

Multiple Droplets

Studi Eksperimental tentang Pengaruh Konduktivitas Material terhadap Fenomena *Multiple droplets* yang Menumbuk Permukaan Padat yang Dipanaskan pada Rejim *Nucleat Boiling* dan Temperatur *Critical Heat Flux*

Farid Subarkah¹, Windy Hermawan Mitrakusuma², Deendarlianto^{1,3}

Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Jalan Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia¹

Farid.subarkah@yahoo.co.id

Pascasarjana Teknik Mesin UGM, urusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung²

Pusat Studi Energi, Universitas Gadjah Mada, Sekip K-1A Kampus UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia³

Abstrak

Studi ekperimental kali ini dilakukan untuk mengetahui tentang pengaruh konduktivitas material terhadap fenomena *multiple droplets* yang menumbuk permukaan padat yang dipanaskan pada Rejim *Nucleat Boiling* dan temperatur sekitar *critical heat flux*. Material-material padat yang digunakan sebagai bahan uji pada penelitian ini adalah *stainless steel*, tembaga, dan aluminium karena material tersebut memiliki konduktivitas yang jauh berbeda satu sama lain. Substansi yang digunakan adalah air dengan diameter *droplet* sebanyak 10 tetes.

Kata Kunci: Seminar RETII, dua fasa, *spray cooling*, *multiple droplets*, konduktivitas.

1. Pendahuluan

Proses tumbukan antara tetesan air atau *droplet* dengan permukaan benda padat yang memiliki temperatur tinggi atau dipanaskan telah diterapkan pada berbagai banyak hal. Fenomena yang terjadi antara *droplet* dari bahan bakar yang bertumbukan dengan dinding-dinding ruang bakar pada *internal combustion engine* akan memengaruhi atomisasi dan pencampuran sebelum pembakaran. *Spray cooling system* yang digunakan pada proses *quenching*, reaksi inti nuklir, dan peralatan elektronik dimana *droplet* digunakan untuk mendinginkan permukaan material pada proses-proses tersebut. Contoh lain dari penerapan *droplet* adalah pada sistem pemadam kebakaran, *coating*, dan lain-lain

Spray cooling merupakan salah satu metode pendinginan yang menggunakan *multiple droplets* yang menumbuk material yang akan didinginkan. *Spray cooling* digunakan karena dengan menggunakan sistem ini maka kalor dari benda padat tersebut akan diserap dengan *heat flux* yang tinggi dan dapat mengontrol laju pendinginan yang diinginkan (Bernaddin dkk., 1995).

Konduksi adalah proses perpindahan energi dari partikel substansi yang memiliki energi lebih besar ke partikel substansi yang

berdekatan yang memiliki energi lebih kecil karena interaksi dari partikel-partikel tersebut. Konduksi dapat terjadi pada benda padat maupun fluida.

Besarnya kalor yang dipindahkan dari proses konduksi dipengaruhi oleh konduktivitas termal dari material tersebut. Konduktivitas termal merupakan salah satu sifat dari suatu material yang menunjukkan kemampuan material tersebut untuk menghantarkan kalor secara konduksi atau besarnya laju perpindahan panas dikalikan dengan tebal dari material per satuan luas permukaan per perbedaan temperatur.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh konduktivitas material pada fenomena *multiple droplets* yang menumbuk permukaan benda padat pada rejim *nucleat boiling*. Distribusi suhu yang terjadi pada permukaan benda padat yang bertumbukan dengan *droplets* menjadi bahasan utama pada makalah ini.

2. Metode

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian kali ini adalah :

1. Pengumpulan Data
2. Analisis Data

2.1 Metode Pengumpulan Data

Temperatur bahan uji dinaikkan dengan menggunakan *heater*. Kemudian Pengumpulan data akan dilakukan dengan mencatat temperatur pada tiap-tiap sensor yang telah dirangkai seperti pada Gambar 3 dengan menggunakan perangkat lunak pada komputer. Pencatatan temperatur tersebut dilakukan ketika suhu set telah tercapai dan stabil.

Parameter eksperimen yang akan dilakukan adalah :

1. Temperatur adalah Temperatur permukaan yang digunakan untuk pengujian adalah mulai dari 110⁰-150⁰ Celcius dengan kenaikan 10⁰ Celcius, temperatur tersebut dipilih karena temperatur tersebut terdapat pada atau sekitar rejim *nucleat boiling*.
2. Jumlah *droplets* yang dijatuhkan adalah 10 *droplets*.
3. Ketinggian jatuh droplet adalah 110 mm dari permukaan material padat.
4. Frekuensi droplet jatuh adalah sebesar 80 tetes per menit.
5. Benda uji yang digunakan adalah *Stainless Steel*, aluminium, dan tembaga.

2.2 Metode Analisis Data

Data dianalisa secara kualitatif dengan mengamati perubahan temperatur yang terjadi pada permukaan, T_a, T_m, dan T_{ab}. Data-data yang telah dikumpulkan atau dicatat oleh perangkat lunak pada komputer dipindahkan, diolah dan dibuat grafik yang menghubungkan antara temperatur *thermocouple* pada setiap bahan uji dan seting.

3. Hasil dan Pembahasan

Sesuai rumus konduksi yaitu

$$Q_{konduksi} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana :

- $Q_{konduksi}$ = Besarnya laju kalor konduksi
- k = konduktivitas termal material
- A = Luas permukaan
- Δx = Tebal dari material

Jika tebal material yang diukur sangat kecil, $\Delta x \rightarrow 0$, maka persamaan akan menjadi :

$$Q_{konduksi} = -k A \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots(2)$$

Sedangkan jika $\dot{Q}/A = \dot{q}$ (*heat flux*) maka

$$\dot{q} = -k \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots(3)$$

Sedangkan analisa kalor pada liquid menggunakan rumus

$$Q = m_{droplets} C_p (T_{sat} - T_{\infty})$$

Dimana :

- \dot{Q} = kalor yang diserap air
- C_p = kapasitas kalor air pada tekanan konstan
- T_{sat} = temperatur saturasi air
- T_{∞} = temperatur air pada sebelum dipanaskan atau pada suhu ruang

Persamaan (1) digunakan untuk menghitung kalor dari permukaan benda padat yang diserap oleh *droplets* sehingga tempratur *droplets* naik dari suhu ruangan menjadi suhu saturasi.

Sedangkan rumus

$$Q = m_{droplets} h_{fg}$$

dimana h_{fg} adalah entalpi penguapan.

Besarnya selisih antara temperatur *thermocouple* paling atas (T_a) (Gambar 3) dengan temperatur *thermocouple* paling bawah (T_b) atau ΔT_{ab} sangat dipengaruhi oleh nilai konduktivitas termal yang dimiliki oleh material tersebut. Seperti yang kita lihat pada hasil grafik di atas, Pada hasil data temperatur *stainless steel*, ΔT_{ab} paling besar dibandingkan dengan tembaga dan aluminium, Hal ini terjadi karena *stainless steel* memiliki konduktivitas termal terendah yaitu SEBESAR, sedangkan sebaliknya tembaga memiliki ΔT_{ab} terkecil karena tembaga memiliki nilai konduktivitas terbesar dibandingkan dengan *stainless steel* dan aluminium.

Proses perubahan temperatur pada permukaan sangat dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu yang C_p , h_{fg} , dan \dot{q} (*heat flux*), konduktivitas termal material padat. Pada penelitian ini, dapat kita asumsikan :

- Karena waktu yang diperlukan untuk menjatuhkan 10 *droplets* lebih sedikit dibandingkan waktu penguapan (*evaporation time*), jumlah massa untuk setiap pengujian pada temperatur set yang sama dengan bahan uji aluminium, *stainless steel*, maupun tembaga besarnya sama dengan 10 kali massa satu *droplet*. sehingga kalor yang digunakan untuk menaikkan suhu *droplets* dari temperatur awal (sama dengan temperatur ruang) menjadi temperatur saturasi, kurang lebih 100⁰C, dan saat proses evaporasi, sama untuk setiap pengujian.
- *Droplet* jatuh dengan luas kontak sama dengan luas lingkaran. *Droplets* menggunakan air sehingga harga C_p dan h_{fg} untuk air sama.
- Perubahan panas hanya mengalir secara vertikal dari sumber panas ke *droplets* tidak dipengaruhi oleh panas dari samping mengingat luas penampang spesimen lebih besar dari pada luas kontak *droplets*.

Pada Gambar 7, 10, 13, 16, dan 19, menunjukkan *stainless steel* mengalami penurunan suhu permukaan yang paling besar, lalu diikuti oleh

aluminium (5, 8, 11, 14, dan 17), sedangkan tembaga (6, 9, 12, 15, dan 18) memiliki penurunan suhu yang paling kecil. *Stainless steel* memiliki penurunan temperatur terbesar karena *stainless steel* memiliki konduktivitas termal paling kecil, sedangkan tembaga memiliki konduktivitas termal paling besar sehingga selisih temperatur antara T_a , T_m , dan T_b (Gambar 3).

Pada Gambar 4, Mebrouk Ait Saada dkk. 2012, melakukan analisis numerik tentang distribusi temperatur pada material padat dengan temperatur tertentu yang terdapat satu *droplet* di atas permukaan dengan suhu lebih rendah. Hasil analisa tersebut adalah semakin besar konduktivitas termal suatu material maka distribusi temperatur akan semakin merata. Namun jika konduktivitas termal suatu material semakin rendah maka distribusi temperatur yang terjadi akan tidak merata.

Mengacu pada Gambar 1, kurva Nukiyama, temperatur sekitar saturasi memiliki *heat flux* yang paling kecil pada regime *nucleate boiling* kemudian seiring dengan kenaikan temperatur, *heat flux* memiliki nilai yang semakin besar. Pada daerah sekitar *Critical heat flux* (CHF) terjadi penurunan suhu terbesar untuk semua bahan uji dan seting, pada gambar, hal ini terjadi karena pada daerah sekitar (CHF), *heat flux droplets* memiliki nilai yang besar dengan kata lain kemampuan *droplets* untuk menyerap kalor dari permukaan bahan uji semakin besar.

Pada Gambar 5 sampai 10 saat semua spesimen diatur temperatur permukaan diatur kurang lebih 110 dan 120. Tembaga (Gambar 6 dan 9) dan aluminium (Gambar 5 dan 8) cukup mampu mempertahankan temperatur permukaan pada suhu yang telah ditetapkan. Namun pada *stainless steel* (Gambar 7 dan 10), terjadi penurunan hanya pada permukaan sedangkan pada T_b tidak terjadi penurunan temperatur.

Ketika temperatur permukaan diatur sebesar kurang lebih 130 (Gambar 11 sampai 13). Tembaga (Gambar 12) adalah spesimen yang baik dalam mempertahankan temperatur permukaan. Aluminium (Gambar 11) mulai mengalami penurunan pada semua *thermocouple* (T_a , T_m , dan T_b). Sedangkan pada *stainless steel* (Gambar 13), penurunan temperatur hanya terjadi pada permukaan dan *thermocouple* paling atas (T_a).

Pada Gambar 14 sampai 19, merupakan grafik hasil pengujian pada suhu sekitar CHF, terlihat pada aluminium (Gambar 14 dan 17) dan tembaga (Gambar 15 dan 18) penurunan temperatur terdeteksi pada *thermocouple* paling bawah (T_b). Namun pada *stainless steel* (Gambar 16 dan 19) penurunan temperatur tetap tidak terjadi pada *thermocouple* paling bawah (T_b). Hal tersebut terjadi juga akibat konduktivitas *stainless steel* yang kecil dibandingkan dengan aluminium maupun tembaga.

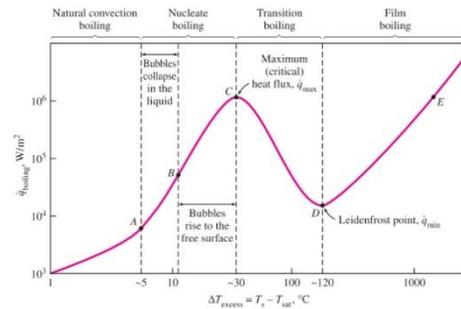
3.1 Tabel

| Spesimen | Kalor Spesifik (J/kg°C) | Konduktivitas (W/m°C) |
|-----------|-------------------------|-----------------------|
| Aluminium | 896 | 220 |
| Tembaga | 380 | 386 |

| | | |
|------------------------|-------|-------|
| <i>Stainless steel</i> | 502,1 | 16,26 |
|------------------------|-------|-------|

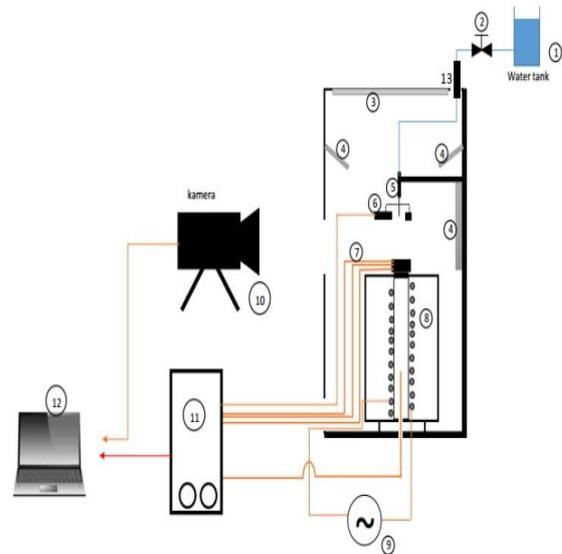
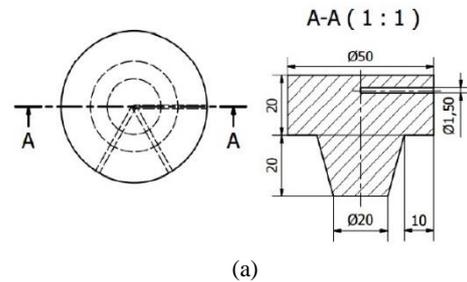
Tabel 1. Data kalor spesifik dan konduktivitas untuk ketiga spesimen. (http://www.engineersedge.com/properties_of_metals.htm)

3.2 Gambar



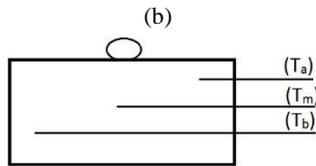
Gambar 1. Kurva pendidihan Nukiyama (Cengel, Yunus A, John M Cimbal, 2006, "Fluid Mechanic", New York: McGraw-Hill).

ambar 2. (a) kurva pendidihan, (b) Kurva waktu evaporasi droplet terhadap temperatur permukaan (Bernardin dan Mudawar, 1999).



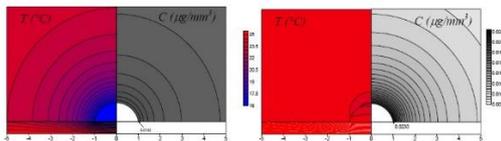
Keterangan:

1. Water tank
2. Control valve
3. Reflektor
4. Lampu LED (light emitting diode)
5. Droplet injector
6. Droplet counter
7. Thermocouple
8. Heater atau pemanas spesimen
9. Sumber listrik AC

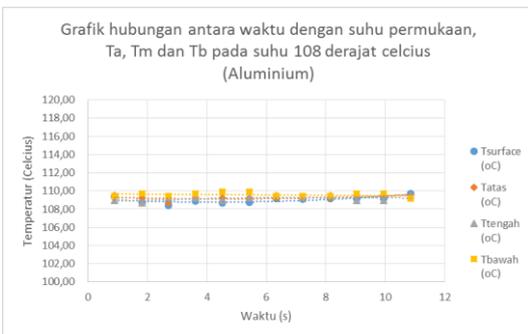


(b)

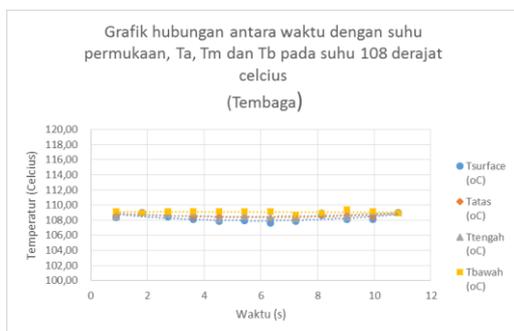
Gambar 3. (a) Gambar teknik spesimen, (b) Skema Alat Uji visualisasi *multiple droplets impact on a hot Surface* (Ardi Wiranata, 2015), (c) letak posisi tiga thermocouple..



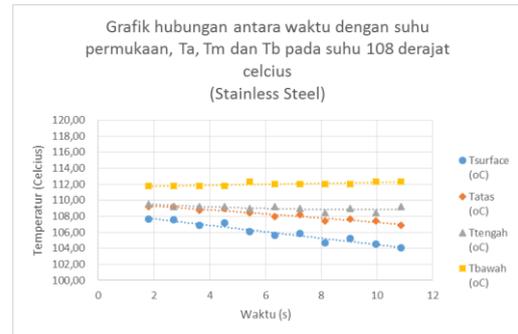
Gambar 4. Hasil simulasi distribusi temperatur pada benda padat yang dipanaskan dengan droplet yang bersuhu lebih rendah (Ait Saada, Mebrouk dkk. 2012 *Effect of substrate thickness and thermal conductivity on an evaporating sessile drop. European: 6th European Thermal Sciences Conference*).



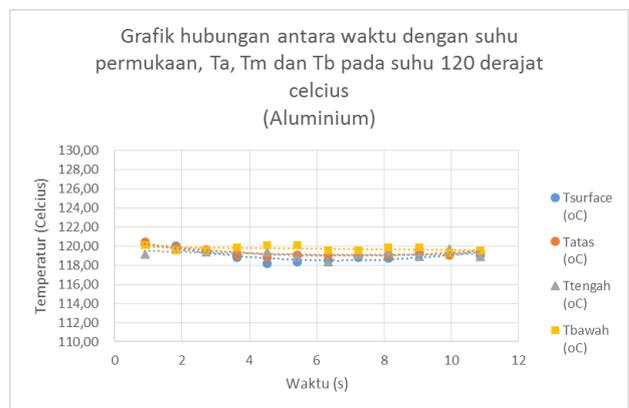
Gambar 5. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a , T_m , dan T_b pada temperatur set 180°C pada spesimen Aluminium.



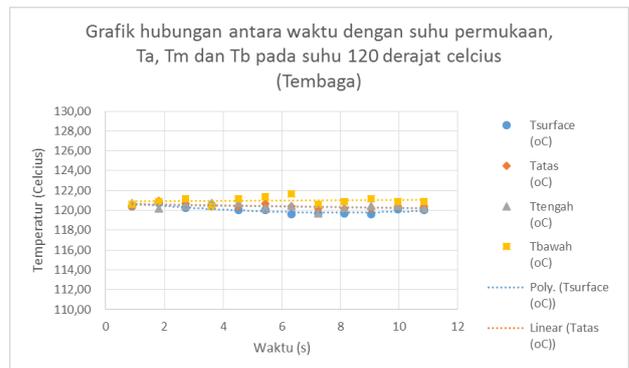
Gambar 6. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a , T_m , dan T_b pada temperatur set 180°C pada spesimen tembaga.



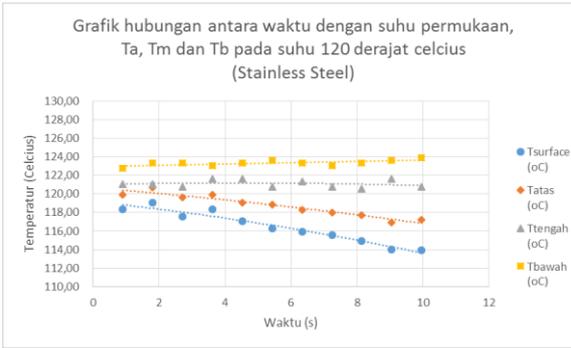
Gambar 7. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a , T_m , dan T_b pada temperatur set 180°C pada spesimen *Stainless steel*.



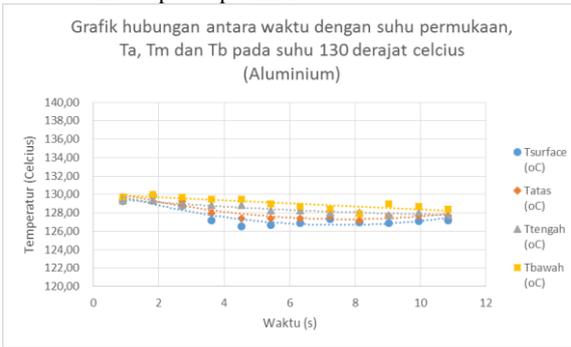
Gambar 8. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a , T_m , dan T_b pada temperatur set 120°C pada spesimen aluminium.



Gambar 9. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a , T_m , dan T_b pada temperatur set 120°C pada spesimen tembaga.



Gambar 10. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a, T_m, dan T_b pada temperatur set 120°C pada spesimen *stainless steel*.



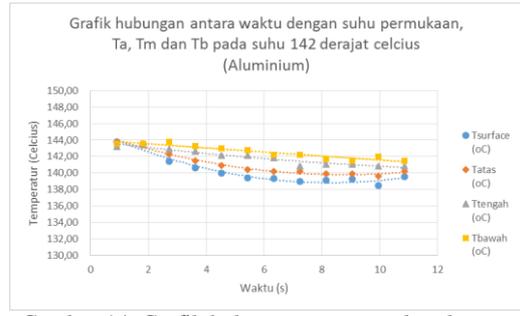
Gambar 11. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a, T_m, dan T_b pada temperatur set 130°C pada spesimen aluminium.



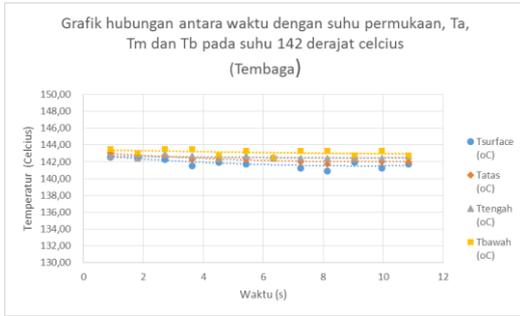
Gambar 12. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a, T_m, dan T_b pada temperatur set 130°C pada spesimen tembaga.



Gambar 13. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a, T_m, dan T_b pada temperatur set 130°C pada spesimen *stainless steel*.



Gambar 14. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a, T_m, dan T_b pada temperatur set 142°C pada spesimen aluminium.



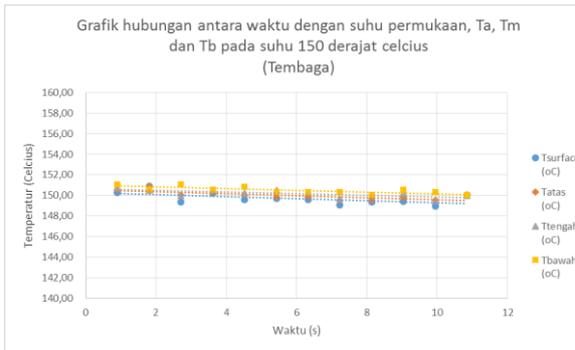
Gambar 15. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a, T_m, dan T_b pada temperatur set 142°C pada spesimen tembaga.



Gambar 16. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a, T_m, dan T_b pada temperatur set 142°C pada spesimen *stainless steel*.



Gambar 17. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a, T_m, dan T_b pada temperatur set 150°C pada spesimen aluminium.



Gambar 18. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a , T_m , dan T_b pada temperatur set 150°C pada spesimen tembaga.



Gambar 19. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu permukaan, T_a , T_m , dan T_b pada temperatur set 150°C pada spesimen *stainless steel*.

4. Kesimpulan

Dari penelitian ini, penulis dapat mengambil kesimpulan :

1. Distribusi temperatur pada *stainless steel* yang dipanaskan pada rejim *nucleate boiling* memiliki tren yang sama walaupun *heat flux* akibat *droplets* semakin tinggi ketika mendekati CHF, yaitu. T_b memiliki temperatur yang konstan sedangkan T_a maupun temperatur permukaan mengalami penurunan. *Heat flux* yang semakin besar hanya menyebabkan perubahan atau penurunan temperatur permukaan dan T_a yang semakin besar.
2. Distribusi temperatur pada aluminium pada rejim *nucleate boiling* dan sekitar CHF bergantung pada nilai *heat flux* dari pendidihan *Nukiyama* (Gambar 1). Semakin besar *heat flux* hingga mencapai sekitar CHF maka perubahan temperatur tidak hanya terjadi pada T_a dan temperatur permukaan tetapi juga pada T_m dan T_b .
3. Distribusi temperatur pada tembaga pada rejim *nucleate boiling* dan sekitar CHF adalah hampir sama dengan aluminium. Perbedaannya adalah penurunan temperatur akibat *droplets* lebih kecil dibandingkan dengan aluminium.

Keunggulan dari penelitian ini adalah fokus menampilkan grafik perubahan temperatur yang terjadi pada fenomena *multiple droplets* yang menumbuk

material padat pada rejim *nucleate boiling*. Kekurangan dari penelitian ini adalah perubahan suhu yang sangat kecil saat *droplets* tepat permukaan datar benda uji tidak dapat dicatat.

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah pencatatan temperatur dapat menggunakan sensor yang lebih baik sehingga perubahan suhu akibat 1 *droplet* dapat terekam dan dapat disinkronkan dengan visualisasi fenomena *multiple droplets*.

Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih pertama kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat melakukan penelitian dan menyelesaikan makalah ini.

Kedua, Penulis mengucapkan terima kasih kepada orang tua yang telah memberi dukungan dan doa restu sehingga penelitian dan makalah ini dapat diselesaikan dengan baik.

ketiga, Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada para pengurus jurusan teknik mesin dan industri, Universitas Gadjah Mada yang telah memberi izin kepada penulis untuk menggunakan laboratorium fluida dan perpindahan kalor dan massa UGM.

keempat, Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan mahasiswa S3 dan S1 yang telah berkontribusi membantu penelitian tentang *multiple droplets* ini.

Penulis juga mengucapkan terima kasih telah menyelenggarakan acara ini dan semoga acara ini dapat berlangsung terus dengan baik dan penuh manfaat.

Daftar Pustaka

- Cengel, Yunus A, John M Cimballa, 2006, "*Fluid Mechanics*", New York: McGraw-Hill.
- Bernardin, J.D. & Mudawar, I., 1999, *The Leidenfrost Point: Experimental Study and Assessment of Existing Models*, Journal of Heat Transfer, 121(4), p.894.
- Deendarlianto, Yasuki, T., Sumitorno, H., Indarto, dkk., 2014, *Effect of Static Contact Angle on The Droplet Dynamics During The Evaporation of a Water Droplet on The Hot Walls*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 71, pp.691-705.
- Ait Saada, Mebrouk, Chikha., Salah., Tadristb Lounès. 2012. *Effect of substrate thickness and thermal conductivity on an evaporating sessile drop*. European: 6th European Thermal Sciences Conference