

## Pengaruh Sudut Kontak Statis Terhadap Dinamika Penjalaran Droplet yang Menumbuk Permukaan Panas di Atas Kondisi Wetting Limit Temperature dan Bilangan Weber Menengah

Romy<sup>a</sup>, Indarto<sup>b</sup>, Deendarlianto<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Riau. Kampus Bina Widya km 12,5 Sp. Baru, Pekanbaru 28293. Tel: (+62) 761 566786 Email: romy@unri.ac.id

<sup>b</sup> Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No.2, Yogyakarta, Indonesia. Tel : (+62) 274 521673. Email: indarto@ugm.ac.id; deendar@gmail.com

### ABSTRACT

*The effect of static contact angles on the spreading of droplet above wetting limit temperature has been studied experimentally. The various of contact angles achieved by using surface with treatments, they were stainless steel, stainless steel coated with TiO<sub>2</sub> without UV light and stainless steel coated with TiO<sub>2</sub> with UV light. Droplet substance was destilated water with initial diameter 2,41 mm. Impact energy was expressed in Weber number, they were 50,27; 60,85; and 71,44. Solid surface temperature was varied from 250–400°C with 5°C interval. As result, it was known that spreading factor increases due to the decreasing of static contact angle and increasing of Weber number. For the condition above wetting limit temperature, spreading factor increases due to the decreasing of static contact angle and the increasing of Weber number until radial breakup limit temperature. Above radial breakup limit temperature, spreading factor decreases due to the decreasing of static contact angle and the increasing of Weber number.*

**Keywords:** droplet; static contact angle; Weber number; wetting limit temperature

### 1. Pendahuluan

Penerapan tumbukan *droplet* dengan permukaan padat yang dipanaskan meliputi banyak hal di bidang keteknikan. Dalam bidang *spray cooling*, *droplet* digunakan untuk mendinginkan permukaan panas pada proses reaksi inti nuklir, *quenching* dan peralatan elektronik. Dalam bidang *internal combustion engine*, interaksi antara *droplet* bahan bakar dengan dinding ruang bakar merupakan hal yang memengaruhi proses atomisasi dan pencampuran sebelum pembakaran. Dalam bidang-bidang lainnya, aplikasi fenomena tumbukan *droplet* juga banyak ditemukan, misalnya pada pemadam kebakaran, *surface coating*, pelumasan, dan masih banyak lagi.

Metode *spray cooling* terbukti dapat membuang *heat flux* yang tinggi sekaligus mengontrol laju pendinginan yang diinginkan (Bernardin dkk.,1995). Laju perpindahan kalor yang tinggi merupakan suatu keuntungan karena dapat mengurangi ukuran, biaya dan kompleksitas peralatan penukar kalor. Metode *pool boiling* dan *jet impingement* tidak memiliki kemampuan dalam menjamin keseragaman dan kontrol pendinginan yang baik terutama pada permukaan yang mempunyai bentuk kompleks.

Kemampuan perpindahan kalor antara *droplet* dengan permukaan padat ditentukan oleh kemampuan membasahi (*wettability*) antara *droplet* dengan permukaan. Semakin luas kontak yang terjadi maka perpindahan kalor yang terjadi akan semakin tinggi dan *evaporation time* semakin kecil. *Wettability* juga dapat diartikan dalam bentuk sudut kontak, semakin kecil sudut kontak maka akan semakin besar *wettability*. Dengan ditemukannya lapisan  $\text{TiO}_2$  yang memiliki sudut kontak mendekati  $0^\circ$  merupakan peluang dalam meningkatkan efisiensi perpindahan kalor.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan *contact angle* terhadap *spreading factor droplet* di atas kondisi *wetting limit temperature*. Hasil yang diperoleh dari penelitian akan dipergunakan sebagai *database* dalam pengembangan model matematika untuk memprediksi dinamika evaporasi *droplet* dan sebagai bahan referensi dan memberikan kontribusi yang baik bagi perkembangan teknik *spray cooling* diwaktu yang akan datang, khususnya pada temperatur tinggi.

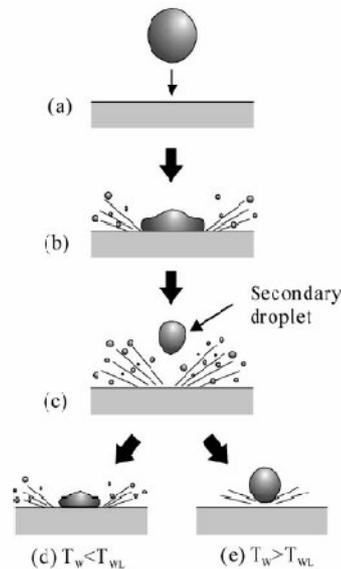
Penelitian mengenai pengaruh sudut kontak *liquid-solid* pada *droplet* sudah pernah dilakukan sebelumnya. Qiao dan Chandra (1997) meneliti pengaruh sudut kontak dengan memberikan *surfactant* (zat untuk menurunkan tegangan permukaan) pada *droplet liquid* untuk mengontrol sudut kontak. Pengaruh yang lebih dominan dengan pemberian *surfactant* tidak diketahui, apakah sudut kontak atau tegangan permukaan.

Hidaka dkk (2006) memanipulasi permukaan dengan variasi kekasaran, disinari plasma dan *coating* permukaan untuk mendapatkan variasi sudut kontak antara  $0^\circ$  hingga  $170^\circ$ . Percobaan yang mereka lakukan terfokus kepada pengaruh sudut kontak terhadap waktu evaporasi, variasi temperatur hingga *wetting limit temperature* dan bilangan Weber rendah.

Padang (2008) meneliti dinamika tetesan pada tiga permukaan yang berbeda yaitu *stainless steel*, *stainless steel* dilapisi  $\text{TiO}_2$  dan *stainless steel* dilapisi  $\text{TiO}_2$  dengan penyinaran ultraviolet dalam mendapatkan variasi sudut kontak. Penelitiannya terfokus pada pengaruh sudut kontak terhadap waktu evaporasi dan karakteristik *droplet* pada bilangan Weber rendah dan variasi temperatur hingga mencapai kondisi Leidenfrost.

Temperatur *wetting limit* atau fluks kalor kritis adalah waktu minimum dalam evaporasi sebuah *droplet*. Daerah pendidihan di atas *wetting limit temperature* dibagi atas pendidihan transisi dan pendidihan film. Takata dkk (2004) menjelaskan kondisi di atas *wetting limit temperature* dapat ditentukan dengan mengamati perilaku evaporasi *droplet*,

yaitu apabila *secondary droplet* yang menimpa permukaan panas tidak terjadi perpecahan (Gambar 1.e).



Gambar 1. Perilaku *droplet* di sekitar *wetting limit temperature* (Takata dkk, 2004)

Salah satu faktor yang mempengaruhi dinamika tumbukan *droplet* adalah energi impak. Parameter yang digunakan untuk mengukur energi impak adalah bilangan Weber yang dipengaruhi oleh diameter, kecepatan, dan sifat fisik *droplet*. Persamaan bilangan Weber sebagai berikut :

$$We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma} \quad (1)$$

dimana,  $\rho$  = adalah massa jenis,  $V$  adalah kecepatan impak *droplet* ( $V = \sqrt{2gh}$ ,  $D$  adalah diameter awal *droplet*,  $h$  adalah ketinggian jatuh *droplet* dan  $\sigma$  adalah tegangan permukaan. Bila ukuran *droplet* terlalu besar bentuknya tidak lagi bulat sempurna tetapi agak lonjong. Oleh karena itu, diameter dihitung menggunakan persamaan Šikalo dkk (2006).

$$D = \left[ D_h^2 D_v \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

## 2. Metodologi Penelitian

Ada dua tahap pengujian yang dilakukan yaitu :

### 2.1 Uji Statis (*Sessile Droop Test*)

Pengujian ini bertujuan untuk mengukur sudut kontak statis untuk berbagai jenis *heat transfer block*, dimana pengamatan dilakukan pada temperatur ruang. Jarum *injector* dengan ketinggian mendekati 0 dari permukaan *heat transfer block*.

## 2.2 Uji Dinamis

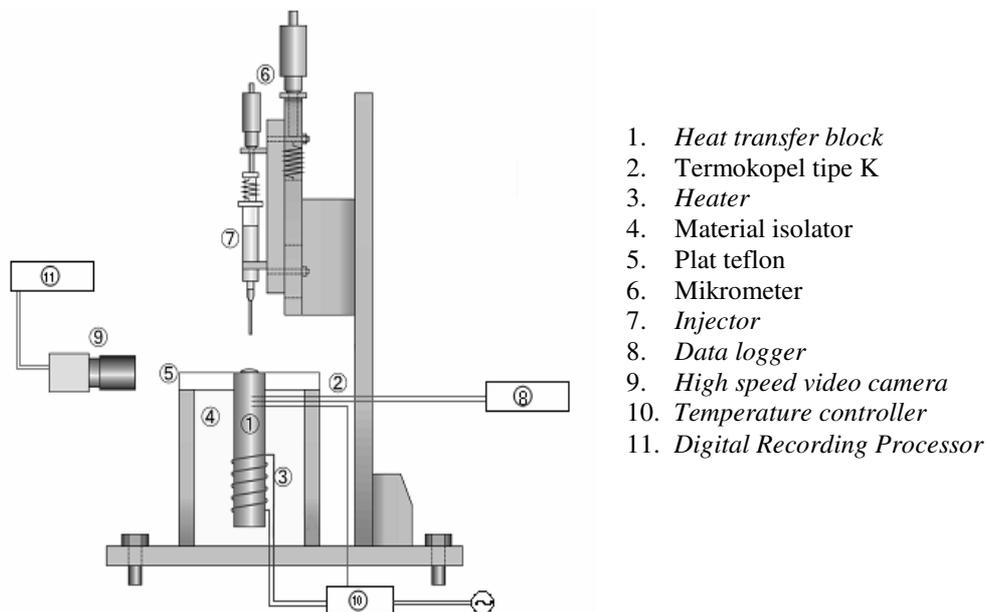
Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik *droplet* setelah ditetaskan. Ketinggian jatuh *droplet* didapat dengan mengatur jarak jarum *injector* terhadap *heat transfer block*. Temperatur permukaan padat yang akan dijatuhi *droplet* diatur dengan menggunakan *temperature controller*. Dinamika tumbukan *droplet* direkam menggunakan *high speed video camera* dengan kecepatan pengambilan gambar 500 frame per detik. Analisa dilakukan berdasarkan data yang diukur melalui *software*.

Parameter pengujian yang akan dilakukan, yaitu :

1. Temperatur permukaan 250–400°C dengan kenaikan temperatur 5°C, sebagai perwakilan untuk daerah di atas kondisi *wetting limit temperature*.
2. Ketinggian jatuh *droplet*: 76, 92, dan 108 mm yang dikonversikan oleh persamaan (1) kebilangan Weber 50,27; 60,85; dan 71,44.
3. Sudut kontak: bahan *stainless steel* (NS), *stainless steel* dengan pelapisan TiO<sub>2</sub> setebal 200 nm (UVN) dan *stainless steel* dengan pelapisan TiO<sub>2</sub> dan disinari sinar ultraviolet (UVW).

## 2.3 Alat Uji

Penelitian ini menggunakan alat dan bahan sebagai berikut:



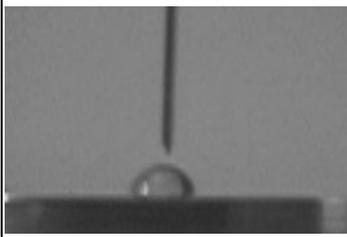
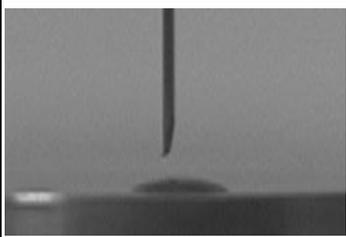
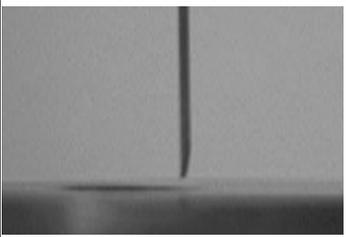
Gambar 2. Susunan alat uji

Fluida *droplet* yang digunakan pada penelitian ini adalah air destilasi. Adapun sifat fisis *droplet* tersebut selama pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Massa jenis } (\rho) &= 996 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Tegangan permukaan } (\sigma) &= 71,2 \times 10^{-3} \text{ N/m}\end{aligned}$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil pengukuran, besarnya sudut kontak statis masing-masing spesifikasi jenis permukaan ditampilkan pada gambar 3. Hasil pengukuran sudut kontak statis atau sudut kontak *equilibrium* diperoleh permukaan NS  $86,80^\circ$ , UVN  $30,72^\circ$  dan UVW mendekati  $0^\circ$ . Hal ini berarti tingkat *wettability* permukaan paling tinggi pada UVW, UVN dan yang paling rendah permukaan NS. Permukaan UVW mempunyai tingkat *wettability* yang sangat tinggi, jika tetesan air menimpa permukaannya maka tetesan tersebut langsung menyebar dan membasahi daerah yang sangat luas sehingga laju perpindahan kalor dari permukaan ke tetesan menjadi tinggi. Permukaan dengan sudut kontak yang kecil ini sangat menguntungkan bila diterapkan pada sistem pendidihan sebab permukaan akan menghasilkan lapisan *film* yang tipis sehingga mampu meningkatkan laju penguapan (Hidaka dkk, 2006).

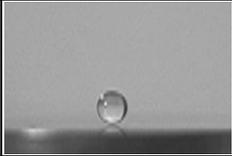
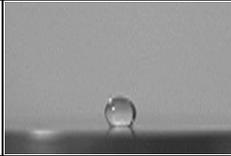
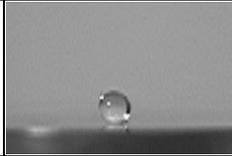
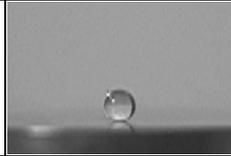
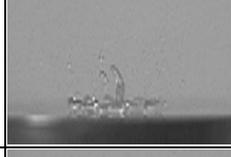
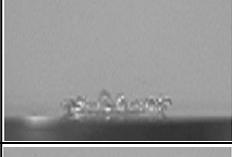
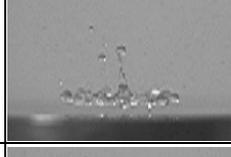
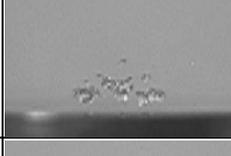
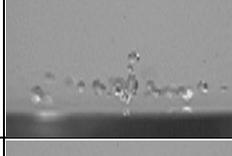
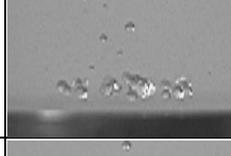
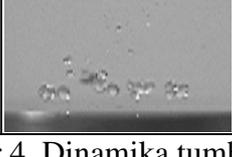
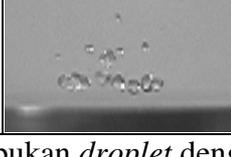
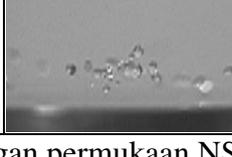
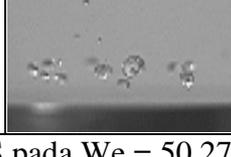
Jenis Permukaan		
NS	UVN	UVW
		
$\theta = 86,80^\circ$	$\theta = 30,72^\circ$	$\theta \approx 0^\circ$

Gambar 3. Sudut kontak statis pada masing-masing spesifikasi jenis permukaan

Gambar 4 menunjukkan pengaruh temperatur terhadap dinamika tumbukan *droplet* dengan temperatur permukaan  $254,0^\circ\text{C}$  yang mempresentasikan keadaan transisi dan temperatur  $295,2$ ,  $357,7$  dan  $394,2^\circ\text{C}$  yang merepresentasikan perilaku *droplet* pada pendidihan film.

Secara umum dengan semakin naiknya temperatur meningkatkan instabilitas penjarangan pada permukaan, dimana dengan naiknya temperatur mengakibatkan semakin cepatnya terbentuk lapisan uap untuk terjadi *breakup*. Hal ini dapat diamati dari perubahan arah *breakup* aksial ( $T_w = 254,0^\circ\text{C}$  dan  $T_w = 292,2^\circ\text{C}$ ) menjadi *breakup* radial ( $T_w = 357,7^\circ\text{C}$  dan  $T_w = 394,2^\circ\text{C}$ ). Cepatnya terbentuk uap dapat juga diamati dengan semakin tingginya *central jet* dan terbentuknya kabut *droplet*. Dinamika tetesan yang terjadi pada

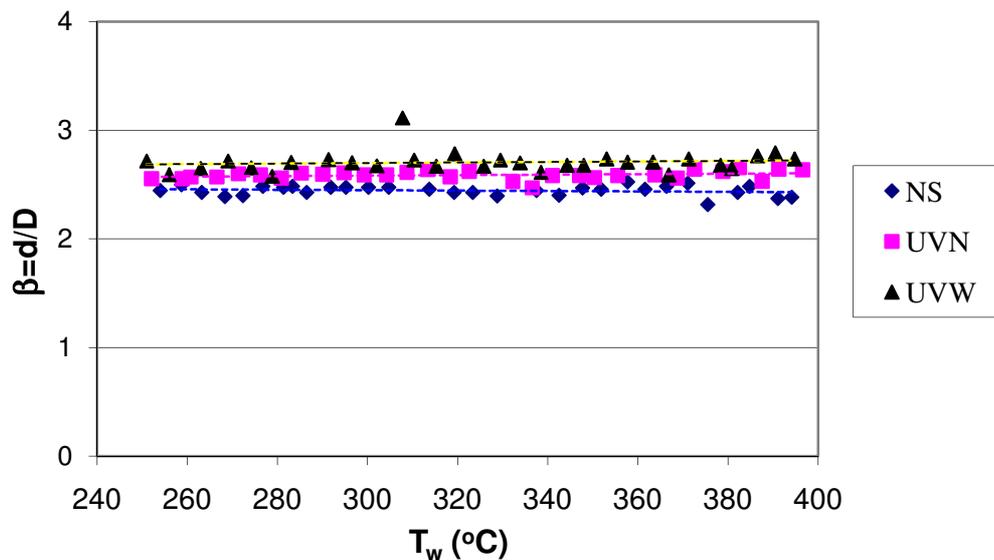
permukaan UVN dan UVW akan menunjukkan pola yang sama dengan tetesan pada permukaan NS.

t (ms)	Temperatur			
	254,0°C	295,2°C	357,7°C	394,2°C
0				
2				
4				
6				
8				
12				

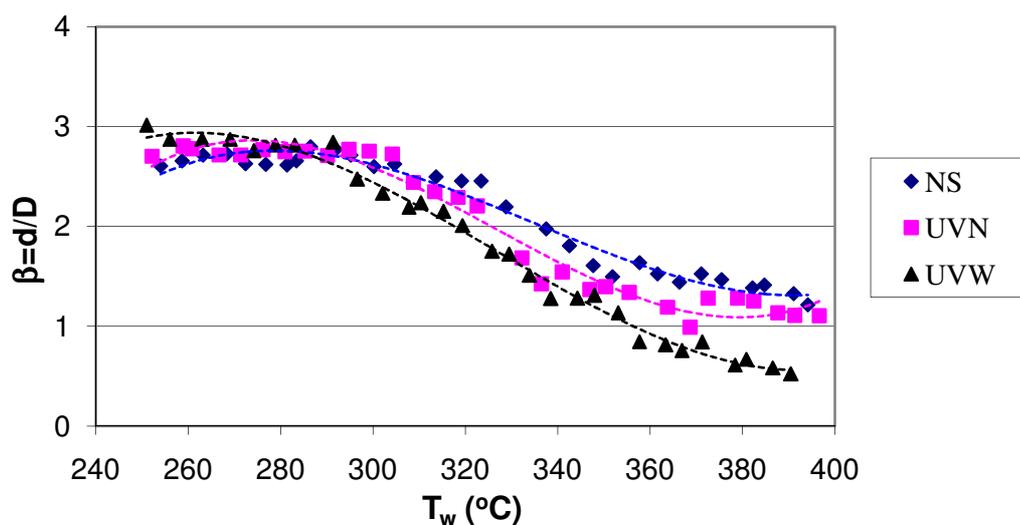
Gambar 4. Dinamika tumbukan *droplet* dengan permukaan NS pada  $We = 50,27$

Gambar 5 memperlihatkan pengaruh sudut kontak statis terhadap *spreading factor* untuk bilangan Weber 50,27 pada 2 ms. Dari Gambar 5 dapat disimpulkan dengan semakin kecil sudut kontak statis, *spreading factor* akan semakin meningkat pada awal tumbukan. Hal tersebut dikarenakan permukaan yang dilapisi dengan  $TiO_2$  mempunyai afinitas yang tinggi terhadap air sehingga kemampuannya menyerap air ke permukaan meningkat. Dengan semakin kecilnya sudut kontak mengakibatkan kecepatan aliran fluida saat penjalaran akan semakin cepat, hal ini yang menyebabkan *spreading factor* akan semakin besar.

Gambar 6 memperlihatkan pengaruh sudut kontak statis terhadap *spreading factor* untuk bilangan Weber 50,27 pada 4 ms. Dari Gambar 6 dapat disimpulkan dengan semakin kecil sudut kontak *spreading factor* akan semakin besar sampai batas *breakup* radial. Dengan semakin kecil sudut kontak mengakibatkan penjaralan *droplet* akan lebih mudah terjadi pecah (*rupture*), sebaliknya dengan semakin besar sudut kontak maka penjaralannya lebih stabil. Sebagai contoh pada bilangan  $We = 50,27$  untuk permukaan UVW *breakup* radial terjadi pada temperatur  $291,4^{\circ}\text{C}$ , untuk permukaan UVN *breakup* radial terjadi pada temperatur  $299,2^{\circ}\text{C}$  dan untuk permukaan NS *breakup* radial terjadi pada  $300,2^{\circ}\text{C}$ .



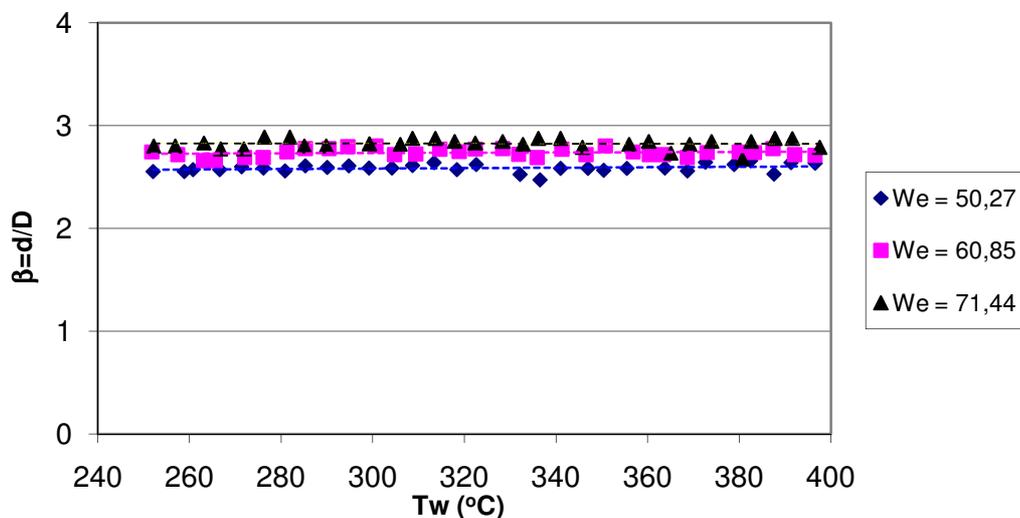
Gambar 5. Pengaruh Sudut Kontak Statis Terhadap *Spreading Factor* pada  $We = 50,27$  dan  $t = 2$  ms



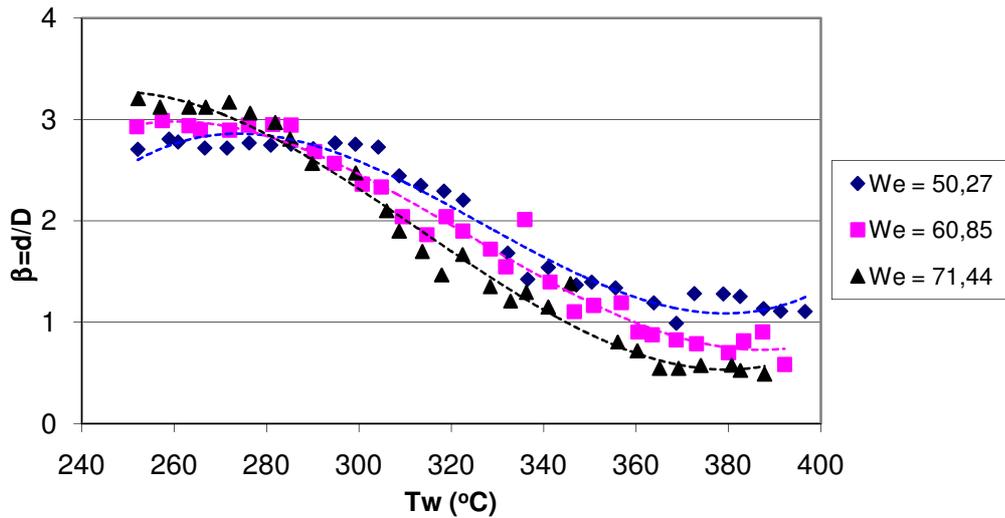
Gambar 6. Pengaruh Sudut Kontak Statis Terhadap *Spreading Factor* pada  $We = 50,27$  dan  $t = 4$  ms

Gambar 7 memperlihatkan pengaruh bilangan Weber terhadap *spreading factor* untuk permukaan UVN pada 2 ms. Dengan meningkatnya bilangan Weber mengakibatkan meningkatnya *spreading factor* di awal tumbukan untuk semua jenis permukaan. Hal ini disebabkan dengan meningkatnya energi tumbukan mengakibatkan semakin besar kecepatan yang didistribusikan untuk melakukan penjalaran. Namun demikian, kenaikan bilangan Weber tidak diikuti oleh kenaikan *spreading factor* secara linier, hal ini disebabkan dengan semakin tinggi bilangan Weber mengakibatkan terjadinya *breakup* kecil yang mengurangi *spreading factor* akibat kecepatan rotasi pada ujung penjalaran (*lamella*).

Gambar 8 memperlihatkan dengan meningkatnya bilangan Weber mengakibatkan *spreading factor* meningkat sampai batas *breakup* aksial. Setelah temperatur melewati batas *breakup* aksial dengan meningkatnya bilangan Weber penjalaran *droplet* semakin tidak stabil dan lebih cepat terjadi *breakup*. Sebagai contoh pada permukaan UVN dengan sudut kontak statis  $\theta = 30,72^\circ$ , dimana untuk bilangan Weber 50,27 *breakup* radial mulai terjadi pada temperatur  $299,2^\circ\text{C}$ , untuk bilangan Weber 60,85 pada temperatur  $290,4^\circ\text{C}$  dan untuk bilangan Weber 71,44 pada temperatur  $281,9^\circ\text{C}$ .



Gambar 7. Pengaruh Bilangan Weber Terhadap *Spreading Factor* pada permukaan UVN dan  $t = 2$  ms



Gambar 8. Pengaruh Bilangan Weber Terhadap *Spreading Factor* pada permukaan UVN dan  $t = 4$  ms

Jika dibandingkan dengan kondisi di bawah *wetting limit temperature* yang didapat oleh Susila (2008) dimana *spreading factor* akan meningkat dengan meningkatnya bilangan Weber. Pada kondisi di atas kondisi *wetting limit temperature*, khususnya pada daerah *breakup* radial *spreading factor* akan menurun dengan meningkatnya bilangan Weber. Hal ini disebabkan dengan kenaikan bilangan Weber dan turunnya tegangan permukaan dengan naiknya temperatur mengakibatkan penjalaran lebih mudah terjadi *breakup*.

#### 4. KESIMPULAN

Sudut kontak statis *droplet* mempengaruhi karakteristik penjalaran di atas permukaan panas. Pengamatan di atas kondisi *wetting limit temperature* diketahui *spreading factor* meningkat dengan makin kecilnya sudut kontak statis hingga batas *breakup* radial terjadi dan setelah batas *breakup* radial *spreading factor* akan semakin menurun. Semakin kecil sudut kontak statis semakin cepat terjadi *breakup* radial.

Di atas kondisi *wetting limit temperature*, meningkatnya bilangan Weber mengakibatkan nilai *spreading factor* semakin besar pada daerah sebelum *breakup* radial namun *spreading factor* akan menurun dengan meningkatnya bilangan Weber pada daerah setelah *breakup* radial. Hal ini disebabkan dengan kenaikan bilangan Weber dan turunnya tegangan permukaan dengan naiknya temperatur mengakibatkan penjalaran lebih mudah terjadi *breakup*. Semakin besar bilangan Weber semakin cepat terjadi *breakup* radial.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bernardin, J.D. and Mudawar, I. 1995. "Validation of the Quench Factor Technique in Predicting Hardness in Heat Treatable Aluminium Alloy". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 38 , 863–873.
- Hidaka, S., Yamashita, A. and Takata, Y. 2006. "Effect of Contact Angle on Wetting Limit Temperature". *Heat Transfer-Asian Research*. 35,513-526.
- Padang, Yesung.A., 2008. *Studi Eksperimental Studi Ekperimental Mengenai Dinamika Tetesan Tunggal Yang Menimpa Permukaan Panas Pada Bilangan Weber Rendah*. Tesis Program Pasca Sarjana, Program Studi Teknik Mesin-UGM.
- Qiao, Y.M. and Chandra, S. 1997. "Experiments on Adding a Surfactant to Water Drops Boiling on a Hot Surface". *Proceeding Royal Society London*. 453, 673–689.
- Šikalo, Š. and Ganić, E.N. 2006. "Phenomena of Droplet-Surface Interactions". *Experimental Thermal and Fluid Science*. 31, 97-110.
- Susila, M.Dyan. 2008. *Studi Eksperimental studi Ekperimental Mengenai Dinamika Tetesan Tunggal Yang Menimpa Permukaan Panas Pada Bilangan Weber Menengah*. Tesis Program Pasca Sarjana, Program Studi Teknik Mesin-UGM.
- Takata, Y.,Hidaka, S., Yamashita, A. and Yamamoto, H. 2004. "Evaporation of Water Drop on A Plasma-irradiated Hydrophilic Surface". *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 25, 320 – 328.