

Effect of Surface Roughness on Pool Boiling Heat Transfer Coefficient

Muhammad Dimyati Nashrullah^{1*}, Antonius Adhika Angkasa², Moses Gregory Ginting², Adhika Widyaparaga², Indro Pranoto²

¹Prodi Magister Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

²Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia

*Corresponding author: muhammad.dimyati.nashrullah@gmail.com

Abstract. This study aims to determine the effect of variations in surface roughness on the performance of the pool boiling heat transfer coefficient. Experiments were carried out using copper with a diameter of 30 mm polished using sandpaper with various roughness variations. Obtained the average roughness (R_a) surface of the test specimens ranged from $0,04 \mu\text{m}$ – $0,22 \mu\text{m}$. De-ionized water are used as working fluids and experiments run at atmospheric pressure and saturation temperature. The results showed that the copper surface with an average roughness (R_a) of $0,22 \mu\text{m}$ had the best pool boiling performance marked by the highest heat transfer coefficient. In addition, the specimens with an average surface roughness of $0,22 \mu\text{m}$ have the highest bubble nucleation site compared to other specimens.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi kekasaran permukaan pada unjuk kerja *pool boiling heat transfer coefficient*. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan tembaga dengan diameter 30 mm yang dipoles menggunakan amplas dengan berbagai variasi kekasaran. Didapatkan hasil kekasaran rata – rata (R_a) permukaan benda uji berkisar $0,04 \mu\text{m}$ – $0,22 \mu\text{m}$. Aquades digunakan sebagai fluida kerja dan eksperimen berjalan pada tekanan atmosfer dan temperatur saturasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa permukaan tembaga dengan kekasaran rata-rata $0,22 \mu\text{m}$ mempunyai unjuk kerja *pool boiling* paling baik ditandai dengan nilai *heat transfer coefficient* paling tinggi. Selain itu, pada benda uji dengan kekasaran permukaan rata – rata (R_a) $0,22 \mu\text{m}$ memiliki *bubble nucleation site* yang paling banyak dibandingkan dengan benda uji lainnya.

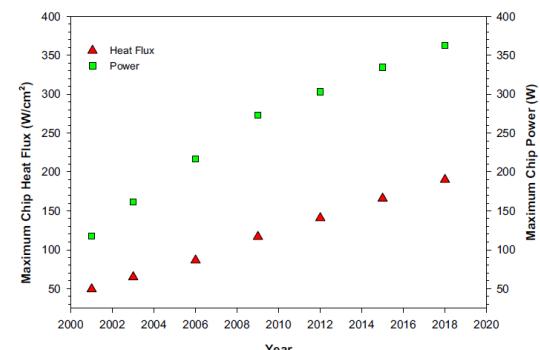
Kata kunci: *pool boiling, heat transfer coefficient, kekasaran permukaan.*

© 2019. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

1. Pendahuluan

Banyak perusahaan modern saat ini yang proses industriannya memerlukan sebuah alat pemindah panas atau *heat exchanger* dalam menjalankan kegiatannya. Penggunaan alat pemindah panas ini dapat ditemui seperti pada industri minyak dan gas bumi, industri kimia, dan industri elektronik. Penggunaan alat pemindah panas dengan performa yang tinggi sebagai sarana pemindahan energi kalor dari satu tempat ke tempat lain atau ditujukan sebagai alat pendinginan semakin banyak digunakan seiring dengan meningkatnya beban kerja alat pemindah panas. Pada industri elektronik, perkembangan teknologi mengakibatkan pembuatan komponen elektronik yang kecil dapat dilakukan. Pengembangan produk seperti mikroprosesor dengan ukuran transistor yang semakin kecil namun memiliki beban panas yang

tinggi, menuntut adanya sebuah alat pemindah panas semakin efisien dalam memindahkan panas.



Gambar 1. Peningkatan *heat flux* pada microprocessor seiring berkembangnya teknologi elektronik [1].

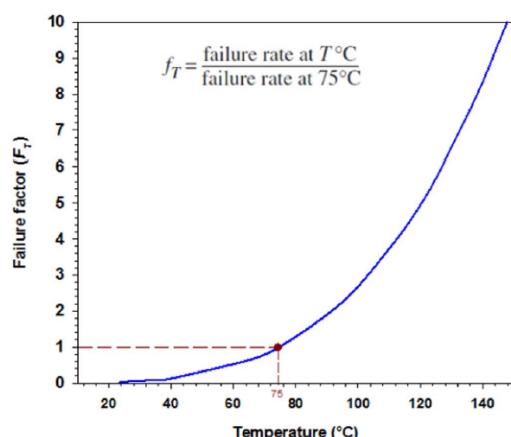
Prosesor yang semakin hari semakin dituntut performanya dengan ukuran transistor yang semakin kecil, mengakibatkan naiknya *heat flux*

Nomenklatur

A	Luas permukaan benda uji (m^2)
c	Specific heat fluida kerja ($J/kg \cdot ^\circ C$)
d	Diameter permukaan benda uji (m)
h	Heat transfer coefficient ($kW/m^2 \cdot ^\circ C$)
m	Massa fluida kerja (kg)
q''	Heat flux (kW/m^2)
q_{ch}	Daya cartridge heater (kW)
q_{nett}	Daya netto yang masuk ke dalam sistem (kW)

q_L	Heatloss yang keluar dari system (kW)
T_1	Temperatur awal fluida kerja ($^\circ C$)
T_2	Temperatur akhir fluida kerja ($^\circ C$)
T_{sat}	Temperatur saturasi fluida kerja ($^\circ C$)
T_{ther}	Temperatur yang terbaca oleh thermocouple ($^\circ C$)
T_w	Temperatur permukaan benda uji ($^\circ C$)
t	Waktu (s)

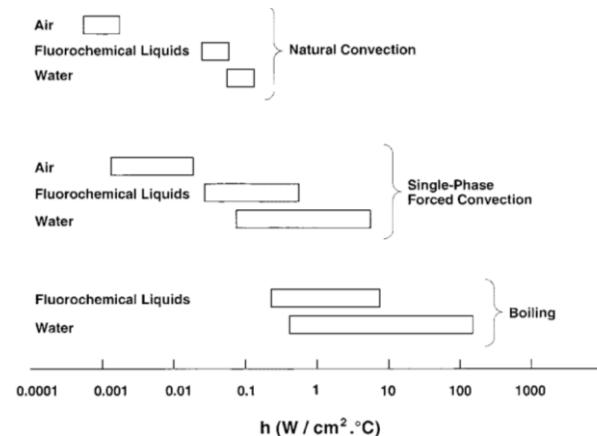
akibat area pelepasan panas yang kecil. Berdasarkan prediksi yang dilakukan oleh *International Electronics Manufacturing Initiative* (iNEMI) pada tahun 2004, sebuah prosesor pada tahun 2020 akan beroperasi pada *power* sebesar 360 W dan *heat flux* sebesar 190 W/cm² di mana nilai *power* dan *heat flux* tersebut selalu naik dibandingkan dengan tahun-tahun sebelumnya, prediksi ini dapat dilihat pada Gambar 1. *Heat flux* yang tinggi ini akan menyebabkan menurunkan keandalan prosesor sehingga umur prosesor akan semakin pendek bahkan beresiko dapat menyebabkan kegagalan kerja prosesor. Bahkan tingkat kegagalan kerja prosesor ini akan meningkat secara eksponensial ketika temperatur prosesor melebihi 75 °C, hal ini sesuai dengan yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Oleh karena itu, sebuah sistem pendingin yang efektif untuk menghilangkan *heat flux* yang tinggipun mutlak untuk dikembangkan.



Gambar 2. Tingkat faktor kegagalan perangkat elektronik terhadap temperatur [1].

Banyak penelitian yang dilakukan mengenai *pool boiling* sebagai salah satu metode pendinginan dua fasa karena kemampuan memindahkan panas yang lebih tinggi dari pada metode pendinginan satu fasa maupun pendinginan alami (natural cooling). Perbandingan kemampuan pendinginan antara ketiga sistem tersebut ditunjukkan oleh Gambar 3. Masing-masing peneliti berupaya mencari cara untuk meningkatkan *Heat transfer coefficient*

(HTC) pada rezim *nucleate boiling* di fenomena *pool boiling*. Para peneliti juga berupaya untuk meningkatkan batasan nilai tertinggi HTC yaitu ketika berada di *Critical Heat flux* (CHF) [2]. Banyak teknik yang telah dilakukan untuk meningkatkan HTC dan CHF pada *pool boiling*, teknik tersebut seperti penggunaan variasi fluida kerja [3,4], penggunaan nanofluida [5-8], pengaturan kekasaran permukaan pemanas [9-12], modifikasi geometri permukaan pemanas [3,13,14], pengaturan orientasi permukaan [6,15], pengaplikasian medan magnet [16], pengaplikasian getaran [17], dan *coating* partikel mikro dan nano pada permukaan pemanas [18-21].

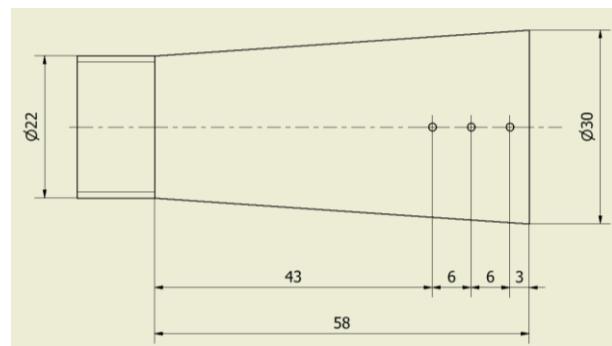


Gambar 3. Heat transfer coefficient untuk natural, single-phase forced convection dan boiling untuk fluida kerja yang berbeda [22].

Han Kim dkk. [21] melakukan penelitian pengaruh pengaplikasian *microporous coating* pada plat tembaga terhadap performa *pool boiling* dengan menggunakan fluida kerja berupa refrigeran R-123. Penelitian dilakukan pada kondisi temperatur saturasi fluida kerja pada tekanan atmosfer. Material *coating* yang digunakan adalah partikel aluminium. Pada penelitian Han Kim dkk. [21], didapatkan hasil peningkatan HTC dan CHF pada masing-masing benda uji yang dilakukan *coating* dibandingkan dengan benda uji plat datar tanpa *coating*, dengan peningkatan HTC paling tinggi

sebesar 270% pada benda uji dengan diameter *coating* 8 – 12 μm , sedangkan peningkatan CHF paling tinggi yaitu pada benda uji dengan diameter *coating* 8 – 12 μm yakni sebesar 40% dibandingkan benda uji tanpa coating. Walunj dan Sathyabhama [14] melakukan percobaan untuk membandingkan performa HTC dan CHF pada berbagai modifikasi permukaan berbentuk channel menggunakan aquades (*de-ionized water*) sebagai fluida kerja. Pada percobaan ini digunakan empat jenis geometri channel dengan benda uji berjumlah enam buah yang masing – masing materialnya adalah tembaga. Jenis geometri *channel* yang digunakan adalah *rectangular microchannel*, *parabolic microchannel*, *stepped microchannel* dan plat datar. Pada percobaan ini didapatkan hasil yaitu terjadi peningkatan CHF paling tinggi pada benda uji *rectangular microchannel* sebesar 182,8% dibandingkan dengan plat datar pada *wall superheat* (ΔT_{excess}) 11,7°C. Kim dkk. [13] melakukan penelitian pengaruh modifikasi permukaan berupa susunan mikro struktur berupa silinde mikro yang berada pada permukaan benda uji dengan material benda uji berupa silikon. Dalam penelitian ini, terdapat 13 benda uji berbahan silikon, di mana satu benda uji memiliki permukaan datar dan 12 lainnya memiliki struktur mikro yang dibuat menggunakan teknik *micro electro chemical system* (MEMS). Dari penelitian tersebut dapat diketahui bahwa penggunaan struktur mikro akan meningkatkan performa HTC dan CHF dibandingkan dengan plat datar. Penggunaan mikro struktur pada benda uji memiliki nilai CHF paling tinggi yaitu 2165 kW/m^2 di 53,39 K, di mana lebih tinggi 310% dari nilai CHF plat datar yang sebesar 697,8 kW.m^{-2} di 42,3 K. Untuk performa HTC, benda uji dengan mikro struktur memiliki nilai lebih dari 350% dari nilai HTC benda uji plat datar. Junsuh Kim dkk. [10] telah melakukan penelitian pengaruh variasi kekasaran permukaan benda uji dimana penelitian benda uji dengan kekasaran $R_a = 2,36 \mu\text{m}$ memiliki nilai CHF paling tinggi yaitu 1625 kW/m^2 dimana hasil ini dua kali lipat lebih dibandingkan CHF pada benda uji dengan kekasaran $R_a = 0,041 \mu\text{m}$ dimana sebesar 775 kW/m^2 .

Melihat potensi penggunaan *pool boiling system* serta penerapan modifikasi permukaan yang memiliki tingkat efektivitas yang tinggi pada performa perpindahan panas, maka perlu dilakukan penelitian terkait pengaruh modifikasi permukaan salah satunya dengan melakukan variasi kekasaran permukaan benda uji. Pada penelitian kali ini akan membahas perlakuan modifikasi permukaan berupa kekasaran permukaan benda uji terhadap fenomena *pool boiling* yang terjadi.



Gambar 4. Bentuk benda uji

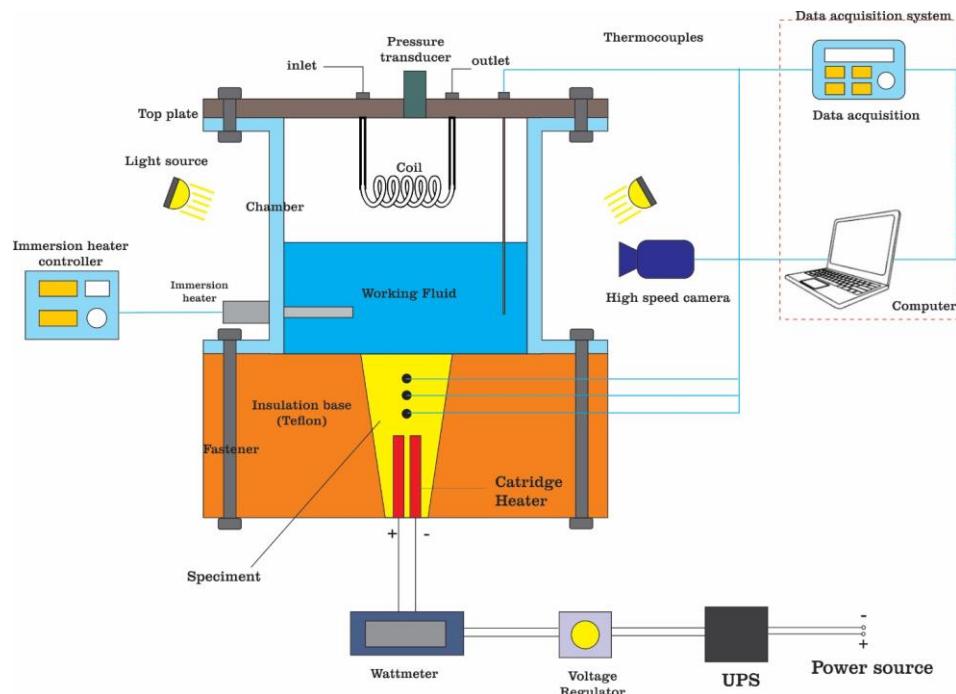
2. Metode Penelitian

2.1 Pembuatan Modifikasi Permukaan

Benda uji berupa tembaga berbentuk silinder konis dengan penampang permukaan berdiameter 30 mm. Bentuk benda uji dapat dilihat pada Gambar 4. Pada penelitian ini, benda uji berjumlah empat buah dimana dilakukan modifikasi kekasaran permukaan. Masing – masing perlakukan benda uji dapat dilihat pada Tabel 1. Setelah dilakukan modifikasi kekasaran, masing – masing benda uji kemudian diukur tingkat kekasarannya menggunakan stillo profilometer. Kemudian masing – masing benda uji diambil peneletrasi permukaannya menggunakan mikroskop.

Tabel 1. Deskripsi benda uji

No.	Benda Uji	Perlakuan Kekasaran
1	A-600	Diampelas menggunakan kertas amplas dengan grit 600. Pengamplasan dilakukan pada kondisi air yang mengalir.
2	A-2000	Diampelas menggunakan amplas dengan grit 600, 800, 1000, 1500 dan 2000 secara berurutan. Pengamplasan dilakukan pada kondisi air yang mengalir.
3	A-5000	Diampelas menggunakan amplas dengan grit 600, 800, 1000, 1500, 2000, dan 5000 secara berurutan, kemudian di- <i>polish</i> menggunakan aerosol. Pengamplasan dilakukan pada kondisi air yang mengalir.



Gambar 5. Skema Alat Penelitian *Pool boiling*

2.2 Fasilitas Eksperimen

Alat eksperimen *pool boiling* terdiri atas bagian utama berupa *heater* dan *boiling chamber*. *Heater* terbagi menjadi dua buah jenis yaitu *main heater* dan *immersion heater*. *Main heater* berfungsi sebagai penyuplai kalor ke benda uji yang berada di dalam *boiling chamber*. *Boiling chamber* berfungsi sebagai wadah fluida kerja dan benda uji yang akan dilakukan pengamatan *pool boiling*. Kalor yang diterima oleh benda uji kemudian akan ditransferkan ke fluida kerja sehingga fluida kerja akan berubah menjadi uap yang bergerak ke atas menuju *condenser* yang berada di dalam *boiling chamber*. Kalor yang ada pada uap lalu berpindah ke fluida yang mengalir di dalam *condenser* sehingga uap akan terkondensasi lalu jatuh ke bawah. Aliran fluida kerja di dalam *condenser* ini akan disuplai oleh saluran dan reservoir sederhana dengan penggerak fluida kerja menggunakan pompa.

Terdapat empat buah *thermocouple* tipe K yang digunakan di dalam alat eksperimen ini. Tiga buah *thermocouple* dipasang di dalam benda uji dan satu *thermocouple* dipasang di dalam *boiling chamber*. *Thermocouple* yang dipasang di dalam benda uji bertujuan untuk mengukur temperatur permukaan benda uji, sedangkan *thermocouple* yang dipasang di atas benda uji bertujuan untuk mengukur *bulk temperature* fluida kerja akibat proses *pool boiling*. Masing – masing *thermocouple* ini kemudian dihubungkan dengan sistem data akuisisi untuk

merekam data perubahan temperatur selama proses berlangsung. Selain itu, sebuah *high speed camera* diletakkan digunakan untuk melihat dan merekam mekanisme pembentukan gelembung dan formasi gelembung pada benda uji. Terdapatpula sebuah sistem penerangan yang akan menyuplai cahaya yang diarahkan ke dalam *boiling chamber* sehingga proses *pool boiling* akan lebih mudah untuk diamati. Skema fasilitas eksperimen *pool boiling* ini dapat dilihat pada Gambar 5.

2.3 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini digunakan fluida kerja berupa aquades. Pada saat proses eksperimen berlangsung, fluida kerja di dalam *boiling chamber* akan dijaga temperaturnya pada temperatur saturasi dan tekanannya pada tekanan atmosfer. Untuk menjaga temperatur pada temperatur saturasi, digunakan *immersion heater* yang dapat menaikkan temperatur fluida kerja secara otomatis ketika temperatur fluida kerja turun di bawah temperatur saturasinya. Sedangkan sebuah *pressure transducer* yang digunakan untuk mengukur tekanan di dalam *boiling chamber* dan menjaga tekanan agar tetap berada pada tekanan atmosfer.

Pada saat eksperimen, daya dari *cartridge heater* dinaikkan bertahap sebesar 5 – 40 Watt. Pembacaan daya dilakukan menggunakan *wattmeter* sedangkan pengaturan daya menggunakan *voltage regulator*. Pengambilan data temperatur dilakukan 5 menit setelah *cartridge heater* dijalankan sesuai daya yang diinginkan. Hal ini bertujuan agar temperatur benda

uji mencapai keadaan *steady*. Pembacaan temperatur oleh masing – masing *thermocouple* akan digunakan untuk mencari perkiraan temperatur benda uji sebagai hasil akhirnya. Perkiraan temperatur pada permukaan benda uji, dihitung menggunakan persamaan

$$T_w = T_{ther} - \frac{q'' \cdot \Delta x}{k} \quad (1)$$

dimana

$$q'' = \frac{q_{nett}}{A} \quad (2)$$

dan

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3)$$

Sedangkan untuk *heat transfer coefficient*, dihitung dengan menggunakan persamaan

$$h = \frac{q''}{T_w - T_{sat}} \quad (4)$$

Sebelum dilakukannya pengambilan data penelitian, dilakukan perhitungan *heatloss* yang keluar dari sistem. Perhitungan *heatloss* dilakukan dengan menaikkan temperatur fluida kerja pada *boiling chamber* dengan cara menyetel daya *cartridge heater* pada nilai tertentu dan dilakukan pada rentan waktu tertentu. Perubahan temperatur fluida kerja inilah yang kemudian digunakan untuk perhitungan *heatloss*. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, *heatloss* yang keluar dari sistem sebesar 17%. *Heatloss* dihitung menggunakan persamaan

$$q_L = q_{ch} - \frac{m \cdot c \cdot (T_1 - T_2)}{t} \quad (5)$$

Dengan menghitung *heatloss* yang keluar dari sistem maka daya netto dapat diketahui dengan persamaan

$$q_{nett} = q_{ch} \cdot 17\% \quad (6)$$

2.4 Sistem Akuisisi Data

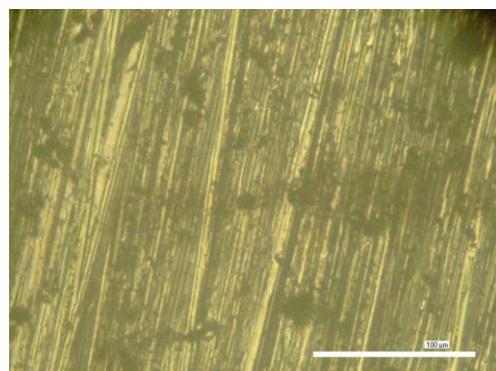
Seluruh data temperatur melalui *thermocouple* diperoleh menggunakan data akuisisi berupa NI cDAQ-9174 dan NI 9213. Seluruh data temperatur tersebut diperoleh menggunakan software LabVIEW. Sebelum dilakukan eksperimen, masing – masing *thermocouple* dilakukan kalibrasi terlebih dahulu. Berdasarkan spesifikasi, *thermocouple* mempunyai tingkat akurasi sebesar $\pm 0,5$ °C.

3. Hasil dan Diskusi

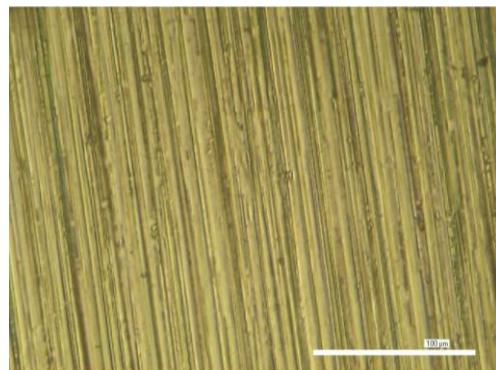
3.1 Modifikasi Permukaan

Masing – masing benda uji dilakukan modifikasi permukaan dengan cara seperti yang tertera pada Tabel 1. Gambar 6. menunjukkan hasil

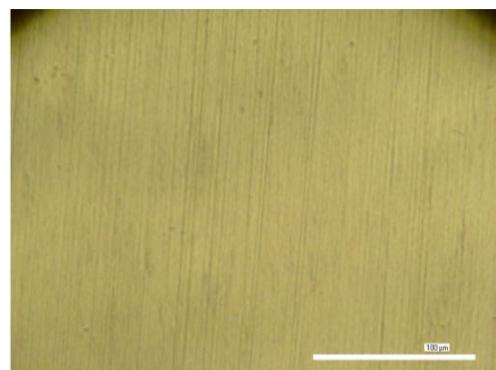
modifikasi kekasaran pada masing – masing benda uji. Hasil pencitraan menunjukkan terbentuknya goresan paralel pada permukaan benda uji. Pada benda uji A-600, goresan tersebut terlihat lebih tidak teratur dibandingkan dengan benda uji A-2000 dan A-5000. Selain itu, pada benda uji A-600 terbentuk pula beberapa goresan yang lebih besar dari pada goresan yang lain disampingnya. Terlihat jelas pula goresan pada benda uji A-600 dan A-2000 jauh lebih besar dibandingkan dengan goresan yang terdapat pada permukaan benda uji A-5000.



(a)

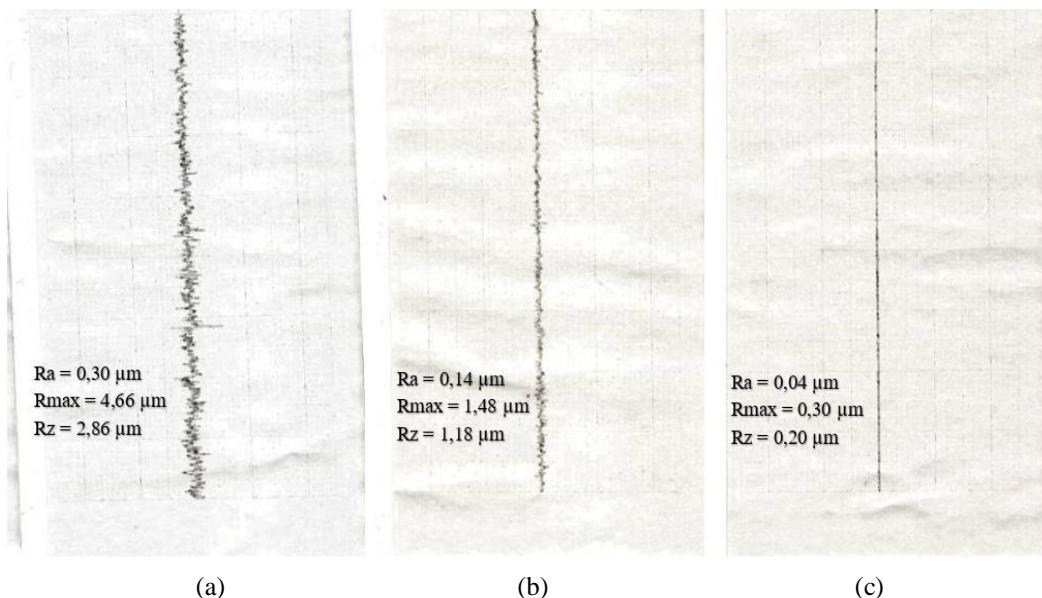


(b)



(c)

Gambar 6. Pencitraan permukaan benda uji (a) A-600, (b) A-2000, dan (c) A-5000 pada perbesaran 100x.



Gambar 7. Hasil pengukuran kekasaran permukaan benda uji (a) A-600, (b) A-2000, dan (c) A-5000 menggunakan Spillo profilometer.

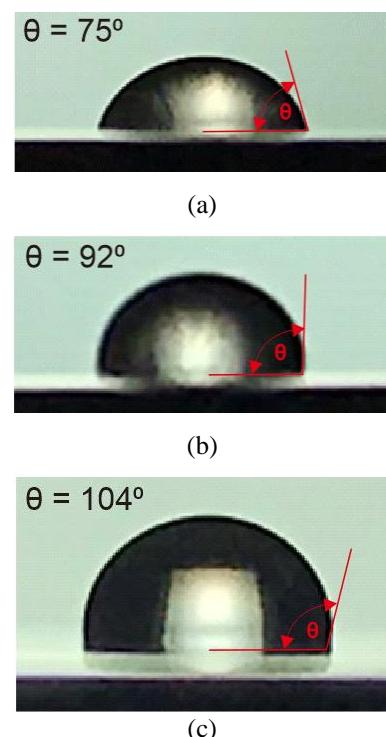
Goresan pada masing – masing benda uji terkonfirmasi dengan adanya hasil pengukuran kekasaran menggunakan stillo profilometer. Gambar 7 menunjukkan hasil pengukuran kekasaran permukaan masing – masing benda uji. Hasil pengukuran kekasaran menunjukkan bahwa permukaan benda uji memiliki nilai terbesar secara berurutan yaitu A-600, A-2000 dan kemudian A-5000.

Kekasaran permukaan ini akan mempengaruhi kemampuan benda uji untuk bersentuhan langsung dengan fluida kerja. Gambar 8 menunjukkan hasil sudut kontak pada masing – masing benda uji. Benda uji dengan kekasaran yang tinggi akan memiliki nilai sudut kontak yang kecil. Nilai sudut kontak yang kecil ini menunjukkan semakin baiknya kemampuan permukaan benda uji untuk terbasahi oleh fluida kerja. Dengan meningkatnya kemampuan permukaan benda uji untuk terbasahi oleh fluida kerja, maka semakin besar pula luasan kontak antara permukaan benda uji dengan fluida kerja. Begitu juga sebaliknya, benda uji dengan kekasaran permukaan yang rendah akan memiliki nilai sudut kontak yang besar. Nilai sudut kontak yang lebih besar ini akan mengakibatkan luasan kontak permukaan dengan fluida kerja juga lebih kecil.

3.2 Kurva Pool boiling

Gambar 9 menunjukkan perbandingan temperatur permukaan benda uji ketika dilakukan eksperimen *pool boiling* dengan menggunakan fluida kerja aquades pada keadaan temperatur saturasi di tekanan atmosfer. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa benda uji A-600 dimana dengan

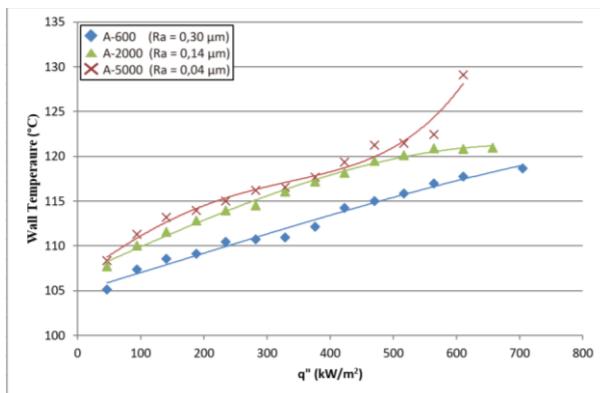
tingkat kekasaran paling tinggi mempunyai performa untuk memindahkan panas lebih baik dibandingkan dengan benda uji A-2000 dan kemudian diikuti oleh benda uji A-5000, ditandai dengan temperatur permukaan benda uji yang paling rendah selama eksperimen berlangsung.



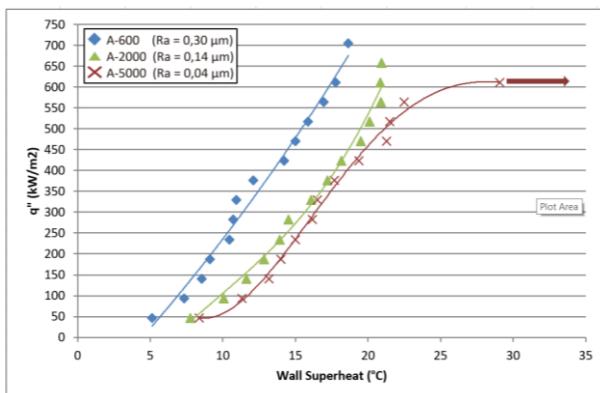
Gambar 8. Sudut kontak pada benda uji (a) A-600, (b) A-2000, dan (c) A-5000 menggunakan fluida berupa aquades.

Perbedaan temperatur pada permukaan benda uji A-2000 dibandingkan benda uji A-5000 memiliki nilai yang lebih rendah rata – rata sebesar

1,72 °C. Perbedaan temperatur paling tinggi antara benda uji A-2000 dan A-5000 sebesar 8,2 °C pada *heat flux* sebesar 610,59 kW/m². Pada benda uji A-600 dan A-2000 permukaan benda uji memiliki perbedaan temperatur rata – rata sebesar 3,79 °C. Perbedaan temperatur paling tinggi antara benda uji A-600 dan A-2000 sebesar 5,12 °C pada *heat flux* sebesar 328,78 kW/m². Sedangkan jika benda uji A-600 dan A-5000 dibandingkan, perbedaan temperatur rata – rata sebesar 5,51 °C dengan perbedaan temperatur terbesar pada 610,59 kW/m² yaitu sebesar 11,3 °C.



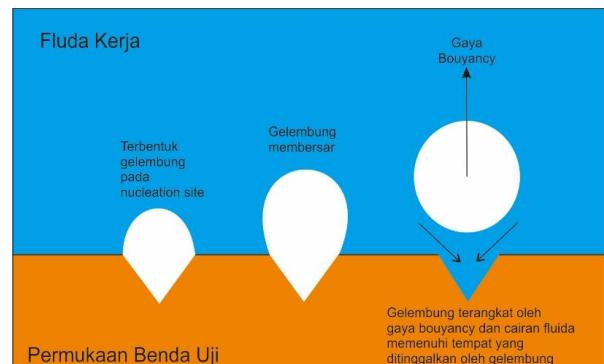
Gambar9. Grafik temperatur pemukaan benda uji terhadap *heat flux* yang melewati benda uji.



Gambar 10. Kurva *pool boiling* pada masing – masing benda uji.

Kurva *pool boiling* pada masing – masing benda uji dapat dilihat pada Gambar 10. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada benda uji A-5000 mengalami kenaikan temperatur signifikan pada *heat flux* setelah 610,59 kW/m². Kenaikan temperatur signifikan ini dilambangkan dengan panah ke kanan. Fenomena ini mengindikasikan bahwa benda uji A-5000 akan mengalami *critical heat flux* (CHF) dan kemudian meninggalkan fase *nucleate boiling* lalu menuju fase *film boiling*. Fenomena CHF pada benda uji A-5000 ini mengindikasikan bahwa benda uji tersebut hanya akan optimal untuk memindahkan panas ketika *heat*

flux yang melewatinya dibawah 610,59 kW/m². Sedangkan pada benda uji A-600 dan A-2000, indikasi terjadinya CHF masih belum terlihat.



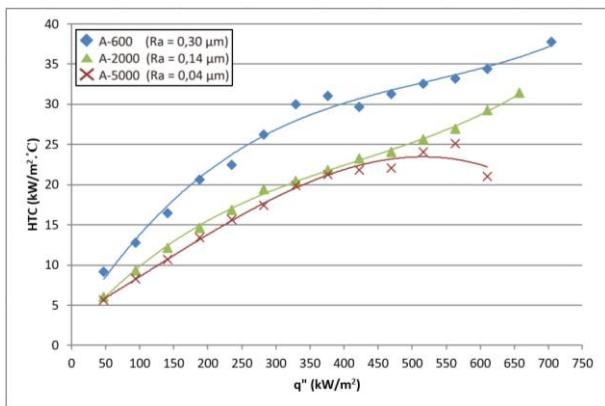
Gambar 11. Proses pembentukan gelembung.

Dari data yang telah disampaikan, jelas bahwa dengan meningkatkan kekasaran pada permukaan benda uji maka sudut kontak akan mengecil, dimana ini akan mengakibatkan naiknya nilai CHF. Dengan meningkatnya kekasaran permukaan, temperatur permukaan benda uji akan semakin baik untuk melepas panas dimana akan mengakibatkan penurunan temperatur permukaan benda uji. Penurunan temperatur permukaan benda uji dan naiknya nilai CHF pada permukaan benda uji dengan kekasaran yang lebih tinggi ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya [9-11].

3.3 Karakteristik Heat Transfer Coefficient Pool Boiling

Proses terbentuknya gelembung pertama kali pada eksperimen *pool boiling* menandakan bahwa eksperimen sudah memasuki fase *nucleate boiling*. Ketika temperatur permukaan benda uji sudah melampaui temperatur saturasi fluida kerja, gelembung gelembung kecil akan terbentuk pada permukaan benda uji sebagai akibat berubahnya fase fluida kerja dari cair ke uap. Pembentukan gelembung ini banyak terjadi di rongga – rongga atau goresan yang terdapat pada permukaan benda uji. Tempat terbentuknya gelembung inilah yang dinamakan dengan *bubble nucleation site*. Gelembung yang masih menempel pada permukaan benda uji akan membesar seiring semakin banyaknya cairan fluida yang berubah fasa menjadi uap. Ketika gelembung sudah mencapai ukuran atau diameter tertentu, gelembung akan lepas dari permukaan benda uji dan kemudian terangkat keatas, proses ini disebabkan oleh gaya bouyancy yang semakin besar seiring bertambahnya ukuran gelembung. Seketika gelembung tersebut terangkat ke atas, cairan fluida kerja sekeliling gelembung

akan mengisi tempat kosong yang ditinggalkan oleh gelembung dan proses pembentukan gelembung terjadi kembali. Ilustrasi pembentukan gelembung dapat dilihat pada Gambar 11.

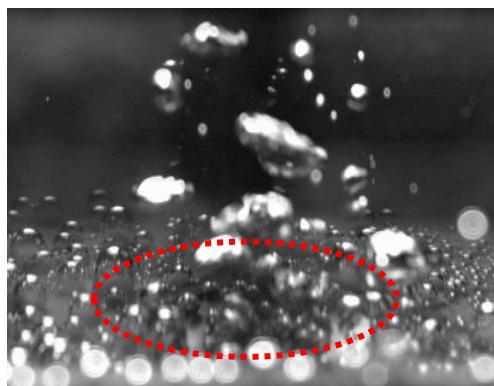


Gambar 12. Kurva *pool boiling* pada masing – masing benda uji.

Gambar 12 menunjukkan nilai *pool boiling heat transfer coefficient* selama eksperimen pada benda uji A-600, A-2000, dan A-5000. Dari gambar tersebut menunjukkan bahwa nilai HTC paling tinggi secara berurutan adalah A-600, A-2000 dan kemudian A-5000. Nilai HTC pada benda uji A-600 lebih tinggi rata – rata 25,2% dibandingkan dengan benda uji A-2000 dan Nilai HTC pada benda uji A-2000 lebih tinggi rata – rata 9% dibandingkan dengan benda uji A-5000. Sedangkan nilai HTC pada benda uji A-600 lebih tinggi rata – rata 32,2% dibandingkan dengan benda uji A-5000. Selisih HTC paling tinggi benda uji A-600 dibandingkan dengan benda uji A-2000 adalah 33,7% lebih tinggi pada *heat flux* 46,96 kW/m². Untuk selisih paling tinggi benda uji A-2000 dibandingkan dengan benda uji A-5000 adalah 28,2% lebih tinggi pada *heat flux* 610,59 kW/m². Sedangkan untuk selisih paling tinggi benda uji A-600 dibandingkan dengan benda uji A-5000 adalah 38,9% lebih tinggi pada *heat flux* 610,59 kW/m². Dari data yang telah dipaparkan, diketahui bahwa benda uji dengan tingkat kekasaran lebih tinggi memiliki nilai *heat transfer coefficient* (HTC) yang lebih tinggi pula.

Nilai HTC yang tinggi pada benda uji dengan permukaan kasar ini disebabkan oleh banyaknya *bubble nucleation site* yang terbentuk di permukaan benda uji. Seperti yang terlihat pada Gambar 6, goresan atau rongga pada permukaan benda uji yang di permukaan kasar lebih banyak dan berukuran lebih besar dibandingkan dengan goresan atau rongga pada benda uji dengan permukaan halus. Goresan yang banyak inilah yang kemudian menjadi tempat terbentuknya gelembung ketika benda uji dilakukan eksperimen *pool boiling*. Dengan semakin banyaknya *bubble nucleation site* yang terbentuk

pada benda uji, maka semakin banyak pula gelembung yang terbentuk. Gelembung yang terbentuk inilah yang kemudian mengeluarkan panas dari benda uji. Oleh karena itu, dengan semakin banyaknya gelembung yang terbentuk, temperatur permukaan benda uji akan semakin rendah. Pada Gambar 13 menunjukkan gelembung yang terbentuk pada *heat flux* 46,96 kW/m² dimasing – masing permukaan benda uji A-600 memiliki jumlah yang lebih banyak dibandingkan dengan benda uji A-2000 dan A-5000. Pada gambar tersebut, garis merah putus putus menunjukkan permukaan benda uji.



(a)



(b)



(c)

Gambar 13. Gelembung pada permukaan benda uji (a) A-600, (b) A-2000, dan (c) A-5000 pada *heat flux* 37,87 kW/m².

4. Kesimpulan

Pada tulisan ini, telah dilakukan penelitian efek kekasaran permukaan terhadap fenomena *pool boiling*. Terdapat tiga buah benda uji dengan kekasaran permukaan rata – rata (R_a) 0,30 μm , 0,13 μm , dan 0,04 μm dengan masing – masing sudut kontaknya adalah 135°, 105°, dan 96°. Dapat disimpulkan bahwa :

- Benda uji dengan kekasaran rata – rata tinggi akan memiliki nilai CHF yang tinggi, begitu pula sebaliknya.
- Benda uji dengan kekasaran rata – rata tinggi akan memiliki nilai HTC yang tinggi pula, benda uji dengan $R_a = 0,30 \mu\text{m}$ memiliki nilai HTC paling tinggi yaitu 38,9% lebih besar dibandingkan dengan HTC pada benda uji dengan $R_a = 0,04 \mu\text{m}$ yaitu pada *heat flux* 610,59 kW/m^2 .
- *Bubble bubble nucleation site* pada benda uji dengan permukaan rata – rata tinggi memiliki jumlah yang paling banyak dibandingkan dengan benda uji dengan permukaan rata – rata lebih rendah.

5. Referensi

- [1] Murshed, S.M.S. and Nieto de Castro, C.A., 2017. A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, pp. 821–833.
- [2] Xie, S. et al., 2018. Review of critical-heat-flux enhancement methods. *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 122, pp. 275–289.
- [3] Deng, D. et al., 2016. Comparative experimental study on pool boiling performance of porous coating and solid structures with reentrant channels. *Appl. Therm. Eng.*, vol. 107, pp. 420–430.
- [4] Jin, L.W. et al., 2011. Saturated pool boiling heat transfer from highly conductive graphite foams. *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 14–15, pp. 2685–2693.
- [5] Salimpour, M.R. et al., 2017. An experimental study on deposited surfaces due to nanofluid pool boiling: Comparison between rough and smooth surfaces. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 88, pp. 288–300.
- [6] Dadjoo, M. et al., 2017. Influence of orientation and roughness of heater surface on critical heat flux and pool boiling heat transfer coefficient of nanofluid. *Appl. Therm. Eng.*, vol. 124, pp. 353–361.
- [7] Quan, X. et al., 2015. An experimental investigation of pool boiling heat transfer on smooth/rib surfaces under an electric field. *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 85, pp. 595–608.
- [8] Rostamian, F. and Etesami, N., 2018. Pool boiling characteristics of silica / water nano fluid and variation of heater surface roughness in domain of time. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 95, pp. 98–105.
- [9] Kim, J. et al., 2017. Effect of Surface Roughness on Pool Boiling Heat Transfer of Water on a Superhydrophilic Aluminum Surface. *Journal of Heat Transfer*, vol. 139, no. October, pp. 1–9.
- [10] Kim, J. et al., 2016. International Journal of Heat and Mass Transfer Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer at a heated surface having moderate wettability. *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 101, pp. 992–1002.
- [11] Jones, J. B. et al., 2015. The Influence of Surface Roughness on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer. *Journal of Heat Trasnfer*, vol. 131, pp. 1–14.
- [12] Kim, J.S. et all., 2018. Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer of water on hydrophobic surfaces. *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 118, pp. 802–811.
- [13] Kim, S.H. et all., 2015. Boiling heat transfer and critical heat flux evaluation of the pool boiling on micro structured surface. *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 91, pp. 1140–1147.
- [14] Walunj, A. and Sathyabham, A., 2018. Comparative study of pool boiling heat transfer from various microchannel geometries. *Appl. Therm. Eng.*, vol. 128, pp. 672–683.
- [15] Howard, A.H. and Mudawar, I., 1999. “Orientation effects on pool boiling critical heat flux (CHF) and modeling of CHF for near-vertical surfaces. *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 42, pp. 1665–1688.
- [16] Abdollahi, A. et al., 2017. Experimental analysis of magnetic field effect on the pool boiling heat transfer of a ferrofluid. *Appl. Therm. Eng.*, vol. 111, pp. 1101–1110.
- [17] Sathyabham, A. and Dinesh, A., 2017. Augmentation of heat transfer coefficient in pool boiling using compound enhancement techniques. *Appl. Therm. Eng.*, vol. 119, pp. 176–188.

- [18] Kiyomura, I.S. et al., 2017. An analysis of the effects of nanoparticles deposition on characteristics of the heating surface and ON pool boiling of water. *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 106, pp. 666–674.
- [19] Jun, S. et al., 2016. Enhancement of Pool Boiling Heat Transfer in Water Using Sintered Copper Microporous Coatings. *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 48, no. 4, pp. 932–940.
- [20] Sarangi, S. et all., 2015. Effect of particle size on surface-coating enhancement of pool boiling heat transfer. *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 81, pp. 103–113.
- [21] Kim, H.J. et al., 2015. Microporous Coatings to Maximize Pool Boiling Heat Transfer of Saturated R-123 and Water. *J. Heat Transfer*, vol. 137, no. 8, p. 081501.
- [22] Mudawar, I., 2001. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes. *IEEE Trans. Components Packag. Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 122–141.