

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	I
HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING	III
HALAMAN PENGESAHAN PENDADARAN	IV
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	V
NASKAH SOAL TUGAS AKHIR	VI
HALAMAN PERSEMBAHAN	VII
KATA PENGANTAR	VIII
DAFTAR ISI	X
DAFTAR GAMBAR	XIII
DAFTAR TABEL	XVI
DAFTAR NOTASI	XVIII
INTISARI	XX
ABSTRACT	XXI
BAB I PENDAHULUAN	1
1. 1. Latar Belakang	1
1. 2. Rumusan Masalah	3
1. 3. Asumsi dan Batasan Masalah	4
1. 4. Tujuan Penelitian	4
1. 5. Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2. 1. Perkembangan Sistem Pendinginan <i>Pool Boiling</i>	5
2. 2. Perkembangan Sistem <i>Pool Boiling</i>	6
2. 2. 1. Perkembangan Alat Uji Eksperimen <i>Pool Boiling</i>	6
2. 2. 2. Perkembangan Material Permukaan pada <i>Pool Boiling</i>	9
2. 2. 3. Perkembangan Fluida Kerja pada <i>Pool Boiling</i>	11
2. 2. 4. Perkembangan Sudut Orientasi terhadap <i>Pool Boiling</i>	13
2. 3. <i>Research Gap</i>	16
BAB III LANDASAN TEORI	18
3. 1. Perpindahan Kalor pada Proses <i>Pool Boiling</i>	18
3. 2. Proses <i>Pool Boiling</i>	19
3. 2. 1. <i>Natural Convection Boiling</i>	20

3. 2. 2. <i>Nucleate Boiling</i>	20
3. 3. Perpindahan Kalor <i>Pool Boiling</i> pada <i>Metal Foam</i>	22
3. 3. 1. Temperatur Permukaan Dinding Aktual (T_s)	22
3. 3. 2. Resistansi Termal	22
3. 3. 3. <i>Porositas</i>	23
3. 3. 4. <i>Scale Factor</i>	23
3. 4. Efek Sudut Orientasi terhadap <i>Boiling Heat Transfer Coefficient</i>	23
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN	25
4. 1. Skema Alat Penelitian	25
4. 2. <i>Boiling Chamber</i>	27
4. 2. 1. <i>Electric Heater</i> dan <i>Heater Insulator</i>	27
4. 2. 2. <i>Rotating Insulator</i>	28
4. 2. 3. <i>Boiling Chamber</i>	29
4. 2. 4. <i>Condenser</i>	29
4. 3. Sensor dan Sistem Data Akuisisi	30
4. 3. 1. Laptop dan <i>Software</i>	30
4. 3. 2. <i>Power Supply</i>	30
4. 3. 3. <i>Pressure Transducer</i>	31
4. 3. 4. <i>Current to Voltage Modul 0/4 – 20 mA to 0 – 10 V</i>	32
4. 3. 5. Pompa	32
4. 3. 6. <i>PWM Driver 10 A</i>	33
4. 3. 7. <i>OMEGALOG OM – SQ 2020 / 2040</i>	33
4. 3. 8. <i>Thermocouple Amplifier Adafruit 8495</i>	35
4. 3. 9. <i>Variable Transformer 1 kVA</i>	36
4. 3. 10. <i>AC Power Meter</i>	36
4. 3. 11. <i>Thermocouple Wire Stainless Steel Diameter 1 mm</i>	37
4. 3. 12. <i>Thermocouple Probe Stainless Steel Diameter 5 mm</i>	38
4. 3. 13. <i>Cartridge Heater</i>	39
4. 3. 14. <i>Inclinometer</i>	39
4. 4. Diagram Alir Penelitian	40
4. 5. Tata Laksana Penelitian	41
4. 6. Fluida Kerja	44



4. 7. Spesimen Uji	45
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	48
5. 1. Perhitungan <i>Thermal Resistance</i>	48
5. 2. Perhitungan <i>Surface Temperature</i> dan <i>Excess Temperature</i>	50
5. 3. Analisis Perbandingan <i>Surface Temperature</i> (T_s) dan <i>Heat Flux</i> (q'')	52
5. 4. Perhitungan <i>Heat Transfer Coefficient</i> (HTC) <i>Nucleate Boiling</i>	53
5. 5. Analisis Fenomena Pendidihan dan Dinamika Pertumbuhan <i>Bubble</i>	55
5. 6. Analisis Perbandingan Variasi Sudut Orientasi pada Metal Foam terhadap <i>Heat Transfer Coefficient</i>	62
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	66
6. 1. Kesimpulan	66
6. 2. Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	hubungan konsumsi daya dan <i>heat flux</i> yang dihasilkan sebuah chip komputer dari tahun ke tahun	2
Gambar 2.1.	<i>Piezoelectric Oscillated Fan</i> pada <i>Heat Sink</i>	5
Gambar 2.2.	Skema Alat Eksperimen <i>Pool Boiling</i>	7
Gambar 2.3.	Skema Alat Eksperimen <i>Pool Boiling</i> dengan <i>Graphite Pore Foam</i>	8
Gambar 2.4.	Skema Alat Eksperimen <i>Open-Cell Metal Foam</i>	9
Gambar 2.5.	Struktur micro pin fins melalui SEM (a) micro-pin-fins surface (MPF) (b) nanocavities on top corner of micro-pin-fins (MPF-TC) (c) nano cavities on top edges of micro-pin-fins (MPF-TE) (d) nanoforests on the top and bottom sides of micro-pin-fins (MPF-NF)	10
Gambar 2.6.	(a) MF Surface, (b) MF+F Surface, (c) MF+M Surface	11
Gambar 2.7.	Skema Alat Eksperimen	12
Gambar 2.8.	Perbandingan Hasil CHF dan ΔT_{sub}	13
Gambar 2.9.	Skema Alat Penelitian	13
Gambar 2.10.	Visualisasi <i>bubble coalescence</i> dan karakteristik segregasi <i>bubble</i> dari permukaan panas pada (a) $\theta = 0^\circ$; (b) $\theta = 30^\circ$; (c) $\theta = 60^\circ$; (d) $\theta = 90^\circ$	14
Gambar 2.11.	Diagram Skematik Peralatan Eksperimen. (1) <i>viewing window</i> , (2) <i>heater</i> , (3) <i>copper block</i> , (4) <i>hot surface</i> , (5) <i>heater assembly</i> , (6) <i>packing</i> , (7) <i>thermocouple</i> , (8) <i>orientation controller</i>	15
Gambar 2.12.	Dinamika <i>bubble</i> pada permukaan spesimen uji untuk lima variasi sudut orientasi	15
Gambar 3.1.	Perbedaan Peristiwa Evaporasi dan <i>Boiling</i>	18
Gambar 3.2.	Proses <i>Boiling</i>	19
Gambar 3.3.	Diagram Nukiyama tentang Kurva Pendidihan Air pada Tekanan 1 atm	20
Gambar 3.4.	Visualisasi Proses <i>Nucleate Boiling</i>	21
Gambar 3.5.	Rangkaian Resistansi Termal	22
Gambar 3.6.	Analisis Gaya <i>Bubble</i> pada Permukaan Miring	23
Gambar 4.1.	Diagram Skematik Fasilitas Uji <i>Pool Boiling</i>	25
Gambar 4.2.	Dokumentasi Alat Uji Penelitian <i>Pool Boiling</i>	26
Gambar 4.3.	Skema Pergerakan <i>Bubble</i> pada <i>Evaporator</i> dalam <i>Heat Flux Nucleate Boiling</i>	27
Gambar 4.4.	3D <i>Rotating Insulator</i> dengan <i>Evaporator</i>	28
Gambar 4.5.	Mekanisme Pengatur Orientasi	28
Gambar 4.6.	Bentuk <i>Boiling Chamber</i>	29
Gambar 4.7.	Bentuk 3D <i>Condenser</i>	29



Gambar 4.8.	<i>Power Supply</i> (a) 12 V / 5 A dan (b) 24 V / 5 A	31
Gambar 4.9.	<i>Pressure Transducer</i> WIKA tipe A – 10	31
Gambar 4.10.	<i>Current to Voltage Modul</i> 0/4 – 20 mA to 0 – 10 V	32
Gambar 4.11.	Pompa Nagasaki NA – 2203 – 1	33
Gambar 4.12.	<i>PWM Driver</i> 10 A	33
Gambar 4.13.	<i>Data Logger</i> OMEGALOG OM – SQ 2020 / 2040	35
Gambar 4.14.	<i>Thermocouple Amplifier</i> Adafruit AD 8495	36
Gambar 4.15.	<i>Variable Transformer</i> 1 kVA	36
Gambar 4.16.	<i>AC Power Meter</i>	37
Gambar 4.17.	<i>Thermocouple Wire</i> Stainless Steel Diameter 1 mm	38
Gambar 4.18.	<i>Thermocouple Probe</i> Stainless Steel Diameter 5 mm	38
Gambar 4.19.	<i>Cartridge Heater</i>	39
Gambar 4.20.	GEMRED <i>Digital Inclinator</i> DL168	39
Gambar 4.21.	Diagram Alir Penelitian	40
Gambar 4.22.	Spesimen Uji dan Dimensi <i>Pin Fins</i>	46
Gambar 5.1.	Rangkaian Resistansi Termal Eksperimen	48
Gambar 5.2.	Perbandingan Nilai T_s <i>Aluminium Metal Foam</i> pada sudut $\theta = 0^\circ - 60^\circ$ dengan Variasi q''	52
Gambar 5.3.	Fenomena Perpindahan Kalor <i>Pool Boiling</i>	56
Gambar 5.4.	<i>Boiling Curve</i> <i>Aluminium Metal Foam</i>	57
Gambar 5.5.	Visualisasi <i>Onset of Nucleate Boiling</i> pada $q'' = 26,49 \text{ kW/m}^2$ Sudut Orientasi $\theta = 0^\circ$ pada AMF	58
Gambar 5.6.	Visualisasi <i>Onset of Nucleate Boiling</i> pada $q'' = 26,49 \text{ kW/m}^2$ Sudut Orientasi $\theta = 15^\circ$ pada AMF	58
Gambar 5.7.	Visualisasi <i>Onset of Nucleate Boiling</i> pada $q'' = 26,49 \text{ kW/m}^2$ Sudut Orientasi $\theta = 30^\circ$ pada AMF	58
Gambar 5.8.	Visualisasi <i>Onset of Nucleate Boiling</i> pada $q'' = 26,49 \text{ kW/m}^2$ Sudut Orientasi $\theta = 45^\circ$ pada AMF	59
Gambar 5.9.	Visualisasi <i>Onset of Nucleate Boiling</i> pada $q'' = 26,49 \text{ kW/m}^2$ Sudut Orientasi $\theta = 60^\circ$ pada AMF	59
Gambar 5.10.	Visualisasi <i>Bubble Merger</i> pada $q'' = 26,49 \text{ kW/m}^2$ Sudut Orientasi $\theta = 0^\circ$ pada AMF	59
Gambar 5.11.	Visualisasi <i>Bubble Merger</i> pada $q'' = 26,49 \text{ kW/m}^2$ Sudut Orientasi $\theta = 15^\circ$ pada AMF	60
Gambar 5.12	Visualisasi <i>Bubble Merger</i> pada $q'' = 26,49 \text{ kW/m}^2$ Sudut Orientasi $\theta = 30^\circ$ pada AMF	60



- Gambar 5.13. Visualisasi *Bubble Merger* pada $q'' = 26,49 \text{ kW/m}^2$ Sudut Orientasi $\theta = 45^\circ$ pada AMF 60
- Gambar 5.14. Visualisasi *Bubble Merger* pada $q'' = 26,49 \text{ kW/m}^2$ Sudut Orientasi $\theta = 60^\circ$ pada AMF 61
- Gambar 5.15. Perbandingan Nilai *Heat Flux* dan HTC pada *Metal Foam* dengan Sudut Orientasi $\theta = 0^\circ - 60^\circ$ 62
- Gambar 5.16. Perbandingan Nilai θ dan \bar{h} pada AMF dengan Variasi q'' 63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Rangkuman Penelitian dalam <i>Pool Boiling</i>	16
Tabel 4.1.	Spesifikasi Laptop untuk Penelitian	30
Tabel 4.2.	Spesifikasi <i>Power Supply</i>	30
Tabel 4.3.	Spesifikasi <i>Pressure Transducer</i> WIKA Tipe A – 10	31
Tabel 4.4.	Spesifikasi <i>Current to Voltage Modul</i> 0/4 – 20 mA to 0 – 10 V	32
Tabel 4.5.	Spesifikasi Pompa Nagasaki NA – 2203 – 1	32
Tabel 4.6.	Spesifikasi <i>PWM Driver</i> 10 A	33
Tabel 4.7.	Spesifikasi OMEGALOG OM – SQ 2020 / 2040	34
Tabel 4.8.	Spesifikasi <i>Thermocouple Amplifier</i> Adafruit 8495	35
Tabel 4.9.	Spesifikasi <i>Variable Transformer</i> 1 kVA	36
Tabel 4.10.	Spesifikasi <i>AC Power Meter</i>	37
Tabel 4.11.	Spesifikasi <i>Stainless Steel Wire Thermocouple</i> Diameter 1 mm	37
Tabel 4.12.	Spesifikasi <i>Stainless Steel Probe Thermocouple</i> Diameter 5 mm	38
Tabel 4.13.	Variabel Bebas	43
Tabel 4.14.	Variabel Terikat	44
Tabel 4.15.	Variabel Kontrol	44
Tabel 4.16.	Properti Fluida Kerja Shell S3-X	45
Tabel 4.17.	Jenis dan Dimensi Spesimen Uji	46
Tabel 4.18.	Properti Berbagai Resistansi Termal Material	47
Tabel 5.1.	Luas Permukaan Berbagai Material Resistansi Termal	49
Tabel 5.2.	Nilai Resistansi Termal Total pada <i>Aluminium Metal Foam</i>	49
Tabel 5.3.	Hasil Perhitungan T_s dan ΔT_{excess} Material <i>Aluminium Metal Foam</i> dengan Sudut Orientasi $\theta = 0^\circ$	50
Tabel 5.4.	Hasil Perhitungan T_s dan ΔT_{excess} Material <i>Aluminium Metal Foam</i> dengan Sudut Orientasi $\theta = 15^\circ$	50
Tabel 5.5.	Hasil Perhitungan T_s dan ΔT_{excess} Material <i>Aluminium Metal Foam</i> dengan Sudut Orientasi $\theta = 30^\circ$	51
Tabel 5.6.	Hasil Perhitungan T_s dan ΔT_{excess} Material <i>Aluminium Metal Foam</i> dengan Sudut Orientasi $\theta = 45^\circ$	51
Tabel 5.7.	Hasil Perhitungan T_s dan ΔT_{excess} Material <i>Aluminium Metal Foam</i> dengan Sudut Orientasi $\theta = 60^\circ$	51
Tabel 5.8.	Hasil Perhitungan <i>Heat Transfer Coefficient</i> Material <i>Aluminium Metal Foam</i> dengan Sudut Orientasi $\theta = 0^\circ$	53
Tabel 5.9.	Hasil Perhitungan <i>Heat Transfer Coefficient</i> Material <i>Aluminium Metal Foam</i> dengan Sudut Orientasi $\theta = 15^\circ$	53
Tabel 5.10.	Hasil Perhitungan <i>Heat Transfer Coefficient</i> Material <i>Aluminium Metal Foam</i> dengan Sudut Orientasi $\theta = 30^\circ$	54



Tabel 5.11. Hasil Perhitungan <i>Heat Transfer Coefficient</i> Material <i>Aluminium Metal Foam</i> dengan Sudut Orientasi $\theta = 45^\circ$	54
Tabel 5.12. Hasil Perhitungan <i>Heat Transfer Coefficient</i> Material <i>Aluminium Metal Foam</i> dengan Sudut Orientasi $\theta = 60^\circ$	54
Tabel 5.13. Perbandingan nilai θ dan \bar{h} pada AMF dengan Variasi q''	64

DAFTAR NOTASI

A_{pf}	: Luas permukaan batang <i>pin fins</i> (mm^2)
A_t	: Luas Total (mm^2)
A_w	: Luas Dinding (m^2)
b	: Gap <i>pin fins</i> (mm)
c	: Tinggi <i>pin fins</i> (mm)
C_{pl}	: Kalor spesifik cairan (J/kg. K)
C_{sf}	: Konstanta eksperimen untuk permukaan dan fluida
d_b	: Diameter <i>Bubble</i> (m)
F_{by}	: Gaya <i>buoyancy</i> (N)
F_{gy}	: Gaya gravitasi (N)
g	: Percepatan gravitasi (m/s^2)
h	: Koefisien perpindahan kalor <i>boiling</i> ($\text{kW/m}^2 \cdot \text{K}$)
h_{fg}	: Entalpi penguapan (J/kg)
k	: Konduktivitas termal (W/m. K)
L	: Panjang <i>heater</i> (mm)
n	: Konstanta eksperimen untuk fluida
Pr_l	: Bilangan Prandtl dari <i>liquid</i>
q	: Laju perpindahan kalor (W)
q''	: <i>Heat flux</i> (kW/m^2)
R_w	: Resistansi termal konduksi (K/W)
T_w	: Temperatur dinding ($^{\circ}\text{C}$)
T_s	: Temperatur permukaan ($^{\circ}\text{C}$)
T_{∞}	: Temperatur fluida ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT_{excess}	: Selisih temperatur dinding aktual dengan temperatur saturasi ($^{\circ}\text{C}$)
θ	: Sudut kemiringan ($^{\circ}$)
σ	: Tegangan permukaan (N/m)
ρ_v	: Massa jenis uap (kg/m^3)



- ρ_l : Massa jenis cairan (kg/m^3)
- ρ_g : Densitas uap (kg/m^3)
- μ_l : Viskositas cairan (kg/m. s)
- α : Lebar *pin fins* (mm)
- ϕ : Porositas *metal foam*
- B : *Boiling*