Perancangan dan Pembuatan *Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon* untuk Sistem Manajemen Termal Baterai Kendaraan Listrik

Muhamad Rizki Sumartono[1]; Toto Supriyono[2]; Bambang Ariantara[3]

[1],[2],[3] Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, Bandung, Indonesia

sumartono.rizki.m@unpas.ac.id; supriyono.toto@unpas.ac.id; bambang.ariantara@unpas.ac.id

Abstrak

Pengelolaan panas pada baterai kendaraan listrik diperlukan untuk mendukung pengembangan sistem manajemen termal yang efektif. Salah satu alternatif yang dapat digunakan adalah *Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon*, yang memanfaatkan perubahan fase fluida kerja untuk memindahkan panas dari evaporator menuju kondensor. Penelitian ini bertujuan merancang dan membuat prototipe *Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon* untuk aplikasi sistem manajemen termal baterai kendaraan listrik. Perancangan dilakukan dengan menentukan konfigurasi sistem, dimensi komponen, material, fluida kerja, serta sistem pendinginan kondensor. Prototipe dirancang menggunakan pipa tembaga berdiameter 1 1/8 inch, satu evaporator, dan dua kondensor yang disusun secara horizontal. Air digunakan sebagai fluida kerja, sedangkan kedua kondensor dilengkapi fin aluminium dengan pendinginan udara untuk meningkatkan luas permukaan perpindahan panas. Tahapan penelitian meliputi identifikasi masalah, studi literatur, perancangan, pengadaan alat dan bahan, serta pembuatan dan perakitan prototipe. Hasil penelitian menunjukkan bahwa prototipe *Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon* telah berhasil dibuat dan dirakit sesuai dengan rancangan yang ditetapkan. Prototipe ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan sistem manajemen termal baterai kendaraan listrik.

Kata kunci: baterai kendaraan listrik, *dual condenser*, *fin aluminium*, *two-phase loop thermosyphon*, sistem manajemen termal.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan kendaraan listrik (*electric vehicle*/EV) sebagai alternatif transportasi rendah emisi meningkatkan kebutuhan terhadap sistem manajemen termal baterai yang efektif dan andal. Baterai *Lithium-Ion* (Li-Ion) banyak digunakan pada kendaraan listrik karena memiliki kerapatan energi yang tinggi dan karakteristik penyimpanan energi yang sesuai untuk aplikasi otomotif [1]–[3]. Namun, selama proses pengisian dan pengosongan, baterai menghasilkan panas akibat proses elektrokimia dan hambatan internal. Akumulasi panas yang tidak terkendali dapat meningkatkan temperatur baterai, mempercepat degradasi material, menurunkan kinerja, serta meningkatkan risiko terjadinya *thermal runaway*. Oleh karena itu, diperlukan *Battery Thermal Management System* (BTMS) untuk membantu menjaga temperatur baterai dalam kondisi operasi yang sesuai [1], [2], [4].

Berbagai teknologi pendinginan telah dikembangkan untuk aplikasi BTMS, termasuk pendinginan udara, cairan, *heat pipe*, dan *thermosyphon*. Salah satu teknologi yang berpotensi digunakan adalah *Two-Phase Loop Thermosyphon*, yaitu sistem perpindahan kalor yang memanfaatkan perubahan fase fluida kerja dari cair menjadi uap dan kembali menjadi cair. Kalor diserap pada evaporator melalui proses penguapan, kemudian dibawa menuju kondensor untuk dilepaskan ke lingkungan melalui proses kondensasi. Fluida kerja selanjutnya kembali menuju evaporator sehingga siklus perpindahan kalor berlangsung secara berulang. Pada konfigurasi yang memanfaatkan sirkulasi alami, pergerakan fluida dapat berlangsung dengan bantuan gravitasi dan perbedaan densitas tanpa memerlukan pompa mekanis sebagai penggerak utama [5], [6].

Kinerja termal *Two-Phase Loop Thermosyphon* dipengaruhi oleh sejumlah parameter, antara lain beban kalor, rasio pengisian fluida kerja (*filling ratio*), temperatur lingkungan, serta konfigurasi evaporator dan kondensor [5], [6]. Kondensor memiliki peran penting dalam proses pelepasan kalor karena menentukan kemampuan sistem untuk mengembunkan uap dan mengembalikan fluida kerja ke fase cair. Oleh sebab itu, konfigurasi kondensor menjadi salah satu aspek yang perlu diperhatikan dalam pengembangan sistem *thermosyphon*. Penggunaan dua kondensor pada konfigurasi *Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon* merupakan salah satu alternatif perancangan untuk mendukung proses pelepasan kalor. Meskipun

demikian, karakteristik termal konfigurasi tersebut perlu dievaluasi berdasarkan rancangan dan kondisi operasinya melalui pengujian eksperimental.

Penelitian terdahulu telah membahas penerapan teknologi berbasis *heat pipe* untuk sistem manajemen termal baterai serta pengembangan model analisis termal-hidraulik pada *Two-Phase Loop Thermosyphon* [5], [6]. Kajian tersebut memberikan landasan bagi pengembangan sistem perpindahan kalor berbasis perubahan fase. Namun, perancangan dan pembuatan prototipe *Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon* untuk mendukung sistem manajemen termal baterai masih memerlukan kajian yang mempertimbangkan konfigurasi komponen, pemilihan material, karakteristik fluida kerja, dan mekanisme pelepasan kalor. Pengujian terhadap prototipe diperlukan untuk memperoleh data aktual mengenai perilaku temperatur dan karakteristik perpindahan kalor sistem.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membuat prototipe *Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon* sebagai alternatif sistem pendinginan untuk manajemen termal baterai kendaraan listrik. Penelitian dilaksanakan melalui tahapan perancangan komponen, pemilihan material, fabrikasi, perakitan, dan pengujian eksperimental. Pengujian dilakukan dengan mengukur temperatur pada bagian evaporator, kondensor, dan lingkungan untuk mengevaluasi karakteristik termal prototipe. Parameter evaluasi meliputi temperatur kerja, laju perpindahan kalor, dan tahanan termal. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai karakteristik termal prototipe yang dikembangkan serta menjadi dasar bagi pengembangan lebih lanjut teknologi pendinginan baterai berbasis *Two-Phase Loop Thermosyphon*.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana merancang Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon untuk aplikasi sistem manajemen termal baterai kendaraan listrik?
2. Bagaimana proses pembuatan prototipe Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon berdasarkan rancangan yang telah ditentukan?

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang meliputi identifikasi masalah, studi literatur, perancangan *Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon*, pengadaan alat dan

bahan, serta pembuatan dan perakitan prototipe. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Berdasarkan Gambar 1, penelitian diawali dengan identifikasi masalah dan studi literatur untuk memperoleh landasan teori serta referensi yang relevan dengan perancangan *Two-Phase Loop Thermosyphon*. Tahap selanjutnya adalah perancangan prototipe yang mencakup pemilihan material, pemilihan fluida kerja, dan penentuan dimensi komponen berdasarkan penelitian terdahulu. Setelah rancangan ditetapkan, dilakukan pengadaan alat dan bahan sesuai kebutuhan, kemudian dilanjutkan dengan proses fabrikasi dan perakitan prototipe *Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon*.

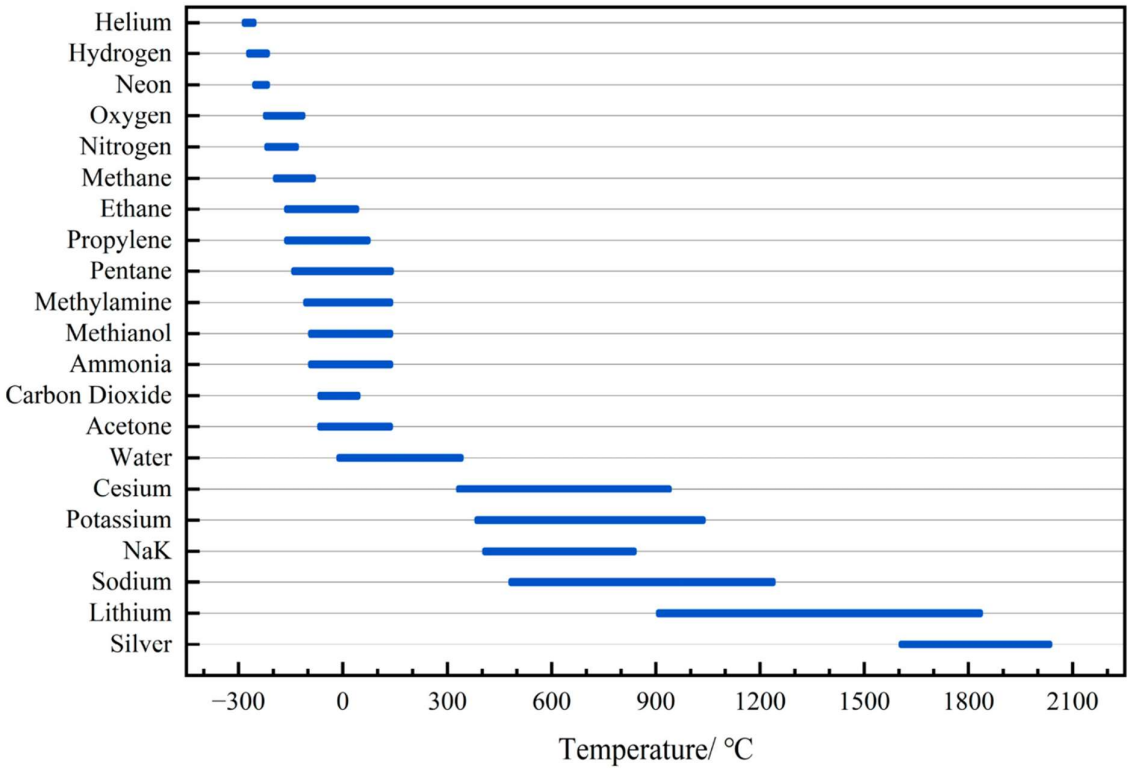
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pemilihan Material

Test Material	*M* [℃]	*N* [℃]	Δ*t* [s]	*α* [mm²/s]	*K*2 [$^{w}/_{m\cdot k}$]
Red copper (Cu)	4.8	2.5	6.0	114.97	401.76
Brass (Bs)	3.7	1.1	12.2	30.40	94.87
Silver (Ag)	7.9	3.9	3.6	177.08	427.24
Aluminium (AL1050)	7.4	2.7	5.0	89.27	217.70
Aluminium Nitride (AlN)	3.0	1.3	9.0	59.79	144.24

Berdasarkan hasil pengukuran Zhang *et al.* [7], perak memiliki konduktivitas termal sebesar 427,24 W/(m·K), sedangkan tembaga merah sebesar 401,76 W/(m·K). Meskipun konduktivitas termal perak sekitar 6,34% lebih tinggi dibandingkan tembaga, penggunaan perak sebagai material pipa *thermosyphon* kurang ekonomis karena harga materialnya jauh lebih tinggi. Oleh karena itu, tembaga dipilih sebagai material pipa *Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon* karena memiliki konduktivitas termal yang tinggi dengan pertimbangan biaya material yang lebih ekonomis.

3.2 Pemilihan Fluida Kerja



Pemilihan fluida kerja pada penelitian ini didasarkan pada rentang temperatur operasi sistem, yaitu 40–70 °C. Berdasarkan grafik rentang temperatur penggunaan berbagai fluida kerja, air (*water*) memiliki rentang temperatur operasi yang mencakup rentang temperatur yang dibutuhkan dalam penelitian ini [8]. Oleh karena itu, air dipilih sebagai fluida kerja pada *Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon* karena sesuai dengan kebutuhan temperatur operasi sistem serta memiliki kalor laten penguapan yang tinggi. Pemilihan air diharapkan dapat mendukung proses perpindahan panas melalui mekanisme penguapan dan kondensasi di dalam sistem.

3.3 Pemilihan dimensi termosiphon

No	Penelitian Terdahulu	Diameter Thermosyphon	Jumlah Evaporator	Jumlah Kondensor	Posisi Evaporator	Media Pendingin Kondensor	Tahanan Termal Terbaik (°C/W)
1	M. Haykal A. (2022) [9]	3/8 inch	2	1	Vertikal	Water Jacket	0,052
2	Aldi N. (2024) [10]	5/8 inch	3	1	Vertikal	Water Jacket	0,124
3	Andrew Suryadeva (2024) [11]	5/8 inch	3	2	Vertikal	Water Jacket	0,144
4	Agung Nugraha (2025) [12]	1 1/8 inch	1	2	Horizontal	Water Jacket	0,022
5	Rizki M. Yusuf (2025) [13]	1 1/8 inch	1	1	Horizontal	Water Jacket	0,028
6	Razi Fahrur (2025)	1 1/8 inch	1	1	Horizontal	Water Jacket	0,0358

7	Mutia Fauziah (2025) [15]	1 1/8 inch	1	2	Horizontal	Water Jacket	0,023
8	Bellani et al. (2019) [16]	-	2	5	Vertikal	fin	0,011
9	Zamanifard & Wang (2025) [17]	-	2	2	Horizontal	fin	0,081
10	Penelitian ini (2026)	1 1/8 inch	1	2	Horizontal	Fin (Air Cooling)	—

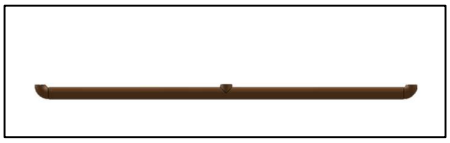
Berdasarkan hasil kajian terhadap penelitian terdahulu, penelitian ini menggunakan konfigurasi *Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon* dengan diameter pipa 1 1/8 inch, satu evaporator, dan dua kondensor yang disusun secara horizontal. Pemilihan konfigurasi tersebut didasarkan pada penelitian Agung Nugraha (2025) dan Mutia Fauziah (2025), yang menggunakan konfigurasi satu evaporator dan dua kondensor horizontal dengan nilai tahanan termal terbaik masing-masing sebesar 0,022 °C/W dan 0,023 °C/W. Hasil tersebut menjadi pertimbangan dalam menentukan konfigurasi dasar sistem thermosyphon yang digunakan dalam penelitian ini.

Perbedaan utama penelitian ini terletak pada penggunaan sirip aluminium (*aluminium fin*) sebagai media peningkatan perpindahan panas pada kondensor dengan pendinginan menggunakan udara, menggantikan sistem *water jacket* yang digunakan pada penelitian terdahulu. Penambahan sirip ditujukan untuk meningkatkan luas permukaan perpindahan panas antara kondensor dan udara lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini berfokus pada pengembangan konfigurasi *Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon* dengan pendinginan udara serta evaluasi kinerja termalnya melalui pengujian eksperimental.

3.4 Proses fabrikasi *dual condenser two-phase loop thermosyphon*

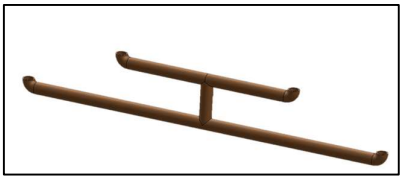
- Pipa tembaga dengan diameter 1 1/8 inci sepanjang 5,6meter dipotong menjadi beberapa bagian dengan panjang masing-masing: 237 mm (2 pipa), 225 mm (2 pipa), 340 mm (2 pipa), 110 mm (1 pipa), 350 mm (2 pipa), 90 mm (1 pipa), dan 791 mm (1 pipa).

- Kemudian, dua pipa dengan panjang 791 mm dan 90 mm disambungkan menggunakan *elbow* dan *tee*, dengan teknik penyambungan *brazing*.



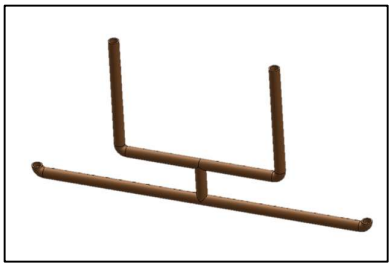
Gambar 1. Fabrikasi *thermosyphon* tahap 1

- Kemudian, dua buah pipa dengan panjang 225 mm disambungkan menggunakan *tee* dan *elbow*, yang kemudian terhubung ke rangkaian bawah dengan pipa berukuran 110 mm melalui *tee*, seperti yang terlihat pada gambar di bawah 2 pipa ukuran 225 mm dihubungkan dengan *tee* dan *elbow* disambungkan dengan rangkaian bawah dengan pipa 110 mm menggunakan *tee* seperti gambar di bawah



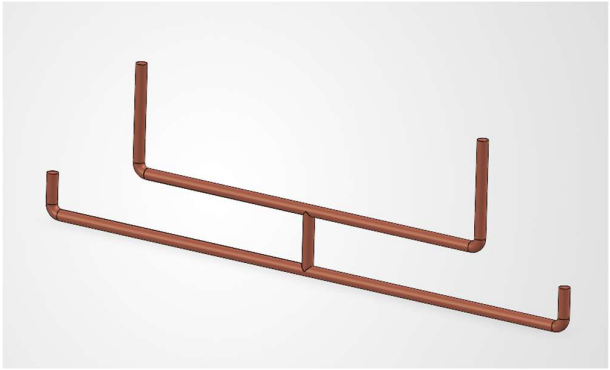
Gambar 2. Fabrikasi *thermosyphon* tahap 2

- Setelah evaporator dan rangkaian bawah terbentuk, dua buah pipa dengan panjang 340 mm kemudian disambungkan menggunakan *elbow*, seperti yang terlihat pada gambar di bawah.



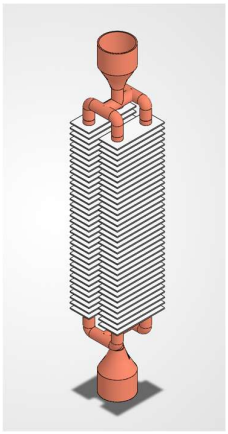
Gambar 3. Fabrikasi *thermosyphon* tahap 3

- Kemudian, dua pipa dengan panjang 50 mm disambungkan menggunakan *elbow*.



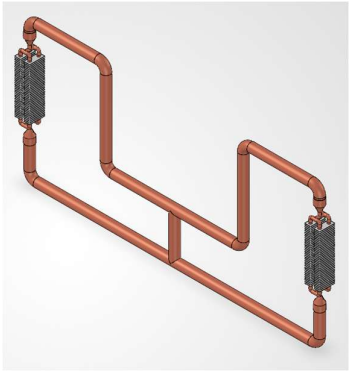
Gambar 4. Fabrikasi *thermosyphon* tahap 4

- Sebelum kedua bagian atas disambungkan, terlebih dahulu dilakukan pemasangan fin aluminium pada bagian kondensor. Fin dipasang pada permukaan kondensor untuk memperluas area perpindahan panas antara kondensor dan udara lingkungan. Pemasangan fin dilakukan sesuai dengan rancangan dimensi dan susunan yang telah ditentukan, sehingga kondensor dapat melepaskan kalor ke udara melalui permukaan sirip. Setelah pemasangan fin selesai, kedua bagian atas disambungkan untuk membentuk konstruksi Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon.



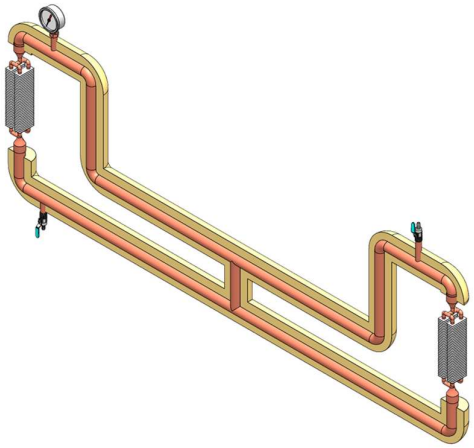
Gambar 5. Fabrikasi *thermosyphon* tahap 5

- Setelah semua bagian diatas selesai, setiap bagian tersebut disambungkan menggunakan *elbow* hingga membentuk *loop*, seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 6. Fabrikasi *thermosyphon* tahap 6

Setelah pembuatan *loop* selesai, tahap terakhir adalah menyambungkan *Pressure Gauge*, 2 *Ball Valve*, dan dop ½ inci menggunakan tiga batang pipa ½ inci dengan panjang 50 mm. Proses penyambungan pada setiap tahap diatas dilakukan dengan metode las *brazzing* di setiap sambungannya hingga membentuk *loop thermosyphon* seperti yang terlihat di bawah ini.



Gambar 7. Fabrikasi *thermosyphon* tahap akhir

4. Kesimpulan

1. Rancangan prototipe Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon telah ditetapkan menggunakan material tembaga dengan air sebagai fluida kerja, diameter pipa 1 1/8 inch, satu evaporator, dan dua kondensor horizontal yang dilengkapi fin aluminium sebagai media perpindahan panas dengan pendinginan udara.

2. Prototipe Dual Condenser Two-Phase Loop Thermosyphon telah berhasil dibuat dan dirakit sesuai dengan rancangan yang ditetapkan, sehingga menghasilkan prototipe fisik yang dapat digunakan untuk pengembangan sistem manajemen termal baterai kendaraan listrik.

DAFTAR PUSTAKA

[1] F. S. Hwang *et al*., "Review of battery thermal management systems in electric vehicles," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 192, Art. no. 114171, 2024.

[2] A. Maiorino, C. Cilenti, F. Petruzziello, and C. Aprea, "A review on thermal management of battery packs for electric vehicles," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 238, Art. no. 122035, 2024.

[3] R. El Kassar, A. Al Takash, J. Faraj, M. Hammoud, M. Khaled, and H. S. Ramadan, "Recent advances in lithium-ion battery integration with thermal management systems for electric vehicles: A summary review," *J. Energy Storage*, vol. 91, Art. no. 112061, 2024.

[4] S. Chavan *et al*., "Thermal management strategies for lithium-ion batteries in electric vehicles: Fundamentals, recent advances, thermal models, and cooling techniques," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 232, Art. no. 125918, 2024.

[5] D. M. Weragoda, G. Tian, A. Burkitbayev, K.-H. Lo, and T. Zhang, "A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 224, Art. no. 120070, 2023.

[6] W. Zhang, W. Hao, and X. Wu, "Development of transient thermal-hydraulic analysis model for the two-phase loop thermosyphon," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 243, Art. no. 122764, 2024.

[7] W.-H. Zhang, W.-K. Lin, C.-H. Tsai, P.-H. Wu, and S.-K. Wu, "A thermo-electric apparatus for thermal diffusivity and thermal conductivity measurements," *Energies*, vol. 12, no. 22, Art. no. 4238, 2019, doi: 10.3390/en12224238.

[8] A. Faghri, "Porous structures in heat pipes," in *Heat Pipes: Review, Opportunities and Challenges*. IntechOpen, 2017.

[9] M. H. Andalusia, “Kaji eksperimental kinerja *multi evaporator loop thermosyphon* untuk pendinginan baterai,” Skripsi, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, Bandung, 2022.

[10] A. Nureliansyah, “Termosifon dua fase dengan *multi evaporator* (*Multi Evaporator Two-Phase Loop Thermosyphon*),” Skripsi, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, Bandung, 2024.

[11] A. Suryadeva, B. Ariantara, and T. Supriyono, “Pembuatan dan uji kinerja *dual condenser multi evaporator two-phase loop thermosyphon* untuk pendingin baterai,” Skripsi, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, Bandung, 2024.

[12] A. Nugraha Saputra, “Kaji eksperimental *dual condenser two-phase loop thermosyphon* dengan *mechanical excitation*,” Skripsi, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, Bandung, 2025.

[13] R. Maulana Yusuf, “Kaji eksperimental *single condenser two-phase loop thermosyphon*,” Skripsi, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, Bandung, 2025.

[14] F. Razi Andika, “Kaji eksperimental *single condenser two-phase loop thermosyphon* dengan *mechanical excitation*,” Skripsi, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, Bandung, 2025.

[15] M. Fauziah, “Kaji eksperimental *dual condenser two-phase loop thermosyphon*,” Skripsi, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, Bandung, 2025.

[16] P. Bellani, F. Milanez, M. Mantelli, S. Filippeschi, M. Mameli, and F. Fantozzi, “Theoretical and experimental analyses of the thermal resistance of a loop thermosyphon for passive solar heating of buildings,” *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, vol. 7, no. 1, 2019, doi: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2019031160.

[17] A. Zamanifard and C.-C. Wang, “An experimental study on a novel two-phase loop thermosyphon applicable for cooling in 2U servers,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 278, Art. no. 127123, 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127123.