

## KARAKTERISASI LAJU ALIRAN MASSA PADA PIPA BAGIAN HEATER BERDASARKAN PERUBAHAN DAYA DI UNTAI (FASSIP-01) MOD.1

Ahmad Fauzi<sup>1)</sup>, Mulya Juarsa<sup>2)</sup>, Rudi Irawan<sup>1)</sup>, Giarno<sup>2)</sup>, G.B. Heru K<sup>2)</sup>, Dedy Haryanto<sup>2)</sup>, Joko<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Ibn Khaldun Bogor

<sup>2)</sup>Pusat Teknologi dan Keselamatan Nuklir – BATAN

e-mail: ahmadfauzi2829@gmail.com

### ABSTRAK

Kecelakaan reaktor nuklir di Fukushima Daiichi Jepang pada 11 Maret 2011, menyebabkan dilakukannya penelitian ini di berbagai negara termasuk Indonesia yang sedang mengembangkan sistem keselamatan pasif dengan alat Untai FASSIP-01 Mod.1 di PTKRN-BATAN Serpong. Ada beberapa komponen pada Untai FASSIP-01 Mod.1 yaitu komponen pemanas yang dinamakan *Blanket Ceramic Heater* (BCH-02), komponen pendingin dengan sistem *refrigerant cooling system* (RCS), dan tabung ekspansi. Sistem pasif menerapkan hukum alami untuk mengamati kondisi yang tidak stabil pada reaktor. Perlu dilakukannya eksperimen untuk mengetahui karakterisasi distribusi temperatur pada pemanas BCH-02 di Untai FASSIP-01 Mod.1 dengan memvariasikan daya dan tegangan 20 volt – 160 volt. Pengujian dilakukan selama 120 menit dan tegangan dinaikkan sebesar 20 volt selama 15 menit, eksperimen pada BCH-02 dilakukan dengan posisi vertikal dan horizontal. Hasil eksperimen pada BCH-02. Pada posisi vertikal perubahan temperatur terhadap waktu paling tinggi adalah T-CER mencapai 240.63°C dan pada posisi horizontal perubahan temperatur terhadap waktu paling tinggi adalah TH-04 mencapai 360,83°C. semakin besar daya yang diberikan maka temperaturnya semakin tinggi. Temperatur yang berada di permukaan *ceramic-brick* lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur di dalam pipa *section*, hal ini disebabkan karena terjadi *heat loss* pada celah celah ruang di dalam BCH-02 sebelum mencapai pipa *section*.

**Kata kunci :** BCH-02, Distribusi temperatur, Keselamatan PLN, Untai FASSIP-01 MOD.1.

### ABSTRACT

*Accident of a nuclear reactor at Japan's Fukushima Daiichi on March 11, 2011, led to this research in various countries including Indonesia which is developing a passive safety system with the FASSIP-01 Mod.1 tool in the PTKRN-BATAN Serpong. There are several components in the FASSIP-01 Mod.1 Strand, namely the heating component called Blanket Ceramic Heater (BCH-02), cooling components with the refrigerant cooling system (RCS), and expansion tubes. The passive system applies natural laws to observe unstable conditions in the reactor. Experiments are needed to determine the characterization of temperature distribution at BCH-02 heaters in Strand FASSIP-01 Mod.1 by varying the power and voltage of 20 volts-160 volts. The test was carried out for 120 minutes and the voltage was increased by 20 volts for 15 minutes, experiments on BCH-02 were carried out in vertical and horizontal positions. The experimental results on BCH-02. In the vertical position the temperature change with respect to the highest time is T-CER reaching 240.63 ° C and in the horizontal position the temperature change with the highest time is TH-04 reaching 360.83 ° C. the greater the power is given, the higher the temperature. The temperature on the ceramic-brick surface is higher than the temperature in the section pipe, this is due to heat loss in the space gaps in the BCH-02 before reaching the section pipe.*

**Keywords :** BCH-02, FASSIP-01 MOD.1, Temperature distribution, Safety of PLN.

### 1. PENDAHULUAN

Masalah energi merupakan isu penting yang sedang hangat dibicarakan. Pemanasan global yang diyakini sedang terjadi dan memasuki tahap yang mengkhawatirkan. Maka dari itu, perlu mencari sumber-sumber energi alternatif yang cukup

potensial untuk menggantikannya, salah satunya dengan mengembangkan energi tenaga nuklir di Indonesia.

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) adalah sebuah pembangkit daya termal yang menggunakan satu atau beberapa reaktor nuklir sebagai sumber panasnya yang perlu

dipertimbangkan karena energi ini dapat menghasilkan daya hingga mencapai 2000 MWe (BATAN, 2018). Penggunaan energi nuklir melalui PLTN sampai saat ini memberikan sekitar 15% dari kebutuhan listrik dunia, akan tetapi dalam penggunaannya, energi nuklir perlu memperhatikan beberapa aspek yang ada, antara lain aspek keselamatan, sosial, ekonomi, teknis, sumberdaya manusia, dan teknologi (Syam dan Septilarso, 2011).

Beberapa kecelakaan yang pernah terjadi pada PLTN diantaranya kecelakaan Three Mile Island Unit 2 (TMI-2) pada tahun 1979 dan Fukushima Daiichi Jepang pada tahun 2011. Reaktor TMI-2 merupakan jenis reaktor air yang bertekanan PWR (*Pressurized Water Reactor*) dan termasuk kategori kecelakaan parah. Pemicu kecelakaan ini adalah, hilangnya sebagian besar air pendingin LOCA (*Loss of Coolant Accident*) di sistem primer, dimana kejadian ini dapat dipersamakan dengan peristiwa kecelakaan air pendingin untuk kebocoran skala kecil. Dalam peristiwa kecelakaan tersebut sehingga teras dari dalam bejana tekan reaktor RPV (*Reactor Pressure Vessel*) meleleh dan sekitar 20 ton lelehan panas bertemperatur sekitar 1130°C terkumpul pada bagian daerah *plenum* (*Lower Plenum*) RPV (Juarsa dan Antariksawan, 2007).

Akibat dari beberapa kecelakaan yang pernah dialami oleh beberapa reaktor nuklir, perancangan dan produsen PLTN terus berupaya untuk lebih mengembangkan dan meningkatkan aspek keselamatan. Salah satu konsep yang terus dikembangkan adalah system keamanan pasif. Sistem keselamatan pasif memiliki prinsip dasar proses konveksi alamiah dan sirkulasi alam (Juarsa, 2016).

Laju aliran sirkulasi alam pada siklus tertutup ini dipengaruhi oleh beberapa parameter, yaitu ukuran diameter pipa, panjang pipa dan beda ketinggian daerah dingin dan panas. Selain itu temperatur juga mempengaruhi laju aliran. Untuk kebutuhan penelitian terkait sistem pendingin pasif, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) Pusat Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) sedang mengembangkan Untai Fasilitas Simulasi Sistem Pasif Unit 1 (FASSIP-01). Komponen Untai FASSIP-01 terdiri dari BCH-02 (*blanket ceramic heater*), RCS (*Refrigrant Cooling System*) dan tabung ekspansi yang terhubung pada pipa dalam posisi vertikal membentuk untaian rektangular. Kasus sirkulasi alam diperkirakan memiliki kondisi aliran yang berbeda di daerah panas (BCH-02) yang posisi di bawah, dengan daerah dingin (RCS) yang

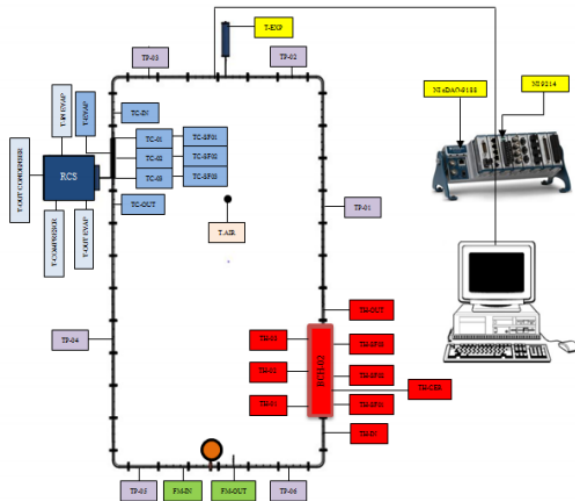
posisinya di atas. Sehingga, analisis berdasarkan data eksperimen terhadap karakterisasi distribusi temperatur pada komponen pemanas BCH-02 di Untai FASSIP-01 Mod.1 (Fauzi, 2018).

Beberapa penelitian keselamatan sistem pasif telah dilakukan oleh Chung et al. (2016) tentang kode TASS / SMR yang dikembangkan menggunakan berbagai model termohidrolik yang mencerminkan fitur desain SMART, seperti penukar panas kondensat dalam sistem pembuangan panas residual pasif. Sistem Pendingin Moderator Pasif (PMCS) dari *Advanced Heavy Water Reactor* dirancang untuk menghilangkan panas dari moderator secara pasif dalam kasus kondisi keluar stasiun hitam yang diperpanjang atau *Station Black Out* (SBO) (Pal et al., 2016). Wu et al. (2017) mempertimbangkan efek resistensi lokal dan ketahanan gesekan dalam loop sirkulasi alami, hubungan analitis antara laju aliran massa sirkulasi alami dan daya pemanasan ( $Q$ ) dapat dinyatakan sebagai  $GQ \propto m; m \propto Re; Rn$ , dimana  $Rn$  adalah rasio dari koefisien kehilangan tekanan lokal dan koefisien gesekan. Naveen et al. (2014) mensimulasikan *start-up loop* yang memiliki orientasi *heater* dan *cooler* yang berbeda dan penerapan model sebagai alat umum untuk mensimulasikan *start-up loop* sirkulasi alami persegi panjang dinilai. VHTR prismatik, blok grafik berbentuk heksagonal dibor untuk memungkinkan penyisipan pin bahan bakar, terbuat dari partikel bahan bakar *tristructural-isotropic* yang dipadatkan, dan saluran pendingin untuk pendingin helium (Tung et al., 2014). Menurut Wang et al. (2014), hubungan antara laju aliran rata-rata siklus sebelum dan sesudah gerakan mulai bergulir, dan hubungan antara parameter gerakan bergulir, amplitudo denyut terelatif dari bilangan Nusselt dan bilangan Reynolds rata-rata siklus, bilangan Nusselt sesaat dalam kondisi gerak bergulir dapat diprediksi menggunakan parameter termal-hidrolik dalam kondisi statis. Keakuratan dan penerapan metode penskalaan yang diusulkan ini ditunjukkan dengan mengusulkan loop sederhana dan sistem seperti *Pressurized Water Reactors* (PWR), dengan sistem untuk mendapatkan dua model yang sesuai (Yu dan Choi, 2016).

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan pada alat Untai FASSIP-01 Mod.1 yang mempelajari karakteristik pendinginan sirkulasi alam dengan menggunakan air sebagai fluida kerjanya. Skema Untai FASSIP-01 Mod.1 dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2.

Gambar 1 dan 2, alat Untai FASSIP-01 Mod.1 memiliki beberapa komponen utama yang meliputi tabung ekspansi, RCS dan BCH-02. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil perhitungan laju aliran massa dan karakterisasi perubahan temperatur pada komponen pemanas BCH-02 berdasarkan perubahan daya *heater* pada Untai FASSIP -01 Mod.1.



Gambar 1. Skema Untai FASSIP-01 Mod.1



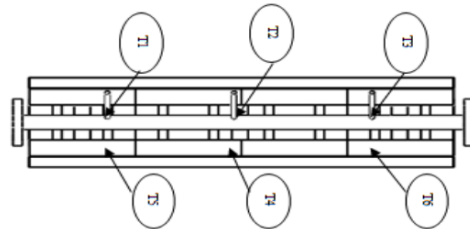
Gambar 2. Untai FASSIP-01 Mod.1

BCH-02 merupakan sebuah alat pemanas kontak langsung yang dipasangkan kawat *heater* sebanyak 8 kawat yang dililit masing-masing kawat sebanyak 11 lilitan. BCH-02 mempunyai panjang 92 cm dan lebar 13 cm x 13 cm. Bagian konduktor penghubung dari kawat pemanas ke pipa *section* dengan *ceramic-brick*. Gambar BCH-02 dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 BCH-02

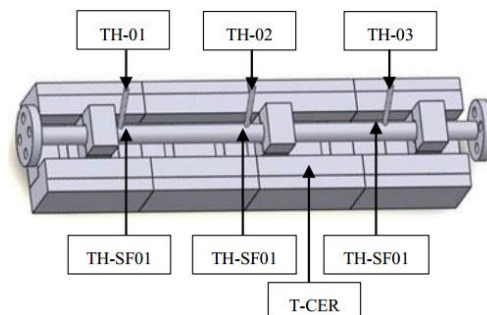
Dapat kita lihat pada Gambar 3 untuk mendapatkan hasil data perhitungan laju aliran massa dan karakterisasi distribusi temperatur pada komponen BCH-02, maka perlu dilakukan pemasangan termokopel pada bagian-bagian yang sudah ditentukan guna mengetahui perubahan temperatur pada BCH-02. Ada 7 termokopel yang dipasang pada BCH-02 dengan posisi vertikal dan 6 termokopel pada posisi horizontal, berikut gambar pemasangan termokopel pada BCH -02 dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.



Gambar 4. Penempatan termokopel posisi horizontal

Pada Gambar 4 penempatan termokopel pada BCH-02 secara horizontal yaitu:

- Posisi T1 menempel di dalam pipa *section*
- Posisi T2 menempel di dalam pipa *section*
- Posisi T3 menempel di dalam pipa *section*
- Posisi T4 menempel di atas *ceramic-brick*
- Posisi T5 menempel di atas *ceramic-brick*
- Posisi T6 menempel di atas *ceramic-brick*

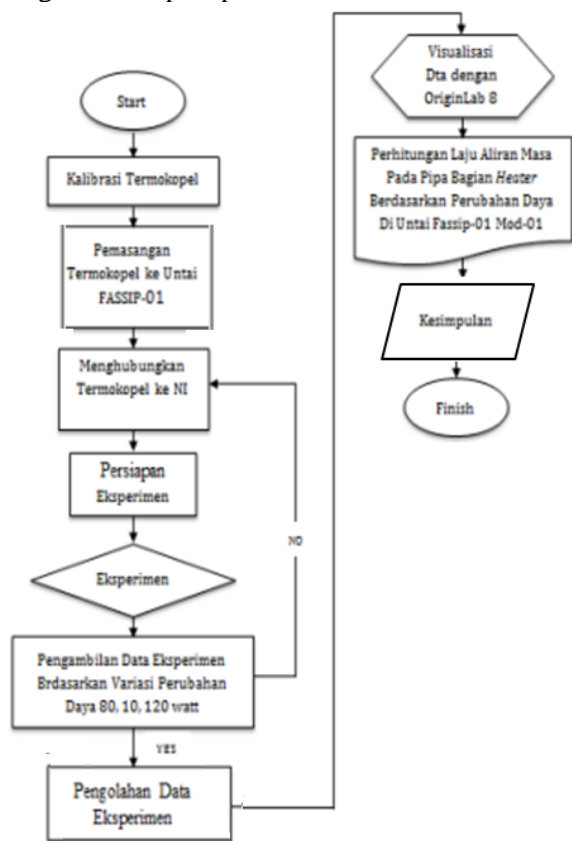


Gambar 5. Penempatan termokopel posisi vertikal

Pada Gambar 5 penempatan termokopel pada BCH-02 secara vertikal yaitu:

- Posisi TH-01 berada di dalam pipa *section*
- Posisi TH-02 berada di dalam pipa *section*
- Posisi TH-03 berada di dalam pipa *section*
- Posisi TH-SF01 di atas permukaan pipa
- Posisi TH-SF02 di atas permukaan pipa
- Posisi TH-SF03 di atas permukaan pipa
- Posisi TH-CER menempel di permukaan *ceramic-brick*.

Termokopel yang sudah dipasang pada BCH-02 dihubungkan ke *Modul National Instrument (NI)* yang berfungsi untuk menghubungkan pembacaan temperatur dari termokopel oleh aplikasi pada komputer. Aplikasi yang digunakan adalah *LabView* untuk mengamati suhu pada BCH-02 di komputer. Adapun penelitian ini dilakukan berdasarkan diagram alir seperti pada Gambar 6.



4tjjop

Gambar 6. Diagram alir Penelitian

Eksperimen ini dilakukan selama 105 menit, pada setiap 15 menit tegangan dinaikkan sebesar 20 volt pada regulator *voltage*.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan eksperimen dan pengambilan data temperatur pada BCH-02 maka

didapatkan data pada Tabel 1 dengan posisi vertikal dan Tabel 2 dengan posisi horizontal

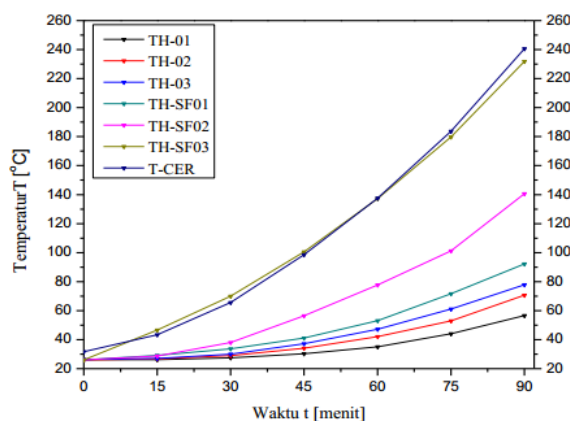
Tabel 1. Data pengujian pada BCH-02 posisi vertikal

No	Menit	V (Volt)	I (A)	P (Watt)	TH-01 °C	TH-02 °C	TH-03 °C
1	15	0	0,00	0	26,16	26,12	26,30
2	30	20	2,50	50,0	26,22	26,80	27,10
3	45	40	4,36	174,4	27,40	28,97	30,01
4	60	60	6,54	392,4	30,27	34,07	37,17
5	75	80	8,84	707,2	35,11	42,13	47,21
6	90	100	11,90	1190,0	44,06	52,91	61,16
7	105	120	14,60	1752,0	56,59	70,71	77,88

No	V (Volt)	I (A)	P (Watt)	TH-SF01 °C	TH-SF02 °C	TH-SF03 °C	T-CER
1	0	0,00	0	26,16	26,12	26,30	32,33
2	20	2,50	50,0	26,22	26,80	27,10	40,05
3	40	4,36	174,4	27,40	28,97	30,01	54,07
4	60	6,54	392,4	30,27	34,07	37,17	92,71
5	80	8,84	707,2	35,11	42,13	47,21	116,32
6	100	11,90	1190,0	44,06	52,91	61,16	163,94
7	120	14,60	1752,0	56,59	70,71	77,88	240,63

Dapat dilihat pada Tabel 1, pada termokopel di menit 15-105 dengan tegangan yang diberikan sebesar 20-120 volt dan arus yang mengalir 0,00-14,60 amper, temperatur yang dibaca oleh termokopel terus mengalami kenaikan. Perubahan temperatur terhadap waktu diberikan oleh *heater* dapat dilihat pada Gambar 7.



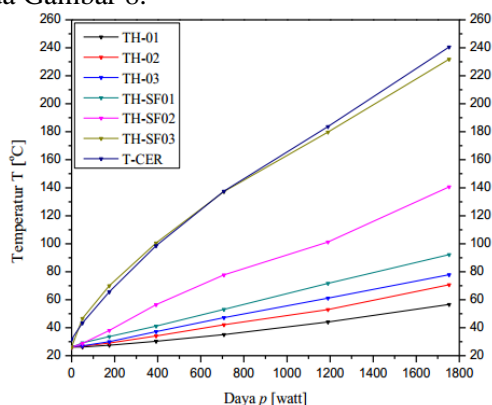
Gambar 7. Grafik temperatur terhadap waktu pada BCH-02

Dari grafik pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa perubahan temperatur terhadap waktu paling tinggi adalah T-CER mencapai 240.63°C, hal ini disebabkan karena pemasangan T-CER berada di dekat kawat *heater*. Sedangkan temperatur paling tinggi pada pipa *section* berada pada TH-SF03 yang penempatannya di atas permukaan pipa *section* mencapai 231.85°C dan perubahan temperatur paling rendah adalah TH-01 mencapai 56.59°C. Hal ini



dikarenakan pemasangannya di dalam *section pipe*, sehingga panas yang diterima lebih lambat. Pada data dan grafik yang diamati, termokopel yang letaknya di permukaan pipa *section* memiliki temperatur lebih tinggi dari pada di dalam pipa *section*, itu karena termokopel yang penempatannya di atas permukaan pipa *section* terkontak langsung dengan alat penghantar panasnya dan di dalam pipa *section* terjadi perbedaan temperatur yang temperaturnya lebih rendah dari pada di permukaan pipa.

Perubahan temperatur yang didapatkan dipengaruhi oleh daya yang diberikan setiap waktu selalu mengalami peningkatan. Perubahan daya terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik temperatur terhadap daya pada BCH-02

Dari grafik pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa perubahan temperatur terhadap daya paling tinggi adalah 1.752 watt. Maka dari itu, semakin besar daya yang diberikan mengakibatkan perubahan temperaturnya semakin tinggi. Adapun hasil data eksperimen yang ke 2 dengan pengambilan data temperatur pada BCH-02 dengan posisi horizontal dapat dilihat pada Tabel 2.

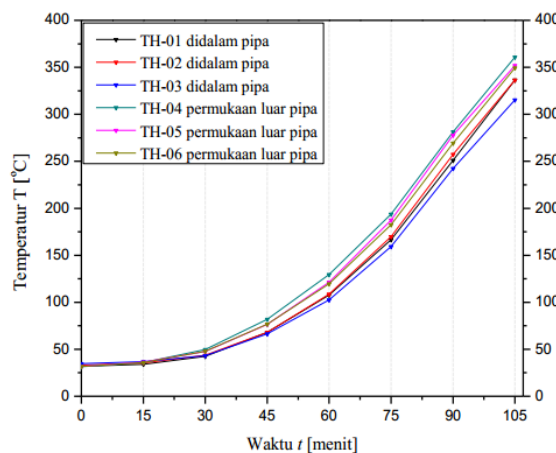
Tabel 2. Data pengujian BCH-02 horizontal

No	Menit	V (Volt)	I (A)	P (Watt)	TH-01 °C	TH-02 °C	TH-03 °C
1	15	0	0,00	0	32,01	33,13	34,66
2	30	20	2,50	50,0	34,01	35,44	36,93
3	45	40	4,36	174,4	42,42	43,63	43,18
4	60	60	6,54	392,4	68,06	68,05	66,5
5	75	80	8,84	707,2	107,69	108,69	102,59
6	90	100	11,90	1190,0	166,59	169,96	159,27
7	105	120	14,60	1752,0	251,09	257,26	242,3

No	Menit	V (Volt)	I (A)	P (Watt)	TH-04 °C	TH-05 °C	TH-06 °C
1	15	0	0,00	0	31,38	31,77	31,77
2	30	20	2,50	50,0	35,85	35,85	36,38
3	45	40	4,36	174,4	49,72	49,72	47,75
4	60	60	6,54	392,4	81,78	81,78	76,67
5	75	80	8,84	707,2	129,38	129,39	119,29
6	90	100	11,90	1190,0	193,77	193,77	182,57
7	105	120	14,60	1752,0	281,35	281,35	269,37

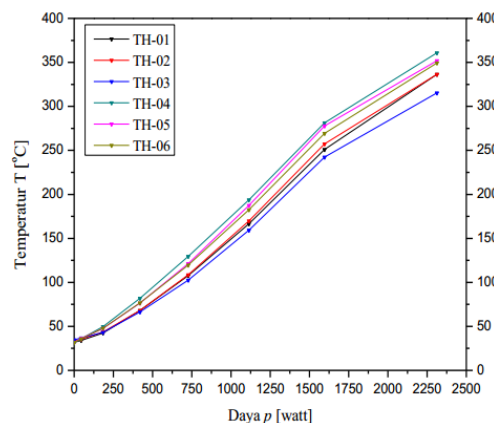
Dapat dilihat pada Tabel 1 pada termokopel TH-01, TH-02, TH-03, TH-04, TH-05 dan TH-06 di menit 15-105 menit dengan tegangan yang diberikan sebesar 20-120 volt dengan arus yang diberikan dari 0,00-14,60 ampere, temperatur yang dibaca oleh termokopel terus mengalami kenaikan temperatur. Perubahan temperatur terhadap waktu diberikan oleh heater dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik temperature terhadap waktu pada BCH-02

Dari grafik pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa perubahan temperatur terhadap waktu paling tinggi adalah TH-04 mencapai 360,83°C, hal ini disebabkan pemasangan TH-04 berada di atas permukaan *ceramic-brick*. Sedangkan perubahan temperatur paling rendah adalah TH-03 mencapai 315,42°C, karena pemasangan termokopel di dalam pipa *section*, sehingga panas yang diterima lebih lambat.

Adapun perubahan temperatur yang didapatkan dipengaruhi oleh daya yang diberikan setiap waktu terus mengalami peningkatan temperatur. Perubahan daya terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik temperature terhadap daya pada BCH-02

Dari grafik pada Gambar 10 dapat dilihat bahwa perubahan temperatur terhadap daya paling tinggi adalah TH-04 mencapai 360,83°C, hal ini karena pemasangan TH-04 berada di atas di permukaan ceramic-brick. Sedangkan perubahan temperatur paling rendah adalah TH-03 mencapai 315,42°C, karena penempatannya di dalam pipa *section* dengan daya yang diberikan sebesar 2.312,8 watt.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan selama 105 menit, didapatkan perbedaan temperatur dengan posisi yang berbeda yaitu vertikal dan horizontal, hal ini bertujuan untuk mengetahui karakterisasi temperatur pada BCH-02 dan perhitungan laju aliran massa pada pipa bagian *heater* berdasarkan perubahan daya di Untai FASSIP-01 Mod.1. hasil eksperimen menunjukkan pada posisi vertikal perubahan temperatur terhadap waktu paling tinggi adalah T-CER mencapai 240.63°C dan pada posisi horizontal perubahan temperatur terhadap waktu paling tinggi adalah TH-04 mencapai 360,83°C

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala PTKRN-BATAN atas ijinnya untuk melakukan Tugas Akhir dan penggunaan fasilitas di laboratorium Termohidrolik Eksperimental. Ucapan terima kasih juga diberikan kepada anggaran DIPA PTKRNBATAN tahun 2017 dan Hibah Luar Negeri, CRP IAEA 2017-2020 dengan nomor kontrak 20948.

#### REFERENSI

BATAN. (2018). Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. Retrieved from [www.batan.go.id/index.php/id/infonuklir/pltn-infonuklir/generasi-pltn/924-pengenalan-pembangkit-listrik-tenaga-nuklir](http://www.batan.go.id/index.php/id/infonuklir/pltn-infonuklir/generasi-pltn/924-pengenalan-pembangkit-listrik-tenaga-nuklir) website: <http://www.batan.go.id>

Chung, Y. J., Kim, S. H., Bae, K. H. (2016). Natural circulation heat transfer model development over vertical tube bundle in the condensate heat exchanger. *Annals of Nuclear Energy*, 94, 759-766. doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.04.037>

Fauzi, A. (2018). Karakteristik distribusi temperatur pemanas BCH-02 di Untai FASSIP-01 *Laporan kerja praktek*.

Juarsa, M. (2016). *Passive System Simulation Facility (FASSIP) Loop for Natural Circulation Study*. Paper presented at the Proceeding of "Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir (SENTEN)". 2016. Batam, 4-5 Agustus 2016.

Juarsa, M., Antariksawan, A. R. (2007). Boiling heat transfer phenomenon research on Three Mile Island Unit 2 nuclear reactor accident event. *Sigma Epsilon*, 11(2), 1-11.

Naveen, K., Iyer, K. N., Doshi, J. B., Vijayan, P. K. (2014). Investigations on single-phase natural circulation loop dynamics part 1: Model for simulating start-up from rest. *Progress in Nuclear Energy*, 76, 148-159. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.05.017>

Pal, E., Kumar, M., Nayak, A. K., Joshi, J. B. (2016). Experimental and CFD simulations of fluid flow and temperature distribution in a natural circulation driven Passive Moderator Cooling System of an advanced nuclear reactor. *Chemical Engineering Science*, 155(C), 45-64. doi: [10.1016/j.ces.2016.07.037](https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.07.037)

Syam, N. S., Septilarso, A. (2011). Aplikasi sistem keselamatan pasif pada reaktor nuklir. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXV HFI*.

Tung, Y.-H., Johnson, R. W., Ferng, Y.-M., Chieng, C.-C. (2014). Modeling strategies to compute natural circulation using CFD in a VHTR after a LOFA. *Nuclear Engineering and Design*, 275, 80-90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.04.012>

Wang, C., Li, X., Wang, H., Gao, P. (2014). Experimental study on single-phase heat transfer of natural circulation in circular pipe under rolling motion condition. *Nuclear Engineering and Design*, 273, 497-504. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.03.045>

Wu, L., Liu, Y., Jia, H.-j., Wang, J. (2017). Innovative flow-resistance performance in the single-phase natural circulation

loop and relevant experiment verification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 107, 66-73. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.043>

Yu, X.-G., Choi, K.-Y. (2016). Systematic and exact scaling analysis of the single-phase natural circulation flow: The hydraulic similarity. *Progress in Nuclear Energy*, 89, 78-87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.02.001>