

## Analisis rugi kalor selama proses pemanasan pada *semi-spherical plenum stainless steel 316* berdasarkan perubahan *setting* suhu pemanasan

Zavi Indasyach Moreno<sup>1</sup>, Ronald Akbar<sup>2</sup>, Almira Citra Amelia<sup>2</sup>, Hilman Adrian<sup>2</sup>, Jeff Michael Johanes<sup>2</sup>, Putut Hery Setiawan<sup>4</sup>, Hyundianto Arif Gunawan<sup>3</sup>, Ragil Sukarno<sup>1</sup>, Darwin Rio Budi Syaka<sup>1</sup>, Mulya Juarsa<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta  
Jl. Rawamangun Muka, Jakarta Timur, DKI Jakarta 13220

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Indonesia  
Jl. Raya Puspipetek Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15320

<sup>3</sup>Program Pascasarjana Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia  
Kampus UI, Depok 16424

<sup>4</sup>Kelompok Riset Sistem Termofluida Reaktor Nuklir, Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, Organisasi Riset Tenaga Nuklir (BATAN), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)  
Gedung 80 KST. B.J. Habibie, Setu, Tangerang Selatan, Banten 15314  
Email korespondensi: mulya.juarsa@brin.go.id

### Abstrak

*Lelehan teras reaktor dalam bentuk semi-spherical telah melepas kalor selama peristiwa kecelakaan parah di reaktor nuklir, di mana karakteristik pelepas kalor perlu untuk dipelajari. Kajian ini bertujuan untuk mengetahui fenomena distribusi suhu dan besar laju rugi kalor pada semi-spherical plenum stainless steel 316 dengan melakukan variasi setting suhu. Dalam kajian ini digunakan plenum bergeometri semi-spherical yang disimulasikan sebagai debris reaktor nuklir dengan metode eksperimen. Eksperimen dilakukan dengan 4 variasi setting suhu yaitu 50°C, 100°C, 150°C, dan 200°C. Alat ukur yang digunakan yaitu termokopel tipe K yang dipasang pada 14 titik yang sudah ditentukan. Pengambilan data diambil saat proses pemanasan dan proses pendinginan yang terjadi pada semi-spherical plenum. Data yang diambil yaitu proses kenaikan dan penurunan suhu dan nilai laju rugi kalor. Berdasarkan hasil eksperimen didapatkan bahwa karakteristik kenaikan dan penurunan suhu ketika proses pemanasan dan pendinginan pada setiap titik termokopel adalah sama. Hasil nilai rugi kalor didapatkan pada suhu 50°C, 100°C, 150°C, dan 200°C secara berturut-turut sebesar 354,235 watt, 670,714 watt, 1442,303 watt, dan 2064,727 watt. Dapat disimpulkan bahwa nilai laju rugi kalor akan meningkat sebanding dengan besar setting suhu awal. Nilai laju rugi kalor dari semua eksperimen berada di atas 50%.*

**Kata kunci:** energi nuklir, perpindahan kalor, distribusi suhu, laju rugi kalor, semi-spherical.

### Abstract

*Reactor core melting in a semi-spherical geometry has released heat during severe accidents in nuclear reactors, where the heat-dissipating characteristics need to be studied. So, the study aims to determine the temperature distribution phenomenon and the heat loss rate in stainless steel 316 semi-spherical. This study used a semi-spherical plenum to simulate nuclear reactor debris by experimental methods. Experiments were carried out using four temperature variations from 50°C, 100°C, 150°C, and 200°C. The measuring instrument used is a K-type thermocouple that has been installed at 14 predetermined points. Data taken are the process of increasing and decreasing the temperature in the semi-spherical plenum and the value of the heat loss rate. Based on the experimental results, it was found that the characteristics of the increase and decrease in temperature during the heating and cooling processes at each thermocouple point tended to be the same. Heat loss values that were obtained at temperatures of 50°C, 100°C, 150°C, and 200°C were 354.235 watts, 670.714 watts, 1442.303 watts, and 2064.727 watts. The value of the heat loss will increase in proportion to the size of the setting temperature. The heat loss rate value for all experiments exceeds 50%.*

**Keywords:** nuclear energy, heat transfer, temperature distribution, heat loss rate, semi-spherical.

### 1. Pendahuluan

Energi listrik menjadi salah satu energi yang sangat dibutuhkan di Indonesia. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada tahun 2020, diketahui sumber energi listrik di Indonesia sebagian besar dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) sebesar

35,220 MW [1], di mana sumber energinya dihasilkan dari kalor hasil pembakaran batu bara. Batu bara merupakan sumber daya konvensional yang ketersediaannya semakin menipis [2]. Oleh karena itu, dibutuhkan pemanfaatan energi baru dan terbarukan. Energi baru terbarukan yang mulai dikembangkan salah satunya yaitu energi surya, karena sifat terbarukan dan ramah lingkungan membuat

pemerintah dan perorangan banyak mengadopsi teknologi tersebut [3]. Namun, energi surya memiliki penurunan efisiensi yang dipengaruhi kenaikan suhu pada panel surya. Setiap kenaikan suhu panel surya 1°C (dari 25°C), akan mengakibatkan penurunan sekitar 0,5% dari total tenaga yang dihasilkan [4]. Selain energi surya, energi nuklir juga merupakan energi baru terbarukan dengan kadar karbon rendah dan keluaran daya yang besar menjadi salah satu solusi peralihan sumber energi dari batu bara [5].

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) menjadi salah satu pilihan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik. Energi listrik yang dapat dihasilkan oleh PLTN tidak dipengaruhi oleh cuaca seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya. Keandalan nuklir dalam menghasilkan listrik dan memenuhi kebutuhan energi harus didukung oleh aspek keselamatan tingkat tinggi. Faktor keselamatan sangat dibutuhkan PLTN, dikarenakan dampak yang ditimbulkan oleh radiasi nuklir sangatlah berbahaya. Terdapat beberapa kejadian di dunia yang patut dicatat sebagai kejadian terburuk dalam sejarah keselamatan PLTN, salah satunya kejadian di reaktor *Three Mile Island* Unit 2 (TMI-2), Amerika Serikat yang mengakibatkan melelehnya teras reaktor [6],[7]. Berdasarkan peristiwa kecelakaan yang terjadi pada reaktor TMI-2 ini, para peneliti terdorong untuk melakukan kajian terkait fenomena melelehnya teras reaktor.

Kajian yang dilakukan pada tahun 2004 terkait dengan distribusi suhu saat pemanasan dan pendinginan permukaan *semi-spherical*. Pada kajian tersebut, didapatkan hasil karakteristik dari kenaikan suhu yang hampir sama untuk semua titik termokopel. Sedangkan pada proses penurunan suhu, didapatkan hasil karakteristik yang agak berbeda disebabkan oleh proses pendinginan menggunakan udara [8].

Kajian yang dilakukan adalah permasalahan yang berhubungan dengan interaksi antara lelehan teras reaktor (*debris*) di bagian bawah bejana dengan dinding bejana reaktor. Perpindahan kalor yang terjadi di dinding bejana reaktor yang dipengaruhi debris perlu dipelajari lebih mendalam. Pemahaman mengenai proses pemanasan yang terjadi di dinding bejana reaktor bergeometri *semi-spherical* (setengah bola) penting dilakukan untuk menunjang eksperimen selanjutnya. Analisis laju rugi kalor (*heat loss*) yang terjadi selama proses pemanasan perlu dilakukan untuk mengetahui berapa besar kalor yang terbuang. Kajian ini bertujuan untuk mengamati fenomena distribusi suhu yang terjadi pada *semi-spherical plenum* dan mengamati analisis rugi kalor (*heat loss*) yang terjadi selama proses pemanasan.

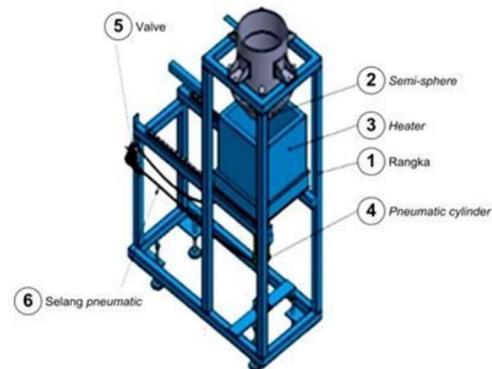
## 2. Metode

Kajian ini menggunakan metode eksperimen dalam mengamati fenomena laju distribusi suhu yang terjadi pada *semi-spherical plenum* berbahan *stainless-steel*

316 dan melakukan analisis terhadap laju kalor (*heat loss*) yang terjadi selama proses pemanasan.

### Alat Uji HeaTiNG-03

Gambar 1 merupakan ilustrasi alat uji HeaTiNG-03 (*Heat Transfer in Narrow Gap*). Alat ini berfungsi untuk melakukan eksperimen mengenai fenomena karakteristik distribusi suhu yang terjadi pada *test section semi-spherical plenum*. Versi sebelumnya yaitu HeaTiNG-01 dirancang dengan *test section annulus* dan HeaTiNG-02 dengan *test section rectangular* [9],[10]. Komponen pada alat uji HeaTiNG-03 terdiri dari rangka alat, *semi-spherical plenum*, *heater*, *pneumatic cylinder*, *valve*, dan selang *pneumatic*.



Gambar 1. Alat uji HeaTiNG-03.

*Pneumatic cylinder* berfungsi untuk menaikkan dan menurunkan *heater* ketika proses pemanasan. Selang *pneumatic* berfungsi sebagai jalur masuknya udara dari kompresor ke *pneumatic cylinder* agar bergerak, karena terdapat tekanan dari udara. *Valve* berfungsi sebagai pengatur masuknya udara ke *pneumatic cylinder* agar dapat diatur kenaikan dan penurunan *heater*.

### Semi-Spherical Plenum

Ilustrasi dari *semi-spherical plenum* berbahan *stainless steel* 316 ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini. *Semi-spherical plenum* diasumsikan sebagai *debris* pada teras reaktor. Pada *semi-spherical plenum* dibuat lubang untuk memasang termokopel. Lubang untuk termokopel yang terdapat pada *plenum* memiliki diameter 4 mm.



Gambar 2. Semi-spherical plenum.

Spesifikasi dari *semi-spherical plenum* ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi semi-spherical plenum.

No	Parameter	Keterangan
1	Bahan	<i>Stainless Steel 316</i>
2	Diameter	300 mm
3	Ketebalan	20 mm
4	Massa	18,7 kg
5	<i>Specific Heat Capacity</i>	500 J/kg°C

#### Termokopel Tipe K

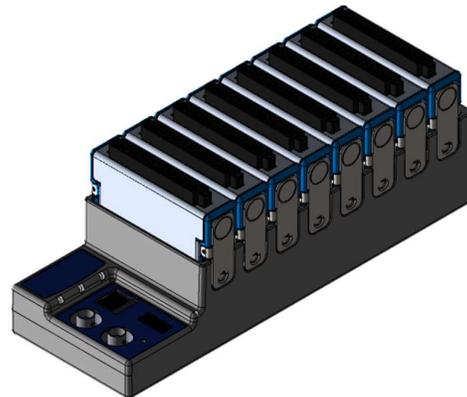
Termokopel tipe K berfungsi untuk memperoleh data kenaikan dan penurunan suhu pada *semi-spherical plenum*. Termokopel tipe K terdiri dari dua kawat *chromel* dan *alumel*. Pada eksperimen ini menggunakan Termokopel tipe K dengan diameter kawat  $2 \times 0,65$  mm. Sebelum digunakan, termokopel dikalibrasi terlebih dahulu agar ketika digunakan dapat membaca pengukuran suhu dengan baik. Termokopel tipe K ditunjukkan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Termokopel tipe K.

#### Data Akuisisi

Data akuisisi berfungsi untuk mengambil dan mengumpulkan data sebelum diolah menjadi data yang diinginkan. Data akuisisi yang digunakan pada studi ini yaitu sasis NI-cDAQ 9178 dan modul suhu NI-9214, di mana ditunjukkan pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Data akuisisi.

#### Slide Regulator Voltage

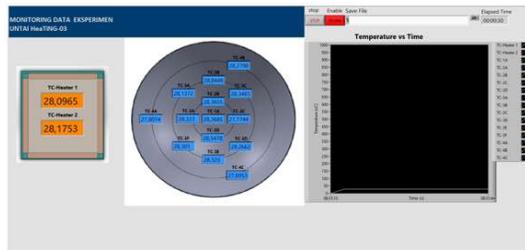
Gambar 5 merupakan *slide regulator voltage* yang berfungsi mengatur tegangan dari sumber listrik sebelum masuk ke *heater*. Oleh karena itu, suhu pada *heater* dapat diatur berdasarkan tegangan yang masuk. *Regulator voltage* memiliki pengaturan keluaran tegangan dari 0-230 volt.



Gambar 5. Slide regulator voltage.

**Program LabVIEW**

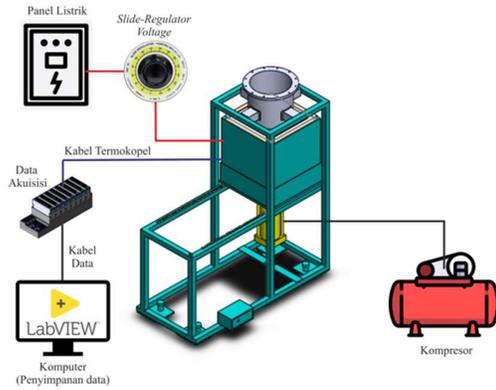
Komputer yang terunduh program LabVIEW berfungsi sebagai penerima data suhu yang dikirim dari data akuisisi. Gambar 6 merupakan tampilan (*interface*) program LabVIEW.



Gambar 6. Tampilan program LabVIEW.

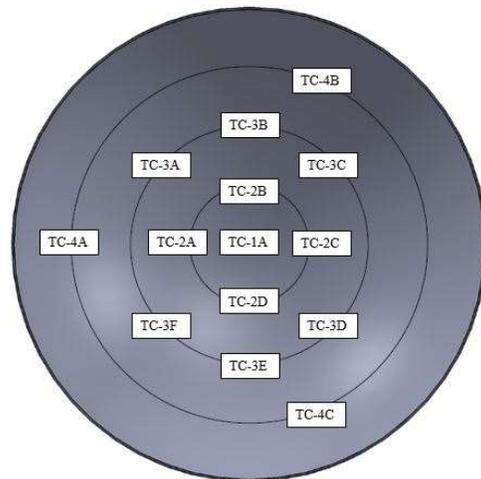
Dapat dilihat pada Gambar 6 dari program LabVIEW, terdapat gambar simulasi dari *semi-spherical plenum* yang telah terpasang *display* pembacaan suhu dari 14 titik termokopel. Terdapat juga *display* pembacaan suhu pada *heater* dan *display* dari grafik suhu terhadap waktu.

Diagram alat uji pada kajian ini ditunjukkan pada Gambar 7 berikut.



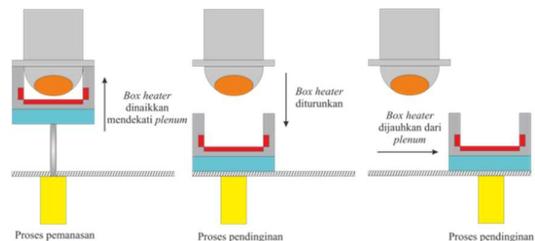
Gambar 7. Diagram alat uji.

Terdapat 14 titik termokopel yang terpasang pada *semi-spherical plenum*. Pada Gambar 8, ditunjukkan posisi dari 14 titik termokopel yang terpasang.



Gambar 8. Posisi 14 titik termokopel.

Eksperimen dilakukan dengan memanaskan *semi-spherical plenum* yang terpasang pada alat uji HeaTiNG-03, dengan menaikkan *heater* hingga mendekati *semi-spherical plenum* menggunakan *pneumatic cylinder*, kemudian daya *heater* diatur secara berkala menggunakan *regulator voltage*. Suhu yang digunakan sebagai matriks eksperimen yaitu 50°C, 100°C, 150°C, dan 200°C. Ketika suhu sudah tercapai, *heater* diturunkan, kemudian daya listrik dimatikan. Proses pemanasan ditunjukkan pada Gambar 9 berikut.



Gambar 9. Tahapan proses pemanasan.

Termokopel yang terpasang akan mengukur perubahan suhu pada *semi-spherical plenum* dan direkam dengan data akuisisi. Hasil perekaman suhu akan terkirim ke komputer, kemudian data tersebut dianalisis lebih lanjut sebagai hasil pengambilan data. Data yang diperoleh merupakan data kondisi transien pada saat proses kenaikan dan penurunan suhu.

Teknik analisis data yang digunakan dalam kajian ini adalah dengan menggunakan metode statistik dan deskriptif. Data yang didapat akan disajikan dalam bentuk grafik, sehingga mudah untuk dipahami. Kemudian diambil kesimpulan dari data statistik yang ada secara deskriptif agar dapat diketahui dengan mudah. Setelah itu dilakukan analisis laju rugi kalor (*heat loss*) selama proses pemanasan dengan menghitung dengan Persamaan (1) sebagai berikut.

$$q_{total} = q_{in} + q_{loss} \quad (1)$$

Di mana kalor total sistem ( $q_{total}$ ), kalor yang diterima *plenum* ( $q_{in}$ ), dan rugi kalor ( $q_{loss}$ ) dalam satuan W. Sehingga untuk mendapatkan nilai rugi kalor, Persamaan (1) disesuaikan menjadi Persamaan (2) berikut.

$$q_{loss} = q_{total} - q_{in} \quad (2)$$

Kalor yang diterima *plenum*, dihitung menggunakan Persamaan (3) berikut [11].

$$q_{in} = m \cdot c_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3)$$

Di mana massa plenum ( $m$ ) dalam satuan kg, *specific heat capacity* ( $c_p$ ) dalam satuan J/kg°C, perubahan suhu ( $\Delta T$ ) dalam satuan °C, dan perubahan waktu ( $\Delta t$ ) dengan satuan s. Kalor keseluruhan merupakan daya yang dihasilkan oleh *heater* dari perkalian tegangan dalam  $V$  (volt) dan arus listrik dalam  $I$  (ampere), dihitung menggunakan Persamaan (4) berikut [12].

$$q_{total} = V \cdot I \quad (4)$$

Setelah laju rugi kalor diketahui dalam satuan Watt. Dilakukan perhitungan untuk mengetahui seberapa besar laju rugi kalor dibandingkan dengan daya total ( $q_{total}$ ) dalam bentuk persentase menggunakan Persamaan (5) sebagai berikut.

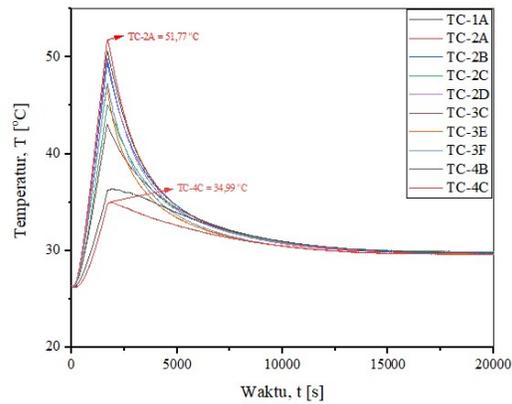
$$\%q_{loss} = \frac{q_{loss}}{q_{total}} \times 100\% \quad (5)$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

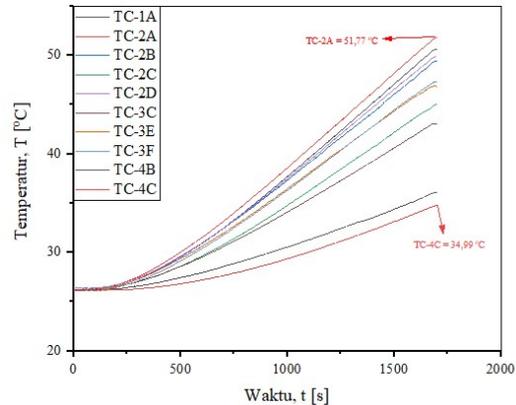
#### Distribusi Suhu

Data hasil yang diambil pada kajian ini mencapai 20000 detik. Data suhu hanya diambil pada 10 titik termokopel, dikarenakan terdapat 4 titik termokopel yang kurang baik dalam melakukan pembacaan suhu. Titik termokopel yang tidak diambil datanya yaitu TC-3A, TC-3B, TC-3D, dan TC-4A. Hasil grafik distribusi suhu terhadap waktu secara lengkap pada eksperimen 50°C diperlihatkan pada Gambar 10 berikut.

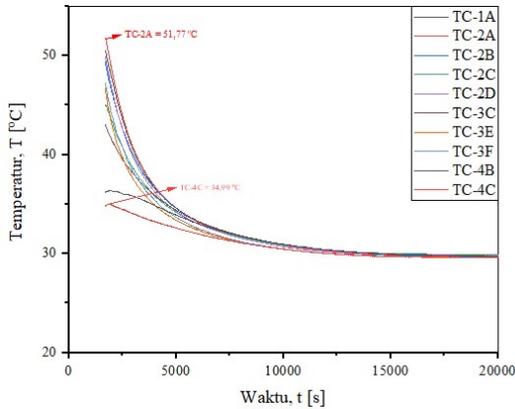
Terlihat suhu puncak tertinggi pada eksperimen 50°C terdapat pada TC-2A sebesar 51,77°C, hal ini dikarenakan TC-1A dan TC-2A sampai TC-2D memiliki posisi titik pada dasar *plenum*, dimana titik tersebut merupakan titik paling dekat dengan *heater*. Suhu terendah terdapat pada TC-4C sebesar 34,99°C. Hal ini dikarenakan titik TC-4C terletak pada bagian lengkungan atas *plenum* yang memiliki jarak paling jauh dari *heater*. Pada Gambar 11 dan Gambar 12, disajikan grafik distribusi kenaikan dan penurunan suhu secara lebih detail pada eksperimen 50°C secara berturut-turut. Distribusi kenaikan suhu pada eksperimen 50°C memiliki karakteristik yang sama pada setiap termokopel.



Gambar 10. Grafik distribusi suhu (set 50°C).



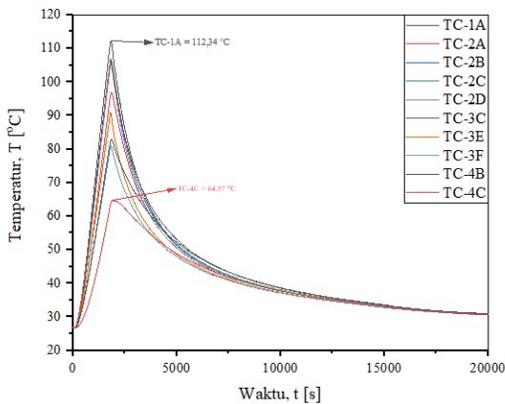
Gambar 11. Grafik distribusi kenaikan suhu (set 50°C).



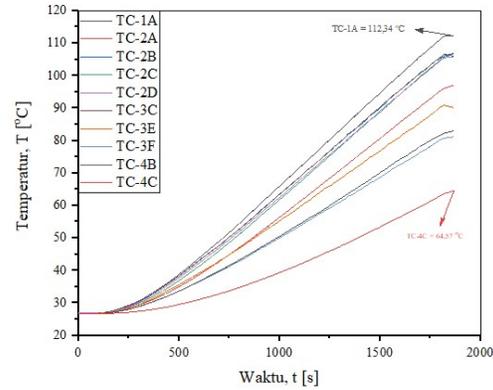
Gambar 12. Grafik distribusi penurunan suhu (set 50°C).

Distribusi penurunan juga memiliki karakteristik yang sama pada setiap termokopel. Namun, ketika waktu di atas 15000 detik, terjadi penurunan suhu secara konvergen pada setiap termokopel.

Hasil grafik distribusi suhu terhadap waktu secara lengkap pada eksperimen 100°C diperlihatkan pada Gambar 13. Suhu puncak tertinggi terdapat pada TC-1A sebesar 112,34°C, yang disebabkan oleh dekatnya posisi TC-1A dengan *heater*. Suhu puncak terendah terdapat pada TC-4C sebesar 64,57°C, yang disebabkan posisi TC-4A yang terjauh dari *heater*. Gambar 14 dan Gambar 15 menunjukkan grafik distribusi kenaikan dan penurunan suhu secara lebih detail. Pada distribusi kenaikan suhu, dapat dilihat karakteristik kenaikan yang sama pada setiap termokopel seperti pada eksperimen suhu 50°C. Distribusi penurunan suhu pada eksperimen 100°C memiliki karakteristik yang sama juga, dan ketika di atas 15000 detik terjadi distribusi penurunan suhu secara konvergen.

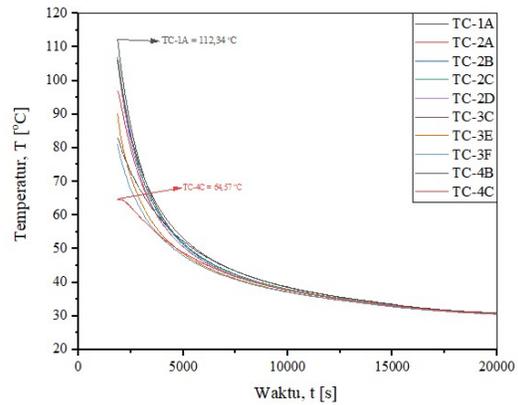


Gambar 13. Grafik distribusi suhu (set 100°C).

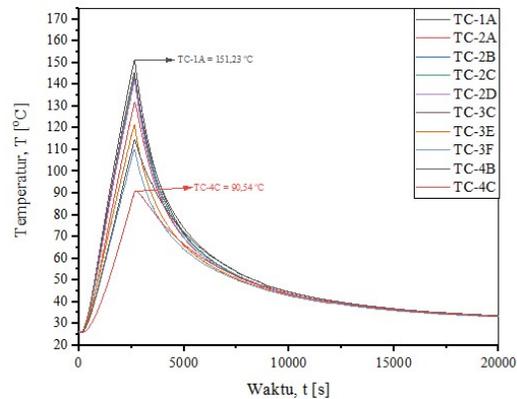


Gambar 14. Grafik distribusi kenaikan suhu (set 100°C).

Hasil grafik distribusi suhu terhadap waktu secara lengkap pada eksperimen 150°C diperlihatkan pada Gambar 16. Suhu puncak tertinggi pada TC-1A sebesar 151,23°C dan suhu puncak terendah terdapat pada TC-4C sebesar 90,54°C.



Gambar 15. Grafik distribusi penurunan suhu (set 100°C).



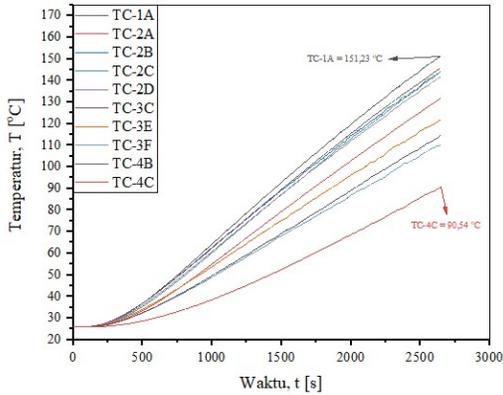
Gambar 16. Grafik distribusi suhu (set 150°C).

Grafik distribusi kenaikan suhu secara lebih detail pada eksperimen suhu 150°C disajikan pada Gambar 17. Kenaikan suhu yang terjadi pada eksperimen 150°C memiliki karakteristik yang sama. Pada grafik distribusi penurunan suhu juga memiliki karakteristik penurunan suhu yang sama dan ditunjukkan pada Gambar 18. Ketika distribusi penurunan suhu sampai

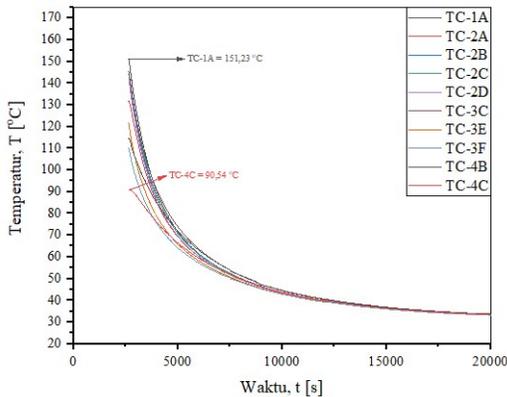
di detik 12500 ke atas, terjadi penurunan suhu secara konvergen pada setiap termokopel.

Hasil grafik distribusi suhu terhadap waktu secara lengkap pada eksperimen 200°C diperlihatkan pada Gambar 19. Suhu puncak tertinggi terdapat pada TC-1A sebesar 201,96°C dan suhu puncak terendah terdapat pada TC-4C sebesar 122,30°C.

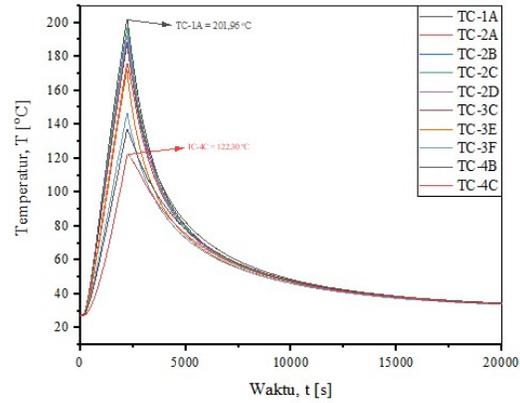
Gambar 20 dan Gambar 21 merupakan grafik distribusi kenaikan suhu dan penurunan suhu secara lebih detail. Distribusi kenaikan suhu dapat dilihat pada grafik di Gambar 22, bahwa karakteristik setiap termokopel memiliki kesamaan seperti pada eksperimen suhu 150°C. Dapat diketahui bahwa karakteristik setiap termokopel memiliki kesamaan dan pada waktu penurunan suhu di atas 12500 detik memiliki penurunan secara konvergen pada setiap termokopel seperti pada eksperimen suhu 150°C.



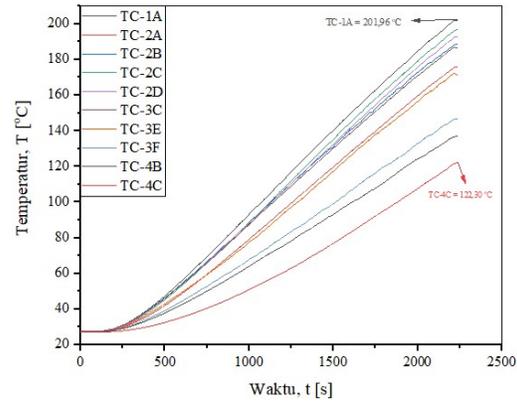
Gambar 17. Grafik distribusi kenaikan suhu (set 150°C).



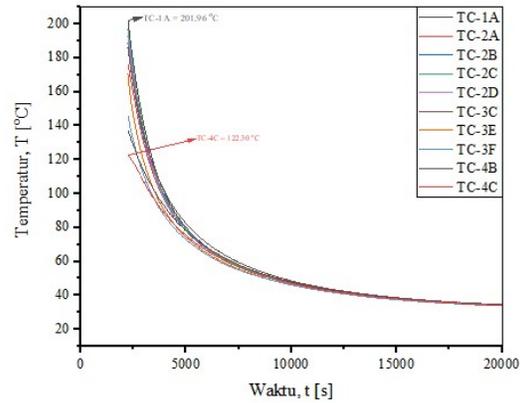
Gambar 18. Grafik distribusi penurunan suhu (set 150°C).



Gambar 19. Grafik distribusi suhu (set 200°C).



Gambar 20. Grafik distribusi kenaikan suhu (set 200°C).



Gambar 21. Grafik distribusi penurunan suhu (set 200°C).

**Analisis Laju Rugi Kalor**

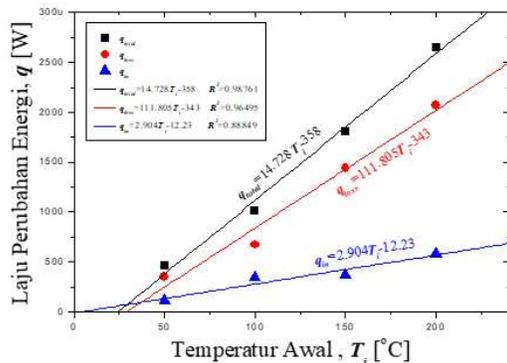
Analisis laju rugi kalor (*heat loss*) selama proses pemanasan pada suhu 50°C, 100°C, 150°C, dan 200°C menggunakan Persamaan (1)-(4) dalam perhitungannya.

Tabel 2 merupakan hasil dari laju rugi kalor pada eksperimen suhu 50°C, 100°C, 150°C, dan 200°C. Dapat diketahui dari hasil analisis laju rugi kalor bahwa setiap kenaikan *setting* suhu sebanding dengan kenaikan dari nilai laju rugi kalor.

**Tabel 2.** Laju rugi kalor pada eksperimen suhu 50°C, 100°C, 150°C, dan 200°C.

No.	Setting Suhu (°C)	Laju Rugi Kalor (W)
1	50	354,235
2	100	670,714
3	150	1442,303
4	200	2064,727

Pada Gambar 22, disajikan grafik laju rugi kalor terhadap suhu. Laju rugi kalor didapat dari hasil pengurangan antara daya total ( $q_{total}$ ) dan daya yang diterima heater ( $q_{in}$ ). Hal itu yang menyebabkan posisi garis  $q_{loss}$  pada grafik berada di antara garis  $q_{total}$  dan  $q_{in}$ .



**Gambar 22.** Grafik laju perubahan energi terhadap setting suhu awal.

Berdasarkan grafik pada Gambar 22, diperoleh hubungan linier antara laju perubahan energi terhadap perubahan setting suhu awal, sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 q_{total} &= 14,728 T_i - 358 & R^2 &= 0,98761 \\
 q_{loss} &= 11,805 T_i - 343 & R^2 &= 0,96495 \\
 q_{in} &= 2,904 T_i - 12,23 & R^2 &= 0,88849
 \end{aligned}$$

Persentase laju rugi kalor ( $\%q_{loss}$ ) pada eksperimen dengan suhu 50°C, 100°C, 150°C, dan 200°C yang dihitung menggunakan Persamaan (5) dalam perhitungannya.

Tabel 3 menunjukkan hasil persentase laju rugi kalor pada eksperimen suhu 50°C, 100°C, 150°C, dan 200°C.

**Tabel 3.** Persentase laju rugi kalor pada eksperimen suhu 50°C, 100°C, 150°C, dan 200°C.

No.	Setting Suhu (°C)	Persentase Laju Rugi Kalor (%)
1	50	77,01
2	100	66,15
3	150	79,77
4	200	77,91

Berdasarkan hasil persentase yang didapatkan, diketahui bahwa laju rugi kalor yang dihasilkan dari semua proses pemanasan di atas 50%.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan eksperimen analisis rugi kalor dengan setting suhu 50°C, 100°C, 150°C, dan 200°C, didapatkan hasil karakteristik kenaikan suhu ketika proses pemanasan dan karakteristik penurunan suhu ketika pendinginan menggunakan fluida udara. Pada proses pemanasan, karakteristik kenaikan suhu pada semua termokopel yang digunakan cenderung memiliki kesamaan. Pada proses pendinginan diperoleh karakteristik penurunan suhu yang sama juga pada semua titik bagian termokopel yang digunakan.

Diketahui dari analisis rugi kalor bahwa semakin tinggi setting suhu yang digunakan, maka semakin tinggi juga laju rugi kalor yang dihasilkan. Oleh karena itu, didapatkan laju rugi kalor tertinggi pada eksperimen 200°C sebesar 2064,727 watt. Sedangkan untuk laju rugi kalor terendah, terdapat pada eksperimen 50°C sebesar 354,235 watt. Pada hasil persentase laju rugi kalor didapatkan pada semua proses pemanasan menghasilkan laju rugi kalor di atas 50%.

#### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM) Gelombang 1 LPDP Mandatori KEMENKEU-BRIN periode 2022 – 2025 (3 tahun) dengan nomor kontrak: B-11/II.7.5/FR/6/2022 dan B-103/III.2/HK.04.03/7/2022 dengan judul penelitian utama: *Inovasi Teknologi Pendingin Pasif Berbasis Fluida Nanobubbles Dan Nanofluids pada Aspek Manajemen Termal untuk Peningkatan Keselamatan PLTN Tipe Besar dan SMR*. Terima kasih kami sampaikan kepada Kepala Pusat Riset dan Teknologi Reaktor Nuklir, Kepala Kelompok Riset Sistem Termofluida Reaktor Nuklir dan teman-teman Peneliti dan Pengembang Teknologi Nuklir atas diskusi teknis.

#### Daftar Pustaka

- [1] A. Pribadi, Hingga Juni Kapasitas Pembangkit di Indonesia 71 GW. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/hingga-juni-2020-kapasitas-pembangkit-di-indonesia-71-gw>, diakses 12 September 2023
- [2] S.R. Ani, Antisipasi Ancaman Pasokan Batu Bara. Arsip Publikasi Ilmiah Biro administrasi Akademik, [S.1]. : <http://research-report.umm.ac.id/index.php/API-BAA/article/view/13867/5259>, diakses 12 September 2023
- [3] Suryana D. Pengaruh temperatur/suhu terhadap tegangan yang dihasilkan panel surya jenis monokristalin (studi kasus: Baristand Industri

- Surabaya). Jurnal teknologi proses dan inovasi industri. 2016;1(2).
- [4] Afriandi A. Implementasi Water Cooling System Untuk Menurunkan Temperature Losses Pada Panel Surya: Tanjungpura University; 2017.
  - [5] Khan I, Tan D, Hassan ST, Bilal. Role of alternative and nuclear energy in stimulating environmental sustainability: impact of government expenditures. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(25):37894-905.
  - [6] Broughton JM, Kuan P, Petti DA, Tolman E. A scenario of the Three Mile Island unit 2 accident. *Nuclear Technology*. 1989;87(1):34-53.
  - [7] Cohen KS, Gusev I, Guskova A, Mettler FA. *Medical management of radiation accidents*: CRC Press; 2001.
  - [8] Pribadi KJ, Heru GB, Rosidi A, Juarsa M. Distribusi Temperatur Saat Pemanasan dan Pendinginan Permukaan Semi-Sphere HeaTING-03 Berdasarkan Temperatur Awal. *SIGMA EPSILON-Buletin Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir*. 2014;18(2).
  - [9] Mulya J, Efrizon U, Andhang WH. The Heat Flux Analysis in an Annulus Narrows Gap With Initial Temperature Variations Using HeaTING-01 Test Section. 2009.
  - [10] Juarsa M, Putra N, Septiadi WN, Antariksawan AR. Experimental study on the effect of gap size to CCFL and CHF in a vertical of narrow rectangular channel during quenching process. *Annals of Nuclear Energy*. 2014;72:391-400.
  - [11] Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. 2015, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*, Fifth Edition (5 ed.). New York: McGraw-Hill Education.
  - [12] Walker J, Resnick R, Halliday D. 2014 *Halliday and resnick fundamentals of physics*: Wiley.