thermocouple* menunjukkan perubahan temperatur yang terjadi berdasarkan wilayah pemasangannya.



Gambar 2. Setup Eksperimen (courtesy by Sunandi, 2023)



Gambar 3. Panel kontrol Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2 melalui LabVIEW

Monitoring pengukuran temperatur dan laju aliran ditampilkan dalam personal komputer (PC) melalui program LabVIEW seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Karakterisasi temperatur dalam penelitian menggunakan termokopel tipe-K akan menghasilkan tegangan yang ditangkap oleh modul *National Instruments* (NI) tipe 9214. Kemudian pengukuran laju aliran menggunakan electromagnetic flowmeter menghasilkan output arus yang ditangkap oleh modul NI

tipe 9203. Semua data yang diterima oleh modul akan terbaca dan dikonversi melalui NI-cDAQ dan ditampilkan oleh program LabVIEW.

Dikarenakan debit aliran diperoleh melalui alat ukur electromagnetic flowmeter maka didapatkan nilai debit aliran yang selanjutnya digunakan untuk menghitung kecepatan rata-rata fluida yang mengalir menggunakan persamaan:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

Keterangan: v = kecepatan aliran fluida (m/s); Q = Debit aliran (m³/s) dan A = luas penampang pipa (m²).

Kecepatan rata-rata yang telah didapatkan dari perhitungan selanjutnya digunakan untuk menentukan rejim aliran melalui perhitungan bilangan Reynold. Untuk menghitung bilangan Reynold digunakan persamaan:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} \quad (2)$$

Keterangan: Re = Bilangan Reynold; v = Kecepatan rata-rata fluida yang mengalir (m/s); D = Diameter dalam pipa (m); ρ = Densitas fluida (kg/m³) dan μ = Viskositas fluida kerja (kg/m.s).

Dikarenakan pada penelitian ini densitas fluida dipengaruhi oleh perubahan temperatur. Maka nilai densitas dapat diperoleh melalui perasamaan korelasi berikut [10].

$$\rho = [A + B(1,8(T) + 32)] + C(1,8(T) + 32)^2 \quad (3)$$

Keterangan: ρ = Densitas fluida (kg/m³); $A = 1004,789042$; $B = -0,046283$, $C = -7,9738 \times 10^{-4}$ dan T = Temperatur (°C)

Perubahan temperatur juga mempengaruhi nilai viskositas fluida. Untuk menghitung korelasi viskositas berdasarkan persamaan (3) adalah sebagai berikut [10].

$$\mu = \exp \left[\frac{(A+CT)}{(1+BT+DT^2)} \right] \quad (4)$$

Keterangan: μ = viskositas fluida kerja (kg/m.s); $A = -6.325203964$; $B = 8.705317 \times 10^{-3}$; $C = -0.088832314$; $D = -9.657 \times 10^{-7}$ dan T = Temperatur (°C)

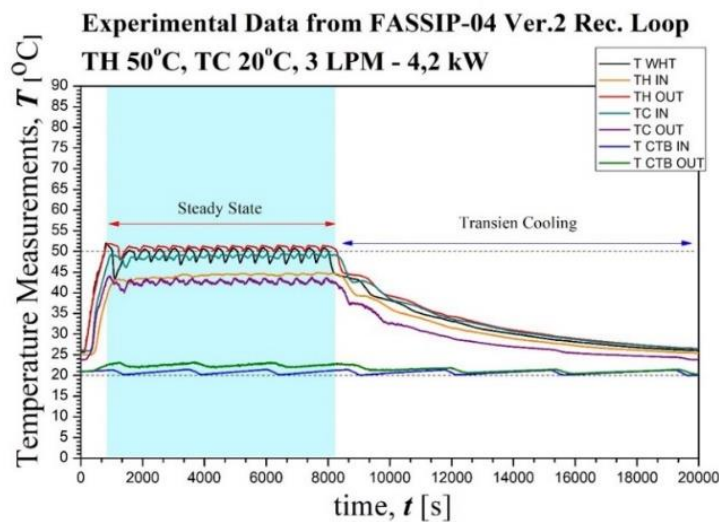
3. Hasil dan pembahasan

Karakteristik perubahan temperatur pada bagian tangki pendingin Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2 merupakan hasil dari pengukuran temperatur selama eksperimen. Laju aliran juga dihasilkan dari pengukuran selama eksperimen, hasil dari perekaman instrumentasi pengukuran modul NI 9214 berupa nilai temperatur dalam satuan °C sedangkan modul NI 9203 menghasilkan nilai laju aliran dalam satuan Liter Per Menit (LPM). Temperatur pada WCT ditetapkan 20 °C dengan laju aliran di bagian pompa pendingin sekunder 3 LPM untuk setiap eksperimen. Data hasil dari pengukuran di tampilkan

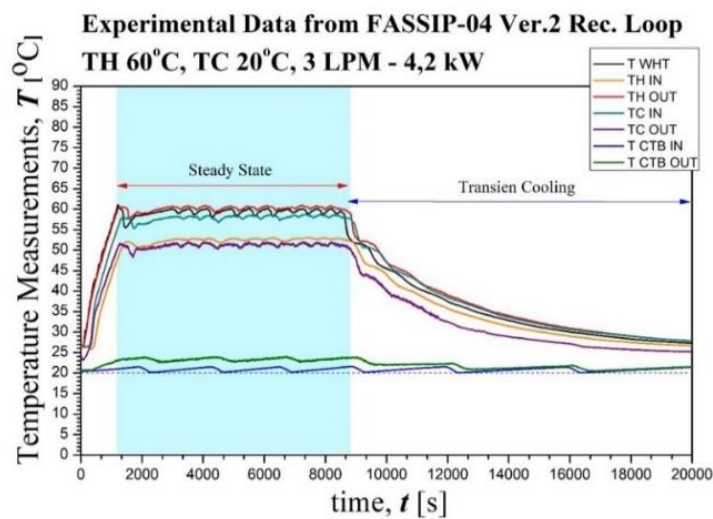
dalam bentuk grafik ilmiah. Berikut merupakan data hasil karakteristik temperatur, laju aliran dan penentuan rejim aliran berdasarkan bilangan reynold dalam bentuk grafik ilmiah.

3.1. Karakteristik temperatur variasi temperatur heater 50°C, 60°C dan 70°C dengan laju aliran pendingin 3 LPM

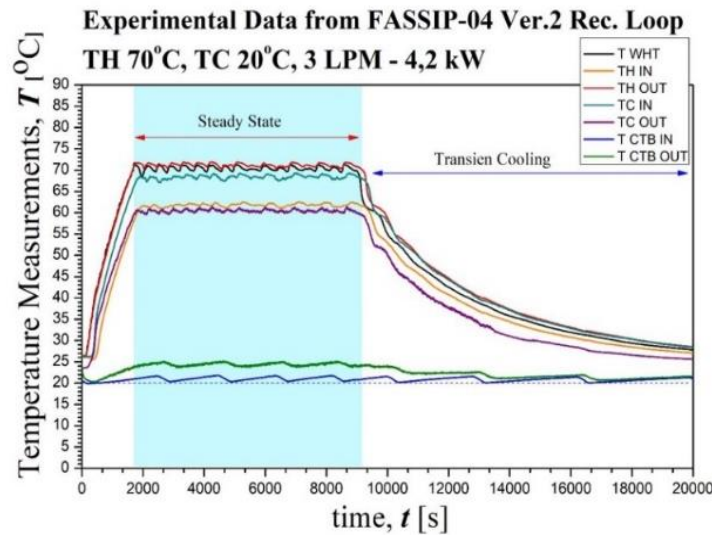
Data eksperimen berupa perubahan temperatur diperoleh berdasarkan pengukuran melalui termokopel yang terpasang pada beberapa titik di Untai Rektangular-TP FASSIP-04 Ver.2. Kondisi eksperimen berlangsung dari mulai pemanasan (transient heating), hingga mencapai kondisi tunak (steady state) dimana temperatur dipertahankan berdasarkan penetapan temperatur yang telah diatur oleh sistem akuisisi data melalui LabVIEW. Setelah kondisi tunak berakhir, semua sistem pemanas dimatikan dan hanya bagian pendinginan saja yang dihidupkan, dimana penurunan temperatur ini disebut transien cooling. Data perubahan temperatur dari awal pemanasan hingga akhir pendinginan selama 20000 detik (5 jam 33 menit 20 detik) pada titik TWHT, TH-IN, TH-OUT, TC-IN, TC-OUT, TCTB-IN, dan TCTB-OUT ditunjukkan apda Gambar 4(a), Gambar 4(b), dan Gambar 4 (c).



(a)



(b)



(c)

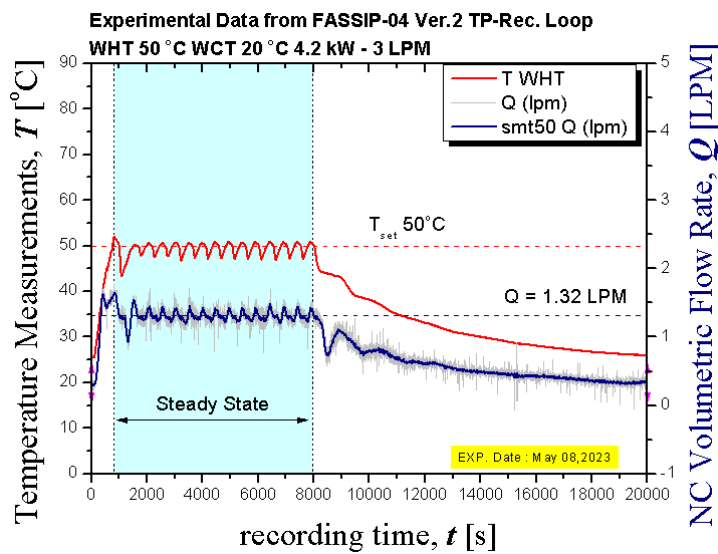
Gambar 4. Karakteristik temperatur berdasarkan variasi temperatur air pemanas
 (a) TH 50 °C, (b) TH 60 °C, dan (c) TH 70 °C

Gambar 4 (a), Gambar 4 (b), dan Gambar 4 (c) secara berturut-turut menunjukkan karakteristik temperatur untuk variasi *setting* temperatur air di tangki pemanas 50 °C, 60 °C, dan 70 °C dengan laju aliran sukender 3 LPM. Dapat terlihat perubahan temperatur dari kondisi *transien heating*, *steady state*, dan *transien cooling* pada perekamaman data selama 20000 detik. Waktu *transien heating* pada 50 °C dimulai dari temperatur lingkungan mencapai temperatur setting dengan memakan waktu 774 detik, pada 60 °C memakan waktu 1168 detik, dan pada 70 °C *transien heating* memakan waktu 1678 detik. Waktu tunak diatur selama 2 jam kemudian waktu *transien cooling* terjadi setelah kondisi tunak, dimana daya heater dimatikan dan temperatur dibiarkan hingga mencapai temperatur lingkungan. Berdasarkan waktu pencapaian *transien heating* menuju kondisi tunak, dapat diketahui bahwa semakin banyak kalor yang dibutuhkan ketika *setting* temperatur dinaikan. Nilai pencapaian transien heating menunjukkan hasil yang lebih baik dari Untai FASSIP-03 NT, dimana untuk mencapai temperatur 50°C saja membutuhkan waktu 1513 detik [11]. Temperatur air pada WHT dalam kondisi tunak untuk variasi 50°C rata-rata mencapai 49,35°C, untuk variasi temperatur 60°C rata-rata mencapai 59,28°C, dan variasi temperatur 70 °C rata-rata mencapai 70,44 °C. Kemudian pada WCT temperatur air dijaga pada 20 °C yang menyebabkan air dalam pipa masuk WCT yakni 48,70 °C, 57,86 °C, 68,37 °C dan Ketika air sudah keluar dari WCT temperatur air pun mengalami penurunan menjadi 42,62 °C, 51,15 °C, 60,46 °C. Penuruan tersebut disebabkan karena adanya penyerapan kalor dari pipa *loop* yang diberikan WHT dan diserap oleh fluida sekunder di WCT. Besarnya penyerapan kalor ditunjukkan dengan perolehan perbedaan temperatur sebesar 6,08 °C, 6,71 °C, 7,91 °C untuk setting temperatur air di tangki pemanas 50 °C, 60 °C, dan 70 °C. Besarnya penyerapan kalor menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan Untai FASSIP-03 NT dengan bentuk *heat exchanger* yang sama, dimana pada setiap variasi temperatur 60 °C, 70 °C, dan 80 °C hanya mengalami penurunan sebesar 3,54°C, 4,13 °C dan 4,65°C [12]. Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar *setting* temperatur air pemanas maka semakin besar perpindahan kalor yang terjadi dibagian pendingin.

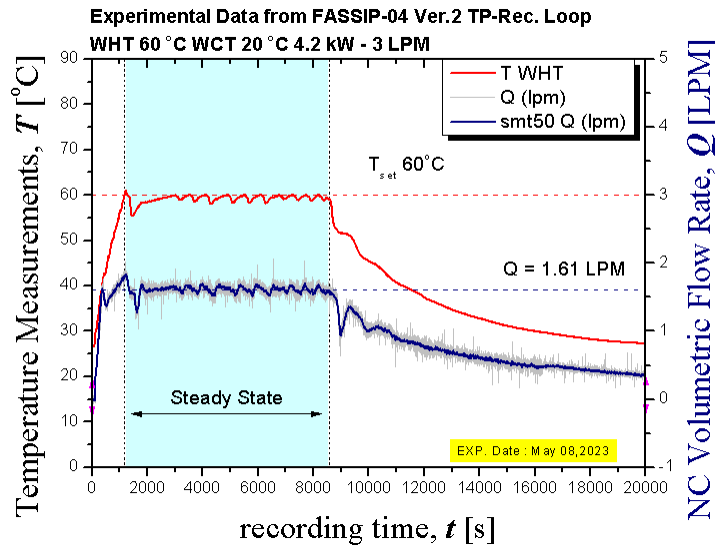
3.2. Laju aliran sirkulasi alami berdasarkan variasi temperatur air pemanas dengan laju aliran pendingin 3 LPM

Data laju aliran yang diperoleh merupakan hasil dari perekaman instrument pengukuran *electromagnetic flowmeter* melalui modul NI 9203. Data pengukuran laju aliran yang diperoleh dalam satuan Liter Per Menit (LPM) ditampilkan dalam bentuk grafik dan ditambahkan dengan perbandingan data perubahan temperatur air di dalam WHT. Laju aliran sirkulasi alami yang terjadi di dalam perpipaan Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2 untuk variasi temperatur air pemanas 50 °C, 60 °C, dan 70 °C dengan laju sekunder 3 LPM disajikan pada Gambar 5. (a), Gambar 5. (b), dan Gambar 5. (c) dalam bentuk kurva hubungan sumbu y (temperatur sebelah kiri, dan laju aliran volumetrik sirkulasi alami di bagian kanan) terhadap sumbu x dalam hal ini adalah waktu perekaman data.

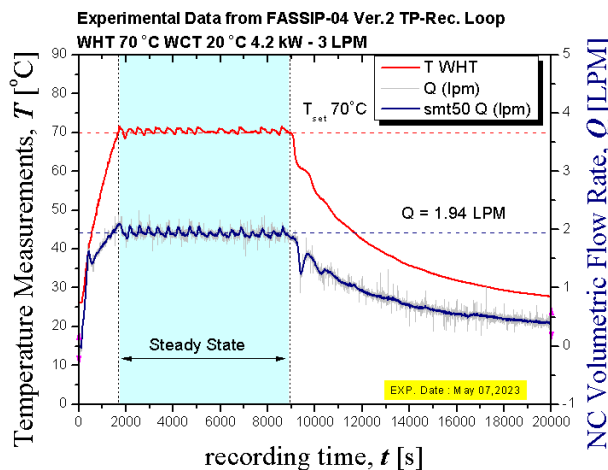
Laju aliran sirkulasi alami berdasarkan variasi temperatur air di dalam tangki pemanas mulai dari 70 °C, 80 °C, dan 90 °C dengan setting temperatur tangki pendingin 20 °C dan laju pendingin sekunder 3 LPM secara berturut-turut ditampilkan pada Gambar 5. (a), Gambar 5. (b) , dan Gambar 5. (c). Profil grafik setiap variasi berbeda-beda begitu juga dengan besaran laju alirannya. Pada variasi temperatur air pemanas 50 °C laju aliran sirkulasi alami rata-rata yang terjadi sebesar 1,32 LPM, untuk variasi temperatur air pemanas 60 °C laju aliran sirkulasi alami rata-rata yang terjadi sebesar 1,61 LPM, kemudian pada variasi 70 °C laju aliran sirkulasi alami rata-rata yang terjadi sebesar 1,94 LPM, nilai laju aliran sirkulasi alami rata-rata dihitung pada saat kondisi *steady state*. Setelah kondisi *steady state* sumber panas yaitu *heater* dimatikan dan laju aliran memasuki kondisi *transien cooling*, laju aliran mengalami penurunan secara perlahan beriringan dengan penurunan temperatur pada WHT. Jika dibandingkan dengan laju aliran yang terjadi pada Untai Rektangular FASSIP-01, penelitian ini menghasilkan nilai yang lebih baik. Nilai laju aliran sirkulasi alami pada Untai Rektangular FASSIP-01 hanya sebesar 0,064 LPM dengan daya heater 4,2 kW dan laju pendingin sekunder 43.10 LPM [5]. Laju aliran sirkulasi alami sangat dipengaruhi oleh perbedaan temperatur antara pemanas dan pendingin, perolehan nilai laju aliran yang dihasilkan penelitian ini membuktikan bahwa semakin besar variasi temperatur maka laju aliran sirkulasi alami yang dihasilkan juga semakin besar.



(a)



(b)



(c)

Gambar 5. Laju aliran berdasarkan variasi laju sekunder 3 LPM dan temperatur pemanas (a) TH 50 °C, (b) TH 60 °C, dan (c) TH 70 °C

3.3. Rejim aliran berdasarkan bilangan Reynold

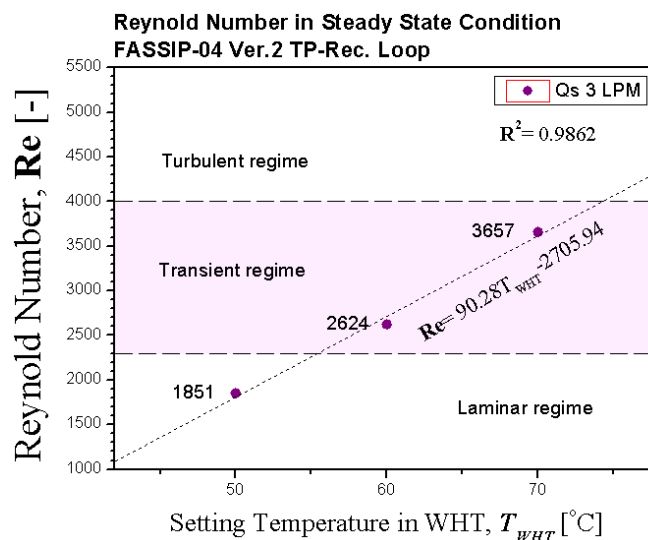
Penentuan rejim aliran pada eksperimen ini dihitung menggunakan persamaan (3). Dimana persamaan tersebut merupakan persamaan bilangan tak berdimensi yaitu bilangan Reynold. Bilangan Reynold didapatkan dengan menghitung perkalian antara kecepatan aliran yang terjadi pada untai terhadap diameter pipa untai dan densitas fluida kemudian dibagi viskositas dinamik fluida. Data pengukuran laju alir yang diperoleh dalam satuan LPM diubah ke satuan m^3/s kemudian dibagi luas dalam pipa untuk mendapatkan nilai kecepatan aliran. Karena analisis rejim aliran difokuskan pada bagian pendingin, maka densitas fluida dan viskositas dinamik fluida yang dipakai berdasarkan perubahan temperatur yang terjadi pada air dalam pipa di bagian tangki pendingin. Densitas fluida dihitung menggunakan persamaan (4), kemudian viskositas dinamik fluida dihitung menggunakan persamaan (5), kedua persamaan tersebut diperoleh dari fungsi perubahan temperatur yang terjadi pada air dalam pipa di bagian tangki pendingin. Penentuan rejim aliran ditentukan berdasarkan hasil perhitungan bilangan Reynolds (Re) pada kondisi tunak, apabila nilai $Re < 2300$ rejim aliran adalah laminar, sementara

nilai Re diantara $2300 < Re < 4000$ rejim aliran transisi dan jika nilai $Re > 4000$ rejim aliran turbulen. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 3. dan ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 6.

Tabel 3. Hasil perhitungan bilangan Reynold dan penentuan rejim aliran

TWHT (°C)	Q (LPM)	Q (m ³ /s)	Kecepatan (m/s)	Densitas (kg/m ³)	Viskositas (kg/m.s)	Re	Rejim aliran
50	1,32	0,000021	0,043	989,11	0,00058	1851	Laminar
60	1,61	0,000026	0,053	985,27	0,00050	2624	Transisi
70	1,94	0,000032	0,064	980,49	0,00043	3657	Transisi

Gambar 6 menunjukkan rejim aliran yang terjadi berdasarkan perolehan bilangan Reynold dengan variasi temperatur air pemanas dan laju sekunder 3 LPM. Laju aliran yang terjadi pada variasi temperatur air pemanas 50 °C memiliki nilai bilangan Reynolds sebesar 1851, menandakan bahwa rejim aliran yang terjadi adalah laminar. Kemudian laju aliran yang terjadi pada variasi temperatur air pemanas 60 °C memiliki nilai bilangan Reynolds sebesar 2624, menandakan bahwa rejim aliran yang terjadi adalah transisi. Lalu, laju aliran yang terjadi pada variasi temperatur air pemanas 70 °C memiliki nilai bilangan Reynolds sebesar 3657, menandakan bahwa rejim aliran yang terjadi masih dalam aliran transisi. Pada penelitian ini aliran yang dihasilkan tidak mencapai rejim aliran turbulen hanya laminar dan tranisi. Berbeda dengan Untai FASSIP-03 NT yang menghasilkan beberapa rejim aliran turbulen yang diperoleh karena efek penggunaan *helical heat exchanger* yang membuat efisiensi pertukaran kalor yang lebih baik dan setting temperatur yang lebih tinggi [11]. Berdasarkan hal tersebut besar kemungkinan rejim aliram turbulen dapat terjadi apabila melakukan setting temperatur 80 °C dan 90 °C pada Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2. Dikarenakan setting temperatur 70 °C menghasilkan nilai bilangan Reynold sebesar 3657 yang mendekati nilai rejim aliran turbulen yaitu 4000. Kelebihan laju aliran sirkulasi alami dengan jenis aliran turbulen yaitu dapat lebih mudah menghantarkan kalor dibandingkan dengan jenis aliran laminar atau transien. Diperoleh juga persamaan fitting linear yaitu $Re=90,28 \times TWHT - 2705,94$ dengan tingkat keakuratan data R^2 (R square) sebesar 0,9862 atau 98,62% yang berarti peningkatan nilai bilangan Reynold linier dengan peningkatan setting temperatur air pemanas. Semakin besar variasi temperatur pada tangki pemanas maka semakin besar laju aliran dan nilai bilangan Reynold yang dihasilkan.



Gambar 6. Hubungan bilangan Reynold berdasarkan *setting* temperatur pemanas

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang didapatkan, maka perubahan temperatur disebabkan oleh penerimaan dan pelepasan kalor yang terjadi selama eksperimen berlangsung antara tangki pemanas dan tangki pendingin. Semakin besar setting temperatur air pada tangki pemanas maka semakin lama waktu transien heating yang diperlukan untuk mencapai kondisi *steady state*. Aliran sirkulasi alami dipengaruhi oleh perubahan temperatur yang terjadi pada WHT dan kenaikan laju aliran sirkulasi alami beriringan dengan kenaikan temperatur pada WHT. Semakin tinggi temperatur air pada WHT maka semakin besar laju aliran sirkulasi alami. Laju aliran sirkulasi alami yang terjadi pada bagian tangki pendingin Untai Rektangulair TP FASSIP-04 Ver.2 untuk variasi temperatur air pemanas 50 °C sebesar 1,32 LPM berada pada rejim aliran laminar dengan bilangan Reynold bernilai 1851 sedangkan pada temperatur air pemanas 60 °C dan 70 °C sebesar 1,61 LPM dan 1,94 LPM berada pada rejim aliran transisi yang secara berturut-turut bilangan Reynold bernilai 2624 dan 3716. Kenaikan gradien temperatur antara sisi panas dan sisi dingin telah meningkatkan laju aliran sirkulasi alami dan mempengaruhi rejim aliran yang terbentuk.

Ucapan terima kasih

Penelitian ini didanai oleh Hibah Penelitian "Riset Inovasi untuk Indonesia Maju" (RIIM) batch 1 tahun 2022-2025 dengan nomor kontrak B-811/II.7.5/FR/6/2022 dan B-2103/III.2/HK.04.03/7/2022. Ucapan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Ibn Khaldun Bogor yang telah memfasilitasi dalam penyelesaian tugas akhir. Terima kasih kepada Kepala Pusat Teknologi Reaktor Nuklir, ORTN BRIN. Terima kasih juga kepada seluruh anggota Kelompok Riset Sistem Termofluida Reaktor Nuklir (NRTFSys) dan terima kasih kepada rekan-rekan EdfEC atas dukungannya.

Daftar Pustaka

- [1] International Energy Agency. World Energy Outlook 2020. IEA, Paris, 2021.
- [2] Nuclear Energy Agency, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Ten Years On: Progress, Lessons, and Challenge, 2021.
- [3] Juarsa, M., Antariksawan, A. R., Kusuma, M. H., Haryanto, D., Putra, N. Estimation of natural circulation flow based on temperature in the FASSIP-02 large-scale loop facility. 2nd international Tropical Renewable Energy Conference (i-TREC) 2017, 2018.
- [4] M. Juarsa, J. H. Purba, H. M. Kusuma, T. Setiadipura, S. Widodo. Preliminary study on mass flow rate in passive cooling experimental simulation during transient using NC-Queen Apparatu. Atom Indonesia. 2014; 40 (3): p. 141-147.
- [5] Juarsa, M., Antariksawan, A. R., Kusuma, M. H., Widodo, S., Putra, N. The effect of power and cooler flow on time responds of flow stability in natural circulation phenomenon using FASSIP-01 loop. The 10th International Meeting of Advances in Thermofluids (IMAT 2018), 2019.
- [6] International Atomic Energy Agency. Advances in small modular reactor technology developments. IAEA, Vienna, 2020.
- [7] Hussein & Esam, M. A. Emerging small modular nuclear power reactors: a critical review. 100038, Physics Open, 2020.

- [8] Antariksawan, A. R., Widodo, S., Juarsa, M., Haryanto, D., Kusuma, M. H., Putra, N. Numerical study on natural circulation characteristics in FASSIP-02 experimental facility using RELAP5 code. 2nd international Tropical Renewable Energy Conference (i-TREC) 2017, 2018.
- [9] Antariksawan, A. R., Widodo, S., Juarsa, M., Haryanto, D., Kusuma, M. H., Putra, N. Simulation of operational conditions of FASSIP-02 natural circulation cooling system experimental loop. Indonesian Journal of Nuclear Science and Technology. 2018; 19 (1):p. 41-54.
- [10] A. Crabtree and M. Simantov. Thermophysical properties of saturated light and heavy water for advanced neutron source applications, United States: Oak Ridge National Lab, 1993.
- [11] D. Haryanto, A. Rosidi, G. B. K. Heru, Giarno, M. Juarsa. Perhitungan dan penentuan jenis aliran pada untai FASSIP-03 NT saat komisioning berdasarkan variasi daya pemanas. Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi. 2022; 12 (1):p. 90-97.
- [12] Lisadavy, A. R., Putra, M. G., Setiawan, P. H., Pamungkas, A. E., Valentina, P., Ariesta, E. P., Ngadi, F., Juarsa M. Experimental study of heat transfer characteristics based on temperature variations in water cooling tank using medium-scale experimental facility. Indonesian Journal of Nuclear Science and Technology. 2014; 25 (1): p. 11-19.
- [13] Ekariansyah, A. S., Tjahjono, H., Juarsa, M., Widodo, S. Analysis of the effect of elevation difference between heater and cooler position in the FASSIP-01 Test loop using relap 5. Sigma Epsilon. 2015; 19 (1): p. 32-40.
- [14] Wang, J. Y., Chuang, T. J., Ferng, Y. M. CFD investigating flow and heat transfer characteristics in a natural circulation loop. annals of nuclear energy. 2013: p. 65-71.
- [15] Gaos, Y. S., Juarsa, M., Marzuki, E., Akbar, J. Efek perubahan sudut kemiringan terhadap perpindahan kalor dan laju aliran air pada untai simulasi sirkulasi alamiah. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir. 2012; 14 (1):p. 39-53.
- [16] International Atomic Energy Agency. Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050. IAEA, Vienna, 2019.
- [17] Rinaldi, A., Gabriella, L. N., Giarno, Prasetio, J., Juarsa, M Estimasi Laju Aliran Sirkulasi Alam Berdasarkan Beda Temperatur pada Untai FASSIP-01. Sigma Epsilon. 2019; 23 (2): p. 58-69.
- [18] Juarsa, M., Giarno, Rohman, A. N., Heru, G. B. K., Witoko, J. P., Tjahyani, D. T. S. Flow rate and temperature characteristics in steady state condition on FASSIP-01 loop during commissioning. International Conference on Nuclear Technologies and Sciences (ICoNETS 2017), 2018.
- [19] International Atomic Energy Agency. Passive safety systems and natural circulation in water cooled nuclear power plant, Wina: TECDOC 1264, 2009.
- [20] Juarsa, M., Giarno., G. B. Heru K., Haryanto, D., Prasetio, J. Passive system simulation facility (fassip) loop for natural circulation study. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir, Batam, 2016.
- [21] Republik Indonesia. Peraturan Presiden No 22 Tahun 2017 tentang Rencana. Sekretariat Negara Republik Indonesia, Jakarta, 2017.
- [22] Pertamina Energy Institute, Pertamina Energy Outlook 2020, Jakarta: Pertamina Energy Institute, 2020.

- [23] Juarsa, M., Goeritno, A. Studi eksperimental laju aliran massa air berdasarkan perubahan sudut kemiringan untai simulasi sirkulasi alamiah (USSA-FT01). *Jurnal Material dan Energi Indonesia*. 2011: p. 22-30.
- [24] Antariksawan, A. R., Juarsa, M., Sundari, T. Study of heat transfer in a water cooling tank with c-shaped heat exchanger and straight heat pipe under natural circulation. *The 10th International Meeting of Advances in Thermofluids (IMAT 2018)*, 2019.
- [25] V. Jain, A. Nayak, P. Vijayan, D. Saha, R. Sinha. Experimental investigation on the flow instability behavior of a multi-channelboiling natural. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018: p. 776-787.
- [26] T. H. Putra, Giarno., S. Hatmoko, G. B. K. Heru, M. Juarsa. Analisis deviasi alat ukur laju aliran pada untai FASSIP-01 dan FASSIP-02. *Sigma Epsilon*. 2019; 23 (2): p. 91-100.
- [27] D. Yuliaji, R. Waluyo, G. Pramono, P. H. Setiawan, M. Juarsa. Uji komisioning fasilitas sistem simulasi passif 04 Versi 2 (FASSIP-04 Ver.2) untuk studi kemampuan pendingin pasif pada sistem keselamatan reaktor nuklir, AME (Aplikasi Mekanika dan Energi). *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 2023; 9 (1): p. 57-63.