

Karakteristik energi internal penukar kalor berdasarkan variasi suhu pemanas sirkulasi alam untai uji FASSIP-02

Giarno¹, G. B. Heru K.¹, Ainur Rosidi¹, Dedy Haryanto¹, Adhika E. P.¹, Mulya Juarsa¹

¹Pusat Riset dan Teknologi Reaktor, Keselamatan dan Keamanan Nuklir (PRTRKKN), Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Kawasan Puspiptek Serpong, Gedung 80, Tangerang Selatan, Banten 15310
Email korespondensi: giarno@batan.go.id

Abstrak

Kecelakaan PLTN di Fukushima Dai-ichi, Jepang, pada tahun 2011 telah menunjukkan kegagalan sistem pendingin aktif (pompa) untuk mendinginkan reaktor, yang memicu kajian terkait penerapan sistem pendingin pasif (tanpa pompa) untuk pengembangan manajemen keselamatan di PLTN. Kajian tentang laju aliran sirkulasi alami sebagai dasar sistem pendingin pasif telah dilakukan sejak tahun 2011 di PRTRKKN dengan menggunakan fasilitas eksperimental skala besar yang disebut uji loop FASSIP-02. Fasilitas ini memiliki sistem penukar panas tipe U di tangki pendinginnya, yang merupakan bagian penting dari proses pembuangan ke lingkungan. Dengan demikian, kajian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan energi yang terjadi pada penukar panas selama kondisi tunak. Kajian dilakukan secara eksperimental, dan perhitungan perubahan energi dalam dilakukan dengan menggunakan data suhu dan variasi laju aliran sirkulasi alami yang terjadi pada variasi suhu pada bagian pemanasan yaitu 40°C, 50°C, dan 60°C. Data perbedaan suhu diperoleh dari suhu masuk dan keluar pada heat exchanger dengan menjaga kondisi steady selama 5 jam dari total waktu percobaan 24 jam. Hasil percobaan menunjukkan bahwa perubahan energi dalam meningkat seiring dengan laju aliran sirkulasi alam yang terjadi.

Kata kunci: energi internal, penukar panas bentuk U, sirkulasi alami, tangki pendingin, uji loop FASSIP-02.

Abstract

The nuclear power plant accident in Fukushima Dai-ichi, Japan, in 2011 has shown the failure of the active cooling system (pump) to cool the reactor, which triggers research related to applying passive cooling systems (without pumps) to developing nuclear power plant safety management. Research on natural circulation flow rates as the basis for passive cooling systems has been carried out since 2011 at PRTRKKN using a large-scale experimental facility called FASSIP-02 test loop. The facility has a U-type heat exchanger system in its cooling tank, which is an essential part of the discharge process to the environment. Thus, this study aims to analyze the energy changes that occur in the heat exchanger during steady conditions. The research was carried out experimentally, and the calculation of internal energy changes was done using temperature data and the variations of the natural circulation flow rate that occurred at temperature variations in the heating section, namely 40°C, 50°C, and 60°C. The temperature difference data was obtained from the inlet and outlet temperatures in the heat exchanger by maintaining steady conditions for 5 hours out of 24 hours total experimental time. The experimental results show that the change in internal energy increases with the flow rate of the natural circulation that occurs.

Keywords: internal energy, U-shape heat exchanger, natural circulation, cooling tank, FASSIP-02 test loop.

1. Pendahuluan

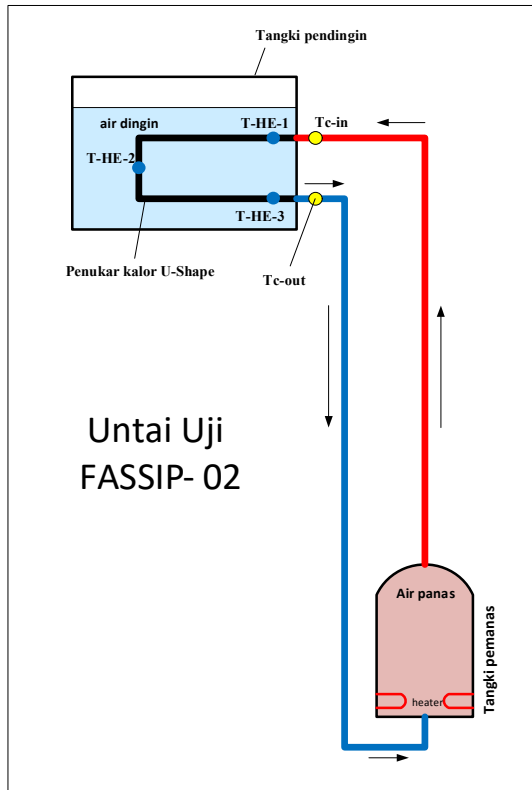
Belajar dari pengalaman kecelakaan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) di Fukushima, Dai-ichi, Jepang tahun 2011 ketika sistem pendingin aktif (pompa) gagal dalam pendinginan reaktor, memicu studi terkait aplikasi sistem pendingin pasif (tanpa pompa) dalam peningkatan manajemen keselamatan PLTN [3],[10]. Kajian terkait laju aliran sirkulasi alam sebagai dasar dari sistem pendingin pasif telah dilakukan sejak tahun 2011 oleh Juarsa dkk [5]. Fasilitas eksperimen skala besar diberi nama untai uji Fasilitas Simulasi Sistem Pasif-02 (FASSIP-02) adalah salah satu fasilitas untuk mempelajari aliran sirkulasi alam akibat adanya gaya apung *bouyancy* dan gaya gravitasi [2],[9]. Untai FASSIP-02 terdiri dari tangki pendingin dan tangki pemanas yang dihubungkan dengan sistem perpipaan. Sistem

perpipaan dari tangki pemanas terhubung dengan sistem penukar kalor tipe *U-shape* di dalam tangki pendingin [8],[6]. Pengambilan panas oleh penukar kalor yang terendam dalam air pada sistem pendingin pasif adalah kolam yang merendam *heat exchanger* (HE) pada reaktor jenis *small modular reactor* (SMR) [4]. Panas yang dihasilkan dari pengoperasian SMR secara normal maupun pada saat terjadi kejadian anomali, harus dibuang ke lingkungan melalui HE [7]. Air panas yang mengalir secara alami dari tangki pemanas menuju tangki pendingin yang melewati alat penukar kalor tipe *U-shape* pada untai uji FASSIP-02 akan dihitung energi internal yang terjadi pada alat penukar kalor. Tujuan dari kajian ini adalah menganalisis karakteristik energi internal dalam penukar kalor tipe *U-shape* secara eksperimen.

2. Metode

Pengisian air di tangki pendingin setinggi dua meter dan air di untai perpipaan hingga terisi setengah dari volume air di tangki ekspansi.

Pengoperasian komputer dan sistem akuisisi data (DAS) untuk setting suhu di tangki pemanas dan perekaman data suhu sesuai dengan matriks eksperimen. Pengoperasian sistem kelistrikan untuk menjalankan 4 buah heater. Melakukan eksperimen mulai dengan kondisi transien di tangki pemanas hingga tercapai kondisi tunak dipertahankan selama 5 jam dari 24 jam pengambilan data eksperimen atau hingga tercapai suhu di tangki pendingin $\leq 30^{\circ}\text{C}$.



Gambar 1. Skema untai uji FASSIP-02.

Gambar 1 menunjukkan skema penukar kalor U-shape, di mana terjadi perubahan energi internal yang berasal dari air panas yang mengalir secara alami dari tangki pemanas. Besarnya energi internal di dalam penukar kalor U-shape (q_{in-HE}) setiap detik dihitung dengan Persamaan 1 (Holman, 2010).

$$q_{in-HE} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$q_{in-HE} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{C-IN} - T_{C-OUT}) \tag{1}$$

dengan, q_{in-HE} = energi internal HE (W); \dot{m} = laju aliran massa (kg/s), C_p = kapasitas jenis air (J/kg $^{\circ}\text{C}$), ΔT = selisih suhu ($^{\circ}\text{C}$). Laju aliran massa pada Persamaan 1 diperoleh berdasarkan data pengukuran debit alir sirkulasi alami eksperimen selama 10 jam menggunakan flow meter *electromagnetic*. Data debit aliran dikonversi menggunakan Persamaan 2.

$$\dot{m} = \rho Q \tag{2}$$

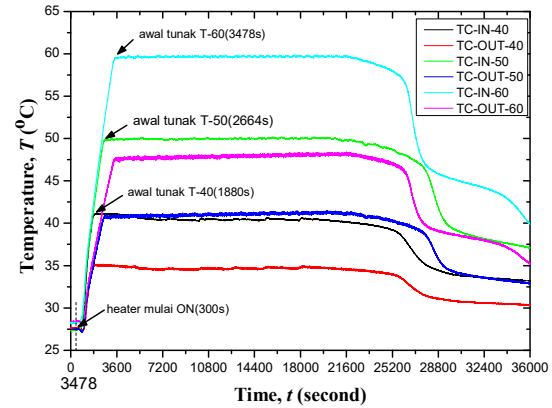
Di mana untuk densitas air dan kapasitas jenis air merupakan fungsi dari perubahan suhu yang ditunjukkan dengan Persamaan 3 dan 4 [1].

$$C_p(T) = 4073.51 + 0.0000021e^{\left(\frac{T}{16.23}\right)} + 61.93e^{\left(\frac{T}{98.39}\right)} \tag{3}$$

$$\rho(T) = 1004.79 - 0.0463(32 + 1.8T) - 0.00079(32 + 1.8T)^2 \tag{4}$$

3. Hasil dan Pembahasan

Data hasil pengukuran diperoleh distribusi suhu yang masuk dan keluar penukar kalor U-shape selama 10 jam. Data tersebut dibuat grafik hubungan distribusi suhu T_{C-IN} dan T_{C-OUT} selama eksperimen menggunakan *software* Origin 8.0, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kurva distribusi suhu selama eksperimen.

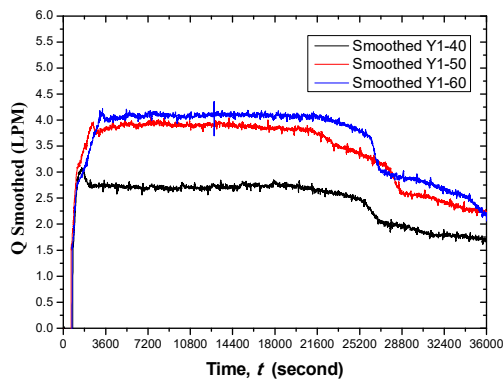
Pembacaan grafik pada Gambar 2, diperoleh kurva distribusi temperatur T_{C-IN} dan T_{C-OUT} untuk pengaturan suhu di tangki pemanas 40°C , 50°C dan 60°C selama eksperimen. Heater ketika mulai menyala, kurva T_{C-IN} untuk semua variasi suhu tidak langsung naik, tetapi mendatar dahulu, lalu naik lebih tegak dibandingkan dengan kurva T_{C-OUT} yang naik lebih landai. Ketiga kurva T_{C-IN} pada saat kondisi transien terlihat saling berhimpit untuk semua variasi pengaturan suhu, begitu juga dengan kurva T_{C-OUT} terlihat berhimpit. Waktu yang dibutuhkan heater untuk proses pemanasan air mulai heater menyala hingga kondisi tunak, dapat ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Waktu kondisi transien.

No.	Setting Temperatur di tangki pemanas, T ($^{\circ}\text{C}$)	Waktu, t (detik)
1	40	1580
2	50	2364
3	60	3178

Tabel 1 menunjukkan waktu yang dibutuhkan *heater* untuk memanaskan air dalam tangki pemanas (kondisi transien), *heater* mulai menyala hingga tercapai suhu awal kondisi tunak. Kondisi tunak dipertahankan selama 5 jam dan berakhir setelah *heater* mati, kemudian eksperimen dibiarkan selama 24 jam untuk pendinginan. Waktu pemanasan air yang tercepat terlihat dari Tabel 1 yaitu selama 1580 detik (26,3 menit) pada pengaturan suhu 40°C dan terlama 3178 detik (53,0 menit) pada pengaturan suhu 60°C. Data dari hasil pembacaan grafik, terlihat semakin besar pengaturan suhu di tangki pemanas, maka semakin lama waktu yang dibutuhkan *heater* untuk memanaskan air hingga tercapai kondisi tunak.

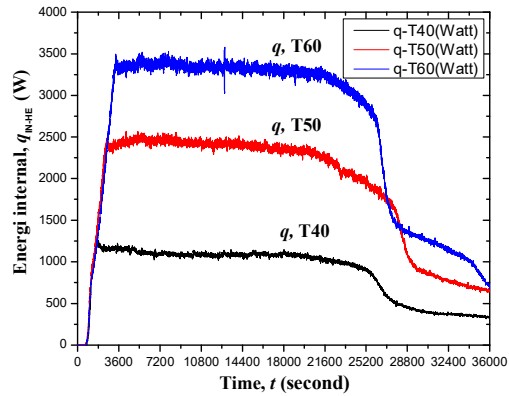
Data hasil pengukuran debit aliran (Q) menggunakan flow meter *electromagnetic* selama eksperimen dalam bentuk LPM, lalu dibuat grafik dengan *software* Origin 8.0, dan nilai Q yang sudah *smoothed*, dibuat grafik seperti ditunjukkan Gambar 3.



Gambar 3. Kurva debit aliran smoothed selama 10 jam.

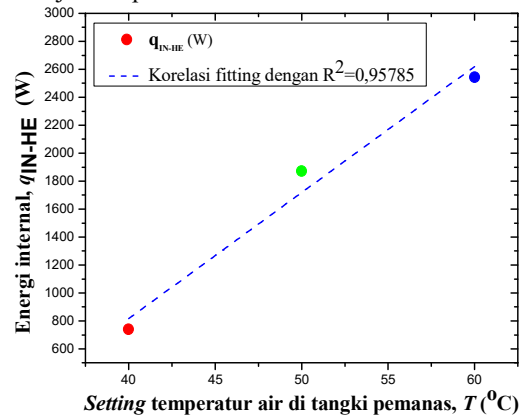
Gambar 3, menunjukkan kurva nilai Q yang sudah *smoothed*, dan kurva nilai Q pada kondisi transien terlihat berhimpit, tetapi pada kondisi tunak, kurva pada pengaturan suhu 50°C dan 60°C lebih dekat dibandingkan dengan 40°C yang terlihat jauh berada di bawah.

Data hasil pengukuran suhu yang masuk dan keluar penukar kalor *U-shape* dan debit aliran dari eksperimen menggunakan untai uji FASSIP-02, akan dilakukan perhitungan perubahan energi internal pada penukar kalor *U-shape* (q_{IN-HE}) dengan menggunakan Persamaan 1. Nilai laju aliran massa dihitung menggunakan Persamaan 2 dengan nilai ρ dari Persamaan 4 dan besarnya Q yang sudah *smoothed*. Nilai kapasitas jenis dihitung menggunakan Persamaan 3. Hasil perhitungan q_{IN-HE} dibuat grafik, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva perubahan energi internal selama eksperimen.

Gambar 4, menunjukkan kurva nilai q_{IN-HE} selama 10 jam untuk tiga variasi pengaturan suhu di tangki pemanas. Ketiga kurva pada saat kondisi transien terlihat berhimpit, hal tersebut menunjukkan nilai perubahan energi internal pada saat transien memiliki karakteristik yang sama. Kurva q_{IN-HE} pengaturan suhu 40 °C pada kondisi tunak, terlihat paling kecil fluktuasinya dibandingkan dengan yang lain. fenomena itu menunjukkan semakin rendah pengaturan suhu di tangki pemanas, kestabilan laju aliran fluida lebih stabil. Kurva pendinginan setelah *heater* mati, terlihat energi internal dengan pengaturan suhu 60°C, lebih cepat turun dibanding yang lain. Hubungan korelasi perubahan energi internal penukar kalor *U-shape* terhadap pengaturan suhu di tangki pemanas dibuat grafik, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik hubungan perubahan energi internal selama eksperimen.

Gambar 5 menunjukkan hubungan korelasi *fitting* dari kedua variabel di atas ditunjukkan oleh Persamaan 5, sebagai berikut:

$$q = -2789,34 + 90,16 \cdot x \tag{5}$$

Persamaan 5 diperoleh dari *fitting* perubahan energi internal di penukar kalor tipe *U-shape* rata-rata terhadap variasi laju aliran sirkulasi alami dengan pengaturan suhu 40°C, 50°C dan 60°C di tangki

pemanas dengan tingkat kepercayaan sebesar $R^2=0,95785$. Sehingga korelasi ini dapat digunakan untuk memprediksi energi internal rata-rata pada penukar kalor tipe *U-shape* untuk rentang suhu air dalam tangki pemanas dari 30°C hingga 99°C (dalam kondisi cair).

4. Kesimpulan

Karakteristik energi internal pada penukar kalor tipe *U-shape* berdasarkan variasi suhu pemanas sirkulasi alam adalah linier. Variasi suhu kondisi tunak di tangki pendingin menunjukkan semakin tinggi suhu, semakin besar energi internal penukar kalor di *U-shape*, di mana kenaikan energi internal dari pengaturan suhu di tangki pemanas 40°C hingga 60°C naik sebesar 32%.

Ucapan Terima Kasih

Kajian ini didanai oleh RISPRO LPDP Mandatori PRN PLTN nomor kontrak: 3/E1/III/PRN/2021 dan kepala PRTRKKN serta rekan BPFKR.

Daftar Pustaka

- [1] Allen Crabtree, M. S.-T. (1993). Thermophysical Properties of Saturated Light and Heavy Water for Advanced Neutron Source Applications.
- [2] Antariksawan, A. R., Widodo, S., Juarsa, M., Haryanto, D., & Putra, M. H. K. and N. (2018). SIMULATION OF OPERATIONAL CONDITIONS OF FASSIP-02 NATURAL CIRCULATION COOLING SYSTEM EXPERIMENTAL LOOP. *Indonesian Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 19(February 2018), 41–54.
- [3] Choi, J. H. (2012). Passive safety systems in advanced water cooled reactors. In 11th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference and the Annual European Safety and Reliability Conference 2012, PSAM11 ESREL 2012 (Vol. 3).
- [4] Ingersoll, D. T., Houghton, Z. J., Bromm, R., & Desportes, C. (2014). NuScale small modular reactor for Co-generation of electricity and water. *Desalination*, 340(1), 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.023>
- [5] Juarsa, M., Purba, J. H., Kusuma, H. M., Setiadipura, T., & Widodo, S. (2014). Preliminary study on mass flow rate in passive cooling experimental simulation during transient using NC-queen apparatus. *Atom Indonesia*, 40(3), 141–147. <https://doi.org/10.17146/ajj.2014.333>
- [6] Kusumah, A. S., Hakim, I. I., Sukarno, R., Rachman, F. F., & Putra, N. (2019). The application of u-shape heat pipe heat exchanger to reduce relative humidity for energy conservation in heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems. *International Journal of Technology*, 10(6), 1202–1210. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i6.3650>
- [7] Liu, Y., & Yu, Y. (2013). A T-H model for residual heat removal system reliability analysis. *Energy Procedia*, 39, 283–293. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.215>
- [8] Nandan, A., & Singh, G. (2016). Experimental study of heat transfer rate in a shell and tube heat exchanger with air bubble injection. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 29(8), 1160–1166. <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.08b.16>
- [9] Nergaard, A., Architect, N., & Engineer, P. (2017). The Magic of Buoyancy and Hydrostatics –Buoyancy and Effective Forces. *Modern Applied Science*, 11(12), 77. <https://doi.org/10.5539/mas.v11n12p77>
- [10] Wu, Y. W., Su, G. H., Qiu, S., & Tian, W. (2012). Development of a thermal-hydraulic analysis software for a passive residual heat removal system. *Annals of Nuclear Energy*, 48, 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.05.012>