

Effect of Drop Frequency on Effectiveness of Multiple Droplets Cooling in Natural Convection Regime

Dannys Arif Kusuma^{1,*}, Indro Pranoto², Aria Riswanda¹, Deendarlianto^{2,3} dan Fauzun²

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

²Pusat Studi Energi, Universitas Gadjah Mada - Yogyakarta

³Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto - Yogyakarta

*Korespondensi: dannys.arif.k@mail.ugm.ac.id

Abstract. Setting or temperature control in a high-powered application becomes important today. The spray cooling method is proven to remove high heat flux while controlling the desired cooling rate. Spray cooling was analyzed by a simpler approach by examining the collision of multiple droplets on heated solid surfaces. Multiple droplets are drops of water which continuously dropped on a surface by certain time difference. When droplet impingement on the surface, the droplet will have spread (spreading), rebound and splashing. In this study, the effect of frequency drops against cooling effectiveness and evaporation time will be observed. Visualization process is used to find area of wetting droplets which is the factor of cooling effectiveness. The observation is performed by using a variable drops to 4,03; 6,16 and 10 Hz. The surface is stainless steel. The surface temperature 60 °C, 80 °C, 100 °C and 120 °C. Image processing techniques are used to extract the data sequentially from images that successfully taken by using high-speed camera. The test results are to be obtained that the variation frequency drops will affect the cooling effectiveness and the temperature decrease rate.

Abstrak. Pengaturan temperatur pada suatu aplikasi dengan daya yang tinggi menjadi hal yang penting saat ini. Metode spray cooling terbukti dapat membuang heat flux yang tinggi sekaligus mengontrol laju pendinginan yang diinginkan. Spray cooling dianalisa dengan melakukan pendekatan yang lebih sederhana dengan meneliti tumbukan multiple droplet pada permukaan padat yang dipanaskan. Multiple droplets adalah tetesan air yang dijatuhkan dengan selisih waktu tertentu secara terus-menerus pada suatu permukaan. Interaksi droplet dengan permukaan padat yang dipanaskan, akan terjadi beberapa fenomena yaitu menyebar (spreading), melambung (rebound) dan menyiprat (splashing). Pada penelitian ini akan diamati pengaruh frekuensi tetesan terhadap efektivitas pendinginan dan penurunan temperatur permukaan. Visualisasi dilakukan untuk mempermudah pengamatan maximum spreading yang merupakan salah satu faktor dari efektivitas pendinginan. Pengujian dilakukan dengan tiga variabel frekuensi tetes pada 4,03; 6,16 dan 10 Hz. Permukaan yang digunakan adalah stainless steel dengan temperatur permukaan 60 oC, 80 oC, 100 oC dan 120 oC. Teknik image processing digunakan untuk mengambil data secara sequential dari gambar yang berhasil diambil dengan menggunakan high-speed camera. Hasil pengujian yang dilakukan diperoleh bahwa variasi frekuensi tetesan akan mempengaruhi efektivitas pendinginan dan laju penurunan temperatur.

Kata kunci: droplets, frequency drops, cooling effectiveness, spreading ratio

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Pengaturan temperatur pada suatu aplikasi dengan daya yang tinggi menjadi hal yang penting saat ini. Aplikasi ini meliputi pendinginan permukaan panas pada proses reaksi inti nuklir, pembentukan material, *quenching*, *blade* turbin dan komponen elektronik. Terakumulasinya kalor pada perangkat akan menghasilkan temperatur yang tinggi serta dapat menyebabkan masalah keamanan, menurunkan tingkat kehandahan dan umur perangkat tersebut. Teknik pembuangan kalor yang inovatif diperlukan untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem (Lin, 2015) [10].

Metode *spray cooling* terbukti dapat membuang *heat flux* yang tinggi sekaligus mengontrol laju

pendinginan yang diinginkan (Bernadin dan Mudawar, 1995) [1]. Laju perpindahan kalor yang tinggi merupakan suatu keuntungan karena dapat mengurangi ukuran, biaya dan kompleksitas peralatan penukar kalor. *Spray cooling* dianalisa oleh Bernadin dkk. (1997) [2] dengan melakukan pendekatan yang lebih sederhana dengan meneliti tumbukan sebuah *droplet* pada permukaan padat yang dipanaskan, dimana dari hasil penelitian tersebut diperoleh karakteristik perpindahan kalor pada *droplet* tunggal yang kemudian digunakan untuk memprediksi karakteristik perpindahan kalor secara menyeluruh pada proses *spraying*.

Salah satu sifat dari *droplets* yang menumbuk permukaan adalah sifat mampu basah (*wettability*),

yaitu kemampuan dari sebuah tetesan untuk membasahi permukaan atau seberapa luasan tetesan yang menyentuh permukaan padat. *Droplet* membasihi ketika menyebar membentuk *film* tipis pada permukaan, dikatakan lemah apabila *droplets* pecah dan mempercik menjadi butiran kecil sehingga hanya membasihi sebagian permukaan (Bernadin dkk., 1996) [4].

Interaksi *droplet* dengan permukaan padat yang dipanaskan, akan terjadi beberapa fenomena yaitu menyebar (*spreading*), melambung (*rebound*) dan menyiprat (*splashing*) (Chandra dan Avedisian, 1991) [5]. Hal ini bisa terjadi karena peningkatan suhu sangat mempengaruhi tegangan permukaan di setiap bahan. Sehingga perilaku *droplet* di setiap spesimen uji yang berbeda memiliki fenomena yang berbeda – beda.

Faktor lain yang mempengaruhi dinamika *droplets* selama tumbukan ke permukaan padat adalah bilangan Weber. Bilangan tersebut didefinisikan sebagai *ratio* antara *inertia energy* dengan *surface tension energy* (Bernadin dkk., 1997) [2]. Ito dkk., (1992) melakukan percobaan tumbukan *droplet* pada bilangan Weber rendah hingga tinggi, didapatkan bahwa pada bilangan Weber sedang *droplets* tidak mengalami disentrigasi tetapi menyebar saat tumbukan [7].

Pasandideh dkk. (2001) membuat model analitis yang memperkirakan efektivitas pendinginan. Didapatkan bahwa efektivitas pendinginan meningkat seiring dengan meningkatnya bilangan *Weber* (*We*), tetapi pada bilangan *Weber* tinggi, efektivitas pendinginan tidak tergantung pada kecepatan dan ukuran *droplet*, melainkan bergantung pada bilangan *Prandtl* (*Pr*) [9]. Kusuma dkk. (2016) menyatakan frekuensi tetesan memberikan pengaruh pada efektivitas pendinginan pada tumbukan *multiple droplets*.

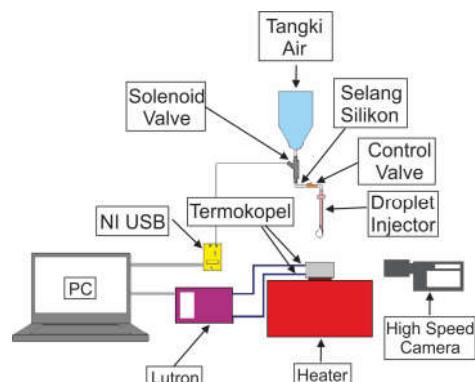
Kandlikar dkk. (2001) melakukan penelitian yang berfokus pada pengaruh bilangan *Weber* atas perilaku tumbukan *droplet* pada permukaan yang dipanaskan. Visualisasi dilakukan pada penelitian ini untuk menyelidiki perilaku *droplet* sehubungan dengan fenomena levitasi. Hasil dari penelitian mereka bahwa variasi dua bilangan *Weber* yang dilakukan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap fenomena levitasi [8].

Deendarlianto dkk. (2016) meniliti pengaruh dari kekasaran permukaan terhadap tumbukan *droplet* pada permukaan yang dimiringkan. Hasil yang telah dilakukan bahwa variasi kekasaran permukaan mampu mempengaruhi kurva penurunan temperatur permukaan, dimana titik *Temperature Leindenfrost* dan *Critical Heat Flux* mengalami perubahan [6].

Penelitian mengenai dinamika *single droplet* yang menumbuk permukaan padat sudah banyak dilakukan sebelumnya namun penelitian mengenai fenomena *multiple droplet* yang menumbuk permukaan padat masih sedikit. Pada penelitian ini peneliti berusaha untuk mempelajari perpindahan kalor dan visualisasi dari fenomena *spreading* dan *recoil* *multiple droplet* ketika menumbuk permukaan datar *Stainless Steel* pada temperatur permukaan 60, 80, 100, dan 120 °C. Dari penelitian ini, akan dibandingkan pengaruh dari frekuensi tetes yang berbeda terhadap *cooling effectiveness* dan laju penurunan temperatur permukaan.

Metode Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Pemanasan spesimen digunakan *heater*, pemanasan dilakukan hingga temperatur permukaan mencapai 60, 80, 100 dan 120 °C. Temperatur permukaan diukur menggunakan termokopel. *Droplet* dijatuhkan ke permukaan yang dipanaskan dengan menggunakan jarum *injector*. Ukuran *droplet* dijaga konstan pada 2,75 mm. Pada frekuensi tetesan diatur dengan *control valve* dan ketinggian tangki pada 1 m, 1,5 m dan 2 m dari keluarnya *droplet* pada jarum untuk menghasilkan frekuensi tetesan 4,03; 6,16 dan 10 Hz. Agar massa total *droplet* yang menumbuk sama maka penetesan dilakukan sebanyak 20 kali. Pada frekuensi 4,03 Hz penetesan dilakukan selama 4,96 detik, frekuensi 6,16 Hz penetesan dilakukan selama 3,24 detik dan frekuensi 10 Hz penetesan dilakukan selama 2 detik. Ketinggian jatuh *droplet* antara permukaan yang dipanaskan dengan jarum *injector* pada 70 mm sehingga menghasilkan bilangan *Weber* sebesar 52,6.



Gambar 1. Skema Alat Multiple Droplets

Dinamika tumbukan *droplet* diamati dengan menggunakan *high speed video camera* dengan kecepatan pengambilan gambarnya 1000 frame per detik. Teknik *image processing* digunakan untuk mengambil data dari gambar yang berhasil diambil dengan menggunakan *high-speed camera*.

Proses visualisasi terhadap video yang diperoleh saat eksperimen dilakukan untuk mempermudah analisis *spreading* tumbukan *droplet*. Langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan hasil visualisasi video adalah merubah format video yang masih “.cine” menjadi format “.avi” menggunakan perangkat lunak Phantom CV 2.8. Video pada format “.avi” akan dipotong menjadi gambar menggunakan perangkat Virtualdub. Potongan video dimulai dari *droplets* menetes pertama hingga terakhir dan proses pengukuran diameter pembasahan dilakukan dengan perangkat lunak Matlab. Berdasarkan hasil teknik *image processing* dan pembacaan termokopel yang didapatkan, dilakukan analisis terhadap rasio sebaran *droplet* dan laju penurunan temperatur permukaan.

Hasil dan Pembahasan

Spreading ratio dicari dengan membagi diameter pembasahan *droplet* dengan diameter awal *droplet*. Pada frekuensi 4,03 Hz belum memberikan pengaruh pada dinamika tumbukan *droplet* karena pada tetes kedua telah mencapai kesetimbangannya jauh sebelum tetes ketiga jatuh dan seterusnya. Sedangkan pada frekuensi 6,16 dan 10 Hz telah terjadi tumbukan antara tetes ketiga dengan sisa tetes kedua yang belum mencapai kesetimbangannya. Hal ini terjadi karena pada frekuensi 6,16 dan 10 Hz jeda waktu penetesan lebih cepat dibandingkan dengan frekuensi sebelumnya yaitu pada 4,03 Hz. Sehingga tetes ketiga menumbuk sisa tetes kedua yang masih terdapat sisa-sisa gaya yang terjadi sebelumnya. Hasil dari *image processing* adalah pemetaan seperti tabel 1, 2 dan 3.

Berdasarkan tabel tersebut terlihat bahwa nilai diameter pembasahan semakin besar disetiap kenaikan temperatur permukaan dan frekuensi tetesan. Kemudian setiap perubahan diameter pembasahan dilakukan pengukuran. Seluruh tetesan akan dicari diameter pembasahannya dari tetes pertama hingga tetes ke dua puluh.

Tabel 1. Spreading pada stainless steel, f = 4,03 Hz

Permukaan Stainless Steel						
Frekuensi 4,03 Hz						
Waktu (ms)	60 °C	Waktu (ms)	80 °C	Waktu (ms)	100 °C	Waktu (ms)
0	○	0	○	0	○	0
6	—	6	—	6	—	6
208	—	204	—	210	—	208
418	—	414	—	428	—	424

Tabel 2. Spreading pada stainless steel, f = 6,16 Hz

Waktu (ms)	Permukaan Stainless Steel					
	60 °C	Waktu (ms)	80 °C	Waktu (ms)	100 °C	Waktu (ms)
0	○	0	○	0	○	0
6	—	6	—	6	—	6
132	—	132	—	130	—	128
256	—	256	—	252	—	250

Tabel 3. Spreading pada stainless steel, f = 10 Hz

Waktu (ms)	Permukaan Stainless Steel					
	60 °C	Waktu (ms)	80 °C	Waktu (ms)	100 °C	Waktu (ms)
0	○	0	○	0	○	0
6	—	6	—	6	—	6
132	—	130	—	132	—	142
246	—	242	—	242	—	248

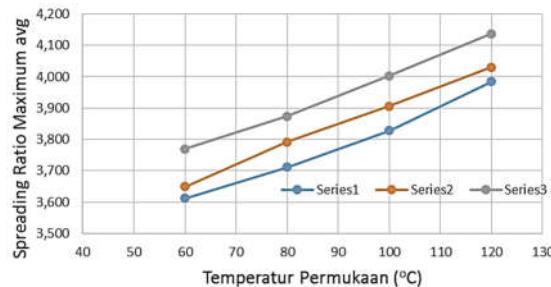
Hasil pengukuran akan dicari pembasahan maksimumnya yang kemudian dirangkum pada tabel 4, dimana merupakan hasil pengukuran *spreading ratio maximum* menjadi *spreading ratio maximum average* yang kemudian digunakan sebagai perhitungan efektivitas.

Tabel 4. Maximum spreading ratio rata-rata

Frekuensi tetesan (Hz)	Temperatur Permukaan (°C)	Maximum Spreading Ratio
4,03	60	3,612
	80	3,711
	100	3,828
	120	3,985
	60	3,649
6,16	80	3,792
	100	3,906
	120	4,030
	60	3,770
	80	3,874
10	100	4,003
	120	4,137

Pada gambar 2 kenaikan *maximum spreading ratio* terhadap kenaikan temperatur permukaan terjadi secara stabil dari temperatur permukaan 60 °C hingga 120 °C. Terlihat pada seluruh variasi frekuensi, bahwa *maximum spreading ratio* bertambah seiring dengan bertambahnya temperatur permukaan yang sesuai dengan peristiwa penurunan

tegangan permukaan air seiring dengan kenaikan temperatur, sehingga gaya yang menahan *droplet* untuk terjadi *spreading* semakin rendah dan membuat *maximum spreading* meningkat. *Maximum spreading ratio* mengalami peningkatan dengan meningkatnya temperatur permukaan.



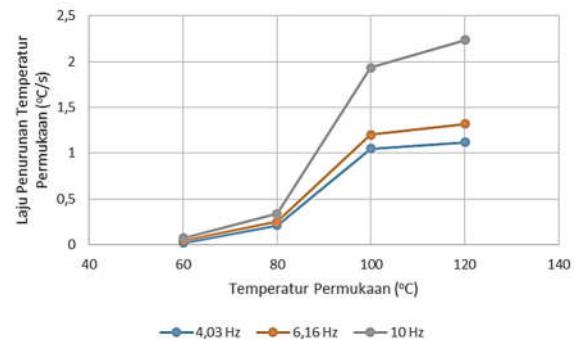
Gambar 2. Spreading ratio maximum

Hasil dari percobaan di atas dengan bilangan frekuensi 4,03; 6,16 dan 10 Hz dan temperatur permukaan 60, 80, 100 dan 120 °C didapatkan bahwa frekuensi tetesan memberikan pengaruh terhadap perubahan *maximum spreading ratio* yang ditunjukkan oleh gambar 2. Berdasarkan data *spreading ratio* pada temperatur permukaan 60, 80, 100 dan 120 °C memberikan hasil bahwa *maximum spreading ratio* mengalami peningkatan disetiap peningkatan frekuensi tetesan. Bisa disimpulkan *maximum spreading ratio* dipengaruhi frekuensi tetesan, dimana seiring meningkatnya frekuensi tetesan, *maximum spreading ratio* juga mengalami peningkatan.

Tumbukan *droplet* dengan permukaan yang panas pastilah mengalami penurunan temperatur pada permukaannya. Hal ini terjadi karena terdapat beda temperatur antara *droplet* dan permukaan yang ditumbuk yang menyebabkan perpindahan kalor dari temperatur permukaan yang tinggi ke temperatur *droplet* yang lebih rendah. Selanjutnya akan dibahas hubungan antara variasi frekuensi tetesan dengan laju penurunan temperatur permukaan. Laju penurunan temperatur permukaan dapat diketahui dengan cara melihat perubahan temperatur permukaan selama ditumbuk oleh *droplet*.

Pada gambar 3 menunjukkan laju penurunan temperatur permukaan spesimen ketika ditetes dengan dua puluh tetes *droplet*. Terlihat bahwa peningkatan frekuensi tetesan juga mengakibatkan peningkatan laju penurunan temperatur permukaan. Hasil tertinggi didapatkan pada frekuensi tetesan 10 Hz dan temperatur 120 °C dengan laju penurunan sebesar 2,233 °C/s dan terendah pada frekuensi 4,03 Hz dan temperatur 60 °C dengan laju penurunan sebesar 0,019 °C/s. Berdasarkan hasil setiap penurunan temperatur permukaan bisa disimpulkan laju penurunan temperatur permukaan dipengaruhi frekuensi tetesan, dimana seiring

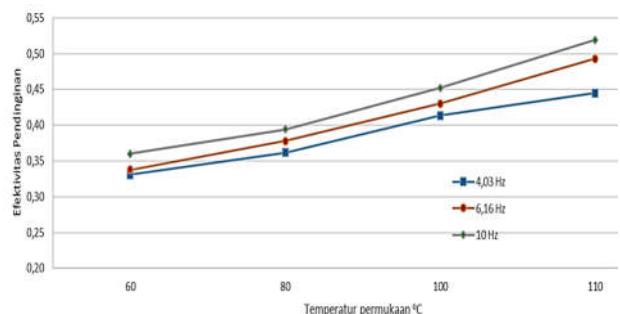
meningkatnya frekuensi tetesan maka laju penurunan temperatur permukaan juga meningkat.



Gambar 3. Laju penurunan temperatur permukaan terhadap temperatur permukaan dengan frekuensi 4,03; 6,16 dan 10 Hz

Hasil percobaan yang telah dilakukan kemudian akan dihitung efektivitas pendinginan. Efektivitas pendinginan adalah perbandingan perpindahan kalor yang terjadi dengan perpindahan kalor maksimum yang mungkin terjadi (ideal) antara *droplet* dan permukaan. Efektivitas pendinginan dapat dikatakan suatu pencapaian pendinginan dibandingkan dengan target pendinginan yang ingin dicapai. Perhitungan efektivitas pendinginan pada frekuensi 4,03; 6,16 dan 10 Hz dengan massa total yang sama, diameter konstan dan banyak tetesan 20 tetes. Maka akan dicari juga hubungan temperatur permukaan dan frekuensi terhadap efektivitas pendinginan.

Pada gambar 4 menunjukkan bahwa efektivitas pendinginan dipengaruhi oleh frekuensi tetesan. Pada seluruh variasi temperatur permukaan efektivitas pendinginan tertinggi terjadi pada temperatur permukaan 120 °C dengan frekuensi 10 Hz dan efektivitas pendinginan terendah terjadi pada temperatur permukaan 60 °C dengan frekuensi 4,03 Hz.



Gambar 4. Laju efektivitas pendinginan terhadap temperatur permukaan dengan frekuensi 4,03; 6,16 dan 10 Hz

Pada variasi temperatur permukaan memberikan hasil bahwa efektivitas pendinginan mengalami peningkatan di setiap peningkatan frekuensi tetesan. Berdasarkan nilai efektivitas pendinginan pada temperatur permukaan 60, 80, 100 dan 120 °C bisa disimpulkan bahwa efektivitas pendinginan dipe-

ngaruhi frekuensi tetesan, dimana seiring meningkatnya frekuensi tetesan maka efektivitas pendinginan juga mengalami peningkatan.

Kesimpulan

Dari eksperimen yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa nilai frekuensi tetesan memberikan pengaruh terhadap laju penurunan temperatur. Berdasarkan dari hasil penelitian bahwa seiring meningkatnya frekuensi tetesan, maka laju penurunan temperatur permukaan yang terjadi juga mengalami peningkatan. Laju penurunan temperatur permukaan ter-tinggi terjadi pada temperatur permukaan *Stainless Steel* 120 °C, frekuensi tetesan 10 Hz dan memiliki nilai sebesar 0,223 °C/s.

Nilai frekuensi tetesan memberikan pengaruh terhadap efektivitas pendinginan. Berdasarkan dari hasil penelitian bahwa nilai frekuensi tetesan yang semakin meningkat menyebabkan peningkatan efektivitas pendinginan. Efektivitas pendinginan memiliki kesesuaian dengan laju penurunan pada temperatur permukaan 60, 80, 100 dan 120 °C, dimana seiring meningkatnya laju penurunan temperatur permukaan maka efektivitas pendinginan juga mengalami peningkatan. Efektivitas pendinginan tertinggi terjadi pada temperatur permukaan *Stainless Steel* 120 °C, frekuensi tetesan 10 Hz dan memiliki nilai sebesar 0,519.

Referensi

- [1] Bernadin, J.D., Mudawar, I., Walsh, C.B. dan Franses, E.I., 1996. Contact Angle Temperature Dependence for Water Droplets on Practical Aluminum Surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer, 40(5), pp.1017-1033.
- [2] J Bernadin, J.D. dan Mudawar, I., 1997. Film Boiling Heat Transfer Of Droplet Stream And Sprays. Internatioinal Journal of Heat and Mass Transfer, 40(11), pp. 2579-2593
- [3] Bernadin, J.D. dan Mudawar, I., 2007. Transition Boiling Heat Transfer of Droplet Streams and spray, Internatioinal Journal of Heat and Mass Transfer,129, pp. 1605-1610.
- [4] Bernadin, J.D., Stebbins, C.J. dan 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), pp. 247-267.
- [5] Chandra, S. dan Avedisian, C.T., 1991. On The Collision Of A Droplet With A Solid Surface, Proceedings Of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 431(1884), pp. 13-41.
- [6] Deendarlianto, Y. dkk., 2016. The Effect of the Surface Roughness on The Dynamic Behavior of The Successive Micrometric Droplets Impacing onto Inclined Hot Surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer, 101, pp.1217-1226.
- [7] Ito T., Takata Y. dan Mousa M.M.M., 1992. Studies on The Water Cooling Hot Surfaces (Analysis of Spray Cooling in The Region Associated with Film Boiling), The Japan Society of Mechanical Engineers, pp.589–598.
- [8] Kandlikar, S.G., Steinke, M.E. dan Singh, A., 2001. Effects of Weber Number and Surface Temperatur on the Boiling, 35th National Heat Transfer Conference, pp.1–10.
- [9] Kusuma, D.A. dkk., 2016. Studi Eksperimental Pengaruh Frekuensi Tetesan Terhadap Efektivitas Pendinginan Pada *Multiple Droplets*. National Symposium on Thermofluids, pp.215–220.
- [10] Pasandideh-Fard, M., Aziz, S.D. dan Mostaghimi, J., 2001. Cooling Effectiveness of A Water Drop Impinging On A Hot Surface, International Journal of Heat and Fluid Flow 22, pp. 201-210.
- [11] Lin, Y.P., 2010. Droplet Impingement Cooling Experiments on Nano-Structured. Mechanical Engineering, Texas A&M University.
- [12] Pasandideh-Fard, M.. dkk., 1996. Capillary effects durung droplet impact on a solid surface, Physics of Fluids 8, pp. 650-659.
- [13] White, F.M., 2007, Viscous Fluid Flow, Second Edition McGraw Hill, New York, pp. 158-160.