

Pengaruh Variasi Lebar Lubang pada Permukaan terhadap Efisiensi Pendidihan Air pada Proses *Pool boiling*

Firstio Noveldo Ananda, Agung Sugeng Widodo, Francisca Gayuh Utami Dewi

Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Indonesia

Jalan M.T. Haryono, 167 – Malang (65145) – Indonesia

E-mail: firstioananda20@gmail.com

Abstrak

Modifikasi pada permukaan alat penukar kalor yang dalam penelitian ini boiler akan meningkatkan pengintian pembentukan gelembung pada permukaan tersebut sehingga tingkat perpindahan panas pada proses pendidihan ikut meningkat. Penyimpangan pada permukaan yang mengalami proses pemanasan termasuk kekasaran dan kotoran dianggap sebagai tempat pengintian pembentukan gelembung tambahan selama proses pendidihan. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung efisiensi pendidihan pada boiler acrylic dengan permukaan yang terbuat dari plat aluminium sebagai konduktor panas yang memiliki kekasaran permukaan berupa lubang dengan lebar yang berbeda-beda di setiap spesimen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan lebar lubang pada setiap spesimen mempengaruhi nilai dari heat flux, heat transfer coefficient dan juga efisiensi pada proses pendidihan. Dimana semakin lebar lubang nilai dari kekasaran permukaan (R_a) semakin besar ketika nilai R_a semakin besar, maka nilai heat transfer coefficient juga semakin besar pula diikuti juga dengan meningkatnya nilai boiling heat flux. Semakin lebarnya lubang pada spesimen maka waktu yang dibutuhkan untuk mendidihkan air menjadi semakin singkat, sehingga efisiensi pendidihannya menjadi lebih besar. Hasil heat transfer coefficient yang tertinggi yaitu pada nucleate pool boiling heat flux $25187,59 \text{ kW/m}^2$ dan dengan lubang dengan lebar $0,8\text{mm}$ dengan nilai R_a $6,818 \mu\text{m}$ yaitu sebesar $839,59 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$. Sedangkan yang terkecil yaitu $19,83 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ yang dihasilkan oleh plat datar (tanpa kekasaran permukaan) pada nucleate pool boiling heat flux $99,15 \text{ kW/m}^2$. Lalu nilai boiling heat flux terbesar dihasilkan oleh plat aluminium dengan lubang yang paling lebar ($0,8\text{mm}$) dengan nilai R_a $6,818 \mu\text{m}$ dan juga ΔT_{excess} (selisih temperatur permukaan dengan temperatur jenuh air) 30°C yaitu sebesar $25187,59 \text{ kW/m}^2$ dan yang terkecil dihasilkan oleh spesimen tanpa kekasaran permukaan dan dengan ΔT_{excess} 5°C yaitu sebesar $99,15 \text{ kW/m}^2$. Efisiensi pendidihan terbesar dihasilkan oleh spesimen dengan lebar lubang yang paling besar ($0,8\text{mm}$) atau dengan nilai R_a $6,818 \mu\text{m}$ sebesar $30,45 \%$. Sedangkan yang terkecil dihasilkan oleh plat datar tanpa kekasaran permukaan dengan nilai sebesar $15,17 \%$. Penambahan lebar lubang pada permukaan boiler akan meningkatkan nilai dari efisiensi pada suatu proses pendidihan.

Kata kunci : heat transfer coefficient, heat flux, efisiensi, pool boiling

PENDAHULUAN

Sejak munculnya isu global akan menipisnya cadangan energi fosil di dunia dewasa ini, mendorong pengguna energi terutama yang mengkonsumsi energi dalam skala menengah sampai skala besar untuk segera mengantisipasinya dengan membenahi sistem termalnya^[1]. Batu bara merupakan salah satu jenis bahan bakar fosil yang berperan penting di dalam sistem PLTU yang dimana sangat berperan penting dalam penuplaian listrik untuk berbagai macam

bidang perindustrian di beberapa daerah di Indonesia. Salah satu langkah untuk mengantisipasi kelangkaan dari bahan bakar fosil tersebut yaitu dengan meningkatkan efisiensi boiler di dalam sistem pembangkitan listrik terutama sistem pembangkit listrik di bidang perindustrian yang menggunakan bahan bakar fosil sebagai bahan bakar untuk boiler yaitu dengan cara membuat kekasaran permukaan alat penukar

kalor pada proses tersebut, dalam hal ini yaitu boiler.

Modifikasi pada permukaan akan meningkatkan pengintian pada permukaan tersebut sehingga tingkat perpindahan panas pada proses pendidihan juga meningkat. Hal ini diamati bahwa penyimpangan pada permukaan yang dipanaskan termasuk kekasaran dan kotoran dianggap sebagai situs pengintian tambahan selama proses pendidihan [2].

Hasil percobaan sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan kekasaran permukaan juga meningkatkan perpindahan panas yang dilakukan oleh Kang, 2000^[4]. Benjamin *et al.*, 2009^[5] juga melakukan penelitian yang berkaitan mengenai efek kekasaran permukaan pada proses perpindahan panas *pool boiling* dimana ia meneliti menggunakan dua jenis fluida yang berbeda yaitu air dan fluorinert (FC-77) dimana koefisien perpindahan panas yang dipengaruhi oleh kekasaran permukaan menunjukkan bahwa FC-77 lebih tinggi daripada air. Kandiklar, 2010^[6] melakukan penelitian mengenai proses pendidihan dengan menggunakan berbagai macam plat yang terdapat kekasaran permukaan dalam bentuk *microchannel*. Dimana plat yang memiliki *microchannel* pada permukaannya berupa lebar 200µm dan kedalaman 275µm memiliki peningkatan efisiensi pendidihan yang paling tinggi.

Pada penelitian kali ini penulis akan melihat perbedaan efisiensi pendidihan pada boiler acrylic dengan permukaan yang terbuat dari plat aluminium sebagai konduktor panas yang memiliki kekasaran permukaan berupa lubang dengan lebar yang

berbeda-beda di setiap spesimen. Dengan pembuatan kekasaran permukaan yang berupa perbedaan lebar lubang pada kekasaran tersebut diharapkan akan terjadi juga peningkatan perpindahan panas yang terjadi sehingga efisiensi dari proses pendidihan diharapkan mengalami peningkatan. Penelitian kali ini menggunakan listrik sebagai penghasil panas yang akan dialirkan dari sumber listrik menuju plat pemanas yang digunakan dalam proses *pool boiling* tersebut.

Untuk memberikan kekasaran permukaan yang berupa lubang dalam bentuk garis lurus menggunakan *wire cutting*. Teknologi tersebut digunakan untuk mendapatkan kekasaran permukaan yang berupa lubang dengan bentuk garis lurus dengan ukuran yang kecil. Perbedaan nilai kekasaran permukaan (Ra) akan mempengaruhi nilai dari *heat transfer coefficient* yang dihasilkan pada proses pendidihan. Semakin tinggi nilai dari Ra maka nilai *heat transfer coefficient* yang dihasilkan semakin besar pula. Hal ini sesuai dengan persamaan [7]:

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

dengan, $C = \left(\frac{R_a}{R_{a0}} \right)^{0,1}$; $R_{a0} = 0,4 \mu$

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

$$n = 0,9 - 0,3 P_r^{0,1}$$

Dimana nilai *heat transfer coefficient* tersebut juga didapatkan dengan memasukkan nilai dari *nucleate boiling heat flux* yang didapatkan melalui persamaan [3]:

$$\dot{q}_n = \mu_l h_f \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[\frac{C_p (T_s - T_s)}{C_s h_f Pr_l^n} \right]^3$$

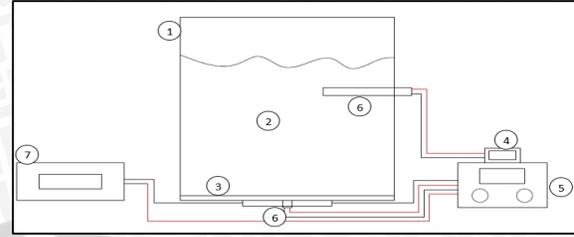
Dengan semakin meningkatnya nilai *heat transfer coefficient* maka nilai dari *heat flux* juga semakin meningkat pada ΔT_{excess} yang sama. Hal tersebut sesuai dengan persamaan [3]:

$$\dot{q} = h(T_s - T_s) = h\Delta T_e$$

Selain itu, perbedaan nilai kekasaran permukaan (*Ra*) juga mempengaruhi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu pendidihan (*suhu nucleate pool boiling*). Semakin tinggi nilai *Ra* maka waktu yang dibutuhkan semakin singkat maka efisiensi yang dihasilkan menjadi lebih tinggi.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian kali ini dilakukan dengan menggunakan metode penelitian (*experimental research*), ΔT_{excess} yang digunakan ialah ΔT_{excess} pada *nucleate pool boiling* yaitu $5^\circ\text{C} \leq x \leq 30^\circ\text{C}$ dengan plat alumunium yang diberi kekasaran permukaan berupa lubang berbentuk garis dengan kedalaman 0,5mm dan lebar lubang 0,4 mm (spesimen 1); 0,6 mm (spesimen 2); 0,8 mm (spesimen 3); dan plat datar (tanpa kekasaran), yang dimana plat tersebut bertindak sebagai permukaan *boiler* dengan panjang 8cm, lebar 3cm, serta memiliki tebal 5mm. Voltase yang di inputkan pada *heater* yaitu sebesar 220 volt dengan arus 2 ampere dan banyaknya air yang dipanaskan sebanyak 250 ml.



Gambar 1. Instalasi penelitian

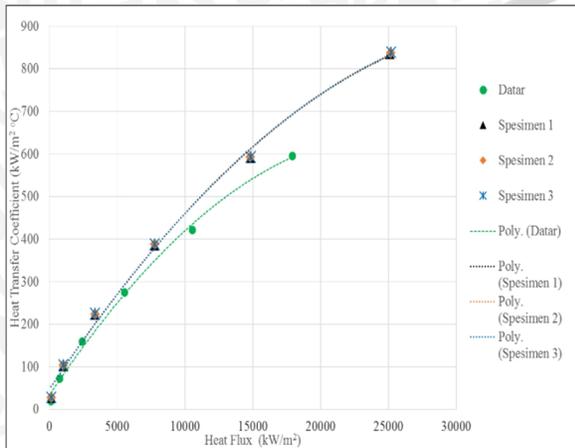
Keterangan gambar :

1. Balok acrylic
2. Fluida (air)
3. Plat pemanas/spesimen
4. Thermoisolation
5. Thermocontrol
6. Thermocouple
7. Thermocontrol

Prosedur penelitian yang pertama adalah menyiapkan plat alumunium dengan kekasaran permukaan yang berupa lebar lubang dengan lebar lubang pada masing-masing plat yaitu 0,4mm ; 0,6mm ; 0,8mm ; dan plat datar tanpa kekasaran permukaan yang telah dibuat sebelumnya menggunakan teknologi wire cutting dan telah diukur nilai kekasaran permukaannya (*Ra*) menggunakan profil projector. Kemudian memasang plat pertama di bagian bawah balok acrylic sebagai permukaan yang mengalami pemanasan. Pasang thermocouple yang sudah terhubung dengan thermoisolation pada bagian samping plat. Kemudian isi balok acrylic yang sudah terpasang plat alumunium dengan fluida yang berupa air sebanyak 250ml. Letakkan seperangkat peralatan tersebut di atas *electric heater*. Pasang thermoisolation yang sudah terhubung dengan thermoisolation ke dalam air. Siapkan juga stopwatch untuk mengukur waktu yang dibutuhkan dalam proses pendidihan. Ketika semua perangkat percobaan sudah siap, nyalakan *electric heater* diikuti dengan start

stopwatch. Ambil data temperatur surface, temperatur air, dan waktu selama proses pendidihan. Amati juga proses yang terjadi pada permukaan. Lakukan juga hal yang sama pada 3 plat lainnya

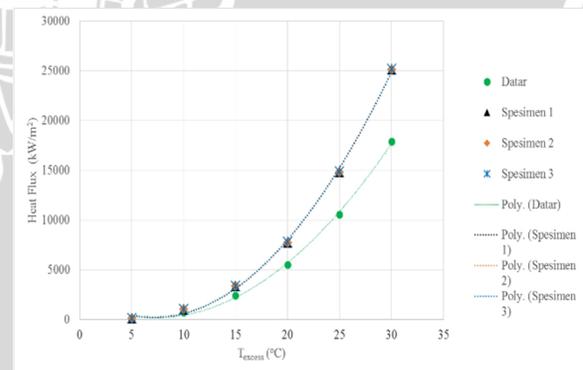
HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 2. Grafik hubungan antara *heat flux* terhadap *heat transfer coefficient*

Pada grafik di atas 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 dengan urutan nilai *heat flux* yang sama.

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 2 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.



Gambar 3. 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*

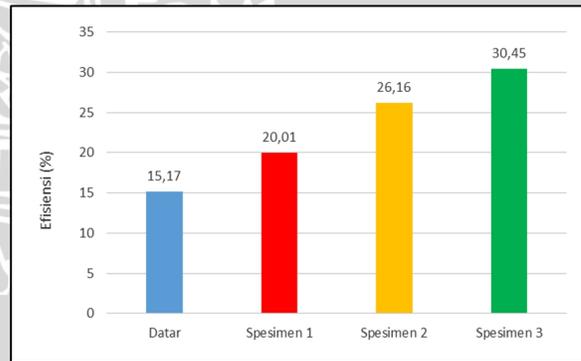
boiling heat flux. Dari grafik tersebut dapat dilihat untuk mencapai temperatur yang ditentukan yaitu perbedaan temperatur surface dengan temperatur saturated atau ΔT_{excess} dalam range *nucleate pool boiling* ($5^\circ\text{C} \leq x \leq 30^\circ\text{C}$) membutuhkan *heat flux* yang berbeda-beda. 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 3 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.

Tabel 1. Data 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



Gambar 4. Grafik perbandingan efisiensi antar spesimen

Gambar di atas 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 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:

$$E_{\text{listrik}} = v \times i \times \Delta t$$

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

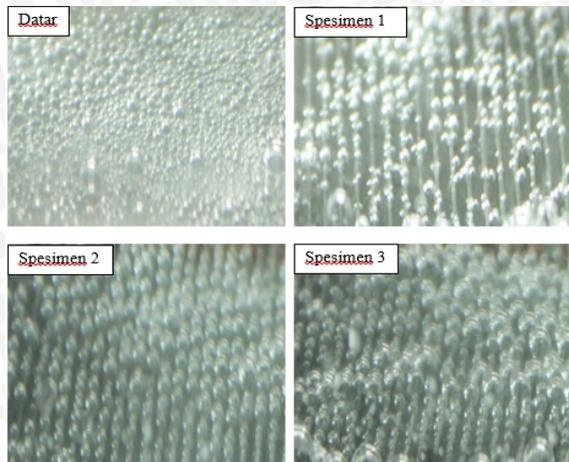
$$Q_{\text{kalor}} = m \times C_p \times \Delta T$$

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

$$E = \frac{E_o}{E_{li}} = \frac{Q_k}{E_{li}} \times 100\%$$

VISUALISASI GELEMBUNG

Pengambilan data visualisasi gelembung dilakukan pada ΔT_{excess} yang sama di setiap spesimen yaitu 20 °C. Didapatkan gambar visualisasi gelembung pada permukaan *boiler* (spesimen) seperti pada gambar 5.



Gambar 5. 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 nilai kekasaran (R_a) yang lebih tinggi atau spesimen yang memiliki lubang yang lebih lebar 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 5 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 menunjukkan nilai *heat flux* pada

spesimen 3 (lebar lubang 0,8) memiliki nilai *heat flux* yang paling tinggi dibandingkan spesimen lainnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pembahasan dari penelitian tentang pengaruh kekasaran permukaan plat dengan variasi lebar lubang terhadap efisiensi pendidihan air pada proses *pool boiling*, dapat disimpulkan sebagai berikut:

Nilai *heat transfer coefficient* dari yang tertinggi 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 jika dilihat dari nilai R_a , nilai *heat transfer coefficient* dari yang tertinggi secara berurutan pada R_a 6,818 μm ; R_a 6,733 μm ; 6,657 μm ; dan spesimen datar. *Heat flux* yang paling besar dari yang tertinggi secara berurutan pada R_a 6,818 μm ; R_a 6,733 μm ; 6,657 μm ; dan spesimen datar. Selain itu, *heat flux* semakin meningkat seiring dengan meningkatnya ΔT_{excess} . Selanjutnya, semakin lebarnya lubang atau nilai R_a pada suatu permukaan boiler maka waktu yang dibutuhkan untuk mendidihkan air (mencapai suhu *nucleate pool boiling*) akan semakin singkat sehingga efisiensi yang dihasilkan akan semakin tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Holman, Jack P. 2010. *Heat Transfer Tenth Edition*. New York : McGraw-Hill.
- [2] Bergman, Theodore L., et. al. 2011. *Introduction to Heat Transfer*. USA : John Wiley & Sons Inc.

- [3] Cengel, Yunus A. 2003. *Heat Transfer : A Practical Approach Second Edition*. New York : McGraw-Hill.
- [4] Kang, Myeong-Gie. 2010. *Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer. International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43 : 4073-4085.
- [5] Jones, Benjamin J., et. al. 2009. *The Influence of Surface Roughness on Nucleate Pool boiling Heat Transfer. Birk and NCN Publication*, vol. 131.
- [6] Kandiklar, Satish G. 2010. *Pool Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics Over Plain and Enhanced Microchannels. International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 133
- [7] Gorenflo, D., 1993. *Pool Boiling, VDI Heat Atlas*. Düsseldorf : VDI Verlag..

