

PERHITUNGAN DESAIN KETEBALAN ISOLATOR TERMAL PADA WATER HEATING TANK FASSIP-02 MOD.01

DEDY HARYANTO¹, AINUR ROSIDI¹, MULYA JUARSA¹, SURIP WIDODO¹

¹Tenaga Nuklir-Pusat Riset dan Teknologi Reaktor Nuklir-BRIN
Kawasan Sain dan Teknologi BJ Habibie, Tangerang Selatan, Banten

*email: dedy004@brin.go.id

Diserahkan: 03/04/2023

Diterima: 02/05/2023

Dipublikasikan: 11/08/2023

Abstrak. Fasilitas Simulasi Sistem Pendingin Pasif-02 (FASSIP-02) Mod. 01 merupakan salah satu fasilitas penelitian untuk mempelajari pendinginan reaktor sistem pasif. Latar belakang penelitian ini dilakukan adalah terjadinya kejadian *station blackout* (SBO) pada PLTN Fukushima Daiichi pada Maret 2011 di Jepang yang berakibat terjadinya kecelakaan nuklir. Salah satu komponen pada FASSIP-02 Mod.01 adalah *Water Heating Tank* (WHT) yang berfungsi sebagai simulator reaktor dalam pembangkitan kalor. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan ketebalan isolator termal pada WHT sehingga dapat memperkecil *heat loss*. Tahapan yang dilakukan adalah menentukan beberapa isolator termal dan menjadikan konduktivitasnya sebagai salah satu data untuk perhitungan. Selanjutnya membuat *flow-chart* untuk melakukan perhitungan menggunakan *software* Matlab, membuat pemrograman pada Matlab serta menjalankan pemrograman tersebut dan melakukan analisis hasil perhitungan dan menentukan jenis isolator termal yang akan digunakan di WHT. Berdasarkan hasil perhitungan isolator termal yang dipilih adalah isolator termal berbahan silika aerogel dengan ketebalan 60-150 mm yang mengakibatkan *heat loss* maksimal sebesar 50 W/m.

Kata Kunci: FASSIP-02 Mod. 01, isolator termal, *Water Heating Tank*, silika aerogel, *heat loss*

Abstract. Passive Cooling System Simulation Facility-02 (FASSIP-02) Mod. 01 is one of the research facilities to study passive system reactor cooling. The background of this research is the occurrence of station blackout (SBO) at the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011 in Japan which resulted in a nuclear accident. One of the components in FASSIP-02 Mod.01 is the Water Heating Tank (WHT) which functions as a reactor simulator in heat generation. This study aims to determine the thickness of the thermal insulator on the WHT so as to minimize heat loss. The steps taken are to determine several thermal insulators and make their conductivity as one of the data for calculations. Next, make a flow-chart to perform calculations using Matlab software, make programming in Matlab and run the program and analyze the calculation results and determine the type of thermal insulator to be used in WHT. Based on the calculation results, the selected thermal insulator is a thermal insulator made of silica aerogel with a thickness of 60-150 mm which results in a maximum heat loss of 50 W/m.

Keywords: FASSIP-02 Mod. 01, thermal insulator, Water Heating Tank, silica aerogel, heat loss

1. Pendahuluan

Kegiatan penelitian yang akan dilakukan dilatarbelakangi oleh kejadian kecelakaan pada PLTN Fukushima Daiichi, Maret 2011 di Jepang. Berdasarkan kecelakaan reaktor nuklir tersebut, sistem pendinginan pasif pada instalasi nuklir harus dapat digunakan untuk membantu melakukan proses pembuangan panas sisa hasil peluruhan yang terjadi secara

terus menerus pada saat sistem pendinginan aktif tidak berfungsi akibat terjadinya *station blackout* berkepanjangan maupun pada kondisi operasi normal. Sehingga pemanfaatan sistem pendingin pasif pada sistem pengambilan kalor pada teras reaktor sebagai sistem keselamatan bantu ketika terjadi kecelakaan menjadi salah satu pilihan [1-2].

Untai uji Fasilitas Simulasi Sistem Pasif (FASSIP) merupakan fasilitas uji eksperimen sistem pendingin pasif untuk pengambilan panas sisa hasil peluruhan yang dihasilkan oleh teras reaktor selama kondisi kecelakaan [3-6]. Beberapa fasilitas uji simulasi telah dibuat oleh Pusat Riset dan Teknologi Reaktor Nuklir untuk melakukan penelitian tentang pendinginan pasif. Fasilitas-fasilitas tersebut adalah fasilitas uji FASSIP-01 kemudian dikembangkan dengan membangun fasilitas uji FASSIP-02 dan dilanjutkan dengan FASSIP-02 Mod.1. Untai uji FASSIP-02 mod.1 adalah fasilitas penelitian sistem pendingin pasif berskala besar yang menggunakan *Water Heating Tank* sebagai simulator reaktor dan menggunakan sebagai pengambil kalor pada *Water Cooling Tank*. Komponen pada Untai uji FASSIP-02 Mod.01 terdiri dari *Water Heating Tank* (WHT) kontak langsung, pemipaan, *Expansion Tank* (ET) dan *Water Cooling Tank* (WCT) yang dilengkapi dengan *Heat Exchanger* dan komponen *Heat Pipe*. Adanya penambahan *Heat Pipe* pada untaian uji FASSIP-02 Mod.01 merupakan pengembangan dari untaian uji FASSIP-02. Untai uji FASSIP-02 mod.1 digunakan untuk penelitian pendinginan sistem pasif pada teras reaktor tanpa menggunakan catu daya listrik, sehingga sirkulasi air yang terjadi diakibatkan karena adanya perbedaan densitasnya. *Water Heating Tank* 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 *Water Cooling Tank*. Selanjutnya *Water Cooling Tank* berfungsi mengambil kalor pada air sehingga temperatur air menurun dan berakibat densitas air naik, sehingga air akan mengalir ke bawah menuju ke *Water Heating Tank* [7]. Kegiatan penelitian pada untaian uji FASSIP-02 Mod. 01 telah dilakukan dan data hasil penelitian tersebut sudah terekam dan tersimpan di Data Akuisisi Sistem (DAS). Penelitian yang telah dilakukan dengan kondisi untaian uji FASSIP-02 Mod. 01 tanpa dilengkapi isolator termal pada komponen-komponennya dan pemipaannya sehingga untuk penelitian selanjutnya untaian uji FASSIP-02 Mod.01 perlu dilengkapi dengan isolator termal.

Pada kegiatan penelitian ini dilakukan untuk mendisain kebutuhan isolator termal pada WHT, dimana WHT sebagai simulator teras reaktor berfungsi untuk menaikkan temperatur fluida kerja. Untuk memperkecil kerugian kalor (*heat loss*) kelingkungan saat pengoperasian, maka WHT perlu dilengkapi dengan isolator termal. Perhitungan dilakukan menggunakan *software* Matlab dan hasil perhitungan ditampilkan dalam grafik. Sedangkan data dimensi WHT diperoleh dari dokumen desain FASSIP-02 Mod.01.

2. Teori

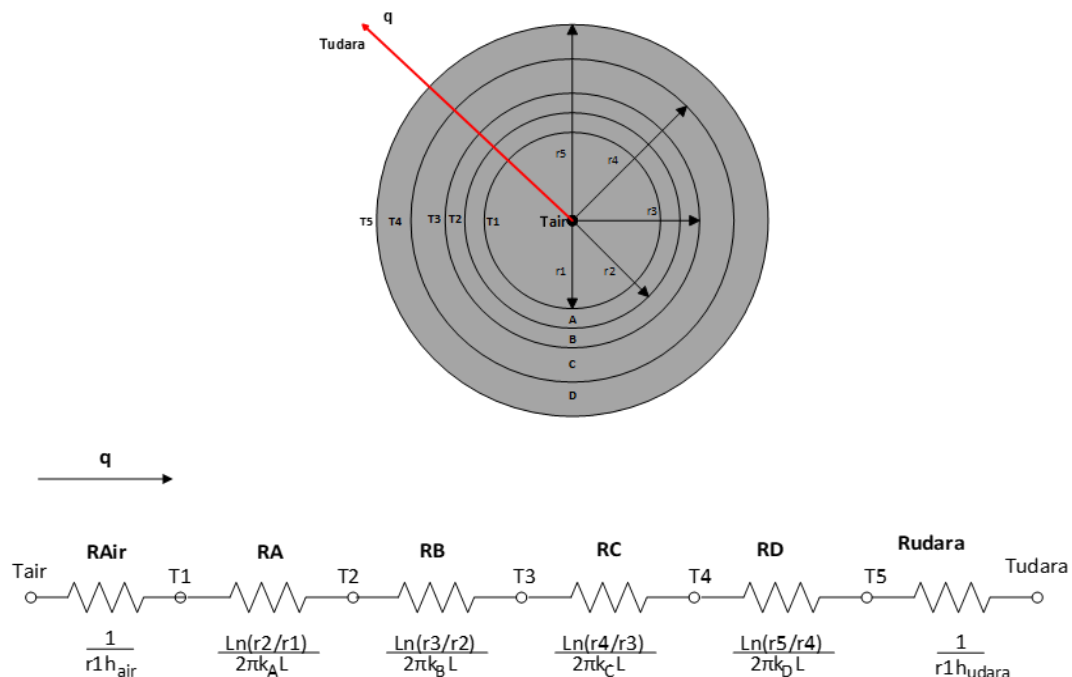
Perpindahan kalor secara konduksi adalah terjadinya perpindahan energi termal dari bagian yang bertemperatur tinggi ke bagian yang bertemperatur rendah pada zat padat. Kemampuan berpindahnya energi termal tersebut dipengaruhi oleh kemampuan dari material dari zat padat tersebut. Kemampuan zat padat untuk memindahkan energi termal disebut konduktivitas termal, dengan demikian konduktivitas dari material yang berbeda tidak sama. Semakin tinggi nilai konduktivitas material maka material tersebut semakin mudah untuk menghantarkan energi termal sehingga material tersebut disebut konduktor. Sebaliknya semakin rendah nilai konduktivitas material, maka material tersebut semakin buruk dalam menghantarkan energi termal dan material tersebut adalah isolator. Nilai konduktivitas material dipengaruhi juga oleh temperatur yang mengenai material tersebut. Semakin tinggi temperaturnya maka nilai konduktivitas material akan naik dan material

akan lebih mudah menghantarkan energi termal. 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 dibawah ini.

Tabel 1. Konduktivitas termal dan konveksi alami beberapa material [8]

Material	Konduktivitas termal (k) (W/m °C)	Konveksi alami (h) (W/m ² °C)
<i>Logam</i>		
Aluminium murni	204	
Baja karbon	54	
Baja krom	15,1	
Tembaga murni	386	
<i>Non logam</i>		
Asbes lembaran	0,166	
Karton gelombang	0,064	
Glass Wool	0,038	
Rock Wool	0,040	
Kapuk	0,035	
Silika Aerogel	0,024	
Kayu Balsa	0,055	
Air		1000
Udara		6

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.



Gambar 1. Aliran termal satu dimensi melalui penampang silinder dan analogi listriknya

Pada material berbentuk silinder, dapat diandaikan aliran laju termal berlangsung menurut arah radial. Sehingga koordinat ruang yang diperlukan untuk menentukan sistem tersebut hanyalah jari-jari silinder (r). Konsep tahanan termal dapat juga digunakan untuk pipa atau tabung yang dilapisi dengan beberapa material isolator termal untuk mengurangi terjadi kehilangan kalor sepanjang pipa atau tabung tersebut. Sistem empat lapis dengan analogi listriknya diperlihatkan pada Gambar 1.

Berdasarkan Gambar 1 diatas laju alir energi termal (*heat loss*) dari air dengan temperatur 90° (*setting* temperatur pengoperasian WHT) pada awalnya terjadi secara konveksi ke dinding dalam tabung WHT. Mulai dari dinding dalam WHT sampai dengan dinding luar isolator Aluminium laju alir energi termal terjadi secara konduksi. Selanjutnya di udara lingkungan laju alir energi termal terjadi secara konveksi. Sehingga untuk menghitung *heat loss* yang terjadi pada WHT dilakukan menggunakan Persamaan (1) [8-9]:

$$\frac{q}{L} = \frac{2\pi(T_{Air} - T_{Udara})}{\frac{1}{r_1 h_{air}} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{k_A} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{k_B} + \frac{\ln(\frac{r_4}{r_3})}{k_C} + \frac{\ln(\frac{r_5}{r_4})}{k_D} + \frac{1}{r_5 h_{udara}}} \quad (1)$$

dengan,

q/L	=	Heat loss W/m
T_{Air}	=	Temperatur dinding dalam tabung ($^\circ\text{C}$)
T_{Udara}	=	Temperatur dinding terluar isolator termal ($^\circ\text{C}$)
r_1	=	Jari-jari dalam tabung (m)
r_2	=	Jari-jari luar tabung dengan material A(m)
r_3	=	Jari-jari luar Isolator material B (m)
r_4	=	Jari-jari luar isolator material C (m)
r_5	=	Jari-jari luar isolator material D (m)
k_A	=	Konduktivitas material A (W/m $^\circ\text{C}$)
k_B	=	Konduktivitas material B (W/m $^\circ\text{C}$)
k_C	=	Konduktivitas material C (W/m $^\circ\text{C}$)
k_D	=	Konduktivitas material D (W/m $^\circ\text{C}$)
h_{udara}	=	Konveksi alami udara (W/m ² $^\circ\text{C}$)
h_{air}	=	Konveksi alami air (W/m ² $^\circ\text{C}$)

Untuk mendapatkan ketebalan optimum pada isolator termal, maka ketebalan isolator termal tidak boleh kurang dari ketebalan kritis isolasi. Jika ketebalan isolator termal kurang dari ketebalan kritis maka *heat loss* meningkat sampai ketebalan isolator termal tepat ditebal kritisnya. Jika ketebalan isolator termal melebihi tebal kritisnya maka *heat loss* akan menurun secara eksponensial. Jari-jari kritis isolator termal dapat diketahui menggunakan Persamaan (2) [8-9]:

$$r_c = \frac{k_{iso}}{h_{ud}} \quad (2)$$

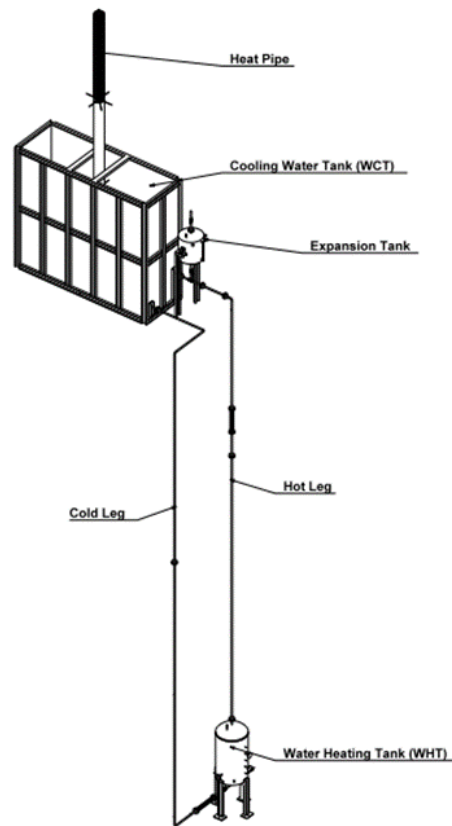
dengan,

r_c	=	Jari-jari kritis (m)
k_{iso}	=	Konduktivitas termal material (W/m $^\circ\text{C}$)
h_{ud}	=	Konveksi alami udara (W/m ² $^\circ\text{C}$)

3. Metodologi Penelitian

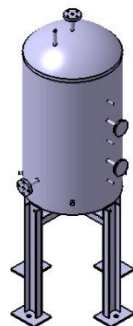
Untai FASSIP-02 Mod. 01. adalah fasilitas penelitian sirkulasi alamiah yang berfungsi sebagai sistem pendingin pasif pada instalasi reaktor nuklir. Fasilitas ini terdiri dari

beberapa komponen yang terhubung secara tertutup menggunakan pipa berdiameter 1 inchi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

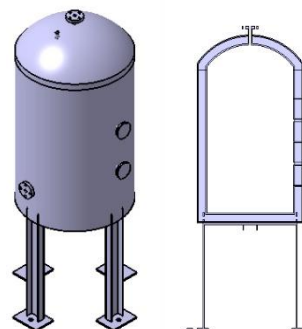


Gambar 2. Untai uji FASSIP-02 Mod.01

Salah satu komponen untai uji FASSIP-02 Mod.01 adalah WHT yang berfungsi untuk mensimulasikan teras reaktor sebagai pembangkit kalor. Komponen ini dilengkapi dengan pemanas listrik dengan daya total 20 kW. Penelitian dilakukan untuk menentukan desain ketebalan isolator termal yang akan dipasang pada WHT sehingga kerugian kalor kelingkungan dapat dikurangi serta keamanan saat pengoperasian untai FASSIP-02 Mod.01 lebih terjamin. Desain WHT yang belum dilengkapi dengan isolator dan yang telah dilengkapi dengan isolator serta gambar belahannya ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4 dibawah ini.

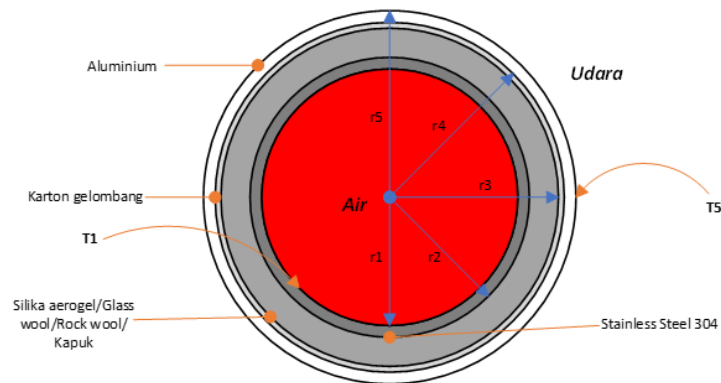


Gambar 3. WHT tanpa isolator termal



Gambar 4. WHT dengan isolator termal

Posisi pemanas listrik di WHT pada bagian bawah dan memanaskan air/fluida kerja secara langsung, sehingga terjadi *heat loss* ke arah lingkungan. Tahapan yang dilakukan dalam penelitian yang dilakukan dalam menentukan ketebalan isolator termal pada WHT yang pertama adalah membuat gambar bagan penampang isolator pada WHT FASSIP-02 seperti ditunjukkan pada Gambar 5 berikut ini.

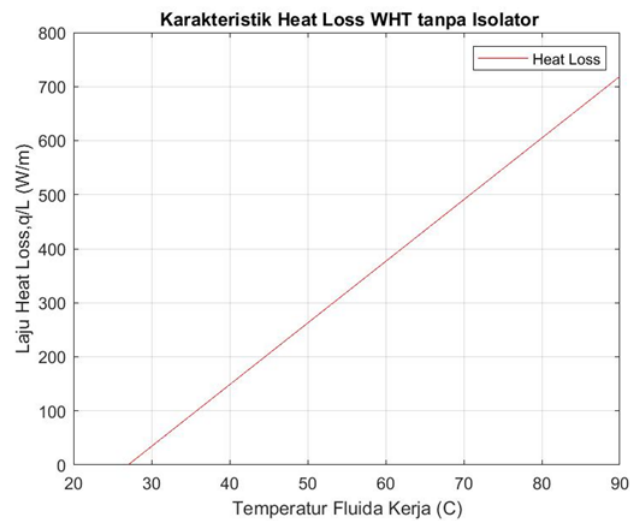


Gambar 5. Penampang isolator pada WHT FASSIP-02

Tahapan selanjutnya adalah melengkapi data-data yang diperlukan untuk menghitung *heat loss* berdasarkan desain dengan pemakaian isolator termal yg telah ditentukan. Isolator termal terluar ditetapkan menggunakan Aluminium dengan ketebalan 1 mm. Isolator kedua dari terluar adalah karton gelombang dengan ketebalan 5 mm. Isolator ketiga dibuat bervariasi dengan 4 pilihan yaitu *glass wool*, *rock wool*, kapuk dan silika aerogel dengan ketebalan bervariasi dari 0 mm sampai dengan 150 mm. Penentuan ketebalan maksimum sebesar 150 mm untuk memenuhi segi estetika dalam desain, sehingga dimensi total WHT tidak menjadi besar sekali. Dengan demikian data jari-jari, konduktivitas termal dan konveksi alami material dapat diketahui sehingga dapat digunakan untuk melakukan perhitungan *heat loss* dengan menggunakan Persamaan (1). Perhitungan dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab, sehingga Persamaan (1) harus diubah menjadi bahasa pemrograman Matlab. Pemilihan penggunaan *software* Matlab dilakukan karena dengan menggunakan *software* tersebut perhitungan yang berulang dengan data perhitungan yang banyak dapat lebih cepat dilakukan dan mendapatkan hasil perhitungan dalam bentuk grafik [10]. Analisis dilakukan berdasarkan hasil perhitungan yang sudah diperoleh berupa grafik sehingga pada akhirnya dapat ditarik kesimpulan dari hasil penelitian ini.

4. Hasil dan Pembahasan

Kondisi saat ini WHT untai FASSIP-02 Mod.01 masih belum dilengkapi dengan isolator termal, sehingga *heat loss* ke lingkungan besar dan efisiensi WHT menjadi turun. Hal ini terjadi karena fluida kerja yang temperaturnya dinaikkan oleh pemanas listrik hanya terlindungi oleh tabung WHT yang bermaterial stainless steel 304. Sedangkan stainless steel termasuk konduktor termal yang bagus, sehingga terjadi *heat loss* ke lingkungan. *Heat loss* yang terjadi pada WHT tanpa dengan isolator termal ditunjukkan pada Gambar 6, perhitungan menggunakan Matlab, listing pemrogramannya dapat dilihat pada Lampiran 1.



Gambar 6. Grafik karakterisasi *heat loss* pada WHT tanpa isolator termal

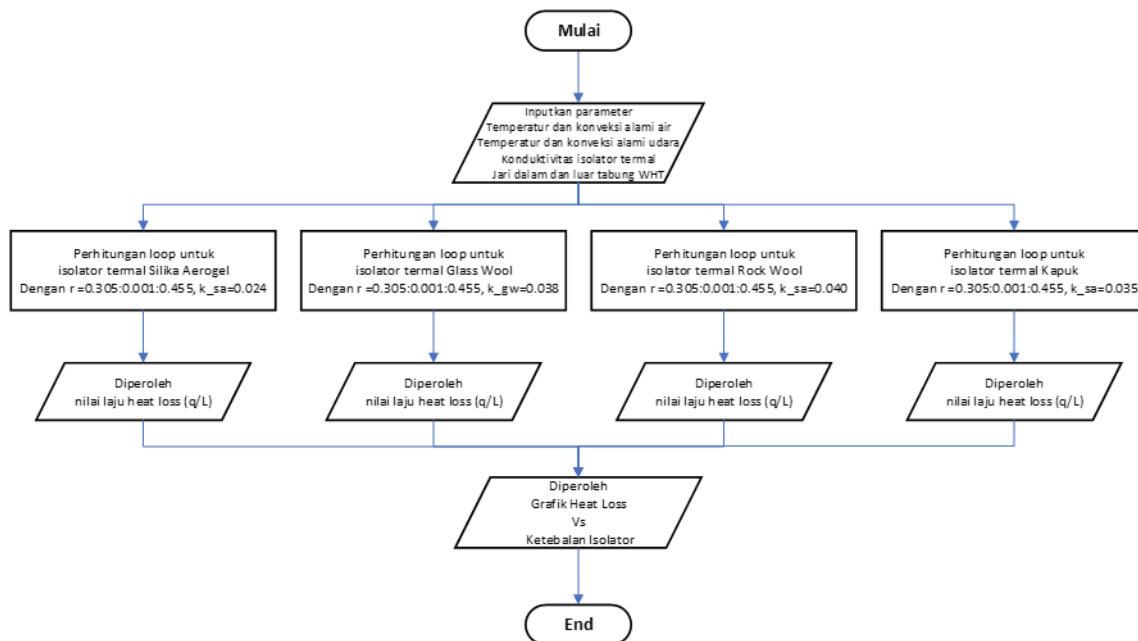
Pada Gambar 6 terlihat laju *heat loss* naik secara linier dengan kenaikan temperatur pada fluida kerja. Sehingga saat fluida kerja bertemperatur 90 °C (temperatur *setting* operasi maksimum) *heat loss* yang terjadi mencapai lebih dari 700 W/m. *Heat loss* tersebut besar dan dengan demikian WHT perlu dilengkapi dengan isolator termal agar *heat loss* yang terjadi menurun.

Perhitungan untuk mengetahui *heat loss* pada komponen WHT untai FASSIP-02 Mod.01 yang desain menggunakan isolator termal menggunakan Persamaan (1). Selanjutnya Persamaan (1) diaplikasikan ke *software* Matlab dengan data-data yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Data perhitungan penentuan laju alir energi termal pada WHT

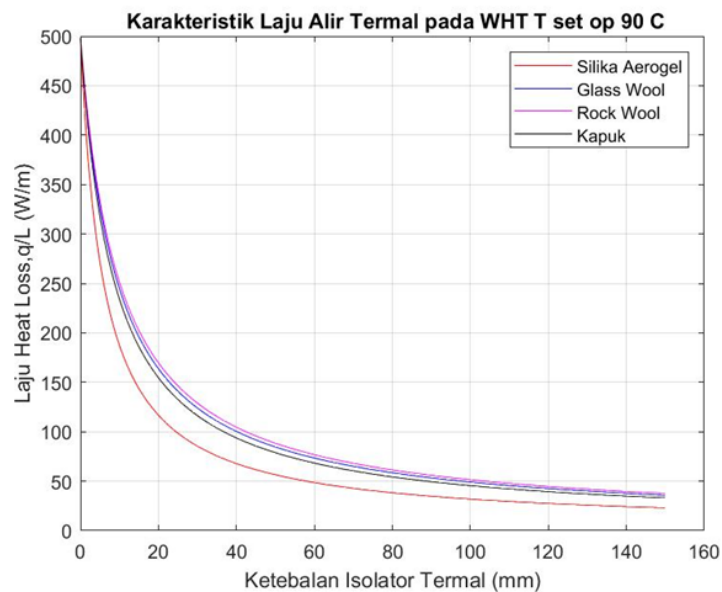
Simbol	Nilai	Keterangan
TA	90 °C	Temperatur air/fluida kerja
TU	27°C	Temperatur udara/lingkungan
r1	0,301 mm	Jari-jari dinding dalam tabung WHT
r2	0,305 mm	Jari-jari dinding luar tabung WHT
r3	0,355-1,055 m	Jari-jari luar isolator silika aerogel/rock wool/glass wool/kapuk (tebal 0-150 mm)
r4	0,360-1,060 m	Jari-jari luar isolator kertas karton gelombang (tebal 5 mm)
r5	0,361-1,061 m	Jari-jari luar isolator aluminium (tebal 1 mm)
h _a	1000 W/m ² °C	Konveksi alami air
h _u	6 W/m ² °C	Konveksi alami udara
k _{ss}	14 W/m°C	Konduktivitas termal material Stainless Steel 304
k _{karton}	0,064 W/m°C	Konduktivitas termal material isolator kertas karton gelombang
k _{al}	182 W/m°C	Konduktivitas termal material isolator Aluminium
k _{sa}	0,024 W/m°C	Konduktivitas termal material isolator silika aerogel
k _{gw}	0,038 W/m°C	Konduktivitas termal material isolator <i>glass wool</i>
k _{rw}	0,040 W/m°C	Konduktivitas termal material isolator <i>rock wool</i>
k _{kap}	0,035 W/m°C	Konduktivitas termal material isolator kapuk

Menggunakan data-data pada Tabel 2, perhitungan untuk menentukan *heat loss* pada WHT dapat dilakukan dengan *software* Matlab dengan alur perhitungan (*flow-chart*) diperlihatkan pada Gambar 7 sedangkan *listing* pemrogramannya dapat dilihat pada Lampiran 2.



Gambar 7. Flow-chart perhitungan ketebalan isolator termal pada WHT untai uji FASSIP-02 Mod.01

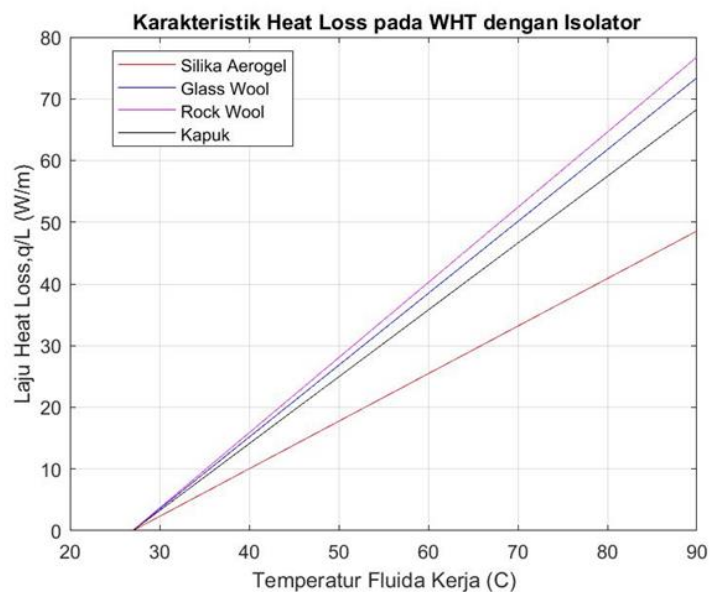
Hasil perhitungan *heat loss* pada WHT akibat dilengkapinya WHT dengan isolator dengan menggunakan *software* Matlab ditunjukkan pada Gambar 8 berikut:



Gambar 8. Karakteristik laju alir kalor pada isolator WHT

Berdasarkan Gambar 8, terlihat *heat loss* (laju alir energi termal) pada WHT mengalami penurunan secara eksponensial dengan dipasangnya isolator termal. Dengan ketebalan yang sama (0-150 mm) pada keempat jenis isolator termal, laju *heat loss* yang terjadi mulai dari 500 W/m menurun secara eksponensial sampai kurang dari 50 W/m dengan bertambah tebalnya isolator termal. Penggunaan isolator termal silika aerogel mengakibatkan penurunan *heat loss* paling kecil. Sehingga isolator silika aerogel lebih bagus dalam memperkecil terjadinya kerugian kalor (*heat loss*) pada WHT dibandingkan dengan isolator *glass wool*, *rock wool* maupun kapuk dan dapat diaplikasikan sebagai

isolator termal pada komponen WHT di FASSIP-02 Mod.01. Untuk pemakaian isolator termal berbahan silika aerogel dapat dilakukan dengan ketebalan antara 60-150 mm, hal ini disebabkan pada ketebalan 60-150 mm *heat loss* yang terjadi ≈ 50 W/m dan menurun secara landai dan sebagai pembanding *heat loss* yang terjadi saat WHT tanpa isolator termal lebih dari 700 W/m pada temperature fluida kerja 90 °C. Maka dengan dilengkapinya WHT dengan isolator termal mengakibatkan penurunan *heat loss* yang sangat besar. Hal ini bisa dilihat juga pada grafik temperatur *versus heat loss* saat WHT sudah dilengkapi dengan isolator termal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9, perhitungannya menggunakan Matlab dan *listing* pemrogramannya dapat dilihat pada Lampiran 3.



Gambar 9. Grafik karakterisasi *heat loss* pada WHT dengan isolator termal

Pada Gambar 9 terlihat laju *heat loss* naik secara linier dengan kenaikan temperatur pada fluida kerja seperti yang terjadi saat WHT belum dipasang isolator termal. Tetapi dengan dilengkapinya WHT dengan isolator termal terjadi penurunan laju *heat loss*, dimana saat fluida kerja bertemperatur 90 °C (temperatur *setting* operasi maksimum) *heat loss* yang terjadi ≈ 50 W/m dengan ketebalan isolator termal 60 mm sebagai pembanding *heat loss* pada temperatur 90 °C dengan WHT tanpa isolator termal adalah 700 W/m.

Menggunakan Persamaan (2) dapat diketahui jari-jari kritis (r_c) dari keempat isolator termal adalah sebagai berikut; r_c isolator silika aerogel 4,0 mm, r_c isolator kapuk 5,8 mm, r_c isolator *glass wool* 6,3 mm dan r_c isolator *rock wool* 6,7 mm. Sedangkan jari-jari dinding luar tabung WHT adalah 305 mm, sehingga jika dibandingkan jari-jari tabung WHT jauh lebih besar daripada jari-jari kritis (r_c) keempat isolator termal. Dengan demikian tebal optimum isolator termal tidak dapat ditemukan dan semakin tebal isolator termal berakibat semakin besar juga tahanan termalnya dan *heat loss* makin menurun [9].

Berdasarkan paparan diatas, maka untuk isolator termal pada WHT dipilih menggunakan silika aerogel selain menggunakan karton gelombang dan aluminium pada lapisan terluarnya. Silika aerogel adalah material dengan volume pori yang besar dengan porositas $\geq 90\%$, luas permukaan sekitar 1500 m² [11]. Ciri lain dari silika aerogel adalah mempunyai transmisi optic yang tinggi sekitar 90%, konduktivitas termal yang rendah sekitar 0,05 W/mK dan konstanta dielektrik rendah sekitar $\sim 1,1$ [12]. Dipasaran silika

aerogel dijual dalam bentuk lembaran sehingga mudah digunakan sebagai isolator termal dengan cara diselimutkan seperti ditunjukkan pada Gambar 9 berikut ini.



Gambar 9. Lembaran silika aerogel

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dengan empat jenis isolator termal untuk menentukan ketebalannya sehingga dapat memperkecil *heat loss* pada WHT diperoleh bahwa semakin tebal isolator termal maka tahanan termalnya akan meningkat dan berakibat penurunan *heat loss* secara eksponensial. Pemakaian isolator termal dengan material silika aerogel menghasilkan *heat loss* yang paling kecil, sehingga dapat dipilih untuk diaplikasikan sebagai isolator termal pada WHT. Pemakaian isolator termal berbahan silika aerogel dapat dilakukan dengan ketebalan antara 60-150 mm, yang mengakibatkan *heat loss* yang terjadi sebesar 50 W/m menurun secara landai. Sebagai pembanding, tanpa menggunakan isolator termal pada pengoperasian dengan temperatur 90 °C *heat loss* pada WHT lebih dari 700 W/m, sedangkan dengan dipasang pada WHT menggunakan isolator silika aerogel, karton bergelombang dan aluminium *heat loss* yang terjadi kurang dari 50 W/m. Dilengkapinya WHT dengan isolator termal yang terdiri dari isolator silika aerogel, isolator karton bergelombang dan isolator aluminium maka *heat loss* pada WHT menjadi berkurang dan keamanan saat pengoperasian lebih terjamin.

6. Ucapan Terima Kasih

Kami ucapkan terima kasih atas dukungan yang diberikan oleh; Riset Pada Rumah Program Hasil Inovasi Teknologi Nuklir Tahun 2022 dengan judul “Protipe Inovasi Teknologi Pendingin Pasif Model Bertingkat Mengacu pada Reaktor Jenis SMART” yang telah membiayai penelitian serta publikasi makalah. Kepala Pusat Riset dan Teknologi Reaktor Nuklir, Kepala Kelompok Riset Sistem Termofluida Reaktor Nuklir selaku atasan langsung dan teman-teman Peneliti dan Pranata Nuklir atas diskusi teknis yang telah dilakukan.

Daftar Pustaka

1. Juarsa, M., dkk. 2011. "Studi Eksperimental laju Aliran Massa Air Berdasarkan Perubahan Sudut kemiringan Untai pada Kasus Sirkulasi Alamiah Menggunakan Untai Sirkulasi Alamiah (USSA-FT01)." Jurnal Material dan Energi Indonesia, Jurusan Fisika FMIPA, 22-30.
2. Antariksawan, A. R. 2000. "Accident Analysis of PWR Station Blackout with Pump Seal Leak Using Melcor 1.8. 4." Proceeding Semonar on Technology and Safety of Nuclear Power Plant and Nuclear Facilities.

3. Sun, D. C., Li, Y., Xi, Z., Zan, Y. F., Li, P. Z., Zhou, W. B., 2017. "Experimental Evaluation of Safety Performance of Emergency Passive Residual Heat Removal System in HPR1000." *Nuclear Engineering Design* 54-60.
4. Kusuma, M. H., Putra, N., Ismarwanti, S., and Widodo S. 2017. "Simulation of Wickless-Heat Pipe as Passive Cooling System in Nuclear Spent Fuel Pool Using RELAP5/MOD3. 2." *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology (International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology)* VII (836-842): 836-842.
5. Wang, M., Tian, W., Qiu, S., Su, G., and Zhang, W. 2013. "An Evaluation of Designed Passive Core Makeup Tank (CMT) for China Pressurized Reactor (CPR1000)." *Annals of Nuclear Energy* 81-86.
6. Tjahjono, H. 2017. "Comprehensive Prediction of Thermosyphon Characteristics in Reactor Passive Cooling System Simulation Loop FASSIP-01." *Atom Indonesia* 157-166.
7. Haryanto, D., Giarno, Witoko, J. P., Hatmoko, S., Santosa, K., Juarsa, M., Kusuma, M., H., Antariksawan, A. R., Putra, N., 2018. "Analisis Kekuatan Mekanik Water Cooling Tank Pada Fasilitas Uji Untai PASSIF-02 Menggunakan CATIA,." *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin POROS*, 16 (1).
8. Holman, J. P., 1997. *Perpindahan Kalor*, Edisi Keenam. Jl. Baping Raya No. 100 Ciracas, Jakarta 13740: Penerbit Erlangga.
9. Bergman, T. L., Lavine, A. S. 2017, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* 8th Edition, ISBN 10: 1118989171, pp. 127-130.
10. Kadir, A., 2019, *Dasar Pemrograman Matlab*, Jl. Beo 38-40 Yogyakarta 55281: Penerbit ANDI.
11. G.M. Pajonk, E. Elaloui, P. Achard, B. Chevalier, J.L. Chevalier, M. Durant,"Physical Properties of Silica Gels and Aerogels Prepared with New Polymeric Precursors", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 186, 2 June 1995, pp. 1-8.
12. Sinko K. 2010,"Influence of Chemical Conditions on the Nanoporous Structure of Silicate Aerogels", *Materials*, pp. 704-740.