

STUDI PENGARUH *FILLING RATIO* TERHADAP UNJUK KERJA TERMAL MODEL *LOOP HEAT PIPE*

Rizky Fadillah¹, Mukhsinun Hadi Kusuma^{2*}, Giarno², Ahmad Kholil¹

¹Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Negeri Jakarta, Jl Rawamangun muka raya, Jakarta, 13220

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

*Email: luluikal@batan.go.id

ABSTRAK

STUDI PENGARUH *FILLING RATIO* TERHADAP UNJUK KERJA TERMAL MODEL *LOOP HEAT PIPE*. Pembuangan panas sisa hasil peluruhan pada saat sistem pendingin aktif mengalami kegagalan masih menjadi permasalahan termal. *Loop heat pipe* (LHP) sebagai salah satu teknologi sistem pendingin pasif berpotensi untuk dimanfaatkan dalam menangani permasalahan termal tersebut. Tujuan studi ini adalah untuk mengetahui fenomena perpindahan kalor yang terjadi akibat pengaruh *filling ratio* terhadap unjuk kerja termal model LHP. Metode eksperimen dilakukan dengan cara mengoperasikan LHP pada *filling ratio* 100 %, 150 % dan 200%. Pada eksperimen ini, laju aliran udara di *condenser* diberikan sebesar 2 m/s, beban kalor sebesar 35, 45, 55, dan 65°C. Model LHP divakum dengan tekanan awal -74 cm Hg. Hasil eksperimen yang diperoleh menunjukkan bahwa LHP memiliki unjuk kerja termal terbaik ketika dioperasikan pada *filling ratio* 200%, yaitu dengan nilai hambatan termal sebesar 0,0017 °C/W. Fenomena perpindahan kalor yang didapatkan berupa distribusi suhu di dalam LHP yaitu *overshoot*, *zigzag* dan *stable*. Kesimpulan studi menunjukkan bahwa *filling ratio* terbesar yang diberikan pada LHP memberikan unjuk kerja termal terbaik, karena semakin banyak fluida kerja yang ada didalam model LHP menyebabkan semakin cepat pendidihan terjadi dan semakin besar *transfer* kalor pada LHP.

Kata kunci: *Loop heat pipe*, Sistem pendingin pasif, *Filling ratio*, Instalasi nuklir.

ABSTRACT

STUDY OF THE EFFECT OF *FILLING RATIO* ON THERMAL PERFORMANCE OF THE *LOOP HEAT PIPE* MODEL. Dissipation of residual heat from decay when the active cooling system fails is still a thermal problem. *Loop heat pipe* (LHP) as a passive cooling system technology has the potential to be utilized in dealing with these thermal problems. The purpose of this study is to determine the phenomenon of heat transfer that occurs due to the effect of *filling ratio* on the thermal performance of the LHP model. The experimental method was carried out by operating the LHP at a *filling ratio* of 100%, 150% and 200%. In this experiment, the air flow rate in the *condenser* is given at 2 m/s, the heat load is 35, 45, 55, and 65 °C. The LHP model was vacuumed with an initial pressure of -74 cm Hg. The experimental results obtained indicate that the LHP has the best thermal performance when operated at a 200% *filling ratio*, with a thermal resistance value of 0.0017 °C/W. The conclusion of the study shows that the largest *filling ratio* given to the LHP gives the best thermal performance, because the more working fluid in the LHP model, the faster the boiling occurs and the greater the heat transfer in the LHP.

Keywords: : *Loop heat pipe*, *Passive cooling system*, *Filling ratio*, *Nuclear installation*.

PENDAHULUAN

Pembuangan panas sisa hasil peluruhan yang dihasilkan oleh bahan bakar nuklir pada saat sistem pendingin aktif mengalami malfungsi dalam mengambil panas tersebut masih menjadi permasalahan termal [1]. *Loop heat pipe* (LHP) sebagai salah satu kandidat sistem pendingin pasif berpotensi untuk menangani permasalahan termal tersebut pada saat sistem pendingin aktif mengalami malfungsi. Kemampuan penyerapan kalor LHP dinilai cukup baik untuk menangani masalah termal yang terjadi. Untuk mempelajari lebih lanjut mengenai kemampuan LHP tersebut, maka Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir membuat model LHP skala kecil untuk mendapatkan gambaran awal sebelum mengembangkan LHP skala besar sebagai sistem pendingin pasif di instalasi nuklir [2]–[4].

Putra et al. telah mempelajari *heat pipe* sebagai sistem pendingin pasif pada bidang elektronik. Hasil investigasinya menunjukkan bahwa *heat pipe* memiliki kinerja termal yang tinggi untuk melepaskan panas secara pasif dan dapat menjaga suhu suatu sistem tetap pada suhu kerja yang aman [5]. **Vasiliev et al.** melalui penelitiannya menyimpulkan bahwa *heat pipe* dapat diaplikasikan sebagai *heat exchanger* karena memiliki kemampuan perpindahan panas yang sangat baik dan dapat diterapkan secara luas di bidang

industri, teknologi elektronik, dan pemanas udara [6].

He et al. melakukan penelitian LHP dengan *evaporator* yang terbuat dari material komposit. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa LHP dengan *evaporator* bermaterial komposit dapat beroperasi secara stabil. LHP tersebut memiliki rentang beban kalor dari 10 W hingga 140 W, suhu *heat sink* berada pada rentang 25°C dan 35°C, dan memiliki unjuk kerja termal yang baik [7]. **Liu et al.** melakukan penelitian LHP menggunakan fluida kerja berupa *ethane*, *propylene* dan *ethylen*. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa pada beban kalor yang sama, hambatan termal LHP yang diisi dengan *ethylene* memiliki nilai yang lebih rendah daripada yang diisi dengan *ethane* dan *propylene*. Hasil penelitian ini konsisten dengan hasil prediksi dari parameter Joung [8].

Xiao et al. melalui penelitiannya menuliskan bahwa LHP yang ia buat dapat mulai bekerja secara normal jika diberikan beban kalor mulai dari 20 W. alat LHP tersebut dapat mempertahankan suhu permukaan pemanas sebagai sumber beban kalor hingga di bawah 90°C. Distribusi LHP tersebut memiliki fenomena *zigzag* pada saat diberikan beban kalor di bawah 20 W, dan suhu saluran masuk kondensor bersilasi secara berkala. Sedangkan sistem LHP dapat beroperasi secara *stable* pada saat mulai

diberikan beban kalor 25 W [9]. **Prayogo et al.** melakukan penelitian mengenai *vertical straight wickless heat pipe* menggunakan metode memanaskan bagian *evaporator* dengan air panas dan memvariasikan suhunya pada 60, 70, 80, dan 90°C. Air demineral digunakan sebagai fluida kerja dan dimasukkan ke dalam *heat pipe* dengan *filling ratio* sebesar 55, 65, 75, dan 85%. Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan aliran udara yang bervariasi pada kecepatan 1, 1.5, 2.1 dan 2.8 m/s. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa unjuk kerja termal tertinggi diperoleh pada tahanan termal 0,03 °C/W, yaitu pada saat *heat pipe* dioperasikan menggunakan *filling ratio* 55%, kecepatan udara 1 m/s, dan temperatur air panas sebesar 90°C [10].

Jiao et al. melalui penelitiannya menunjukkan bahwa *filling ratio* menjadi salah satu faktor penting yang mempengaruhi unjuk kerja termal LHP. Jika *evaporator* dimasukkan fluida kerja dengan *filling ratio* yang minimum, maka sirkulasi di dalam *loop heat pipe* tidak berjalan dengan sempurna. Sedangkan jika *filling ratio* pada *evaporator* mempunyai nilai maksimum dan diberikan beban kalor yang besar, maka akan terjadi ledakan periodik di dalam *evaporator* dikarenakan air demineral mendidih dan melebihi kapasitas *evaporator*. Dengan demikian maka pemberian *filling ratio* harus sesuai dengan geometri *heat pipe*, beban kalor di

evaporator, dan laju pendinginan di *condenser* [11], [12].

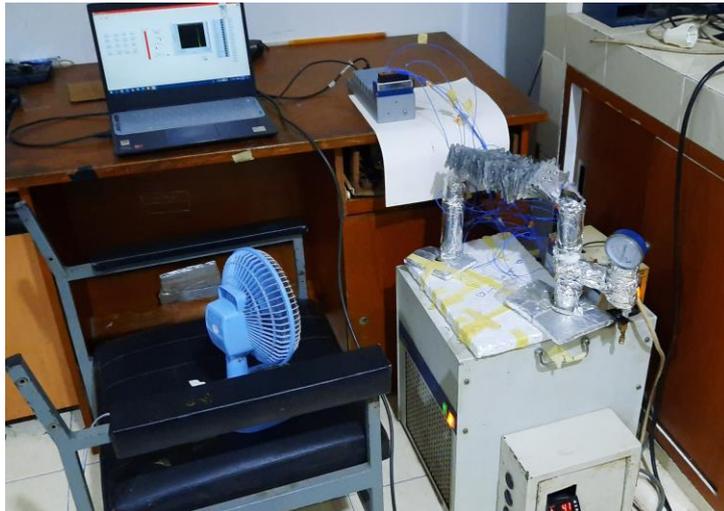
Berdasarkan studi literatur tersebut, maka penelitian pada model LHP skala kecil ini sangat penting dilakukan dalam rangka untuk memperoleh gambaran awal sebelum dilakukan pembuatan prototipe LHP sebagai sistem pendingin pasif di instalasi nuklir. Pada studi ini, pembahasan difokuskan untuk mempelajari pengaruh *filling ratio* pada model LHP. *Filling ratio* merupakan rasio antara volume fluida kerja *evaporator* dibandingkan volume *evaporator* secara menyeluruh. Studi ini merupakan bagian dari pembelajaran mengenai prototipe LHP sebagai sistem pendingin pasif di instalasi nuklir yang berada di PTKRN, Badan Tenaga Nuklir Nasional [13].

Tujuan studi ini adalah untuk mengetahui fenomena perpindahan kalor yang terjadi akibat pengaruh *filling ratio* terhadap unjuk kerja termal model LHP. Metode eksperimen dilakukan dengan cara mengoperasikan LHP pada *filling ratio* 100 %, 150 % dan 200%. Dalam eksperimen ini, laju aliran udara di *condenser* diberikan sebesar 2 m/s, beban kalor sebesar 35, 45, 55, dan 65°C. Model LHP divakum dengan tekanan awal -74 cmHg.

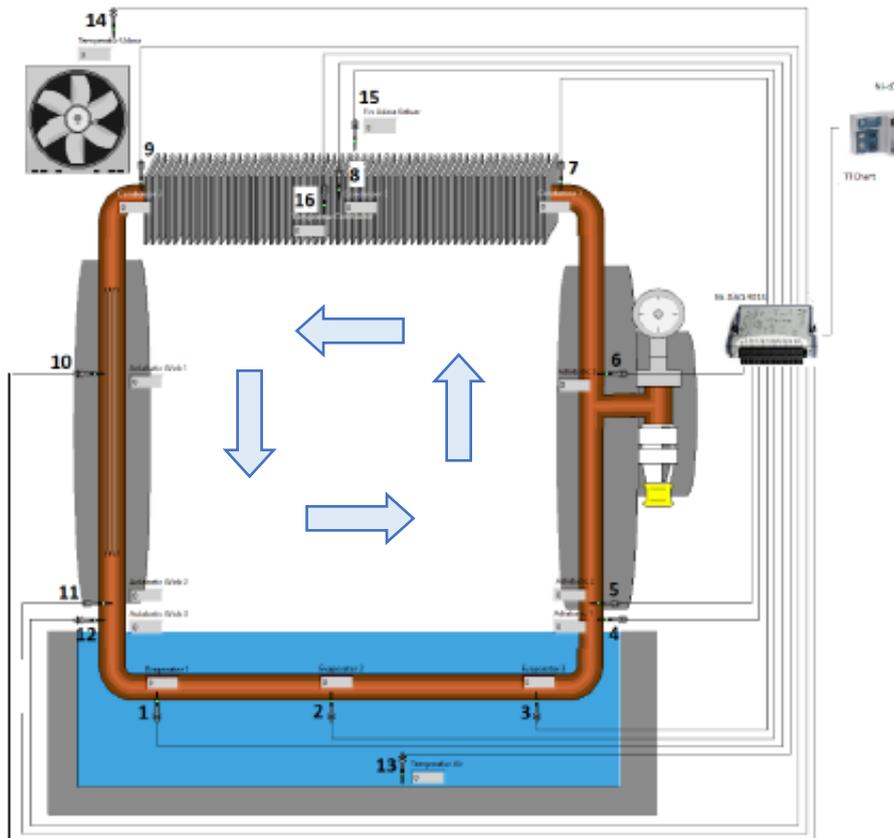
METODOLOGI

Test section dan *experimental setup* dari LHP yang digunakan dalam percobaan ini dapat dilihat pada Gambar 1. dan

Gambar 2.



Gambar 1. Test section LHP



Gambar 2. Experimental setup 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 |

Pada Gambar 1. ditunjukkan *test section* LHP yang digunakan pada studi ini. Alat LHP terbuat dari tembaga, dan memiliki bentuk persegi dengan panjang

masing-masing sisi 30 cm. Dalam desainnya, LHP dibagi menjadi 1 bagian *evaporator*, 1 bagian *condenser* dengan *fin*, dan 2 bagian *adiabatic*.

Bagian paling atas berupa *condenser* yang dilengkapi *fin* berjumlah 50 buah dengan tebal masing-masing *fin* 1,5 mm. Bagian paling bawah merupakan bagian *evaporator* yang menerima kalor selama eksperimen dilakukan, 2 bagian lainnya merupakan bagian *adiabatic* yang diisolasi menggunakan *glass wool*. Pada satu bagian *adiabatic* dilengkapi dengan sistem *vacuum* dan sebuah saluran yang digunakan untuk mengisi fluida kerja serta dipasang *vacuum gauge*, satu bagian lainnya dipasang *wick* yang terbuat dari kumpulan pipa kapiler sebanyak 16 buah dengan panjang masing-masing 20 cm.

Empat buah pipa tembaga dengan diameter luar 9,55 mm dan diameter dalam 8,60 mm digunakan sebagai material utama LHP. Pada satu bagian *adiabatic* diisi *wick* sebagai jalur masuk fluida setelah menguap pada bagian *evaporator*. *Wick* yang digunakan sebanyak 16 pipa tembaga dengan diameter dalam dan luar berturut-turut 1,8 dan 0,5 mm. Pada bagian *adiabatic* yang lainnya dipasangkan *vacuum gauge* dan *gate valve* sebagai jalur untuk memvakumkan dan memasukkan fluida kerja ke LHP. Pada bagian *condenser* LHP dipasangkan 17 *fin* aluminium dengan tebal 1,5 mm dirangkai dengan jarak per-*fin* 1,5

cm dengan menambahkan *thermal grace* ke celah kosong antara *fin* dan *condenser*. *Elbow* yang digunakan untuk menyambung pipa tembaga LHP merupakan *elbow* tembaga dengan diameter dalam dan luar berturut-turut 1,55 dan 9,55 mm. Metode sambungan yang digunakan adalah *welding* dengan *filler* berupa kuningan. Penambahan lem *araldite* pada setiap sambungan bertujuan agar sambungan tidak bocor.

Dari Gambar 2. dapat dilihat *evaporator* menerima kalor dari air yang telah dipanaskan oleh *Circulastic Thermotath bath* (CTB) dengan variasi suhu 35 - 65 °C. Alat CTB tersebut digunakan sebagai sumber panas air dan dapat diatur menggunakan pengatur suhu dengan akurasi $\pm 1^{\circ}\text{C}$. untuk menjaga suhu air. Air demineral digunakan sebagai fluida kerja dan dimasukkan ke dalam *evaporator* dengan *filling ratio* sebesar 100, 150, 200 %. Bagian *adiabatic* terletak ditengah bagian *heat pipe*. Bagian *adiabatic* dilapisi menggunakan *polyurethane* untuk mengurangi pelepasan kalor ke lingkungan.

Bagian *condenser* diberikan *fin* sebagai media pelepas kalor. Sebuah *fan* digunakan untuk meniupkan udara pada *fin* tersebut dengan kecepatan 2 m/s. Pada bagian LHP diberikan tekanan awal sebesar -74 cm Hg agar titik didih dari air demineral dalam LHP menjadi rendah. *Monitoring* dan perekaman data suhu pada LHP menggunakan sistem data akuisisi *National*

Instrument. Eksperimen ini dilakukan dengan mengikuti matriks seperti Tabel 1.

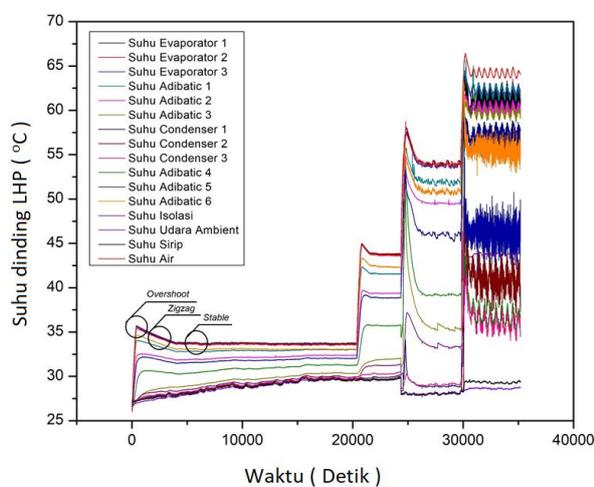
Tabel 1. Matiks eksperimen

Fluida Kerja	LHP			
	Tekanan awal LHP (cm Hg)	Filling ratio %	Kecepatan udara (m/s)	Suhu CTB (°C)
Air Demineral	-74	100	2	35
				45
				55
				65
				35
	-74	150	2	45
				55
				65
				35
				45
	200	2	45	
			55	
			65	
			35	
			65	

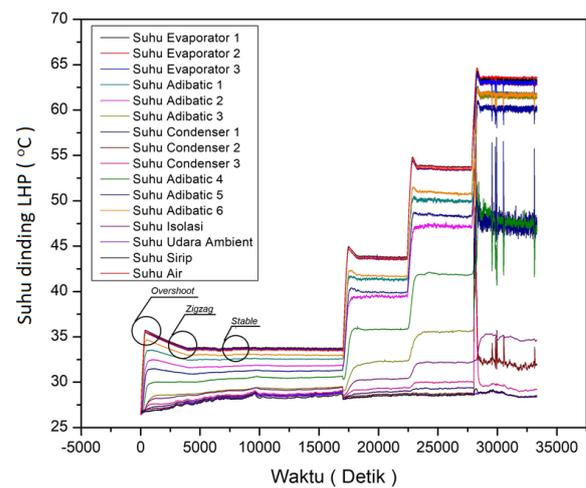
HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Suhu Transient LHP

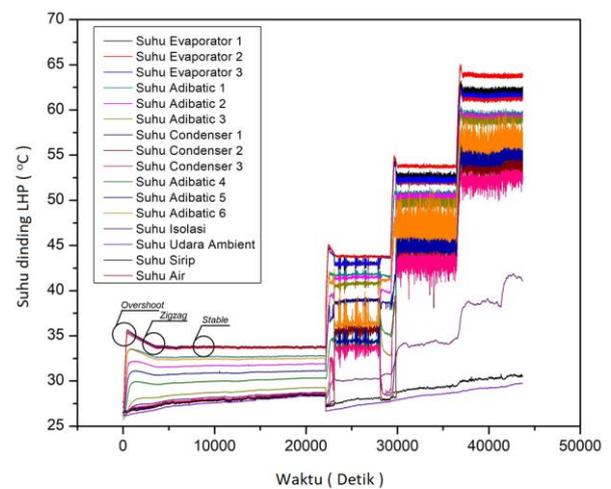
Distribusi suhu *transient* pada bagian LHP yang didapatkan dari eksperimen ditunjukkan pada Gambar 3. – 5.



Gambar 3. Distribusi suhu *transient* pada filling ratio 100% dan kecepatan udara 2 m/s



Gambar 4. Distribusi suhu *transient* pada filling ratio 150% dan kecepatan udara 2 m/s



Gambar 5. Distribusi suhu *transient* pada filling ratio 200% dan kecepatan udara 2 m/s

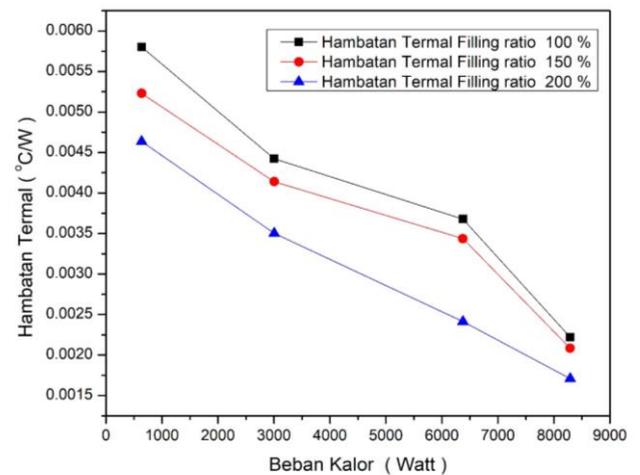
Pada Gambar 3. – 5. dapat dilihat fenomena yang terjadi pada model LHP, yaitu fenomena *overshoot*, *zigzag*, dan *stable*. Fenomena *overshoot* yaitu keadaan di mana terjadinya perubahan cairan fluida kerja pada bagian *evaporator* karena terus menerus mendapatkan kalor dari air panas pada CTB. Hal tersebut mengakibatkan uap air pada *evaporator* naik menuju daerah *adiabatic* dan *condenser* sehingga suhunya ikut meningkat.

Setelah fenomena *overshoot* terjadi, berikutnya yang terjadi adalah fenomena *zigzag*. Pada kondisi ini, uap air yang sudah berada di *condenser* selanjutnya akan melepaskan kalornya hingga terjadi peningkatan suhu pada dinding *condenser*. Penyerapan panas *laten* oleh udara yang dialirkan menuju *fin* pada *condenser* mulai menyebabkan terjadinya proses kondensasi. Kondensat yang dihasilkan kemudian turun mengikuti arah gravitasi melalui *adiabatic* hingga akhirnya kembali ke *evaporator* dan menyebabkan terjadinya pola *zigzag* pada distribusi suhu di seluruh dinding LHP. Distribusi suhu dengan pola *zigzag* yang terus menerus ini mengakibatkan sirkulasi alam mulai berlangsung, namun belum mencapai keadaan yang tetap.

Fenomena yang terjadi selanjutnya adalah fenomena *stable*. Pada kondisi ini, distribusi suhu yang terjadi di dalam model LHP perlahan menjadi *steady*. Keadaan *steady* adalah keadaan di mana suhu tetap mengalami fluktuasi nilai suhu namun tetap berada pada rentang nilai yang tidak terlalu jauh dan terjadi secara terus menerus pada beban kalor dan kecepatan udara pendingin yang konstan. Kondisi ini juga menunjukkan bahwa sirkulasi secara alami antara uap dan kondensat di dalam model LHP telah terjadi secara terus menerus dan tetap stabil.

Hambatan termal LHP

Hasil dari perhitungan untuk hambatan termal dari LHP ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hambatan termal LHP

Dari Gambar 6. menunjukkan bahwa hambatan termal menurun seiring dengan kenaikan beban kalor. Kemampuan LHP untuk melepas kalor bergantung pada hambatan termalnya. Hal tersebut sesuai dengan persamaan hambatan termal, $R = \Delta T/Q$, di mana hambatan termal berbanding lurus terhadap ΔT antara *evaporator* dengan *condenser* dan berbanding terbalik dengan beban kalor yang diberikan. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil ΔT maka semakin kecil juga nilai dari hambatan termal tersebut. Berdasarkan persamaan tersebut, hambatan termal terendah berada pada *filling ratio* 200 %, kecepatan udara pendingin 2 m/s dan beban kalor 65°C, yaitu menghasilkan sebesar 0,0017 °C/W. Hal tersebut diperoleh karena pada *filling ratio* tersebut menghasilkan ΔT yang lebih kecil dibandingkan *filling ratio* lainnya.

KESIMPULAN

Studi menunjukkan bahwa model LHP memiliki fenomena *overshoot*, *zigzag* dan *stable* yang secara umum terdapat pada *heat pipe*. Berdasarkan hasil eksperimen, *filling ratio* 200 % memberikan unjuk kerja termal LHP terbaik karena pada *filling ratio* 200% menghasilkan ΔT yang lebih kecil dibandingkan variasi *filling ratio* lainnya. Hal ini terjadi karena pada *filling ratio* 200 % memiliki agresifitas pendidihan fluida dan transfer kalor dibandingkan pada *filling ratio* lainnya. Manfaat penelitian ini adalah membuktikan bahwa *filling ratio* berpengaruh terhadap unjuk kerja termal LHP. Sehingga *filling ratio* harus disesuaikan dengan geometri, beban kalor dan laju aliran udara.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih di tujukan kepada Kepala PTKRN yang telah memberi izin dan support fasilitas penelitian serta pembimbing yang telah memberikan arahan dan masukan pada penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. I. Permana, "Aspek Keselamatan Operasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas," *J. Tek. Lingkung.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2013.
- [2] T. H. Putra, G. Giarno, S. Hatmoko, G. B. Heru K, and M. Juarsa, "Analisis Deviasi Alat Ukur Laju Aliran pada Untai FASSIP-01 dan FASSIP-02," *SIGMA Epsil. - Bul. Ilm. Teknol. Keselam. Reakt. Nukl.*, vol. 23, no. 2, p. 91, 2019, doi: 10.17146/sigma.2019.23.2.5682.
- [3] M. H. Kusuma, "Sistem Pendingin Pasif di Kolam Penyimpanan Bahan Bakar Bekas Nuklir dengan Menggunakan Pipa Kalor," pp. 35–45, 2017.
- [4] N. Putra and W. Nata, *Teknologi Pipa Kalor Teori, Desain dan Aplikasi*. UI-Press, 2014.
- [5] 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
- [6] L. L. Vasiliev, "Heat pipes in modern heat exchangers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–19, 2005.
- [7] S. He, P. Zhou, W. Liu, and Z. Liu, "Experimental study on thermal performance of loop heat pipe with a composite-material evaporator for cooling of electronics," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 168, p. 114897, 2020.
- [8] 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, p. 115530, 2020.
- [9] B. Xiao *et al.*, "Experimental investigation of loop heat pipe with a large squared evaporator for multi-heat sources cooling," *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 239–248, 2020.
- [10] K. Prayogo, N. Putra, M. H. Kusuma, N. A. Abdullah, and B. Ariantara, "Investigation on vertical straight wickless-heat pipe as gamma irradiator passive cooling system," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2255, no. September, 2020, doi: 10.1063/5.0014139.
- [11] B. Jiao, L. M. Qiu, X. B. Zhang, and Y. Zhang, "Investigation on the effect of filling ratio on the steady-state heat transfer performance of a vertical

- two-phase closed thermosyphon,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, no. 11, pp. 1417–1426, 2008.
- [12] K. Ponomarev, A. Islamova, and F. Dmitry, “Critical heat flux in a closed two-phase thermosyphon,” *EPJ Web Conf.*, vol. 196, p. 00022, 2019, doi: 10.1051/epjconf/201919600022.
- [13] T. Sukchana and C. Jaiboonma, “Effect of Filling Ratios and Adiabatic Length on Thermal Efficiency of Long Heat Pipe Filled with R-134a,” *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 298–306, 2013.