

Desain Isolator Termal pada *Hotleg* dan *Coldleg* FASSIP-02 Mod.01

Dedy Haryanto, Ainur Rosidi, Mulya Juarsa, Surip Widodo

Organisasi Tenaga Nuklir-Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir
Badan Riset dan Inovasi Nasional

Kawasan Sain dan Teknologi B.J. Habibie Tangerang Selatan Banten

Kampus ITS, Jalan Raya ITS, Sukolilo, Surabaya 60111

*E-mail: dedy004@brin.go.id

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 was the occurrence of a station blackout (SBO) at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in March 2011 in Japan which resulted in a nuclear accident. *Hotleg* and *coldleg* are components of FASSIP-02 Mod.01, *hotleg* functions as a working fluid piping before the Water Cooling Tank (WCT) component while *coldleg* as a working fluid piping after the Water Cooling Tank (WCT) component. This activity aims to determine the thickness of the thermal insulator on the *hotleg* and *coldleg* so as to minimize heat loss and ensure safety during operation. The steps taken are to determine the silica aerogel thermal insulator as an insulator on the *hotleg* and *coldleg* are make programming in Matlab and run the programming and analyze the results of the calculations. Based on the calculation results the selected thermal insulator is a thermal insulator made from silica aerogel with a thickness of 50-150 mm resulting in a maximum heat loss of 6.5 W/m on *hotleg* and 3.4 W/m on *coldleg*.

Keywords: *coldleg*; fassip-02 mod. 01; *hotleg*; silica aerogel; thermal insulator; water heating tank

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. *Hotleg* dan *coldleg* merupakan komponen pada FASSIP-02 Mod.01, *hotleg* berfungsi sebagai pemipaan fluida kerja sebelum komponen *Water Cooling Tank* (WCT) sedangkan *coldleg* sebagai pemipaan fluida kerja setelah komponen *Water Cooling Tank* (WCT). Penelitian ini bertujuan untuk menentukan ketebalan isolator termal pada *hotleg* dan *coldleg* sehingga dapat memperkecil *heat loss* dan menjamin keamanan saat pengoperasian. Tahapan yang dilakukan dalam menentukan isolator termal silika aerogel sebagai isolator pada *hotleg* dan *coldleg* adalah membuat pemrograman pada Matlab serta menjalankan pemrograman tersebut dan melakukan analisis hasil perhitungan. Berdasarkan hasil perhitungan isolator termal yang dipilih adalah isolator termal berbahan silika aerogel dengan ketebalan 50-150 mm yang mengakibatkan *heat loss* maksimal sebesar 6,5 W/m pada *hotleg* dan 3,4 W/m pada *coldleg*.

Kata kunci: *coldleg*; fassip-02 mod. 01; *hotleg*; isolator termal; silika aerogel; *water heating tank*

1. Pendahuluan

Kegiatan penelitian ini dilatarbelakangi oleh kejadian kecelakaan pada PLTN Fukushima Daiichi, Maret 2011 di Jepang. Berdasarkan kecelakaan reaktor nuklir tersebut, sistem pendinginan pasif pada instalasi nuklir 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. [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]. Untai uji FASSIP-02 mod.1 adalah fasilitas penelitian sistem pendingin pasif berskala besar yang menggunakan *Water Heating Tank* (WHT) sebagai simulator reaktor dan menggunakan *Water Cooling Tank* (WCT) sebagai pengambil kalor. Sisi *hotleg* merupakan pemipaan sebelum WCT dan sisi *coldleg* merupakan pemipaan setelah WCT. Penambahan *Heat Pipe* pada untaian uji FASSIP-02 Mod.01 merupakan pengembangan dari untaian uji FASSIP-02.

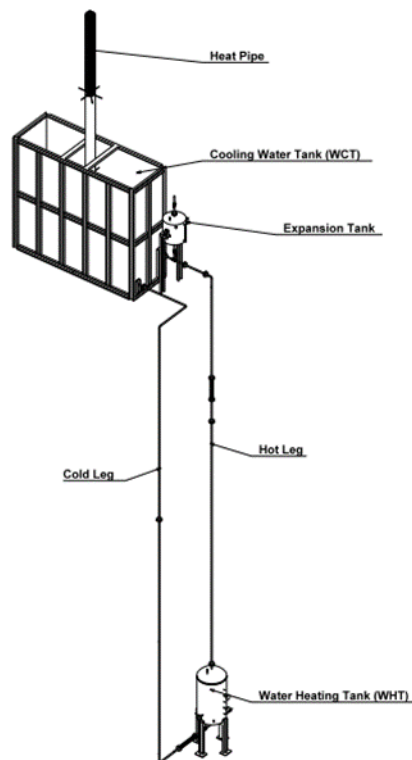
Penelitian lebih awal yang telah dilakukan untuk mempelajari sistem pasif diantaranya, pendekatan *study*

literatur dan estimasi perhitungan kalor dan waktu penguapan air dalam *Water Cooling Tank* [7]. Penelitian secara simulasi menggunakan *software* RELAP5 untuk mempelajari karakteristik sirkulasi alami dan untuk membantu memvalidasi desain FASSIP-02 [8]. Investigasi terhadap fenomena yang terjadi di sirkulasi alami sistem pendingin pasif PLTN untuk meningkatkan kinerja keselamatannya. Hasil dari penelitian tersebut diturunkannya beberapa persamaan untuk menganalisis laju aliran sirkulasi alam dari beberapa persamaan yang berhubungan dengan fenomena sirkulasi alam dan perpindahan panas di dalam pipa [9]. Investigasi perubahan pengaruh suhu pada area dingin dan area panas menjadi aliran sirkulasi alami menggunakan *software* CFD Fluent. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan aliran sirkulasi alami dari 0,035 m/s menjadi 0,218 m/s menggunakan perhitungan berdasarkan data eksperimen. Menggunakan CFD Fluent, alirannya meningkat dari 0,038 m/s hingga 0,327 m/s [10].

Perhitungan desain isolator termal pada *hotleg* dan *coldleg* ini dilakukan untuk memenuhi kebutuhan isolator termal pada *hotleg* dan *coldleg*. Adanya isolator termal pada *hotleg* dan *coldleg* akan memperkecil kerugian kalor (*heat loss*) kelingkungan saat pengoperasian. Perhitungan dilakukan menggunakan *software* Matlab dan hasil perhitungan ditampilkan dalam bentuk grafik. Sedangkan data dimensi *hotleg* dan *coldleg* diperoleh dari dokumen desain FASSIP-02 Mod.01.

2. Teori

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 1.



Gambar 1. Untai uji FASSIP-02 Mod.01

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. 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 [11]. Kegiatan penelitian pada untai 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 untai uji FASSIP-02 Mod. 01 tanpa dilengkapi isolator termal pada komponen-komponennya dan pemipaannya sehingga untuk penelitian selanjutnya untai uji FASSIP-02 Mod.01 perlu dilengkapi dengan isolator termal.

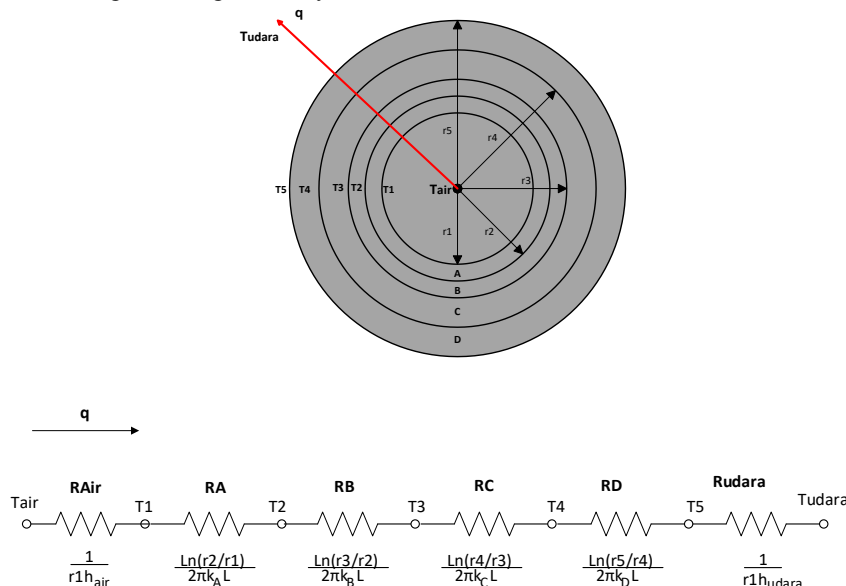
Perpindahan kalor secara konduksi adalah terjadinya perpindahan energi termal dari bagian yang bertemperatur tinggi ke bagian yang bertemperatur rendah pada zat padat. Kemampuan berpindahnya energi termal tersebut dipengaruhi oleh kemampuan dari material dari zat padat. Kemampuan zat padat untuk memindahkan energi termal disebut konduktivitas termal, dengan demikian konduktivitas dari material yang berbeda tidak sama. 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 [12]

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. 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) [13]. 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 diperlihatkan pada Gambar 2 dibawah ini berikut dengan analogi listriknya.



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 temperatur 90° (*setting* temperatur pengoperasian FASSIP-02 Mod.01) pada awalnya terjadi secara konveksi ke dinding dalam tabung pipa. Mulai dari dinding dalam pipa sampai dengan dinding luar isolator terluar, laju alir energi termal terjadi secara konduksi. Selanjutnya di udara lingkungan laju alir energi termal terjadi secara konveksi. Sehingga perhitungan *heat loss* yang terjadi pada *hotleg* dan *coldleg* dilakukan menggunakan Persamaan (1) [13]:

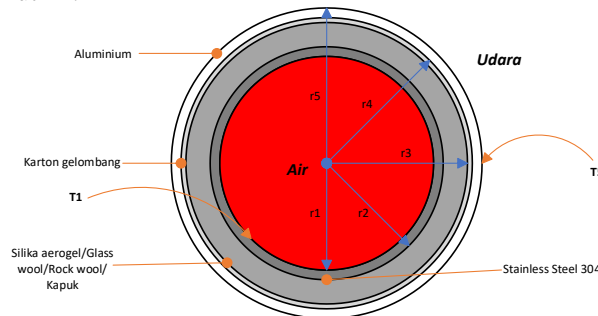
$$\frac{q}{L} = \frac{2\pi(T_{Air} - T_{Udara})}{\frac{1}{r_1 h_{air}} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_A} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_B} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_C} + \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{k_D} + \frac{1}{r_5 h_{udara}}} \quad (1)$$

dengan,

- q/L = Heat loss W/m
- T_{Air} = Temperatur dinding dalam pipa (°C)
- T_{Udara} = Temperatur dinding terluar isolator termal (°C)
- r₁ = Jari-jari dalam pipa (m)
- r₂ = Jari-jari luar pipa dengan material A(m)
- r₃ = Jari-jari luar Isolator material B (m)
- r₄ = Jari-jari luar isolator material C (m)
- r₅ = Jari-jari luar isolator material D (m)
- k_A = Konduktivitas material A (W/m °C)
- k_B = Konduktivitas material B (W/m °C)
- k_C = Konduktivitas material C (W/m °C)
- k_D = Konduktivitas material D (W/m °C)
- h_{udara} = Konveksi alami udara (W/m² °C)
- h_{air} = Konveksi alami air (W/m² °C)

2. Metodologi Penelitian

Tahapan pertama yang dilakukan dalam penelitian untuk menentukan ketebalan isolator termal pada *hotleg* dan *coldleg* adalah membuat gambar bagan penampang isolator pada pipa *hotleg* dan *coldleg* FASSIP-02 seperti ditunjukkan pada Gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. 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 dipilih berdasarkan hasil perhitungan *heat loss* dari isolator *glass wool*, *rock wool*, kapuk dan silika aerogel dengan ketebalan bervariasi dari 0 mm sampai dengan 150 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 (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 [14]. Analisis dilakukan berdasarkan hasil perhitungan yang sudah diperoleh berupa grafik sehingga pada akhirnya dapat ditarik kesimpulan dari hasil penelitian ini. Data yang digunakan dalam perhitungan ketebalan isolator termal pada pipa *hotleg* dan *coldleg* ditunjukkan pada Tabel 2.

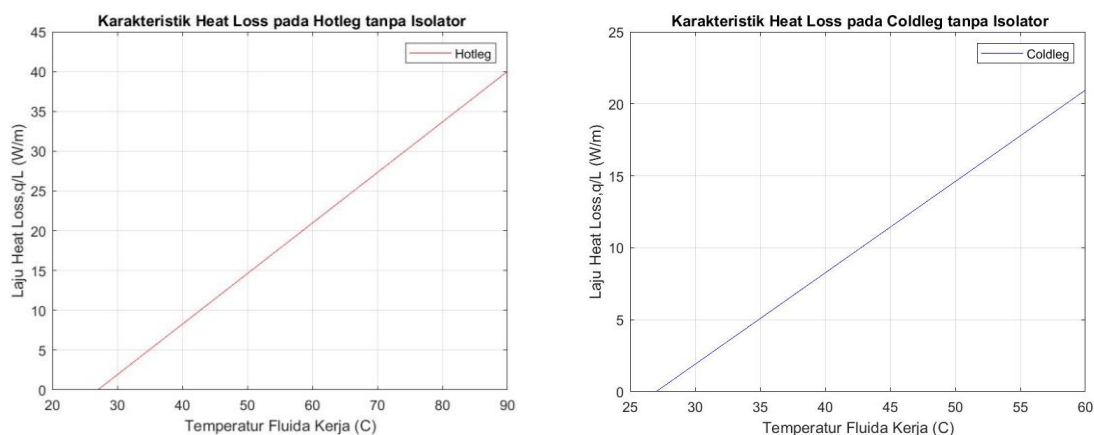
Tabel 2. Data untuk perhitungan penentuan laju alir energi termal pada pipa *hotleg* dan *coldleg*

Simbol	Nilai	Keterangan
TAH	90 °C	Temperatur air/fluida kerja pada <i>hotleg</i>
TAC	60 °C	Temperatur air/fluida kerja pada <i>coldleg</i>
TU	27°C	Temperatur udara/lingkungan
r ₁	0,0135 m	Jari-jari dinding dalam tabung pipa <i>hotleg</i> dan <i>coldleg</i>
r ₂	0,0170 m	Jari-jari dinding luar tabung pipa <i>hotleg</i> dan <i>coldleg</i>
r ₃	0.067 m	Jari-jari luar isolator termal (tebal 50 mm)

r_4	0.072 m	Jari-jari luar isolator kertas karton gelombang (tebal 5 mm)
r_5	0.073 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

3. Hasil dan Pembahasan

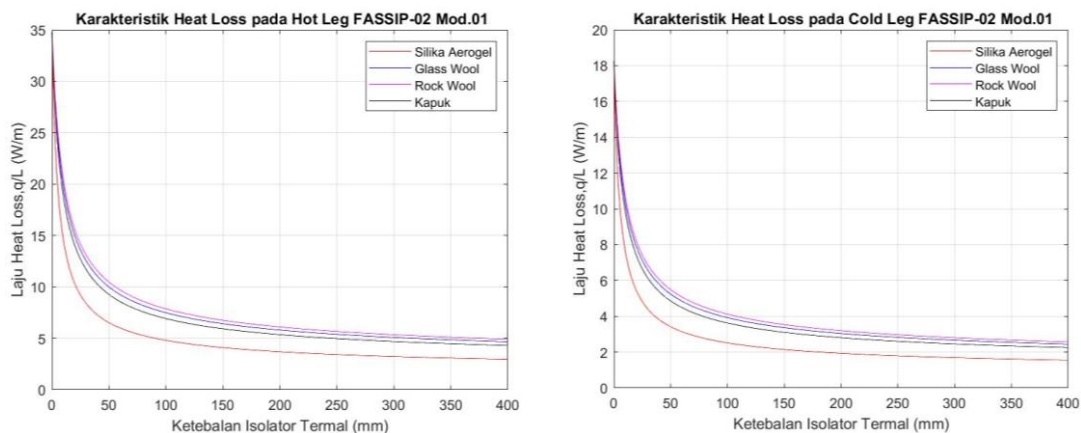
Kondisi saat ini *hotleg* dan *coldleg* untai FASSIP-02 Mod.01 masih belum dilengkapi dengan isolator termal, sehingga *heat loss* kelingkungan besar. *Heat loss* yang terjadi pada *hotleg* dan *coldleg* tanpa dengan isolator termal berdasarkan hasil perhitungan menggunakan *software* Matlab ditunjukkan pada Gambar 5, dengan menggunakan data pada Tabel 2.



Gambar 4. Grafik karakterisasi *heat loss* pada *hotleg* dan *coldleg* tanpa isolator termal

Pada Gambar 4 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* pada *hotleg* mencapai 40 w/m dan pada *coldleg* lebih dari 20 w/m. *Heat loss* tersebut cukup besar dan dengan demikian pipa *hotleg* dan *coldleg* perlu dilengkapi dengan isolator termal agar *heat loss* yang terjadi menurun.

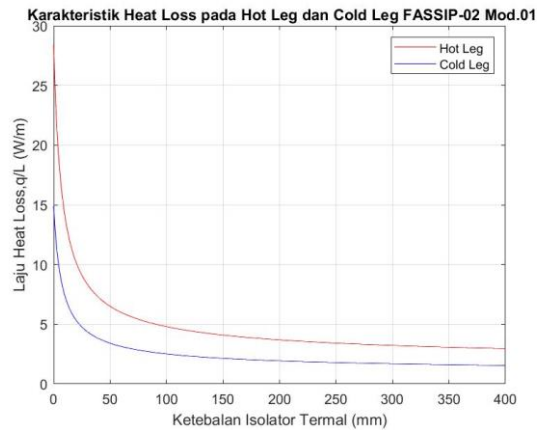
Penentuan penggunaan isolator termal untuk menurunkan *heat loss* yang terjadi pada *hotleg* dan *coldleg* perlu dilakukan perhitungan terlebih dahulu dengan kondisi desain yang sama untuk 4 buah jenis isolator termal. Perhitungan menggunakan *software* Matlab dengan menggunakan data pada Tabel 2, hasil perhitungan ditunjukkan pada grafik Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Karakteristik laju alir kalor dengan berbagai isolator

Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa pemakaian isolator termal silika aerogel pada desain yang sama dengan isolator termal lainnya menghasilkan laju *heat loss* yang paling rendah pada bagian *hotleg* dan *coldleg*. Sehingga

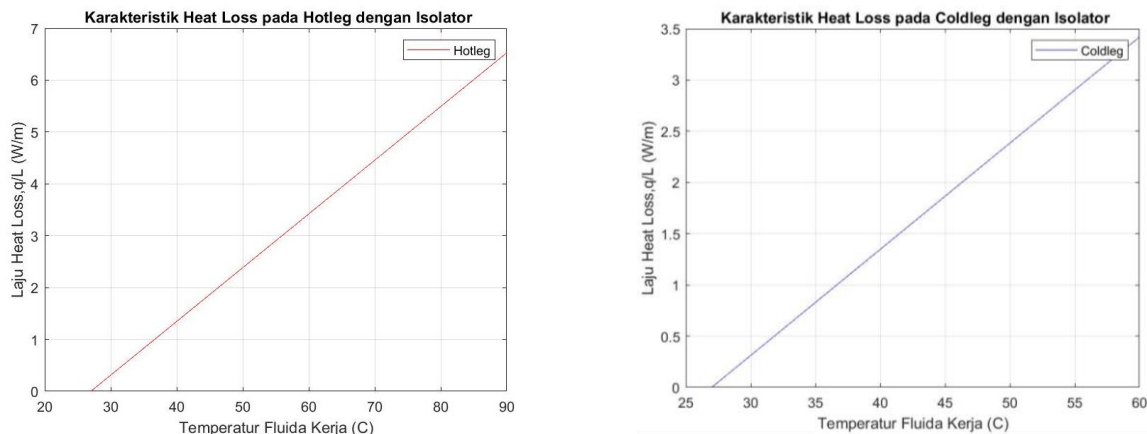
untuk diaplikasikan pada *hotleg* dan *coldleg* penggunaan isolator termal silika aerogel menjadi pilihan selain menggunakan karton gelombang dan aluminium pada lapisan terluarnya. Silika aerogel adalah material dengan volume pori yang besar dengan porositas $\geq 90\%$ [15]. Ciri lain dari silika aerogel adalah mempunyai transmisi *optic* yang tinggi sekitar 90%, konduktivitas termal yang rendah sekitar 0,05 W/mK dan konstanta dielektrik rendah sekitar $\sim 1,1$ [16]. Dipasaran silika aerogel dijual dalam bentuk lembaran sehingga mudah digunakan sebagai isolator termal dengan cara diselimutkan. Perhitungan menggunakan *software* Matlab untuk pengaplikasian silika aerogel pada *hotleg* dan *coldleg* dengan hasil perhitungan diperlihatkan pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Karakteristik laju alir kalor pada isolator *hotleg* dan *coldleg*

Berdasarkan Gambar 6, terlihat *heat loss* (laju alir energi termal) pada *hotleg* dan *coldleg* mengalami penurunan dengan dipasangnya isolator termal. Dengan ketebalan yang sama (0-400 mm) pada jenis isolator termal silika aerogel, laju *heat loss* yang terjadi menurun sampai kurang dari 5 W/m dengan bertambah tebalnya isolator termal. Untuk pemakaian isolator termal berbahan silika aerogel dapat dilakukan dengan ketebalan antara 50-150 mm, hal ini disebabkan pada ketebalan 50-150 mm *heat loss* yang terjadi ≈ 5 W/m dan menurun secara landai. Maka dengan dilengkapinya *hotleg* dan *coldleg* dengan isolator termal silika aerogel mengakibatkan penurunan *heat loss* yang sangat besar.

Selanjutnya dilakukan perhitungan *heat loss* pada *hotleg* dan *coldleg* saat kedua bagian tersebut telah dilengkapi dengan isolator termal silika aerogel tebal 50 mm, karton bergelombang tebal 1 mm dan aluminium dibagian terluarnya tebal 1 mm. Perhitungan dilakukan menggunakan *software* Matlab dan hasil perhitungan seperti terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik karakterisasi *heat loss* pada *hotleg* dan *coldleg* dengan isolator termal

Pada Gambar 7, dengan dilengkapinya *hotleg* dan *coldleg* dengan isolator termal terjadi penurunan laju *heat loss*. Dimana saat fluida kerja bertemperatur 90 °C *heat loss* pada *hotleg* sebesar $\approx 6,5$ W/m dengan ketebalan isolator termal 50 mm. Sebagai pembandingan *heat loss* pada temperatur 90 °C pada *hotleg* tanpa isolator termal adalah 40 W/m. Sedangkan pada *coldleg*, *heat loss* maksimum kurang dari 3,5 W/m pada temperatur 60 °C dan sebagai pembandingan *heat loss* pada temperatur 60 °C dengan *coldleg* tanpa isolator termal adalah sekitar 20 W/m.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan untuk menentukan ketebalannya isolator termal dengan tujuan memperkecil *heat loss* pada *hotleg* dan *coldleg* diperoleh, bahwa semakin tebal isolator termal maka tahanan termalnya akan meningkat dan berakibat penurunan *heat loss*. Pemakaian isolator termal dengan material silika aerogel menghasilkan *heat loss* yang paling kecil, sehingga dipilih untuk diaplikasikan sebagai isolator termal pada *hotleg* dan *coldleg*. Pemakaian isolator termal berbahan silika aerogel dapat dilakukan dengan ketebalan antara 50-150 mm, yang mengakibatkan *heat loss* yang terjadi sebesar ≈ 5 W/m menurun secara landai. Sebagai pembanding *heat loss* pada temperatur 90°C pada *hotleg* tanpa isolator termal adalah 40 W/m. Saat *hotleg* dilengkapi dengan isolator termal *heat loss* pada *hotleg* sebesar $\approx 6,5$ W/m. Sedangkan pada *coldleg*, *heat loss* maksimum kurang dari 3,5 W/m pada temperatur 60°C dan sebagai pembanding *heat loss* saat temperatur 60°C pada *coldleg* tanpa isolator termal adalah sekitar 20 W/m.

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. Kepala Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, Kepala Kelompok Riset Sistem Termofluida Reaktor Nuklir selaku atasan langsung dan teman-teman Peneliti dan Pengembang Teknologi 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] Ningsih, L. F., Sofyan, A. R., Giarno, Haryanto, D., Witoko, J. P., Juarsa, M., 2018. "Estimasi Perhitungan Kalor dan Laju Aliran Kalor pada Untai FASSIP-02," Sigma Epsilon, Mei: 22 (1) 26-34.
- [8] Antariksawan, A. R., Widodo, S., Juarsa, M., Haryanto, D., Kusuma, M. H., Putra, N., 2018, "Numerical Study on Natural Circulation Characteristics in FASSIP-02 Experimental Facility Using RELAP5 Code." 2nd international Tropical Renewable Energy Conference (i-TREC) 2017. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 105.
- [9] Juarsa, M., Giarno, Kusnugroho, G. B. H., Haryanto, D., Witoko, J. P., 2016. "Passive System Simulation Facility (FASSIP) Loop for Natural Circulation Study,." Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2016.
- [10] Juarsa, M., Antariksawan, A. R., Kusuma, M. H., Putra, N., Moniaga, P. P., 2018, "Preliminary Investigation on Natural Circulation Flow using CFD and Calculation Base on Experimental Data Pre-FASSIP-02." Symposium of Emerging Nuclear Technology and Engineering Novelty. IOP Conf. Series: Journal of Physics.
- [11] Cengel, Y. A., 2003, Heat Transfer a Practical Approach Second Edition, Published by McGraw-Hill, a business unit of The McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of America, New York, NY 10020.
- [12] Holman, J. P., 1997. Perpindahan Kalor, Edisi Keenam. Jl. Baping Raya No. 100 Ciracas, Jakarta 13740: Penerbit Erlangga.
- [13] Bergman, T. L., Lavine, A. S. 2017, Fundamentals of Heat and Mass Transfer 8th Edition, ISBN 10: 1118989171, pp. 127-130.
- [14] Kadir, A., 2019, Dasar Pemrograman Matlab, Jl. Beo 38-40 Yogyakarta 55281: Penerbit ANDI.
- [15] 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.
- [16] Sinko K. 2010, "Influence of Chemical Conditions on the Nanoporous Structure of Silicate Aerogels", Materials, pp. 704-740.