

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH WICK SUMBU KAPILER PADA MODEL LOOP HEAT PIPE

Dimas Panji Asmara¹, Mukhsinun Hadi Kusuma^{2*}, Giarno², Darwin Rio Budi Syaka¹

¹Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Negeri Jakarta Jl Rawamangun Muka Raya,
Jakarta 132020

²Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN)
Kawasan Puspitek Serpong, Tangerang Selatan 15413

*Email: luluikal@batan.go.id

ABSTRAK

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH WICK SUMBU KAPILER PADA MODEL LOOP HEAT PIPE. Kecelakaan pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Fukushima Daiichi memacu para peneliti untuk menggunakan sistem pendingin pasif dalam rangka meningkatkan keselamatan termal instalasi nuklir. Salah satu teknologi sistem pendingin pasif adalah *Loop Heat Pipe* (LHP) karena memiliki kemampuan pembuangan kalor yang baik. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh performa *wick* berupa sumbu kapiler dalam rangka meningkatkan unjuk kerja termal dan distribusi suhu pada LHP. Metode eksperimen dilakukan dengan mengoperasikan LHP menggunakan suhu air panas sebagai beban kalor di *evaporator* pada suhu 35°C, 45°C, 55°C dan 65°C. Pendinginan di bagian *condenser* menggunakan laju aliran udara 2 m/s. Hasil eksperimen didapatkan suhu pada bagian *adiabatic* dengan *wick* lebih rendah dibandingkan pada bagian *adiabatic* tanpa *wick*. kesimpulan dari penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan *wick* pada LHP dapat memberikan jalur dari evaporasi yang terjadi di bagian *evaporator*.

Kata kunci: *wick* pipa kapiler, *Loop Heat Pipe*, sistem pendingin pasif, instalasi nuklir.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF CAPILLARY AXIS WICK ON LOOP HEAT PIPE MODEL. The accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant prompted researchers to use passive cooling systems to improve the thermal safety of nuclear installations. One of the passive cooling system technologies is *Loop Heat Pipe* (LHP) because it has good heat dissipation capabilities. The purpose of this study was to determine the effect of *wick* performance in the form of a capillary axis in order to improve thermal performance and temperature distribution on the LHP. The experimental method was carried out by operating the LHP using hot water temperature as the heat load in the evaporator at temperatures of 35°C, 45°C, 55°C and 65°C. Cooling in the condenser uses an air flow rate of 2 m/s. The experimental results showed that the temperature in the *adiabatic* section with *wick* was lower than in the *adiabatic* section without *wick*. the conclusion of this study proves that the use of a *wick* on the LHP can provide a path for evaporation that occurs in the evaporator section.

Keywords: *capillary pipe wick*, *Loop Heat Pipe*, *passive cooling system*, *nuclear installation*.

PENDAHULUAN

Berkurangnya sumber energi listrik menjadikan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) digunakan sebagai salah satu alternatif pembangkit energi listrik. Pemakaian teknologi nuklir mempunyai dampak kekurangan dan kelebihan. Salah satu potensi bahaya penggunaan PLTN adalah terlepasnya zat radioaktif apabila terjadi kecelakaan serta kegagalan dalam pengoperasiannya. Jika potensi dari bahaya tersebut terjadi, maka akan memberikan dampak negatif bagi para masyarakat secara luas dan pekerja yang ada di PLTN [1].

Salah satu contoh kecelakaan yang terjadi yaitu pada PLTN di kawasan Fukushima, Jepang tahun 2011. Kecelakaan ini diawali dengan gempa sebesar kurang lebih 9 SR yang melanda Fukushima Jepang, dimana pada kawasan ini terdapat PLTN yang dioperasikan oleh Tokyo *Electrical company*. PLTN yang dioperasikan oleh industri ini mempunyai jenis boiling water reactor (BWR) generasi ke-2 yang seluruh sistem pendinginnya tergantung pada sistem aktif. Gempa tersebut menyebabkan reaktor *shutdown* secara otomatis. Gempa ini mengakibatkan rusaknya sistem transmisi listrik yang diperlukan oleh sistem reaktor secara keseluruhan serta mengakibatkan kawasan PLTN ini mengalami *Station Black Out* (SBO) [1].

Setelah 1 jam terjadi gempa, kemudian tsunami datang sehingga merendam kawasan

PLTN mencapai ketinggian 14 m, serta merendam rumah pompa pendingin dan generator listrik. Akibatnya seluruh kawasan PLTN mengalami SBO yang cukup lama. Hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan suhu serta tekanan pada teras reaktor yang menyebabkan terjadinya ledakan 4 unit PLTN dari total 6 unit yang terdapat gas hidrogen dikarenakan sisa hasil peluruhan yang dihasilkan dari reaktor tidak bisa dibuang dengan baik ke lingkungan [1].

Peristiwa tersebut menjadi dasar pengembangan untuk terus meningkatkan sistem keselamatan PLTN yang terdapat di seluruh dunia serta dibutuhkan membuat sistem keselamatan untuk reaktor masa depan. Penggunaan sistem keselamatan pasif mulai diperhatikan untuk menunjang sistem pendingin reaktor ketika sistem keselamatan aktif gagal berfungsi akibat terdapatnya kecelakaan. Salah satu teknologi yang digunakan untuk mendinginkan serta membuang panas secara pasif merupakan pemanfaatan teknologi baru *loop heat pipe* (LHP) [1]–[3].

Pada eksperimen sebelumnya, **Kusuma et al.** menggunakan *heat pipe* lurus tanpa sumbu kapiler sebagai sistem pendingin pasif. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran pendingin akan mempercepat proses kondensasi di *condenser* dan akan memperkecil perbedaan suhu *evaporator* dan *condenser* sehingga menghasilkan

tahanan termal pipa kalor terendah [4]. Pada penelitian lainnya **Zhu et al.** mengenai pengaruh suhu *heat sink*, karakteristik operasional serta telah memberikan referensi desain sistem pendingin ketika sistem *loop heat pipe* digunakan pada pendinginan listrik. Hasilnya menghasilkan suhu *heat sink* yang optimal sebesar (18°C) dan untuk suhu pada bagian *evaporator* terendah sebesar (77°C), waktu *start-up* terpendek (1000s), tahanan termal terkecil sebesar (0,29K/W), dan panas pada *evaporator* tertinggi koefisien transfer ($3.1 \times 10^4 \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$) [5], [6].

Putra et al. telah melakukan berbagai penelitian mengenai *heat pipe* sebagai pendingin pasif. Penelitian-penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan berbagai fluida kerja seperti air demineral dan *nanofluid*. Hasil yang didapatkan bahwa *nanofluid* berpotensi dapat digunakan sebagai fluida kerja pada *heat pipe* [7]–[10]. Menurut **Vasiliev et al.** *heat Pipe* sudah banyak diaplikasikan pada bidang industri, teknologi elektronik, pemanfaatan gas buang, pemanas udara, sistem HVAC, dan pemanfaatan panas buang dari boiler, melalui penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa *heat pipe* dapat diaplikasikan pada alat penukar kalor terkini karena memiliki kemampuan pemindahan kalor yang baik [11]–[13]. Pada penelitian **Grissa et al.** *heat pipe* dibuat sebagai teknologi yang tepat karena mempunyai

solusi yang baik dengan desain termalnya yang hemat biaya dan mempunyai perpindahan panas yang sangat baik dengan mempunyai kapabilitas, efisiensi yang tinggi dan kesederhanaan struktural [14], [15].

Penelitian **Wang et al.** mengenai termal karakteristik hidrolis dan batas perpindahan panas dari *heat pipe* kalium telah di selidiki dalam studi eksperimennya, dalam eksperimennya tentang kerja perpindahan panas pada suhu tinggi *heat pipe* kalium, menghasilkan dua sistem percobaan yaitu kondisi berpendingin udara dan pendingin air, telah dirancang dan diterapkan untuk mengetes *heat pipe* dengan jumlah muatan yang berbeda, jadi kondisi *stable* dan batas perpindahan panas kinerja dari perpindahan panas *heat pipe* [6].

Kinerja termal dari *heat pipe* datar dengan logam telah diteliti secara eksperimental oleh **Somasundaram et al** [16]. Dengan mengevaluasi pengaruh masukan panas laju aliran air pendingin dan suhu di sisi *condenser* dan *filling ratio* fluida kerja di efisiensi termal *Copper Flat Heat Pipe*, dengan *Wick* memiliki porositas 0,77 dan $1,114 \times 10^{10} \text{ mm}^2$ dan air sebagai fluida kerja. Mereka menyimpulkan dengan penambahan satu dan dua kolom *wick* dapat menyebabkan penurunan 2,1% dan 3,1% dalam resistansi termal. Menurut **Odagiri et al.** *heat Pipe* mempunyai perpindahan panas yang tinggi dan memiliki keunggulan lainnya seperti mampu bekerja tanpa tenaga

dari listrik, serta bekerja dalam keadaan anti gravitasi, *heat pipe* banyak digunakan selaku perangkat pendingin lampu LED *chip* dan elektronik selular [17]. **Setyawan et al.** dalam bagian dinding *Heat Pipe* yang diisi sumbu kapiler (*wick*) yang berupa *sintered powder*, *screen mesh* dan *groove*. Berperan sebagai jalur fluida serta pompa kapiler. *Heat pipe* disebut sebagai *superconductor* sebab ia mempunyai kapasitas serta kecepatan perpindahan kalor yang luar biasa dengan hampir tidak ada kehilangan kalor [18]. Menurut **Liu et al.** *heat Pipe* bekerja dengan aliran fluida kerja dua fasa dalam melakukan perpindahan panasnya, agar efisiensi pada *heat pipe* lebih tinggi dalam hal kinerja perpindahan panas, *Heat Pipe* ini mempunyai kelebihan dan mampu dalam hal perpindahan panas yang kuat kapabilitas dengan sedikit perbedaan suhu, fleksibilitas tinggi telah membuat *Heat Pipe* banyak digunakan pada perangkat elektronik karena memiliki pembuangan panas yang baik [19].

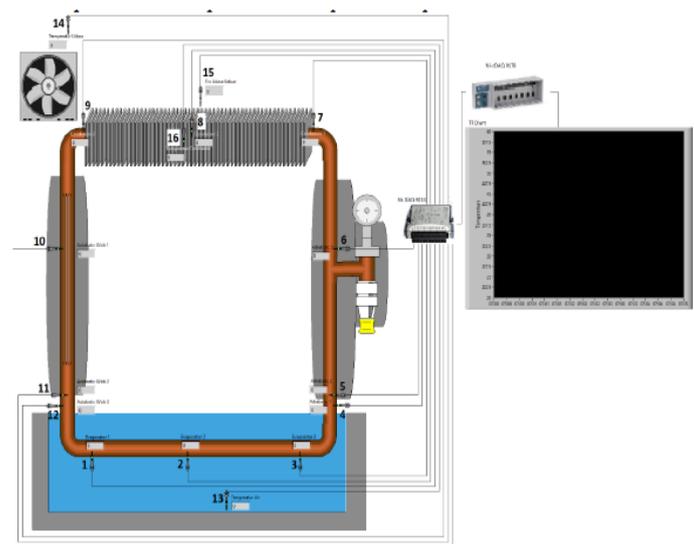
Penelitian mengenai LHP ini merupakan bagian dari penelitian yang masih dalam tahap pengembangan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional, khususnya di Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh *wick* pada LHP apakah dapat beroperasi dengan memberikan jalur dari hasil proses evaporasi. Metode eksperimen dilakukan dengan mengoperasikan LHP menggunakan *wick*.

LHP dioperasikan dengan memvariasikan suhu air panas sebagai beban kalor di *evaporator* pada suhu 35°C, 45°C, 55°C dan 65°C. Untuk laju aliran udara sebagai pendinginan yang dialirkan ke *fin* yang menempel pada bagian *condenser* digunakan sebesar 2 m/s. dan *filling ratio* adalah rasio antara volume fluida kerja dengan volume *evaporator* pada LHP diberikan sebesar 200%.

METODOLOGI

Eksperimental Setup

Penelitian ini menggunakan eksperimental *setup* dan *test section* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, dan Gambar 2.



Gambar 1. Eksperimental *setup* model LHP

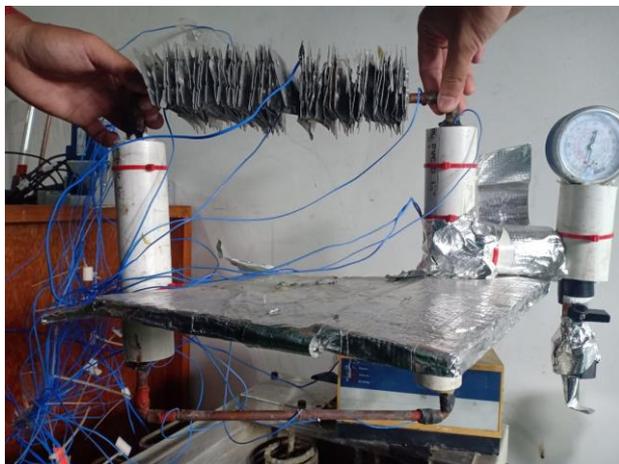
Keterangan:

- | | |
|-----------------|----------------------|
| 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. Suhu air |
| 6. Adiabatic 3 | 14. Suhu udara |
| 7. Condenser 1 | 15. Fin out |
| 8. Condenser 2 | 16. Fin condenser |

Eksperimental *setup* model LHP sebagai sistem pendingin pasif dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. LHP terbuat dari material pipa tembaga dengan panjang pipa 1200 mm, diameter dalam 8,65 mm, diameter luar 9,55 mm, LHP terdiri atas tiga bagian yang disebut dengan *evaporator*, *adiabatic* dan *condenser*. Bagian *evaporator* terletak pada bagian bawah dengan panjang sisi tegak masing-masing 50 mm dan panjang bagian mendatar 300 mm.

Bagian *adiabatic* yang memiliki panjang masing-masing 200 mm terletak antara bagian *evaporator* dan *condenser* dengan dua jalur yang berbeda, yaitu 1 buah jalur uap dan 1 buah jalur fluida hasil kondensasi. Bagian *condenser* terletak pada bagian atas dengan panjang sisi tegak masing-masing 50 mm dan panjang bagian mendatar 300 mm [2].

Test section model LHP dengan *wick* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. *Test section* model LHP dengan *wick* sumbu kapiler.

Pada gambar 2 ditunjukkan *test section* model LHP dengan menggunakan *wick*. Eksperimen dilakukan dengan diberikan suhu pada bagian *evaporator* sebesar 35°C, 45°C, 55°C, dan 65°C. Model LHP menggunakan *filling ratio* 200% dan proses pendinginan diberikan laju aliran 2 m/s.

Evaporator sebagai bagian yang menyerap kalor direndam di dalam *circulating thermostatic bath* (CTB) yang berisi air panas. Di dalam pipa *evaporator* diberikan fluida air demineral. Fluida kerja air demineral dipilih karena memiliki kompatibilitas yang baik dengan material LHP, memiliki *merit number* yang tinggi, dan stabilitas termal yang baik.

Bagian *adiabatic* berfungsi sebagai jalur uap dari *evaporator* menuju *condenser* dan jalur fluida hasil kondensasi dari *condenser* menuju *evaporator*. Pada bagian ini, panas yang berasal dari LHP tidak boleh keluar menuju lingkungan dan sebaliknya. Untuk mengurangi pembuangan kalor ke lingkungan, keseluruhan bagian *adiabatic* diisolasi dengan material insulasi *ceramic blanket*, *glass wool* dan *aluminium sheet*.

Pada bagian *condenser* diletakkan *fin* untuk membantu pembuangan kalor dari *condenser* ke lingkungan. *Fin* yang digunakan berbahan *aluminium* dan memiliki bentuk persegi panjang. Masing-masing *fin* memiliki panjang 116.3 mm, lebar 45.1 mm, dan tebal 0.4 mm. *Fin*

tersebut diletakkan dengan jarak antar *fin* sebesar 5 mm.

Laju aliran udara yang divariasikan kecepatannya digunakan sebagai media pendingin untuk membuang panas di *fin* ke lingkungan. Pada eksperimen ini divariasikan beban kalor yang diterima oleh *evaporator* dan kecepatan udara pendingin yang dialirkan ke permukaan *fin*. Matriks eksperimen LHP menggunakan *wick* dapat dilihat pada Tabel 1.

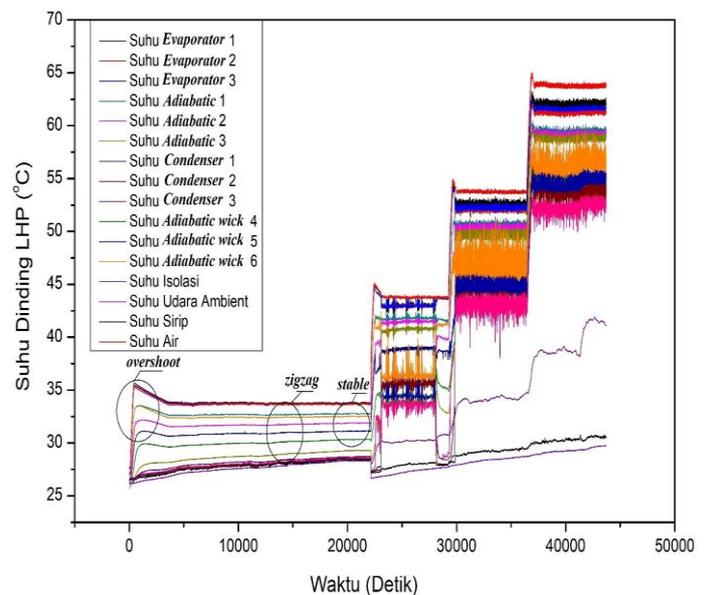
Tabel 1. Matriks eksperimen model LHP

Fluida kerja	Filling ratio (%)	Laju udara pendingin (m/s)	Beban kalor (°C)	Tekanan vakum (cmHg)
	200	2	35	-74
Air demineral	200	2	45	-74
	200	2	55	-74
	200	2	65	-74

HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi suhu *transient* LHP

Hasil eksperimen LHP menggunakan *wick* pada *filling ratio* 200% dengan beban kalor yang divariasikan dari suhu 35°C, 45°C, 55°C, 65°C dan laju aliran udara 2 m/s ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Distribusi suhu *transient* LHP menggunakan *filling ratio* 200% dan laju aliran udara 2 m/s

Dari Gambar 3 ditunjukkan suhu *transient* dengan waktu eksperimen pada suhu 35°C selama ± 6 jam baru didapatkan fenomena *steady*. Untuk suhu 45°C, 55°C, dan 65°C, eksperimen dilakukan selama 1,5 jam untuk mendapatkan fenomena *steady* tersebut. Fenomena ini logis karena pada suhu 35°C dibutuhkan waktu yang cukup lama dikarenakan suhu yang dipanaskan oleh CTB di *evaporator* cukup rendah sehingga memperlambat proses perpindahan kalor pada model LHP. Pada suhu 45°C, 55°C, dan 65°C memiliki kesamaan waktu untuk mencapai fenomena *steady* karena semakin besar beban kalor yang diberikan, siklus perpindahan panas yang terjadi pada fluida kerja yang ada di dalam *evaporator* semakin cepat dalam menyerap dan membuang panas. Sehingga berpengaruh pada waktu

yang diperlukan untuk mencapai keadaan *stable*.

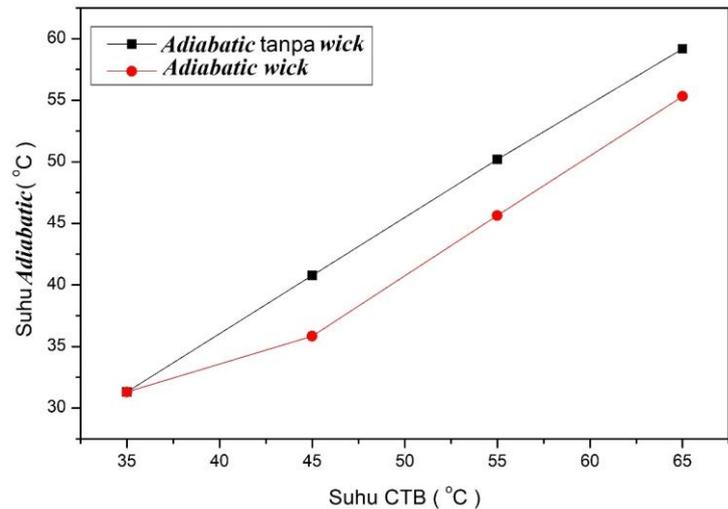
Pada Gambar 3 juga ditunjukkan fenomena *overshoot*, *zigzag*, dan *steady*. Untuk fenomena *overshoot* yang terjadi adalah pada bagian *evaporator* mengalami kenaikan suhu yang disebabkan oleh beban kalor yang diberikan ke *evaporator* secara terus-menerus sehingga fluida kerja cair yang berada di dalam tersebut mengalami proses evaporasi menjadi uap air. Uap air tersebut mengalir melewati bagian *adiabatic* diikuti kenaikan suhu pada daerah tersebut. Pada keadaan ini, belum terjadi sirkulasi secara baik sehingga suhu *evaporator* mengalami peningkatan yang cukup signifikan.

Dari Gambar 3 dapat dilihat setelah fenomena *overshoot* selesai kemudian diikuti dengan fenomena *zigzag*. Pada keadaan ini, sirkulasi mulai berjalan namun belum pada keadaan yang stabil. Ketidakstabilan ini terlihat dari pola distribusi suhu pada bagian *evaporator* dan *condenser* yang cukup berfluktuatif.

Fenomena berikutnya yang dapat dilihat pada Gambar 3 adalah fenomena *stable*. Keadaan ini menunjukkan bahwa distribusi suhu pada LHP mencapai kestabilan secara keseluruhan karena sirkulasi alam di dalam LHP telah berjalan dengan baik. Fenomena ini berarti pada keadaan *stable*, penyerapan kalor dan pembuangan kalor oleh LHP telah berjalan dengan baik.

Perbandingan Suhu Adiabatic

Pada Gambar 4 dapat dilihat performa dari bagian pipa kapiler *adiabatic* dengan diberikan beban kalor sebesar 35°C, 45°C, 55°C, dan 65°C, serta menggunakan *filling ratio* 200%. Laju aliran udara pendingin 2 m/s.



Gambar 4. Perbedaan suhu *adiabatic* tanpa *wick* dan dengan *wick*

Dari Gambar 4 dapat dilihat suhu pada bagian *adiabatic* dengan *wick* lebih rendah dibanding pada bagian *adiabatic* tanpa *wick*. Fenomena ini menunjukkan bahwa uap yang sudah terevaporasi di bagian *evaporator* agar mengalir terlebih dahulu menuju pipa kapiler *adiabatic* tanpa *wick*. Hal ini dapat dilihat dari suhu kedua pipa *adiabatic* yang berbeda. Pada suhu 35°C dapat dilihat kedua suhu *adiabatic* tanpa *wick* dan *adiabatic wick* memiliki suhu berkisar 31°C.

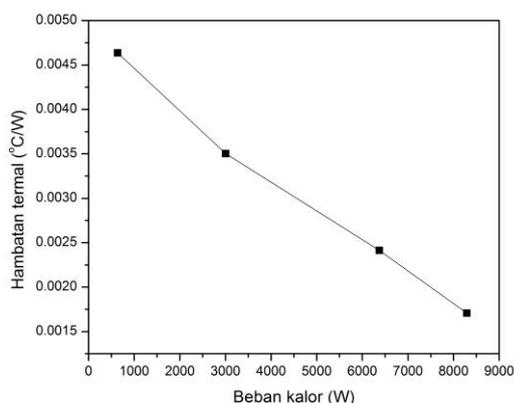
Hal ini menunjukkan pada suhu 35°C LHP belum bisa bekerja secara optimal karena evaporator menyerap suhu dari CTB

masih rendah. Selanjutnya pada suhu CTB 45°C, bagian *adiabatic* tanpa *wick* berada pada suhu 40°C berbeda dengan *adiabatic* dengan *wick* yang memiliki suhu lebih rendah yaitu 35°C. Lalu pada suhu CTB di 55°C, bagian *adiabatic* tanpa *wick* memiliki suhu sebesar 50°C dan *adiabatic* dengan *wick* memiliki suhu lebih rendah yaitu 45°C.

Kemudian di suhu CTB 65°C terlihat suhu bagian *adiabatic* tanpa *wick* lebih tinggi yaitu sebesar 59°C dibandingkan *adiabatic wick* yang lebih rendah yaitu sebesar 55°C. Hal ini menunjukkan bagian *adiabatic* dengan *wick* dapat menahan uap pada saat terjadi evaporasi di bagian *evaporator*.

Hambatan Termal

Pada Gambar 5 ditunjukkan hambatan termal model LHP dengan memberikan beban kalor sebesar 35°C, 45°C, 55°C, dan 65°C dengan menggunakan *filling ratio* sebesar 200% dan kecepatan udara pendingin sebesar 2 m/s.



Gambar 5. Hambatan termal LHP pada *filling ratio* 200% dan laju aliran udara 2 m/s.

Dari Gambar 5 terlihat hambatan termal terkecil pada LHP sebesar 0,0017 °C/W, yaitu ketika LHP dioperasikan dengan beban kalor 65°C. Hambatan termal menjadi kecil karena semakin besar beban kalor yang diberikan ke *evaporator* akan meningkatkan jumlah uap hasil pendidihan yang naik ke *condenser* dan mempercepat siklus perpindahan kalor pada LHP secara menyeluruh untuk mencapai keadaan *stable*-nya.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari hasil studi yang diperoleh menunjukkan bahwa *wick* dapat berfungsi dengan baik untuk menahan uap tidak naik ke bagian *condenser* dan sebagai jalur fluida hasil kondensasi untuk kembali ke *evaporator* pada kondisi suhu diatas 35°C ketika *evaporator* menyerap suhu yang semakin meningkat. Fenomena perpindahan kalor yang didapatkan menunjukkan bahwa LHP dengan *wick* ini memiliki kesamaan fenomena distribusi suhu seperti *heat pipe* pada umumnya, yaitu *overshoot*, *zigzag*, dan *stable*. Model LHP ini memiliki hambatan termal yang sangat kecil sebesar 0,0017 °C/W diperoleh saat model LHP dioperasikan pada beban kalor 65°C.

Hasil ini menunjukkan semakin tinggi beban kalor yang diberikan di *evaporator* menyebabkan semakin kecilnya nilai hambatan termal, sehingga kemampuan LHP dalam menyerap dan membuang kalor menjadi sangat baik. Diharapkan studi ini

dapat digunakan sebagai salah satu dasar untuk mendesain prototipe LHP.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Badan Tenaga Nuklir National khususnya pada Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir serta pembimbing praktisi atas ilmu pengetahuan yang telah diberikan dan kesempatan untuk melakukan penelitian tugas akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. N. S. Nandy Putra, "Teknologi Pipa Kalor," p. 185, 2014.
- [2] M. H. Kusuma, "Studi Eksperimental Model Loop Heat Pipe sebagai System Pendingin Pasif di Kolam Pengambil Panas Small Modular Reactor," 2019.
- [3] M. H. Kusuma *et al.*, "Passive cooling system in a nuclear spent fuel pool using a vertical straight wickless-heat pipe," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 126, pp. 162–171, 2018, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.12.033.
- [4] M. Hadi Kusuma, "Sistem Pendingin Pasif di Kolam Penyimpanan Bahan Bakar Bekas Nuklir dengan Menggunakan Pipa Kalor," Universitas Indonesia, 2017.
- [5] K. Zhu, X. Li, H. Li, Z. Yang, and Y. Wang, "Experimental investigation on the effect of heat sink temperature on operational characteristics of a new-type loop heat pipe," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 2423–2429, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.298.
- [6] C. Wang *et al.*, "Experimental study on heat transfer limit of high temperature potassium heat pipe for advanced reactors," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 151, p. 107935, 2021, doi: 10.1016/j.anucene.2020.107935.
- [7] N. Putra, Yanuar, and F. N. Iskandar, "Application of nanofluids to a heat pipe liquid-block and the thermoelectric cooling of electronic equipment," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 35, no. 7, pp. 1274–1281, 2011, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2011.04.015.
- [8] N. Putra, W. N. Septiadi, R. Sahmura, and C. T. Anggara, "Application of Al₂O₃ nanofluid on sintered copper-powder vapor chamber for electronic cooling," *Adv. Mater. Res.*, vol. 789, pp. 423–428, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.789.423.
- [9] S. W. Chi, "Heat pipe theory and practice," *hemi*, 1976.
- [10] A. Faghri, *Heat pipe science and technology*. Global Digital Press, 1995.
- [11] L. L. Vasiliev, "Heat pipes in modern heat exchangers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–19, 2005, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2003.12.004.
- [12] H. Akachi, "Structure of a heat pipe." Google Patents, May 1990.
- [13] K. S. Udell, "Heat transfer in porous media considering phase change and capillarity—the heat pipe effect," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 28, no. 2, pp. 485–495, 1985.
- [14] T. Brahim and A. Jemni, "CFD analysis of hotspots copper metal foam flat heat pipe for electronic cooling applications," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 159, no. December 2019, p. 106583, 2021, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106583.
- [15] K. Grissa, A. M. Benselama, Z. Lataoui, Y. Bertin, and A. Jemni, "Investigations of the thermal performance of a cylindrical wicked heat pipe," *Int. J. Energy Res.*, vol. 42, no. 9, pp. 3048–3058, 2018, doi: 10.1002/er.3973.
- [16] D. Somasundaram, A. Mani, and M.

- Kamaraj, "Experimental investigation of thermal performance of metal foam wicked flat heat pipe," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 82, pp. 482–492, 2017, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.12.006
- [17] K. Odagiri and H. Nagano, "Heat transfer characteristics of flat evaporator loop heat pipe under high heat flux condition with different orientations," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 153, no. February, pp. 828–836, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.022.
- [18] 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.
- [19] C. Liu, R. Xie, N. Li, D. Lu, F. Hong, and Y. Wu, "Experimental study of loop heat pipes with different working fluids in 190–260 K," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 178, no. September 2019, p. 115530, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115530.