

BAB IV
DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

4.1.1 Perhitungan Kekasaran Permukaan

Seperti yang sudah di jelaskan pada bab 2 mengenai kekasaran permukaan, variasi lebar lubang pada permukaan plat akan mempengaruhi profil sesuai dengan variasi yang dibentuk. Dari lubang yang telah dibuat, maka kekasaran permukaan plat dapat didefinisikan akibat pengaruh variasi lebar lubang tersebut sehingga dapat dihitung nilai kekasaran permukaan aritmatik (R_a) dari spesimen tersebut.

Tabel 4.1 Data tinggi puncak dan lembah

		1	2	3	4	5
Lembah (mm)	1	0,345	0,341	0,335	0,336	0,313
	2	0,321	0,345	0,341	0,323	0,318
	3	0,339	0,340	0,338	0,331	0,316
Puncak (mm)	1	0,345	0,346	0,354	0,351	0,333
	2	0,350	0,336	0,335	0,345	0,327
	3	0,351	0,336	0,342	0,335	0,332

Keterangan: perbesaran 50 kali

Contoh perhitungan nilai R_a :

$$R = (|Z_1| + |Z_2| + |Z_3| \dots |Z_N|/N)$$

$$R = \left(\frac{1,1}{3}\right) = 0,337 \text{ mm}$$

$$R = 0,337 \text{ m} \times \frac{1}{5} = 6,733 \text{ } \mu\text{m}$$

4.1.2 Data Hasil Penelitian

Data pada tabel 4.2 merupakan hasil penelitian untuk pengujian kekasaran permukaan yang menghasilkan nilai R_a dari berbagai spesimen yang memiliki lebar lubang yang berbeda-beda. Selain itu didapatkan juga waktu pemanasan untuk melakukan suatu proses pendidihan yang menghasilkan nilai efisiensi pendidihan.



Tabel 4.2 Data Hasil Penelitian

Spesimen	Lebar lubang (mm)	Ra (μm)	Waktu (detik)
Datar	0	0,520	1054
Spesimen 1	0,4	6,657	799
Spesimen 2	0,6	6,733	611
Spesimen 3	0,8	6,818	525

4.1.3 Pengolahan Data

Perhitungan data dilakukan untuk mencari hasil dari nilai *nucleate pool boiling heat flux* yang terdapat pada air, heat transfer coefficient, dan juga efisiensi pendidihan pada penelitian ini. Di bawah ini merupakan contoh perhitungan pengolahan data untuk spesimen 2 yaitu spesimen dengan lebar lubang 0,6mm dengan Ra 6,733 μm pada ΔT_{excess} 20 $^{\circ}\text{C}$

- P_r (*prandtl number*) = 1,85
- μ_l (*viscosity of the liquid*) = $2,97 \times 10^{-4}$ kg/m.s
- h_f (*enthalpy of vaporization*) = $2,27 \times 10^6$ J/kg
- g (*gravitational acceleration*) = $9,81 \text{ m/s}^2$
- ρ_l (*density of the liquid*) = $961,5 \text{ kg/m}^3$
- ρ_v (*density of the vapor*) = $0,5045 \text{ kg/m}^3$
- σ (*surface tension of the liquid-vapor interface*) = $0,05985 \text{ N/m}$
- C_p (*Specific heat of the liquid*) = $4212 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$
- C_s (*experimental constant that depends on surface-fluid combination*) = $0,011$
- h_0 (*reference heat transfer coefficient*) = $5600 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$
- q_0 (*reference heat flux*) = 20000 W/m^2
- R_{a0} (*reference roughness parameters*) = $0,4 \mu\text{m}$
- P_{sat} (*saturated pressure*) = 101 bar
- P_{crit} (*critical pressure*) = $220,6 \text{ bar}$
- v (*voltage*) = 220 volt
- i (*arus listrik*) = 2 Ampere
- V (*volume air*) = 250ml
= $2,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
- ρ_l (*massa jenis air*) = 1000 kg/m^3
- C_p (*kalor jenis air*) = $4180 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$

➤ *Nucleate pool boiling heat flux*

$$T_s = 115 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_s = 95 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{excess}} = T_s - T_{s1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} \dot{q}_n &= \mu_l h_f \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[\frac{C_p (T_s - T_s)}{C_s h_f Pr_l^n} \right]^3 \\ &= 2,97 \times 10^{-4} \cdot 2,27 \times 10^6 \left[\frac{9,8 (95 - 95)}{0,0} \right]^{1/2} \left[\frac{4 (1 - 9)}{0,0 \cdot 2,2 \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 1,8 \cdot 1} \right]^3 \\ &= 1622668 \text{ W/m}^2 \\ &= 1622,67 \text{ kW/m}^2 \end{aligned}$$

➤ *Heat transfer coefficient*

$$h = h_0 C (Pr) \left(\frac{\dot{q}_n}{q_0} \right)^n$$

$$= 5600 \times 14,557 \times 2,94 \times \left(\frac{1622,67}{2} \right)^{0,6}$$

$$= 388020,43 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$= 388,02 \text{ kW/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

dengan, $C(\text{empirical constant}) = \left(\frac{Ra}{Ra_0} \right)^{0,1}$; $Ra_0 = 0,4 \mu$

$$= \left(\frac{6,733}{0,4} \right)^{0,1} = 14,557$$

$$F(Pr) (\text{Pressure reduce function}) = 1,73 Pr^{0,2} + \left(6,1 + \frac{0,6}{1 - Pr} \right) Pr^2$$

$$= 1,73 \left(\frac{P}{P_c} \right)^{0,2} + \left(6,1 + \frac{0,68}{1 - \left(\frac{P}{P_c} \right)} \right) \left(\frac{P}{P_c} \right)^2$$

$$= 1,73 \left(\frac{1}{2,6} \right)^{0,2} + \left(6,1 + \frac{0,6}{1 - \left(\frac{1}{2,6} \right)} \right) \left(\frac{1}{2,6} \right)^2$$

$$= 2,94$$

$$n (\text{heat flux exponent}) = 0,9 - 0,3 Pr^{0,1}$$

$$= 0,9 - 0,3 \frac{P}{P_c}^{0,1}$$

$$= 0,9 - 0,3 \frac{101}{220,6}^{0,1}$$

$$= 0,63$$

➤ *Pool boiling heat flux*

$$\begin{aligned}\dot{q}_b &= h(T_s - T_{s_i}) = h\Delta T_e \\ &= 388,02 \times 20 \\ &= 7760,41 \text{ kW/m}^2\end{aligned}$$

➤ Efisiensi pendidihan

- ΔT (selisih suhu air (suhu akhir-suhu awal))

$$\Delta T = 95^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 70^\circ\text{C}$$

- Massa air

$$\begin{aligned}m &= V \times \rho_l \\ &= 2,5 \times 10^{-4} \times 961,5 \\ &= 0,24 \text{ kg}\end{aligned}$$

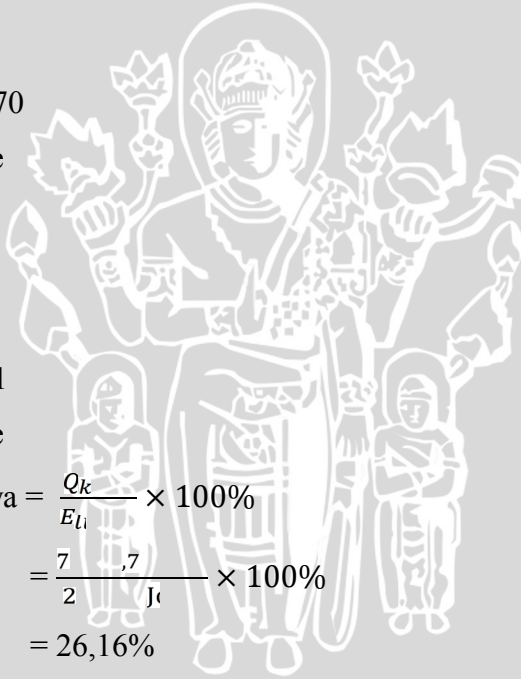
- Energi output (Q_{kolor})

$$\begin{aligned}Q_{\text{kolor}} &= m \times C_p \times \Delta T \\ &= 0,24 \times 4180 \times 70 \\ &= 70333,73 \text{ Joule}\end{aligned}$$

- Energi input (E_{listrik})

$$\begin{aligned}\text{Waktu} &= 611 \text{ detik} \\ E_{\text{listrik}} &= V \times i \times t \\ &= 220 \times 2 \times 611 \\ &= 268840 \text{ Joule}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Jadi, efisiensi pendidihannya} &= \frac{Q_k}{E_{li}} \times 100\% \\ &= \frac{70333,7}{268840} \times 100\% \\ &= 26,16\%\end{aligned}$$



Tabel 4.3 Data Hasil Perhitungan

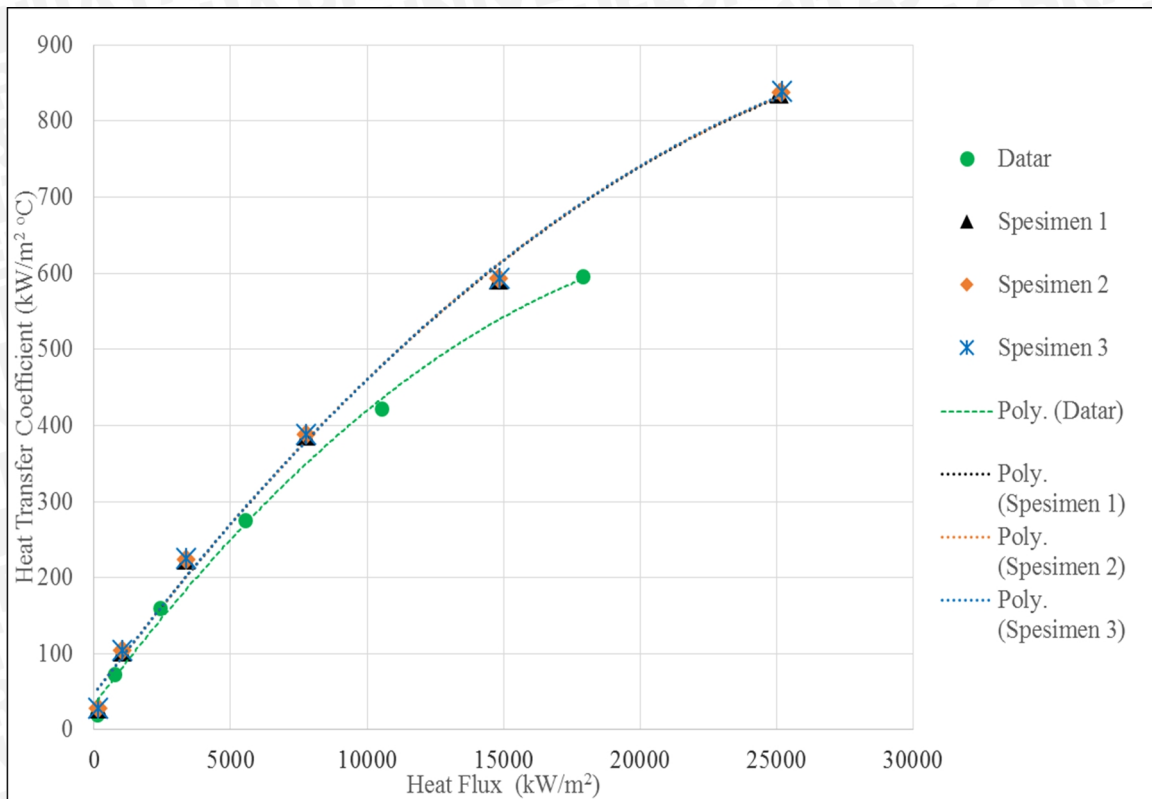
Spesimen	ΔT_{excess} ($^{\circ}\text{C}$)	$\dot{q}_{\text{nucleate}}$ ($\text{kW}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$)	h ($\text{kW}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$)	\dot{q}_{boiling} ($\text{kW}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Datar	5	25,35	19,83	99,15
	10	202,83	73,98	739,80
	15	684,56	159,81	2397,15
	20	1622,67	276,01	5520,25
	25	3169,27	421,71	10542,68
	30	5476,50	596,24	17887,05
Spesimen 1	5	25,35	27,83	139,17
	10	202,83	103,85	1038,45
	15	684,56	224,32	3364,86
	20	1622,67	387,44	7748,70
	25	3169,27	591,95	14798,63
	30	5476,50	836,93	25107,83
Spesimen 2	5	25,35	27,88	139,38
	10	202,83	104,00	1040,02
	15	684,56	224,66	3369,94
	20	1622,67	388,02	7760,41
	25	3169,27	592,84	14820,99
	30	5476,50	838,19	25145,77
Spesimen 3	5	25,35	27,92	139,61
	10	202,83	104,18	1041,75
	15	684,56	225,04	3375,54
	20	1622,67	388,67	7773,32
	25	3169,27	593,83	14845,64
	30	5476,50	839,59	25187,59

Tabel 4.4 Data Hasil Perhitungan Efisiensi Pendidihan

Spesimen	Energi Listrik (Joule)	Q_{kalor} (Joule)	Effisiensi (%)
Datar	463760	70333,73	15,17
Spesimen 1	351560	70333,73	20,01
Spesimen 2	268840	70333,73	26,16
Spesimen 3	231000	70333,73	30,45

4.2 Pembahasan

4.2.1 Hubungan antara *Heat Flux* terhadap *Heat Transfer Coefficient*



Gambar 4.1 Grafik hubungan antara *heat flux* terhadap *heat transfer coefficient*.

Gambar 4.1 menunjukkan hubungan grafik antara *heat flux* terhadap *heat transfer coefficient*. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan seiring meningkatnya *heat flux* maka *heat transfer coefficient* nya ikut mengalami peningkatan. Nilai *heat transfer coefficient* tertinggi dihasilkan oleh spesimen dengan lebar lubang yang paling lebar dengan nilai kekasaran permukaan yang paling kasar atau dengan nilai Ra sebesar 6,818 μm yaitu secara berurutan mulai *heat flux* 25187,59; 14845,64; 7773,32; 3375,54; 1041,75; dan yang terkecil yaitu 139,61 kW/m^2 . Sedangkan nilai *heat transfer* yang paling rendah terdapat pada spesimen tanpa kekasaran (datar).

Dari grafik diatas juga dapat diketahui bahwa semakin lebar lubang pada suatu spesimen atau semakin bertambahnya nilai kekasaran dari suatu permukaan (spesimen) maka nilai dari *heat transfer coefficient* ikut meningkat. Pada gambar 4.1 grafik untuk spesimen dengan nilai Ra 6,818 μm (spesimen dengan lubang yang paling lebar yaitu sebesar 0,8mm) menempati posisi dengan nilai *heat transfer coefficient* yang paling besar

dibandingkan spesimen dengan nilai Ra 6,733 μm ; 6,657 μm ; dan spesimen tanpa kekasaran. Spesimen dengan lubang sebesar 0,6mm atau spesimen dengan nilai Ra 6,733 μm memiliki nilai *heat transfer coefficient* lebih besar daripada spesimen yang memiliki nilai Ra 6,657 μm dan spesimen tanpa kekasaran. Sedangkan spesimen dengan Ra 6,657 μm (spesimen dengan lebar lubang yang paling kecil yaitu dengan lebar sebesar 0,4mm) memiliki nilai *heat transfer coefficient* yang lebih besar dibandingkan spesimen tanpa kekasaran yang memiliki nilai *heat transfer coefficient* yang paling kecil.

Nilai *heat transfer coefficient* yang disajikan grafik pada gambar 4.1 dihasilkan dengan persamaan Ribatski (2009) :

$$h = h_0 C (P_r) \left(\frac{\dot{q}_n}{q_0} \right)^n \quad (\text{Gorenflo, 1993}) \quad (4-1)$$

dengan,

$$C = \left(\frac{Ra}{Ra_0} \right)^{0,1} ; Ra_0 = 0,4 \mu \quad (\text{Gorenflo, 1993}) \quad (4-2)$$

$$F(P_r) = 1,73 P_r^{0,2} + \left(6,1 + \frac{0,6}{1-P_r} \right) P_r^2 \quad (\text{Gorenflo, 1993}) \quad (4-3)$$

$$n = 0,9 - 0,3 P_r^{0,1} \quad (\text{Gorenflo, 1993}) \quad (4-4)$$

$$\dot{q}_n = \mu_l h_f \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[\frac{c_p (T_s - T_s)}{C_s h_f P_r^n} \right]^3 \quad (\text{Cengel, 2003:522}) \quad (4-5)$$

Sedangkan *heat flux pool boiling* yang disajikan grafik pada gambar 4.2 dihasilkan dengan persamaan:

$$\dot{q}_b = h(T_s - T_{s_s}) = h\Delta T_e \quad (\text{Cengel, 2003:26}) \quad (4-6)$$

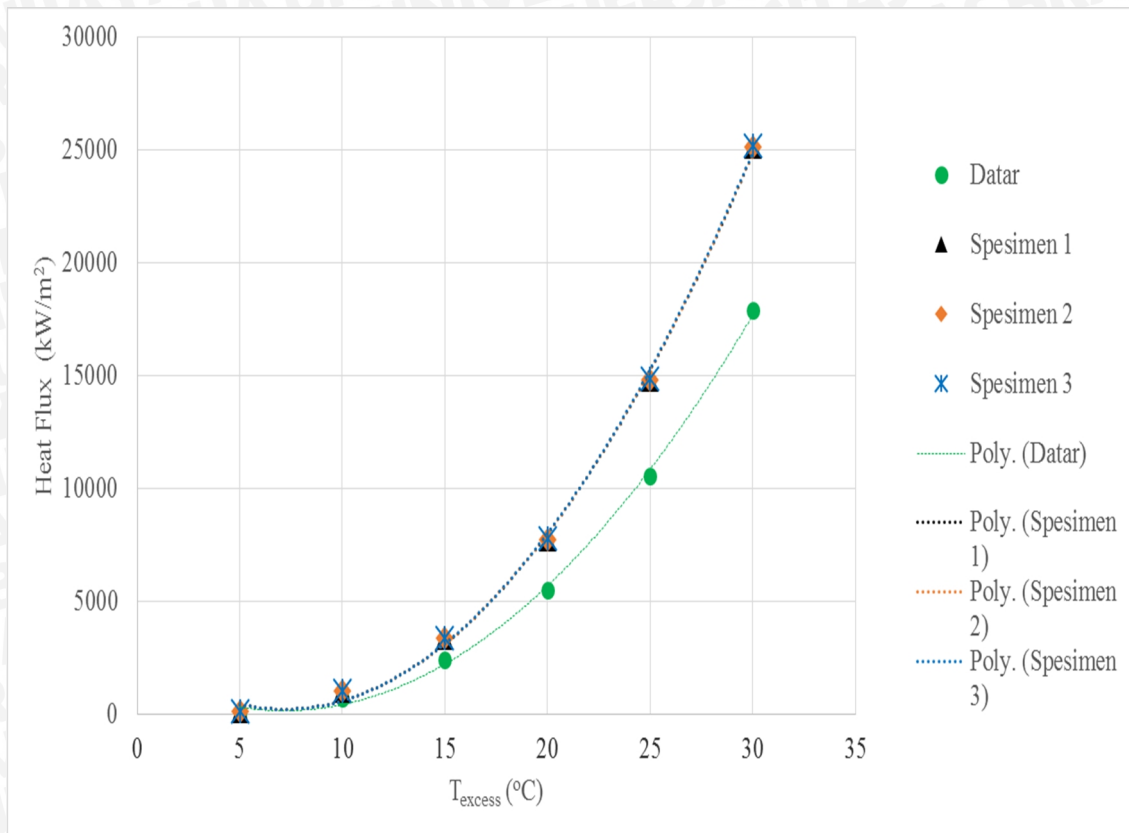
Dimana :

h = *heat transfer coefficient*

T_s = *surface temperature of the fluid* ($^{\circ}\text{C}$)

T_{s_s} = *saturation temperature of the fluid* ($^{\circ}\text{C}$)

4.2.2 Hubungan antara Perbedaan Temperatur *Surface* dengan Temperatur *Saturated* (ΔT_{excess}) terhadap *Heat flux* pada *Nucleate Pool Boiling*



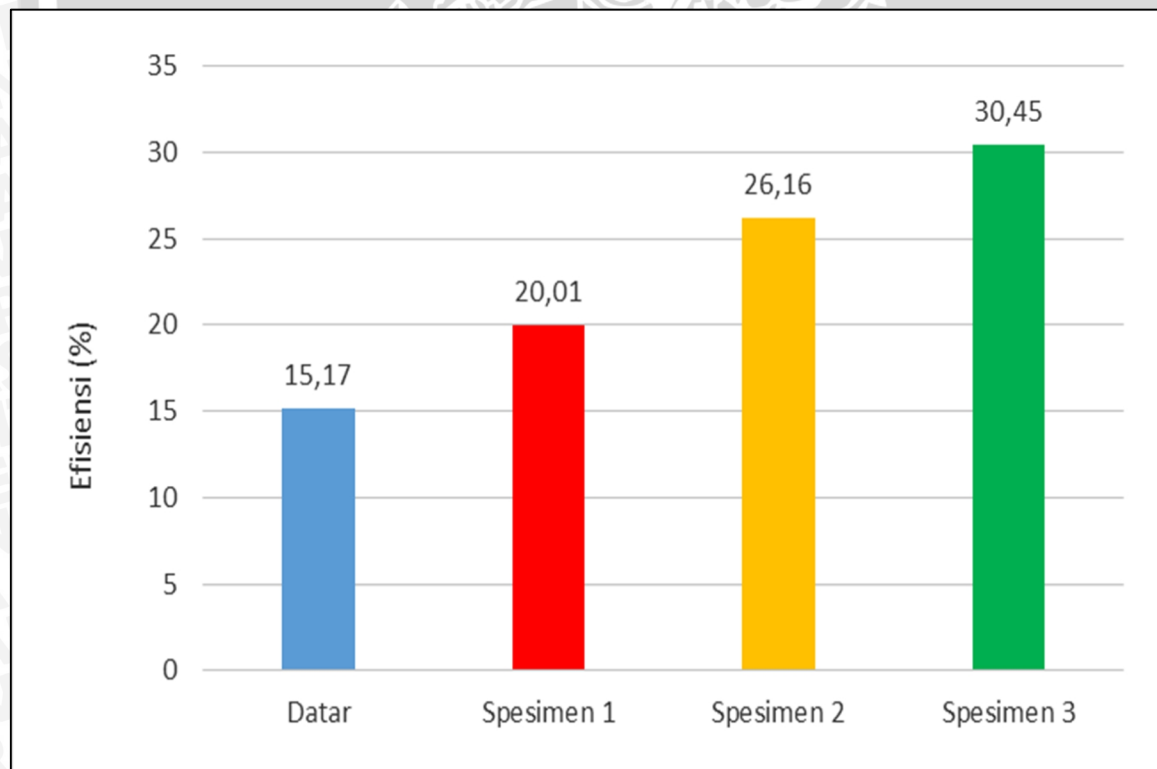
Gambar 4.2 Grafik hubungan antara perbedaan temperatur *surface* dengan temperatur *saturated* (ΔT_{excess}) terhadap *heat flux* pada *nucleate pool boiling*.

Pada grafik di atas menunjukkan hubungan antara ΔT_{excess} terhadap *pool boiling heat flux*. Dari grafik tersebut dapat dilihat untuk mencapai temperatur yang ditentukan yaitu perbedaan temperatur *surface* dengan temperatur *saturated* atau ΔT_{excess} dalam range *nucleate pool boiling* ($5\text{ }^{\circ}\text{C} \leq x \leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) membutuhkan *heat flux* yang berbeda-beda. Dapat dilihat dari grafik di atas bahwa setiap spesimen dengan spesimen lainnya memiliki kecenderungan yang sama yaitu *heat flux* yang semakin meningkat seiring dengan meningkatnya ΔT_{excess} . Hal ini disebabkan karena *heat flux* menunjukkan besarnya kalor yang di transfer per satuan luas dari permukaan (spesimen) ke air. Jadi, ketika suhu permukaan semakin tinggi maka jumlah kalor yang ditransfer dari permukaan ke air juga menjadi semakin banyak pula sehingga menyebabkan *heat flux* semakin tinggi

Selain itu semakin lebar lubang pada suatu spesimen atau bisa juga disebut dengan meningkatnya nilai kekasaran dari suatu permukaan (spesimen) juga semakin tinggi pula *heat flux* yang dihasilkan. Seperti dapat dilihat pada gambar 4.2 bahwa spesimen dengan

nilai Ra 6,818 μm (spesimen dengan lebar lubang yang paling besar yaitu dengan lebar 0,8mm) memiliki *heat flux* yang paling besar dibandingkan dengan spesimen lainnya. Spesimen dengan lebar lubang sebesar 0,6mm (spesimen dengan nilai Ra 6,733 μm) memiliki *heat flux* yang lebih besar dibandingkan spesimen dengan lebar lubang yang paling kecil yaitu 0,4mm (spesimen yang memiliki nilai kekasaran 6,657 μm) dan spesimen tanpa diberi kekasaran permukaan (plat datar). Sedangkan spesimen tanpa kekasaran memiliki *heat flux* yang paling rendah dibandingkan dengan spesimen lainnya. Hal tersebut dikarenakan semakin lebarnya lubang pada permukaan maka gelembung yang terbentuk akan semakin besar pula. Dengan besarnya gelembung yang terdapat pada permukaan dimana gelembung tersebut menyimpan panas yang akan ditransfer oleh permukaan ke air, ketika gelembung terlepas dari permukaan maka kalor yang ditransfer akan menjadi semakin besar sehingga menyebabkan nilai *heat flux* nya juga semakin tinggi.

4.2.3 Perbandingan Efisiensi antar Spesimen



Gambar 4.3 Grafik perbandingan efisiensi antar spesimen

Gambar 4.3 menunjukkan perbandingan nilai efisiensi antar spesimen dengan nilai kekasaran yang berbeda-beda. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa dengan meningkatnya atau bertambahnya lebar lubang pada suatu spesimen, maka meningkat pula nilai dari efisiensi. Pada gambar 4.3 spesimen dengan lebar lubang yang paling besar dengan nilai Ra 6,818 μm memiliki nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu dengan nilai 30,45 %. Selanjutnya pada spesimen yang memiliki lebar lubang sebesar 0,6mm dimana spesimen ini memiliki nilai Ra 6,733 μm memiliki nilai efisiensi di bawah spesimen yang memiliki nilai Ra 6,818 μm yaitu sebesar 26,16 %. Spesimen dengan lebar lubang 0,4 mm dengan nilai Ra 6,657 μm memiliki nilai efisiensi yang lebih rendah dari spesimen dengan nilai Ra 6,818 dan 6,733 μm yaitu sebesar 20,01 %. Sedangkan spesimen tanpa kekasaran memiliki nilai efisiensi yang paling rendah diantara spesimen lainnya yaitu sebesar 15,17%.

Hal tersebut dikarenakan berdasarkan hasil percobaan didapatkan semakin besar lebar dari lubang dari suatu permukaan boiler (spesimen) atau semakin besarnya nilai Ra pada spesimen tersebut maka semakin sedikit pula waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu pendidihan (dalam hal ini suhu *nucleate pool boiling*). Seperti yang disajikan pada tabel 4.5 dapat dilihat bahwa pada spesimen yang memiliki lubang yang paling besar (dengan nilai Ra 6,818 μm) hanya membutuhkan waktu 525 detik untuk dapat mencapai suhu *nucleate pool boiling* lebih singkat daripada spesimen yang memiliki lebar lubang yang lebih kecil dengan lebar lubang sebesar 0,6mm (dengan nilai Ra 6,733 μm) yang membutuhkan waktu 611 detik, spesimen dengan lebar lubang yang terkecil atau spesimen yang mempunyai nilai Ra 6,657 μm yang membutuhkan waktu 799 detik, dan spesimen tanpa kekasaran yang membutuhkan waktu yang paling lama yaitu 1054 detik. Dari hasil percobaan tersebut maka nilai dari energi input dalam hal ini energi listrik, menghasilkan nilai yang semakin kecil seiring dengan semakin singkatnya waktu yang dibutuhkan oleh *heater* untuk memanaskan air sampai dengan suhu *nucleate pool boiling* sesuai dengan persamaan

$$E_{\text{listrik}} = v \times i \times t \quad (4-4)$$

Dengan semakin kecilnya nilai dari energi input dengan nilai energi output yang sama untuk setiap spesimen berdasarkan persamaan

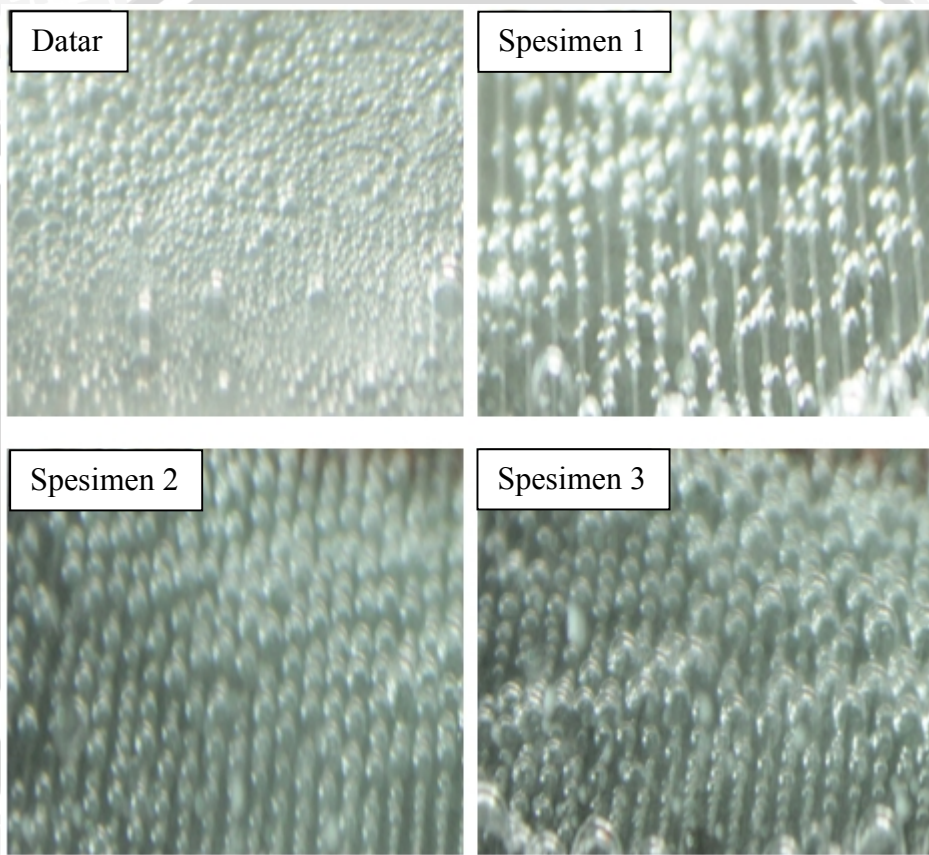
$$Q_{\text{kolor}} = m \times C_p \times \Delta T \quad (4-5)$$

maka didapatkan nilai efisiensi yang semakin besar dengan menurunnya nilai dari energi input sesuai dengan persamaan

$$E = \frac{E_e o}{E_i} = \frac{Q_k}{E_{li}} \times 100\% \quad (4-6)$$

4.3 Visualisasi Gelembung pada Permukaan

Pengambilan data visualisasi pada permukaan *boiler* dilakukan pada keempat plat aluminium yang memiliki kekasaran yang berbeda. Pengambilan data tersebut dilakukan pada ΔT_{excess} yang sama di setiap spesimen yaitu 20 °C. Didapatkan gambar visualisasi gelembung pada permukaan *boiler* (spesimen) seperti pada gambar 4.4



Gambar 4.4 Visualisasi gelembung pada permukaan boiler.

Pada visualisasi gelembung yang terdapat pada permukaan *boiler* dapat dilihat bahwa pada ΔT_{excess} yang sama pada masing-masing spesimen didapatkan besar gelembung yang berbeda. Permukaan spesimen yang memiliki lubang yang lebih lebar atau spesimen yang memiliki nilai kekasaran (R_a) yang lebih tinggi akan membentuk gelembung yang besar pula. Sesuai dengan teori yang sudah disebutkan pada bab sebelumnya bahwa kekasaran permukaan akan memicu terbentuknya pengintian gelembung. Dari hasil

visualisasi pada gambar 4.4 terlihat bahwa spesimen 3 dengan permukaan yang memiliki lebar lubang 0,8mm membentuk gelembung yang lebih besar dibandingkan spesimen lainnya. Dengan semakin besarnya gelembung yang terbentuk yang mana gelembung tersebut membawa panas dari permukaan menuju ke seluruh bagian air, maka *heat flux* yang dihasilkan juga semakin besar pula karena *heat flux* merupakan besarnya kalor yang di transfer per satuan luas dari permukaan (spesimen) ke air. Jadi hasil visualisasi ini juga mendukung hasil dari perhitungan *heat flux* yang terdapat pada tabel 4.2 yang mana pada tabel tersebut menunjukkan *heat flux* pada spesimen 3 (lebar lubang 0,8mm) memiliki nilai *heat flux* yang paling tinggi dibandingkan spesimen lainnya.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

