

ANALISIS UNJUK KERJA PEMANAS DAN PENDINGIN DI UNTAI FASILITAS SIMULASI SISTEM PASIF

Mahran Noufal¹, Giarno², Joko Prasetyo², Dedy Haryanto², Mulya Juarsa²

¹Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Udayana Bali

²Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) - BATAN

ABSTRAK

ANALISA UNJUK KERJA PEMANAS DAN PENDINGIN DI UNTAI FASILITAS SIMULASI SISTEM PASIF. Untai FASSIP-01 adalah fasilitas simulasi sistem pasif yang digunakan untuk menginvestigasi fenomena sirkulasi alami guna penguasaan kemampuan desain reaktor dengan sistem keselamatan pasif. Untai FASSIP-01 yang terdiri dari section berupa pipa *stainless steel* berdiameter 1 inch yang disusun membentuk untaian rektanguler dengan ukuran lebar 350 cm dan tinggi 600 cm. Komponen utama yang terpasang pada untaian rektanguler adalah tangki *heater* sebagai pemanas dan tangki *cooler* sebagai pendingin. Dalam rangka persiapan eksperimen, perlu dilakukan analisis awal untuk mengetahui unjuk kerja pemanas dan pendingin pada untaian FASSIP-01. Analisis dilakukan dengan perhitungan berdasarkan data pengukuran yang diperoleh melalui variasi daya pemanas untuk mengetahui waktu optimal dalam proses pemanasan dan pendinginan. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada daya total 20 kW, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur air 75 °C adalah sekitar 0,48 jam. Begitu juga dengan kinerja refrigerator dan tangki pendingin, dimana bila kalor yang diserap refrigerator selama pendinginan semakin besar maka waktu pendinginan optimal akan semakin cepat tercapai.

Kata kunci: unjuk kerja, pemanas dan pendingin, sirkulasi alami, untaian FASSIP-01

ABSTRACT

ANALYSIS ON HEATER AND COOLER PERFORMANCES IN THE PASSIVE SYSTEM TEST FACILITY. The FASSIP-01 test loop is the facility of passive system simulation to investigate a natural circulation phenomenon with the goal to understand reactor design capability using passive safety system. The FASSIP-01 test loop consists of several sections made by stainless steel pipe with diameter 1 inch to form a rectangular loop with overall dimension of 350 cm width and 600 cm height. Main components which are installed in the rectangular loop are heater tank as heater and cooler tank as cooler. In order to prepare the FASSIP-01 experiment, a pre-analysis to determine the performance of heater and cooler is required. The analyses were performed by calculation based on the measurement data with the heater power variations used to determine the optimal time during heating and cooling process. The result of calculation showed that for a total power of 20 kW, the time required to reach the water temperature of 75 °C was about 0.48 hours. The performance of refrigerator and cooling tank were also proven that if the heat absorbed by the refrigerator become bigger, than the optimum cooling time will be faster achieved.

Keywords: performance, heater and cooler, natural circulation, FASSIP-01 test loop

PENDAHULUAN

Kecelakaan merupakan salah satu hal yang sangat ingin diminimalisir atau bila mungkin dihilangkan pada suatu sistem, proses ataupun pada penggunaan perangkat kerja. Salah satu kecelakaan yang terjadi sebagai akibat gagalnya proses pada sistem pendinginan di suatu pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) pernah terjadi pada PLTN tipe BWR (*boiling water reactor*) di Fukushima, Jepang pada tanggal 11 Maret 2011^[1]. Kecelakaan yang dipicu oleh kejadian gempa bumi berskala 8.9 richter (di atas perkiraan *site evaluation*) menyebabkan tsunami yang timbul menerjang batas air di pantai Fukushima di kompleks reaktor. Kondisi tersebut menyebabkan terendahnya sistem tenaga cadangan berupa genset diesel untuk pendinginan reaktor pasca *shutdown*. Akibat terakhir adalah terjadinya ledakan hidrogen dan lelehnya bahan bakar dan bejana tekan reaktor.

Kegagalan pendinginan akibat terendahnya genset diesel menjadi gambaran gagalnya sistem pendingin aktif (memerlukan daya atau energi dari luar) pada proses pendinginan di reaktor nuklir pasca terjadi suatu kecelakaan untuk memindahkan atau mengurangi panas dari teras reaktor. Alternatif untuk menggunakan model pendinginan tanpa memerlukan daya atau energi dari luar dan berdasarkan hukum-hukum alam yang berlaku pada dasarnya telah difikirkan diteliti oleh beberapa peneliti^[2,3]. Sistem pendinginan yang menggunakan hukum-hukum alam sering disebut sistem pendingin pasif, dimana proses sirkulasi terjadi secara alami dikarenakan perbedaan kerapatan fluida diantara dua titik yang

memiliki perbedaan ketinggian. Penelitian fenomena sirkulasi alami juga telah diteliti oleh beberapa peneliti untuk mengetahui parameter yang mempengaruhi proses alirannya^[4,5,6].

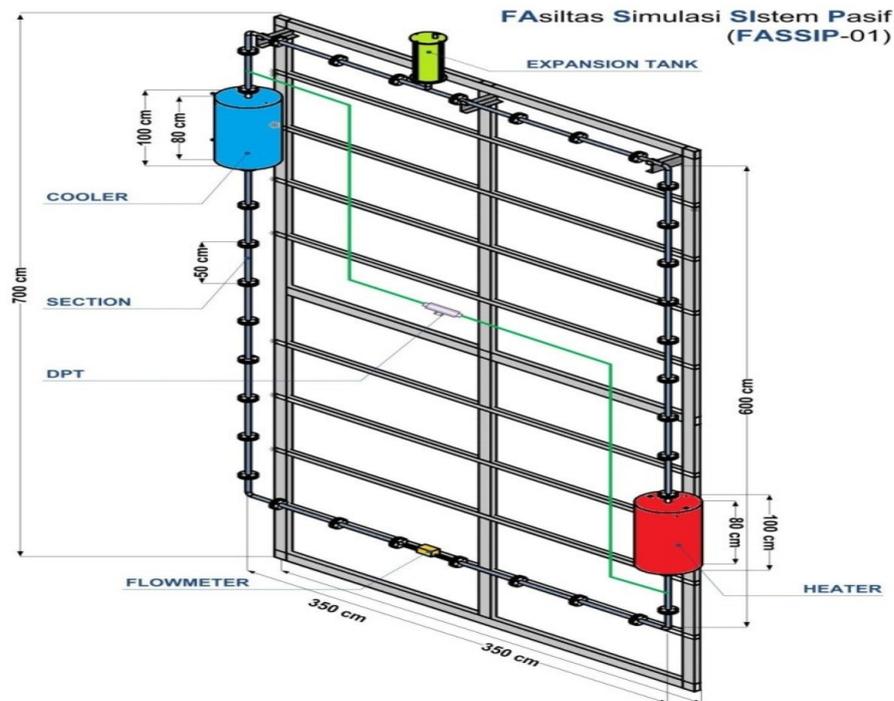
Untuk mempelajari dan menguasai prinsip-prinsip sirkulasi alami dan kegunaannya untuk mendesain reaktor nuklir yang lebih aman, khususnya saat kecelakaan terjadi maka di Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) - BATAN telah dirancang dan dikonstruksi fasilitas eksperimen untuk meneliti fenomena sirkulasi alami yang disebut sebagai Untai Fasilitas Simulasi Sistem Pasif versi 01 (FASSIP-01). Untai FASSIP-01 memiliki dua komponen utama berupa tangki *heater* sebagai pemanas dan tangki *cooler* sebagai pendingin untuk menimbulkan perbedaan densitas air di dalam untai. Tujuan penulisan ini adalah untuk menganalisis unjuk kerja pemanas dan pendingin pada untai FASSIP-01 untuk mendapatkan gambaran awal sebelum dilakukannya eksperimen..

TEORI

Natural circulation atau sirkulasi alami adalah prinsip perpindahan kalor yang digunakan dalam untai uji FASSIP-01 yang berbasis *safe and secure* untuk desain reaktor nuklir. Secara prinsip, sirkulasi alam adalah perpindahan aliran yang terjadi secara alami sebagai hasil dari konstruksi untai uji FASSIP-01 itu sendiri. Tangki pendingin atau *cooler* sebagai sumber “energi dingin” pada FASSIP-01 diletakkan pada posisi yang lebih tinggi

daripada tangki pemanas atau *heater* seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Dengan demikian, maka fluida air yang telah melalui proses penurunan temperatur di dalam *cooler* akan memiliki massa jenis yang lebih besar dari flui-

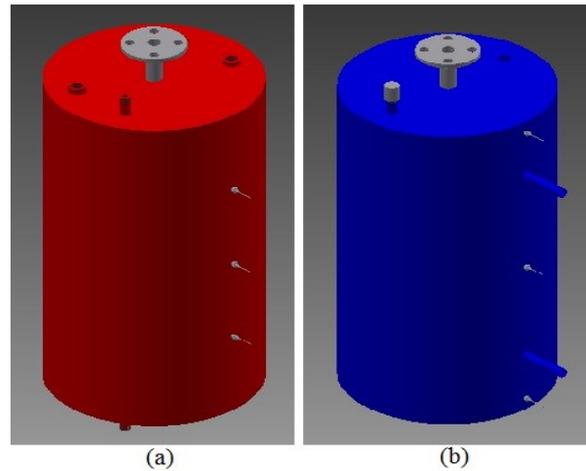
da air pada temperatur normal, sehingga air akan turun mengikuti alur dari untai persegi panjang (*rectangular loop*) menuju *heater* [7].



Gambar 1. Skema konstruksi Untai FASSIP-01

Dalam tangki pemanas, fluida air dengan temperatur yang lebih rendah dari temperatur lingkungan akan dipanaskan dengan temperatur yang diinginkan, karena sebelumnya telah didinginkan di dalam tangki pendingin. Ketika proses pemanasan berlangsung, fluida air akan memiliki densitas yang lebih rendah daripada fluida air pada temperatur lingkungan. Hal itu akan mengakibatkan Bergeraknya fluida air dari *heater* ke atas mengikuti alur dari untai yang berbentuk persegi panjang. Dengan demi-

kian, sirkulasi alam adalah sebuah efek sirkulasi yang disebabkan karena adanya perbedaan massa jenis/densitas yang dimiliki oleh fluida pada kondisi tertentu [2-3]. Sirkulasi alam memiliki keterkaitan dengan gaya gravitasi dan efek *buoyancy* yang menyebabkan fluida air bisa bergerak turun dan terangkat naik [4]. Gambar 2 menunjukkan desain 3D dari komponen *heater* dan *cooler* dalam Untai FASSIP-01.



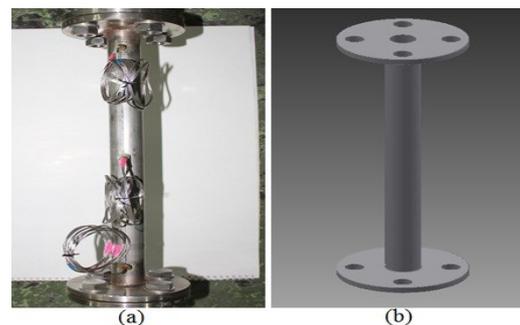
Gambar 2. Ilustrasi gambar (a) tangki *heater* dan (b) tangki *cooler* Untai FASSIP-01

Pada desain tangki pemanas, FASSIP-01 menggunakan komponen *heater* standar yang terendam dalam air di dalam tangki *heater* dengan daya maksimal hingga 5000 W/240 V. Daya maksimum tersebut tidak semuanya langsung di uji cobakan dalam eksperimen menggunakan Untai FASSIP-01, melainkan dikendalikan dengan menggunakan sebuah *voltage regulator*. Ketika tuas kendali dioperasikan secara penuh, maka secara otomatis daya yang disuplai tidak sampai 5000 W. Terdapat 4 unit komponen *heater* yang dipasang di dalam tangki pemanas, sehingga total akan ada 20 kW yang digunakan untuk memanaskan fluida air pada tangki pemanas dengan diameter = 16 inch, tinggi = 800 mm, dan tebal = 4mm [7]. Untuk desain tangki pendingin, proses pendinginan dilakukan dengan bantuan refrigerator yang disambung menggunakan pipa inlet dan outlet ke tangki pendingin. Refrigerator yang digunakan berkapasitas 2 PK, dengan fluida pendingin (*refrigerant*) R22.

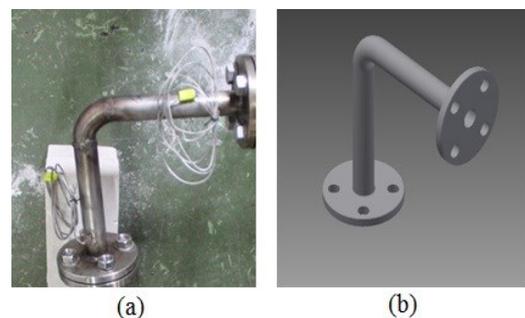
Pengoperasian untai uji FASSIP juga dilengkapi dengan beberapa komponen lain yang penting, yaitu:

- Komponen utama

Segmen perpipaan dengan dimensi $L = 50$ cm, diameter = 1 inch (Sch 20) dan *elbow section* Section Bend 90° $L = 50$ cm, seperti ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.

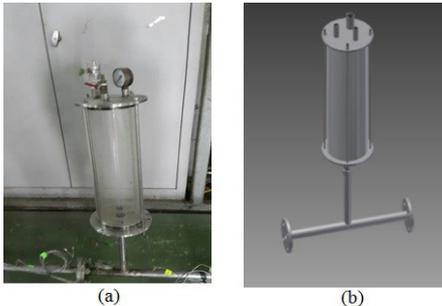


Gambar 3. Segmen (a) perpipaan lurus dan (b) desain 3D



Gambar 4. Segmen (a) perpipaan belok 90° dan (b) desain 3D

Tangki ekspansi untuk mengkompensasi kelebihan tekanan ataupun volume fluida yang mungkin terjadi dengan dimensi diameter = 6 inch, tinggi = 490 mm, tinggi dengan flens = 510 mm dan diameter flens = 20mm) seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

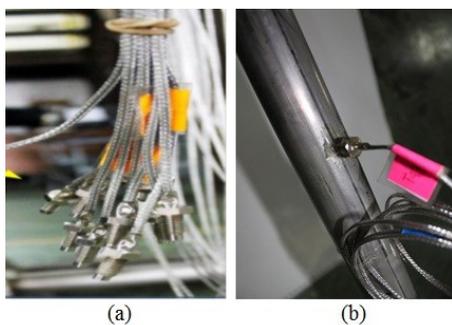


Gambar 5. Desain (a) tangki ekspansi dan (b) desain 3D

Support untuk menunjang berdirinya untai persegi panjang yang terdiri dari campuran besi-karbon dengan dimensi tinggi = 700 cm, lebar = 350 cm dalam bentuk U 10x5 cm dan 5x3 cm.

- **Komponen Penunjang/Alat Ukur**

Thermocouples sebagai piranti pengukur temperatur di seluruh titik yang dipasang seperti perpipaan, tangki pendingin, dan tangki pemanas seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. (a) Thermocouple Type K untai FASSIP dan (b) contoh pemasangan

Differential Pressure Transmitter (DPT) untuk mengukur beda tekanan pada outlet tangki pendingin dan outlet tangki pemanas karena pengaruh proses perpindahan panas seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. *Differential Pressure Transmitter* untai FASSIP-01

Flowmeter sebagai pengukur laju alir yang mengalir di sepanjang untai pendingin. Alat ini dipasang pada bagian bawah untai karena diperkirakan terjadi aliran pendingin paling besar ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Flowmeter pada FASSIP-01

Voltage Regulator sebagai pengendali daya pada komponen *heater* yang berada di dalam tangki pemanas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Komponen *heater* berada di dalam air agar kalor yang hilang dapat ditekan seminim mungkin.



Gambar 9. Voltage Regulator pada FASSIP-01

HASIL DAN PEMBAHASAN

Fluida air yang berada di dalam tangki pemanas ataupun pendingin akan memberikan dampak tersendiri bagi masing-masing proses yang terjadi selama berlangsungnya eksperimen. Proses pemanasan (peningkatan temperatur) terjadi pada tangki pemanas sementara proses pendinginan (penurunan temperatur) terjadi pada tangki pendingin. Proses pemanasan tangki pemanas dengan menaikkan daya listrik yang dikendalikan oleh voltage regular hingga mencapai temperatur yang ditentukan. Dalam perencanaan prosedur operasi lama waktu kenaikan perlu dipertimbangkan. Berikut adalah perkiraan waktu optimal yang dibutuhkan untuk proses pemanasan dan pendinginan pada eksperimen di untai FASSIP-01.

Perhitungan waktu pemanasan pada komponen heater

Diketahui bahwa volume tangki pemanas = 103,7 liter dengan massa air di dalamnya = 103,7 kg (asumsi fluida didalam yang mampu dipanaskan 100 kg), kalor jenis air = 4200 Joule/Kg °C, asumsi temperatur awal = 25 °C, dan asumsi temperatur akhir = 75 °C. Kalor yang diterima oleh fluida air dalam tangki pemanas dihitung dengan persamaan berikut ^[8]:

$$q = mc_p \Delta T \dots\dots\dots (1)$$

Sehingga:

$$Q = 100 \text{ kg} \times 4200 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} \times (75 - 25 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$Q = 2100 \text{ kJ}$$

Untuk menghitung waktu yang optimal untuk mencapai temperatur 75 °C, maka dapat dihitung dengan persamaan kalor yang dilepas oleh komponen heater $q_{dilepas}$ melalui rumus dasar perpindahan kalor berikut ^[8].

$$q_{dilepas} = \frac{Q_{diterima}}{t} \dots\dots\dots (2)$$

Sehingga

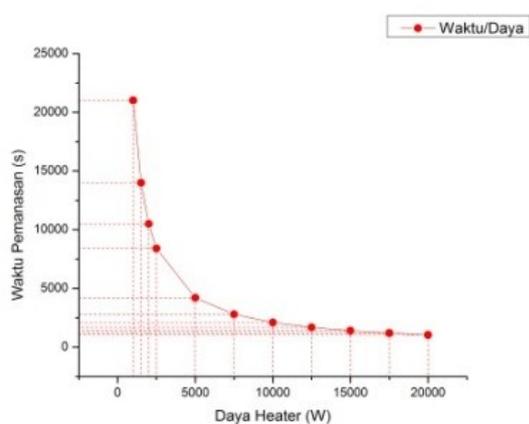
$$t = \frac{Q_{diterima}}{q_{dilepas}} \dots\dots\dots (3)$$

Bila kalor yang diterima oleh fluida air divariasikan sesuai dengan daya heater sebanyak 11 varian nominal, maka waktu optimum yang diperoleh ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 1. Waktu pemanasan air dengan variasi daya heater

Daya total heater (Watt)	Daya 1 heater (Watt)	Waktu pemanasan (detik)
1000	250	29400
1500	375	19600
2000	500	14700
2500	625	11760
5000	1250	5880
7500	1750	3920
10000	2500	2940
12500	3125	2352
15000	3750	1960
17500	4375	1680
20000	5000	1470

Gambar 10 berikut menunjukkan grafik perbandingan variasi daya heater dengan waktu pemanasan yang diperoleh dengan perhitungan di atas.



Gambar 10. Grafik perbandingan variasi daya heater dengan waktu pemanasan air

Terlihat adanya hubungan antara daya heater dengan waktu penerimaan kalor dimana bila heater bekerja dengan daya yang besar maka waktu yang dihasilkan pun akan menjadi semakin cepat. Perhitungan perpindahan kalor diasumsikan dianggap pada kondisi adiabatik dan pola perpindahan kalor terjadi secara 1 dimensi.

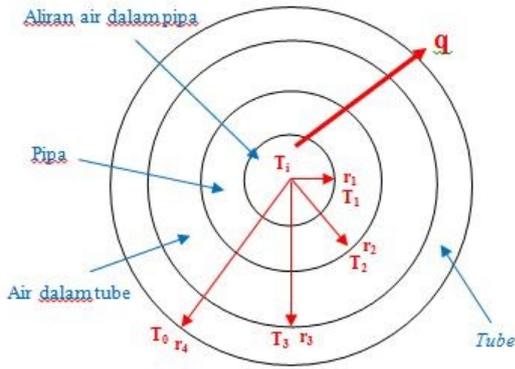
Perhitungan waktu pendinginan pada tangki pendingin

Diketahui bahwa volume tangki pendingin = 103,7 liter dengan massa air = 103,7 kg (asumsi fluida didalam yang mampu didinginkan 100 kg), kalor jenis air = 4200 Joule/Kg °C, asumsi temperatur awal = 28 °C (asumsi temperatur ruang), dan asumsi temperatur akhir = 20 °C. Energi kalor yang dilepas oleh fluida air dalam tangki pendingin dihitung dengan persamaan (1), sehingga $Q = 100 \text{ kg} \times 4200 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} \times (28 - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) = 3360 \text{ kJ}$

Nilai nominal 3360 kJ di atas adalah energi kalor minimal yang harus dilepas oleh air di dalam tangki pendingin untuk dapat menurunkan temperatur dari 28 °C menjadi 20 °C.

Menghitung kalor yang diserap oleh refrigerator

Perhitungan penyerapan kalor dideksripsikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11. Pipa berada diantara air dengan ketebalan tertentu untuk mendinginkan pipa tersebut.



Gambar 11. Skematik Aliran Kalor pada Fluida

Berdasarkan gambar di atas, diketahui spesifikasi berikut:

- $r_1 = 0,375 \text{ inch} = 0,009525 \text{ m}$
- $r_2 = 0,525 \text{ inch} = 0,01335 \text{ m}$
- $Q = 204 \text{ ml/detik}$ (*flowmeter*)
- $r_3 = 0,0488 \text{ m}$
- $r_4 = 2 \text{ inch} = 0,0508 \text{ m}$
- $L = 800 \text{ mm} = 0,8 \text{ m}$

Perhitungan hambatan thermal dilakukan dengan cara berikut:

a. Menghitung hambatan termal pada air di dalam pipa dengan persamaan berikut:

$$R_A = \frac{1}{h_i A} \dots\dots\dots (4)$$

Dimana h_i adalah koefisien perpindahan kalor pada aliran air di dalam pipa dan dicari berdasarkan sifat-sifat air pada temperatur rerata 28°C yaitu:

- $\rho = 995,58 \text{ kg/m}^3$
- $k = 0,616 \text{ Pr} = 5,68 \text{ Watt/m}^\circ\text{C}$
- $\mu = 8,37 \times 10^{-4} \text{ kg/m.detik}$

Koefisien perpindahan kalor h_i dihitung dengan persamaan berikut:

$$h_i = Nu \frac{k}{d} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana Nu adalah bilangan *Nusselt* dan bergantung pada jenis aliran air apakah laminar atau turbulens. Untuk itu perlu dihitung bilangan Reynolds atau Re dengan persamaan berikut:

$$Re = \rho \frac{vd}{\mu} \dots\dots\dots (6)$$

Langkah pertama adalah menghitung kecepatan aliran, dimana $Q = 204 \text{ ml/detik}$ atau $0,000206 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan radius pipa $r_i = 0,009525 \text{ m}$. Kecepatan aliran dihitung dengan:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,000206}{\pi \cdot 0,009525^2} = 0,723 \text{ m/detik}$$

Sehingga bilangan Reynold adalah:

$$Re = \rho \frac{vd}{\mu} = 995,58 \frac{0,723 \times 0,01905}{8,37 \times 10^{-4}} = 16383$$

Yang berarti aliran tersebut adalah turbulens, maka rumus untuk mencari bilangan *Nusselt* adalah:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \dots\dots\dots (7)$$

Sehingga $Nu = 108,4$

Dengan demikian h_i pada aliran air berdasarkan (5) adalah : $3505 \text{ Watt/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, sehingga hambatan termal R_A pada air berdasarkan (4) adalah: $5,959 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/Watt}$.

- b. Tahanan termal pada pipa dihitung dengan persamaan berikut:

$$R_B = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_p L} \dots\dots\dots (8)$$

Dimana k_p adalah konduktivitas termal pada pipa *stainless-steel* 304 yaitu 16,3 W/m.°C, sehingga $R_B = 4,120 \times 10^{-3}$ °C/Watt.

- c. Tahanan termal pada air di dalam *tube* dihitung dengan persamaan berikut:

$$R_C = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_a L} \dots\dots\dots (9)$$

Dimana k_a adalah konduktivitas termal untuk air yaitu 0,616 W/m.°C karena diasumsikan air dalam kondisi diam di dalam *tube* dan terjadi perpindahan kalor secara konduksi, sehingga $R_C = 0,419$ °C/Watt.

- d. Tahanan termal di dalam *tube* R_D dihitung dengan persamaan (8) dengan diameter berbeda, sehingga $R_D = 4,902 \times 10^{-4}$ °C/Watt.

Setelah semua nilai hambatan termal diperoleh, maka nilai perpindahan kalor atau kalor yang diserap refrigerator dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$q = \frac{\Delta T}{\Sigma R_{th}} = \frac{T_i - T_o}{R_A + R_B + R_C + R_D} \dots\dots\dots (10)$$

Bila diasumsikan temperatur yang harus diturunkan oleh refrigerator adalah 28 °C (T_i) menuju nilai 2 °C (T_o), maka $q = 60,53$ Watt.

Perhitungan waktu pendinginan pada tangki pendingin oleh refrigerator

Persamaan dasar perpindahan kalor

pada tangki pendingin adalah:

$$q_{serap} = \frac{Q_{lepas} \text{ (Joule)}}{\text{Waktu (s)}} \dots\dots\dots (11)$$

Sehingga waktu optimal yang dibutuhkan untuk mendinginkan air dengan kalor yang dilepas oleh air dengan asumsi temperatur 20°C dan diserap *refrigerator* hingga temperatur 2 °C adalah:

$$t = 3360000 \text{ Joule} / 60,53 \text{ Watt} = 180406,41 \text{ detik} = \pm 15 \text{ jam.}$$

KESIMPULAN

Variasi dari kuantitas daya yang dibangkitkan oleh *heater* pada untai uji FASSIP-01 akan menentukan cepat lambatnya proses perpindahan panas pada air di dalam tangki pemanas. Dengan daya total 20 kW dari *heater*, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur air 75 °C adalah sekitar 0,48 jam. Begitu juga dengan kinerja refrigerator dan tangki pendingin, walaupun belum ada perbandingan hasil pengujian dan hanya dengan satu titik kalor serap, terlihat bahwa ketika kalor yang diserap oleh refrigerator pada proses pendinginan semakin besar maka waktu pendinginan optimal akan semakin cepat tercapai.

DAFTAR PUSTAKA

1. <http://news.softpedia.com/news/Earthquake-Damages-Japanese-Nuclear-Reactors-189294.shtml>, diakses pada tanggal 23 Agustus 2016.
2. J. LIM, J. YANG, S.W. CHOI, D.Y. LEE, S. RASSAME, T. HIBIKI, M. ISHII, "Assesment of Passive Safety System

- Performance Under Gravity Driven Cooling System Drain Line Break Accident”, *Progress in Nuclear Energy* 74 (2014) 136-142.
3. LU DAOGANG, ZHANG XUN, GUO CHAO, “Stability Analysis for Single-phase Liquid Metal Rectangular Natural Circulation Loops”, *Journal of Annals of Nuclear Energy* 73 (2014) 189–199.
 4. P. K. VIJAYAN, H. AUSTREGESILO, “Scaling Laws for Single-phase Natural Circulation Loops”, *Journal of Nuclear Engineering and Design* 152 (1994) 331-347.
 5. P. K. VIJAYAN, M. SHARMA, D. SAHA, “Steady State and Stability Characteristic of Single-Phase Natural Circulation in a Rectangular Loop with Different Heater and Cooler Orientations, *Experiment Thermal and Fluid Science* 31 (2007) 925-945.
 6. J. Y. WANG, T. J. CHUANG, Y.M. FENG, “CFD Investigating Flow and Heat Transfer Characteristic a Natural Circulation Loop”. *Annals of Nuclear Energy* (2013) 65-71.
 7. M. JUARSA, “Studi Eksperimental Fenomena Sirkulasi Alamiah Aliran Satu-Fasa untuk Pengembangan PRHRS Menggunakan Untai FASSIP”, *Usulan Penelitian Tahun 2015, Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir BATAN*, 2015.
 8. J.P. HOLMAN, “*Perpindahan Kalor*”, Penerbit Erlangga, Edisi keenam, 1995.