

**VISUALISASI ALIRAN
TWO PHASE LOOP THERMOSYPHON**

Flow Visualization of Two Phase Loop Thermosyphon

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik Mesin

Oleh :

Martina Tekla Imelda

228070002



**MAGISTER TEKNIK MESIN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS PASUNDAN BANDUNG
2025**

ABSTRAK

Two-phase loop thermosyphon (TPLT) merupakan perangkat perpindahan kalor pasif yang berpotensi tinggi untuk diaplikasikan sebagai sistem pendingin baterai kendaraan listrik. Namun, kinerja TPLT tidak hanya ditentukan oleh nilai perpindahan panas, tetapi juga oleh kestabilan aliran dua fasa di dalam loop. Penelitian ini bertujuan mengamati secara visual mekanisme perubahan fasa, pola aliran, serta ketidakstabilan aliran pada TPLT dengan variasi *filling ratio* (FR) dan beban kalor. Penelitian eksperimental menggunakan prototipe TPLT berbahan kaca borosilika yang terdiri dari evaporator, kondensor, riser, dan downcomer. Fluida kerja aquadest divariasikan *filling ratio* nya sebesar 45%, 55%, dan 65%, sementara beban kalor divariasikan dari 30 W hingga 110 W. Aliran divisualisasikan dengan kamera berkecepatan tinggi dan fluktuasi suhu diukur menggunakan termokopel. Hasil menunjukkan FR berpengaruh signifikan terhadap stabilitas sistem. Pada *filling ratio* 45%, sistem menunjukkan ketidakstabilan tinggi yang ditandai dengan *geyser boiling*, *density wave oscillation*, dan transisi pola aliran cepat dari *bubble* hingga *mist flow*. Sebaliknya, *filling ratio* 55% dan 65% menghasilkan aliran yang lebih stabil dengan film cair yang konsisten dan fluktuasi temperatur yang rendah. Selain itu, pola aliran yang teridentifikasi dari *bubbly*, *slug*, *churn*, *annular*, hingga *mist flow* menunjukkan intensitas dan dominansi yang meningkat seiring bertambahnya beban kalor. Temuan ini memberikan panduan krusial untuk desain sistem pendingin TPLT yang optimal dan stabil dengan menentukan *filling ratio* operasi yang sesuai untuk menghindari ketidakstabilan aliran.

Kata kunci: *two-phase loop thermosyphon*, visualisasi aliran, perubahan fasa, pola aliran, ketidakstabilan aliran, *filling ratio*.

ABSTRACT

Two-phase loop thermosyphon (TPLT) is a passive heat transfer device with high potential for application as an electric vehicle battery cooling system. However, the performance of TPLT is not only determined by the heat transfer value, but also by the stability of the two-phase flow within the loop. This study aims to visually observe the phase change mechanism, flow patterns, and flow instability in TPLT with variations in filling ratio (FR) and heat load. The experimental study used a prototype TPLT made of borosilicate glass consisting of an evaporator, condenser, riser, and downcomer. The working fluid of distilled water was varied in filling ratios of 45%, 55%, and 65%, while the heat load was varied from 30 W to 110 W. The flow was visualized with a high-speed camera and temperature fluctuations were measured using a thermocouple. The results showed that FR significantly affected the system stability. At a filling ratio of 45%, the system exhibited high instability characterized by geyser boiling, density wave oscillation, and a rapid flow pattern transition from bubble to mist flow. In contrast, filling ratios of 55% and 65% produced a more stable flow with a consistent liquid film and low temperature fluctuations. Furthermore, the identified flow patterns, including bubbly, slug, churn, annular, and mist flow, showed increasing intensity and dominance with increasing heat load. These findings provide crucial guidance for the design of an optimal and stable TPLT cooling system by determining the appropriate operating filling ratio to avoid flow instability.

Keywords: two-phase loop thermosyphon, flow visualization, phase transition, flow pattern, flow instability, filling ratio.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mobil listrik merupakan kendaraan yang digerakkan menggunakan energi listrik yang disimpan dalam baterai [1]. Baterai merupakan salah satu komponen utama yang berperan sebagai sumber energi penggerak mobil listrik. Baterai menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia. Energi kimia tersebut bereaksi ketika terjadi proses *charging* (pemakaian) dan *discharging* (penggunaan/pengosongan) baterai. Reaksi kimia tersebut mengalami pembangkitan kalor yang meningkatkan temperatur kerja baterai [2]. Kenaikan temperatur baterai yang terlalu tinggi mengakibatkan penurunan kinerja baterai sehingga umur pakai baterai pun menjadi lebih singkat. Dalam kondisi operasi ekstrem, dimana sistem mengalami peningkatan temperatur dan tekanan yang berlebih, dapat memicu terjadinya ledakan atau kebakaran yang dapat membahayakan penggunanya [3]. Untuk menghindari kondisi tersebut, diperlukan sebuah metode eksperimen pelepasan kalor yang efektif dari baterai agar baterai tetap bekerja pada temperatur yang optimal.

Two phase loop thermosyphon (TPLT) merupakan peralatan termal pasif yang telah menjadi solusi yang menarik untuk transfer kalor yang sangat efisien dalam berbagai aplikasi industri, salah satunya untuk pendingin baterai mobil listrik [4,5]. Kinerja *two-phase loop thermosyphon* (TPLT) sangat dipengaruhi oleh karakteristik aliran dua fasa, yang meliputi mekanisme perubahan fasa, pola aliran, dan ketidakstabilan aliran yang terjadi di dalam *loop* [6][7]. Beberapa penelitian telah dilakukan dengan menggunakan metode eksperimen untuk mendapatkan kinerja TPLT yang lebih handal dengan menggunakan metode eksperimen. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dibuatlah *summary of previous studies* yang dapat dilihat pada tabel 1.1 di bawah ini.

Tabel 1.1 Summary of Previous Studies

Author	Method	Result	Strengths	Limitation
Haykal Muhammad (2021)	Eksperimental kinerja <i>multi evaporator loop thermosyphon</i>	- Resistansi termal MELT terkecil yaitu sebesar 0.052 °C/W pada beban kalor 131.1 W, dengan temperatur baterai luar yaitu 72 °C.	- Prototipe fungsional MELT (Multi Evaporator Loop Thermosyphon) - Mendapatkan hasil kuantitatif berupa nilai resistansi termal dan performa pada berbagai variasi beban kalor. - Menunjukkan perbandingan kinerja dengan konvekksi paksa.	- Variabel penelitian terbatas - Kinerja menurun pada beban kalor di bawah dari 70 W. - Temperatur baterai masih di atas batas kerja yang direkomendasikan. - Jenis fluida, diameter, jumlah evaporator dan Panjang lintasan yang terbatas .dalam penelitian ini
Aldi Nureliansyah (2024)	<i>Multi Evaporator Two-Phase Loop Thermosyphon</i>	- Kinerja optimal termosifon pada ketinggian evaporator 90 mm dengan daya pembangkitan kalor 120 W dengan hambatan termal terbaik sebesar 0.124 °C/W.	- Prototipe fungsional <i>multi evaporator two-phase loop thermosyphon</i> - Mendapatkan hasil kuantitatif berupa nilai resistansi termal dan performa pada berbagai variasi beban kalor , ketinggian dan kemiringan.	- Pemampatan evaporator oleh gelembung uap karena digunakan evaporator dengan bentuk tube.
Suryadeva Andrew (2024)	Eksperimen Kinerja <i>Multi Evaporator Loop Thermosyphon</i>	- Ketinggian Fluida kerja evaporator sebesar 70 mm memiliki kinerja yang baik pada beban kalor 45W dengan hambatan termal sebesar 0.144 °C/W.	- Prototipe fungsional <i>multi evaporator loop thermosyphon</i> - Mendapatkan hasil kuantitatif berupa nilai resistansi termal dan performa pada berbagai variasi beban kalor , <i>filling</i>	- Terdapat fluktuasi temperatur - Kinerja buruk saat dimiringkan dengan <i>filling ratio</i> 70 mm - Variasi <i>filling ratio</i> - Asumsi terjadinya pemampatan oleh

Author	Method	Result	Strengths	Limitation
		Tetapi TPLT memiliki kinerja yang buruk saat dimiringkan.	<i>ratio</i> dan kemiringan.	gelembung pada evaporator
Maulana Rizki (2025)	Eksperimen kinerja <i>single condenser two-phase loop thermosyphon</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Tahanan termal TPLT terendah sebesar 0.028 °C/W pada beban kalor 199.5 W dan <i>filling ratio</i> 20.6% dengan temperatur evaporator 51.42 °K. - Pada sudut kemiringan positif, TPLT mengalami penurunan kinerja yang signifikan dan pada sudut kemiringan negatif hingga - 15° TPLT tidak mengalami penurunan kinerja yang berarti. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prototipe <i>single condenser two-phase loop thermosyphon</i> - Mendapatkan hasil kuantitatif berupa nilai resistansi termal dan performa pada berbagai variasi beban kalor dan kemiringan tertentu. - Fluktuasi temperatur berhasil diperkecil dari penelitian Haykal Muhamad dan Suryadeva Andrew. 	<ul style="list-style-type: none"> - Terdapat fluktuasi temperatur - Variasi jumlah kondensor yang terbatas
Fauziah Mutia. (2025)	Metode eksperimen kinerja <i>dual condenser two-phase loop thermosyphon</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Tahanan termal terbaik sebesar 0,023°C/W, dengan temperatur rata - rata evaporator 50,38 °C, dan, temperatur rata - rata kondensor 41,39 °C pada beban kalor 400 W dengan <i>filling ratio</i> 20,6%. - Tidak terjadi kekeringan pada evaporator dengan variasi kemiringan tertentu. 	<ul style="list-style-type: none"> - Memiliki prototipe <i>dual condenser two-phase loop thermosyphon</i> - Mengurangi fluktuasi temperatur dan dapat mengatasi masalah <i>dry out</i>. - Mendapatkan nilai resistansi termal dan performa pada berbagai variasi beban kalor dan kemiringan tertentu. 	<ul style="list-style-type: none"> - Terjadi fluktuasi temperatur.

Author	Method	Result	Strengths	Limitation
Razi Fahrur (2025)	Eksperimen kinerja <i>single condenser two-phase loop thermosyphon</i> dengan <i>mechanical excitation</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Tahanan termal terbaik sebesar 0.0358 °C/W pada beban kalor 198.9 W, dengan filling ratio 20.6% dalam kondisi datar. - Pengujian dengan eksitasi pada beban kalor rendah akan memperbesar fluktuasi dan memperburuk tahanan termal. Namun, Fluktuasi akan menurun dan memperbaiki tahanan termal pada beban kalor yang tinggi. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prototipe <i>single condenser two phase loop thermosyphon</i> - Mendapatkan nilai resistansi termal dan performa pada berbagai variasi beban kalor dan getaran tertentu. - Berhasil menurunkan fluktuasi 	<ul style="list-style-type: none"> - Terjadi fluktuasi - Variasi kondensor yang terbatas.
Zhang Tao et al.(2023).	Eksperimen visualisasi aliran dua fasa pada untuk kinerja TPLT dengan orientasi vertikal	<ul style="list-style-type: none"> - Kinerja tinggi pada <i>filling ratio</i> 40%. - Gagal beroperasi pada <i>filling ratio</i> di bawah 35% akibat pengeringan local - Peta rezim aliran berupa <i>bubbly flow</i>, <i>slug flow</i>, <i>churning flow</i>, dan <i>annular flow</i>, serta perilaku aliran berupa fluktuasi antarmuka cair-uap pada rasio pengisian 45% dengan beban kalor 210 W. 	<ul style="list-style-type: none"> - Visualisasi pola aliran dua fasa dapat diidentifikasi secara detail. - Hubungan kuantitatif antara rasio pengisian, daya masukan, dan kinerja perpindahan panas. - Peta rezim aliran lengkap 	<ul style="list-style-type: none"> - Variasi filling ratio yang diuji relatif sempit (35–45%), jenis fluida terbatas yaitu hanya R141b dan diameter pipa 10 mm serta variasi beban kalor.

Author	Method	Result	Strengths	Limitation
Khodabandeh et al.(2010).	Eksperimen visualisasi aliran dan pengukuran performa termal	<ul style="list-style-type: none"> - Ketidakstabilan aliran dan termal meningkat seiring dengan penurunan tinggi saluran, sedangkan koefisien perpindahan panas bertambah dengan peningkatan tinggi saluran dan heat flux. - Rezim aliran yang terjadi mencakup <i>bubbly flow</i> pada kondisi koefisien perpindahan kalor tinggi, serta aliran balik (<i>reverse flow</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> - Visualisasi pola aliran dua fasa dapat diidentifikasi secara detail. - Hubungan fenomena aliran dengan performa termal. - Pengaruh geometri terhadap stabilitas aliran dan perpindahan panas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Variabel terbatas pada variasi diameter (1.2 mm, 1.6 mm, 2.1 mm, 2.4 mm, 2.7 mm) dan tinggi saluran evaporator (0.7 mm, 0.9 mm, 1.3 mm, 1.6 mm, 1.8 mm). - Fluida kerja terbatas pada R 134a. - Mekanisme osilasi dan cara pengendalian.

Berdasarkan hasil penelitian yang disajikan pada Tabel *Summary of Previous Studies* 1.1, diketahui bahwa penelitian terdahulu telah menghasilkan *prototype* TPLT dengan nilai tahanan termal yang rendah yang menunjukkan efektivitas perpindahan panas yang baik. Namun, kinerja termal yang tinggi tersebut tidak selalu diikuti oleh operasi sistem yang stabil. Beberapa penelitian yang telah dilakukan mengungkapkan adanya fluktuasi temperatur yang signifikan selama pengoperasian *two phase loop thermosyphon* (TPLT), meskipun tahanan termalnya relatif rendah. Fluktuasi ini diasumsikan berkaitan dengan fenomena pemampatan dan pertumbuhan gelembung uap di daerah evaporator, yang mengindikasikan terjadinya ketidakstabilan aliran dua fasa di dalam *loop*. Asumsi ini didasari oleh analisis yang hanya berbasis respon temperatur tanpa didukung oleh observasi visual secara langsung terhadap fenomena aliran di dalam TPLT. Akibatnya, mekanisme fisik yang mendasari terjadinya fluktuasi temperatur dan

ketidakstabilan aliran tersebut belum dapat dipastikan secara sistematis, sehingga asumsi mengenai pemampatan gelembung uap di evaporator belum tervalidasi secara eksperimental. Oleh karena itu, dilakukan observasi visual untuk mengidentifikasi perubahan fasa dan pola aliran serta pengaruhnya terhadap ketidakstabilan aliran yang terjadi di dalam loop sehingga hasilnya dapat dijadikan sebagai dasar pemahaman dan perancangan desain *two phase loop thermosyphon* yang lebih stabil dan handal untuk aplikasi pendingin mobil listrik pada penelitian selanjutnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan ke dalam beberapa pertanyaan penelitian sebagai berikut:

- a. Bagaimana instalasi visualisasi aliran di dalam *two phase loop thermosyphon* (TPLT)?
- b. Bagaimana jumlah fluida (*filling ratio*) memengaruhi mekanisme perubahan fasa dan pola aliran, serta hubungannya dengan ketidakstabilan aliran di dalam *two-phase loop thermosyphon*?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini ialah :

- a. Membuat instalasi alat pengujian untuk visualisasi aliran dua fasa di dalam *two-phase loop thermosyphon* (TPLT).
- b. Observasi visual aliran dalam *two-phase loop thermosyphon* (TPLT) untuk mengidentifikasi perubahan fasa dan pola aliran serta pengaruhnya dengan ketidakstabilan aliran.

1.4 Manfaat

Hasil dari penelitian ini memberikan pedoman untuk memahami perubahan fasa dan pola aliran (*rezim pattern*) serta *instability flow* sebagai dasar pengembangan model desain sistem dari *two-phase loop thermosyphon*.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan observasi visual terhadap perubahan fasa, pola aliran dan ketidakstabilan aliran yang terjadi di dalam *two-phase loop thermosyphon*.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan perihal latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II STUDI LITERATUR

Bab ini berisi tentang fenomena aliran dua fasa yang meliputi perubahan fasa dan pola aliran serta stabilitas aliran fluida secara teoritis dan beberapa jurnal terkait penelitian tentang *two-phase loop thermosyphon*.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang metode penelitian, variabel penelitian, lokasi dan waktu penelitian, alat dan bahan, prosedur penelitian dan teknik analisis data penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi pembahasan mengenai mekanisme perubahan fasa, pola aliran dan analisis pengaruhnya terhadap ketidakstabilan aliran pada berbagai tingkat *filling ratio*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab berisi ringkasan hasil penelitian dan usulan dalam pengembangan model desain *two-phase loop thermosyphon*.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian yang berfokus pada visualisasi aliran *two phase loop thermosyphon* (TPLT), diawali dengan tinjauan pustaka terhadap beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan penerapan TPLT sebagai sistem pendingin kendaraan listrik. Uraian penelitian-penelitian tersebut disajikan sebagai berikut :

Haykal Muhamad [8] melakukan penelitian dengan metode eksperimental untuk mengetahui kinerja Multi Evaporator Loop Thermosyphon (MELT) sebagai pendingin baterai. Prototipe MELT diuji menggunakan simulator baterai berbahan aluminium yang dipasang pada evaporator. MELT menggunakan pipa dengan diameter berukuran 9.53 mm yang dilengkapi dua evaporator dan satu kondensor dengan orientasi vertikal. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan daya pemanas listrik, yaitu 40 W, 50 W, 60 W, 70 W, 80 W dan 183 W. dan memperoleh resistansi termal MELT terkecil yaitu sebesar 0.052 °C/W pada beban kalor 131.1 W, dengan temperatur baterai luar 72 °C.

Penelitian yang dilakukan Suryadeva Andrew [9] menggunakan metode eksperimen dengan memvariasikan ketinggian fluida kerja pada loop *thermosyphon*. Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi pengaruh kemiringan *thermosyphon* terhadap kinerjanya. Pipa tembaga yang digunakan yaitu 9.52 mm dengan tiga evaporator dan dua kondensor dan berorientasi vertikal. Pada penelitian ini diperoleh kinerja optimal *thermosyphon* pada ketinggian fluida sebesar 70 mm dan beban kalor sebesar 45 W dengan hambatan termal sebesar 0.144 °C/W.

Maulana Rizki [10] melakukan penelitian yang menggunakan metode eksperimen dengan tujuan menentukan kinerja dari *single condenser* TPLT dengan evaporator horizontal menggunakan pipa tembaga berdiameter 28.57 mm dengan satu evaporator dan satu kondensor serta berorientasi vertikal.

Penelitian ini dilakukan dengan memperbesar diameter serta mengubah orientasi evaporator menjadi horizontal. Hasil penelitian diperoleh tahanan termal

TPLT terendah sebesar $0.028 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ pada beban kalor 199.5 W dan *filling ratio* 20.6% dengan temperatur evaporator $51.42 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Penelitian berikutnya menggunakan variasi sudut kemiringan 0° , 5° , 10° , -5° , -10° , dan -15° dengan daya pemanas $40 \text{ W} - 200 \text{ W}$, diperoleh bahwa pada sudut kemiringan positif TPLT mengalami penurunan kinerja yang signifikan dan pada sudut kemiringan negatif hingga -15° TPLT tidak mengalami penurunan kinerja yang berarti.

Fauziah Mutia [11] melakukan penelitian untuk mengetahui kinerja *dual condenser two-phase loop thermosyphon* secara eksperimental dengan memvariasikan *filling ratio*, kemiringan dan beban kalor dengan diameter pipa yang lebih besar yaitu 28.57 mm , orientasi pipa horizontal, dan dua kondensor. Dari penelitian ini diperoleh tahanan termal terendah pada beban kalor 400 W dengan *filling ratio* 20.6% sebesar $0.023 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, dengan temperatur rata - rata evaporator $50.38 \text{ }^{\circ}\text{C}$, dan temperatur rata - rata kondensor $41.39 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa *dual condenser two-phase loop thermosyphon* lebih efektif dibandingkan *single condenser* dalam menurunkan fluktuasi temperatur dan mampu mengatasi masalah kekeringan saat dimiringkan.

Razi Fahrur [12] juga melakukan penelitian yang berjudul “Kaji eksperimental *single condenser two-phase loop thermosyphon* dengan *mechanical excitation*” yang menggunakan metode eksperimen untuk mendapatkan kinerja TPLT dengan mengubah posisi evaporator dan memperbesar diameter pipa sebesar 28.57 mm serta menambahkan eksitasi dalam penguj34iannya. Penelitian tahap pertama dilakukan dengan variasi *filling ratio* yaitu 20.6% , 35.3% , 50% , dan 64.7% dan memperoleh tahanan termal terbaik yaitu $0.0358 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ pada beban kalor 198.9 W . Pada tahap pengujian dengan menambahkan eksitasi mendapatkan bahwa eksitasi memperbesar fluktuasi dan memperburuk tahanan termal pada beban kalor rendah namun, menurunkan fluktuasi dan memperbaiki tahanan termal pada beban kalor tinggi.

Penelitian yang dilakukan oleh Aldi Nureliansyah [13] dengan judul “*Multi Evaporator Two-Phase Loop Thermosyphon*” ini menggunakan metode

eksperimen dengan tujuan untuk merancang dan membuat sebuah loop thermosyphon pendingin baterai serta pengujian kinerjanya. Loop thermosyphon diuji kinerjanya dengan memvariasikan ketinggian, (h) evaporator mulai dari 70 mm, 90 mm, 110 mm, 130 mm, 150 mm, dan 170 mm. Hasil dari penelitian ini diperoleh kinerja optimal termosifon pada ketinggian evaporator 90 mm dengan daya pembangkitan kalor 120 W dengan hambatan termal terbaik sebesar 0.124 °C/W.

Penelitian terdahulu dilakukan oleh Khodabandeh Rahmatollah *et al* [14] dengan tujuan untuk menyelidiki perpindahan panas, rezim aliran, dan masalah perilaku osilasi selama operasi yang tidak stabil dari sistem *two-phase closed loop thermosyphon*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa ketidakstabilan aliran dan termal meningkat seiring dengan penurunan tinggi saluran (H) dan koefisien perpindahan panas juga meningkat seiring dengan peningkatan tinggi saluran dan fluks panas. Aliran gelembung (*bubbly flow*) mencirikan rezim aliran pada koefisien perpindahan panas tinggi sementara gelembung terbatas, aliran balik dan didih intermiten lebih signifikan untuk tinggi saluran rendah dengan koefisien perpindahan panas yang lebih rendah dan *critical heat flux*.

Judul dari penelitian yang dilakukan oleh Zhang Tao *et al.*[13] ialah “Heat transfer characteristics and operational visualization of two-phase loop thermosyphon”. Penelitian ini dilakukan dengan pengamatan visualisasi kecepatan tinggi untuk membandingkan dan mengevaluasi kinerja perpindahan panas dan karakteristik aliran dua fasa dari TPLT berposisi vertikal yang memiliki diameter dalam 10 mm. R141b digunakan sebagai fluida kerja pada rasio pengisian volumetrik 35–50%. Hasil dari penelitian ini ialah TPLT berfungsi dengan baik dan memiliki kapasitas perpindahan panas yang tinggi pada rasio pengisian yang relatif tinggi (40%), sementara itu gagal beroperasi pada rasio pengisian rendah 35% di bawah masukan daya lebih besar dari 250 W karena pengeringan lokal. Konduktivitas termal efektif maksimum $2,0 \times 10^5$ W/(m·K) dicapai pada rasio pengisian optimal 40%. Peta rezim aliran dikembangkan untuk mengidentifikasi

efek kombinasi rasio pengisian dan daya panas pada evaluasi pola aliran dan ketidakstabilan aliran dua fasa. Peta rezim aliran ini mencakup *bubbly flow*, *slug flow*, *churning flow*, *annular flow*. Fluktuasi antarmuka cair-uap terjadi pada rasio pengisian 45% dengan beban kalor yang diberikan yaitu sebesar 210 W.

2.2 Prinsip Kerja Kendaraan Listrik

Kendaraan listrik memperoleh tenaga dari energi listrik yang tersimpan didalam baterai. Energi listrik kemudian diubah menjadi energi mekanik yang menghasilkan tenaga penggerak oleh motor listrik sebagai penggerak utamanya. Tenaga penggerak tersebut disalurkan ke roda sehingga roda dapat berputar dan kendaraan mulai bergerak. Kendaraan yang bergerak akan mengalami pengosongan baterai (*discharging*) dan beberapa energi lainnya akan diubah kembali menjadi energi listrik ketika *regenerative braking*. Baterai yang kosong diisi ulang di stasiun pengisian / *charging station* [13,14,15].

2.3 Baterai pada Kendaraan Listrik

Baterai berfungsi untuk menyimpan dan menyediakan energi listrik yang digunakan untuk menggerakkan motor listrik. Energi listrik yang disimpan/diisi disebut proses *charging* baterai dan energi listrik yang disediakan/digunakan disebut proses *discharging* baterai [3,15].

2.2.1 Baterai Lithium-ion pada Kendaraan Listrik

Secara umum, terdapat beberapa jenis baterai yang digunakan pada kendaraan listrik yaitu Lead/Acid, Nikel-kadmium (Ni-Cd), Nickel-Metal Hydride (NiMH), Lithium Ferrous Phosphate (LFP) dan Lithium-ion. Namun, penggunaan baterai yang mayoritas digunakan pada kendaraan listrik pada zaman ini adalah baterai lithium-ion [18]. Baterai lithium-ion merupakan baterai yang bekerja berdasarkan pergerakan ion lithium antara katoda dan anoda melalui elektrolit (Cair) [3]. Baterai lithium-ion dapat menyimpan energi listrik berkapasitas besar dengan bentuk yang ringkas. Baterai ini dapat diisi berulang kali tanpa kehilangan kapasitas yang significant dan memiliki kinerja yang baik pada beban yang tinggi. Akan tetapi baterai ini memiliki stabilitas

termal yang kurang baik. Dalam hal ini temperatur nya yang cenderung cepat meningkat dan berpotensi menimbulkan kebakaran yang sulit dipadamkan [19].

Baterai lithium-ion sangat sensitif terhadap perubahan temperatur. Temperatur ideal dari baterai lithium-ion ialah berkisar dari 15 °C – 40 °C [18,19]. Beberapa fenomena berisiko dapat terjadi ketika baterai beroperasi pada kondisi temperatur yang tinggi seperti pembangkitan gas, pembengkakan sel, hingga *thermal runaway*. Tabel 2.1 berikut menunjukkan berbagai uraian teknis faktor risiko yang dapat muncul pada baterai lithium-ion [22].

Tabel 2. 1 Risk Aspect of Lithium-ion battery

Risk Aspect of Lithium-ion battery		
Risk Factor	Initial Temperature	Consequence
Pembangkitan Gas	>70 °C	Kerusakan pada elektrolit (elektrolit mulai terurai).
Pemberntukan Gas	>120 °C	Kerusakan SEI (Solid Electrolyte Interphase) dan menghasilkan gas C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , dan C ₃ H ₆ .
Pembengkakan Baterai	120 °C – 220 °C	Penumpukan tekanan dan separator meleleh.
<i>Thermal Runway</i>	>160 °C – 300 °C	Elektrolit terurai, overheat, menghasilkan gas CO ₂ dan H ₂ O dan ledakan/kebakaran serta kegagalan struktur.

2.2.2 Prinsip kerja baterai kendaraan Listrik

Prinsip kerja baterai pada umumnya dapat dijelaskan sebagai berikut :

a. Proses *Charging*

Proses charging terjadi ketika adanya pengisian energi listrik dari *charger* kedalam baterai dalam bentuk energi kimia. Pengisian direkomendasikan pada temperatur 0 °C – 45 °C [23]. Pengisian baterai diatur oleh *Battery Management System* (BMS) sehingga dapat mengontrol arus listrik yang masuk ke tiap sel agar tetap merata dan baterai terlindungi dari risiko *overcharge* maupun *overheating*. Setelah baterai terisi penuh, pengisian secara otomatis berhenti dan kendaraan dapat beroperasi kembali [24][25] .

b. Proses Discharging

Proses *discharging* terjadi ketika adanya pengosongan baterai, dimana baterai mengeluarkan energi listrik untuk menggerakkan beban seperti motor listrik agar kendaraan dapat bergerak/beroperasi. Ketika terjadi kekosongan baterai, maka kendaraan melakukan pengisian energi listrik kembali. Proses *discharging baterai* direkomendasikan pada temperatur 0 °C- 45 °C [23].

2.4 Prinsip Kerja Two-Phase Loop Thermosyphon

Termosifon merupakan perangkat transfer panas dengan konduktivitas termal yang sangat tinggi, di mana fluida di dalamnya bersirkulasi secara alami. *Two phase loop thermosyphon* dirancang sesuai kebutuhan untuk memindahkan panas jarak jauh untuk kapasitas yang lebih besar. TPLT terdiri dari empat bagian utama yaitu evaporator, riser, kondensor, dan downcomer. TPLT memanfaatkan gaya gravitasi dalam proses sirkulasinya [24,25]. Agar berfungsi dengan optimal, TPLT harus dipasang secara vertikal dengan evaporator berada di bawah dan kondensor di bagian atas.

Evaporator berfungsi menyerap kalor dari sumber panas sehingga fluida kerja di dalamnya mengalami kenaikan temperatur sehingga terjadi penguapan. Uap memiliki densitas yang lebih rendah sehingga uap terdorong naik akibat adanya gaya *buoyancy* melalui tabung naik menuju kondensor. Kondensor berfungsi melepaskan kalor dari fluida kerja sehingga fluida tersebut mengalami penurunan temperatur sehingga terjadi kondensasi. Cairan hasil kondensasi tersebut memiliki densitas yang lebih tinggi kemudian turun kembali ke evaporator melalui *downcomer* [5,25,26,27]. Sirkulasi tersebut terjadi secara kontinu.

2.5 Fenomena Aliran Dua Fasa

Fenomena aliran dua fasa merupakan fenomena global yang terjadi akibat adanya interaksi dua fasa zat. Dua fasa zat ini bergerak serentak dalam suatu sistem/saluran dan mengalami perubahan fasa seperti gas–cair, gas–padat, maupun cair–padat. Interaksi dua fasa tersebut merupakan perubahan fasa yang memicu perubahan pola dan dinamika aliran sepanjang saluran yang berpengaruh terhadap kestabilan aliran [31].

2.4.1 Perubahan Fasa

Perubahan fasa pada sistem *two phase loop thermosyphon* secara umum terbagi menjadi dua proses utama, yaitu proses penguapan (*boiling process*) yang berlangsung di dalam evaporator dan proses kondensasi (*Condensation*) yang terjadi di dalam kondensor [32].

1. *Boiling Process*

Proses pendidihan merupakan perubahan fasa dari cair menjadi gas melalui proses penguapan akibat adanya peningkatan beban kalor yang terjadi pada bagian evaporator. Terdapat tiga tipe pendidihan yaitu *pool boiling*, *nucleat boiling* dan *transition boiling*.

Nucleat boiling terjadi ketika permukaan evaporator perlahan menjadi panas yang mengakibatkan terbentuknya gelembung-gelembung uap kecil di sepanjang permukaan evaporator. Gelembung uap kecil akan membesar ketika cairan menguap disekitar gelembung kecil. Beban kalor yang diberikan secara kontinu pada dinding evaporator memicu gelembung uap terlepas dari rongga evaporator bergerak naik menuju kondensor dan cairan yang tersisa akan mempertahankan proses pendidihan didalam evaporator.

2. *Condensation*

Proses condensation merupakan perubahan fasa dari gas menjadi cair melalui proses pendinginan. Kondensasi terjadi ketika uap melewati dan bersentuhan dengan permukaan yang didinginkan di bawah temperatur jenuh. Pada keadaan ini akan terjadi dua jenis kondensasi yaitu *dropwise condensation* dan *film condensation*. Pada *dropwise condensation*, cairan akan berbentuk *droplets* dan tidak sepenuhnya membasahi atau menutupi permukaan kondensor. Sedangkan pada *film condensation*, cairan sepenuhnya akan menutupi dan membasahi permukaan kondensor.

2.4.2 Pola Aliran

Pola aliran / *flow pattern* merupakan pola aliran yang terbentuk akibat adanya interaksi antara tegangan permukaan dan gaya gravitasi dari perubahan dua fasa (gas dan cairan) yang tersusun di dalam pipa atau saluran [33]. Setiap pola memiliki

karakteristik yang berbeda dalam sistem yang merupakan faktor kunci dalam perancangan dan operasi sistem dua fasa. Pola aliran menunjukkan pola yang dominan terjadi pada skala fenomena yang berfokus disepanjang pipa/loop dan mempengaruhi stabilitas perpindahan panas pada system [34].

a. Pola aliran fluida pipa horizontal

Gaya gravitasi pada pipa horizontal bekerja melintang terhadap arah aliran yang menyebabkan cairan cenderung mengendap di bawah dan gas mengalir pada bagian atas. Perubahan fasa yang terjadi pada pipa horizontal menjadi asimetris yang membentuk pola khas seperti *stratified flow* yang lebih stabil pada aspek kestabilan interface cair-gas. Mekanisme perpindahan panas pada pipa horizontal lebih dominan pada perbedaan densitas dalam memisahkan fasa zat [35].

Pola aliran yang terbentuk pada pipa horizontal dan vertikal dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 di bawah ini.

1. *Stratified Flow*

Pada *stratified flow*, fasa cair berada di bagian bawah pipa, sedangkan fasa gas di bagian atas dengan pemisah yang datar. Terdapat interface datar/rata yang memisahkan gas dan cair. *Stratified flow* terjadi pada kecepatan rendah dan cenderung stabil [33,34] .

2. *Wavy flow*

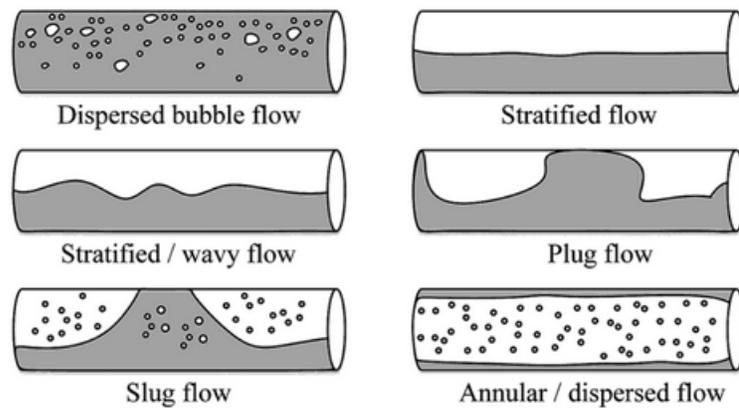
Wavy flow memiliki bentuk antarmuka antara gas-cair yang bergelombang tetapi tidak menutupi sebagian besar penampang pipa. Fasa gas mengalir dibagian atas pipa secara kontinu dan fasa cair mengalir di bawah pipa dengan permukaan bergelombang. *Wavy flow* tergolong aliran yang masih stabil walaupun kedua fasa bergelombang. Pola aliran ini terbentuk akibat fasa gas yang bergerak dengan kecepatan tinggi. *Wavy flow* memberikan dampak yang positif berupa fluktuasi tekanan kecil–sedang yang dapat meningkatkan perpindahan panas [33], [36].

3. *Slug Flow*

Slug flow memiliki bentuk antarmuka gas-cair yang bergelombang dan menutupi sebagian besar penampang pipa. *Slug flow* tergolong aliran yang tidak stabil karena adanya fluktuasi tekanan [31,32,34].

4. *Annular Flow*

Pada *annular flow*, fasa cair berupa film tipis menempel pada dinding pipa, sedangkan fasa gas mengalir di bagian tengah pipa. Tidak adanya batas pemisah karena gas telah dikelilingi oleh film cair. *Annular flow* dapat terjadi pada kecepatan gas tinggi yang mendominasi sehingga mendorong cairan menjadi lapisan tipis di dinding pipa. *Annular flow* cenderung tidak stabil karena ada gelombang pada film cair [31,32].



Gambar 2.1 Pola Aliran Horizontal

a. Pola aliran fluida pipa vertikal

Gaya gravitasi yang bekerja pada pipa vertikal ialah sejajar terhadap arah aliran yang mengakibatkan gas dan cairan bergerak bersamaan naik turun. Perubahan fasa menjadi simetris pada penampang pipa sehingga terbentuk beberapa pola aliran seperti *bubbly flow*, *slug flow*, *churn flow* dan *annular flow*. Mekanisme perpindahan panas pada pipa vertikal memanfaatkan gaya buoyancy yang lebih dominan dalam menentukan perubahan fasa [31,32,33].

1. *Bubbly Flow*

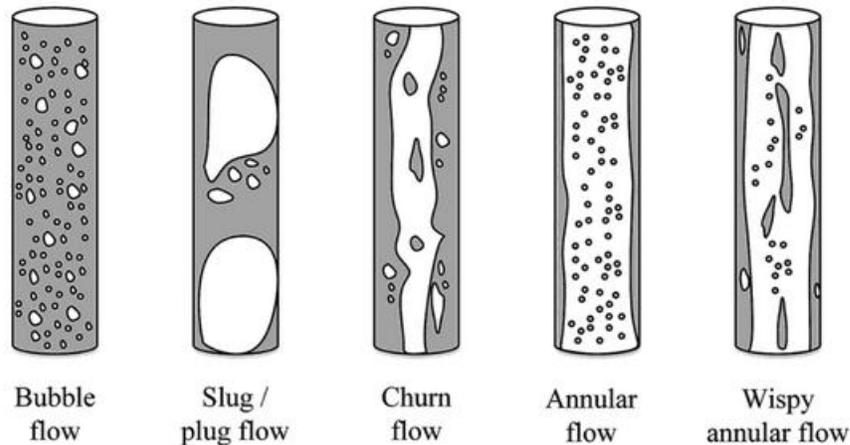
Bubbly flow terbentuk dari partikel-partikel gas tersebar secara merata dan seragam di seluruh volume cairan. Ini menciptakan campuran yang terlihat seragam, dimana tidak ada konsentrasi gas yang lebih tinggi di satu area dibandingkan dengan area lain. Pada *bubbly flow*, laju aliran gas relatif rendah dan laju cairan cukup dominan [31,32].

2. *Slug Flow*

Slug flow merupakan gelembung gas besar memanjang di dalam pipa yang bergerak dengan cairan yang bergerak diantaranya. Pada *slug flow*, laju aliran gas meningkat sehingga gelembung kecil bergabung membentuk gelembung besar [31,32].

3. *Churn Flow*

Churn flow terbentuk oleh fasa gas dan cairan yang saling bercampur secara kacau, tidak teratur. Laju gas makin tinggi sehingga aliran slug menjadi tidak stabil dan pecah dan membentuk *churn flow* [31,32].



Gambar 2.2 Pola Aliran Vertikal

2.4.3 *Two Phase Flow Instabilities*

Ketidakstabilan aliran dua fasa merupakan kondisi di mana sistem tidak memiliki kapabilitas untuk mempertahankan kestabilan aliran terhadap fluktuasi perubahan fasa yang terjadi di dalamnya. Ketidakstabilan aliran dapat menurunkan kinerja sistem dan

mengakibatkan getaran mekanik, *critical heat flux*, *burnout* prematur serta masalah kontrol yang dapat merusak sistem [35,36,37].

2.4.3.1 *Static Instability*

Ketidakstabilan statis (*static instability*) terjadi ketika sistem aliran dua fasa menunjukkan respon yang besar terhadap perubahan kecil yang diberikan pada kondisi operasi tertentu. Ketidakstabilan statis umumnya terjadi pada *flow-regime transitions*, *flow excursion* dan *dryout and quenching* yang tidak melibatkan efek waktu atau respon osilasi [36,37].

a. *Flow regime transition*

Flow regime transition merupakan perubahan pola aliran yang significant seperti pola *bubble* menjadi pola *churn* atau *slug* yang mempengaruhi stabilitas aliran.

b. *Flow Excursion*

Flow excursion merupakan perubahan laju aliran yang tinggi terhadap penurunan tekanan di sepanjang *loop* yang dapat mempengaruhi stabilitas aliran dan menyebabkan terjadinya *reverse flow* dan *pressure drop oscillation*.

c. *Dryout and Quenching*

Dryout merupakan kondisi operasi yang mengalami pengeringan total yang menyebabkan terjadinya *heat critical flux*, *overheat* dan kerusakan pada sistem. Pada umumnya, *dryout* terjadi pada bagian evaporator. Sedangkan *quenching* merupakan kondisi operasi dimana bagian evaporator kembali terisi oleh fluida cair.

d. *Geyser boiling*

Geyser boiling terjadi ketika temperatur mencapai titik didih dan membentuk uap panas yang sangat intents dan cepat sehingga menciptakan lonjakan tekanan dan aliran uap yang significant. Siklus ini terus berulang. *Geyser boiling* dapat menyebabkan osilasi tekanan dan temperatur, *reverse flow* dan *density wave oscillation*.

2.4.3.2 Dynamic Instability

Ketidakstabilan dinamis merupakan kondisi operasi sistem dua fasa yang menghasilkan osilasi aliran terhadap waktu akibat interaksi antara proses *evaporation* dan *condensation*. Ketidakstabilan dinamis umumnya terjadi pada osilasi frekuensi rendah seperti *density wave oscillation* dan *pressure drop oscillation* yang terjadi di sistem sirkulasi alami seperti *two phase loop thermosyphon* [36,37].

a. Density Wave Oscillation

Density wave oscillation merupakan bentuk ketidakstabilan aliran dua fasa yang terjadi akibat ketidaksesuaian antara perubahan densitas lokal dan proses penguapan menuju kondensasi. Pada evaporator, penambahan beban kalor menyebabkan perbedaan densitas antara cairan dan uap, sehingga gaya buoyancy mendorong uap menuju kondensor. Namun, perubahan fasa ini tidak selalu seimbang dengan tingkat penguapan di evaporator, sehingga timbul osilasi periodik pada laju aliran dan tekanan sepanjang sistem [35,36,37].

b. Pressure Drop Oscillation

Pressure drop oscillation (PDO) merupakan bentuk ketidakstabilan aliran dua fasa yang terjadi ketika sistem berada pada kondisi laju yang aliran tinggi tetapi terlambat merespons perubahan fasa akibat resistansi yang ditimbulkan oleh geometri pipa sepanjang *loop* [35,36].

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini bersifat eksperimental untuk mengamati perubahan fasa dan mengidentifikasi pola aliran berupa *regim flow* serta *flow instability* (*instability static* dan *dynamic*) yang memiliki pengaruh besar terhadap efisiensi dan kestabilan aliran di dalam *two-phase loop thermosyphon*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan alat uji *two-phase loop thermosyphon* yang terbuat dari bahan kaca borosilika dan terdiri dari satu evaporator, *riser*, satu kondensor dan *downcomer*. Data diperoleh dari pengukuran temperatur menggunakan *thermocouple* dan visualisasi aliran fluida menggunakan kamera berkecepatan tinggi untuk mendapatkan *regim flow* yang terjadi akibat adanya interaksi dua fasa (cair-gas) dengan variasi beban kalor terhadap waktu. Analisis data dilakukan dengan mengamati perubahan fasa dan pola serta stabilitas aliran untuk mengkaji hubungan antaranya terhadap fenomena perpindahan kalor.

3.2 Variabel Penelitian

Terdapat 3 variabel dalam penelitian ini yang dapat diatur dan tetap konsisten tanpa memberikan perubahan yang berarti serta dapat dihitung selama proses perpindahan kalor berlangsung yaitu:

3.2.1 Variabel Bebas

a. Beban Kalor

Beban kalor yang diberikan sebagai sumber panas pada *two-phase loop thermosyphon* ini bervariasi dimulai dari 30 W, 50 W, 70 W, 90 W, dan 110 W.

b. Jenis Fluida

Jenis fluida yang digunakan dalam penelitian ini ialah *aquadest*.

c. *Filling ratio*

Jumlah fluida yang digunakan yaitu sebesar 45%, 55% dan 65% dari total volume fluida di dalam *two-phase loop thermosyphon*.

d. Tekanan Operasi

Tekanan yang diatur di dalam *two-phase loop thermosyphon* diharuskan berada di bawah tekanan atmosfer (<1 atm) atau yang disebut vakum.

3.2.2 Variabel Kontrol

a. Dimensi Pipa

Diameter keseluruhan pipa yang digunakan pada penelitian ini berukuran 15.87 mm. Dengan panjang pipa *riser* evaporator sebesar 420 mm dan panjang pipa *downcomer* 380 mm.

b. Jumlah dan orientasi evaporator kondensor

Pada penelitian ini hanya menggunakan satu evaporator dengan posisi vertikal dan satu kondensor dengan posisi horizontal dimana letak kondensor berada diatas evaporator.

c. Lingkungan eksternal

Two-phase loop thermosyphon dilengkapi dengan *water jacket* dengan diameter berukuran 41.27 mm sebagai bantuan eksternal dalam proses kondensasi.

3.2.3 Variabel Terikat

a. Perubahan Fasa

Perubahan fasa merupakan parameter yang diamati berupa cairan, uap dan campuran yang terdistribusi disepanjang *loop*.

b. Pola Aliran

Pola aliran yang terjadi dalam proses perubahan fasa ini dapat berupa *bubbly*, *slug*, *churn*, *annular*, *wispy annular* dan *mist flow*.

c. *Instability Flow*

Ketidastabilan aliran yang terjadi di dalam *loop* dapat diamati berupa *flow regim transition*, *geyser boiling*, *density wave oscillation* dan *reverse flow*.

3.3 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Termodinamika, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan dengan periode waktu penelitian kurang lebih tiga bulan.

3.4 Alat dan Material Penelitian

3.4.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian visualisasi aliran *two-phase loop thermosyphon* ini dapat dilihat pada tabel 3.1 di bawah ini.

Tabel 3.1 Alat Penelitian

No.	Alat dan komponen	Jumlah	Gambar	Fungsi
1.	Loop thermosyphon	1 buah		Media sirkulasi fluida kerja dan visualisasi <i>flow instabilities</i> yang terjadi di dalam sistem.
2.	Pressure Gauge (Standar EN 837-1, Accuracy class 1.6 dengan ketelitian ± 0.05 bar dari skala penuh (-1 sampai 1.5 bar).	1 buah		Mengukur serta memantau tekanan yang terjadi di dalam loop selama proses pengujian.

No.	Alat dan komponen	Jumlah	Gambar	Fungsi
3.	Vacum Pump	1 buah		<p>Menciptakan kondisi hampa pada loop dengan mengosongkan udara, sehingga tekanan sistem dapat dipertahankan di bawah 1 atm.</p>
4.	Gelas Ukur	1 buah		<p>Mengukur volume fluida kerja sesuai dengan nilai <i>filling ratio</i> yang ditentukan.</p>
5.	Kabel Nikelin dengan ketebalan 0.5 mm	1 meter		<p>Elemen penghantar panas yang dialirkan dari DC <i>power supply</i> menuju dinding evaporator.</p>

No.	Alat dan komponen	Jumlah	Gambar	Fungsi
6.	Arduino Mega 2560	1 buah		Akuisisi data yang ditampilkan dan diolah melalui Microsoft Excel.
7.	Thermocouple type K (rentang kesalahan antara 0,02°C hingga 0,97°C, dengan nilai kesalahan rata-rata 0,54°C)	5 buah		Sensor temperatur yang ditempatkan pada titik-titik tertentu pada dinding loop untuk memantau distribusi temperatur selama eksperimen berlangsung.
8.	DC Power Supply (Model : R-SPS3010D Input : AC 230V ± 10% Output : 0~30V / 0~10A Fuse : 5×20mm 3A)	1 buah		Sumber energi listrik untuk memanaskan kabel nikelin pada bagian evaporator.

No.	Alat dan komponen	Jumlah	Gambar	Fungsi
9.	Water Pump	1 buah		Mensirkulasikan air pendingin melalui <i>water jacket</i> yang terpasang pada kondensor.
10.	Laptop	1 buah		Perangkat pengolah data yang terhubung dengan sistem akuisisi berbasis Arduino Mega.
11.	Kamera canon 550D (Shutter speed 1/4000 s)	1 buah		Alat dokumentasi visual yang merekam pola aliran dua fasa di dalam loop untuk mendukung analisis hasil eksperimen

3.4.2 Material Penelitian

Material penelitian yang digunakan dalam penelitian visualisasi aliran *two-phase loop thermosyphon* dapat dilihat pada tabel 3.2 di bawah ini.

Tabel 3. 2 Material dan komponen

No.	Material dan komponen	Jumlah	Gambar	Fungsi
1.	Aquadest	117 mili liter		Fluida kerja yang mengalami proses evaporasi dan kondensasi di dalam loop thermosyphon
2.	Lem Araldit	1 set		Perekat dua komponen pada sistem loop, sehingga sambungan menjadi kokoh dan kedap terhadap kebocoran

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Persiapan Alat penelitian

Tahap persiapan penelitian diawali dengan instalasi instrument *pressure gauge* dan *ball valve* lalu menambahkan *aquadest* kedalam *loop* sebagai fluida kerja. Setelah fluida terisi kemudian dilakukan proses vakum pada *loop* menggunakan *vacuum pump*.

Selanjutnya, dilakukan instalasi selang pada bagian *water jacket* dan menggunakan *water pump* sebagai pendukung aliran air dalam proses pendinginan eksternal pada bagian kondensor *loop*. Kemudian dilakukan instalasi kawat nikelin pada bagian evaporator dan pemasangan *thermocouple* pada empat bagian *loop* yaitu dua bagian pada kondensor dan dua bagian pada evaporator serta satu kabel *thermocouple* sebagai pengukur temperatur *ambient*. Pemasangan *thermocouple* disertai dengan instalasi arduino guna mendapatkan nilai temperatur dan memantau kondisi operasi yang berada pada titik yang telah ditentukan. Setelah pemasangan selesai, DC *power supply* disiapkan sebagai pemberi beban kalor dan kamera berkecepatan tinggi untuk mendapatkan gambar dan video yang berkualitas. Tahap ini akan dilakukan secara bertahap dan diulang dengan variasi *filling ratio* sebesar 45%, 55%, dan 65%.

3.5.2 Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dilaksanakan secara bertahap dengan variasi beban kalor dari DC *power supply* mulai dari 30 W, 50 W, 70 W, 90 W, dan 110 W dengan variasi *filling ratio* 45%, 55%, dan 65% melalui kabel nikelin yang ditempelkan pada bagian evaporator *loop*. Pada setiap variasi beban kalor, dilakukan pengamatan visual terhadap perubahan fasa yang direkam menggunakan kamera berkecepatan tinggi dengan jarak kurang lebih 300 mm. Kemudian, dilakukan juga pemantauan dan pencatatan data temperatur secara kontinu melalui sistem akuisisi data berbasis excel yang kemudian disajikan dalam bentuk diagram temperatur (T) terhadap waktu (t).

Dari penelitian tersebut diperoleh grafik dan tabel temperatur terhadap waktu dari variasi beban kalor yang berbeda-beda serta foto dan video yang memperlihatkan pola aliran yang terbentuk di dalam *loop*. Selanjutnya dilakukan interpretasi terhadap hubungan antara perubahan fasa dan *flow instability* fluida yang terjadi didalam *loop*.

3.6 Tahapan Penelitian

Untuk memperjelas tahapan penelitian yang dilakukan, ditampilkan diagram tahapan penelitian 3.1 di bawah ini. Diagram tersebut menggambarkan secara sistematis urutan kegiatan mulai dari persiapan hingga analisis hasil.

1. Studi Literature

Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk mengetahui teori dasar aliran dua fasa, penelitian terdahulu, serta celah penelitian yang dapat dikembangkan.

2. Rumusan Masalah

Setelah dilakukan studi literatur, diperoleh gambaran mengenai inti permasalahan yang perlu diteliti lebih lanjut.

3. Tujuan Penelitian

Dari inti permasalahan yang telah dirumuskan, ditetapkan tujuan penelitian yang hendak dicapai.

4. Batasan Masalah

Berdasarkan tujuan penelitian, ditetapkan batasan masalah untuk memperjelas variabel yang digunakan serta ruang lingkup output yang dihasilkan.

5. Spesifikasi Parameter

Dalam penelitian ini, spesifikasi parameter ditentukan guna membatasi ruang lingkup eksperimen, meliputi variabel bebas, *level*, dan *output*.

6. Instalasi Alat dan Material

Setelah menentukan spesifikasi parameter, dilakukan pemasangan alat dan material pada *loop*.

7. Visualisasi Aliran dan Pengumpulan Data

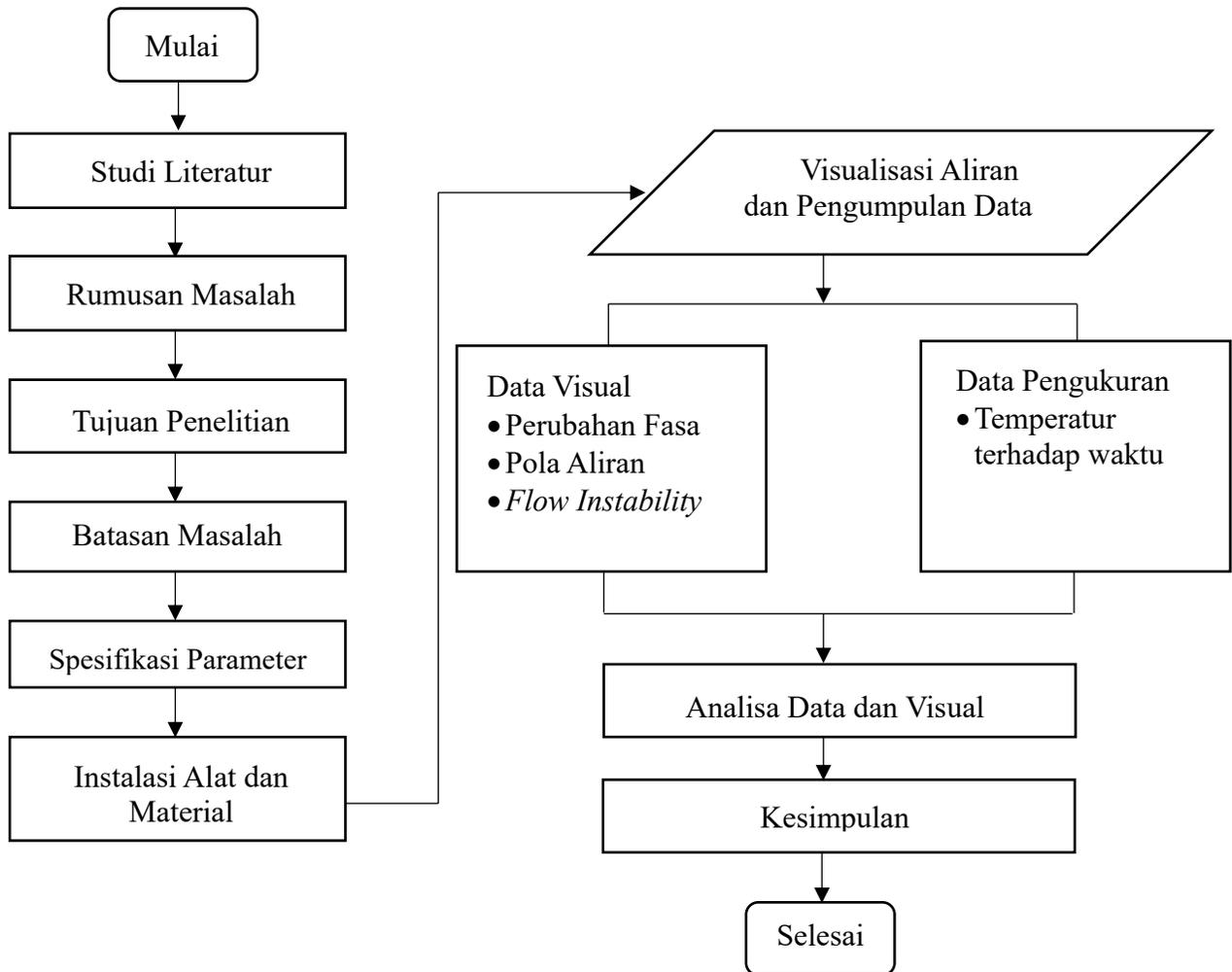
Pada tahap ini, dilakukan visualisasi aliran berupa foto dan rekaman kamera terhadap perubahan fasa yang kemudian membentuk pola aliran tertentu. Kemudian dilakukan pengumpulan data temperatur terhadap waktu dalam bentuk grafik dan tabel data temperatur dari setiap variasi beban kalor yang diberikan.

8. Analisa Data dan Visual

Setelah mendapatkan data pengukuran dan visual, dilakukan analisa terhadap perubahan fasa termasuk pola aliran yang terbentuk terhadap *flow instability* yang terjadi didalam loop dengan variasi beban kalor yang berbeda-beda dari setiap *filling ratio* yang telah ditentukan.

9. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa dengan variabel yang telah ditentukan sebelumnya, diperoleh pola aliran yang terbentuk dan hubungan antara perubahan fasa dengan ketidakstabilan aliran yang terjadi didalam *loop*.



Gambar 3. 1 Diagram Tahap Penelitian

3.7 Jadwal Penelitian

Untuk mendukung kelancaran dan ketepatan waktu dalam pelaksanaan penelitian, dibuatlah jadwal penelitian yang mencakup seluruh tahapan kegiatan yang dapat dilihat pada Tabel 3.3 di bawah ini. Jadwal penelitian dibuat dengan tujuan sebagai acuan

dalam pengelolaan waktu dan sumber daya agar penelitian dapat berjalan secara efektif dan efisien sesuai dengan target yang telah ditetapkan.

Tabel 3.3 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Agustus				September				Oktober				November				Desember				Output
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1.	Penyusunan proposal	■	■	■	■	■	■															Proposal
2.	Penentuan Parameter	■	■	■	■	■	■															Perencanaan Variabel
3.	Instalasi alat penelitian	■	■																			Instalasi beberapa alat pada <i>loop thermosyphon</i> dan <i>vakum loop</i>
4.	SUP (Seminar Usulan Penelitian)						■	■														Seminar proposal
5.	Pelaksanaan penelitian (visualisasi aliran) dengan filling ratio 45%									■	■	■	■									Rekaman berupa perubahan fasa, pola aliran dan <i>instability flow</i> serta data temperatur dengan variasi beban kalor tertentu
6.	Pelaksanaan penelitian (visualisasi aliran) dengan filling ratio 55%									■	■	■	■									Rekaman berupa perubahan fasa, pola aliran dan <i>instability flow</i> serta data temperatur dengan variasi beban kalor tertentu
7.	Pelaksanaan penelitian (visualisasi aliran) dengan filling ratio 65%									■	■	■	■									Rekaman berupa perubahan fasa, pola aliran dan <i>instability flow</i> serta data temperatur dengan variasi beban kalor tertentu
6.	Pengolahan data dan analisa data													■	■	■	■					hasil analisa hubungan antara mekanisme

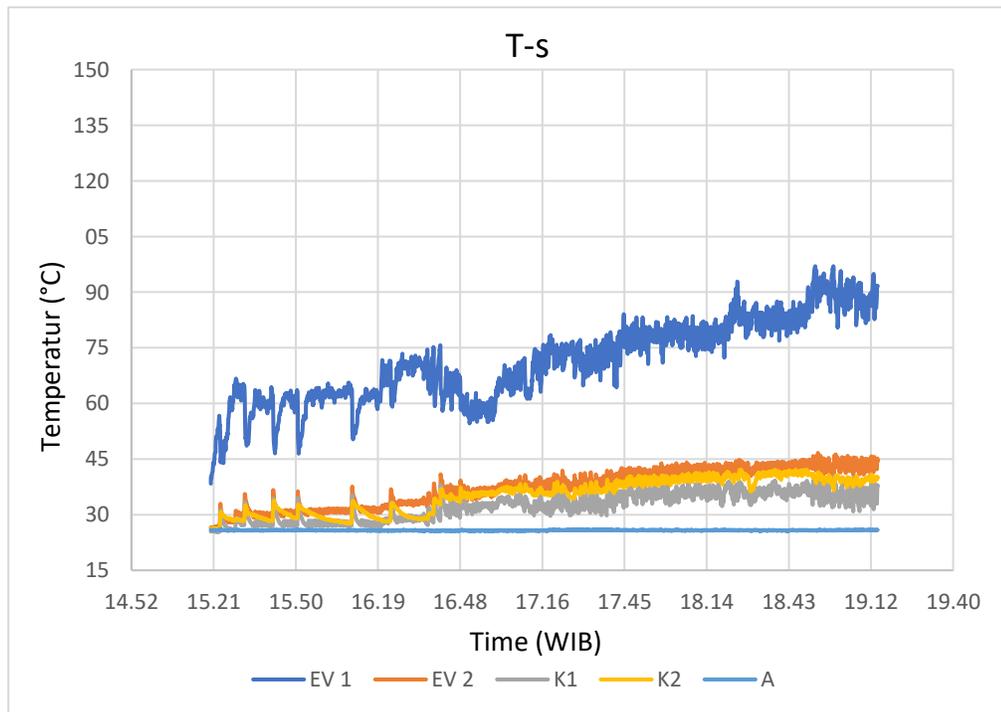
No	Kegiatan	Agustus				September				Oktober				November				Desember				Output
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
																						perubahan fasa,pola aliran terhadap <i>instability flow</i> .
7.	Sidang Thesis																					Evaluasi Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian pada Filling Ratio 45%

Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi beban kalor dari 30 W, 50 W, 70 W, 90 W hingga 110 W pada sistem dengan *filling ratio* 45% (235 mm) dan debit air water jacket 0.2 liter per menit.



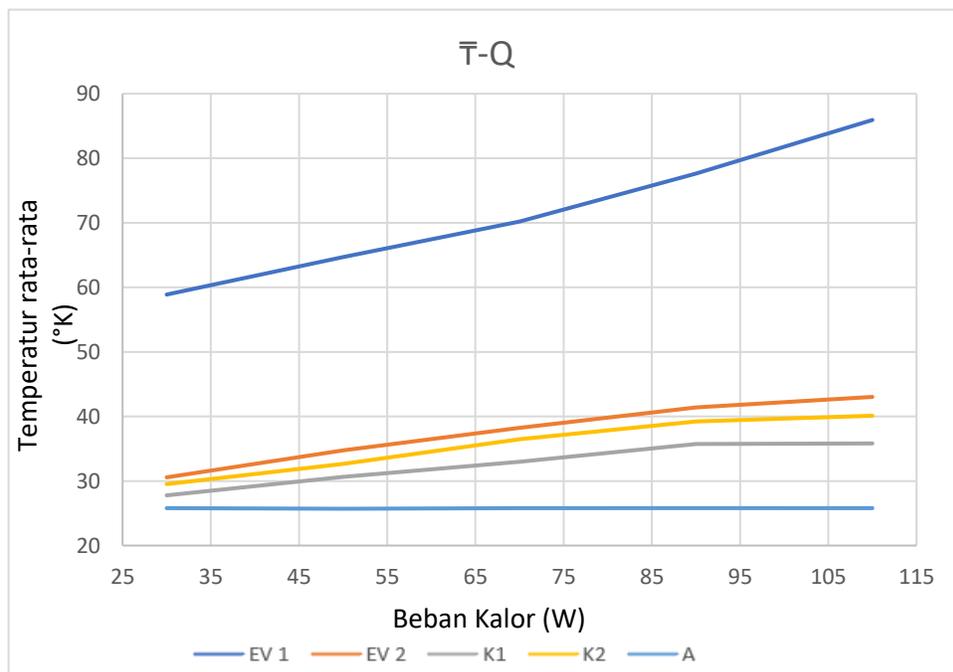
Grafik 4.1 Temperatur terhadap waktu

Gambar grafik 4.1 menampilkan EV1 sebagai temperatur tertinggi dan terus meningkat dengan bertambahnya beban kalor yang mengindikasikan terjadinya *overheating*, EV2 sedikit lebih rendah, sedangkan K1, K2, dan A tetap rendah. Semua sensor menunjukkan fluktuasi temperatur yang menunjukkan adanya ketidakstabilan aliran dengan fluktuasi terbesar terjadi pada EV1, sedangkan sensor lainnya relatif rendah.

Tabel 4.1 Temperatur Rata-rata

Beban Kalor	Evaporator		Kondensor		Ambient
	Tev-1	Tev-2	Tk-1	Tk-2	
30 W	58.88	30.57	27.78	29.52	25.79
50 W	64.70	34.76	30.66	32.67	25.70
70 W	70.21	38.24	32.98	36.48	25.80
90 W	77.63	41.39	35.73	39.23	25.80
110 W	85.93	43.03	35.82	40.11	25.80

Dari tabel 4.1 menunjukkan temperatur rata-rata dari hasil pengukuran sensor dengan variasi beban kalor tertentu.



Gambar 4.2 Grafik \bar{T} -Q

Gambar grafik 4.2 menunjukkan temperatur rata-rata di semua titik pengukuran (EV1, EV2, K1, K2, A) meningkat seiring dengan peningkatan beban kalor. Pada beban 30–50 W, kenaikan temperatur relatif lambat, sedangkan pada 90–110 W kenaikannya lebih cepat.

Tabel 4.2 Perubahan Fasa (*Phase change*)

No.	Beban Kalor	Fenomena perubahan fasa	Observasi Visual
1.	30 W	<i>Nucleate boiling</i>	Terbentuk seperti uap / film cair tipis disepanjang area evaporator
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Droplet terbentuk dengan cepat disepanjang dinding kondensor, bergabung, menyatu membentuk film cair yang banyak dan kemudian jatuh mengalir ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor sedikit
2.	50 W	<i>Nucleate boiling</i>	- <i>Film</i> cair terbentuk tipis hanya pada area evaporator menuju kondensor
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Droplet terbentuk dengan cepat, bergabung, menyatu membentuk film cair hanya pada area masuk dan keluar dinding kondensor yang kemudian mengalir jatuh ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor sedikit
3.	70 W	<i>Nucleate boiling</i>	- <i>Film</i> cair terbentuk dengan sangat tipis pada area atas evaporator
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Uap panas terlihat sesaat akibat fluktuasi dan langsung membentuk droplet yang sangat tipis dan menyatu dengan cepat membentuk film cair yang mengalir jatuh ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor sangat sedikit
4.	90 W	<i>Nucleate boiling</i>	- <i>Film</i> cair terbentuk sangat tipis pada evaporator dan hampir tidak ada
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Uap panas terlihat sesaat akibat fluktuasi dan langsung membentuk droplet yang sangat tipis dan menyatu dengan cepat membentuk film cair yang mengalir jatuh ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor sangat sedikit

No.	Beban Kalor	Fenomena perubahan fasa	Observasi Visual
5.	110 W	<i>Nucleate boiling</i>	- <i>Film</i> cair terbentuk sangat tipis pada evaporator dan hampir tidak ada
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	- Uap panas terlihat sesaat akibat fluktuasi dan langsung membentuk droplet yang sangat tipis dan menyatu dengan cepat membentuk film cair yang mengalir dan jatuh ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor sangat sedikit

Berdasarkan hasil observasi visual pada Tabel 4.2, dapat dilihat bahwa pada *filling ratio* 45% (235 mm) menunjukkan terjadinya *nucleate boiling* yang lemah karena indikasi kekeringan. Hal ini ditunjukkan dengan adanya akumulasi *film* cair tipis yang terlihat hampir merata diseluruh area evaporator dan kondensor mulai dari beban kalor terendah yaitu 30 W.

Tabel 4.3 Pola Aliran (*Regim Flow*)

No.	Beban Kalor	Pola Aliran	<i>flow pattern intensity</i>	Observasi Visual
1.	30 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	- Pergerakan pola aliran yang cepat dengan durasi yang singkat - ketebalannya tipis, dan penyebaran yang terbatas dibagian bawah evaporator - Didominasi oleh pola aliran <i>churn</i>
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
2.	50 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	- Pergerakan pola aliran yang cepat dengan durasi yang singkat - Ketebalannya perlahan bertambah, dan penyebaran yang mulai memenuhi area evaporator - Didominasi oleh pola aliran <i>churn</i>
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
3.	70 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	- Pergerakan pola aliran yang sangat cepat dan acak dengan durasi yang lama - Ketebalannya bertambah dan penyebaran memenuhi seluruh area hingga puncak evaporator - Didominasi oleh pola aliran <i>churn /annular</i>
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
		<i>Annular</i>	<i>high</i>	

4.	90 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pergerakan pola aliran yang sangat cepat dan acak dengan durasi yang lama - Pola aliran terbentuk sangat tebal, dan penyebaran memenuhi seluruh area hingga puncak evaporator - Didominasi oleh pola aliran <i>churn</i> / <i>annular</i>
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
		<i>Annular</i>	<i>high</i>	
		<i>Mist</i>	<i>high</i>	
5.	110 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pergerakan pola aliran yang sangat cepat dan acak dengan durasi yang lama - Pola aliran terbentuk sangat tebal, dan penyebaran memenuhi seluruh area hingga puncak evaporator - Didominasi oleh pola aliran <i>churn</i> / <i>annular</i>
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
		<i>Annular</i>	<i>high</i>	
		<i>Mist</i>	<i>high</i>	

Dari tabel 4.3 menunjukkan terbentuknya pola aliran yang bervariasi di dalam sistem TPLT sebagai respon dari input beban kalor yang meningkat secara bertahap.

Tabel 4.4 Ketidakstabilan Aliran (*Instability Flow*)

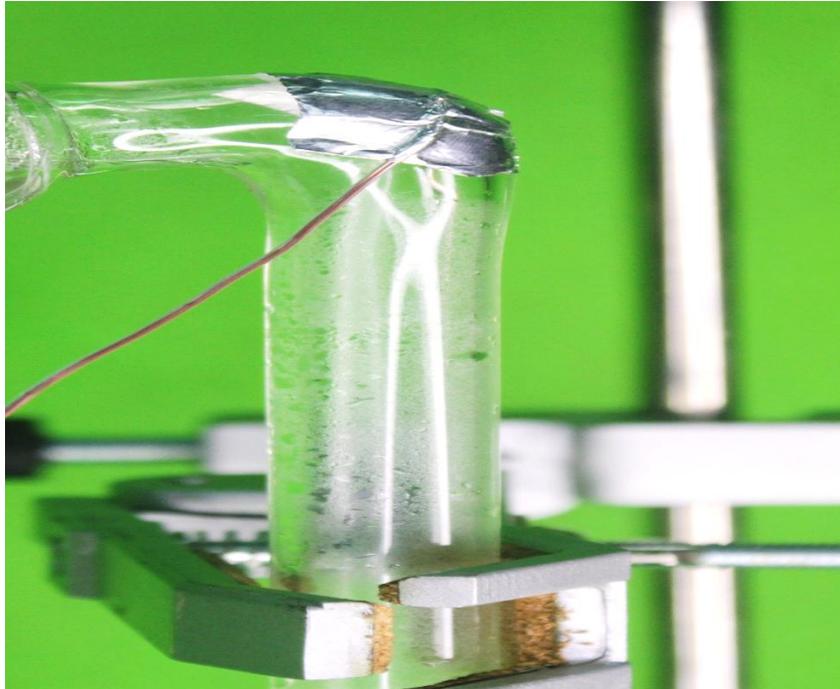
No.	Beban Kalor	Jenis Ketidakstabilan Aliran		Observasi Visual	
		Statik	Dinamis	Statik	Dinamis
1.	30 W	<i>flow regime transition</i>	<i>density wave oscillation</i>	transisi cepat dan acak: bubble → slug → churn	<i>low amplitude</i> dan hampir tidak ada
2.	50 W	<i>flow regime transition</i>	<i>density wave oscillation</i>	transisi cepat dan acak: bubble → slug → churn	<i>low amplitude</i> dan hampir tidak ada
		<i>Reverse flow</i>	<i>geyser boiling</i>	<i>weak / occasional</i>	<i>low intensity</i>
3.	70 W	<i>flow regime transition</i>	<i>density wave oscillation</i>	transisi lebih cepat dan acak: churn → annular	<i>low to high amplitude</i>

No.	Beban Kalor	Jenis Ketidakstabilan Aliran		Observasi Visual	
		Statik	Dinamis	Statik	Dinamis
		<i>reverse flow</i>	<i>geyser boiling</i>	<i>weak / occasional</i>	<i>medium-high intensity</i>
4.	90 W	<i>flow regime ransition</i>	<i>density wave oscillation</i>	transisi sangat cepat dan acak: churn →annular → mist	<i>high amplitude</i>
		<i>reverse flow</i>	<i>geyser boiling</i>	<i>weak / occasional</i>	<i>high intensity</i>
5.	110 W	<i>flow regime ransition</i>	<i>density wave oscillation</i>	transisi sangat cepat dan acak: churn →annular → mist	<i>high amplitude</i>
		<i>reverse flow</i>	<i>geyser boiling</i>	<i>weak / occasional</i>	<i>high intensity</i>

Tabel 4.4 menunjukkan bahwa sistem mengalami ketidakstabilan aliran dinamis tipe *geyser boiling* di seluruh rentang beban kalor. Seiring peningkatan beban kalor, intensitas ketidakstabilan ini semakin parah, yang secara visual terlihat dari transisi pola aliran yang berubah dengan cepat dari *bubble-slug* hingga didominasi oleh *churn*. Kondisi ini memicu terjadinya *density wave oscillation* dan *reverse flow* lemah pada beban kalor yg tinggi.

4.1.1 Dokumentasi Observasi Visual

- Fenomena Perubahan Fasa (*boiling* dan *condensation*)



Gambar 4.3 *Film* cair pada bagian atas evaporator



Gambar 4.4 *Film* cair pada bagian bawah evaporator



Gambar 4.5 *Film cair* pada area kanan kondensor



Gambar 4.6 *Film cair* pada area kiri kondensor



Gambar 4.7 *Film cair* pada seluruh area kondensor

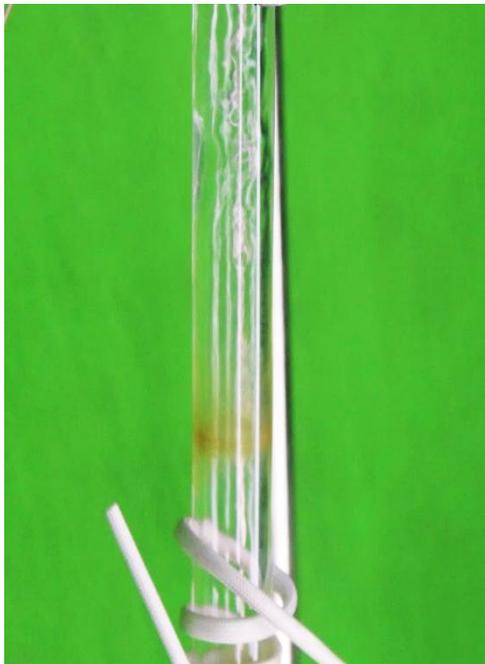
- *Flow Regim* pada Evaporator
 - Pola Aliran (*Regim Flow*) dengan 45% *filling ratio*



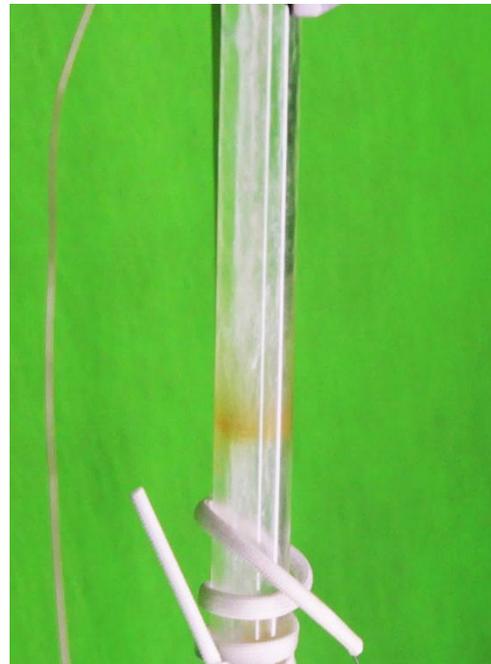
Gambar 4.8 *bubble-slug flow* (30W)



Gambar 4.9 *Churn flow* (50W)



Gambar 4.10 *Wipsy - Annular Flow*
(70-110)



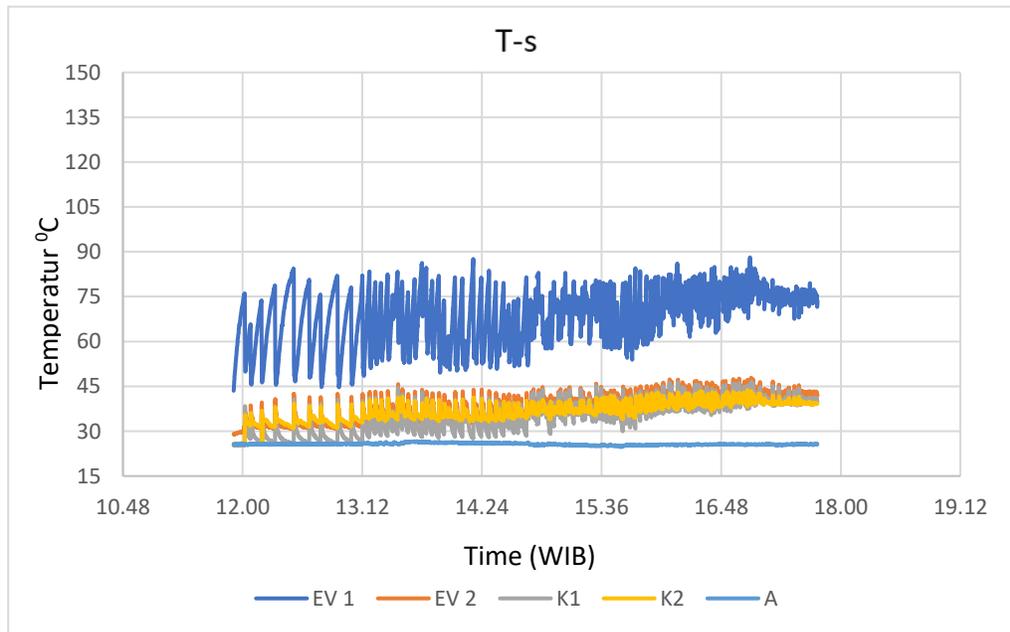
Gambar 4.11 *Mist Flow*
(70-110W)

4.1.3 Analisis Observasi Visual

Pada *filling ratio* 45%, volume fluida yang lebih kecil menghasilkan uap panas dengan kapasitas lebih rendah yang menyebabkan proses terbentuknya uap (*nucleate boiling*) tidak terjadi secara kontinyu dimana uap terbentuk lalu kemudian runtuh kembali sehingga secara visual akan terlihat seperti aktivitas lapisan uap tipis yang menempel pada hampir seluruh permukaan dinding evaporator. Laju pembentukan uap pun menjadi semakin tidak stabil karena uap tidak sepenuhnya bergerak ke atas menuju kondensor melainkan jatuh akibat perbedaan densitas dan terperangkap serta menumpuk di dalam cairan evaporator yang memicu terjadinya *geyser boiling*. *Geyser boiling* yang merupakan lonjakan uap panas, mendorong seluruh kolam cairan yang ada di atasnya dan menyapu semua *film* cair yang terbentuk pada dinding evaporator maupun kondensor sehingga pada fenomena selanjutnya, *film* cair menjadi lebih tipis dan hanya terbentuk di beberapa area tertentu, terutama di bagian atas evaporator dan dekat *inlet* kondensor. Kondensat yang dihasilkan pun sangat sedikit bahkan tidak jatuh mencapai *downcomer*. Kondisi ini menyebabkan fluktuasi yang memicu terjadinya *density wave oscillation* diikuti *reverse flow* lemah dengan seiring bertambahnya beban kalor. Siklus ini akan berulang yang dapat mencegah pembentukan pola aliran yang stabil dan menyebabkan kinerja sistem menjadi sangat buruk. Fenomena perubahan fasa, pola aliran yang terbentuk, dan ketidakstabilan aliran tersebut dapat dilihat pada video dengan link yang tertera pada lampiran.

4.2 Hasil Pengujian pada Filling Ratio 55%

Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi beban kalor dari 30 W, 50 W, 70 W, 90 W hingga 110 W pada sistem dengan *filling ratio* 55% (245 mm) dan debit air water jacket 0.2 liter per menit.



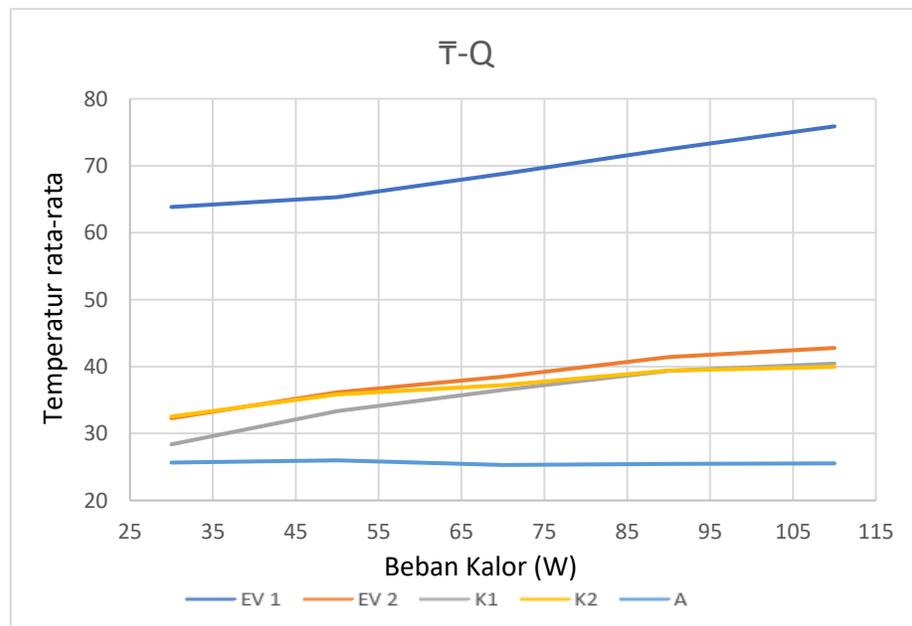
Gambar 4.12 Grafik T-s

Gambar grafik 4.12 menunjukkan semua sensor mengalami fluktuasi temperatur yang mengindikasikan adanya ketidakstabilan aliran dengan fluktuasi terbesar terjadi pada EV1, sedangkan sensor lainnya relatif rendah. Namun, fluktuasi temperatur yang terjadi menjadi lebih stabil seiring dengan meningkatnya beban kalor.

Tabel 4.5 Temperatur Rata-rata

Beban Kalor	Evaporator		Kondensor		Ambient
	Tev-1	Tev-2	Tk-1	Tk-2	
30 W	63.84	32.29	28.38	32.54	25.68
50 W	65.30	36.15	33.35	35.84	25.99
70 W	68.78	38.51	36.51	37.23	25.30
90 W	72.47	41.44	39.37	39.42	25.45
110 W	75.89	42.79	40.44	39.96	25.56

Dari tabel 4.5 menunjukkan temperatur rata-rata dari hasil pengukuran sensor dengan variasi beban kalor tertentu.



Gambar 4.13 Grafik \bar{T} -Q

Gambar grafik 4.13 menunjukkan temperatur rata-rata di semua titik pengukuran (EV1, EV2, K1, K2, A) meningkat seiring dengan peningkatan beban kalor. Pada beban 30–50 W, kenaikan temperatur relatif lambat, sedangkan pada 90–110 W kenaikannya lebih cepat.

Tabel 4.6 Perubahan Fasa (*Phase change*)

No.	Beban Kalor	Fenomena perubahan fasa	Observasi Visual
1.	30 W	<i>Nucleate boiling</i>	- <i>Film</i> cair terbentuk semakin tebal pada area tertentu yaitu <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> dari kondensor
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	- Droplet terbentuk dengan cepat pada beberapa area dinding kondensor, bergabung, menyatu membentuk film cair yang banyak dan kemudian jatuh mengalir ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor mulai bertambah
2.	50 W	<i>Nucleate boiling</i>	- <i>Film</i> cair terbentuk tipis hanya pada area evaporator menuju kondensor
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	- Droplet terbentuk dengan cepat, bergabung, menyatu membentuk film cair hanya pada area masuk dan keluar dinding kondensor yang kemudian mengalir jatuh ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor sedikit
3.	70 W	<i>Nucleate boiling</i>	- <i>Film</i> cair terbentuk dengan sangat tipis pada area atas evaporator
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	- Uap panas terlihat sesaat akibat fluktuasi dan langsung membentuk droplet yang sangat tipis dan menyatu dengan cepat membentuk film cair yang mengalir jatuh ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor sangat sedikit
4.	90 W	<i>Nucleate boiling</i>	- <i>Film</i> cair terbentuk sangat tipis pada evaporator dan hampir tidak dapat diamati secara visual
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	- Uap panas terlihat sesaat akibat fluktuasi dan langsung membentuk droplet yang sangat tipis dan menyatu dengan cepat membentuk film cair yang mengalir jatuh ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor sangat sedikit
5.	110 W	<i>Nucleate boiling</i>	- <i>Film</i> cair terbentuk sangat tipis pada evaporator dan hampir tidak dapat diamati secara visual
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	- Uap panas terlihat sesaat akibat fluktuasi dan langsung membentuk droplet yang sangat tipis dan menyatu dengan cepat membentuk film cair yang mengalir dan jatuh ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor sangat sedikit

Berdasarkan hasil observasi visual pada Tabel 4.6, dapat dilihat bahwa pada *filling ratio* 55% (245 mm) menunjukkan proses *nucleate boiling* yang lebih aktif yang menyebabkan jumlah uap yang dihasilkan lebih besar dan menghasilkan *film* cair yang lebih tebal serta tersebar hampir merata diseluruh area evaporator dan kondensor mulai dari beban kalor terendah yaitu 30 W.

Tabel 4.7 Pola Aliran (*Regim Flow*)

No.	Beban Kalor	Pola Aliran	<i>flow pattern intensity</i>	Observasi Visual
1.	30 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pergerakan pola aliran yang cepat dan acak dengan durasi yang singkat - Lebih tebal, dan penyebaran yang perlahan lebih luas hampir diseluruh area evaporator - Pola aliran <i>bubble</i> dan <i>slug</i> juga terbentuk di <i>downcomer</i> dalam jumlah yang banyak - Didominasi oleh pola aliran <i>churn</i> pada evaporator dan <i>slug</i> pada kondensor
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
2.	50 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pergerakan pola aliran yang cepat dan acak dengan durasi yang singkat - Ketebalannya bertambah, dan penyebaran yang memenuhi area evaporator - Pola aliran <i>bubble</i> dan <i>slug</i> juga terbentuk di <i>downcomer</i> dalam jumlah yang banyak - Didominasi oleh pola aliran <i>churn</i> pada evaporator
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
3.	70 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pergerakan pola aliran yang sangat cepat dan acak dengan durasi yang lama - Semakin tebal dan penyebaran memenuhi seluruh area hingga puncak evaporator - Pola aliran <i>bubble</i> dan <i>slug</i> juga terbentuk di <i>downcomer</i> dalam jumlah yang banyak - Didominasi oleh pola aliran <i>churn</i> /<i>annular</i> pada evaporator
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
		<i>Annular</i>	<i>high</i>	
4.	90 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pergerakan pola aliran yang sangat cepat dan acak dengan durasi yang lama - Pola aliran terbentuk tebal, dan penyebaran memenuhi seluruh area hingga puncak evaporator - Didominasi oleh pola aliran <i>churn</i> / <i>annular</i> pada evaporator
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	

No.	Beban Kalor	Pola Aliran	<i>flow pattern intensity</i>	Observasi Visual
		<i>Annular</i>	<i>high</i>	
		<i>Mist</i>	<i>high</i>	
5.	110 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pergerakan pola aliran sangat cepat dan acak dengan durasi yang lama - Pola aliran terbentuk sangat tebal, dan penyebaran memenuhi seluruh area hingga puncak evaporator - Didominasi oleh pola aliran <i>churn</i> / <i>annular</i> pada evaporator
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
		<i>Annular</i>	<i>high</i>	
		<i>Mist</i>	<i>high</i>	

Observasi visual pada tabel 4.7 menyajikan adanya pola aliran yang terbentuk tidak hanya pada evaporator melainkan juga terbentuk pada area *downcomer*. Pola aliran yang terbentuk didominasi oleh pola aliran *slug*. Hal ini mengindikasikan terjadinya proses penguapan yang intensif di bagian evaporator dan menghasilkan uap dengan kapasitas aliran yang besar.

Tabel 4.8 Ketidakstabilan Aliran (*Instability Flow*)

No.	Beban Kalor	Jenis Ketidakstabilan Aliran		Observasi Visual	
		Statik	Dinamis	Statik	Dinamis
1.	30 W	<i>flow regime transition</i>	<i>density wave oscillation</i>	Transisi cepat dan acak: bubble → slug → churn	<i>low amplitude</i> dan hampir tidak ada
		<i>Reverse flow</i>	<i>Geysier boiling</i>	<i>moderate / frequent</i>	<i>low intensity</i>
2.	50 W	<i>flow regime transition</i>	<i>density wave oscillation</i>	Transisi cepat dan acak: bubble → slug → churn	<i>low amplitude</i> dan hampir tidak ada
		<i>Reverse flow</i>	<i>Geysier boiling</i>	<i>moderate/ frequent</i>	<i>low intensity</i>
3.	70 W	<i>flow regime transition</i>	<i>density wave oscillation</i>	Transisi lebih cepat dan acak: churn → annular	<i>low to high amplitude</i>

No.	Beban Kalor	Jenis Ketidakstabilan Aliran		Observasi Visual	
		Statik	Dinamis	Statik	Dinamis
		<i>Reverse flow</i>	<i>Geysers boiling</i>	<i>strong/ occasional</i>	<i>Medium-high intensity</i>
4.	90 W	<i>flow regime transition</i>	<i>density wave oscillation</i>	Transisi sangat cepat dan acak: churn → annular → mist	<i>high amplitude</i>
		<i>Reverse flow</i>	<i>Geysers boiling</i>	<i>strong / occasional</i>	<i>high intensity</i>
5.	110 W	<i>flow regime transition</i>	<i>density wave oscillation</i>	Transisi sangat cepat dan acak: churn → annular → mist	<i>high amplitude</i>
		<i>Reverse flow</i>	<i>Geysers boiling</i>	<i>weak / occasional</i>	<i>high intensity</i>

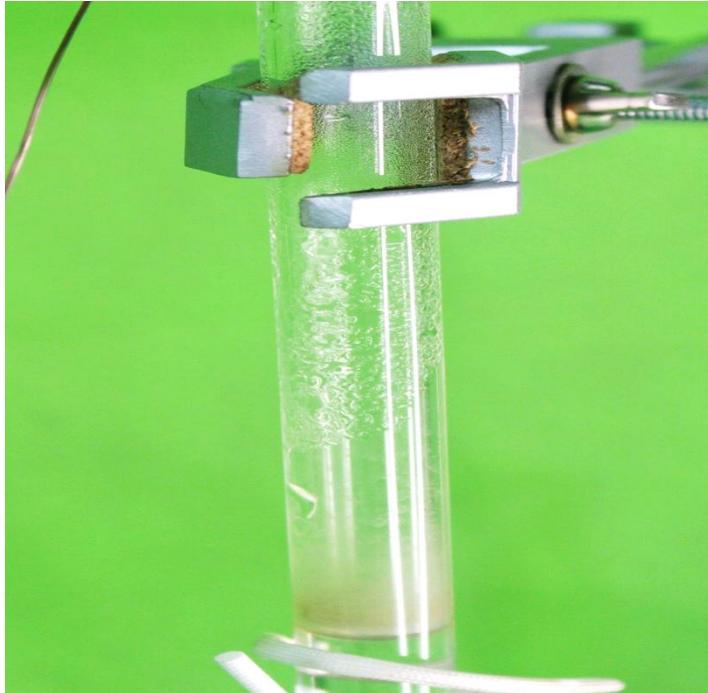
Tabel 4.8 menunjukkan bahwa pada peningkatan beban kalor mengubah mekanisme ketidakstabilan dimana pada beban 30-50 W, sistem didominasi oleh *geysers boiling* yang menyebabkan *reverse flow* kuat. Namun, pada saat beban kalor 70 W, penguapan menjadi kontinyu dan mengurangi *reverse flow*, tetapi memicu *density wave oscillation* yang tetap menyebabkan fluktuasi kuat.

4.2.1 Dokumentasi Observasi Visual

- *Film* cair pada evaporator dan kondensor



Gambar 4.14 *Film* cair pada bagian atas evaporator



Gambar 4.15 *Film* cair pada bagian bawah evaporator



4.16 *Film cair* pada area kanan kondensor

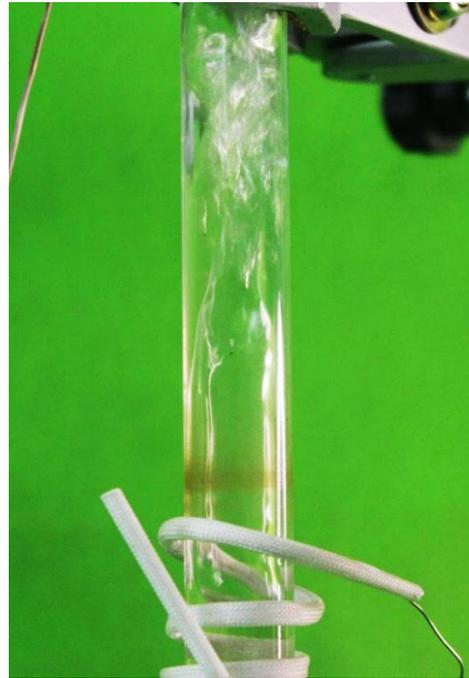


Gambar 4.17 *Film cair* pada area kiri kondensor

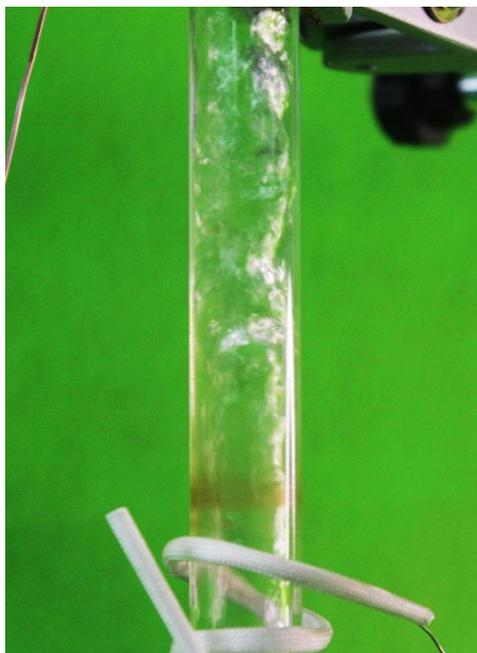
• *Flow Regim pada Evaporator*



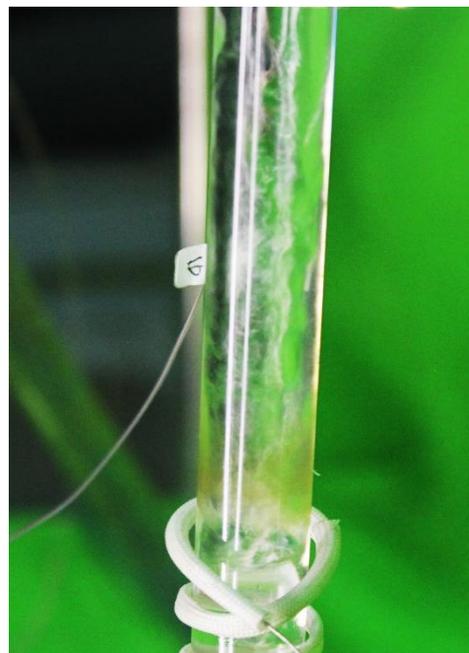
Gambar 4.18 *Bubble - slug flow*
(30W)



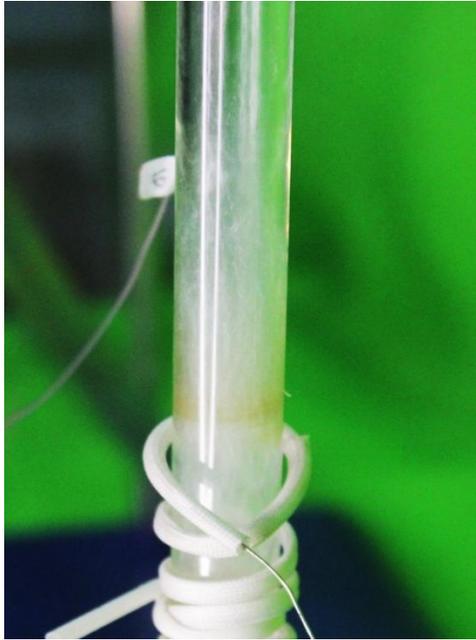
Gambar 4.19 *Slug - churn flow*
(30-50W)



Gambar 4.20 *churn flow*

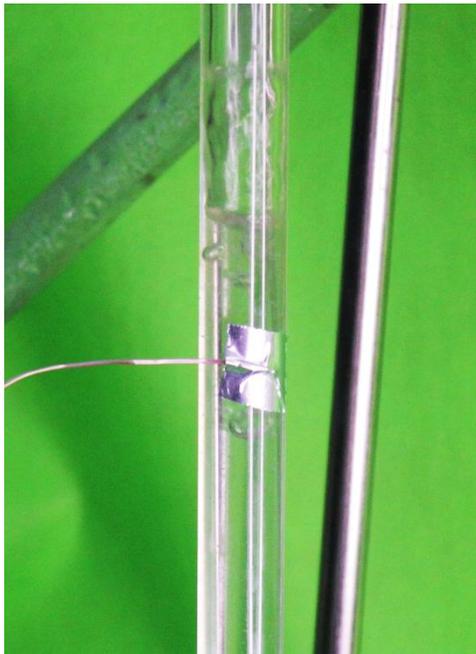


Gambar 4.21 *Wipsy - Annular flow*



Gambar 4.22 *Mist flow* (70-110W)

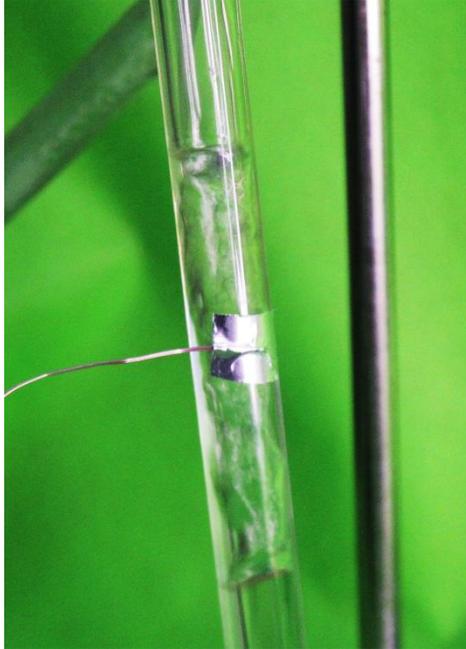
- *Flow regime* pada Kondensor



Gambar 4.23 *Bubble flow* (30-50W)



Gambar 4.24 *Churn flow* (30-50W)



Gambar 4.25 Churn flow (30-50W)

4.2.2 Analisis Visual Observation

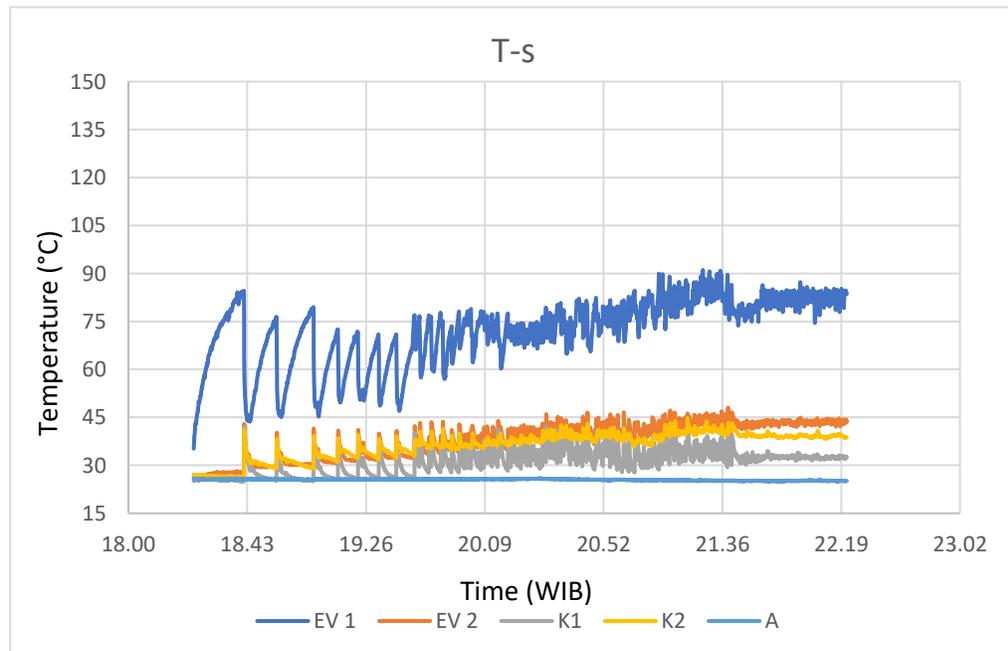
Berdasarkan hasil observasi visual yang dilakukan, proses terbentuknya uap (*nucleate boiling*) pada *filling ratio* 55% terjadi lebih aktif dan kontinyu dimana secara visual, film cair terbentuk tebal dan menempel pada hampir seluruh permukaan dinding evaporator. Namun, laju pembentukan uap menjadi terhambat karena sirkulasi *nucleate boiling* yang belum cukup kuat dan menyebabkan jatuhnya film cair akibat gaya gravitasi yang bergerak ke bawah berlawanan arah dengan uap panas. Hal ini mengakibatkan uap panas tidak tersalurkan dengan baik menuju kondensor. Uap akan kembali terperangkap dan menumpuk di dalam cairan evaporator meskipun tidak lebih ekstrim dari *filling ratio* 45% yang memicu terjadinya *geyser boiling*. Lonjakan uap mendorong seluruh kolam cairan beserta uap dengan kapasitas yang besar bergerak ke atas melewati kondensor dan jatuh pada area *downcomer*. Cairan beserta uap tersebut kembali bergerak dan membentuk pola aliran *bubble* serta *slug* yang mengindikasikan terjadinya ketidakstabilan yaitu *reverse flow*. Siklus ini terjadi intens pada beban kalor rendah yaitu 30 W, 50 W dan 70 W. Namun,

geyser boiling yang terjadi terus menyapu semua *film* cair yang terbentuk pada dinding evaporator maupun kondensor sehingga pada fenomena selanjutnya, *film* cair menjadi lebih tipis dan hanya terbentuk di beberapa area tertentu, terutama di bagian atas evaporator dan dekat *inlet* kondensor. Kondisi ini menyebabkan intensitas dan frekuensi pola aliran pada downcomer semakin kecil tetapi tetap terjadi fluktuasi kuat yang memicu terjadinya *density wave oscillation* diikuti *reverse flow* dengan seiring bertambahnya beban kalor 90 W dan 110 W.

Siklus ini akan berulang yang dapat mencegah pembentukan pola aliran yang stabil dan menyebabkan kinerja sistem menjadi sangat buruk. Fenomena perubahan fasa, pola aliran yang terbentuk, dan ketidakstabilan aliran tersebut dapat dilihat pada video dengan link yang tertera pada lampiran.

4.3 Hasil Pengujian pada Filling Ratio 65%

Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi beban kalor dari 30 W, 50 W, 70 W, 90 W hingga 110 W pada sistem dengan *filling ratio* 65% (255 mm) dan debit air *water jacket* 0.2 liter per menit.



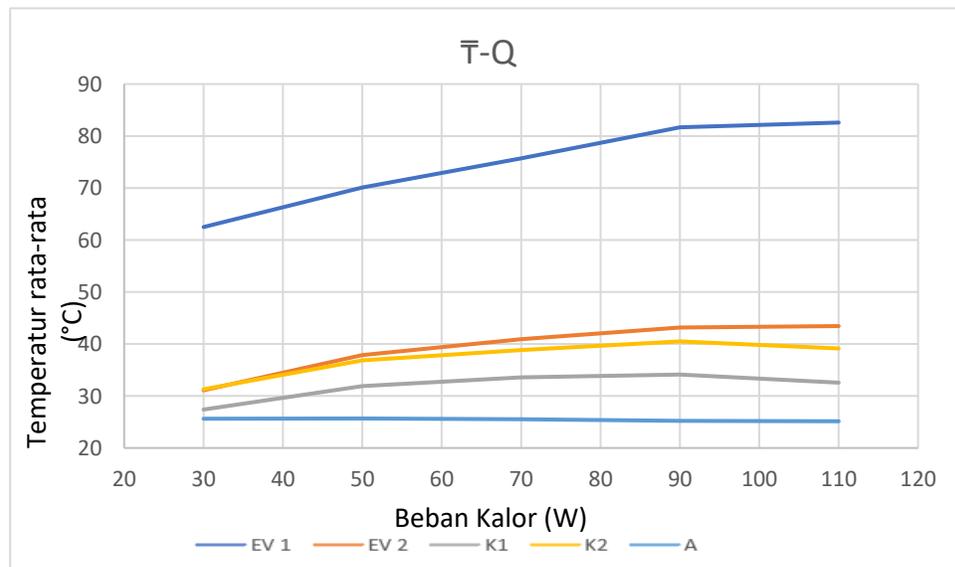
Gambar 4.26 Grafik T-s

Gambar grafik 4.26 menunjukkan semua sensor mengalami fluktuasi temperatur yang mengindikasikan adanya ketidakstabilan aliran dengan fluktuasi terbesar terjadi pada EV1, sedangkan sensor lainnya relatif rendah. Namun, fluktuasi temperatur yang terjadi menjadi tidak stabil terutama pada beban kalor rendah dan perlahan beralih menuju *instability flow* yang lebih teratur seiring dengan meningkatnya beban kalor.

Tabel 4.9 Temperatur Rata-rata

Beban Kalor	Evaporator		Kondensor		Ambient
	Tev-1	Tev-2	Tk-1	Tk-2	
30 W	62.50	31.09	27.39	31.30	25.62
50 W	70.08	37.87	31.89	36.83	25.67
70 W	75.70	40.92	33.57	38.86	25.52
90 W	81.69	43.17	34.13	40.50	25.24
110 W	82.59	43.45	32.56	39.14	25.14

Dari tabel 4.9 menunjukkan rata-rata temperatur yang berada didalam evaporator, kondensor maupun temperatur ruang/ambient.



Gambar 4.27 Grafik \bar{T} -Q

Gambar grafik 4.27 menampilkan temperatur rata-rata di semua titik pengukuran (EV1, EV2, K1, K2, A) meningkat seiring dengan peningkatan beban kalor. Pada beban 30–50 W, kenaikan temperatur rata-rata lebih cepat, sedangkan temperatur pada beban kalor 70 W - 90 W mengalami kenaikan namun tidak significant hingga beban kalor mencapai 110 W sistem kemungkinan besar sudah mendekati atau melewati batas kemampuannya.

Tabel 4.10 Perubahan Fasa (*Phase change*)

No.	Beban Kalor	Fenomena perubahan fasa	Observasi Visual
1.	30 W	<i>Nucleate boiling</i>	- <i>Film</i> cair terbentuk semakin tebal pada area tertentu yaitu <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> dari kondensor
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	- Droplet terbentuk dengan cepat disepanjang dinding kondensor, bergabung, menyatu membentuk <i>film</i> cair yang banyak dan kemudian jatuh mengalir ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor banyak
2.	50 W	<i>Nucleate boiling</i>	- Terbentuk tebal hanya pada area evaporator menuju kondensor
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	- Droplet terbentuk dengan cepat, bergabung, menyatu membentuk <i>film</i> cair tebal hanya pada area masuk dan keluar dinding kondensor yang kemudian mengalir jatuh ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor sedikit
3.	70 W	<i>Nucleate boiling</i>	- Terbentuk dengan sangat tipis pada area atas evaporator
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	- Uap panas terlihat sesaat akibat fluktuasi dan langsung membentuk <i>droplet</i> yang sangat tipis dan menyatu dengan cepat membentuk <i>film</i> cair yang mengalir jatuh ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor sedikit
4.	90 W	<i>Nucleate boiling</i>	- Terbentuk sangat tipis pada evaporator dan hampir tidak dapat diamati secara visual
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	- Uap panas terlihat sesaat akibat fluktuasi dan langsung membentuk <i>droplet</i> yang sangat tipis dan menyatu dengan cepat membentuk <i>film</i> cair yang mengalir jatuh ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor sangat sedikit

No.	Beban Kalor	Fenomena perubahan fasa	Observasi Visual
5.	110 W	<i>Nucleate boiling</i>	- Terbentuk sangat tipis pada evaporator dan hampir tidak dapat diamati secara visual
		<i>Transition dropwise - film condensation</i>	- Uap panas terlihat sesaat akibat fluktuasi dan langsung membentuk <i>droplet</i> yang sangat tipis dan menyatu dengan cepat membentuk film cair yang mengalir dan jatuh ke bawah. - Jumlah kondensat yang terbentuk di dalam kondensor sangat sedikit

Berdasarkan hasil observasi visual pada Tabel 4.10, dapat dilihat bahwa pada *filling ratio* 65% (255 mm) menunjukkan proses *nucleate boiling* yang sangat aktif yang menyebabkan jumlah uap yang dihasilkan lebih besar dan menghasilkan *film* cair yang lebih tebal serta tersebar hampir merata diseluruh area evaporator dan kondensor mulai dari beban kalor terendah yaitu 30 W.

Tabel 4.11 Pola Aliran (*Regim Flow*)

No.	Beban Kalor	Pola Aliran	<i>flow pattern intensity</i>	Observasi Visual
1.	30 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pergerakan pola aliran yang cepat dengan durasi yang singkat - Pola aliran lebih tebal dan penyebaran yang cepat memenuhi seluruh area evaporator dan bergerak menuju <i>downcomer</i> melewati area kondensor - Pola aliran <i>bubble</i> dan <i>slug</i> juga terbentuk di <i>downcomer</i> dalam jumlah yang banyak - Didominasi oleh pola aliran <i>churn</i> pada evaporator
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
2.	50 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pergerakan pola aliran yang cepat dengan durasi yang singkat - Pola aliran yang terbentuk tebal dan masih tetap bergerak memenuhi seluruh area evaporator. - Pola aliran <i>bubble</i> dan <i>slug</i> juga terbentuk di <i>downcomer</i> dalam jumlah yang banyak - Didominasi oleh pola aliran <i>churn</i> pada evaporator
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
3.	70 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	- Pergerakan pola aliran yang sangat cepat dan acak dengan durasi yang cepat

No.	Beban Kalor	Pola Aliran	<i>flow pattern intensity</i>	Observasi Visual
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Ketebalannya bertambah dan penyebaran memenuhi seluruh area hingga puncak evaporator - Pola aliran <i>bubble</i> dan <i>slug</i> juga terbentuk di <i>downcomer</i> dalam jumlah yang banyak - Didominasi oleh pola aliran <i>churn</i> pada evaporator
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
		<i>Annular</i>	<i>high</i>	
4.	90 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pergerakan pola aliran yang sangat cepat dan acak dengan durasi yang cepat - Pola aliran terbentuk tebal, dan penyebaran memenuhi seluruh area hingga puncak evaporator - Didominasi oleh pola aliran <i>churn</i> pada evaporator
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
		<i>Annular</i>	<i>high</i>	
		<i>Mist</i>	<i>high</i>	
5.	110 W	<i>Bubble</i>	<i>low</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pergerakan pola aliran yang sangat cepat dan acak dengan durasi yang cepat - Pola aliran terbentuk tebal, dan penyebaran memenuhi seluruh area hingga puncak evaporator - Didominasi oleh pola aliran pada evaporator
		<i>Slug</i>	<i>low</i>	
		<i>Churn</i>	<i>high</i>	
		<i>Annular</i>	<i>high</i>	
		<i>Mist</i>	<i>high</i>	

Observasi visual pada tabel 4.11 menyajikan adanya pola aliran yang terbentuk tidak hanya pada evaporator melainkan juga terbentuk pada area *downcomer*. Pola aliran yang terbentuk didominasi oleh pola aliran *slug*. Hal ini mengindikasikan terjadinya proses penguapan yang sangat intensif di bagian evaporator dan menghasilkan uap dengan kapasitas aliran yang sangat besar.

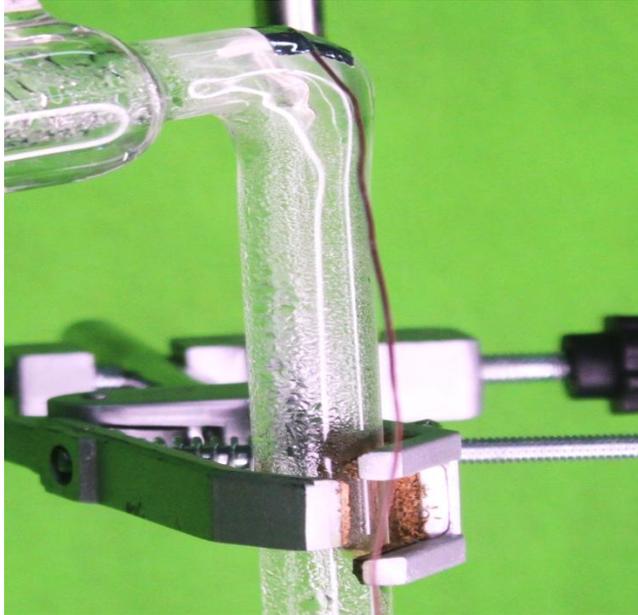
Tabel 4.12 Ketidakstabilan Aliran (*Instability Flow*)

No.	Beban Kalor	Karakteristik Ketidakstabilan		Observasi Visual	
		Statik	Dinamis	statik	Dinamis
1.	30 W	<i>flow regime transition</i>	<i>density wave oscillation</i>	transisi cepat dan acak: bubble → slug → churn	<i>high amplitude</i>
		<i>reverse flow</i>		<i>strong/ occasional</i>	
2.	50 W	<i>flow regime transition</i>	<i>density wave oscillation</i>	transisi cepat dan acak: bubble → slug → churn	<i>high amplitude</i>
		<i>reverse flow</i>		<i>strong / occasional</i>	
3.	70 W	<i>flow regime transition</i>	<i>density wave oscillation</i>	transisi lebih cepat dan acak: churn →annular	<i>high amplitude</i>
		<i>reverse flow</i>		<i>weak-strong / occasional</i>	
4.	90 W	<i>flow regime transition</i>	<i>density wave oscillation</i>	transisi sangat cepat dan acak: churn →annular → mist	<i>high amplitude</i>
		<i>reverse flow</i>		<i>weak / occasional</i>	
5.	110 W	<i>flow regimet transition</i>	<i>density wave oscillation</i>	transisi sangat cepat dan acak: churn →annular → mist	<i>high amplitude</i>
		<i>reverse flow</i>		<i>weak / occasional</i>	

Tabel 4.12 menunjukkan bahwa pada peningkatan beban kalor mengubah mekanisme ketidakstabilan dimana pada beban 30-70 W, sistem didominasi oleh *geyser boiling* yang menyebabkan *reverse flow* kuat. Namun, pada saat beban kalor 70-110 W, penguapan menjadi kontinyu dan mengurangi *reverse flow*, tetapi memicu *density wave oscillation* yang tetap menyebabkan fluktuasi kuat

4.3.1 Dokumentasi Observasi Visual

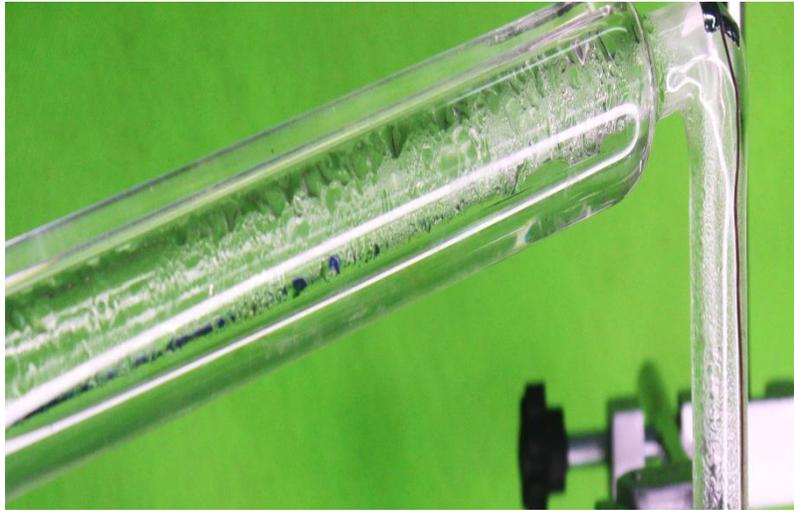
- *Film* cair pada evaporator dan kondensor



Gambar 4.28 *Film* cair pada bagian atas evaporator



Gambar 4.29 *Film* cair pada bagian atas evaporator



Gambar 4.30 *Film* cair pada area kanan kondensor



Gambar 4.31 *Film* cair pada area kiri kondensor

- *Flow Regim* pada Evaporator dan Kondensor



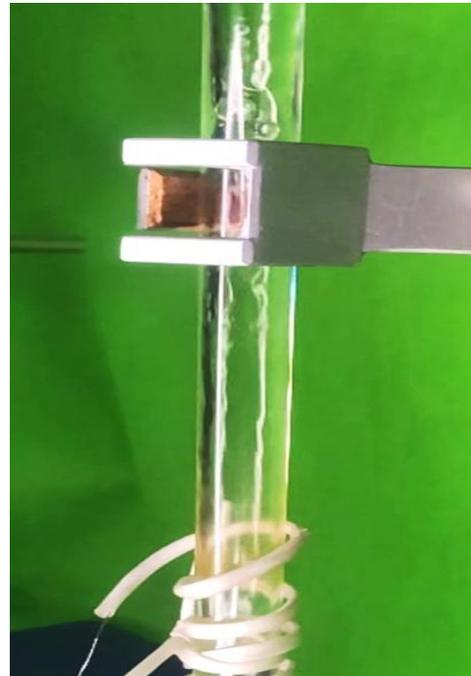
Gambar 4.32 *Bubble flow*
(30-50 W)



Gambar 4.33 *Slug to annular flow*
(70-110)



Gambar 4.44 *Churn flow*
(70-110W)

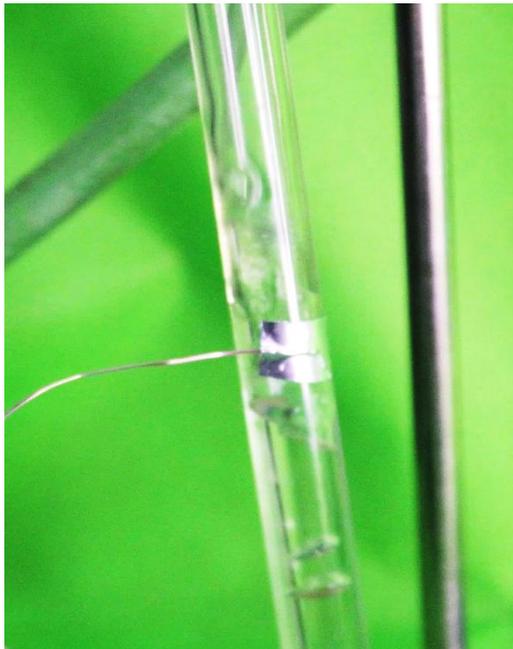


Gambar 4.45 *Annular to churn flow*
(70-110W)



Gambar 4.46 *Mist flow* (70-110)

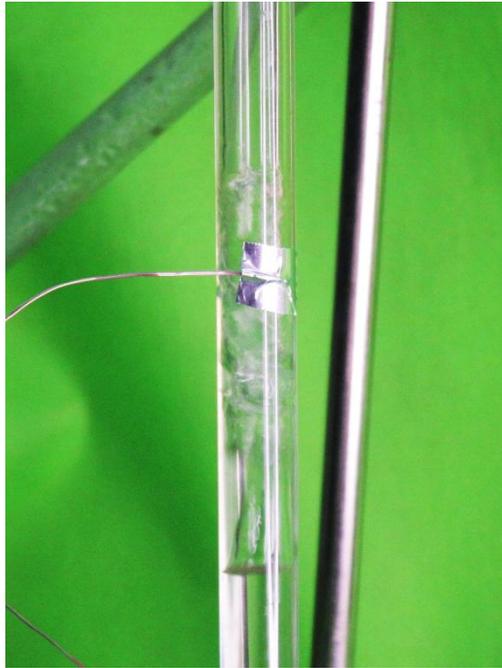
- *Flow regim* pada kondensor



Gambar 4.47 *Bubble flow* (30-50 W)



Gambar 4.48 *Churn flow* (30-50 W)



Gambar 4.49 *Churn flow* (30-50 W)

4.3.2 Analisis Visual Observation

Berdasarkan hasil observasi visual yang dilakukan, proses terbentuknya uap (*nucleate boiling*) pada *filling ratio* 65% terjadi lebih aktif dan kontinyu serta menghasilkan uap panas dengan kapasitas yang besar dibandingkan dengan *filling ratio* 45% dan 55%, dimana secara visual, *film* cair terbentuk tebal dan menempel pada hampir seluruh permukaan dinding evaporator dan kondensor. Tetapi film cair tersebut hanya terbentuk pada area tertentu dari kondensor yaitu pada area inlet dan outlet. Hal ini menunjukkan perpindahan panas yang tidak efektif dimana kondensor tidak mampu mengembunkan uap dengan cepat sehingga dengan volume fluida cair yang besar menghasilkan gelembung-gelembung uap / *bubble flow* yang besar pula dan dengan input beban kalor yang kontinyu, gelembung kecil tersebut akan semakin banyak dan membentuk gelembung besar yang dinamakan pola aliran *slug*. Dalam kondisi ini, terjadi penumpukan tekanan didalam cairan evaporator yang semakin lama akan menumpuk dan pada waktu tertentu akan meledak sebagai *geyser boiling*.

Melalui ledakan tersebut, cairan dan uap panas akan bergerak ke atas melewati kondensor dan jatuh pada area downcomer. Cairan beserta uap tersebut kembali bergerak dan membentuk pola aliran *bubble* serta *slug* yang mengindikasikan terjadinya ketidakstabilan yaitu *reverse flow*. Siklus ini terjadi intens pada beban kalor rendah yaitu 30 W, 50 W dan 70 W. Namun, *geyser boiling* yang terjadi terus menyapu semua *film* cair yang terbentuk pada dinding evaporator maupun kondensor sehingga pada fenomena selanjutnya, *film* cair menjadi lebih tipis dan hanya terbentuk di beberapa area tertentu, terutama di bagian atas evaporator dan dekat *inlet* kondensor. Kondisi ini menyebabkan intensitas dan frekuensi pola aliran pada evaporator dan *downcomer* semakin kecil tetapi tetap terjadi fluktuasi tekanan kuat yang memicu terjadinya *density wave oscillation* diikuti *reverse flow* dengan seiring bertambahnya beban kalor 90 W dan 110 W.

Siklus ini akan berulang yang menyebabkan kinerja sistem menjadi sangat buruk. Fenomena perubahan fasa, pola aliran yang terbentuk, dan ketidakstabilan aliran tersebut dapat dilihat pada video dengan link yang tertera pada lampiran.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

1. Instalasi visualisasi aliran pada sistem TPLT telah berhasil dibangun dan dioperasikan. Prototipe berbahan kaca borosilika yang dilengkapi dengan kamera berkecepatan tinggi dan sensor termokopel terbukti efektif untuk mengamati secara langsung fenomena perubahan fasa, pola aliran, dan ketidakstabilan yang terjadi di dalam loop, serta mengukur respon termalnya.
2. *Filling ratio* 45% menghasilkan operasi sistem yang sangat tidak stabil. Kondisi ini ditandai dengan fluktuasi temperatur yang ekstrem pada evaporator, terjadinya fenomena *geyser boiling* dan *density wave oscillation*, serta indikasi kekeringan (*dryout*) parsial yang terlihat dari film cair yang sangat tipis. Hal ini menyebabkan hambatan termal yang tinggi dan kinerja pendinginan yang buruk. Peningkatan *filling ratio* menjadi 55% dan 65% secara drastis meningkatkan stabilitas termal sistem. Volume fluida kerja yang besar bertindak sebagai *penyangga termal (thermal buffer)* yang meredam fluktuasi suhu, mencegah terjadinya *dryout*, dan menghasilkan respon suhu yang stabil. Namun demikian, *filling ratio* 55% dan 65% yang lebih tinggi mengorbankan efisiensi perpindahan panas puncak (karena adanya hambatan dari film cair tebal dan aliran di *downcomer*) untuk mendapatkan stabilitas operasi yang sangat baik, yang merupakan aspek krusial untuk aplikasi praktis seperti pendinginan baterai kendaraan listrik.

5.2 SARAN

1. Meskipun loop kaca borosilikat telah digunakan untuk visualisasi, permukaannya yang sangat halus dan reflektif menyulitkan identifikasi detail pola aliran. Oleh karena itu, untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk menggunakan evaporator dengan permukaan yang

dibuat kasar atau memiliki struktur mikro. Modifikasi ini bertujuan untuk meningkatkan kontras visual sehingga fenomena perubahan fasa dan pembentukan serta transisi pola aliran dapat diamati secara lebih jelas dan mendetail.

2. Disarankan untuk melakukan penelitian dengan variasi filling ratio yang lebih rapat (misalnya 50%, 60%, 70%) untuk menemukan titik optimal yang memberikan keseimbangan terbaik antara stabilitas termal dan efisiensi perpindahan panas.
3. Disarankan untuk memperbesar diameter evaporator pada *riser* dan menambahkan *bypass* sebagai saluran yang mencegah adanya penumpukan uap pada evaporator untuk memperoleh karakteristik aliran dua fasa yang lebih stabil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Doughty and E. P. Roth, "A general discussion of Li Ion battery safety," *Electrochemical Society Interface*, vol. 21, no. 2, pp. 37–44, 2012, doi: 10.1149/2.F03122if.
- [2] S. Palokangas, "BATTERY CELL FIRE DETECTION AND SUPPRESSION SYSTEM," 2022.
- [3] T. Wan and Y. Wang, "The Hazards of Electric Car Batteries and Their Recycling," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1011, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/1011/1/012026.
- [4] Marcia Barbosa Henriques Mantelli, "Thermosyphons and Heat Pipes: Theory and Applications," p. 111, 2020.
- [5] T. Zhang, J. Qu, and Y. Hua, "Heat transfer characteristics and operational visualization of two-phase loop thermosyphon," *Appl Therm Eng*, vol. 228, no. April, p. 120520, 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120520.
- [6] C. Zhao, X. Yuan, J. Long, L. Jin, and B. Guan, "Investigation of heat transfer and flow characteristics in two-phase loop thermosyphon by visualization experiments and CFD simulations," pp. 1–20, 2025.
- [7] H. A. Muhammad, "Kaji eksperimental kinerja multi evaporator loop thermosyphon untuk pendinginan baterai," 2022, [Online]. Available: <https://repository.unpas.ac.id/62502/>
- [8] A. Suryadeva, "Perancangan dan Analisis Kinerja Multi Evaporator Loop Thermosyphon Untuk Pendingin Baterai Design and Performance Analysis of Multi-Evaporator Loop Thermosyphon for Battery Cooling," 2024.
- [9] R. Maulana, "Kaji eksperimental single condenser two-phase loop thermosyphon Experimental study of single condenser two-phase loop thermosyphon," 2025.
- [10] F. Mutia, "Kaji eksperimental dual condenser two-phase loop thermosyphon," 2025.
- [11] F. Razi, "Kaji eksperimental single condenser two-phase loop thermosyphon dengan mechanical excitation," 2025, [Online]. Available: <http://repository.unpas.ac.id/39229/>

- [12] N. Aldi, “Termosifon dua fase dengan multi evaporator multi evaporator two-phase loop thermosyphon,” 2024, [Online]. Available: <http://repository.unpas.ac.id/id/eprint/71002>
- [13] R. Khodabandeh and R. Furberg, “Instability, heat transfer and flow regime in a two-phase flow thermosyphon loop at different diameter evaporator channel,” *Appl Therm Eng*, vol. 30, no. 10, pp. 1107–1114, 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.01.024.
- [14] S. Vasiljević, B. Aleksandrović, J. Glišović, and M. Maslač, “Regenerative braking on electric vehicles: working principles and benefits of application,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1271, no. 1, p. 012025, 2022, doi: 10.1088/1757-899x/1271/1/012025.
- [15] R. Sarode and A. Eadke, “Electric Vehicle (Construction and Working principle),” *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 7, no. 10, pp. 140–142, 2020.
- [16] B. Gnörich and L. Eckstein, “Battery Electric Vehicles,” *Fuel Cells: Data, Facts, and Figures*, pp. 1–11, 2016, doi: 10.1002/9783527693924.ch01.
- [17] S. Muslimin, Z. Nawawi, B. Y. Suprpto, and T. Dewi, “Comparison of Batteries Used in Electrical Vehicles,” *Proceedings of the 5th FIRST T1 T2 2021 International Conference (FIRST-T1-T2 2021)*, vol. 9, pp. 421–425, 2022, doi: 10.2991/ahe.k.220205.074.
- [18] C. Iclodean, B. Varga, N. Burnete, D. Cimerdean, and B. Jurchiș, “Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 252, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/252/1/012058.
- [19] A. Maiorino, C. Cilenti, F. Petruzzello, and C. Aprea, “A review on thermal management of battery packs for electric vehicles,” *Appl Therm Eng*, vol. 238, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.122035.
- [20] D. C. a Foo Shen Hwang a,*, Thomas Confrey a, Colin Reidy b, Dorel Picovici a and C. N. David Culliton a, “Review of battery thermal management systems in electric vehicles”.
- [21] C. Essl *et al.*, “Comprehensive hazard analysis of failing automotive lithium-ion batteries in overtemperature experiments,” *Batteries*, vol. 6, no. 2, 2020, doi: 10.3390/batteries6020030.
- [22] R. Ranjith Kumar, C. Bharatiraja, K. Udhayakumar, S. Devakirubakaran, K. S. Sekar, and L. Mihet-Popa, “Advances in Batteries, Battery Modeling, Battery

Management System, Battery Thermal Management, SOC, SOH, and Charge/Discharge Characteristics in EV Applications,” *IEEE Access*, vol. 11, no. October, pp. 105761–105809, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3318121.

- [23] K. W. E. Cheng, B. P. Divakar, H. Wu, K. Ding, and H. F. Ho, “Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 60, no. 1, pp. 76–88, 2011, doi: 10.1109/TVT.2010.2089647.
- [24] H. A. Gabbar, A. M. Othman, and M. R. Abdussami, “Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards,” *Technologies (Basel)*, vol. 9, no. 2, 2021, doi: 10.3390/technologies9020028.
- [25] A. Franco and S. Filippeschi, “Closed loop two-phase thermosyphon of small dimensions: A review of the experimental results,” *Microgravity Sci Technol*, vol. 24, no. 3, pp. 165–179, 2012, doi: 10.1007/s12217-011-9281-6.
- [26] H. Cao, T. Ding, Z. He, and Z. Li, “A new idea of the flow model applied to a two-phase loop thermosyphon,” *Energy Proceedings*, vol. 11, pp. 1–5, 2020, doi: 10.46855/energy-proceedings-7280.
- [27] C. C. J. Vincent and J. B. W. Kok, “Investigation of the overall transient performance of the industrial two-phase closed loop thermosyphon,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 35, no. 6, pp. 1419–1426, 1992, doi: 10.1016/0017-9310(92)90033-O.
- [28] M. C. Tsai, S. W. Kang, H. Y. Li, and W. F. Tsai, “Operation of a two-phase reverse loop thermosyphon,” *Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 259–264, 2015, doi: 10.6180/jase.2015.18.3.06.
- [29] H. Yao *et al.*, “Characteristics of phase-change flow and heat transfer in loop thermosyphon: Three-dimension CFD modeling and experimentation,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 35, no. April, p. 102070, 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.102070.
- [30] M. M. Awad and Y. S. Muzychka, “A simple two-phase frictional multiplier calculation method,” in *Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, IPC*, vol. 1, 2004, pp. 475–483. doi: 10.1115/ipc2004-0721.
- [31] Grey F natterer, *Advanced Heat Transfer*. 2021.
- [32] A. J. Ghajar, “Non-boiling heat transfer in gas-liquid flow in pipes - A tutorial,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 27, no. 1, pp. 46–73, 2005, doi: 10.1590/S1678-58782005000100004.

- [33] C. E. Brennen, *Introduction to Multiphase Flow*. 2014. doi: 10.1017/cbo9780511807169.002.
- [34] L. Cheng, G. Ribatski, and J. R. Thome, “Two-phase flow patterns and flow-pattern maps: Fundamentals and applications,” *Appl Mech Rev*, vol. 61, no. 1–6, pp. 0508021–05080228, 2008, doi: 10.1115/1.2955990.
- [35] V. D. Hatamipour and M. A. Akhavan-Behabadi, “Visual study on flow patterns and heat transfer during convective boiling inside horizontal smooth and microfin tubes,” *World Acad Sci Eng Technol*, vol. 45, no. 9, pp. 701–707, 2010.
- [36] BOURE JA, BERGLES AE, and TONG LS, “Review of Two-Phase Flow Instability,” *ASME Pap*, 1971.
- [37] S. Kakac and B. Bon, “A Review of two-phase flow dynamic instabilities in tube boiling systems,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 51, no. 3–4, pp. 399–433, 2008, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.09.026.
- [38] M. Ishii, “Study on Flow Instabilities in Two-Phase Flow Mixtures,” *Report ANL-76-23, Argonne National Laboratory*, 1976.