

PENGARUH VARIASI KEDALAMAN LUBANG PADA PERMUKAAN PLAT
PEMANAS TERHADAP EFISIENSI PENDIDIHAN AIR
PADA PROSES *POOL BOILING*

Indra Barani, Agung Sugeng Widodo, Rudy Soenoko

Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Indonesia

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

E-mail: indrabarani@gmail.com

Abstrak

Pemanas air (*water heater*) merupakan salah satu alat yang sering digunakan oleh masyarakat luas disebabkan oleh fungsinya yang sangat berguna untuk kehidupan sehari-hari. Salah satu metode untuk mempercepat pemanasan air adalah dengan mempercepat proses pembentukan inti (*nucleate*) pada proses *pool boiling*. Modifikasi pada *surface* (permukaan) akan meningkatkan proses pembentukan inti sehingga tingkat perpindahan panas juga meningkat. Penelitian ini bertujuan untuk melihat efisiensi pendidihan pada wadah acrylic dengan permukaan (*surface*) yang terbuat dari plat alumunium sebagai penghantar panas dan memiliki kekerasan permukaan berupa kedalaman permukaan yang berbeda pada setiap spesimen. Metode penelitian ini meliputi perhitungan efisiensi *pool boiling* dengan variasi kedalaman pada kekasaran permukaannya yaitu sebesar 0.52 μm ; 3,311 μm ; 5,075 μm ; 7,169 μm pada permukaan plat alumunium dengan panjang 8 cm, lebar 3 cm, dan tebal 2 mm serta plat datar tanpa kekasaran permukaan dengan dimensi yang sama. $\Delta T_{\text{excess}} (T_s - T_{\text{sat}})$ yang digunakan atau yang dituju ialah ΔT_{excess} pada *nucleate pool boiling* yaitu $5^\circ\text{C} \leq x \leq 30^\circ\text{C}$ dengan volume air 250 ml. Voltase dan arus yang digunakan oleh *electric heater* ialah 220 V dan 2 A. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan kedalaman *surface* pada setiap spesimen mempengaruhi besarnya nilai *heat flux*, *heat transfer coefficient* dan juga efisiensi pada proses pendidihan. Dimana semakin dalam lubang dari kekasaran permukaan maka nilai (Ra) yang dihasilkan semakin besar, sehingga nilai *heat transfer coefficient* juga semakin besar yang diikuti dengan meningkatnya nilai *boiling heat flux*. Semakin kasar suatu permukaan maka semakin tinggi efisiensi yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan kondisi permukaan *heater* mempengaruhi proses perpindahan panas. Hasil *heat transfer coefficient* yang tertinggi yakni pada spesimen 3 dengan kekasaran permukaan 7,169 μm dengan hasil *heat transfer coefficient* sebesar 431 $\text{MW}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ dan efisiensi sebesar 27,95 %. Hasil *heat transfer coefficient* terendah terjadi pada spesimen datar dengan kekasaran *surface* 0,52 μm dengan hasil *heat transfer coefficient* sebesar 255 $\text{MW}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ dan efisiensi sebesar 15,17%. Penambahan kedalaman lubang pada kekasaran permukaan pemanas akan meningkatkan nilai dari efisiensi pada suatu proses pendidihan.

Kata kunci : *Pool boiling*, *water heater*, kekasaran permukaa, *heat transfer coefficient*, *heat flux*, efisiensi

ABSTRACT

Water heating (water heater) is one of tool that often commonly used cause the function is very useful. One method to increase heating water is to accelerate the process of nucleate in pool boiling process. Modification of the surface will increase the process of forming the nucleat so the heat transfer rate is also increased. This study discuss about efficiency pool boiling in acrylic with surface made from aluminum plate as a conductor of heat transfer which has a surface roughness of the surface form different depths on each sepesimen. This research method includes the calculation of the efficiency of pool boiling with added surface roughness variations μm 0:52; 3.311 μm ; 5.075 μm ; 7.169 μm contained on the surface of the aluminum plate with 8cm long, 3cm wide and 5 mm thick and flat plate without surface roughness with the same dimensions. ΔT_{excess} that we used is $\Delta T_{\text{excess}} (T_s - T_{\text{sat}})$ on nucleate pool boiling, which is $5^\circ\text{C} \leq x \leq 30^\circ\text{C}$ with a water volume of 250 ml. Voltage that electric used is 220 V and 2 A. The results showed that the difference in the depth of the surface at each sepesimen affect the value of heat flux, heat transfer coefficient and efficiency of the boiling process. Where the deeper holes from surface roughness (Ra), the value of (Ra) increase, so the value of heat transfer coefficient is also increase, followed by increasing the value of boiling heat flux. The more rough of the surface, the value of the efficiency will be increase. This is because the heater surface conditions affect the heat transfer process. The results of the highest heat transfer coefficient that is on the specimen 3 by the surface roughness of 7.169 μm with the result of heat tarnsfer coeficient of 431 MW / $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ with an efficiency of 27,95%. Results of the lowest heat transfer coefficient on flat specimens with surface roughness of 0.52 μm with the result of heat transfer coefficient of 255 MW / $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ with an efficiency of 15,17%. The addition of the depth of the holes on the heater surface roughness will increase the value of efficiency at a boiling process.

Keywords: Pool boiling, water heater, surface roughness, heat transfer coefficient, heat flux, efficiency

PENDAHULUAN

Ketersediaan energi tiap tahun semakin menurun hal ini di sebabkan oleh meningkatnya pertumbuhan penduduk tiap tahunnya. Peningkatan jumlah penduduk tersebut tidak diimbangi dengan ketersediaan sumber energi yang ada, sehingga sumber energi semakin menurun. Salah satu contohnya adalah energi listrik. Pada periode 1990-2011 konsumsi energi listrik asean mengalami peningkatan yang signifikan, dimana pada tahun 2011 mencapai sebesar 712 Ton watt hour (TWh) dengan total kapasitas pembangkit mencapai 145.884 MW (*Outlook Energy Indonesia* 2014).

Pemanas air (*water heater*) merupakan salah satu alat yang sangat sering digunakan

oleh masyarakat luas disebabkan oleh fungsinya yang sangat berguna untuk kehidupan sehari-hari. Namun untuk mendapatkan tempratur air yang tinggi dibutuhkan daya listrik yang besar dalam waktu yang relatif lama, oleh karena itu perlu diadakannya sebuah penelitian untuk dapat mempercepat waktu pemanasan sehingga daya listrik yang dibutuhkan tidak terlalu besar dan dapat menghemat penggunaan sumber energi listrik.

Dewasa ini telah ditemukan suatu metode untuk mempercepat proses pemanasan air dengan mempercepat proses pembentukan inti (*nucleate*) pada proses *pool boiling*. Modifikasi pada permukaan akan meningkatkan pengintian pada permukaan tersebut sehingga tingkat

perpindahan panas pada proses pendidihan juga meningkat.

Pada penelitian sebelumnya telah didapatkan bahwa ada dua pembahasan pada proses *pool boiling* dimana eksperimen dilakukan pada suatu luasan permukaan dengan kekasaran tertentu yang dibasahi dengan fluida yang berbeda pada tekanan atmosfer. Pada fluida air didapatkan adanya peningkatan koefisien perpindahan panas yang rendah pada kekasaran permukaan 1,08 μm , namun pada kekasaran 10,0 μm (sangat kasar) mengalami peningkatan koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi. Pada kekasaran permukaan yang sama dengan menggunakan fluida FC-77 maka nilai koefisien perpindahan panas akan meningkat secara kontinyu dengan diikuti peningkatan kekasaran permukaan (Jones, 2009). Peningkatan *heat transfer* pada *nucleate boiling* dapat ditingkatkan dengan mengkombinasikan kekasaran permukaan dengan pori berlubang pada permukaan (Kotthoff, 2006). Pada kekasaran suatu permukaan *nano-structured surface* didapatkan bahwa koefisien *heat-transfer* dan *heat-flux* dapat meningkat 4 hingga 10 kali lebih tinggi dibandingkan dengan permukaan yang tidak mempunyai kekasaran permukaan (Hendricks, 2009).

Pada penelitian kali ini penulis akan melihat perbedaan efisiensi pendidihan pada wadah acrylic dengan permukaan yang terbuat dari plat aluminium sebagai elemen pemanas yang memiliki kekasaran permukaan berupa kedalaman lubang yang berbeda-beda pada tiap spesimen. Dengan pembuatan kekasaran permukaan dan perbedaan ukuran geometri pada kekasaran tersebut diharapkan akan terjadi juga peningkatan perpindahan panas yang terjadi sehingga efisiensi dari proses pendidihan diharapkan dapat mengalami peningkatan. Penelitian kali ini menggunakan listrik sebagai penghasil panas yang akan di

alirkan dari sumber listrik menuju plat pemanas yang digunakan dalam proses *pool boiling* tersebut.

Variasi kekasaran dengan kedalaman lubang yang digunakan yakni 7,169 μm pada spesimen 3, 5,075 μm pada spesimen 2, 3,311 μm pada spesimen 1 dan 0,52 μm pada spesimen datar, pada permukaan yang terbuat dari plat aluminium dengan panjang 8cm, lebar 3cm, dan tebal 2 mm. Untuk memberikan kekasaran permukaan yang berupa lubang dalam bentuk garis lurus menggunakan *wire cutting*. Perbedaan nilai kekasaran permukaan (R_a) akan mempengaruhi nilai dari *heat transfer coefficient* yang dihasilkan pada proses pendidihan. Semakin tinggi nilai dari R_a maka nilai *heat transfer coefficient* yang dihasilkan semakin besar pula. Hal ini sesuai dengan persamaan 2.

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 di bawah ini :

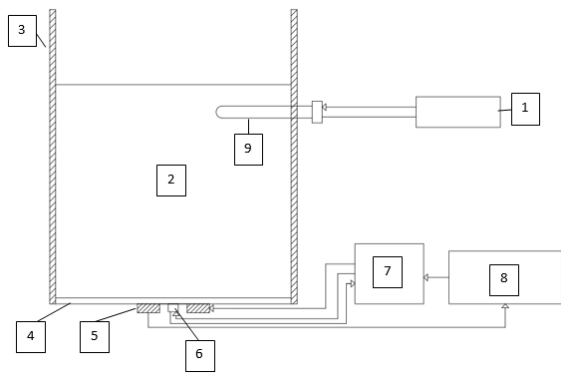
$$\dot{q}_{\text{nucleate}} = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{c_p (T_s - T_{\text{sat}})}{c_{sf} h_{fg} Pr_l^n} \right]^3$$

(Cengel, 2003:26) (1)

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

METODE PENELITIAN

Rancangan alat :



Gambar 1. Instalasi penelitian

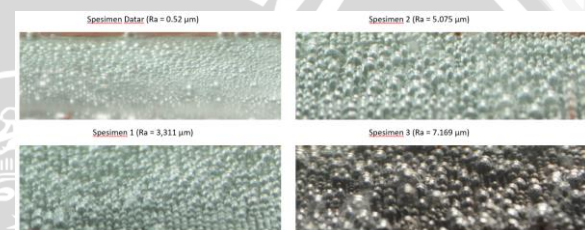
Keterangan gambar :

1. Thermocontrol
2. Air
3. Wadah (Acrylic)
4. Spesimen
5. Elemen Pemanas
6. Thermocouple
7. Thermocontrol
8. Statvolt
9. Thermocouple

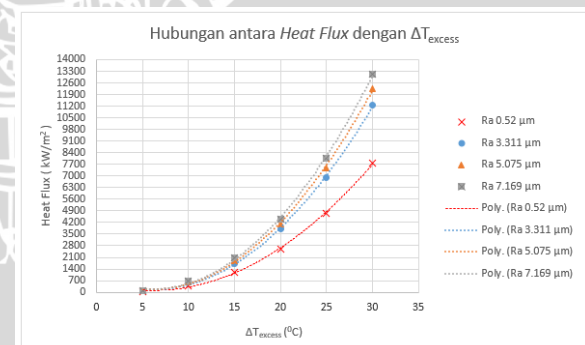
Prosedur penelitian yang pertama adalah menyiapkan plat aluminium dengan variasi kedalaman surface 7,169 μm pada spesimen 3, 5,075 μm pada spesimen 2, 3,311 μm pada spesimen 1 dan 0,52 μm pada spesimen datar, yang telah dibuat sebelumnya menggunakan *wire cutting* dan telah diukur nilai kekasaran permukaannya (Ra) menggunakan profil projector. Kemudian pasang plat di bagian bawah wadah acrylic sebagai pemanasan. Kemudian pasang *thermocouple* yang sudah terhubung dengan *thermocontrol* pada bagian samping plat. Kemudian isi wadah acrylic yang sudah terpasang plat aluminium dengan air sebanyak 250 ml. Letakkan seperangkat peralatan tersebut di atas *electric heater*. Pasang *thermocouple* yang sudah terhubung dengan

thermocontrol ke dalam air. Ukur waktu dengan menggunakan *stopwatch* guna mengetahui berapa lama waktu yang dibutuhkan dalam proses pembentukan *nucleat* hingga mendidih. 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 Visualisasi pembentukan inti (*nucleat*) gelembung pada kekasaran permukaan plat dengan variasi kedalaman saat $\Delta T_{\text{excess}} 10^\circ\text{C}$.



Gambar 3 Hubungan antara perbedaan temperatur surface dengan temperatur saturated (ΔT_{excess}) terhadap *heat flux* pada *nucleate pool boiling*

Gambar 3 diatas menunjukkan hubungan antara *heat flux nucleate boiling* terhadap ΔT_{excess} (dimana pada *nucleate boiling* ΔT_{excess} berada pada $5^\circ\text{C} \leq x \leq 30^\circ\text{C}$) terhadap kekasaran permukaan dengan variasi kedalaman. Pada gambar 4.1

menunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya ΔT_{excess} maka nilai *heat flux* yang didapatkan semakin meningkat. Semakin tinggi kekasaran permukaan sepsimen maka nilai *heat flux* yang dihasilkan juga akan semakin tinggi. Dimana dari gambar 4.1 diperoleh hasil bahwa nilai kekasaran dengan nilai 7,169 μm memperoleh nilai kekasaran yang paling tinggi, diikuti dengan spesimen dengan nilai kekasaran 5,075 μm , 3,311 μm , dan yang terakhir spesimen dengan kekasaran 0,520 μm . Penurunan nilai kekasaran spesimen disebabkan oleh semakin rendah nilai kekasaran pada suatu permukaan akan menurunkan *heat flux* yang disebabkan karena hubungan antara *heat flux* dengan kekasaran permukaan adalah berbanding lurus, sebagai mana yang dijelaskan pada persamaan berikut :

$$h = h_0 C F(P_r) \left(\frac{\dot{q}_{\text{nucleate}}}{q_0} \right)^n$$

(Gorenflo, 2011:10) (2)

Dimana :

- h = Heat transfer coefficient ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)
- h_0 = reference heat transfer coefficient ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)
- C = empirical constant
- $F(P_r)$ = Pressure reduce function
- q_0 = reference *heat flux* (W/m^2)
- n = Exponent of *heat flux*

Lalu substitusikan persamaan 2 kedalam persamaan berikut :

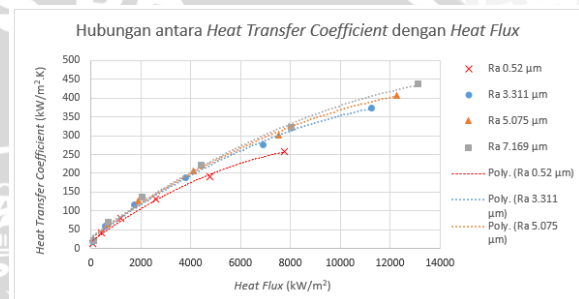
$$\dot{q} = h(T_s - T_{\text{sat}}) = h\Delta T_{\text{excess}}$$

(Cengel, 2003:26) (3)

Dimana :

- h = *Heat transfer coefficient*
- T_s = *Surface temperature of the fluid* ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{sat} = *Saturation temperature of the fluid* ($^{\circ}\text{C}$)

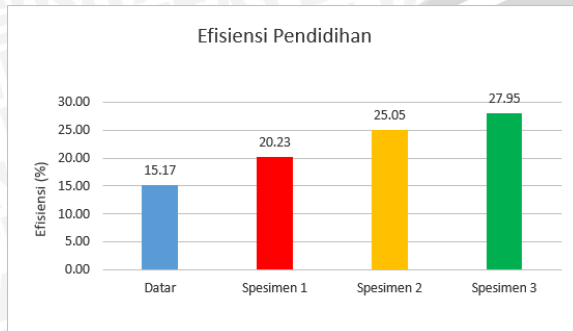
Dari persamaan 2 dan 3 didapatkan hubungan antara kekasaran permukaan (R_a) dengan *heat flux* (\dot{q}) adalah sebanding (berbanding lurus), sehingga semakin meningkat nilai kekasaran permukaan suatu spesimen, maka nilai *heat flux* yang didapatkan juga akan semakin besar, dari kedua persamaan 2 dan 3 juga dapat dilihat bahwa hubungan antara *heat flux* (\dot{q}) dengan ΔT_{excess} adalah sebanding (berbanding lurus).



Gambar 4 Grafik hubungan antara *heat flux* terhadap *heat transfer coefficient*

Gambar 4 diatas menjelaskan hubungan antara *heat transfer coefficient* (HTC) terhadap *heat flux* dengan kekasaran permukaan spesimen yang berbeda, diimana kekasaran pada penelitian merupakan kekasaran dengan variasi kedalaman. Dari gambar 3 dijelaskan bahwa dengan meningkatnya nilai *heat flux* pada masing-masing spesimen yang uji, maka akan meningkatkan nilai HTC. Kekasaran pada permukaan juga dapat mempengaruhi nilai dari HTC dimana semakin tinggi nilai kekasaran suatu permukaan maka, nilai dari HTC yang didapatkan juga akan semakin tinggi, hal tersebut dapat dilihat pada persamaa 3 dimana nilai HTC berbanding lurus (sebanding) dengan nilai *heat flux* dan nilai kekasaran permukaan pada persamaan 2 adalah sebanding dengan nilai HTC. Dari gambar 3 diperoleh bahwa semua grafik telah sesuai dengan teori yang ada, diaman

heat flux berbanding lurus atau sebanding dengan HTC dan HTC berbanding lurus (sebanding) dengan kekasaran permukaan. Spesimen dengan kekasaran permukaan 7,619 μm memperoleh nilai HTC tertinggi dibandingkan dengan nilai spesimen lainnya, sedangkan spesimen dengan kekasaran 0,520 μm mendapatkan nilai HTC terendah.



Gambar 5 Grafik perbandingan efisiensi antar spesimen

Gambar 5 di atas menjelaskan akan efisiensi pendidihan yang terjadi pada proses *pool boiling* dengan kekasaran permukaan spesimen yang berbeda (variasi kedalaman). Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa dengan meningkatnya nilai kekasaran pada suatu spesimen, maka meningkat pula nilai dari effisiensinya. Sehingga diperoleh hasil yakni spesimen dengan nilai kekasaran 7,169 μm memiliki tingkan efisiensi yang paling tinggi yakni sebesar 27,95%, dan tingkat efisiensi terendah yakni pada spesimen dengan nilai kekasaran 0,52 μm memiliki tingkat efisiensi hanya 15,17 %. Pada spesimen dengan kekasaran 3,311 μm memiliki tingkat efisiensi sebesar 20,23 % dan pada spesimen dengan kekasaran 5,075 μm memiliki tingkat efisiensi sebesar 25,05 %.

Semakin kasar suatu permukaan maka semakin tinggi efisiensi yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan kondisi permukaan *heater* mempengaruhi proses perpindahan panas. Karena semakin kasar

suatu permukaan *heater* maka akan mempercepat pembentukan inti gelembung, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk mendidihkan air akan semakin cepat. Semakin cepat waktu yang dibutuhkan untuk mendidihkan air maka nilai dari efisiensi pendidihan akan semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan teori pada persamaan berikut :

$$E_{\text{listrik}} = V \times i \times \Delta t \quad (4)$$

Dimana :

V = Voltase (volt)

I = Arus listrik (Ampere)

Δt = Selisih waktu (detik)

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

Dimana:

m = massa air (kg)

C_p = Kalor jenis air (J/kg °C)

ΔT = Temperatur (°C)

$$\text{Effisiensi} = \frac{\text{Energi output}}{\text{Energi input}} = \frac{Q_{\text{kolor}}}{E_{\text{listrik}}} \times 100\% \quad (6)$$

Dimana:

Q_{kolor} = Energi yang diserap oleh air

E_{listrik} = Energi yang dihasilkan oleh *heater*

KESIMPULAN

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

1. Adanya hubungan antara peningkatan perbedaan temperature (ΔT_{excess}) dengan heat flux adalah berbanding lurus sebagai mana yang telah dijelaskan pada persamaan 3, dimana semakin tinggi nilai ΔT_{excess} maka nilai heat flux yang

didapatkan juga akan semakin tinggi. Ukuran atau kedalaman lubang pada suatu permukaan *heater* juga mempengaruhi nilai dari *heat flux* dan juga *heat transfer coefficient* serta efisiensi. Semakin besar kedalaman lubang dari suatu permukaan maka kekasaran permukaan yang berupa nilai R_a juga semakin besar. Dengan semakin besarnya nilai R_a , maka sesuai dengan persamaan 3 akan meningkatkan nilai dari *heat transfer coefficient* karena R_a berbanding lurus dengan h (*heat transfer coefficient*). Dengan demikian juga akan meningkatkan nilai dari *heat flux* karena nilai *heat transfer coefficient* berbanding lurus dengan *heat flux*.

2. Ukuran kedalaman suatu lubang pada permukaan plat suatu pemanas akan mempengaruhi nilai dari kekasaran permukaan (R_a), dimana semakin dalam ukuran suatu lubang pada plat pemanas, maka nilai dari kekasaran permukaan yang didapatkan akan semakin tinggi, sehingga semakin tingginya nilai kekasaran suatu permukaan akan mempengaruhi nilai *heat transfer coefficient* (HTC) dan *heat flux*. Hubungan ini dapat dilihat pada persamaan 2 dimana hubungan antara HTC dengan nilai R_a adalah berbanding lurus, dengan hubungan ini akan menghasilkan nilai HTC yang besar. Dengan nilai HTC yang semakin besar, nilai *heat flux* yang didapatkan juga akan semakin besar menurut persamaan 3, dimana hubungan antara nilai HTC dan *heat flux* adalah berbanding lurus.
3. Dari pembahasan dan analisa yang telah dilakukan pada bab sebelumnya, didapatkan bahwa nilai efisiensi dipengaruhi oleh waktu, dimana semakin kasar suatu permukaan maka waktu yang

diperlukan untuk mendidihkan fluida air dalam wadah yang diteliti akan semakin singkat. Oleh karena itu semakin singkatnya waktu yang dibutuhkan untuk memanaskan fluida air maka nilai efisiensi yang didapatkan akan semakin besar, hal ini dikarenakan hubungan waktu pemanasan dengan efisiensi pendidihan adalah berbanding terbalik, sebagaimana yang tertera pada persamaan 4 dan 6.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Collier, John G. 1993. *Convective Boiling and Condensation*. Clarendon Press (3rd ed). United Kingdom: Oxford University Press
- [2] Cengel, Yunus A. 2002. *Heat Transfer : A Practical Approach Second Edition*. New York : McGraw-Hill.
- [3] Cengel, Yunus A. 2002. *Thermodynamics : An Engineering Approach Fourth Edition*. New York : McGraw-Hill.
- [4] Frank P. Incropera dan David P. Dewitt. 1996. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Fifth Edition*. New York : John Wiley and Sons Pandey.
- [5] Hendricks, Terry J., et. al. 2009. *The Influence of Surface Roughness on Nucleate Pool boiling Heat Transfer*.
- [6] Jones, Benjamin J., et. al. 2009. *The Influence of Surface Roughness on Nucleate Pool boiling Heat Transfer*. Birck and NCN Publication.
- [7] Kothhof, Stevan., et al. 2006. *Heat Transfer and Bubble Formation in Pool boiling : Effect of Basic Surface Modification for Heat Transfer Enhancement*.
- [8] Said, Sudirman., Dkk. 2014. *Outlook Energi Indonesia 2014*. Jakarta.