

# Perhitungan Ketebalan Minimum Isolasi Akibat Rugi Kalor pada *Water Heating Tank* Untai FASSIP-02

Giarno\*, Mukhsinin Hadi Kusuma, Mulya Juarsa, Anhar Riza Antariksawan  
Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir-Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Gedung 80 Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan, Banten  
\*giarno@batan.go.id

**Abstrak**—Teknologi keselamatan di beberapa desain Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) generasi III<sup>+</sup> dan IV menggunakan sistem pendingin pasif untuk mengambil panas peluruhan yang dihasilkan oleh reaktor, khususnya pada kondisi kecelakaan. Penelitian dan pengembangan tentang fenomena sistem pendinginan secara pasif telah dilakukan di Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN), Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) dengan membuat untai uji Fasilitas Simulasi Sistem Pasif-01 (FASSIP-01). Untai uji tersebut telah dikembangkan dengan mendisain sebuah untai baru yang dinamakan untai uji Fasilitas Simulasi Sistem Pasif-02 (FASSIP-02). Fasilitas uji yang dikembangkan terdiri dari komponen utama yaitu *water heating tank (WHT)*, *water cooling tank (WCT)*, dan sistem pemipaan. Untuk mempelajari fenomena di salah satu komponen utama tersebut, telah dilakukan studi awal dengan simulasi komputer menggunakan software RELAP5. Penelitian yang akan dilakukan adalah melakukan perhitungan ketebalan minimum isolasi pada *WHT*. Metodologi yang dilakukan dengan mengumpulkan data hasil simulasi pengoperasian untai FASSIP-02, menghitung kerugian kalor di *WHT*, menghitung temperatur dinding luar *WHT* dan menghitung ketebalan isolasi berdasarkan ditetapkan temperatur isolasi dan rugi kalor yang diijinkan. Hasil perhitungan berdasarkan temperatur dinding luar yang diijinkan sekitar 30 hingga 35°C diperoleh ketebalan isolasi minimum sebesar 1,39 cm, sedangkan perhitungan berdasarkan rugi kalor yang diijinkan antara 100 W hingga 1000 W diperoleh ketebalan isolasi minimum sebesar 0,39 cm. Berdasarkan 2 macam perhitungan ketebalan isolasi, semakin tipis ketebalan isolasi maka rugi kalor semakin besar.

**Kata kunci** : *Water heating tank, ketebalan minimum, FASSIP-02.*

**Abstract**—*Safety technologies of several design of generation III<sup>+</sup> and IV of nuclear power plants uses passive cooling systems to extract decay heat generation in the reactor, especially during an accident. Research and development on the phenomenon of passive cooling system has been performed at the Center for Nuclear Reactor Technology and Safety, National Nuclear Energy Agency by making the test section of Passive System Simulation Facility-01 (FASSIP-01). The test section has been developed by designing a new section called Passive System Simulation Facility-02 (FASSIP-02). The test facility developed consists of the main components of water heating tank (WHT), water cooling tank (WCT), and piping systems. To study the phenomenon in one of the major components, a preliminary study has been conducted using*

*computer simulation using RELAP5 software. The research that will be done is to calculate minimum insulation thickness on WHT. The methodology undertaken is collecting data from the simulation results of the operation of FASSIP-02 loop, calculating the heat losses in WHT, calculating the WHT's outer wall temperature and calculating the insulation thickness based on the insulation temperature and allowable heat loss. The calculation result based on allowable outer wall temperature of 30 to 35°C obtained minimum insulation thickness of 1.39 cm, while calculation based on allowable heat loss of 100 W to 1000 W obtained minimum insulation thickness of 0.39 cm. Based on 2 kinds of insulation thickness calculation, the thinner the thickness of the insulation then the greater the heat losses.*

**Keyword** : *Water heating tank, minimum thickness, FASSIP-02.*

## PENDAHULUAN

Pemenuhan kebutuhan energi listrik di Indonesia yang saat ini didominasi oleh sumber konvensional perlu dikurangi karena ketersediaannya yang semakin menipis. Agar tidak terjadi kelangkaan sumber energi tersebut untuk generasi masa depan, maka perlu dipikirkan terobosan sebuah sumber energi baru dan terbarukan. Salah satu energi baru dan terbarukan tersebut adalah energi nuklir [1].

Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) sebagai salah satu dari pemanfaatan tenaga nuklir perlu ditingkatkan keselamatannya. Hal ini terkait dengan beberapa kejadian kecelakaan yang diakibatkan oleh pemanfaatan PLTN di dunia. Salah satu penyebab terjadinya kecelakaan tersebut adalah gagalnya pengambilan panas sisa yang dihasilkan oleh bahan bakar reaktor karena tidak berfungsinya sistem pendingin ketika terjadi *station blackout (SBO)* [2]. Sebagian besar reaktor generasi III hanya memanfaatkan sistem pendingin aktif untuk mengambil panas yang dihasilkan ketika reaktor beroperasi normal ataupun pada saat terjadi kecelakaan. Mengacu pada upaya peningkatan keselamatan saat ini telah dikembangkan sistem pendingin pasif pada generasi III<sup>+</sup> dan IV [3].

Penelitian mengenai penggunaan sistem pasif untuk pengambilan panas sisa yang dihasilkan ketika terjadi kecelakaan di reaktor telah dilakukan oleh banyak peneliti. Penelitian fenomena sirkulasi alamiah yang dilakukan

Rabiee et.al menunjukkan perubahan fluks panas menyebabkan ketidakstabilan yang fluktuasi terhadap laju aliran massa air [4]. Simulasi sistem perpindahan panas sisa ke lingkungan secara pasif pasca kecelakaan pada di *spent fuel storage pool* reaktor nuklir telah dilakukan dengan program RELAP5 oleh M.H. Kusuma et.al dengan menggunakan pemodelan alat uji *heat pipe* [5]. Untuk memperdalam studi tentang sistem pendingin pasif di sistem reaktor, saat ini di laboratorium Termohidrolika PTKRN-BATAN telah memiliki untai Fasilitas Simulasi Sistem Pasif-01 (FASSIP-01) dengan perancangan *heat sink system* menggunakan *software Cycle-Tempo* dalam penentuan *coefficient of performance* fluida kerja sistem *refrigerasi* [6]. Untai FASSIP-01 terdiri dari untai rektanguler dan untai *heat sink system*, hasil analisis laju aliran massa di *cooler tank* telah dilakukan oleh Giarno at.al [7], sedangkan fenomena laju aliran fluida sirkulasi alamiah yang terjadi di untai rektanguler untai FASSIP-01 telah dipelajari oleh Mulya Juarsa at.al [8]. Pemodelan RELAP5 Mod3 untuk mempelajari fenomena beda ketinggian antara *water heating tank (WHT)* dan *water cooling tank (WCT)* untai FASSIP-01 telah dilakukan oleh Andy Ekariansyah [9].

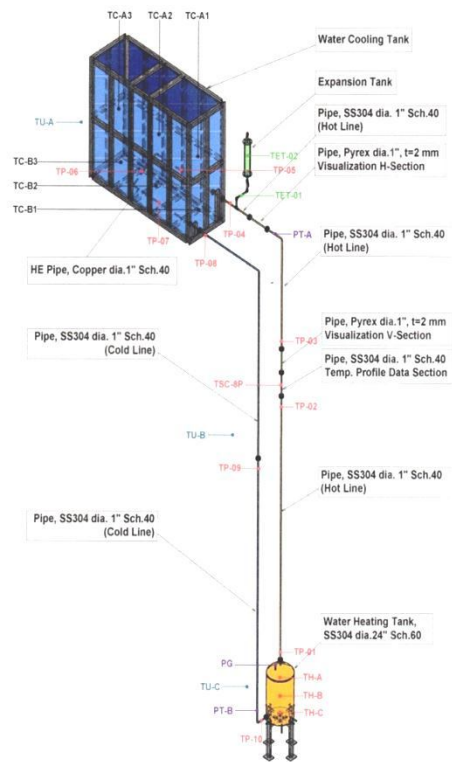
Dalam rangka pengembangan studi sistem pendingin pasif, maka saat ini sedang dikonstruksi untai uji Fasilitas Simulasi Sistem Pasif-02 (FASSIP-02). Diharapkan dengan dibangunnya untai uji yang baru, akan diperoleh studi yang lebih detail mengenai fenomena perpindahan panas secara alamiah di sistem reaktor ketika mengalami SBO [2]. Dari studi awal, diketahui bahwa kehilangan kalor di *WHT* FASSIP-02 besar, hasil simulasi menggunakan *software RELAP5* [10].

Tujuan penelitian ini adalah untuk menghitung ketebalan minimum isolasi pada *water heating tank (WHT)* akibat rugi kalor pada saat pengoperasian untai FASSIP-02 terisolasi. Ketebalan minimum isolasi adalah batas ketebalan minimum untuk meminimalkan rugi kalor pada *WHT*.

METODE

Metode penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data geometri *WHT* dan bahan isolasi yang akan digunakan serta data hasil pemodelan RELAP5. Melakukan perhitungan rugi kalor pada *WHT* dan ketebalan minimum isolasi menggunakan persamaan konduksi.

Rancangan dari untai uji FASSIP-02 yang sedang dibangun dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain untai FASSIP-02

Data geometri *WHT* seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Geometri WHT

Material pipa SS304, Sch.10		
Diameter dalam tangki	D <sub>1</sub>	0,598 m
Diameter luar tangki	D <sub>2</sub>	0,610 m
Jari-jari dalam tangki	r <sub>1</sub>	0,299 m
Jari-jari luar tangki	r <sub>2</sub>	0,305 m
Tinggi tangki	L	1 m
Konduktivitas termal	k <sub>ss</sub>	15 W/m.°C

Data bahan isolasi yang akan digunakan untai FASSIP-02 seperti Tabel 2.

Tabel 2. Bahan isolasi

Material Rockwool		
Konduktivitas termal	k <sub>r</sub>	0,038 W/m.°C
Densitas	ρ	80 kg/m <sup>3</sup>
Kapasitas panas	C <sub>p</sub>	840 J/kg.°C

Menghitung banyaknya kalor (*q*) pada suatu penampang/saluran yang berbentuk pipa/tabung yaitu dengan persamaan (1) [11]:

$$q = \dot{m}.c_{p\text{air}}.(T_{hot} - T_{cold}) \dots\dots\dots(1)$$

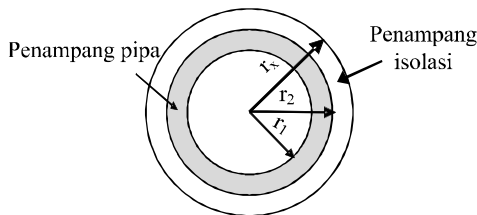
dengan :  $\dot{m}$ =laju aliran massa (kg/s),  $c_{p\text{air}}$ =kapasitas jenis air 60°C= 4200 J/kg.°C,

Menghitung rugi kalor ( $q_k$ ) konduksi geometri silinder dengan persamaan (2) [11] :

$$q_k = \frac{2\pi kL}{Ln \frac{r_2}{r_1}} (T_{r1} - T_{r2}) \dots\dots\dots(2)$$

dengan :  $T_{r1}$ =Temperatur dalam dinding WHT (°C),  $T_{r2}$ =Temperatur luar dinding WHT (°C),  $k$ =konduktivitas termal SS (W/m.°C),  $L$ =tinggi tangki WHT (m).

Arah perpindahan kalor secara radial dari penampang atas permukaan tangki, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Penampang WHT

Untuk penentuan tebal minimum isolasi, dilakukan langkah sebagai berikut:

- Mengumpulkan data dari hasil simulasi operasi FASSIP-02.
- Menghitung kerugian kalor di WHT berdasarkan data yang ada.
- Menghitung temperatur luar dinding tangki.
- Menghitung tebal minimum isolasi berdasarkan ketetapan temperatur isolasi dan rugi kalor yang diijinkan.

Untuk menghitung tebal minimum tersebut, akan ditentukan kehilangan kalor maksimum per satuan panjang WHT atau persentase rugi kalor.

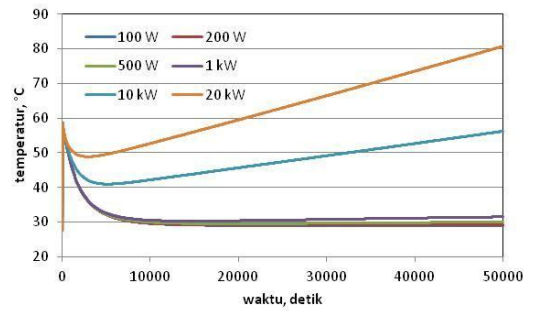
HASIL

Dari hasil simulasi menggunakan software RELAP5 yang telah dilakukan diperoleh data seperti pada Tabel 3 dan Gambar 3 [10]. Tabel 3 memperlihatkan data temperatur inlet dan outlet WHT untuk setiap daya pemanas, sedangkan pada Gambar 3 memperlihatkan evolusi temperatur outlet hasil simulasi. Analisis lengkap hasil simulasi akan dipublikasikan tersendiri.

Tabel 3. Data WHT tanpa isolasi [10]

Daya pemanas P (W)	Temperatur inlet WHT, $T_{in}$ (°C)	Temperatur outlet WHT, $T_{out}$ (°C)	Laju alir, $\dot{m}$ (kg/s)
100	28,99	29,01	0.00073
200	29,16	29,22	0.00118
500	29,67	29,99	0.00279
1000	30,55	31,47	0.00550

10000	47,38	56,19	0.03197
20000	66,42	80,72	0.04729



Gambar 3. Temperatur outlet WHT [10]

Berdasarkan data pada Tabel 3, dihitung jumlah kalor dari pemanas yang diserap oleh air yang masuk ke WHT. Hasil perhitungan dengan persamaan (1) pada daya 10000 W kondisi tanpa isolasi, diperoleh nilai laju aliran massa sebesar 0,03197 kg/s, maka diperoleh jumlah kalor di WHT, yaitu:

$$q = 0,05 \times 4200 \times (56,19 - 47,38)$$

$$q = 1182,94 \text{ W}$$

Dengan cara yang sama diperoleh jumlah kalor di WHT tanpa isolasi seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Jumlah kalor yang diserap air WHT

Daya pemanas, P (W)	Temperatur inlet WHT, $T_{in}$ (°C)	Temperatur outlet WHT, $T_{out}$ (°C)	Jumlah kalor, q (W)
100	28,99	29,01	0,061
200	29,16	29,22	0,297
500	29,67	29,99	3,746
1000	30,55	31,47	21,254
10000	47,38	56,19	1182,942
20000	66,42	80,72	2837,327

Mengacu pada hasil perhitungan pada Tabel 4, jumlah kalor yang dipindah ke air yang mengalir ke dan keluar dari WHT tampak sangat kecil dibanding dengan daya pemanas listrik di WHT. Namun demikian, jika dilihat pada Gambar 3, di atas daya 1 kW, temperatur air masih dalam kondisi transien. Artinya, kalor yang ditransfer masih digunakan untuk menaikkan temperatur air, bukan semuanya hilang sebagai kerugian kalor ke lingkungan. Sebaliknya, untuk daya 100, 200 dan 500 W, sudah dapat dikatakan kondisinya *steady*, sehingga besar kemungkinan perbedaan jumlah kalor antara yang dibangkitkan pemanas dan yang diserap air adalah yang hilang ke lingkungan. Untuk mengurangi rugi kalor ke lingkungan, diperlukan isolasi di luar dinding tangki WHT.

Perhitungan ketebalan minimum isolasi dilakukan dengan terlebih dahulu menetapkan persentase rugi kalor yang diijinkan. Dalam hal ini, ditetapkan 1% dari panas yang dibangkitkan oleh pemanas. Jika maksimum daya pemanas adalah 20 kW, maka rugi kalor yang diijinkan

adalah 200 W. Nilai ini yang akan dijadikan dasar untuk perhitungan tebal minimum isolasi. Di sisi lain, dari simulasi diketahui bahwa temperatur air maksimum di *WHT* pada daya 20 kW adalah 89,16°C [10]. Untuk konservatisme, diasumsikan bahwa temperatur dinding dalam *WHT* sama dengan temperatur maksimum air. Berdasarkan hal tersebut, menggunakan persamaan (2) dapat dihitung temperatur permukaan luar dinding *WHT*, yaitu:

$$T_2 = T_1 - \frac{1}{2 \times \pi \times k_{ss} \times L} \times q \times \ln \frac{r_2}{r_1} \text{ atau}$$

$$T_2 = 89,16 - \frac{1}{2 \times \pi \times 15 \times 1} \times q \times \ln \frac{0,305}{0,299}$$

diperoleh temperatur dinding luar  $T_2 = 89,12 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Selanjutnya, untuk menentukan tebal isolasi, harus ditetapkan nilai temperatur di dinding luar isolasi. Oleh karena diketahui temperatur udara luar 30 C, maka temperatur dinding paling rendah adalah sama dengan temperatur udara luar. Dalam perhitungan kali ini, temperatur dinding luar isolasi dijadikan variabel dengan nilai antara 30 hingga 35°C. Tebal isolasi dapat dihitung dengan persamaan (2). Tabel 5 memperlihatkan ketebalan isolasi untuk beberapa harga temperatur dinding luar isolasi.

Tabel 5. Perhitungan tebal isolasi sebagai fungsi temperatur dinding luar isolasi

Temperatur luar isolasi (°C)	Ln (r <sub>3</sub> /r <sub>2</sub> )	r <sub>3</sub> (m)	Tebal isolasi (m)
30	0,070542	0,327292	0,022292
31	0,069349	0,320471	0,015471
32	0,068156	0,320089	0,015089
33	0,066962	0,319707	0,014707
34	0,065769	0,319326	0,014326
35	0,064576	0,318945	0,013945

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, tebal isolasi berkisar antara 1,39 hingga 2,20 cm tergantung temperatur dinding luar isolasi yang diijinkan. Dengan jumlah rugi kalor tertentu, jika temperatur luar isolasi yang diijinkan lebih tinggi, maka tebal isolasi lebih tipis.

Perhitungan kedua dengan mengasumsikan rugi kalor yang diijinkan. Dalam hal ini, ditetapkan rugi kalor antara 0,5% hingga 5% dari daya pemanas maksimum 20 kW. Temperatur maksimum dinding luar isolasi yang diijinkan ditetapkan 35°C.

Tabel 6. Tebal isolasi sebagai fungsi rugi kalor yang diijinkan

% rugi kalor	Ln (r <sub>3</sub> /r <sub>2</sub> )	r <sub>3</sub> (m)	Tebal isolasi (m)
0,5	0,129152	0,347048	0,042048
1,0	0,064576	0,325346	0,020346
2,0	0,032288	0,315009	0,010009
3,0	0,021525	0,311636	0,006636
4,0	0,016144	0,309964	0,004964
5,0	0,012915	0,308965	0,003965

Berdasarkan hasil perhitungan di Tabel 6, dapat diketahui bahwa untuk temperatur luar isolasi yang diijinkan tetap sebesar 35°C, maka semakin besar rugi kalor yang dapat diterima, semakin tipis tebal isolasi, yaitu berkisar 4,2 cm hingga 0,39 cm.

#### SIMPULAN

Salah satu komponen penting FASSIP-02 adalah *WHT*. Untuk mengurangi rugi kalor ke lingkungan perlu dipasang isolasi. Hasil perhitungan berdasarkan temperatur dinding luar yang diijinkan sekitar 30 hingga 35°C diperoleh ketebalan isolasi minimum sebesar 1,39 cm, sedangkan perhitungan berdasarkan rugi kalor yang diijinkan antara 100 W hingga 1000 W diperoleh ketebalan isolasi minimum sebesar 0,39 cm. Berdasarkan 2 macam perhitungan ketebalan isolasi, semakin tipis ketebalan isolasi maka rugi kalor semakin besar.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas pembiayaan melalui program INSINAS Kementerian Ristekdikti dengan Nomor Kontrak: 02/INS-2/PPK/E/E4/2017.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Reyes, "Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants Phenomena, models, and methodology for system reliability assessments," Dr. Jose Reyes (US)2005.
- [2] IAEA-TECDOC-1264, "Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants," IAEA, November, Vienna, 2009.
- [3] L. Santini, D. Papini, and M. E. Ricotti, "Experimental Characterization of a Passive Emergency Heat Removal System for a GenIII," *Science and Technology of Nuclear Installations*, vol. 2010, 2009.
- [4] A. Rabiee, M. M. Mirzaee, M. R. Nematollahi, and A. Atf, "Experimental and numerical investigation of natural circulation stability of the SHUNCL thermal-hydraulic loop," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 93, pp. 386-396, 2016.
- [5] M. H. Kusuma, N. Putra, S. Widodo, and A. R. Antariksawan, "Simulation of Heat Flux Effect in Straight Heat Pipe as Passive Residual Heat Removal System in Light Water Reactor Using RELAP5 Mod 3.2," in *Applied Mechanics and Materials*, 2016, pp. 122-126.
- [6] G. Giarno, M. Juarsa, and J. P. Witoko, "Perancangan sistem heat-sink untai FASSIP-01 menggunakan software Cycle-Tempo," 2015.
- [7] G. Giarno, D. Prasetyo, and A. N. Rachman, "ANALISIS LAJU ALIRAN AIR DI COOLER PADA HEAT SINK SYSTEM UNTAI UJI FASSIP," *SIGMA EPSILON-Buletin Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir*, vol. 20, 2017.
- [8] M. Juarsa, Giarno, G. H. K, D. H., and J. PW, "Passive System Simulation Facility (FASSIP) loop for Natural Circulation Study," *Prosiding SENTEN 2016*, 2016.
- [9] A. S. Ekariansyah, H. Tjahjono, M. Juarsa, and S. Widodo, "Analysis Of The Effect Of Elevation Difference Between Heater And Cooler Position In The Fassip-01 Test Loop Using Relap5," *SIGMA EPSILON-Buletin Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir*, vol. 19, 2016.
- [10] A. R. Antariksawan, "Komunikasi pribadi," 2017.

- [11] J. R. Welty, C. E. Wicks, R. E. Wilson, and G. Rorrer, "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer," *Book*, vol. 4th edition, 2001.