

Optimalisasi pendinginan pasif dengan dual evaporator loop heat pipes: studi visualisasi dengan radiografi neutron

Andhy M. Fathoni^{a,b}, Priska A. Hendrayanto^{a,c}, Ranggi S. Ramadhan^d, Nandy Putra^{a,1}

^aDepartemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Depok, 16425

^bPusat Riset Konversi dan Konservasi Energi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Tangerang Selatan, 15314

^cPusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Tangerang Selatan, 15314

^dRutherford Appleton Laboratory, ISIS Facility, Chilton, OX11 0QX, United Kingdom

¹nandyputra@eng.ui.ac.id

ABSTRACT

In this study, a dual evaporator loop heat pipe (DE-LHP) was developed to accommodate multiple heat sources from a single electronic device. Loop heat pipe (LHP) operation involves complex hydrodynamic phenomena, especially in scenarios involving multiple vapor-liquid interfaces. The complexity of LHPs depends on various elements, such as device design, orientation to gravity, selection of working fluids, heat loads, and condenser cooling conditions. The accuracy of virtual representations in capturing the actual hydrodynamic behavior of a working LHP needs to be improved, hampering the development of precise modeling and design methodologies. This study on thermal performance alone needs to provide a comprehensive picture. Therefore, using visualization is important because research on visualization of working fluid behavior in two phases still needs to be completed. Therefore, neutron radiography is used in this experiment to observe the boiling and fluid dynamics in the heat pipe because it has advantages over other visualization methods. Copper material is used to develop the DE-LHP. The capillary wick used is made of stainless steel screen mesh. Deionized water with a 50% filling ratio is selected as the working fluid. To understand the flow behavior phenomenon under steady-state conditions, the heat load is varied in a constant temperature range of 40-120°C. Three cartridge heaters simulate multiple heat sources and are controlled using a PID controller. The results show that the proposed DE-LHP can function well, accommodate multiple heat sources, and maintain stable performance over a wide range of constant temperatures. Neutron radiography images reveal essential details about the working fluid distribution during operation. The images also show interesting findings, such as steam pulses and entrained working fluid in the vapor chamber and channels.

Keywords: Loop heat pipe, dual evaporator, multiple heat sources, visualization studies, neutron radiography.

Received 2 September 2024; **Presented** 2 Oktober 2024; **Publication** 20 Januari 2025;

DOI: 10.71452/590646

PENDAHULUAN

Heat pipe (HP) adalah perangkat pendinginan pasif yang sangat efisien dan efektif. HP memiliki konduktivitas termal yang sangat tinggi, bahkan dapat mencapai puluhan kali lipat konduktivitas termal dari material logam yang sangat konduktif seperti tembaga atau stainless steel [1]. HP memiliki berbagai macam tipe seperti *straight heat pipe* [2], *pulsating heat pipe* [3], dan *loop heat pipe* (LHP) [4]. Saat ini, HP sudah diaplikasikan pada berbagai sistem manajemen termal untuk memindahkan atau mendisipasi panas seperti pada baterai kendaraan listrik [5], perangkat elektronik [6] atau pada peralatan pesawat luar angkasa [7].

LHP adalah salah satu jenis dari HP yang telah banyak digunakan [8]. Sebagaimana pada HP umumnya, pada LHP panas yang datang dari sumber panas akan diserap oleh evaporator. Panas tersebut akan menguapkan fluida kerja ketika temperatur saturasinya telah tercapai. Uap dari fluida kerja akan

bergerak menuju kondensor melalui jalur uap. Setelah sampai di kondensor, fluida kerja akan terkondensasi dan fasanya akan kembali pada fase cair. Cairan fluida kerja ini akan bergerak kembali ke evaporator dan membentuk siklus loop melalui jalur cair [9].

Fenomena rumit ini menjadi lebih kompleks ketika *dual evaporator* (DE) digunakan dalam LHP [10, 11]. Dalam sistem seperti ini, beberapa antarmuka antara fase cair dan uap terjadi secara bersamaan. Hal ini akan menyebabkan perilaku aliran yang lebih dinamis dan tidak terduga. Memahami perilaku aliran seperti ini penting untuk mengoptimalkan desain DE-LHP dan meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Untuk memahami perilaku aliran dalam LHP, beberapa metode visualisasi seperti menggunakan material transparan [12], termografi inframerah [13], fotografi kecepatan tinggi [14], dan pencitraan sinar-X [15] telah digunakan. Meskipun metode-metode ini telah memberikan wawasan berharga, ada keterbatasan

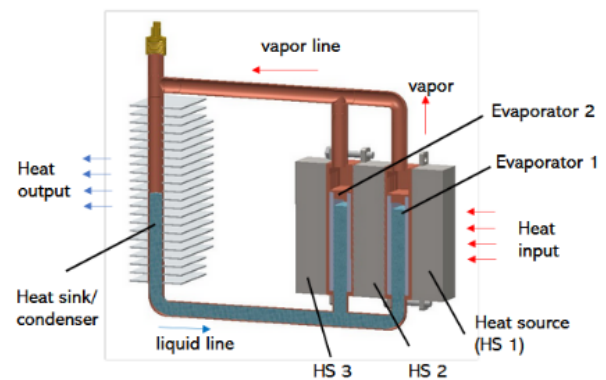
dalam hal resolusi dan kontras. Radiografi neutron telah terbukti menjadi metode visualisasi terbaru yang dapat menggambarkan perilaku aliran kompleks dalam LHP secara akurat [16].

Beberapa studi visualisasi LHP telah dilakukan. Maydanik et al. [17] menggunakan radiografi neutron untuk memvisualisasikan dua LHP dengan konfigurasi serupa. Amonia dan metanol digunakan sebagai fluida kerja pada masing-masing LHP. LHP diuji pada berbagai beban panas dan orientasi. Ditemukan bahwa terdapat pulsasi antarmuka cair-uap di ruang kompensasi dan kondensor. Studi serupa oleh Cimbala et al. [18] berhasil menangkap terjadinya pengeringan sumbu parsial. Dengan menggunakan metode visualisasi lainnya, fenomena ini sulit ditangkap. Chuang et al. menggunakan radiografi neutron untuk memvalidasi prediksi model matematisnya tentang kinerja termal LHP dalam orientasi anti-gravitasi. Terlepas dari literatur yang disebutkan di atas, jumlah studi visual LHP menggunakan radiografi neutron masih sangat terbatas. Selain itu, sepengetahuan penulis, tidak ada studi visual tentang dual evaporator loop heat pipe (DE-LHP) yang ditemukan. Dalam studi ini, perilaku aliran DE-LHP akan dipelajari menggunakan radiografi neutron. Sebuah DE-LHP sederhana telah dirancang dan diproduksi untuk digunakan dalam studi eksperimental. Beberapa fenomena yang terjadi selama operasi LHP akan diobservasi dan dilaporkan.

METODOLOGI

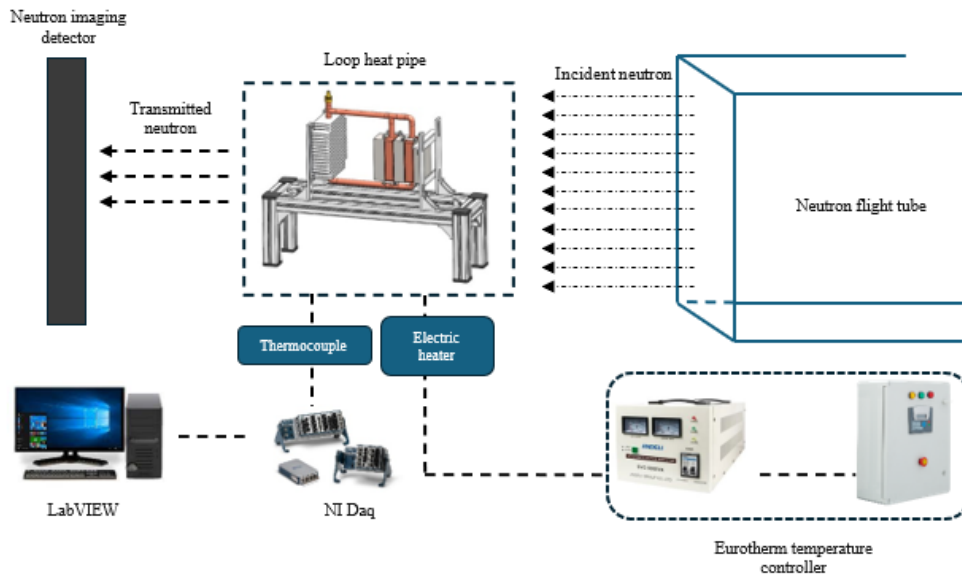
Studi visualisasi dilakukan pada beamline Imaging and Materials Science and Engineering (IMAT) di ISIS Neutron and Muon Source, Rutherford Appleton Laboratory, Inggris. Gambar 1 menunjukkan desain detail dari DE-LHP, sementara Gambar 2 menunjukkan skematik eksperimen DE-LHP di garis sinar neutron. Dimensi DE-LHP dirancang khusus agar sesuai dengan bidang pandang terbesar dari detektor pencitraan neutron yang tersedia di beamline IMAT. Evaporator, saluran cairan dan uap, serta kondensor terbuat dari tembaga, sementara sirip kondensor terbuat dari aluminium. Sumbu kapiler terbuat dari jaring stainless steel dengan porositas 67%. DE-LHP diisi

dengan air deionisasi sebagai fluida kerja dengan rasio pengisian 50%. Tiga blok stainless steel terbuat dari SS400, masing-masing berukuran 60 x 28 x 15 mm³, berfungsi sebagai penyangga untuk pemanas cartridge yang digunakan sebagai sumber panas. Pemanas ini dikendalikan oleh pengontrol suhu EUROTHERM. Tiga termokopel tipe K dipasang di permukaan blok sumber panas untuk mengukur suhu sumber panas. Termokopel terhubung ke sistem akuisisi data NI DAQ 9214, yang merekam data suhu selama pengujian. Beban panas 40 W diberikan pada setiap sumber panas, mengakumulasi total beban panas 120 W. Suhu lingkungan dipertahankan pada 20-22°C. DE-LHP akan dimiringkan 10° untuk mengurangi terjadinya fenomena dari cairan yang terbawa ke jalur uap dari evaporator.



Gambar 1. Gambar 3D detail dari DE-LHP

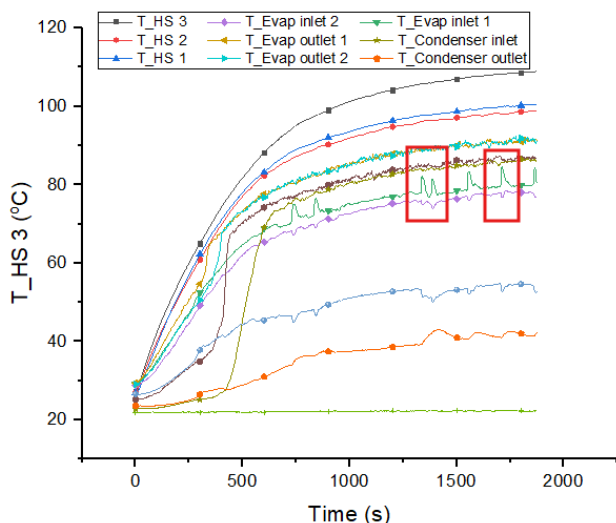
DE-LHP dipasang di panggung sampel dan disejajarkan di depan sistem detektor pencitraan neutron: ANDOR Zyla sCMOS 4.2 Plus, yang dipasang di dalam kotak kamera tomografi Messina. Scintillator LiF/ZnS dengan ketebalan 200 µm digunakan, dengan area aktif 220 × 220 mm². Pinhole 80 mm digunakan, memberikan L/D sebesar 125. Jarak sampel ke detektor sekitar 60 mm, memberikan resolusi spasial sekitar 500 µm. Gambar diambil dengan waktu paparan tiga detik. Gambar yang diambil kemudian diproses menggunakan perangkat lunak Fiji/Image-J.



Gambar 2. Skematik eksperimental dari DE-LHP pada neutron beam line

HASIL DAN PEMBAHASAN

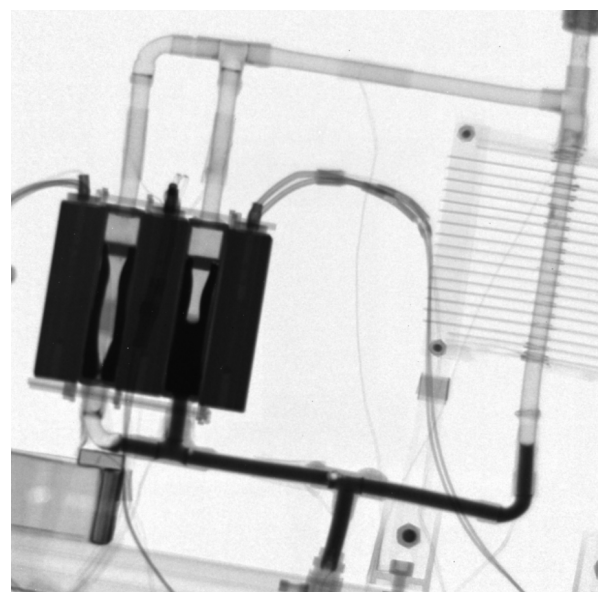
Fluktuasi temperatur pada DE-LHP ketika beban panas diterapkan pada evaporator ditunjukkan pada Gambar 3. Sistem ini bergantung pada konveksi paksa berbasis udara untuk pembuangan panas. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, temperatur ambien berkisar 22oC. Tiga sumber panas dipasang di antara kedua evaporator dan pada sisi kanan dan kiri evaporator (lihat Gambar 1).



Gambar 3. Distribusi temperatur pada DE-LHP

Awalnya, setiap bagian dari loop berada pada suhu sekitar suhu lingkungan. Ketika sumber panas dengan daya 120 W diterapkan pada sumber panas, evaporator pada DE-LHP menyerap panas dan semua bagian dari loop secara bertahap meningkat suhunya.

Secara bersamaan, temperatur outlet evaporator melonjak. Ini menunjukkan adanya uap. Temperatur saluran uap dan inlet kondensor dengan cepat mengikuti, meningkat suhunya karena uap mulai melewati saluran uap dan masuk ke kondensor. Cairan kondensat kemudian melewati saluran cairan, menurunkan suhu di sepanjang saluran cairan. Ini terjadi secara terus menerus hingga kondisi steady state berhasil tercapai. Dari Gambar 3, didapatkan bahwa kondisi steady-state tercapai setelah 1000 detik.



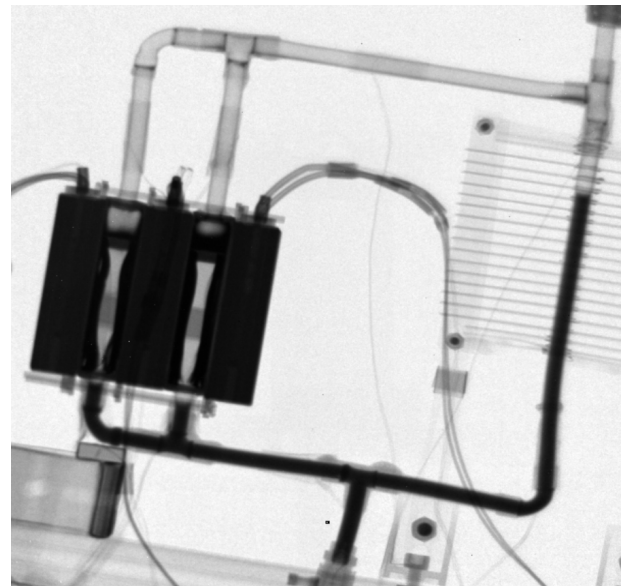
Gambar 4. Distribusi cairan fluida kerja pada saat belum ada beban panas

Gambar 4 menunjukkan distribusi transien fluida kerja di dalam DE-LHP tanpa beban panas. Beban

panas 120 W diterapkan pada dual evaporator, dibagi rata di tiga sumber panas, di mana masing-masing menyediakan 40 W. Radiografi neutron memberikan kontras yang lebih gelap untuk material dengan atenuasi neutron yang tinggi, seperti fluida kerja dalam keadaan cair, struktur sumbu, dan sumber panas yang terbuat dari stainless steel. Sebaliknya, fluida kerja dalam keadaan uap menunjukkan kontras yang lebih terang. Gambar 4 menunjukkan distribusi fluida kerja ketika tidak ada beban panas yang diterapkan pada DE-LHP (kondisi awal, waktu $t = 0$ s). Terlihat jelas bahwa distribusi fluida kerja tidak mengikuti prinsip bejana berhubungan, mengkonfirmasi studi visualisasi sebelumnya oleh Maydanik et al. [17]. Tingkat fluida kerja tidak sama di saluran cairan dan kedua evaporator. Fluida kerja diserap oleh evaporator yang lebih dekat dengan kondensor. Hal ini mungkin disebabkan oleh penurunan tekanan yang lebih rendah karena jarak saluran yang lebih pendek. Asimetri geometris juga dapat menyebabkan ketidakseimbangan tekanan yang membuat fluida kerja lebih banyak diserap oleh salah satu evaporator. Karena kualitas pembuatan sumbu jaring bervariasi, hal ini dapat menyebabkan salah satu evaporator memiliki gaya kapiler yang lebih kuat dan lebih menarik bagi fluida kerja.

Gambar 5 menunjukkan distribusi fluida kerja ketika beban panas mulai diterapkan pada evaporator. Seperti yang terlihat pada Gambar 3, kondisi steady state tercapai sekitar 1000 detik setelah operasi dimulai. Gambar 5 menunjukkan kondisi steady state di dalam kondensor, pada kondisi ini, suhu sumber panas mencapai sekitar 80°C dan hampir semua cairan di evaporator telah menguap karena titik jenuh fluida kerja telah tercapai. Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa DE-LHP mencapai kondisi operasionalnya dengan cepat dan perpindahan panas dari sumber panas ke cairan sangat baik, di mana cairan yang masuk ke evaporator langsung menguap. Di sekitar kondensor, cairan kondensat telah terbentuk karena panas yang dibuang ke lingkungan oleh kondensor. Gambar 3 juga menunjukkan bahwa suhu steady state sumber panas 3 mencapai 115°C , yang lebih tinggi daripada suhu steady state sumber panas 2 dan 3 yang mencapai sekitar $95\text{-}100^{\circ}\text{C}$. Ini menunjukkan bahwa evaporator 2 bekerja lebih baik daripada evaporator 1 dalam menyerap panas dari sumber panas. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan penurunan tekanan antara kondensor dan masing-masing evaporator. Penurunan tekanan yang lebih rendah pada evaporator 2 menyebabkan lebih banyak fluida kerja mengalir melaluinya, sehingga memberikan kinerja termal yang lebih baik. Perbedaan tekanan

kapiler dari kedua sumbu di evaporator 1 dan 2 mungkin terjadi, tetapi hal ini seharusnya dapat diabaikan karena material, struktur, dan ketebalan sumbu sama.



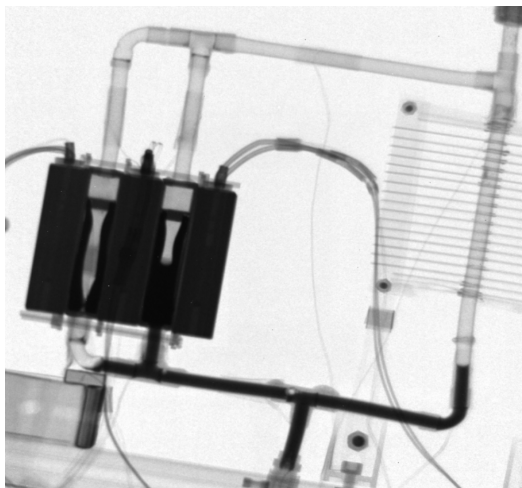
Gambar 5. Distribusi cairan fluida kerja pada saat kondisi steady-state dengan beban 120 W

Gambar 3 juga menunjukkan fenomena pulsa uap (*vapor pulse*). Fenomena ini pada Gambar 3 ditunjukkan dengan kotak berwarna merah. Salah satu fenomena pulsa uap terjadi pada detik ke 1700 pada inlet evaporator 2. Kejadian pulsa uap ini dikonfirmasi dari studi visualisasi dengan radiografi neutron yang ditunjukkan pada Gambar 6. Dari Gambar 6 dapat dilihat distribusi cairan pada kondisi awal (lihat Gambar 6 (a)), sebelum pulsa (lihat Gambar 6 (b) dan Gambar 6 (c)) dan saat terjadi pulsa uap (Gambar 6 (d)). Pulsa uap ini dapat terjadi kemungkinan karena adanya akumulasi tekanan seiring naiknya temperatur di dalam evaporator. Akumulasi tekanan ini ketika mencapai puncaknya akan dilepas dalam bentuk pulsa uap. Pada kondisi studi ini, pelepasan uap lebih mudah ke arah jalur cair karena lebih sedikit adanya penghalang. Hal yang menarik, dari Gambar 3 dapat diobservasi bahwa terjadinya pulsa uap ternyata mempengaruhi keseluruhan DE-LHP dimana hampir di semua posisi DE-LHP, terjadi distraksi dan pulsa temperatur. Hal ini dapat mempengaruhi performa termal secara keseluruhan dari DE-LHP. Pada penelitian yang akan datang, perlu diadakan suatu penyesuaian agar pulsa uap ini dapat berkurang atau bahkan dihilangkan.

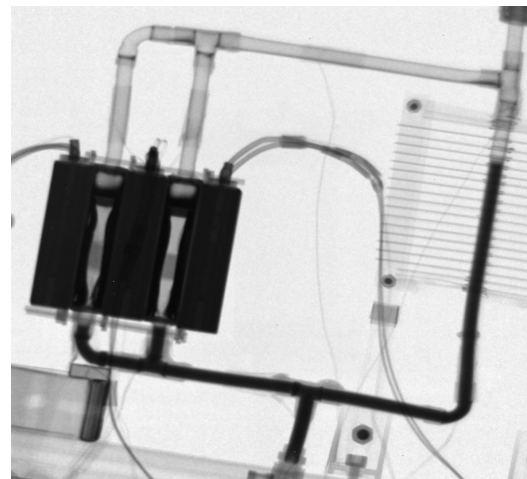
KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, studi visual DE-LHP menggunakan radiografi neutron disajikan. Studi ini menunjukkan bahwa radiografi neutron dapat menjadi alat yang efektif untuk memvisualisasikan perilaku aliran fluida kerja di dalam DE-LHP tanpa mengubah penutupnya menjadi bahan yang transparan secara visual. Hasilnya menunjukkan bahwa ketika DE-LHP mencapai operasi steady state, ditemukan bahwa sebagian besar fluida kerja langsung menguap begitu memasuki ruang kompensasi.

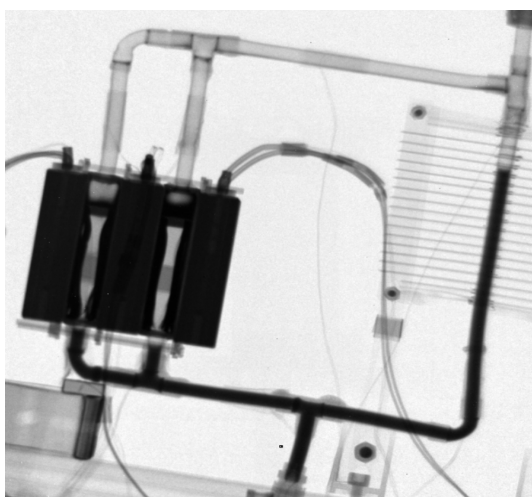
Studi ini juga menunjukkan bahwa terjadinya pulsa uap saat kondisi steady state sudah tercapai. Hal ini dapat terjadi karena adanya pelepasan tekanan uap yang terakumulasi pada evaporator. Kejadian ini cukup merugikan karena dapat mempengaruhi keseluruhan kinerja termal dari DE-LHP. Berikutnya, studi yang lebih mendalam perlu dilakukan untuk lebih memahami perilaku aliran di dalam DE-LHP. Beberapa variasi yang dapat dilakukan meliputi rasio pengisian, orientasi geometris, skenario beban panas, dan fluida kerja yang berbeda. Selain itu, penelitian lebih mempertimbangkan pemilihan wick yang tepat untuk mengurangi terjadinya pulsa uap agar kinerja termal dari DE-LHP dapat optimal.



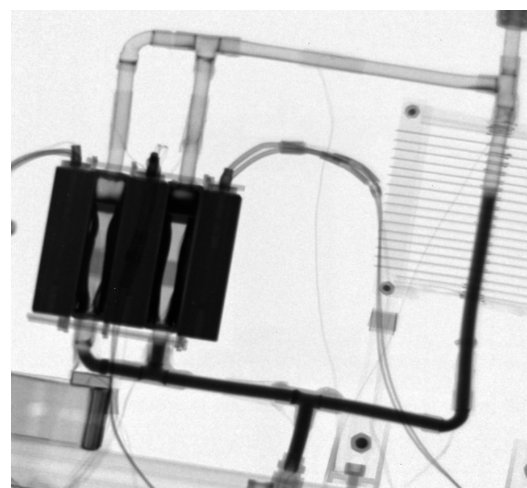
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 6. Kondisi sebelum dan saat pulsa uap. (a) kondisi inisial, (b) 1000 detik, (c) 1500 detik, (d) 1700 detik (saat terjadinya pulsa uap)

UCAPAN TERIMA KASIH DAN DANA PENELITIAN

Penulis ingin berterima kasih kepada ISIS Neutron Muon and Source atas penyediaan waktu pemakaian neutron radiografi (DOI: 10.5286/ISIS.E.RB2410341) yang didanai melalui International Science Partnership Fund (ISPF) Inggris.

KONTRIBUSI PENULIS

Andhy M. Fathoni: Konseptualisasi, Metodologi, Investigasi, Pemrosesan gambar, Penulisan – draf asli. Priska A. Hendrayanto: Metodologi, Fabrikasi alat, Investigasi, Pemrosesan gambar. Rangi S. Ramadhan: Penyediaan laboratorium, Investigasi, Tinjauan dan penyuntingan, Supervisi, Perolehan dana. Nandy Putra: Konseptualisasi, tinjauan & penyuntingan, Supervisi, Perolehan dana.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. M. Fathoni, N. Putra, and T. M. I. Mahlia, "A systematic review of battery thermal management systems based on heat pipes," *Journal of Energy Storage*, vol. 73, p. 109081, 2023/12/15/ 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109081>.
- [2] L. Liu, X. Ma, X. Ji, X. Yang, and J. Wei, "Performance improvement of loop heat pipe by micro-pin-fins/powders composite surface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Article vol. 208, 2023, Art no. 124093, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124093.
- [3] E. D. Patel and S. Kumar, "Thermal performance of a single loop pulsating heat pipe with asymmetric adiabatic channel," *Applied Thermal Engineering*, Article vol. 219, 2023, Art no. 119541, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119541.
- [4] V. G. Pastukhov and Y. F. Maydanik, "Temperature control of a heat source using a loop heat pipe integrated with a thermoelectric converter," *International Journal of Thermal Sciences*, Article vol. 184, 2023, Art no. 108012, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.108012.
- [5] Q. Zhang, G. Cao, and X. Zhang, "Study of wet cooling flat heat pipe for battery thermal management application," *Applied Thermal Engineering*, Article vol. 219, 2023, Art no. 119407, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119407.
- [6] X. Wang *et al.*, "Visualization study of a flat confined loop heat pipe for electronic devices cooling," *Applied Energy*, Article vol. 322, 2022, Art no. 119451, DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119451.
- [7] H. Zhang *et al.*, "Development of Flat-Plate Loop Heat Pipes for Spacecraft Thermal Control," *Microgravity Science and Technology*, Article vol. 31, no. 4, pp. 435-443, 2019, DOI: 10.1007/s12217-019-09716-8.
- [8] H. Wang, G. Lin, X. Shen, L. Bai, and D. Wen, "Effect of evaporator tilt on a loop heat pipe with non-condensable gas," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Article vol. 128, pp. 1072-1080, 2019, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.033.
- [9] L. Wang *et al.*, "Research on the Heat Transfer Characteristics of a Loop Heat Pipe Used as Mainline Heat Transfer Mode for Spacecraft," *Journal of Thermal Science*, Article vol. 28, no. 4, pp. 736-744, 2019, DOI: 10.1007/s11630-019-1142-4.
- [10] Y. Qu, S. Qiao, and D. Zhou, "Steady-state modelling of dual-evaporator loop heat pipe," *Applied Thermal Engineering*, vol. 193, p. 116933, 2021/07/05/ 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116933>.
- [11] N. Phan, Y. Saito, N. Katayama, and H. Naganano, "Operating characteristics of a dual flat-evaporator loop heat pipe for single heat source cooling in any orientation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Article vol. 172, 2021, Art no. 121146, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121146.
- [12] Q. Zhang, G. Lin, X. Shen, L. Bai, and D. Wen, "Visualization study on the heat and mass transfer in the evaporator-compensation chamber of a loop heat pipe," *Applied Thermal Engineering*, Article vol. 164, 2020, Art no. 114472, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114472.
- [13] N. S. Ramasamy, P. Kumar, B. Wangaskar, S. Khandekar, and Y. F. Maydanik, "Miniature ammonia loop heat pipe for terrestrial applications: Experiments and modeling," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 124, pp. 263-278, 2018/02/01/ 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.10.018>.
- [14] S. C. Zhao, Z. K. Zhang, R. Z. Zhao, Z. C. Liu, and W. Liu, "Experimental study on global visualization of loop heat pipe with a flat disk-shaped evaporator," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 10895-10912, 2022/11/01/ 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.08.240>.
- [15] R. J. Mglen, "An introduction to additive manufactured heat pipe technology and advanced

- thermal management products," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 25, p. 100941, 2021/10/01/ 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100941>.
- [16] P. Y. A. Chuang, J. M. Cimbala, and J. S. Brenizer, "Experimental and analytical study of a loop heat pipe at a positive elevation using neutron radiography," *International Journal of Thermal Sciences*, Article vol. 77, pp. 84-95, 2014, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.10.010.
- [17] Y. F. Maydanik, V. G. Pastukhov, and S. E. Kichanov, "Visual studies of the operation of loop heat pipes by neutron radiography," *Thermal Science and Engineering Progress*, Article vol. 35, 2022, Art no. 101444, DOI: 10.1016/j.tsep.2022.101444.
- [18] J. M. Cimbala *et al.*, "Study of a loop heat pipe using neutron radiography," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 61, no. 4, pp. 701-705, 2004/10/01/ 2004, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.03.104>.