

Optimasi isolasi sistem pemanas *water heating tank* pada untai rektangulir fasilitas simulasi sistem pasif (FASSIP- 04 VER.0)

Muhamad Repaldi^{1,a}, Dwi Yuliaji^{1,3,b}, Roy Waluyo^{1,3,c}, Mulya Juarsa^{1,2,d}, Ryan Oktaviandi^{1,3}, Katon Adhi Prayogo¹, Shendy Akbar M aryadi¹, Syahrul Aminudin¹, Akbar Farhan Maulana¹, Muhamad Andika Apriansyah¹, Randi Fahrian¹, Muhamad Bintang¹, Nur Rochman Budiyanto^{1,3}

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

²Badan Riset dan Inovasi Nasional, Tangerang selatan
PUSPITEK Setu, Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

Email

a) m.repaldi3709@gmail.com

b) dwi.yuliaji@uika-bogor.ac.id

c) roy.waluyo@gmail.com

d) mulya.juarsa@brin.go.id

ABSTRACT

Research on the Rectangular Loop Passive Cooling System Simulation Facility (FASSIP-04 Version 0) in the Water Heating Tank design is needed to obtain optimization results from the heating system insulation application. This study aims to obtain the temperature characteristics on the surface of the Water Heating Tank and obtain the value of thermal loss in conditions without insulators and with insulators. Thermal insulation is a method or process used to reduce the heat transfer rate. The analysis is carried out by calculating the amount of heat loss without using insulating material and insulation with a variable thickness of 10 mm, 20 mm, and 30 mm for the maximum temperature of the Water Heating Tank. From the results of the analysis of polyurethane heat absorbers on the water heating tank, the temperature of the heating chamber reached 80°C – 100 °C, as measured using a K-type thermocouple and polyurethane insulator. The results of heat loss analysis wasted on the condition of WHT without an insulator of 100.42 W. While for WHT that already uses a 10 mm insulator of 25.68 W, 20 mm of 10.67 W and 30 mm of 5.8 W. So, with the number of data acceptance is 0.99956 (99.956%) and adding of 30 mm thick insulation has reduced heat loss by 94.6%.

Keywords: FASSIP-04 Version 0, heat loss, insulator, rectangular loop, Water Heating Tank

Received 30 September 2023; **Presented** 5 Oktober 2023; **Publication** 27 Mei 2024

PENDAHULUAN

Kegiatan penelitian ini dilatarbelakangi oleh kejadian kecelakaan pada PLTN Fukushima Daiichi, Maret 2011 di Jepang. Berdasarkan kecelakaan reaktor nuklir tersebut, keselamatan dalam desain sebuah reaktor nuklir menjadi syarat mutlak dan penting diperhatikan serta di pertimbangkan. . Kecelakaan reaktor tersebut menunjukkan bahwa sangat diperlukan sistem keselamatan yang sifatnya pasif (*passive safety*) dan melekat (*inherent safety*). [1-2].

Berdasarkan dari kecelakaan tersebut, maka dibutuhkan suatu sistem keselamatan untuk menyelamatkan reaktor dari kecelakaan kebocoran reaktor akibat sistem pendingin gagal fungsi. Pengembangan sistem pendingin pasif

dapat digunakan sebagai upaya keselamatan pada sistem pendinginan reaktor nuklir. Sistem pendingin pasif memiliki kelebihan yaitu tidak membutuhkan pompa atau energi luar untuk membuat aliran dan hanya memanfaatkan siklus alam, sehingga kejadian seperti di Fukushima Daiichi, sistem pendingin akan terus bekerja meski listrik padam, alat penelitian sistem pendingin pasif (FASSIP 04 Ver 0.) merupakan fasilitas uji eksperimen sistem pendingin pasif untuk pengambilan panas sisa hasil peluruhan

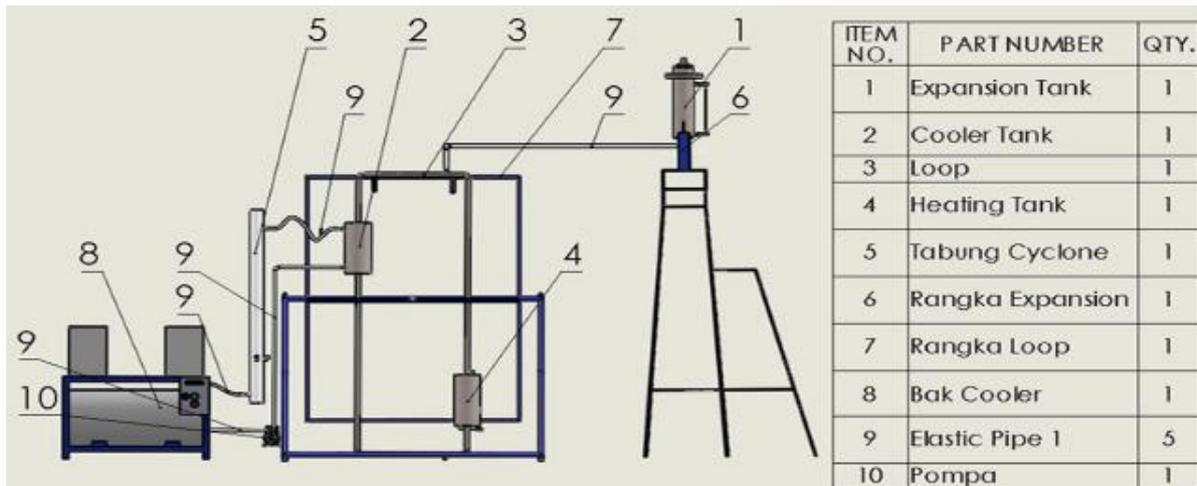
yang dihasilkan oleh teras reaktor selama kondisi kecelakaan. Untai uji FASSIP 04 Ver 0. adalah fasilitas penelitian sistem pendingin pasif yang menggunakan Water Heating Tank (WHT) sebagai

simulator reaktor dan menggunakan Water Cooling Tank (WCT) sebagai pengambil kalor. Alat ini merupakan model terbaru dari alat FASSIP 03 NC..

Optimasi isolasi sistem pemanas *water heating tank* ini dilakukan untuk memenuhi kebutuhan isolator termal pada tangki pemanas. Adanya isolator termal pada *water heating tank* akan memperkecil kerugian kalor (*heat loss*) kelingkuangan saat pengoperasian dan membuat kinerja *water heating tank* lebih optimal.

Teori

Untai Rektangular FASSIP 04 Ver 0 ini merupakan sebuah alat simulasi yang menyimulasikan reaktor dari PLTN dan menggunakan sistem sirkulasi alam pada alat ini. Sistem sirkulasi alam pada alat ini berada pada bagian loop tertutup yang berisikan air sebagai fluida kerjanya seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Untai Rektangular FASSIP 04 Ver 0.

Untai uji FASSIP04 Ver 0. digunakan untuk penelitian pendinginan sistem pasif pada teras reaktor tanpa menggunakan catu daya listrik, sehingga sirkulasi air yang terjadi diakibatkan karena adanya perbedaan densitasnya. WHT berfungsi untuk mensimulasikan teras reaktor sebagai pembangkit kalor, kalor yang dihasilkan mengakibatkan temperatur air meningkat. Densitasnya menjadi turun dan air akan mengalir ke atas menuju WCT. Selanjutnya WCT berfungsi mengambil kalor pada air sehingga temperatur air menurun dan berakibat densitas air naik, sehingga air akan mengalir ke bawah menuju ke WHT [4].

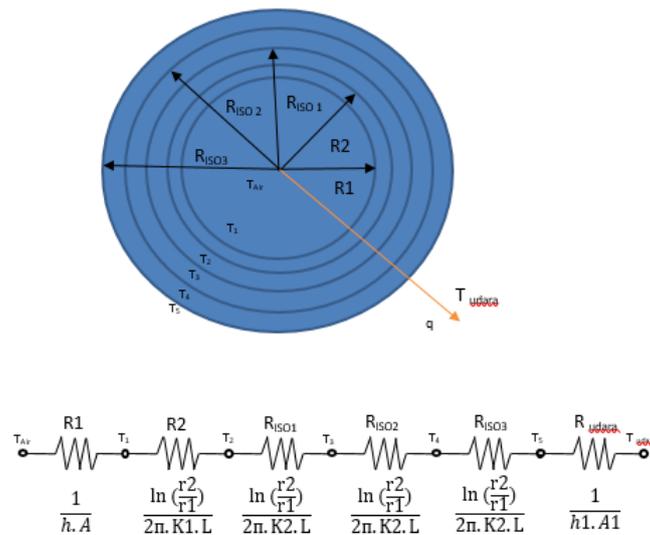
Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah proses berpindahnya energi kalor atau panas (*heat*) karena adanya perbedaan temperatur. Dimana, energi kalor akan berpindah dari temperatur media yang lebih tinggi ke temperatur media yang lebih rendah. . Proses terjadinya perpindahan panas dapat terjadi secara konduksi, konveksi, dan radiasi [3].

Perpindahan kalor secara konduksi adalah terjadinya perpindahan energi termal dari bagian yang bertemperatur tinggi ke bagian yang bertemperatur rendah dengan media penghantar panas tetap. Nilai konduktivitas material dipengaruhi juga oleh temperatur yang mengenai material tersebut. Sedangkan konveksi alami adalah kemampuan zat cair dan gas untuk memindahkan energi termal. Nilai konduktivitas termal dan konveksi alami beberapa material diperlihatkan pada Tabel 1.

Perhitungan perpindahan termal atau laju alir termal (*heat loss*) pada material menggunakan hukum Fourier tentang konduksi termal untuk menghitung aliran termal dalam sistem sederhana satu-dimensi. Pada material berbentuk silinder. Konsep tahanan termal dapat juga digunakan untuk pipa atau tabung yang dilapisi dengan isolator termal untuk mengurangi terjadi kehilangan kalor sepanjang pipa atau tabung tersebut[5]. Sistem tiga lapis diperlihatkan pada Gambar 2 di bawah ini berikut dengan analogi listriknya.

Tabel 1. Konduktivitas termal dan konveksi alami beberapa material [3]

Material	Konduktivitas termal (k) (W/m.°C)	Konveksi alami (h) (W/m ² .°C)
<i>Logam :</i>		
Polyurethane	0.022	
Baja SS	14	
<i>Non Logam :</i>		
Air	0.556	1000
Udara	0.024	6



Gambar 2 Aliran termal satu dimensi melalui penampang silinder dan analogi listriknya.

Berdasarkan Gambar 2 diatas laju alir energi termal (*heat loss*) dari air dengan daya maksimal (pengoperasian FASSIP 04 Ver.0) pada awalnya terjadi secara konveksi ke dinding dalam tabung pipa.

Resistensi adalah pengukuran kemampuan material untuk menahan perpindahan panas. Semakin banyak material yang mampu memblokir perpindahan panas melalui permukaannya, maka semakin besar ketahanan termalnya, berikut adalah persamanya.

$$R \text{ konveksi} = \frac{1}{h.A} \tag{1}$$

$$R \text{ konduksi} = \frac{\ln(\frac{r_2^2}{r_1^2})}{2\pi.K.L} \tag{2}$$

$$q = \frac{\Delta T}{R \text{ total}} \tag{3}$$

Keterangan:

- R = Resistensi (°C/W)
- q = Heat loss W/m
- T_{air} = Temperatur dinding dalam pipa (°C)

T_{udara} = Temperatur dinding terluar isolator termal (°C)

R_{air} = Resistensi air (°C/W)

R_{ss} = Resistensi Stainless Steel (°C/W)

R_{iso1} = Resistensi Isolator 10 mm (°C/W)

R_{iso2} = Resistensi isolator 20 mm (°C/W)

R_{iso3} = Resistensi isolato 30 mm (°C/W)

h_{udara} = Konveksi alami udara (W/m²°C)

h_{air} = Konveksi alami air (W/m²°C)

k = Konduktivitas material (W/m °C)

L = Panjang (m)

METODOLOGI PENELITIAN

1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam pemasangan isolasi pada *water heating tank* menggunakan bahan isolator *polyurethane*. dan lakban aluminium.

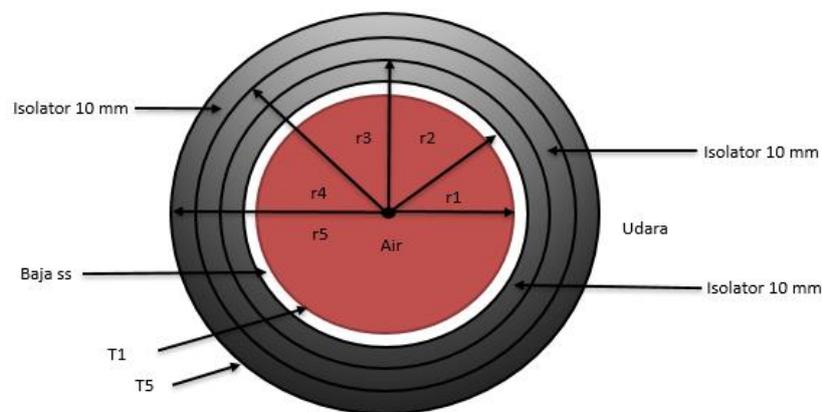
2. Alat

Peralatan yang digunakan dalam pengujian dan penelitian *isolasi water heating tank* diantaranya sebagai berikut :

1. *Water Heating Tank* pada alat FASSIP-04 Versi 0 merupakan alat eksperimen sebagai media ataupun sebagai alat yang akan diisolator.
2. *Termokopel* ini digunakan untuk mengukur temperature yang ada di dalam *Water Heating Tank* dan di setiap lapisan isolator.
3. Modul *NI-9213* berfungsi untuk merekam data arus ke *NI DAQ 9188* untuk pembacaan di computer.

4. *NI Chassis cDAQ 9188* berfungsi mengontrol dan melakukan pembacaan pada modul- modul *NI* lainnya.
5. Komputer berfungsi sebagai alat untuk menampilkan data-data yang telah di rekam oleh modul *NI*.

Tahapan pertama yang dilakukan dalam penelitian untuk menentukan ketebalan isolator termal pada *water heating tank* adalah membuat gambar bagan penampang isolator pada *water heating tank FASSIP 04 Ver.0* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Penampang isolator pada WHT FASSIP 04 Ver.0

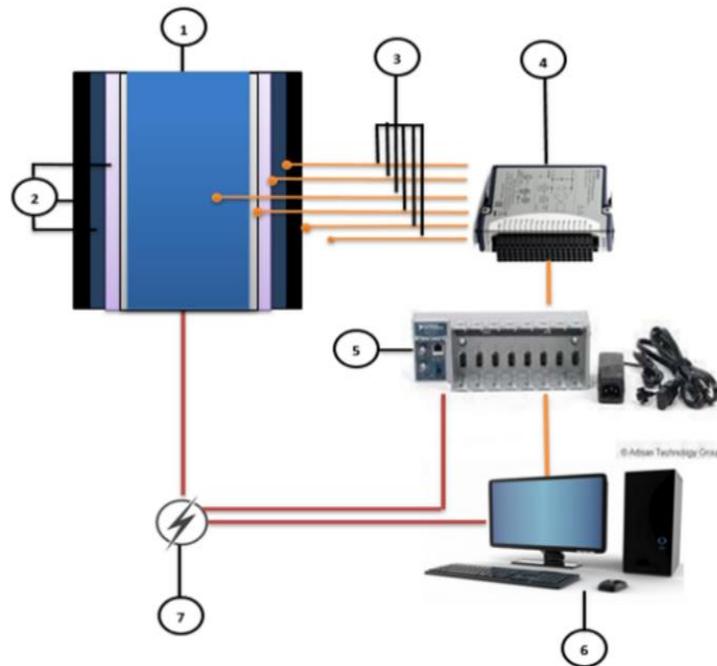
Tahapan selanjutnya adalah Pengambilan data-data yang diperlukan untuk menghitung *heat loss* berdasarkan desain dengan pemakaian isolator termal yang telah ditentukan. Isolator termal terluar ditetapkan menggunakan isolator *Polyurethane* ketebalan 10 mm. Isolator kedua ketebalan 10 mm. Isolator ketiga ketebalan 10 mm. Dengan demikian data jari-jari, konduktivitas termal dan konveksi alami material dapat diketahui sehingga dapat digunakan untuk melakukan perhitungan *heat loss* dengan menggunakan Persamaan (3). Perhitungan dilakukan dengan menggunakan *software Excel*, lalu hasil dari perhitungan yang telah di dapat disajikan menjadi gerapik menggunakan *software Origin*.

Pengujian temperatur pada WHT tanpa menggunakan isolator dan menggunakan isolator dengan ketebalan 1, ketebalan 2, dan ketebalan 3 dengan daya yang digunakan 1500 watt, menggunakan termokopel dan *software LabView* untuk merekam temperature dengan lama waktu 100 menit..

Pengambilan data dengan menggunakan daya 1500 watt pada heater selama 100 menit. Sehingga dari hasil pengujian WHT tanpa isolator, temperatur maksimal di dalam WHT dapat mencapai 97,13 °C dan temperatur dinding luar WHT mencapai 88,86 °C dengan waktu yang di butuh mencapai 3750 detik, sedangkan temperatur temperatur maksimal di dalam WHT setelah menggunakan isolator ketebalan 10 mm mencapai 99,14 °C dan temperatur dinding isolator Mencapai 73,39 °C dengan waktu yang di butuhkan 3500 detik, jadi untuk penggunaan isolator ketebalan 10 mm pada WHT dengan daya 1500 watt dapat menghasilkan temperatur lebih tinggi dibandingkan WHT tanpa menggunakan isolator, dan untuk perbandingan temperatur di dalam WHT Dan di permukaan isolator lebih besar di dibandingkan tanpa menggunakan isolator.

Pengambilan data dengan menggunakan daya 1500 watt pada heater selama 100 menit. Sehingga dari hasil pengujian WHT menggunakan isolator ketebalan 2 dan ketebalan 3, temperatur rata-rata maksimal

di dalam WHT dengan ketebalan 2 dapat mencapai $99,15^{\circ}\text{C}$ dan temperatur rata-rata dinding luar WHT Mencapai $50,41^{\circ}\text{C}$ dengan waktu yang di butuh mencapai 3420 detik, sedangkan temperatur di dalam WHT mencapai $99,17^{\circ}\text{C}$ permukaan isolator ketebalan 3 mencapai $41,02^{\circ}$ dengan waktu yang di butuh mencapai 2585 detik. untuk penggunaan isolator ketebalan 3 pada WHT dengan daya 1500 whatt dapat meredam temperatur lebih baik dibandingkan menggunakan isolator ketebalan 2.



Gambar 4. Skema Pengujian

Keterangan :

1. Water Heating Tank
2. Isolator Polyurethane
3. Termokopel
4. Modul NI-9213
5. NI Chassis cDAQ 9188
6. Komputer
7. Listrik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang digunakan dalam perhitungan ketebalan isolator termal pada Water heating tank ditunjukkan pada Tabel 2.

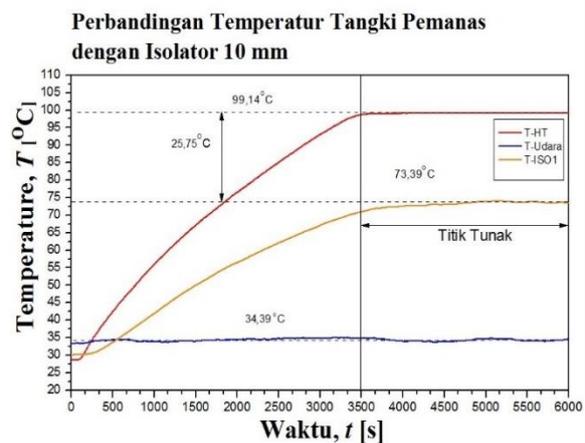
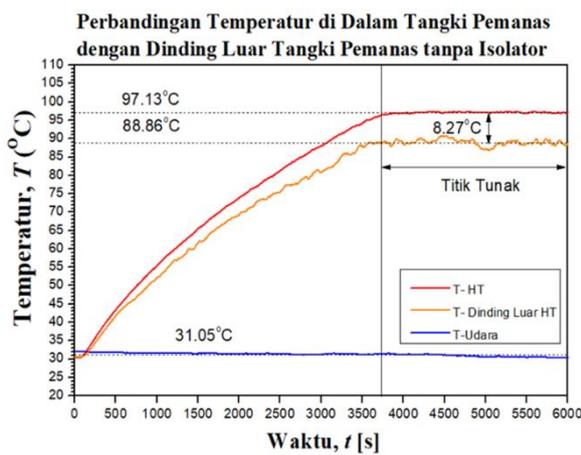
Tabel 2. Data untuk perhitungan penentuan laju alir energi termal pada water heating tank

Simbol	Nilai
h	$1000 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
h_1	$6 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
r_1	$0,082 \text{ m}$
r_2	$0,090 \text{ m}$
r_3	$0,10 \text{ m}$
r_4	$0,11 \text{ m}$
r_5	$0,12 \text{ m}$

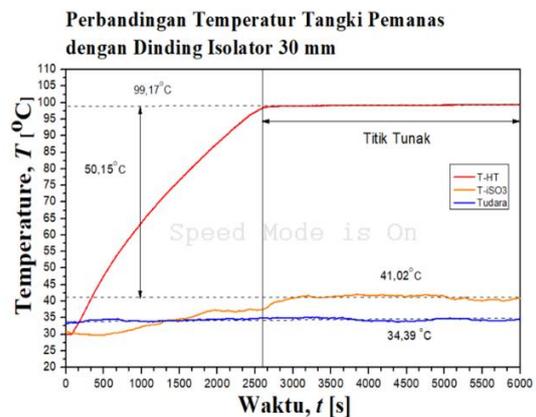
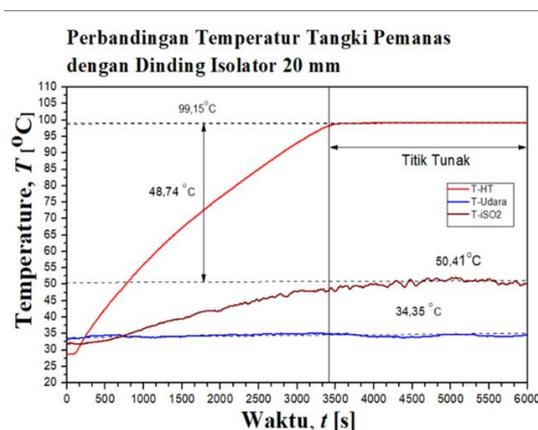
Simbol	Nilai
K_1	0,556 W/m°C
K_2	14 W/m°C
K_3	0,022 W/m°C
L	0,41 m
R_{AIR}	0,0047 °C/W
R_{SS}	0,0023 °C/W
R_{ISO1}	1,86 °C/W
R_{ISO2}	5,41 °C/W
R_{ISO3}	10,5 °C/W
R_{udara}	0,64 °C/W

Tabel 1 Hasil pengujian temperatur WHT

Variasi	T_a WHT	T_{∞} WHT	T_{Udara}	Waktu
Tanpa isolasi	97,13 °C	88,86 °C	31,05 °C	100 Menit
Ketebalan 1	99,14 °C	73,39 °C	34,39 °C	
Ketebalan 2	99,15 °C	50,41 °C	34,35 °C	
Ketebalan 3	99,17 °C	41,20 °C	34,39 °C	



Gambar 5. Grafik perbandingan temperature di dalam dan di luar dinding WHT tanpa isolator dan dengan isolator 10 mm



Gambar 6. Grafik perbandingan temperature WHT dan permukaan isolator ketebalan 20 mm

Tabel 4. Laju perpindahan panas

Variasi	T _a WHT	T _∞ HT	T _{Udara}	T _I -T _∞	q (W)
Tanpa isolator	97,13 °C	88,86 °C	31,5 °C	66,09 °C	100,42 W
Isolator 1	99,14 °C	73,96 °C	34,39 °C	64,75 °C	25,68 W
Isolator 2	99,15 °C	50,41 °C	34,35 °C	64,8 °C	10,72 W
Isolator 3	99,17 °C	41,02 °C	34,39 °C	64,78 °C	5,80 W

Persamaan *q loss thermal* tanpa isolator

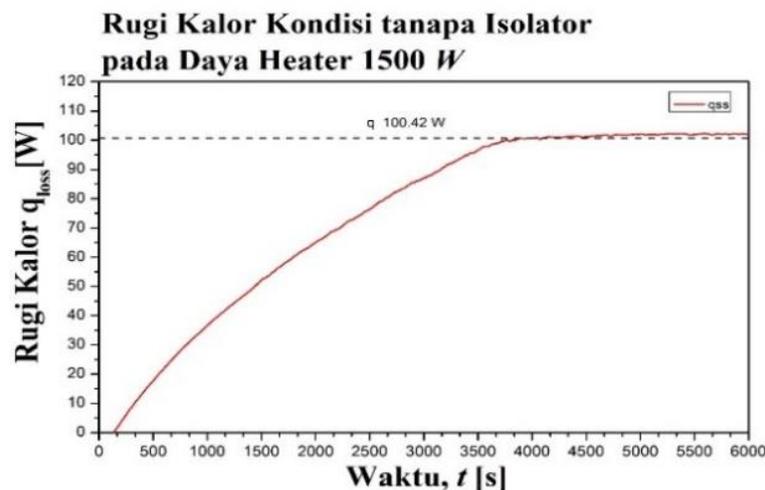
$$q = \frac{\Delta T}{R_{total}}$$

$$q = \frac{(T_a - T_u)}{R_{air} + R_{SS} + R_{udara}}$$

$$q = \frac{(97,13 - 31,04)}{0,0047 + 0,0023 + 0,65}$$

$$q = \frac{(66,09)}{0,66}$$

$$q = 100,42 W$$



Gambar 7. Grafik *loss thermal* kondisi tanpa isolator.

Dengan melakukan perhitungan didapatkan nilai laju perpindahan panas atau nilai q pada WHT tanpa menggunakan isolator di dapat temperatur 97,13 °, dan untuk *loss thermal* nya yaitu sebesar 100,42 W .

Persamaan *loss thermal* menggunakan isolator 10 mm.

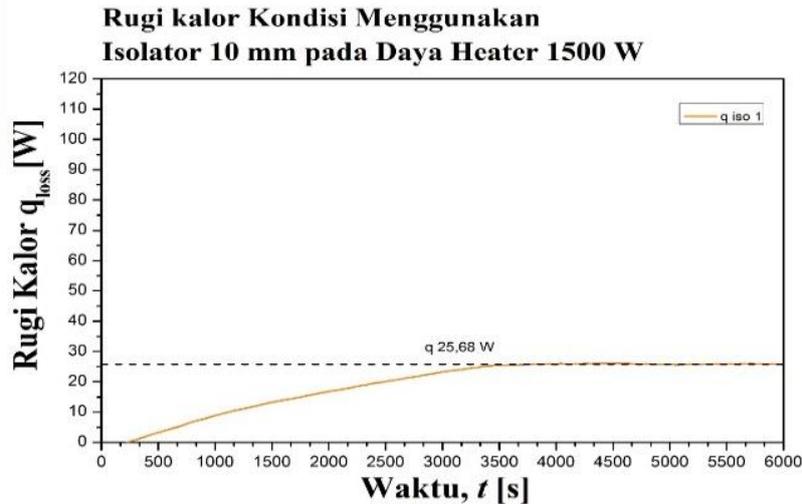
$$q = \frac{\Delta T}{R_{total}}$$

$$q = \frac{(T_a - T_u)}{R_{air} + R_{SS} + R_{iso1} + R_{udara}}$$

$$q = \frac{(99,14 - 34,39)}{0,0047 + 0,0023 + 1,86 + 0,64}$$

$$q = \frac{(64,75)}{2,25}$$

$$q = 25,68 W$$



Gambar 8. Grafik loss thermal kondisi menggunakan isolator 10 mm.

Dengan melakukan perhitungan didapatkan nilai laju perpindahan panas atau nilai q pada WHT dengan menggunakan isolator 10 mm di dapat temperature $99,14\text{ }^{\circ}\text{C}$, dan untuk *loos thermal* nya yaitu sebesar $25,68\text{ W}$.

Persamaan *loss thermal* menggunakan isolator 20 mm.

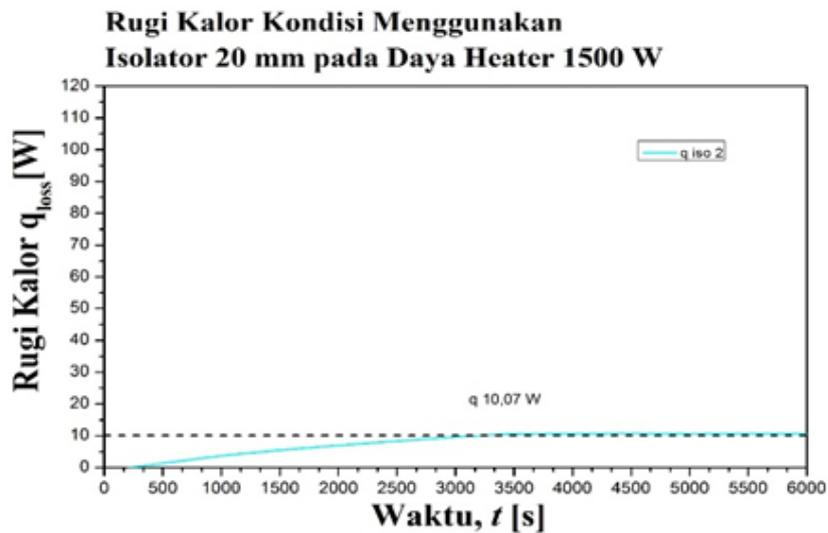
$$q = \frac{\Delta T}{R_{total}}$$

$$q = \frac{(T_a - T_u)}{R_{air} + R_{ss} + R_{iso2} + R_{udara}}$$

$$q = \frac{(99,15 - 34,35)}{0,0047 + 0,0023 + 5,41 + 0,64}$$

$$q = \frac{(64,8)}{6,0}$$

$$q = 10,07\text{ W}$$



Gambar 9 Grafik *heat loss* kondisi menggunakan isolator 20 mm.

Dengan melakukan perhitungan didapatkan nilai laju perpindahan panas atau nilai q pada WHT dengan menggunakan isolator 20 mm di dapat temperature 99,15 °C, dan untuk *loos thermal* yaitu sebesar 10,07 W.

Persamaan *loss thermal* menggunakan isolator 30 mm

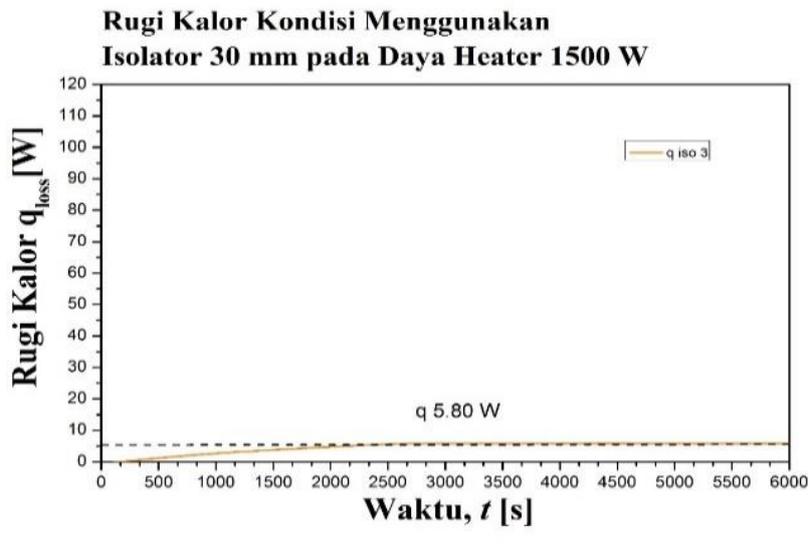
$$q = \frac{\Delta T}{R_{total}}$$

$$q = \frac{(T_a - T_u)}{R_{air} + R_{ss} + R_{iso3} + udara}$$

$$q = \frac{(99,17 - 34,39)}{0,0047 + 0,0023 + 10,5 + 0,64}$$

$$q = \frac{(64,78)}{11,2}$$

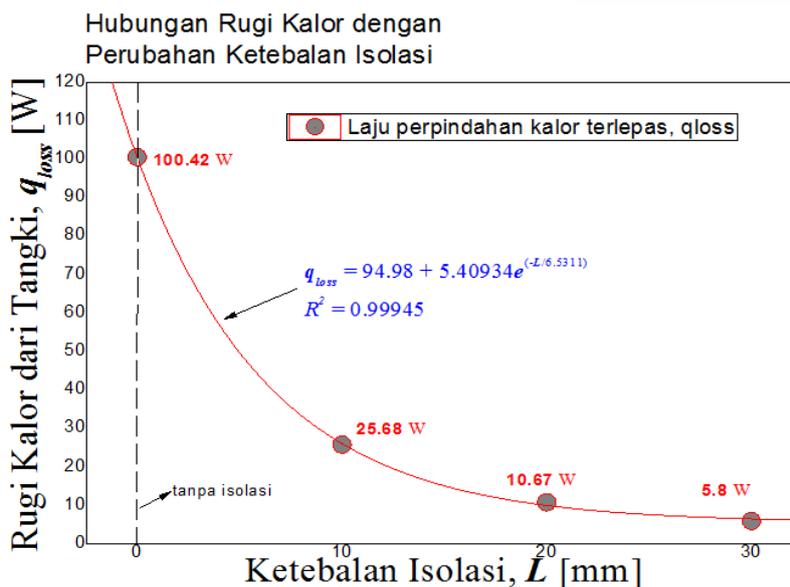
$$q = 5,80 W$$



Gambar 10. Grafik *heat loss* kondisi menggunakan isolator 30 mm.

Dengan melakukan perhitungan didapatkan nilai laju perpindahan panas atau nilai q pada WHT dengan menggunakan isolator 30 mm di

dapat temperature 99,17 °C, dan untuk *loos thermal* nya yaitu sebesar 5,80 W.



Gambar 11. Grafik hubungan *heat loss* terhadap ketebalan isolasi

Berdasarkan Gambar 9., terlihat hubungan nilai perubahan rugi kalor terhadap ketebalan isolasi tangki pemanas ditunjukkan dengan korelasi non-liner,

berupa persamaan eksponensial hasil dari fitting data perhitungan rugi kalor. Adapun persamaannya, adalah:

$q_{loss} = 94.98 + 5.4093e^{\left(\frac{-L}{6.5311}\right)}$ dengan tingkat penerimaan data R^2 sebesar 0.99956 (99,956%). Penambahan isolasi setebal 30 mm telah mengurangi rugi kalor sebesar 94.6%.

KESIMPULAN

1. Temperatur maksimal yang di hasilkan WHT sebelum menggunakan isolator *Polyurethane* mencapai 97, 13°C dengan lama waktu yang di butuhkan 3750 detik untuk mencapai titik tunak. Sedangkan untuk temperatur maksimal WHT yang sudah menggunakan isolator ketebalan 30 mm mencapai 99,15 °C dengan lama waktu yang di butuhkan 2585 detik untuk mencapai titik tunak dengan daya maksimal 1500 W.
2. Dari hasil perhitungan q kalor yang terbuang pada kondisi WHT tanpa isolator sebesar 100,42 W. Sedangkan untuk WHT yang sudah menggunakan isolator 10 mm 25,68 W, 20 mm 10,67 W dan 30 mm sebesar 5,8 W. Jadi dengan tingkat penerimaan data R^2 (WHT tanpa isolator) = 0.99956 (99,956%). Penambahan isolasi setebal 30 mm telah mengurangi rugi kalor sebesar 94.6%.

UCAPAN TERIMAKASIH

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.

DAFTAR PUSATAKA

- [1] Arindya, R., 2019, Studi Keselamatan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir, Seminar Nasional sinergi (Energi dan Teknologi), Jurnal Unisma Bekasi, 17-23.
- [2] Riupassa, R. D., Basar, K., & Waris, A. (2020). Pemodelan Sirkulasi Alamiah Bahan Pendingin pada Reaktor Nuklir dengan Variasi Perbedaan Temperatur Pemanas dan Pendingin. Jurnal Fisika, ISBN:978-602-61045-6-4, 133-134.

- [3] Holma, J.P, (2010). *Heat Transfer*. sixth edition, McGraw Hill, td., New York 1986. 3
- [4] M. J., Antariksawan, A. R., Kusuma, M. H., Haryanto, D., & Putra, N. (2017). 2nd international Tropical Renewable Energy Conference (i-TREC). *Estimation of natural circulation flow based on temperature in the FASSIP-02 large-scale test loop facility*, 3. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/105/1/012091>
- [5] Haryanto, D., Rosidin, A., Juarsa, M., Widodo, S., (2023). Desain Isolator Termal pada Hotleg dan Coldleg FASSIP-02 Mod.01. Tangerang Selatan Banten, 72-73.