

# STUDI EKSPERIMEN PADA FENOMENA *SUCCESSIVE DROPLETS* MENUMBUK PERMUKAAN TEMBAGA PANAS

## (*EXPERIMENTAL STUDY ON THE PHENOMENA ON THE SUCCESSIVE DROPLETS IMPACTING HOT COPPER SURFACE*)

Arif Widyatama<sup>1</sup>, Akmal Irfan Majid<sup>1</sup>, Teguh Wibowo<sup>1,3</sup>, Deendarlianto<sup>1,2</sup>,  
dan Samsul Kamal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada

<sup>2</sup>Pusat Studi Energi, Universitas Gadjah Mada

<sup>3</sup>Departemen Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto

<sup>1</sup>Jl. Grafika No.2 Yogyakarta, Indonesia

email: arifwidyatama@ugm.ac.id

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari fenomena dan interaksi antara tetesan air (*droplet*) dan permukaan logam panas dengan metode eksperimental. Pada penelitian ini, *droplet* dijatuhkan dari posisi 50 mm dari atas permukaan logam dengan frekuensi 8,5 *droplet* per detik. Diameter *droplet* yang diamati sebesar 3,12 mm. Logam yang digunakan adalah tembaga dengan temperatur permukaan di antara 110-240° C. *High speed video camera* dengan kecepatan 2000 fps digunakan untuk merekam data visual. *Teknik image processing* diaplikasikan untuk menghitung perubahan diameter *droplet*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *pertama*, pada temperatur rendah, *droplet* cenderung mempertahankan posisi awal kontak dengan perubahan bentuk yang fluktuatif. *Kedua*, temperatur tinggi, terjadi fenomena bouncing yang mengakibatkan tumbukan antar *droplet* menjadi tidak sempurna. Hasil visualisasi dapat mengungkap perubahan geometri *droplet* berupa spreading ratio dan apex height secara lengkap. Dari penelitian ini juga diketahui bahwa temperatur 140°C menjadi daerah transisi awal terjadinya fenomena yang mengakibatkan *droplet* tidak bersinggungan dengan permukaan panas sehingga proses perpindahan kalor antar permukaan terhambat.

**Kata kunci:** *successive droplets, tembaga, spreading ratio, apex height*

### Abstract

This study was aimed at investigating the phenomena and interactions between water *droplets* and hot metal surfaces using an experimental method. In this study, the *droplet* was dropped from 50 mm from the top of the metal surface with a frequency of 8.5 *droplets* per second. The observed *droplet* diameter was 3.12 mm. The metal used was copper with a surface temperature between 110-240 ° C. High speed video camera with a speed of 2000 fps was used to record visual data. Then the image processing technique was applied to calculate the change in *droplet* diameter. The results show that at low temperatures, *droplets* tend to maintain their initial position of contact with fluctuating deformations. While at high temperatures, a bounce phenomenon occurs which results in collisions between *droplets* being imperfect. Visualization results can reveal the complete change in the *droplet* geometry in the form of spreading ratio and complete apex height. The temperature of 140° C is the initial transition area for phenomena that result in *droplets* has no contact with hot surfaces so that the process of heat transfer between surfaces is inhibited.

**Keywords:** *successive droplets, copper, spreading ratio, apex height*

## **PENDAHULUAN**

Fenomena *droplet* menumbuk permukaan zat padat dapat ditemukan dalam berbagai bidang seperti industri printer, komponen elektronik, dan manufaktur logam. Setiap implementasi mempunyai spesifikasi dan kebutuhan yang harus dipenuhi secara presisi agar didapatkan keluaran proses sesuai dengan yang dibutuhkan. Pada industri manufaktur logam, *droplet* yang menumbuk permukaan panas dapat ditemukan pada proses *spray cooling*. Teknik ini mampu menghasilkan *heat flux* yang lebih tinggi dibandingkan dengan konveksi paksa sehingga secara keseluruhan dapat menekan biaya produksi dengan optimalisasi proses perpindahan kalor pada logam (Deendarlianto *et al.*, 2014).

Urgensi implementasi *droplet* pada berbagai bidang tersebut mengakibatkan fenomena ini menjadi salah satu fokus penelitian dalam tiga dekade terakhir. Berbagai penelitian telah dilakukan mencakup berbagai macam karakteristik *droplet* (Deendarlianto *et al.*, 2016; Liang *et al.*, 2016), Perkembangan riset pada bidang ini telah dirangkum dengan komprehensif oleh Liang dan Mudawar (2017) yang menyatakan bahwa meskipun secara umum berbagai macam mekanisme *boiling* dan karakterisasi *droplet* sudah berhasil dipaparkan, masih diperlukan banyak studi lanjut terkait fenomena detail seperti pengaruh munculnya

lapisan uap pada pergerakan *droplet* ataupun mekanisme tercapainya *critical heat flux*. Penelitian yang difokuskan pada analisa perpindahan kalor dilakukan oleh Gradeck, Seiler, Ruyer, dan Maillet (2013) pada variasi bilangan Weber dan temperatur. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kemampuan *droplet* dalam mengangkat kalor, atau bisa disebut *energy removal*, sangat tergantung dari dinamika *droplet* ketika menumbuk permukaan panas. Oleh sebab itu, diperlukan kajian secara menyeluruh pada perilaku *droplet* dengan berbagai kondisi kerja

Saat sebuah *droplet* menumbuk permukaan panas, terjadi variasi fenomena hidrodinamis dan perpindahan kalor. Dari studi literatur terhadap penelitian sebelumnya didapatkan bahwa selain kecepatan dan diameter *droplet*, temperatur permukaan logam merupakan faktor dominan yang mempengaruhi perubahan perilaku tersebut.

Salah satu usaha komprehensif untuk memetakan pengaruh temperatur permukaan logam dilakukan oleh Bernardin, Stebbins, dan Mudawar (1997) yang melakukan penelitian pada aluminium dengan temperatur 100-280°C yang mewakili empat *boiling regime*. Penelitian ini berhasil mendefinisikan peta pola perilaku *droplet* pada tiga jenis bilangan Weber. Bertola (2015) memanfaatkan perkembangan teknologi *high speed video camera* untuk mendapatkan fenomena *droplet* secara

lebih detail. Hasilnya adalah lima daerah berhasil didefinisikan yang terdiri dari tiga *independent regime* dan dua *regime* kombinasi. Ditemukannya perbedaan antara hasil penelitian Bertola (2015) dengan Tran *et al.* (2013) menunjukkan bahwa fenomena *droplet* ini masih perlu dikaji secara mendalam.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah mempelajari fenomena dan interaksi antara *droplet* dan permukaan tembaga panas. *Droplet* pertama diluncurkan dari *jet nozzle* sehingga menumbuk permukaan logam. Pada periode tertentu, *droplet* kedua kembali diluncurkan sehingga fenomena kedua *droplet* tersebut dapat diamati. Penggunaan *high speed video camera* yang dikombinasikan dengan *image processing technique* memungkinkan fenomena tersebut dapat dianalisis dengan komprehensif. Informasi yang didapatkan pada penelitian ini sangat bermanfaat untuk pengembangan analisis lebih lanjut pada *internal flow* dan transfer kalor yang terjadi dalam *droplet*. Selain itu, data yang diperoleh juga dapat digunakan sebagai dasar dalam pengembangan model dan verifikasi studi simulasi.

## **METODE PENELITIAN**

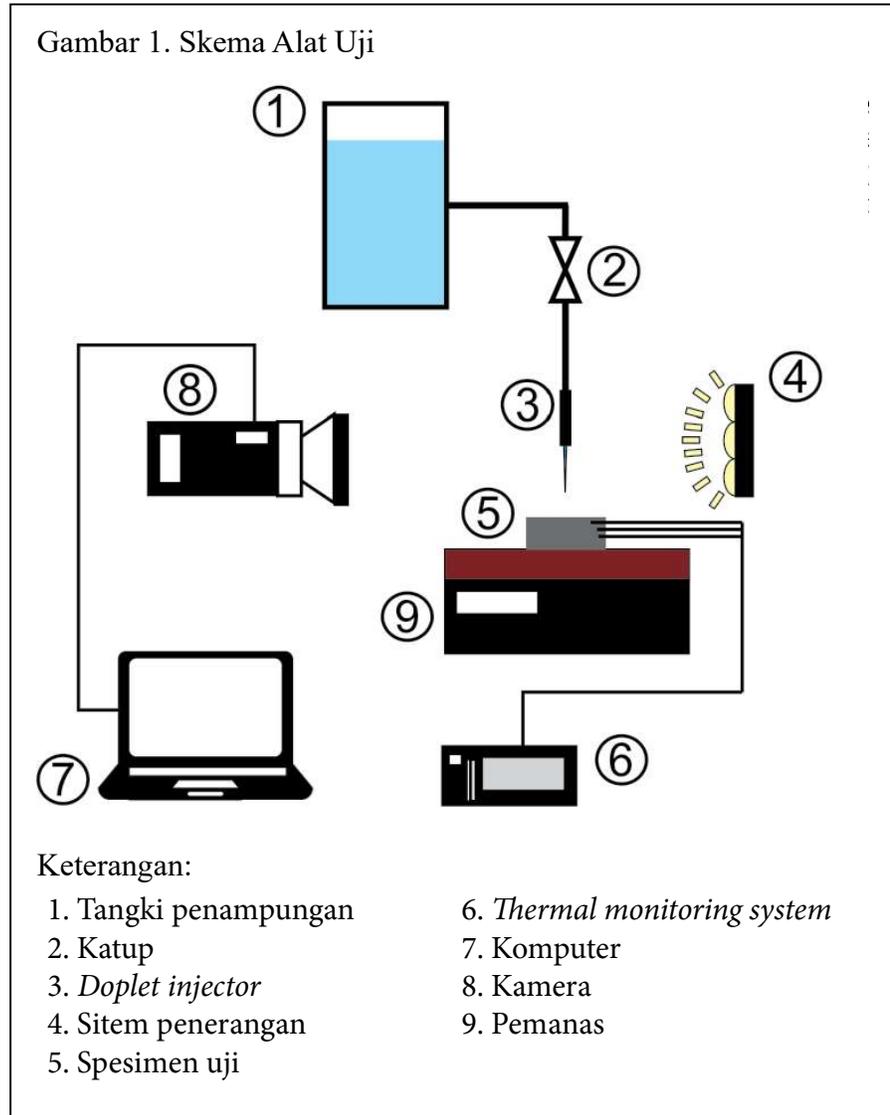
Penelitian ini menggunakan eksperimen yang sama dengan beberapa penelitian sebelumnya (Wibowo, Widyatama, Kamal, Indarto, & Deendarlianto, 2018; Riswanda,

Pranoto, Deendarlianto, Indarto, & Wibowo, 2018). Skema dari peralatan eksperimen dapat dilihat pada Gambar 1 yang secara umum terbagi menjadi beberapa komponen utama yaitu *droplet generator*, pemanas induksi serta benda uji, dan sistem penerangan.

Sebagai penghasil panas, sebuah pemanas induksi digunakan pada penelitian ini dengan daya yang dihasilkan mencapai 1600 Watt. Tepat di atas pemanas, benda uji dapat dengan mudah diletakkan dan dilepas menyesuaikan kebutuhan penelitian. Pada penelitian ini, spesimen yang akan digunakan adalah tembaga. Spesimen tersebut dilengkapi dengan tiga buah lubang untuk meletakkan termokopel tipe K yang telah terkalibrasi untuk memantau temperatur permukaan spesimen dengan akurat.

*Droplet generator* yang digunakan pada penelitian ini disusun oleh *droplet injector* dan tangki penyimpanan fluida. Berbagai parameter yang dapat diatur pada alat ini adalah ketinggian posisi *injector*, frekuensi *droplet*, serta ukuran *droplet*. Namun pada penelitian ini, variabel tersebut dibuat konstan dengan fokus penelitian ada pada variasi temperatur. *Injector* diletakkan 50 mm di atas permukaan panas tersebut. Diameter *droplet* adalah 3,12 mm dengan frekuensi 8,5 *droplet* per detik.

Untuk merekam fenomena *droplet* saat menumbuk permukaan aluminium



panas, digunakan *high speed video camera* Phantom MIRO M310. Kamera ini merekam 3200 fps (*frame per second*) pada resolusi tertinggi dan dapat diatur hingga mencapai 10.000 fps pada resolusi yang lebih kecil. Pada penelitian ini, kamera dioperasikan pada 2000fps dan resolusi 1024 x 768 sehingga didapat gambar yang tajam dan dapat menangkap fenomena *droplet* secara komprehensif. Sebagai sumber penerangan,

satu set lampu LED diletakkan 10 cm di belakang pemanas induksi. Sebuah layar berbahan kertas kalkir juga ditambahkan agar dihasilkan pencahayaan yang merata. Hal ini akan mempermudah proses pengolahan citra pada tahapan selanjutnya

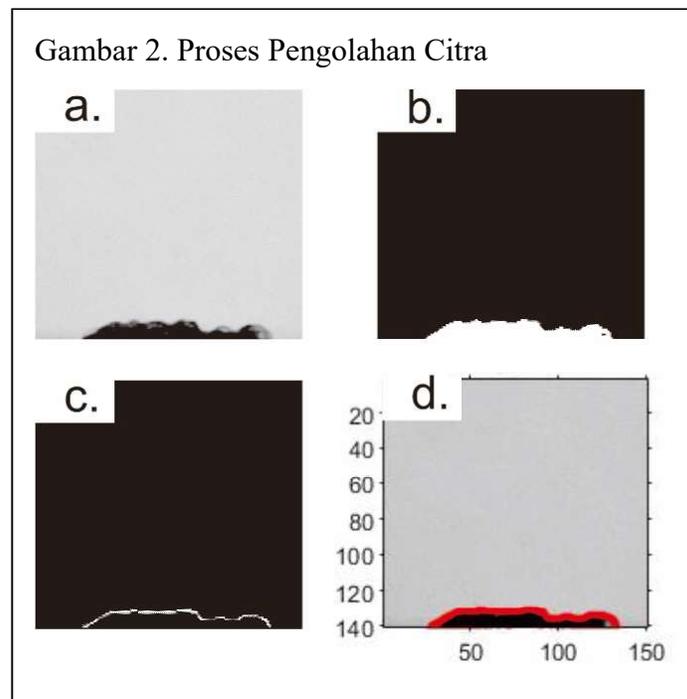
Penelitian ini menggunakan aquades sebagai fluida pendingin. Aquades diletakkan pada tangki *droplet* generator sebelum dijatuhkan dalam bentuk *droplet*. Setelah

permukaan logam sudah mencapai temperatur yang diinginkan, *droplet* dijatuhkan dan fenomena *droplet* ketika menumbuk permukaan panas mulai direkam dalam jangka waktu tertentu. Pada penelitian ini, temperatur benda uji divariasikan antara 110-240°C yang mencakup daerah *nucleate boiling* hingga *film boiling*.

Setelah video dari fenomena *droplet* direkam menggunakan *high speed video camera*, *file* video dipecah menjadi kumpulan citra digital. Proses ini menggunakan *software Phantom Control Camera*. Selanjutnya, citra digital tersebut akan dimanfaatkan sebagai *file* awal dalam pengolahan data dengan metode *image processing* untuk menghasilkan data kuantitatif yang dapat mendukung proses analisis fenomena.

Pada tahapan ini, *software* Matlab terutama *image processing toolbox* digunakan untuk mengolah citra (Gambar 2).

Metode pengolahan citra untuk mendapatkan data kuantitatif pada fenomena *droplet* menumbuk permukaan panas sudah dikembangkan oleh beberapa peneliti sebelumnya seperti Mitrakusuma *et al.* (2018) dan Wibowo *et al.* (2018). Prinsip utama dari metode ini adalah penentuan batas yang jelas antara benda yang ingin diukur, didefinisikan sebagai *foreground*, dan objek-objek lain yang tidak representatif terhadap fenomena disebut *background*. Tahapan dari proses ini dapat dilihat pada Gambar 2. Secara umum, citra awal yang memiliki format *grayscale* diubah menjadi gambar biner yang berisi gambar hitam-putih. Warna

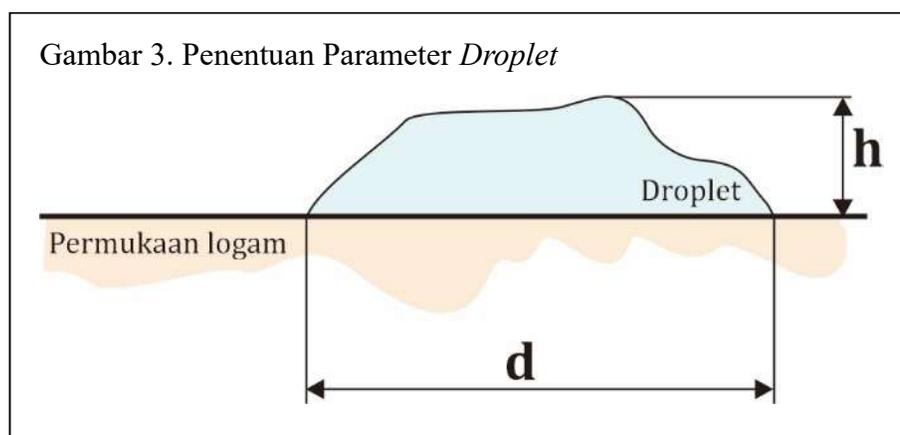


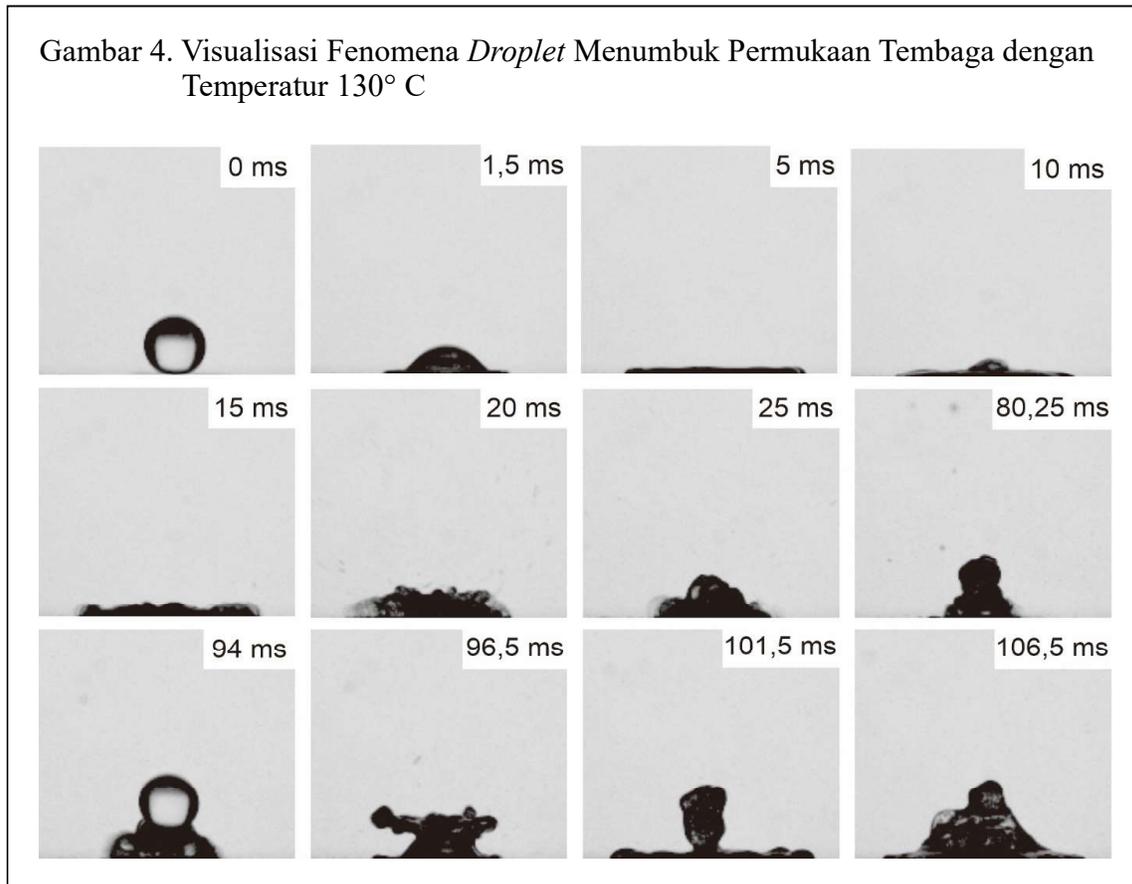
putih mewakili objek *droplet*. Selanjutnya, dari object tersebut dapat dicari garis perimeter yang merupakan garis pada bagian terluar (tepi) *droplet* seperti yang dilihat pada Gambar 2 (c). Pada penelitian ini, *spreading diameter* ( $d$ ) dan tinggi *droplet* ( $h$ ) menjadi data utama yang akan dianalisis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Data tersebut akan dibandingkan dengan diameter awal *droplet* sehingga menghasilkan *spreading ratio* dan *apex height*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 4 menunjukkan fenomena *droplet* menumbuk permukaan tembaga pada temperatur  $130^{\circ}\text{C}$  yang diidentifikasi sebagai transisi antara daerah *natural convection boiling* dan *nucleate boiling*. Sesaat setelah *droplet* menumbuk permukaan panas, terjadi proses *spreading* yang diakibatkan perubahan gaya dari posisi aksial menjadi radial. Fenomena ini akan menghasilkan permukaan *droplet* dengan bentuk yang tipis hingga mencapai kondisi

*spreading ratio* maksimal yang terjadi pada 5 ms. Selanjutnya, terjadi proses *recoil* tidak sempurna secara berulang yang disebabkan oleh proses pendidihan fluida tersebut. Dapat dilihat bahwa selama proses tersebut, terjadi perpindahan panas secara konveksi pada fluida yang mengakibatkan fluktuasi permukaan *droplet* menjadi lebih bergelembung. Selain itu, volume *droplet* secara perlahan juga berkurang karena mulai terinisiasi fenomena *secondary droplet* seperti yang tampak pada waktu 20 ms. Pada 94 ms, terjadi kontak antara *droplet* pertama dan *droplet* kedua yang menghasilkan fenomena *liquid swelling* seperti yang diamati oleh Fujimoto *et al.* (2017). Keberadaan tambahan fluida tersebut memberikan dorongan secara radial sehingga meningkatkan *spreading droplet*. Pengamatan pada hasil visual juga menunjukkan bahwa atomisasi *secondary droplet* dapat terhambat karena datangnya *droplet* yang memiliki temperatur lebih rendah dari *droplet* pertama. Secara umum, keberadaan *droplet* kedua secara





sempurna menumbuk *droplet* pertama dan mampu meningkatkan *wetting area* serta menggantikan sebagian besar volume *droplet* yang sudah hilang selama proses.

Selanjutnya, fenomena yang berbeda dapat ditemukan pada temperatur yang relatif lebih tinggi di mana pada penelitian ini, perilaku *droplet* pada saat menumbuk permukaan dengan temperatur 230°C dijadikan sebagai contoh seperti yang telah ditunjukkan pada Gambar 4. Setelah *droplet* menumbuk permukaan panas, dapat terlihat bahwa proses nukleasi terjadi lebih cepat dibandingkan pada fenomena temperatur rendah. Saat *droplet*

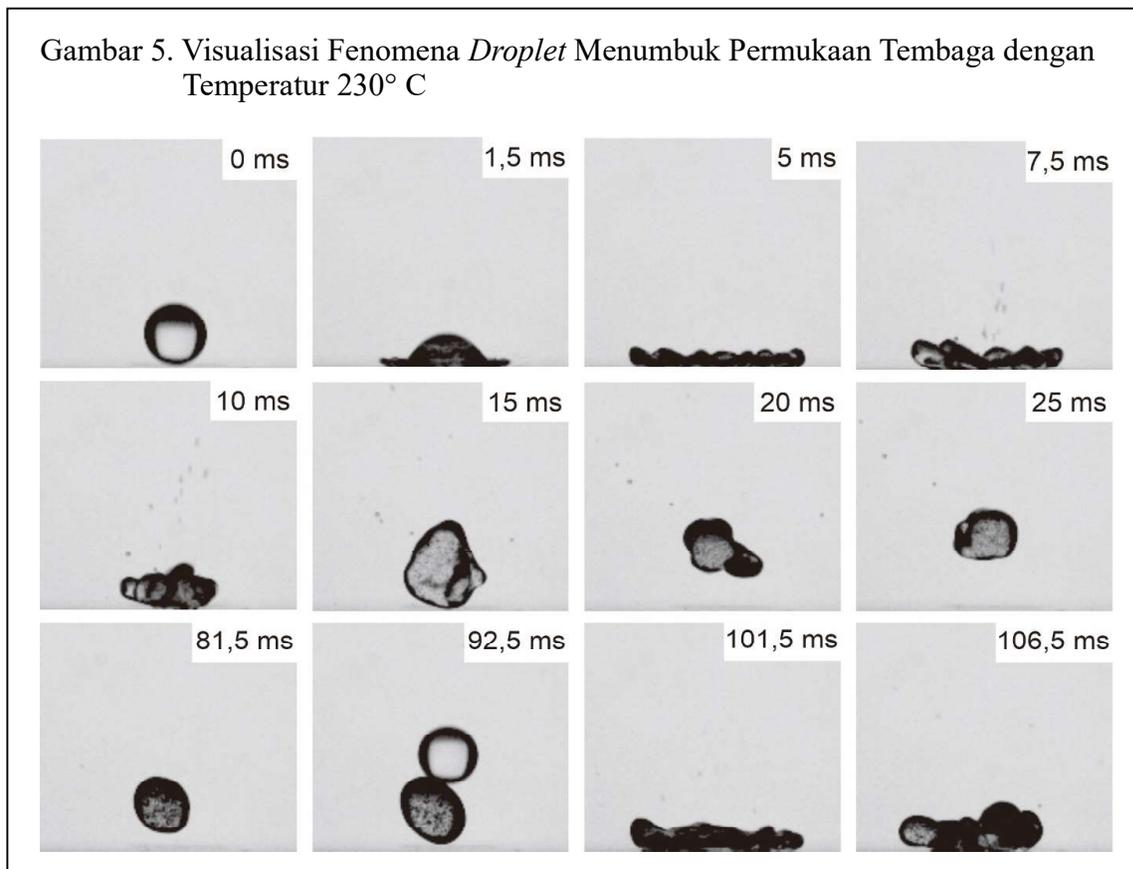
berekspansi mencapai titik *spreading* maksimal, dapat ditemui aliran *internal* dalam *droplet* sehingga mengakibatkan permukaan *droplet* bergelombang. Pada 7,5 ms; terbentuknya *secondary droplet* mulai dominan. Fenomena *bouncing* yang mengakibatkan proses perpindahan panas antara permukaan logam dan fluida terhenti juga diamati. Fenomena *droplet bouncing* ini, seperti yang diamati oleh Bianco, Chevy, Clanet, Lagubeau, dan Quéré (2006) terjadi beberapa kali hingga *second droplet* datang dan menumbuk *first droplet* saat di udara. Bianco *et al.* (2006) menyatakan bahwa proses *rebound* tersebut sangat dipengaruhi

oleh bilangan Weber di mana ketika bilangan Weber cenderung rendah, *elasticity droplet* juga rendah yang menyebabkan kecilnya *energy losses* pada *droplet* sehingga tinggi pantulan *droplet* cenderung sama. Datangnya *droplet* kedua membuat *droplet* akan kembali mempertahankan posisinya di atas permukaan panas dalam periode waktu tertentu sehingga proses *cooling* kembali berjalan.

Paparan sebelumnya mampu menjelaskan fenomena *droplet* secara komprehensif dari proses tumbukan pertama, fenomena *spreading* dan *recoiling*, serta terbentuknya *secondary droplet*. Informasi tersebut perlu didukung dengan data

kuantitatif secara detail. Pada penelitian ini, teknik *image processing* yang digunakan dapat menghitung beberapa parameter penting seperti *spreading diameter* dan *apex height*.

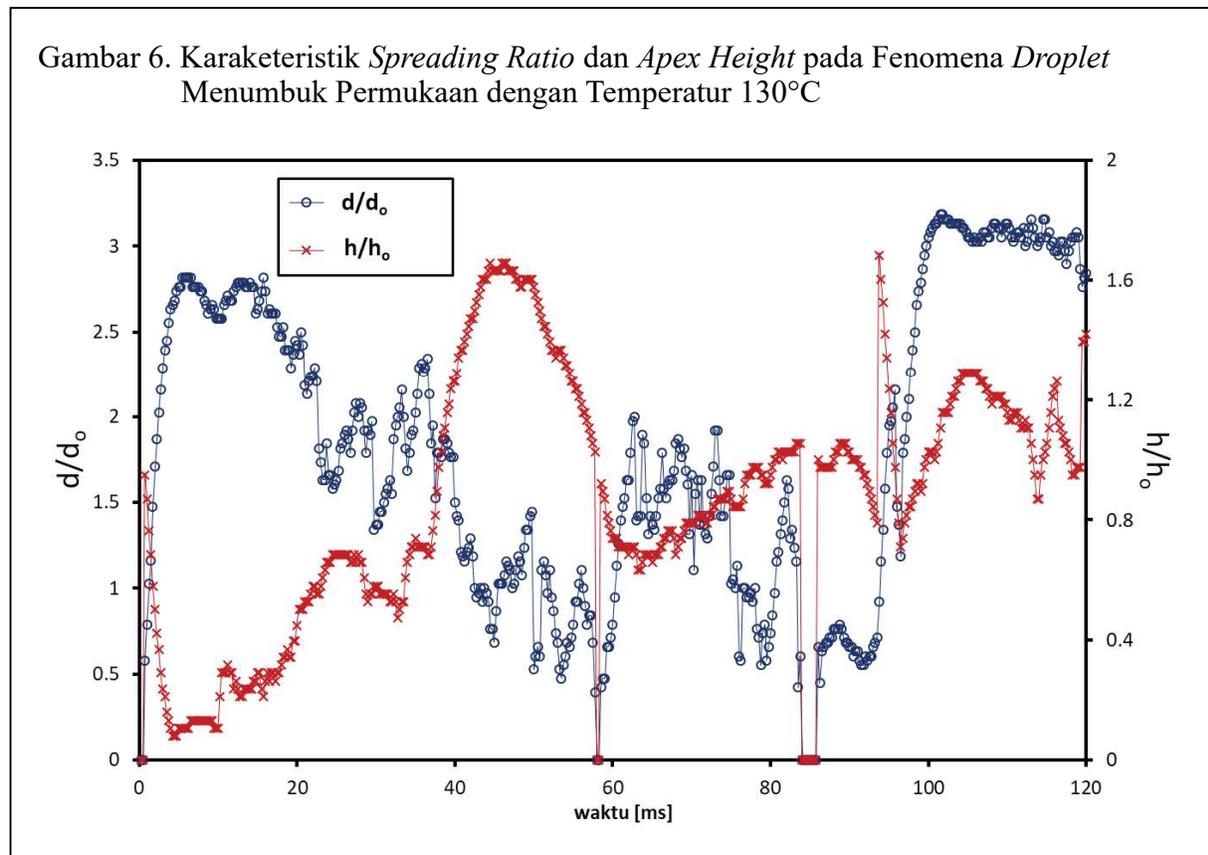
Gambar 5 menunjukkan grafik perubahan *spreading ratio* dan *apex height* pada *droplet* ketika menumbuk permukaan tembaga dengan temperatur permukaan 130° C. Untuk fenomena *spreading ratio*; dapat diamati bahwa setelah *droplet* menumbuk permukaan panas; nilai *spreading ratio* meningkat hingga mencapai titik 2,8 pada 7 ms. Selanjutnya; terjadi fluktuasi nilai dengan rentang 0,5 dan 2 hingga akhirnya



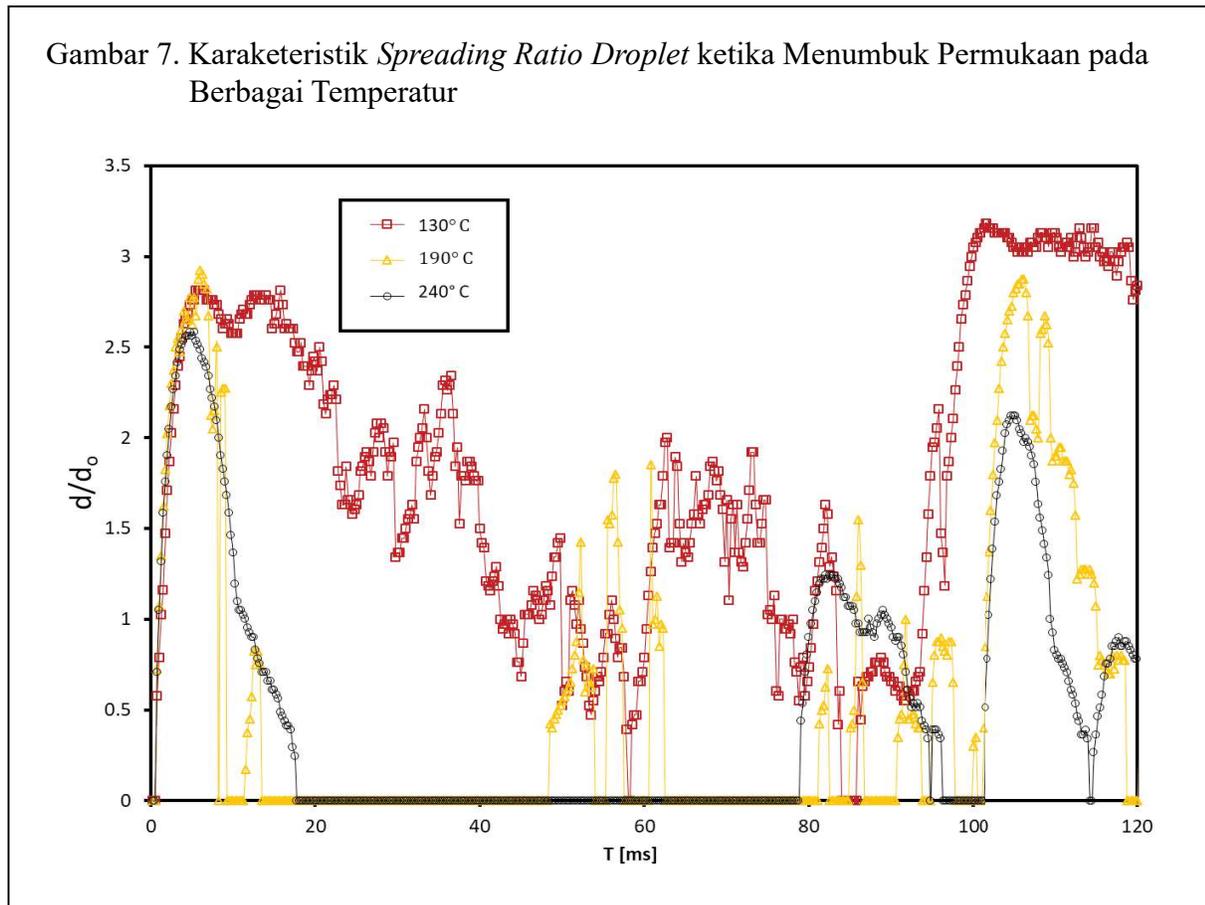
kedatangan *droplet* kedua mengakibatkan peningkatan *spreading ratio* mencapai 3.2. Sedangkan tren fluktuasi nilai *apex height* secara umum merupakan kebalikan dari fenomena *spreading ratio*. Sebagai contoh, ketika *droplet* mencapai nilai *spreading* maksimal pada 7 ms; dapat dicermati bahwa nilai *apex height* mencapai nilai terendah pada titik 0,23. Pada Gambar 6 juga dapat diamati bahwa pada periode tertentu terjadi peristiwa melayang yakni ketika *droplet* tidak menyentuh permukaan panas. Fenomena ini berbeda penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Wibowo *et al.* (2018), pada temperatur 110° C, *droplet*

masih menempel sempurna pada permukaan. Daerah transisi ini perlu menjadi perhatian khusus mengingat pada saat tersebut tidak terjadi perpindahan panas.

Pada penelitian ini, juga dapat diamati bahwa perubahan *spreading ratio* juga dipengaruhi oleh temperatur permukaan. Gambar 7 menunjukkan fluktuasi *spreading ratio* pada temperatur 130°C, 190°C, dan 240°C. Pada temperatur 130°C, internal *flow* yang dipicu oleh proses konveksi dalam *droplet* mengakibatkan terjadinya turbulensi aliran. Hal tersebut mendesak *interface droplet* sehingga terjadi perubahan *spreading ratio* secara fluktuatif. Pada



Gambar 7. Karakteristik *Spreading Ratio Droplet* ketika Menumbuk Permukaan pada Berbagai Temperatur

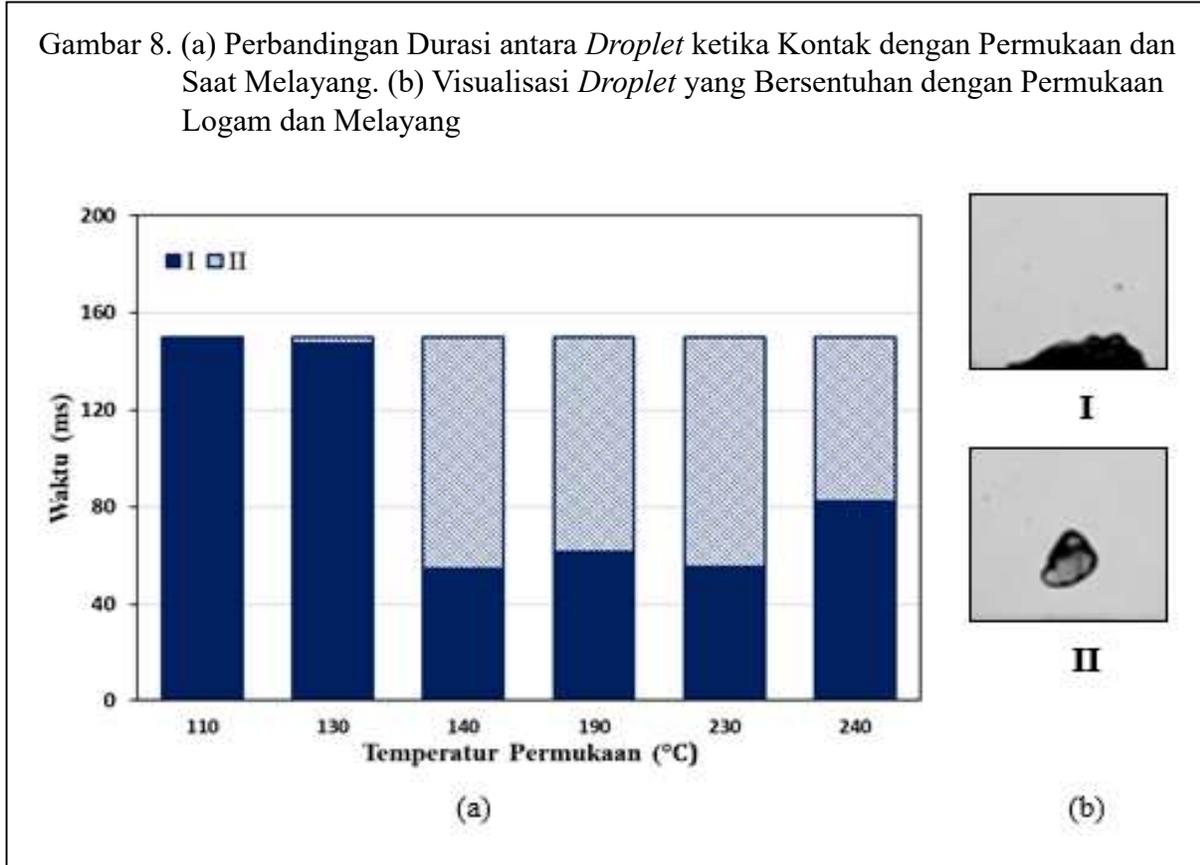


fenomena temperatur tinggi, proses perubahan fasa terjadi sangat cepat pada bagian bawah *droplet* di mana lapisan film tipis terbentuk sehingga perpindahan panas ke badan *droplet* secara keseluruhan terhambat. Fenomena ini terkonfirmasi dari data kuantitatif serta visualisasi yang menunjukkan *interface droplet* cenderung lebih tenang. Selanjutnya proses penguapan yang terjadi pada temperatur tinggi menyebabkan pengurangan volume *droplet* secara signifikan.

Dalam implementasi *spray cooling* pada dunia industri, proses perpindahan panas

yang mengakibatkan penurunan temperatur pada logam terjadi seiring dengan adanya kontak antara fluida dan permukaan logam. Oleh karena itu, *contact time* menjadi hal yang krusial dalam proses ini. Visualisasi terhadap fenomena *droplet* pada Gambar 4 dan 5 didukung dengan data kuantitatif pada Gambar 7 menunjukkan bahwa ditemukan beberapa momen ketika *droplet* melayang dan tidak bersentuhan oleh permukaan logam. Analisis lebih lanjut dapat dilihat pada Gambar 8a yang menunjukkan proporsi waktu *droplet* saat kontak dengan permukaan panas dan ketika melayang.

Gambar 8. (a) Perbandingan Durasi antara *Droplet* ketika Kontak dengan Permukaan dan Saat Melayang. (b) Visualisasi *Droplet* yang Bersentuhan dengan Permukaan Logam dan Melayang

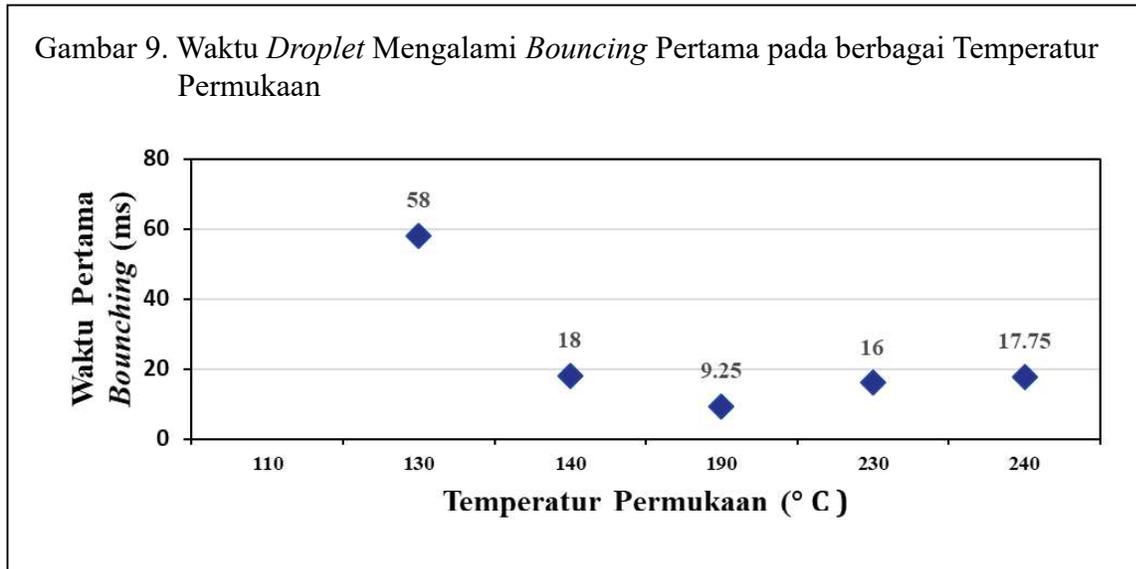


Pada temperatur 110°C, *droplet* masih sepenuhnya menempel pada permukaan logam. Peningkatan temperatur di titik 130°C menginisiasi terjadi fenomena *bouncing* meskipun pada titik ini, presentase *droplet* melayang masih sangat sedikit. Peningkatan signifikan mulai terjadi pada kondisi 140°C pada saat durasi *droplet* dan permukaan logam saling kontak hanya sekitar 55 ms. Fenomena minimnya kontak antara *droplet* dan permukaan logam masih dapat diamati hingga temperatur mencapai 240°C.

*Droplet bouncing* merupakan peristiwa yang harus dihindari karena mempengaruhi performa pendinginan. Salah satu upaya

mencegahnya adalah dengan menambahkan *droplet* lain sehingga sistem bekerja dalam bentuk *single successive droplet*. Keberadaan *second droplet* akan lebih efektif jika *first droplet* belum mengalami *bouncing* karena peristiwa tersebut dapat memicu pergeseran posisi *droplet*. Hal tersebut menunjukkan pentingnya informasi mengenai waktu ketika *droplet* pertama kali *bouncing* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Pada temperatur tinggi, mulai 140°C, *first droplet* mengalami *bouncing* pada rentang 9-18 ms. Sedangkan pada daerah transisi 130°C, *droplet* mampu tetap kontak dengan permukaan logam selama 58 ms sebelum akhirnya *bouncing*.

Gambar 9. Waktu *Droplet* Mengalami *Bouncing* Pertama pada berbagai Temperatur Permukaan

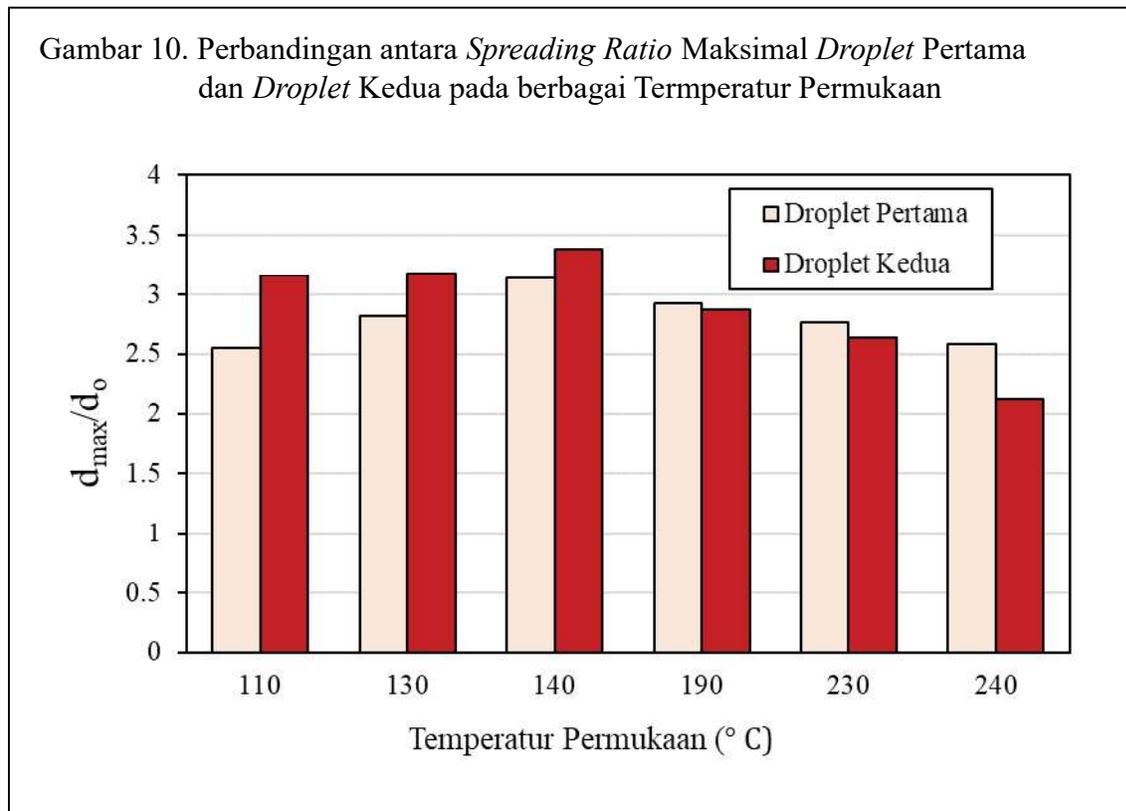


Perubahan karakteristik *droplet* juga diamati oleh Park *et al.* (2014) yang menyimpulkan bahwa pada temperatur di atas 130° C, kalor laten yang memicu evaporasi secara berulang

mendominasi mekanisme perpindahan panas antara *droplet* dan permukaan.

Gambar 10 menunjukkan perbandingan antara *spreading* maksimal pada kasus

Gambar 10. Perbandingan antara *Spreading Ratio* Maksimal *Droplet* Pertama dan *Droplet* Kedua pada berbagai Temperatur Permukaan



*droplet* pertama dan *droplet* kedua. Pada temperatur 110 - 140° C, kehadiran *droplet* kedua mampu meningkatkan *spreading ratio* maksimal untuk setiap kasus. Pada temperatur lebih dari 190° C, dapat dilihat bahwa justru diamati penurunan *spreading ratio* maksimal. Hal ini disebabkan pada temperatur ini penguapan terjadi dengan sangat cepat sehingga volume *droplet* pertama berkurang secara signifikan. Pada kasus ini, kehadiran *droplet* kedua mampu menggantikan fluida yang hilang sehingga proses perpindahan kalor.

## SIMPULAN

Pada penelitian ini, karakteristik *droplet* menumbuk permukaan tembaga panas berhasil diamati secara komprehensif melalui kombinasi visualisasi *high speed video camera* dan *image processing technique*. Pada temperatur rendah, *droplet* cenderung mempertahankan posisi awal kontak dengan perubahan bentuk yang fluktuatif. Pada temperatur tinggi, terjadi fenomena *bouncing* yang mengakibatkan tumbukan antar *droplet* tidak sempurna. *Image processing* yang digunakan mampu menghasilkan data perubahan geometri *droplet* dengan detail. Data yang diperoleh pada penelitian ini dapat menjadi dasar untuk penelitian lebih lanjut terkait fenomena *heat transfer* pada *droplet* dan validasi pengembangan model.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bernardin, J. D., Stebbins, C. J., & Mudawar, I. (1997). Mapping of impact and heat transfer regimes of water drops impinging on a polished surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(2), 247-267. Diunduh dari [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(96\)00119-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(96)00119-6).
- Bertola, V. (2015). An impact regime map for water drops impacting on heated surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85, 430-437. Diunduh dari <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.084>.
- Biance, A. L., Chevy, F., Clanet, C., Lagubeau, G., & Quéré, D. (2006). On the elasticity of an inertial liquid shock. *Journal of Fluid Mechanics*, 554, 47-66. Diunduh dari <https://doi.org/10.1017/S0022112006009189>.
- Deendarlianto, Takata, Y., Hidaka, S., Indarto, Widyaparaga, A., Kamal, S., ... Kohno, M. (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, 691-705. Diunduh dari <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.066>.
- Deendarlianto, Takata, Y., Widyatama, A., Majid, A. I., Wiranata, A., Widyaparaga, A., ..., & Indarto (2018). The interfacial dynamics of the micrometric *droplet* diameters during the impacting onto inclined hot surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126, 39-51. Diunduh dari <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.023>.
- Fujimoto, H., Yoshimoto, S., Takahashi, K., Hama, T., & Takuda, H. (2017). Deformation behavior of two *droplets* successively impinging obliquely on hot solid surface. *Experimental Thermal*

- and Fluid Science*, 81, 136-146. Diunduh dari <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.10.009>.
- Gradeck, M., Seiler, N., Ruyer, P., & Maillet, D. (2013). Heat transfer for Leidenfrost drops bouncing onto a hot surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 47, 14-25. Diunduh dari <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.10.023>.
- Liang, G., Mu, X., Guo, Y., Shen, S., Quan, S., & Zhang, J. (2016). Contact vaporization of an impacting drop on heated surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 73-80. Diunduh dari <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.11.027>.
- Liang, G., & Mudawar, I. (2017). Review of drop impact on heated walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 103-126. Diunduh dari <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.031>.
- Mitrakusuma, W. H., Kamal, S., Indarto, Dyan Susila, M., Hermawan, & Deendarlianto. (2017). The dynamics of the water *droplet* impacting onto hot solid surfaces at medium Weber numbers. *Heat and Mass Transfer/Waerme-Und Stoffuebertragung*, 53(10), 3085-3097. Diunduh dari <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2053-0>.
- Park, J. Y., Gardner, A., King, W. P., & Cahill, D. G. (2014). *Droplet* impingement and vapor layer formation on hot hydrophobic surfaces. *Journal of Heat Transfer*, 136(9), 1-8. Diunduh dari <https://doi.org/10.1115/1.4027856>.
- Riswanda, A., Pranoto, I., Deendarlianto, Indarto, & Wibowo, T. 2018. Study on the effect of Weber Number to heat transfer of multiple droplets on hot stainless steel surface. Dalam S. Ma'mun, H. Tamura, & M.R.A. Purnomo (Eds.), *MATEC Web of Conferences*, 154, 01114. Les Ulis Perancis: EDP Sciences. Diunduh dari <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815401114>.
- Tran, T., Staat, H. J. J., Susarrey-Arce, A., Foertsch, T. C., Van Houselt, A., Gardeniers, H. J. G. E., ... Sun, C. (2013). *Droplet* impact on superheated micro-structured surfaces. *Soft Matter*, 9(12), 3272-3282. Diunduh dari <https://doi.org/10.1039/c3sm27643k>.
- Wibowo, T., Widyatama, A., Kamal, S., Indarto, & Deendarlianto. (2018). The effect of pressure and frequency on the dynamic behavior and evaporation time of successive water *droplets* impacting onto hot surface. *MATEC Web of Conferences*, 154, 01107. Diunduh dari <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815401107>.