

## PENGEMBANGAN FASILITAS EKSPERIMEN POOL DAN FLOW BOILING UNTUK MEMPELAJARI PERFORMA DAN FENOMENA HEAT TRANSFER PADA BERAGAM FLUIDA DAN MATERIAL

Ignatius Yan Rosario<sup>1</sup>, Pradhana Adhi Prasadha Mahardhika<sup>2</sup>, Indro Pranoto<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

e-mail: <sup>1</sup>ignatiusyan91@mail.ugm.ac.id, <sup>2</sup>pradhana.adhi@mail.ugm.ac.id, <sup>3</sup>indro.pranoto@ugm.ac.id

### ABSTRACT

Thermal management system recently is needed in many human aspect especially technology development. The technology is improved to be faster and can handle huge work load with massive heat which is produced by the system. In poor thermal management scheme, the generated heat is able to reduce the product durability and even cause failure of the product. Study of the performance and phenomenon has been conducted with a lot of variation of fluid and material in pool or flow boiling system. This study focuses on development of pool and flow boiling facility that can capture various variables which are needed to conclude the heat transfer characteristic and performance.

Both design of pool and flow boiling facility uses evaporation and condensation area in each system. Boiling observation area is in the evaporation area and made from aluminum. The condenser and the heater housing are made from cooper. Aluminum and cooper are considered as good thermal conductivity material. This facility has optimal surface temperature under critical heat flux based on boiling curve reason. It is designed to present pressure, temperature, and bubble image data with adjustment on power input and fluid flow rate (for flow boiling). The experimental facilities can be used to investigate the boiling heat transfer performance and observe the pool and flow boiling phenomena. The experimental study to obtain boiling curve, pressure drop, correlation of heat transfer coefficient, and some boiling heat transfer correlations from different materials and working fluids can be conducted.

**Keywords :** boiling facility, boiling phenomena, flow boiling, heat transfer coefficient, pool boiling, thermal management,.

### INTISARI

Akhir-akhir ini perkembangan teknologi menuntut adanya rekayasa termal yang baik. Beberapa fasilitas yang diciptakan mampu bekerja lebih cepat dan juga mampu menangani beban kerja yang besar yang pada akhirnya menghasilkan kalor yang besar. Pada kondisi ini, ketahanan produk dapat menurun bahkan dapat mengakibatkan kerusakan pada produk. Pada penelitian lainnya telah dipelajari performa dan fenomena pendidihan pada berbagai jenis fluida dan material pada sistem pool dan flow boiling. Penelitian ini sendiri berfokus pada pengembangan fasilitas pool dan flow boiling yang mampu mengamati berbagai variable yang berhubungan dengan karakteristik dan performa transfer kalor.

Pada fasilitas penelitian ini, keduanya terdapat area evaporasi dan kondensasi. Pengamat pendidihan dilakukan pada area evaporasi yang terbuat dari alumunium. Sedangkan, area kondensasi dan rumah heater dibuat dari tembaga. Kedua jenis material ini digunakan karena mempunyai konduktivitas termal yang baik. Untuk pengoperasian alat ini, temperatur permukaan optimal adalah di bawah temperatur critical. Kondisi ini dibatasi karena menyesuaikan kurva boiling dimana setelah melewati temperature critical, terjadi lonjakan temperatur yang signifikan. Fasilitas penelitian ini dapat digunakan untuk mempelajari performa transfer kalor dan mengamati fenomena pool dan flow boiling. Hasil pengolahan data yang dapat ditampilkan adalah kurva boiling, pressure drop, korelasi heat transfer coefficient, dan beberapa korelasi lain dari berbagai material dan fluida kerja.

**Kata kunci :** fasilitas boiling, fenomena boiling, flow boiling, koefisien transfer kalor, pool boiling, thermal management.

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi dari masa ke masa mengalami kemajuan yang sangat signifikan dan tidak terduga. Mesin-mesin baru diciptakan dan makin disempurnakan untuk dapat memenuhi kebutuhan manusia. Demi mendapatkan performa yang lebih baik tersebut, beberapa mesin membutuhkan energi yang lebih banyak baik itu energi listrik maupun kimia. Sebagai dampak dari penggunaan energi yang besar ini, panas yang dihasilkan juga besar. Performa mesin kemudian sangat bergantung pada kemampuan untuk menjaga temperatur pada batas optimalnya dan membuang panas yang tidak digunakan. Diharapkan mesin-mesin ini dapat bekerja

dengan maksimal, memiliki efisiensi tinggi, dan tahan lama. Penelitian mengenai *pool* dan *flow boiling heat transfer* diharapkan mampu menjadi solusi pada masalah *thermal management* dengan mengetahui karakteristik *boiling* yang terjadi. Sedangkan, untuk batasan masalah dibatasi pada pembuatan dan pengembangan fasilitas penelitian *pool* dan *flow boiling*.

Karakteristik *boiling* dapat dilihat dari beberapa parameter yang meliputi: *heat flux*,  $\Delta T_{excess}$ , *heat transfer coefficient*, dan *pressure drop*. Besarnya *heat flux* ( $q''$ ) dipengaruhi oleh besarnya kalor yang diterima oleh elemen pemanas ( $Q$ ) dan luas permukaan elemen pemanas ( $A_s$ ).  $Q$  yang diterima juga dapat dihitung dari voltase listrik *heater* ( $V$ ) dan kuat arusnya ( $I$ ). Dengan demikian, dapat dirumuskan dalam Persamaan (1).

$$q'' = \frac{Q}{A_s} = \frac{V \times I}{A_s} \quad (1)$$

Untuk  $\Delta T_{excess}$ , merupakan selisih antara temperatur permukaan dinding aktual ( $T_s$ ) dengan temperatur saturasi ( $T_{sat}$ ) dari fluida kerja yang digunakan. Sesuai dengan Persamaan (2).

$$\Delta T_{excess} = T_s - T_{sat} \quad (2)$$

Sedangkan,  $T_s$  dipengaruhi oleh temperatur dinding terbaca ( $T_w$ ), daya kalor yang digunakan ( $\dot{q}$ ), selisih panjang total batang pemanas dengan panjang batang pemanas pada titik pembacaan ( $L_s - L_w$ ), konduktivitas thermal material ( $k$ ), dan luas permukaan perpindahan kalor ( $A_s$ ). Yang kemudian dirumuskan ke dalam Persamaan (3).

$$T_s = T_w - \dot{q}(L_s - L_w)/kA_s \quad (3)$$

Untuk *boiling heat transfer coefficient* ( $h$ ) sesuai Persamaan (4), dipengaruhi *heat flux* ( $q''$ ) dan  $\Delta T_{excess}$ .

$$h = q''/\Delta T_{excess} \quad (4)$$

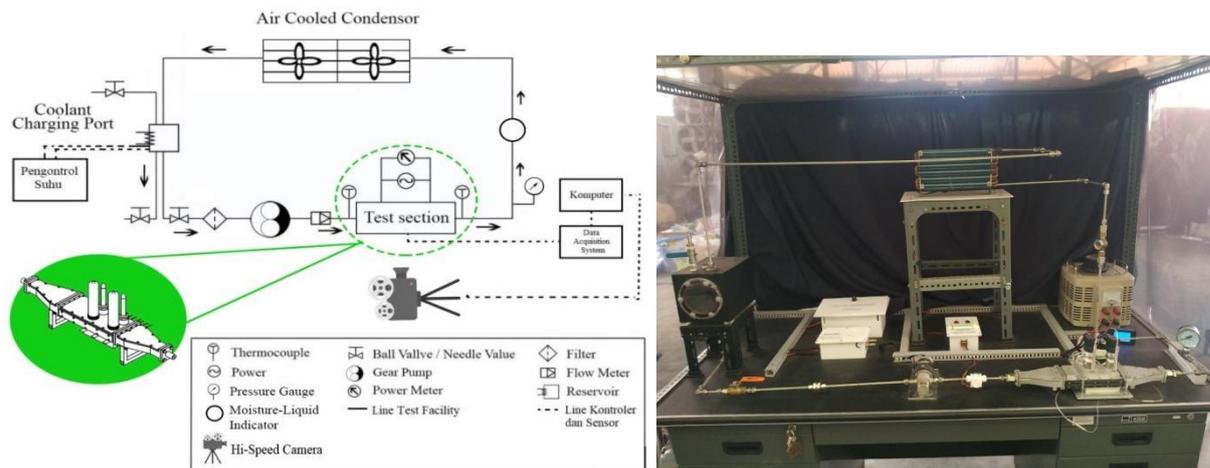
Pada pengamatan fenomena *boiling*, dapat digunakan dua sistem dengan karakteristik masing-masing yang meliputi *flow* dan *pool boiling*. Pada *flow boiling*, terdapat aliran fluida di dalam sistem. Sedangkan, pada *pool boiling* tidak ada aliran fluida kecuali saat terjadinya *free convection* saat proses *boiling* di dalam sistem. Dalam perancangan alat uji *flow dan pool boiling*, secara garis besar terdiri dari dua bagian utama yaitu: kondensor dan evaporator. Penelitian *flow boiling* yang dilakukan Lee dan Mudawar (2008) mengacu pada konsep tersebut. Pada alat yang mereka buat, terdapat juga *reservoir* yang digunakan sebagai penampung fluida agar *supply* aliran lancar. Selain itu, digunakan pompa sebagai pendorong aliran dan filter sebagai penyaring partikel-partikel pada fluida. Penelitian-penelitian lain menggunakan sistem yang sama dimana terdapat bagian evaporator, kondensor, reservoir, pompa, dan filter.

Dari konsep tersebut, perbedaan antar peneliti terdapat di bagian evaporator yang merupakan tempat pengamatan fenomena *boiling*. Desain yang dibuat menyesuaikan kebutuhan pengamatan dari masing-masing peneliti. Penelitian Lee dan Mudawar (2008) mengamati fenomena micro channel dan angle pengamatan dari atas. Begitu juga dengan penelitian Falsetti dkk. (2018) yang melakukan pengamatan dari sudut yang sama. Keduanya juga menerapkan konsep inline pada aliran inlet dan outletnya. Yang membedakan keduanya adalah ukuran spesimen benda uji yang akan diamati. Berbeda dengan McNeil dkk. (2010), desain alat uji yang dibuat menggunakan model  $T$  pada inlet dan outlet aliran. Dari ketiga peneliti, penempatan sensor temperatur dan tekanan adalah di bagian inlet dan outlet aliran untuk mengetahui perbedaan diantara kedua posisi tersebut.

Pada desain *pool boiling*, garis besar desain yang digunakan juga memiliki kemiripan. Berbentuk sebuah *chamber* pengamatan dimana di dalamnya terdapat bagian *heater* dan *heat sink*. Salah satu desain adalah dari penelitian Pranoto, dkk. (2012). Material yang digunakan adalah aluminium sebagai konstruksi utama. Pada bagian *heater* digunakan tembaga. Ditempatkan juga beberapa sensor yaitu *thermocouple* dan *pressure transducer*. Penempatan *thermocouple* ada di bagian *heater* dan di dalam *chamber*.

## 2. METODE PENELITIAN

Proses awal yang dilakukan adalah desain alat uji *flow* dan *pool boiling* dengan referensi desain penelitian lainnya. Gambar 1 merupakan skema rancangan *flow boiling* yang telah dibuat. Dimensi masing-masing bagian alat rancangan dapat dilihat pada Tabel 1. Bagian utama dari sistem ini menggunakan prinsip kerja alat penukar kalor yang terdiri dari evaporator dan kondensor dengan reservoir sebagai pengatur aliran fluida. Pada bagian evaporator, terdapat sumber panas (4 buah *immersion heater*), 6 buah *thermocouple*, dan 2 buah *pressure transducer*. Sumber panas memanaskan bagian ini dan mengakibatkan terjadinya evaporasi fluida di dalam evaporator. Di bagian ini terjadi *boiling* dan dilakukan pengamatan terhadap temperatur, tekanan, dan visual.



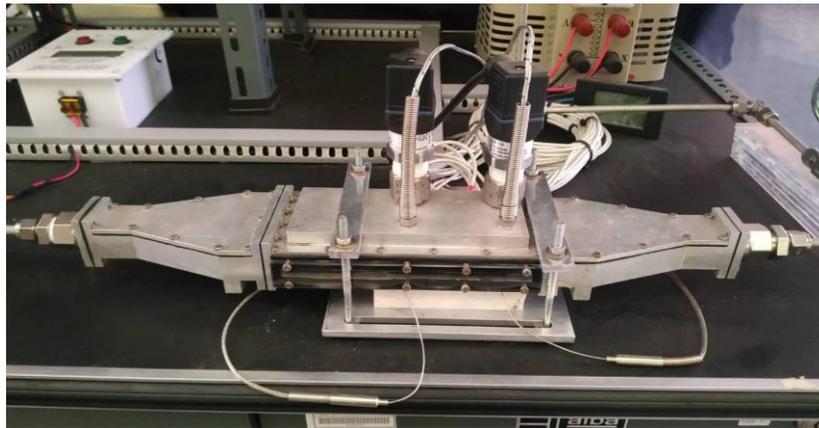
Gambar 1. Skema dan Foto Fasilitas Uji *Flow Boiling*

Aliran kalor kemudian meninggalkan evaporator dan masuk ke bagian kondensor. Di bagian kondensor, fluida panas tersebut mengalir melalui pipa berliku dan didinginkan menggunakan dua buah kipas. Outputnya adalah fluida dengan temperature rendah yang kemudian ditampung di bagian reservoir. Bagian reservoir ini berguna sebagai penampung fluida agar *supply* fluida di dalam sistem tetap terjaga. Dari bagian ini kemudian fluida kembali masuk ke dalam evaporator. Terdapat juga filter untuk menyaring *debris* dan pompa untuk mensuplai aliran sebelum masuk ke bagian evaporator. Pengamatan fenomena *boiling* dilakukan pada bagian evaporator yang dilengkapi *heater* sebagai sumber panas, sensor tekanan dan temperatur sesuai Gambar 2. Detail sensor dan instrumentasi yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Dimensi Fasilitas Eksperimen Pool dan Flow Boiling

Pool Boiling		
Komponen	Parameter	Nilai
<i>Heater</i>	Diameter	15 mm
	Panjang	50 mm
	Daya	300 W
<i>Heating Base</i>	Panjang	100 mm
	Lebar	100 mm
	Tinggi	50 mm
<i>Boiling Chamber</i>	Panjang	100 mm
	Lebar	100 mm
	Volume	549,2 cm <sup>3</sup>
<i>Condenser</i>	Diameter <i>Coil</i>	3 mm
	<i>Pitch</i>	3,2 mm
	Tinggi	50 mm
	Luas Permukaan	140,1 cm <sup>2</sup>
<i>Base Insulation Layer</i>	Panjang	70 mm
	Lebar	70 mm
	Tinggi	60 mm
<i>Evaporator</i>	Panjang	35 mm
	Lebar	35 mm
	Tinggi	58 mm

Flow Boiling		
Komponen	Parameter	Nilai (mm)
<b>Evaporator</b>	Panjang terluar	454
	Lebar terluar	74
	Tinggi terluar	48
	Lebar Kanal	60
	Tinggi Kanal	18
	Diameter dalam pipa in/out	6,35
	Diameter luar pipa in/out	13
<b>Blok Heater dan Insulator</b>	Panjang blok <i>heater</i>	82
	Lebar blok <i>heater</i>	60
	Tinggi Blok <i>Heater</i>	13
	Tinggi insulator	20
	Tebal insulator	10
<i>Heater cartridge</i>	Diameter	10
	Panjang	50
	Jumlah	7 buah
<b>Reservoir</b>	Panjang	21
	Lebar	15
	Tinggi	15
	Diameter saluran	13
<b>Pompa</b>	Diameter luar in/out	3,175

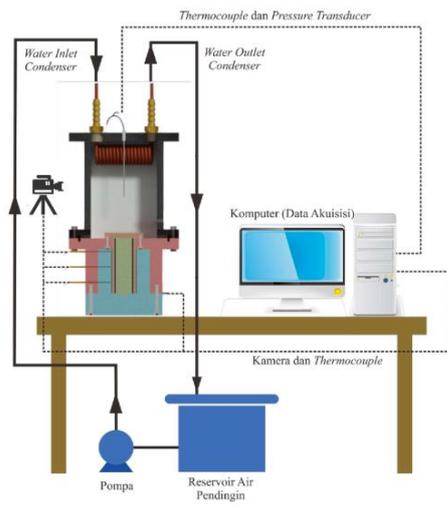


Gambar 2. Evaporator Flow Boiling

Tabel 2. Instrumentasi Alat

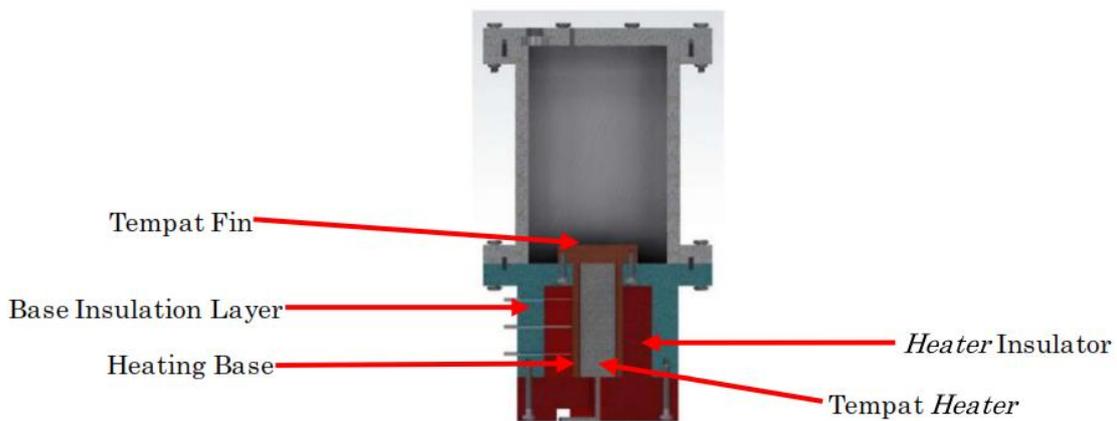
Instrumentasi	Komponen	Jumlah (Pool)	Jumlah (Flow)
Pressure Transducer	Power Supply 24V/5A	1	1
	Transducer 4-20 mA to 0-10 V	2	2
	Pressure Transducer Wika model A-10	1	2
Pump Controller	Power Supply 12V/5A	1	1
	PWM Driver 10 A	1	1
DAQ Station	NI-DAQ USB 6008	2	2
	Thermocouple Amplifier Adafruit AD 8495	7	6
	USB hub	1	1
Power Source	Variable Transformer 1 kVA	1	1
	AC Power Meter	1	1
Thermocouple	Thermocouple Wire Stainless Steel dia. 1 mm	5	4
	Thermocouple Probe Stainless Steel dia. 5 mm	2	2

Selanjutnya, skema rancangan pool boiling dapat dilihat pada Gambar 3 dengan dimensi yang digunakan seperti tersaji pada Tabel 1. Pada pool boiling, terdiri dari berbagai komponen diantaranya: *boiling chamber*, *condenser*, *evaporator*, dan komponen elektronik pendukung. *Boiling chamber* berfungsi sebagai wadah fluida kerja yang terbuat dari aluminium. *Evaporator* pada alat penelitian ini adalah *cartridge heater* yang diselubungi material tembaga. Pada bagian ini, input panas masuk dan mengubah fasa fluida cair menjadi fasa uap. *Condenser* bertindak untuk mengubah fasa uap fluida kerja di dalam *chamber* kembali menjadi cairan. *Condenser* berupa *coil* yang di dalamnya mengalir cairan pendingin yang didorong oleh pompa. Untuk komponen elektronis pendukung berupa sensor tekanan, sensor temperatur, dan data acquisition yang dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 3. Skema dan Foto Fasilitas Uji Pool Boiling

Pada bagian evaporator seperti pada Gambar 4, terdapat *base insulation layer*, *heater*, *heater insulator*, dan *heating base*. *Base insulation layer* juga terbuat dari teflon yang berfungsi sebagai fondasi utama alat *pool boiling*. *Heater insulator* berguna untuk mengurangi rugi kalor akibat terbuangnya kalor ke lingkungan dan terbuat dari material teflon. *Heating base* bertindak sebagai insulator dari *heater* yang ada di dalamnya dan juga terbuat dari teflon. Hasil desain tersebut kemudian dimanufaktur dan dirangkai. Bagian yang perlu juga mendapat perhatian adalah bagian instrumentasi elektronis. Penyesuaian perlu dilakukan agar mendapat data yang valid dan benar seperti menambahkan bagian elektronis tambahan untuk membantu pembacaan data. Salah satunya adalah data acquisition (daq). Digunakan daq dari National Instrumen dengan *software* Lab View sebagai user interface.



Gambar 4. Bagian Evaporator Pool Boiling

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk memastikan fasilitas eksperimen pool dan flow boiling bekerja dengan baik, telah dilakukan pra pengujian yang meliputi uji kebocoran, kalibrasi sensor, dan pengujian pengambilan data. Semua telah sesuai parameter yang ditentukan. Pemilihan fluida juga telah dilakukan dengan mempertimbangan *boiling point* yang lebih rendah dari 100 °C. Fluida kerja yang digunakan adalah 3M Novec HFE-7100. Penelitian akan dilakukan pada kondisi *sub-cooled* dimana temperatur fluida kerja di bawah temperatur saturasinya. Range pengambilan data temperatur adalah dibawah temperatur *critical* dari fluida yang dipakai. Penelitian yang dilakukan akan menghasilkan *boiling curve* dengan beberapa parameter yang dapat dilihat meliputi: *heat flux*,  $\Delta T_{\text{excess}}$ , *heat transfer coefficient*, dan *pressure drop*.

#### 3.1 Flow Boiling

Dalam perancangan sistem *flow boiling*, bagian *reservoir* memiliki peranan penting dalam mengatur kelancaran aliran. Bagian ini menampung fluida kerja sebelum memasuki evaporator. Pada sistem yang digunakan, terjadi perpindahan kalor di bagian evaporator dan kondensor. Jika kalor masuk dan keluar tidak

seimbang, dimungkinkan di dalam sistem akan banyak mengalir aliran dua fasa dan menghambat kelancaran aliran. Disinilah peran penting reservoir agar fluida yang melewati pompa berbentuk cair.

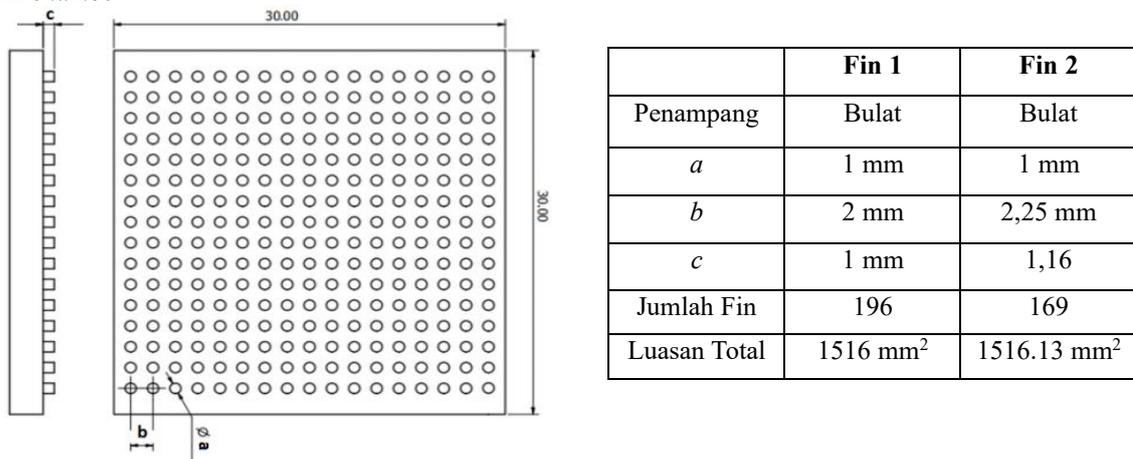
Hal lain yang juga perlu diperhatikan adalah penempatan sensor-sensor yang mendukung pengamatan. Pada flow boiling, perlu ditempatkan sensor pada bagian inlet dan bagian outlet. Kedua bagian ini adalah bagian sebelum dan sesudah melewati sumber panas. Gradien temperatur yang terjadi akan banyak mempengaruhi fenomena *boiling* yang terjadi juga. Bagian lain yang perlu diamati adalah bagian *heater* dan perlu ditempatkan *thermocouple* pada bagian ini. Tujuannya adalah untuk mengetahui besar kalor yang masuk ke dalam sistem.

### 3.2 Pool Boiling

Desain *pool boiling* lebih sederhana dibandingkan *flow boiling*. Terdiri dari sebuah *chamber* dengan *heater* dan kondensor pendingin di dalamnya. Adanya *coil condenser* membantu menjaga temperatur uap yang dihasilkan dari pendidihan dan dapat kembali berubah fasa menjadi cair dan sistem tidak kehabisan fluida kerja. Saat dinyalakan, temperatur uap di bagian atas *chamber* tidak mengalami kenaikan temperatur. Sensor-sensor ditempatkan di bagian *heater* dan di dalam *chamber*. Karena terdapat fluida kerja cair dan tidak memenuhi *chamber*, sensor ditempatkan di bagian yang tertutup fluida cair dan satu sensor lainnya di bagian atas untuk mengetahui temperatur uap yang dihasilkan.

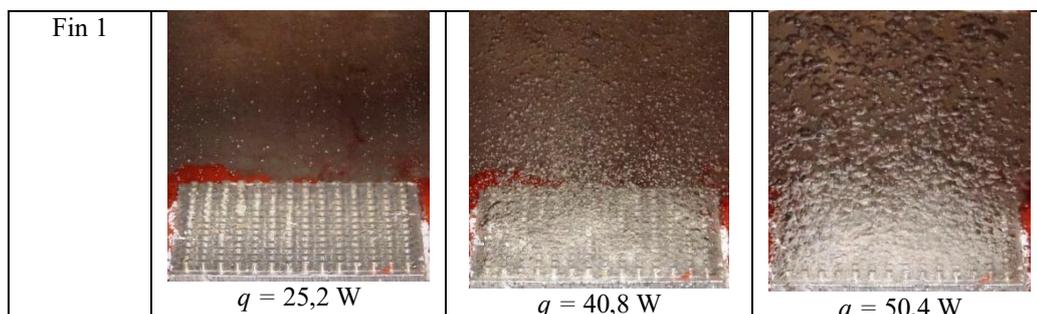
### 3.3 Pengujian pada Pool Boiling

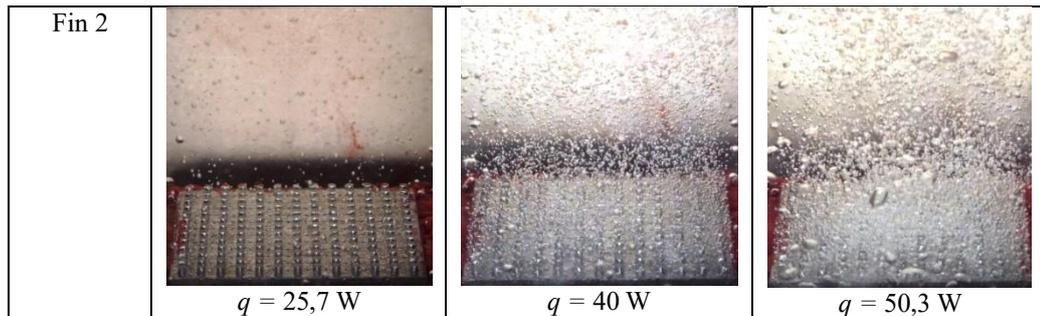
Pada pengambilan data, digunakan dua jenis fin. Material fin adalah aluminium dengan heater menggunakan tembaga. Dimensi fin dapat dilihat pada Gambar 5. Daya listrik yang digunakan adalah 10-50 W dengan interval 5 W. Temperatur permukaan maksimal dibatasi dibawah 100°C. Pengambilan data dilakukan pada kondisi *steady* dengan rentang waktu 30 menit dari alat mulai bekerja awal dan rentang waktu 5 menit untuk tiap pergantian daya listrik. Fluida kerja yang digunakan adalah HFE 7100 dengan tinggi fluida 5 cm di dalam *chamber*.



Gambar 5. Dimensi Pin Fin

Dalam pengujian, dapat dilihat fenomena *bubble* yang terjadi pada Gambar 6,. Pada daya rendah, temperatur permukaan masih lebih rendah dari temperatur saturasi fluida kerja dan tidak terbentuk *bubble*. Zona ini berupa *free convection*. Pada fin 2, terbentuk pada daya 20,6 W atau *heat flux* 13,6 kW/m<sup>2</sup> dengan temperatur permukaan 61,39 °C. Pada zona ini, temperatur permukaan sudah melebihi temperatur saturasi fluida dan belum terbentuk *bubble*. Nampak terbentuk aliran fluida panas di dalam *chamber*. Fenomena yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 7.





Gambar 6. Fenomena Pendidihan pada Fin 1 dan Fin 2 dengan Variasi  $q$



Gambar 7. Fenomena Aliran Fluida pada *Free Convection Boiling*

Seiring pertambahan daya listrik, sistem memasuki *nucleate boiling*. Pada Fin 1, *onset of nucleate boiling* terjadi pada  $q = 25,2 \text{ W}$  atau  $q'' = 16,6 \text{ kW/m}^2$  dengan temperatur permukaan  $61,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pada Fin 2, terjadi pada  $q = 25,7 \text{ W}$  atau  $q'' = 16,9 \text{ kW/m}^2$  dengan temperatur permukaan  $70,9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Selisih temperature antara Fin 1 dan Fin 2 sebesar  $9,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Fenomena yang terjadi adalah mulai terbentuk *bubble* pada beberapa titik. Pada pengamatan, titik nukleasi atau permulaan munculnya *bubble* terjadi di bagian batang fin dan dapat dilihat pada Gambar 8. Semakin banyak batang fin yang dimiliki fin tersebut, semakin banyak titik nukleasinya. Kondisi ini kemudian meningkatkan *heat transfer coefficient* sehingga temperatur yang dihasilkan lebih rendah pada fin 1 yang memiliki lebih banyak batang fin.

Daya listrik kemudian dinaikan dan *bubble* yang terbentuk juga makin banyak. Pada Fin 1 dan  $q = 40,8 \text{ W}$  atau  $q'' = 26,9 \text{ kW/m}^2$ , temperatur permukaan sebesar  $80,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pada Fin 2 dan  $q = 40 \text{ W}$  atau  $q'' = 26,4 \text{ kW/m}^2$ , temperatur permukaan sebesar  $82,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pada Fin 1 dan  $q = 50,4 \text{ W}$  atau  $q'' = 33,2 \text{ kW/m}^2$ , temperatur permukaan sebesar  $87,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pada Fin 2 dan  $q = 50,3 \text{ watt}$  atau  $q'' = 33,2 \text{ kW/m}^2$ , temperatur permukaan sebesar  $91,13 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pada  $q = 50 \text{ W}$ , *bubble* yang terbentuk sudah banyak dan *bubble* mulai terakumulasi. Akumulasi *bubble* dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 8. Fenomena *Onset of Nucleate Boiling* pada Fin 1



**Gambar 9.** Fenomena Penyatuan *Bubble* Fin 1 pada  $q = 50,3$  W

#### 4. KESIMPULAN

Fasilitas alat uji ini dirancang mampu melakukan pengujian di bawah temperatur *critical* dari fluida yang digunakan. Pada pengamatan fenomena *boiling*, zona pendidihan di bawah *critical heat flux*. Pada  $q$  rendah, tidak terjadi *bubble*. Terjadi aliran *free convection* pada Fin 2 di  $q = 20,6$  W saat temperatur permukaan sama dengan temperatur saturasinya. Pada kondisi ini, terjadi aliran fluida panas di dalam sistem. *Onset of nucleat boiling* kemudian terjadi pada  $q = 25$  W pada kedua fin yang mana mulai terbentuk *bubble* di beberapa titik. *Bubble* terbentuk terutama pada batang fin. Jumlah *bubble* yang terbentuk bertambah seiring peningkatan *heat flux*. Pada  $q = 50$  W, *bubble* yang terbentuk sangat banyak dan mulai terjadi terakumulasi hingga hampir terbentuk *film boiling*.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih diberikan kepada: Program Magister Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada dan tim peneliti Thermal Management System Laboratorium Perpindahan Kalor dan Massa Departemen Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada. Penelitian ini didanai oleh Hibah Penelitian Departemen Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik UGM Tahun 2020.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Falsetti, C., Magnini, M., Thome, J.R. (2018). Hydrodynamic and thermal analysis of a micro-pin fin evaporator for on-chip two-phase cooling of high density power micro-electronics. *Applied Thermal Engineering*, 130, 1425-1439
- Lee, J., Mudawar, I. (2008). Fluid flow and heat transfer characteristics of low temperature two-phase micro-channel heat sinks – Part 1: Experimental methods and flow visualisation results. *International Journal of Heat Transfer*, 51, 4315-4326.
- McNeil, D.A., Raesi, A.H., Kew, Bobbili, P.R. (2010). A comparison of flow boiling heat-transfer in in-line mini pin fin and plane channel flows. *Applied Thermal Engineering*, 30, 2412-2425.
- Pranoto, I., Leong, K. C., & Jin, L. W. (2012). The role of graphite foam pore structure on saturated pool boiling enhancement. *Applied Thermal Engineering*, 42, 163–172.