

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH BEBAN KALOR TERHADAP UNJUK KERJA TERMAL MODEL *LOOP HEAT PIPE*

Aziz Yudha Nugraha¹, Mukhsinun Hadi Kusuma^{2*}, Giarno², Wardoyo¹

¹Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Negeri Jakarta, Jakarta Timur, 13220, Indonesia

²Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), Gedung 80, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan, 15314, Indonesia

*Email: luluikal@batan.go.id

ABSTRAK

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH BEBAN KALOR TERHADAP UNJUK KERJA TERMAL MODEL *LOOP HEAT PIPE*. Sistem pendingin pasif diperlukan sebagai redundan apabila sistem pendingin aktif pada instalasi nuklir mengalami kegagalan operasi. Konsep teknologi sistem pendinginan pasif yang potensial digunakan dalam menyerap dan membuang kalor dengan baik adalah *loop heat pipe* (LHP). Diharapkan LHP menjadi solusi manajemen termal dalam keselamatan pengoperasian instalasi nuklir. Tujuan studi eksperimen ini adalah untuk mengetahui fenomena perpindahan kalor yang terjadi di dalam model LHP dan bagaimana unjuk kerja termalnya dalam menyerap dan melepas kalor. Metode yang digunakan adalah dengan melakukan eksperimen model LHP pada variasi beban kalor sebesar 35°C, 45°C, 55°C, dan 65°C. Hasil studi eksperimen menunjukkan bahwa didapatkan fenomena *overshoot*, *zigzag*, dan *stable* seperti fenomena umum perpindahan kalor yang terjadi pada LHP dengan nilai hambatan termal terkecil sebesar 0,0017 °C/W, yaitu diperoleh pada saat model LHP dioperasikan pada beban kalor 65°C. Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi beban kalor yang diterima oleh *evaporator* menyebabkan semakin kecilnya nilai hambatan termal model LHP.

Kata kunci: Beban kalor *evaporator*; *Filling ratio*; *Loop heat pipe*; Sistem pendingin pasif; Instalasi nuklir.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF HEAT LOAD ON THE THERMAL PERFORMANCE OF A LOOP HEAT PIPE MODEL. Passive cooling system is required as redundant if the cooling system is active on the installation of nuclear experiencing the failure of the operation. Concept technology system of the passive cooling potential is used to absorb and get rid of the heat by better is a loop heat pipe (LHP). Expected LHP be a solution to thermal management in the safety operation of the nuclear installation. The purpose of this experimental study is to investigate the phenomenon of heat transfer that occurs in the model of the LHP and how the performance of the thermal in absorbing and removing heat. The method used is to do an experiment model of the LHP in the variation of heat load at 35°C, 45°C, 55°C, and 65°C. The results of the experimental study show that the obtained phenomenon of *overshoot*, *zigzag*, and *stable* as a common phenomenon of heat transfer that occurs in the LHP with the value of the thermal barriers of the smallest of 0,0017 °C/W, which is obtained at the time of model LHP operated at a heat load of 65°C. The conclusion of this research shows that the higher the heat load received by the evaporator causes the small resistance value of the thermal model of the LHP.

Key words: Evaporator heat load; *Filling ratio*; *Loop heat pipe*; Passive cooling system; Nuclear installations.

PENDAHULUAN

Keselamatan merupakan aspek penting dalam pengoperasian instalasi nuklir. Pada dasarnya, instalasi nuklir pada era modern ini sudah mulai mengeliminasi penggunaan sistem pendingin aktif sebagai sistem keselamatan utama, dan digantikan dengan sistem pendingin pasif sebagai redundan untuk menggantikan peran sistem pendingin aktif tersebut. Salah satu konsep teknologi sistem pendinginan pasif yang berpotensi digunakan dalam menyerap dan membuang kalor ketika sistem pendingin aktif mengalami kegagalan operasi adalah *loop heat pipe* (LHP) [1]. Teknologi LHP sebagai sistem pendingin pasif di instalasi nuklir masih dalam uji skala laboratorium.

Loop heat pipe merupakan salah satu jenis *heat pipe* yang berbentuk pipa melingkar dan bekerja secara pasif. [2]. LHP memiliki kemampuan menyerap dan membuang kalor yang lebih besar jika dibandingkan dengan *heat exchanger* konvensional. Hal ini terbukti dalam penggunaannya sebagai pendingin pasif pada perangkat elektronik [3]. Pada umumnya, komponen utama dari LHP berupa bagian *evaporator*, *adiabatic* dengan menggunakan sumbu kapiler (*wick*) atau tanpa *wick*, *condenser*, dan di dalamnya diisi dengan fluida kerja cair dengan *filling ratio* tertentu [4]. *Evaporator* merupakan bagian LHP yang digunakan sebagai penyerap kalor, *adiabatic* sebagai jembatan

uap dan kondensat, serta *condenser* sebagai pelepas kalor. *Evaporator* dan *condenser* dihubungkan dengan suatu saluran hasil pendidihan dan saluran cairan hasil kondensasi [5]. *Wick* merupakan komponen pada *heat pipe* yang berfungsi mengoptimalkan kinerjanya dalam proses sirkulasi perpindahan kalor [6]. Fluida kerja cair digunakan sebagai media perpindahan kalor dalam LHP dengan besar *filling ratio* tertentu. *Filling ratio* tersebut merupakan volume keseluruhan bagian *evaporator* yang diisi dengan fluida kerja. Pemberian *filling ratio* di atas jumlah maksimum akan menyebabkan vibrasi pada model LHP akibat ledakan dari pendidihan fluida kerja di *evaporator*. Namun apabila pemberian *filling ratio* di bawah jumlah minimum, akan berakibat pada timbulnya *non-condensable gas* yang menyebabkan berkurangnya kinerja LHP [7]. Fasa yang terjadi pada proses perpindahan kalor LHP yaitu fasa penguapan (evaporasi) dan fasa kondensasi [8].

Ula melakukan penelitian *heat pipe* lurus bertingkat dengan memvariasikan beban kalor sebesar 10 W, 20 W, 30 W, dan 40 W. Dari hasil penelitian dan analisisnya menunjukkan besarnya hambatan termal pada masing-masing beban kalor secara berurutan adalah 0,97 K/W; 0,69 K/W; 0,65 K/W; dan 0,79 K/W. Kesimpulan yang didapatkan bahwa hambatan termal cenderung mengalami penurunan seiring

dengan peningkatan beban kalor yang diterima, namun pada beban kalor 40 W, hambatan termal mengalami peningkatan akibat terbentuknya *nukleat* yang menghambat proses perpindahan panas [9]. Melalui penelitiannya, **Sugita** berpendapat bahwa *heat pipe* dengan material tembaga memiliki kecepatan perpindahan panas yang tinggi dengan nilai konduktivitas beberapa ratus kali dari konduktivitas termal tembaga [10]. **Setyawan et al.** telah melakukan eksperimen *heat pipe* lurus tembaga dengan *wick screen mesh* 300 dan memvariasikan *filling ratio* 40 %, 60 % dan 80 %. Kesimpulan yang didapatkan bahwa unjuk kerja termal terbaik diperoleh pada *filling ratio* 60 % [11].

Zein melakukan eksperimen menggunakan *loop heat pipe* (LHP) dengan sumbu kapiler biomaterial menyimpulkan bahwa LHP merupakan jawaban terhadap tantangan yang berkaitan dengan permintaan teknologi untuk perangkat yang beroperasi dengan suhu tinggi dan memiliki kemampuan mentransmisikan kalor yang efisien [12].

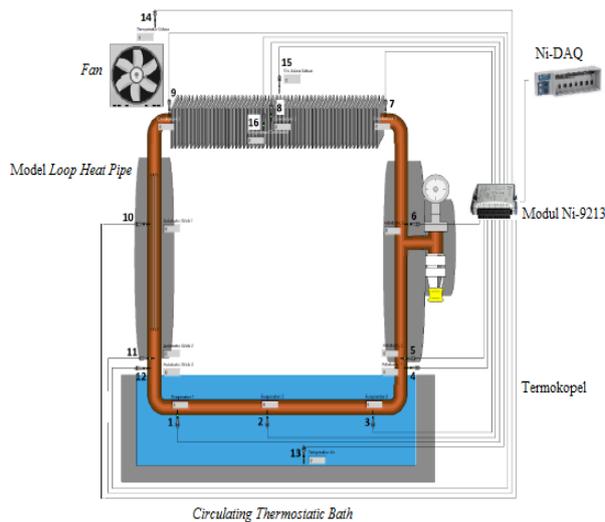
Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *heat pipe* khususnya LHP memiliki potensi yang baik untuk digunakan sebagai teknologi dalam menyerap dan membuang kalor suatu perangkat atau instalasi untuk menjaga integritasnya.

Tujuan studi eksperimen ini adalah untuk mengetahui fenomena perpindahan kalor yang terjadi di dalam model LHP yang dibuat sendiri dan bagaimana unjuk kerja termalnya dalam menyerap dan melepas kalor. Metode yang digunakan adalah dengan melakukan eksperimen model LHP pada variasi beban kalor pada suhu air panas 35°C, 45°C, 55°C, dan 65°C. Fluida kerja di dalam *evaporator* menggunakan air demineral dengan *filling ratio* 200 %. Pembuangan kalor pada bagian *condenser* menggunakan udara dengan laju pendinginan sebesar 2 m/s. Model LHP divakum dengan tekanan sebesar -74 cm Hg.

Penelitian ini penting dilakukan untuk memberikan gambaran awal pengembangan LHP skala besar di instalasi nuklir. Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian penggunaan model LHP sebagai sistem pendingin pasif pada instalasi nuklir yang dilakukan oleh Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional.

METODOLOGI PENELITIAN

Skematik Eksperimen



Gambar 1. Skematik eksperimen model loop heat pipe (LHP)

Keterangan :

- | | |
|-----------------|----------------------|
| 1. Evaporator 1 | 9. Condenser 3 |
| 2. Evaporator 2 | 10. Adiabatic Wick 1 |
| 3. Evaporator 3 | 11. Adiabatic Wick 2 |
| 4. Adiabatic 1 | 12. Adiabatic Wick 3 |
| 5. Adiabatic 2 | 13. Temperatur Air |
| 6. Adiabatic 3 | 14. Temperatur Udara |
| 7. Condenser 1 | 15. Fin Udara Keluar |
| 8. Condenser 2 | 16. Fin Condenser |

Seperti ditunjukkan pada Gambar 1 bahwa model LHP terdiri dari 3 bagian yaitu *evaporator*, *adiabatic*, dan *condenser*. Model LHP dibuat menggunakan pipa dengan material tembaga. Masing-masing bagian *evaporator*, *adiabatic*, dan *condenser* memiliki panjang 300 mm dengan diameter luar sebesar 9,55 mm dan diameter dalam sebesar 8,65 mm. *Evaporator* digunakan sebagai bagian yang menyerap kalor dan tempat menampung fluida kerja dari model LHP. Air demineral digunakan sebagai fluida kerja di

evaporator dengan *filling ratio* 200 %. *Adiabatic* dilapisi dengan salah satu material *insulation* yaitu *Glass wool*. Hal ini bertujuan untuk menjaga suhu pada bagian tersebut tidak mengalami fluktuasi yang dipengaruhi oleh suhu lingkungan.

Pada salah satu bagian *adiabatic* diisi dengan 12 buah *wick* sebagai jalur aliran fluida setelah terkondensasi pada bagian *condenser*. *Wick* yang digunakan adalah pipa dengan material tembaga yang memiliki panjang 200 mm dengan diameter luar sebesar 1,8 dan diameter dalam sebesar 0,5 mm. Pipa-pipa kecil yang dijadikan *wick* tersebut disusun melingkar secara *vertical* di bagian kiri daerah *adiabatic*. Di bagian *condenser*, diletakkan 50 buah sirip (*fin*) dengan material aluminium dan memiliki tebal 1,5 mm.

Circulating thermostatic bath (CTB) yang berisi dengan air panas merupakan sumber beban kalor *evaporator* dengan variasi suhu sebesar 35°C, 45°C, 55°C, dan 65°C. Penggunaan variasi suhu tersebut merefleksikan suhu air kolam setelah reaktor mengalami *shutdown* sehingga menyebabkan kegagalan fungsi pada sistem pendingin aktif. Pada saat eksperimen LHP, beban kalor tersebut akan memanaskan fluida kerja cair yang ada di dalam *evaporator* hingga menjadi uap air.

Udara pendingin dihembuskan pada bagian *fin condenser* dengan laju pendinginan sebesar 2 m/s guna membuang

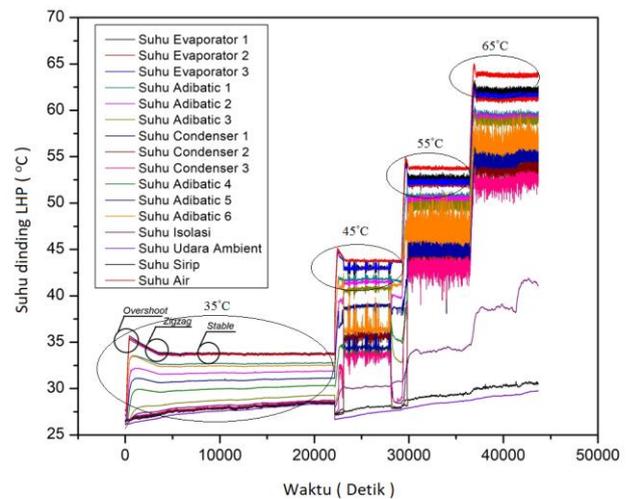
kalor ke lingkungan dan mengubah fluida kerja yang semula berfase uap air menjadi cair dan akan kembali ke bagian *evaporator* dengan memanfaatkan gaya gravitasi.

Data acquisition system dari *National Instrument* digunakan sebagai instrumen untuk melakukan perekaman data suhu. Perekaman data eksperimen dikontrol dengan menggunakan sebuah *virtual instrument* yang dibuat untuk memudahkan perekaman, pembacaan, dan monitoring data suhu yang dihasilkan. Jumlah termokopel yang digunakan sebanyak 16 buah. Tiga buah untuk mengukur suhu pada dinding bagian *evaporator*, tiga buah pada bagian dinding *condenser*, dua buah pada masing-masing dinding bagian *adiabatic*, dua buah pada bagian isolasi *adiabatic*, satu buah pada *fin* dibagian *condenser*, dan satu buah pada *fin* dengan udara pendingin yang keluar dari *condenser*, satu buah untuk suhu air CTB, dan satu buah untuk suhu udara lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Suhu *Transient*

Pengaruh pemberian beban kalor sebesar 35°C , 45°C , 55°C , dan 65°C terhadap distribusi suhu *transient* model *loop heat pipe* (LHP) dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi suhu *transient* model LHP pada pemberian beban kalor sebesar 35°C , 45°C , 55°C , dan 65°C .

Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa fenomena perpindahan kalor yang terjadi pada eksperimen model LHP ini adalah *overshoot*, *zigzag*, *steady*.

Fenomena *overshoot* yaitu keadaan dimana bagian *evaporator* mengalami kenaikan suhu yang disebabkan oleh beban kalor yang diberikan ke *evaporator* secara terus-menerus sehingga fluida kerja cair yang berada di dalam bagian *evaporator* tersebut mengalami proses evaporasi menjadi uap air.

Setelah fenomena *overshoot* terjadi, berikutnya yang terjadi adalah fenomena *zigzag*. *Zigzag* merupakan fenomena dimana uap fluida kerja hasil pemanasan mengalami proses kondensasi. Hal ini terjadi akibat panas dari uap fluida kerja tersebut diserap oleh *fin* dibagian *condenser* yang dialirkan oleh udara pendingin dibuang ke lingkungan sehingga merubah

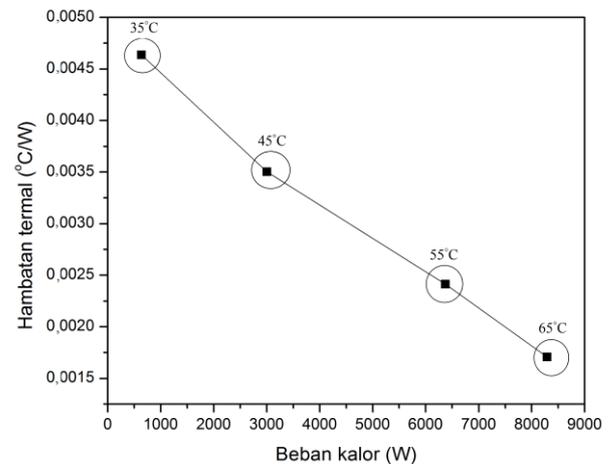
fasa uap fluida kerja tersebut berubah menjadi fasa cair.

Fenomena yang terjadi selanjutnya adalah *stable*. Fenomena *stable* adalah fenomena yang terjadi ketika distribusi suhu pada model LHP mencapai kestabilan secara keseluruhan.

Pada pemberian beban kalor sebesar 35°C, LHP memerlukan waktu selama ±6 jam untuk mencapai keadaan suhu *stable*, dikarenakan jumlah beban kalor tersebut tidak cukup efektif untuk memanaskan fluida kerja di dalam *evaporator* sehingga memperlambat proses perpindahan kalor pada model LHP. Pemberian beban kalor sebesar 45°C, 55°C, dan 65°C berpengaruh pada model LHP dengan waktu sekitar ±1 jam untuk mencapai keadaan *stable*. Hal ini terjadi karena semakin besar beban kalor yang diberikan, siklus perpindahan panas pada fluida kerja cair di dalam *evaporator* semakin cepat dalam menyerap dan membuang panas, sehingga akan berpengaruh pada waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan *stable*. Untuk beban kalor 65°C, terdapat perbedaan distribusi suhu dikarenakan pada saat beban kalor tersebut telah mencapai keadaan optimal dari kinerja model LHP tersebut. Dari analisa tersebut, disimpulkan bahwa kenaikan beban kalor berpengaruh pada waktu kinerja model LHP untuk mencapai keadaan *stable*.

Hambatan Termal

Pengaruh beban kalor sebesar 35°C, 45°C, 55°C, dan 65°C terhadap hambatan termal model *loop heat pipe* (LHP) dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hambatan termal model LHP pada beban kalor 35°C, 45°C, 55°C, dan 65°C

Gambar 3 menunjukkan bahwa setiap kenaikan beban kalor menghasilkan semakin kecilnya nilai tahanan termal. Hambatan termal terkecil diperoleh dengan nilai sebesar 0,0017 °C/W pada saat model LHP dioperasikan dengan beban kalor 65°C. Hal ini terjadi karena semakin besar beban kalor yang diberikan ke *evaporator*, maka jumlah uap hasil pendidihan yang naik ke *condenser* semakin bertambah dan mempercepat siklus perpindahan kalor pada model LHP secara menyeluruh untuk mencapai keadaan fenomena *stable*.

KESIMPULAN

Kesimpulan studi eksperimen dari model *loop heat pipe* (LHP) ini menunjukkan fenomena perpindahan kalor yang terjadi adalah *overshoot*, *zigzag*, *steady* seperti fenomena umum perpindahan kalor yang terjadi pada LHP. Unjuk kerja termal terbaik didapatkan dengan hambatan termal terkecil sebesar 0,0017 °C/W, yaitu diperoleh pada saat model LHP dioperasikan pada beban kalor 65°C.

Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi beban kalor yang diterima oleh *evaporator* menyebabkan semakin kecilnya nilai hambatan termal, sehingga berujung pada unjuk kerja termal yang semakin baik. Diharapkan penelitian model LHP ini dapat menjadi dasar pengembangan *prototype* LHP berskala besar untuk dijadikan sebagai sistem pendingin pasif pada instalasi nuklir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kepada pihak manajemen yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan tugas akhir di Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional atas ilmu pengetahuan yang telah diberikan.

REFERENSI

- [1] M. Mochizuki *et al.*, “Nuclear Reactor Must Need Heat Pipe for Cooling,” *Front. Heat Pipes*, vol. 2, no. 3, pp. 1–5, 2012, doi: 10.5098/fhp.v2.3.3001.
- [2] Y. Maydanik, V. Pastukhov, and M. Chernysheva, “Development and investigation of a loop heat pipe with a high heat-transfer capacity,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 130, pp. 1052–1061, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.084.
- [3] A. R. Anand, A. Jaiswal, A. Ambirajan, and P. Dutta, “Experimental studies on a miniature loop heat pipe with flat evaporator with various working fluids,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 144, no. May, pp. 495–503, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.092.
- [4] N. B. N and K. Hc, “Materials Used in Heat Pipe,” *Mater. Today Proc.*, vol. 2, no. 4–5, pp. 1469–1478, 2015, doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.072.
- [5] M. H. Kusuma, “Disertasi Doktor: Sistem Pendingin Pasif di Kolam Penyimpanan Bahan Bakar Bekas Nuklir dengan Menggunakan Pipa Kalor,” Universitas Indonesia, 2017.
- [6] K. Cheung, “SAE TECHNICAL Thermal Performance and Operational Characteristics of Loop Heat Pipe (NRL LHP),” no. 724, 2018.
- [7] J. He, J. Miao, L. Bai, G. Lin, H. Zhang, and D. Wen, “Effect of non-condensable gas on the startup of a loop heat pipe,” *Appl. Therm. Eng.*, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.07.154.
- [8] Z. Liu, D. Wang, C. Jiang, J. Yang, and W. Liu, “Experimental study on loop heat pipe with two-wick flat evaporator,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 94, pp. 9–17, 2015, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.02.007.
- [9] W. A. W. Ula, “Analisis Perpindahan Panas Pada Pipa Kalor Bertingkat,” *J. Mettek J. Ilm. Nas. dalam Bid. Ilmu Tek. Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 74–78, 2019.
- [10] J. T. Mesin, F. Teknik, and U. N. Jakarta, “Perpindahan panas pipa

- kalor sudut kemiringan 0,30,45,60,90 Derajat,” *J. Konversi Energi dan Manufaktur UNJ*, vol. Edisi Terb, pp. 144–148, 2014.
- [11] I. Setyawan, S. R. Riawan, S. P. Sari, and Ridwan, “Analisis Kinerja Pipa Kalor Lurus Menggunakan Sumbu Kapiler Screen Mesh 300 Dengan Memvariasikan Filling Rasio,” *J. ASIMETRIK J. Ilm. Rekayasa Inov.*, vol. 2, no. 2, pp. 133–138, 2020, doi: 10.35814/asiimetrik.v2i2.1470.
- [12] U. Indonesia, F. Teknik, P. Studi, and T. Mesin, “Penggunaan Sumbu Kapiler Biomaterial Dan Sintered - Cu Penggunaan Sumbu Kapiler Biomaterial Dan,” 2012.