

## Karakteristik perubahan laju aliran massa di bagian pendingin berdasarkan variasi daya selama pada kondisi tunak untai rektangular FASSIP-04 Ver.2

Muhamad Rafel<sup>a,1</sup>, Sunandi Kharisma<sup>b</sup>, Dwi Yulijai<sup>a</sup>, Roy Waluyo<sup>a</sup>, Andika Enggar<sup>c</sup>,  
Arif Adthyas Budiman<sup>c</sup>, Shendy Akbar Maryadi<sup>a</sup>, Ryan Oktaviandi<sup>d</sup>, Esa Putra Ariesta Raharjo<sup>d</sup>,  
Nur Rochman Budiyanto<sup>d</sup>, Putut Hery Setiawan<sup>c</sup>, Mulya Juarsa<sup>a, c, 2\*</sup>

<sup>a</sup>Engineering Development for Energy Conversion and Conservation (EDfEC) Research Group, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Science, Ibn Khaldun Bogor University, Jl. Sholeh Iskandar, RT.01/RW.10, Kedungbadak, Kota Bogor, Jawa Barat 16162, Indonesia

<sup>b</sup>Reactor Thermal-Fluids System Development (RTFSyDev.) Research Group, Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, Organisasi Riset Tenaga Nuklir, BRIN. Gedung 80 KST. B.J. Habibie, Setu, Tangerang Selatan 15314, Banten

<sup>c</sup>Heat Pipe and Nanotechnology Laboratory, Faculty of Engineering, Udayana University, Bukit Jimbaran, Badung, Bali, 80631,

<sup>d</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada  
Jl. Grafika No.2, Senolowo, Sinduadi, Kec. Mlati, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

<sup>1</sup>[mrafel27@gmail.com](mailto:mrafel27@gmail.com),

<sup>2</sup>[mulya.juarsa@brin.go.id](mailto:mulya.juarsa@brin.go.id)\*(corresponding author)

### ABSTRACT

The nuclear reactor accident at Fukushima Dai-Ichi on March 11, 2011, in Japan, became an important background for developing passive systems in nuclear safety. Passive cooling system technology utilizes the phenomenon of natural circulation due to the balance of buoyancy force and friction resistance force. The occurrence of flow is due to the difference in density of the working fluid based on changes in temperature and power. The purpose of the research was to analyze the natural circulation flow that arises due to changes in power. The research method was conducted experimentally by varying the heater power from 1400 W, 2800 W, and 4200 W for 6 hours. With the object of research on the cooling section of the rectangular loop FASSIP-04 Ver.2. The experimental results show that the higher the power variation, the greater the mass flow rate, which has a value difference of 0.01 kg/s.

**Keywords:** FASSIP-04 Ver.2, natural circulation, power, mass flow rate, temperature., cooling section.

**Received** 30 September 2023; **Presented** 5 October 2023; **Publication** 27 May 2024

### PENDAHULUAN

Kegiatan ini dilatarbelakangi peristiwa kecelakaan reaktor nuklir di Fukushima Dai-Ichi di Jepang pada maret 11 Maret 2011 gempa dengan kekuatan 9 Skala Richter (SR), dan tsunami dengan ketinggian 14-15 meter (12). Kecelakaan tersebut menyebabkan pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Fukushima Daiichi. Tiga dari enam reaktor stasiun mengalami leleh inti dan seluruh fasilitas rusak parah. Kecelakaan yang terjadi pada pembangkit listrik tenaga nuklir di Fukushima Dai-ichi telah menjadi pelajaran untuk para peneliti dalam mengembangkan sistem pasif dalam keselamatan nuklir (passive cooling system) Pelibatan sistem pasif dapat mengurangi kekambuhan kecelakaan di pembangkit listrik tenaga nuklir. Karena penghilangan

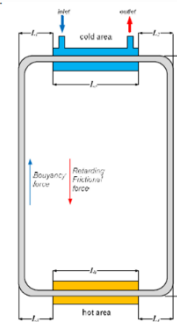
pembangkitan panas setelah reaktor dimatikan, khususnya pada kasus pemadaman stasiun, penggunaan sistem pendingin pasif menjadi sangat diperhatikan diimplementasikan dalam perancangan sistem keselamatan reaktor nuklir. Penambahan fitur sistem keselamatan pasif pada reaktor canggih dilibatkan untuk mencegah kecelakaan terjadi. Fitur sistem keselamatan pasif ini diharapkan dapat meningkatkan keselamatan reaktor nuklir dan mencegah pelepasan radiasi ke lingkungan (1). Berdasarkan peristiwa tersebut, maka dibutuhkan sistem keselamatan pasif untuk bisa mendinginkan sisa panas pada reaktor nuklir. Salah satu konsep yang terus di kembangkan yaitu sistem keselamatan pasif. Fitur-fitur keselamatan pasif terdiri dari sistem shutdown pasif dan sistem pendinginan pasif pasca pemadaman (shutdown) dan mengungkung zat

radioaktif agar tidak terlepas lingkungan (3). Dengan dilengkapinya instalasi nuklir menggunakan sistem pendinginan pasif, maka pengoperasian instalasi nuklir menjadi lebih terjamin keamanannya(10). Sistem pemadaman pasif adalah suatu mekanisme yang akan memadamkan reaktor yang dipicu oleh gangguan yang mengarah kepada kecelakaan. Teknologi sistem pendingin pasif adalah aliran fluida yang bergerak tanpa adanya gangguan gaya dari luar yang di sebut dengan sirkulasi alam (natural circulation) yang terjadi karena adanya perbedaan densitas akibat pemuian fluida setelah peningkatan suhu (7). Sirkulasi alami Dalam reaktor nuklir, sistem perpindahan panas primer terdiri dari inti (sumber panas) dan pendingin yang mentransfer panas ke pendingin sekunder (sink). Jika heat sink disimpan pada elevasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan sumber panas, sirkulasi alami pendingin dapat tercapai. Untuk memindahkan cairan pendingin dari sumber ke bak cuci, tidak diperlukan pompa. Tidak adanya pompa membuat mode ini lebih andal dibandingkan dengan sirkulasi paksa (13). Berdasarkan uraian diatas penelitian ini menunjang penelitian-penelitian lainnya yang fenomena sirkulasi alami dan sistem pendingin pasif pada reaktor nuklir. Topik fenomena sirkulasi alam ini sangat dekat dengan dibidang konversi energi, sehingga penelitian tersebut dilakukan diprogram studi Teknik Mesin Fakultas Teknik and Sains Universitas Ibn Khaldun Bogor dengan dibangunnya Fassip-04 Ver.2 (6). Fasilitas simulasi ini menggunakan prinsip perbedaan densitas air akibat perbedaan temperatur antara tangki panas heater yang mengakibatkan terjadinya menurunnya densitas air fenomena ini disebut dengan gaya apung (buoyancy). dan ketika air mencapai cooler densitas air akan meningkat yang menyebabkan air jatuh mengalir kembali ke heater yang terjadi karena adanya gaya gravitasi (2). Penelitian yang terkait dalam investigasi laju aliran yang terjadi *passive system cooling system loop* (5). Perhitungan berdasarkan berdasarkan variasi daya yang dilakukan pada fasilitas yang di sebut FASSIP-3 NT.

Maka dari itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui laju aliran sirkulasi alami berdasarkan variasi daya kondisi tunak pada untai rektangular FASSIP-04 Ver.2.

## Teori

Sirkulasi alami adalah fenomena dimana aliran fluida tanpa adanya bantuan dari gaya gaya luar. Sistem perpindahan panas primer terdiri dari inti (sumber panas) dan pendingin yang mentransfer panas kependingin sekunder (sink). Dalam proses nya fluida dapat mengalir karena perbedaan suhu. Seperti semua zat tiga hukum fisika yang dapat menjelaskan fenomena dinamika fluida, yaitu kekekalan massa, detik Newton hukum gerak, dan hukum kekekalan energi atau hukum pertama termodinamika. Dalam sirkulasi alami, aliran fluida terjadi karena gaya apung fluida yang dihasilkan oleh perubahan dalam kepadatan cairan. Perubahan densitas fluida dapat disebabkan oleh perbedaan temperatur fluida (8).



Gambar 1. Natural Circulation loop

**Gambar 1** menunjukkan konsep sederhana sirkulasi alami berdasarkan bouyancy force dan retarding frictional force, dengan daerah pendingin di bagian atas dan daerah pemanas di bagian bawah di untai rektangular. Berdasarkan dengan konsep sederhana untai rektangular lahirnya beberapa penelitian dengan fasilitas simulasi system pasif yang menggunakan natural circulation seperti fasilitas sistem FASSIP 01, FASSIP 02, FASSIP 03 (11). Pada Untai Rektangular TPFASIIP 04 Ver.02, Laju aliran yang telah diukur oleh flowmeter (Q) diperoleh dari hasil konversi laju aliran permenit(LPM) menjadi satuan  $m^3/s$ . Sehingga dapat perhitungan laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) menggunakan persamaan (1) sebagai berikut:

$$\dot{m} = Q \times \rho$$

Keterangan:

$\dot{m}$  = Laju aliran massa (kg/s).

$Q$  = Volume air yang mengalir melalui saluran per satuan waktu ( $m^3/s$ )

$\rho$  = Massa jenis ( $kg/m^3$ )

Dikarenakan pada penelitian ini densitas merupakan fungsi dari temperatur maka nilai densitas dapat diperoleh melalui persamaan korelasi berikut (Marietta,1993).

$$\rho = [A + B(1,8T + 32) + C(1,8T + 32)^2] \quad (5)$$

Keterangan:

- $\rho$  = Densitas/massa jenis [ $\text{kg/m}^3$ ]
- A = 1004,789042
- B = -0,046283
- C =  $-7,9738 \times 10^{-4}$
- T = Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

## METODELOGI PENELITIAN

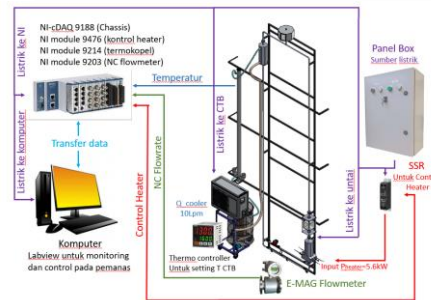
Untai Rektangular FASSIP-04 Ver.2 digunakan fasilitas eksperimen mengenai sirkulasi alami dengan rejim aliran satu fase dan dua fase yang bekerja pada tekanan rendah, dimana alat ini di buat dengan konsep rektangular loop atau bentuk segi empat dengan panjang 6 meter dan lebar 1,32 meter menggunakan pipa SS 201 dengan diameter 1 inch. FASSIP merupakan singkatan Fasilitas Simulasi Sistem Pasif dengan penomoran 04 yang di maksudkan sebagai nomor urut dari pembuatan generasi sebelumnya. Keterangan TP merupakan Two Phase yang berarti alat ini memiliki aliran dua fase dan Ver.2 merupakan generasi kedua. Cara kerja dari Untai Rektangular FASSIP-04 adalah air harus sudah diisi penuh kedalam pipa dan tanpa ada udara atau gelembung yang masih terperangkap dalam untai, kemudian air dalam tangki pemanas dipanaskan dengan heater variasi daya heater 1400 W, 2800 W, dan 4200 W. Fasilitas tersebut bisa dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2

### 1. Set up Eksperimen

Setup eksperimen terdiri atas Untai Rektangular TPFASSIP-04 Ver.2 di hidupkan melalui panel listrik. Kemudian operasikan Untai Rektangular TP FASSIP-04 Ver.2 melalui LabView. Untuk melakukan eksperimen di perlukan penentuan jumlah heater yang akan dihidupkan.



Gambar 3. Setup Eksperimen

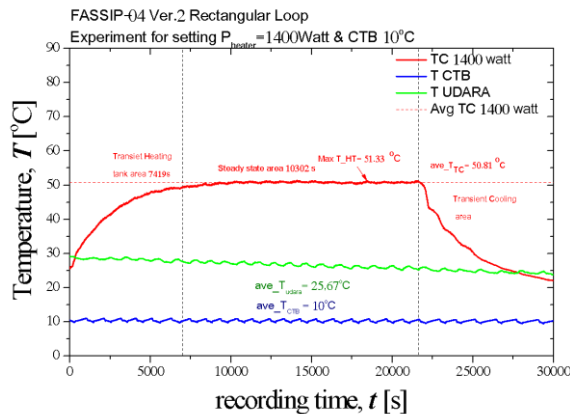
Fluida dipanaskan oleh Water Heating Tank secara langsung (direct) dan didinginkan oleh Water Cooling Tank secara tidak langsung (non direct). Untai Rektangular merupakan tempat terjadinya sirkulasi alami dan terdapat Image Processing Area sehingga fenomena aliran sirkulasi alami dapat dilihat saat eksperimen berlangsung. Sistem pendingin Water Cooling Tank 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 suhu condenser dengan setting CTB  $10^{\circ}\text{C}$ . Laju aliran pada sistem pendingin di atur melalui katup dan dibantu sistem by pass pada keluaran pompa cooler. Laju aliran sistem pendingin dapat dilihat rotameter yang telah dipasang. Kemudian air pada Water Cooling Tank yang telah menyerap panas akan mengalir menuju tabung pre cooler dan terjadi pembuangan sisa panas yang di bantu 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. Semua komponen seperti thermocouple, electromagnetic flowmeter dan pressure transmitter terhubung melalui NI-cDAQ setiap 1 detik dan ditampilkan melalui program LabView pada komputer. Sebanyak 15 termokopel yang terpasang dan telah dikalibrasi dengan tingkat

error 1% pada Untai Rektangular FASSIP-04 Ver.2. Penamaan dan penempatan padamodul NI. terhubung melalui NI-cDAQ setiap 1 detik dan ditampilkan melalui program LabView pada komputer.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

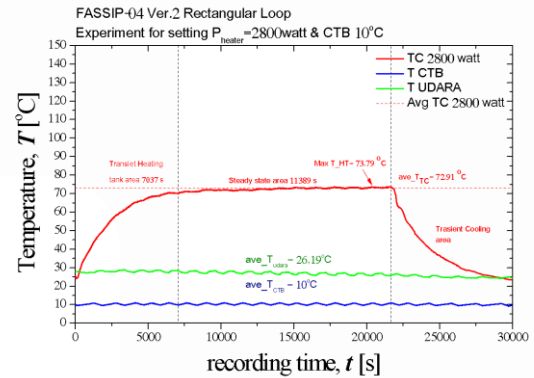
### 1. Karakteristik perubahan temperatur di pendingin

Berdasarkan studi eksperimental variasi daya heater dengan setting eksperimen yaitu, 1400 W, 2800 W, 4200 W dengan setting di dalam tangki pendingin 10 °C. Eksperimen dilakukan selama 6 jam dimana terdapat kondisi transien panas dan steady state namun saat kondisi transien pendinginan sampai temperatur heater mencapai kondisi initial atau sama dengan kondisi awal.



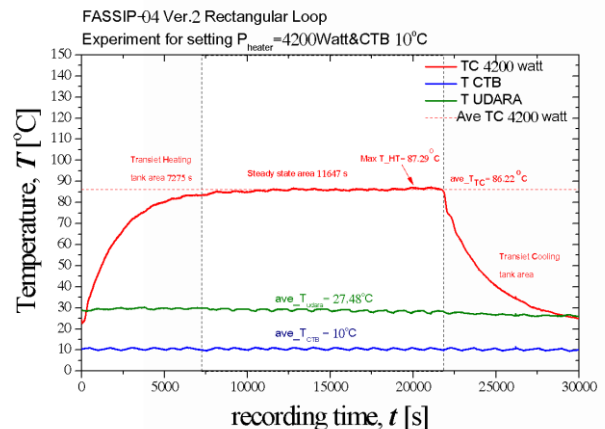
Gambar 4. Grafik temperatur TC pada variasi daya 1400 W

Berdasarkan **Gambar 4** waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi tunak pada variasi daya 1400 W yaitu 7419 detik, lalu kondisi tunak yang dijaga hingga detik ke 10302 detik. Setelah kondisi tunak eksperimen dilanjutkan untuk mendapatkan karakteristik temperatur pada kondisi transien penurunan yang di lakukan mulai dari 21871 hingga detik ke 30000 detik. Untuk Variasi daya 1400 watt dengan temperatur rata rata lingkungan 25.67 °C dengan setting temperatur tangki pendingin 10 °C. Temperatur air yang terjadi pada HT dalam kondisi tunak dengan variasi daya heater 1400 watt dengan setting temperatur tangki pendingin 10°C rata rata mencapai 50.81 °C. dan temperatur maksimal air pemanas mencapai 51.33 °C.



Gambar 5. Grafik Temperatur TC Pada Variasi 2800 W

Berdasarkan pada **Gambar 5** pada variasi daya 2800 W waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi tunak yaitu 7077 detik, lalu kondisi tunak dijaga hingga detik ke 11389 detik. Setelah kondisi tunak eksperimen dilanjutkan untuk mendapatkan karakteristik temperatur pada kondisi transien penurunan yang di lakukan 21727 hingga detik 30000 detik. pada variasi 2800 watt dengan temperatur rata rata lingkungan 26.19 °C dengan setting temperatur tangki pendingin Temperatur air yang terjadi pada HT dalam kondisi tunak dengan variasi daya heater 2800 watt dengan setting temperatur tangki pendingin 10 °C rata rata mencapai 72.91°C. dan temperatur maksimal air pemanas mencapai 73.79 °C.



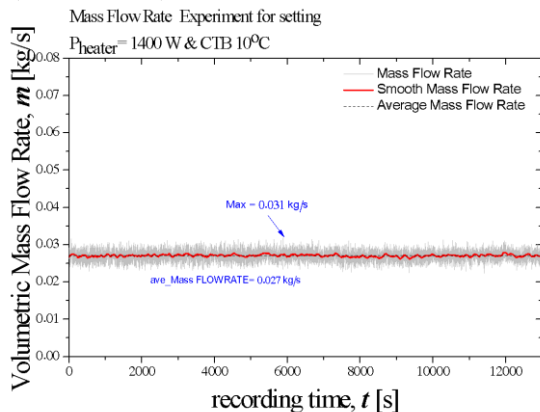
Gambar 7. Grafik temperatur TC pada variasi daya 4200 W

Berdasarkan **Gambar 7** pada variasi daya 4200 W waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi tunak yaitu 7275 detik , lalu kondisi tunak dijaga hingga detik 11647 detik. Setelah kondisi tunak eksperimen dilanjutkan untuk mendapatkan karakteristik temperatur pada kondisi transien penurunan yang dilakukan 21826 hingga detik 30000 detik. Lalu pada variasi 4200 watt dengan temperatur rata rata

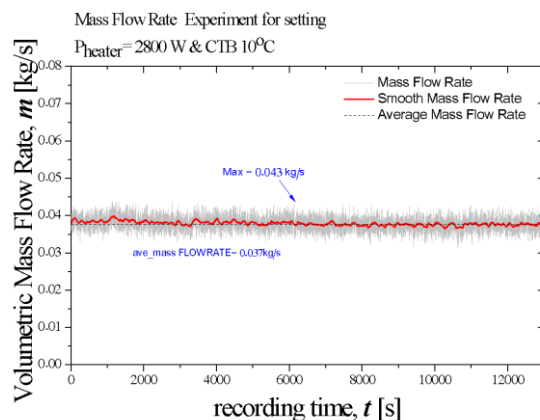
lingkungan 27.48 °C dengan setting temperatur tangki pendingin 10 °C. Temperatur air yang terjadi pada HT dalam kondisi tunak dengan variasi daya heater 4200 watt dengan setting temperatur tangki pendingin 10 °C rata rata mencapai 86.22 °C. dan temperatur maksimal air pemanas mencapai 87.29 °C.

## 2. Karakteristik Laju Aliran Massa pada Kondisi Tunak

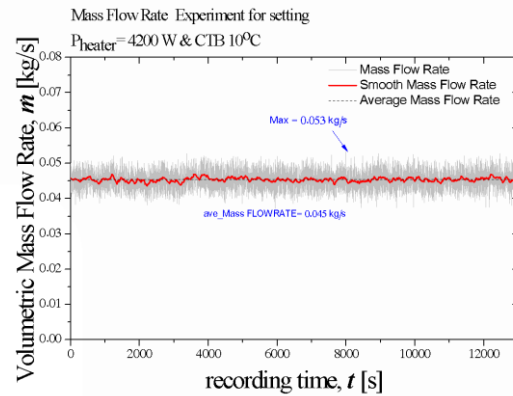
Nilai laju aliran massa pada pipa bagian tangki pendingin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 1. Sebelum menghitung laju aliran massa pada bagian tangki pendingin dilakukan perhitungan terlebih dahulu untuk mengetahui bilangan  $\rho$  dengan menggunakan persamaan 2. Hasil dari perhitungan bisa dilihat melalui pada **Gambar 8**, **Gambar 9**, dan **Gambar 10**



Gambar 8. Laju aliran massa pada variasi 1400 W

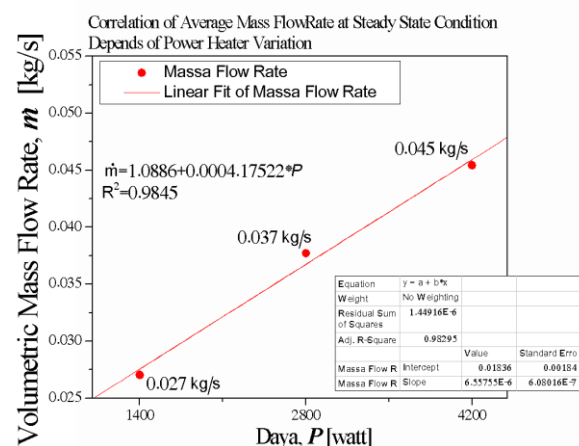


Gambar 9. Laju aliran Massa Pada Variasi 2800 W



Gambar 10. Grafik laju aliran massa pada variasi 4200 W

Berdasarkan **Gambar 8** karakteristik laju aliran sirkulasi massa variasi daya 1400 W, Laju aliran massa mendapatkan rata rata 0,027 kg/s dengan kondisi tunak 7853 detik ditahan hingga 12000 detik. Saat kondisi kondisi tunak mengalami kenaikan sehingga nilai laju aliran massa meningkat drastis hingga mencapai nilai maksimal 0,031 kg/s. Pada **Gambar 9** laju aliran secara alami variasi daya 2800 W mendapatkan rata rata 0,037 kg/s dengan kondisi tunak di tahan 7853 detik hingga 1200 detik. Saat kondisi tunak mengalami kenaikan sehingga nilai laju aliran massa meningkat drastis hingga mencapai nilai maksimal 0.047 kg/s. **Gambar 10** menunjukkan laju aliran massa pada daya 4200 W mendapatkan rata rata 0,045 kg/s dengan kondisi tunak 7853 detik hingga 1200 detik. Saat kondisi steady state mengalami kenaikan sehingga nilai laju aliran massa meningkat drastis hingga mencapai nilai maksimal 0,053 kg/s.



Gambar 11. Perbandingan laju aliran massa pada variasi daya

Berdasarkan pada **Gambar 11** bahwa terdapat perbedaan laju aliran sirkulasi massa tiap variasi daya menjelaskan bahwa pada variasi daya 1400 W rata rata laju sirkulasi massa yang

dihasilkan selama kondisi tunak sebesar 0.027 kg/s. Perubahan laju aliran sirkulasi massa pada variasi daya 2800 W selama kondisi tunak sebesar 0.037 kg/s. Perubahan laju aliran sirkulasi alami pada variasi daya 4200 W selama kondisi tunak sebesar 0.045 kg/s. Dari **Gambar 11** dapat disimpulkan bahwa pada variasi daya 4200 W memiliki Laju aliran massa yang paling tinggi di saat kondisi tunak dibandingkan dengan daya 1400 W dan 2800 W. hal ini menandakan semakin tinggi setting daya heater semakin tinggi pula laju aliran massa untai dalam kondisi tunak. Lalu dapat dilihat pula pada ketiga variasi membentuk grafik yang linear menaik sehingga dapat di fitting secara linear dan menghasilkan persamaan seperti berikut,

$$\dot{m} = 1.0886 + 0,0004175P$$

dengan  $R^2=0,9845$  menandakan persamaan linear hasil dari fitting hampir akurat.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang didapatkan maka dapat di tarik kesimpulan, sebagai berikut:

Perubahan temperatur yang terjadi disebabkan oleh pertukaran kalor yang terjadi selama eksperimen berlangsung. Semakin tinggi perbedaan variasi daya semakin lama waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi tunak. Selain itu dapat dilihat bahwa semakin tinggi setting variasi daya heater, semakin besar temperatur fluida yang memiliki rata-rata sebesar 87,29 °C. Pada hasil pembahasan karakteristik laju aliran massa dapat dilihat bahwa seiring bertambahnya nilai variasi daya heater semakin naik juga nilai laju aliran maksimum yang dapat dicapai pada untai yang memiliki perbedaan sebesar 0.01 kg/s.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Hibah Riset untuk 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. Terima kasih kepada Kepala Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, Organisasi Riset Tenaga Nuklir (BATAN), dan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BATAN). Terima kasih juga kepada seluruh anggota Kelompok Riset Sistem Termal-Fluida Reaktor Nuklir (RTFSyDev). Terima kasih disampaikan kepada para

mahasiswa peneliti di Kelompok Penelitian EDfEC Teknik Mesin FTS Universitas Ibn Khaldun Bogor.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A R Antariksawan & Mulya, N. s. (2018). Numerical study on natural circulation characteristics in. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105.
- [2] Almadesya Rinaldi, E. L.-0. (2019). ESTIMASI LAJU ALIRAN SIRKULASI ALAM BERDASARKAN BEDA TEMPERATUR PADA UNTAI FASSIP-01. Sigma Epsilon, 58-69.
- [3] Andang Widiharto, R. I. (2011). Reaktor Innovative Molten Salt (imsr) dengan sistem dengan sistem keselamatan pasif menyeluruh. Teknologi Reaktor Nuklir, 10-20.
- [4] Anhar R. Antariksawan, S. W. (2018). SIMULATION OF OPERATIONAL CONDITIONS OF FASSIP-02 NATURAL CIRCULATION. Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia , 41-54.
- [5] Dedy haryanto, E. C.-0. (2022). EFISIENSI COOLING TANK SECTION UNTAI FASSIP-03 NT BERDASARKAN VARIASI DAYA PEMANAS HEATING TANK SECTION PADA KONDISI TUNAK. TECHNOPEX-2022 Institut Teknologi Indonesia, 20-29.
- [6] Dwi Yuliaji, U. K. (2023). UJI KOMISIONING FASILITAS SISTEM SIMULASI PASIF 04 VERSI 2 (FASSIP 04 VER.2) UNTUK STUDI KEMAMPUAN PENDINGINAN PASIF PADA SISTEM KESELAMATAN REAKTOR NUKLIR. AME (Aplikasi Mekanika dan Energi): Jurnal Ilmiah Teknik Mesin 2023, 57-63.
- [7] Fredrick Neo, A. D. (2019). Analisis Desain Konseptual Sistem Pendingin Pasif Pasca Shutdown Reaktor PCMSR. International Journal of Education, Science, Technology and Engineering, 68-83.
- [8] Habibi Abdillah et al, S. o. (2017). Study of Natural Convection Passive Cooling System for. International Conference on Energy Sciences (ICES 2016) , 877.
- [9] Juarsa, M., G.B., G., K, H., Haryanto, D., & Prasetyo, J. (2016). PASSIVE SYSTEM SIMULATION FACILITY (FASSIP) LOOP. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2016, 2355-7524.

[10] M Juarsa, A. R. (2017). Estimation of natural circulation flow based on temperature in. international Tropical Renewable Energy Conference, 105.

[11] Mulya juarsa et al, P. S. (2016 ). PASSIVE SYSTEM SIMULATION FACILITY (FASSIP) LOOP. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2016 , 673-682.

[12] Nuclear Energy Agency, W. D. (2021). Fukushima Daiichi Nuclear Power. japan: Nuclear energy agency.

[13] V.Archana, N. m. (2015). Numerical modeling of supercritical CO<sub>2</sub>natural circulation loop. Nuclear Engineering and Design, 330-345.