

Perubahan *Preheat Zone Thickness* dan Bilangan Karlovitz pada Fenomena *Flame lift-up* Pembakaran Premix Gas Propana

I Made Kartika Dhiputra, Bambang Sugiarto, Yulianto S. Nugroho, Cokorda Prapti Mahandari

Flames and Combustion Research Group Laboratorium Termodinamika,

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, UI, Depok

Email: dhiputra_made@yahoo.com, bangsugi@eng.ui.ac.id, yulianto.nugroho@ui.ac.id, pmahandari@yahoo.com

ABSTRAK

Fenomena lompatan nyala api atau *flame lift-up* ditemukan pada penelitian menggunakan burner Bunsen. *Flame lift-up* adalah kejadian melompatnya nyala dari ujung burner ke ring yang berada di atas ujung burner. Penelitian dasar tentang nyala api belum banyak membahas penyebab melompatnya nyala api. Dengan pendekatan konsep regangan nyala, kajian awal untuk menentukan bilangan tanpa dimensi penyebab munculnya fenomena ini dibahas dengan menentukan perubahan *preheat zone thickness* kemudian Bilangan Karlovitz. *Preheat zone thickness* ditentukan berdasarkan gradien maksimum dari distribusi temperatur pada sumbu nyala. Sedangkan Bilangan Karlovitz dihitung berdasarkan *preheat zone thickness*, kecepatan nyala dan laju regangan nyala. Peristiwa melompatnya nyala api yang hanya sesaat dianalisis dengan membandingkan kedua parameter pada dua kondisi yakni sesaat sebelum *lift-up* dan sesaat setelah terjadinya *lift-up*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketebalan daerah pemanasan awal dan kecepatan nyala laminar setelah *lift-up* menurun sedangkan Bilangan Karlovitz sebelum dan setelah *lift-up* cenderung tetap yakni sekitar 2.5. Nilai ini dapat dijadikan prediksi awal bahwa lompatan nyala api akan terjadi pada Bilangan Karlovitz 2.5.

Kata kunci: *Lift-up, preheat zone thickness, karlovitz number.*

ABSTRACT

It has been found a phenomenon of flame lift-up on the experiment employing a Bunsen burner. Flame lift-up is the occurrence of flame jumping from the tip burner to the ring that inserting above the burner. Fundamental research on flames did not elaborate the cause of flame jumping. Using flame stretch approach, an initial research on dimensionless number to predict the occasion of this phenomenon was discussed to determine preheat zone thickness and Karlovitz number. Preheat zone thickness was calculated based on temperature distribution of flame axes. Karlovitz number was determined from preheat zone thickness, burning velocity and stretch rate. The occurrence of flame lift-up was less than a second. Therefore the two parameters will be evaluated on two different conditions which are just before and just after lift-up happened. It was found that after lift-up, preheat zone thickness and burning velocity decreased. Karlovitz number just before and after lift-up occurred is about 2.5. This number can be considered as the initial prediction that flame lift-up will be appeared on Karlovitz number 2.5.

Keywords: *Lift-up, preheat zone thickness, karlovitz number.*

PENDAHULUAN

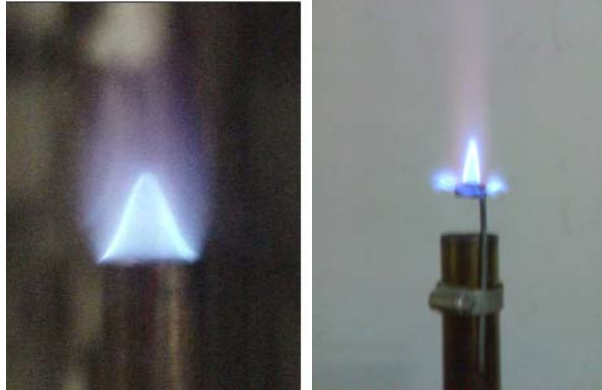
Sebuah fenomena lompatan nyala api ditemukan pada pembakaran premix menggunakan burner Bunsen yang dipasang ring pada jarak tertentu dari ujung burner. Pada saat laju aliran udara ditingkatkan sedangkan laju aliran gas dijaga tetap, pangkal nyala yang sebelumnya pada ujung tabung burner akan berpindah ke ring yang dipasang pada jarak tertentu dari ujung burner. Kejadian ini disebut lompatan nyala api yakni nyala

melompat dari ujung burner menuju ring seperti pada Gambar 1. Akibat melompatnya nyala api maka kerucut nyala yakni bagian nyala yang bersinar terang berbentuk kerucut berubah ukurannya. Sisi tegak kerucut nyala menunjukkan daerah pembakaran premix sepenuhnya.

Daerah pemanasan awal atau *preheat zone thickness* juga berubah dengan melompatnya nyala api dari ujung burner ke ring. Daerah pemanasan awal adalah daerah pemanasan campuran bahan bakar dan oksidator atau udara sebelum ber-

langsungnya penyalaan atau reaksi awal pembakaran.

Kecepatan nyala menurun setelah terjadinya *lift-up*. Kecepatan nyala adalah kecepatan perambatan ujung nyala yang pada pembakaran menggunakan Bunsen dapat didekati dengan laju aliran volume campuran udara dan bahan bakar dibagi luasan permukaan ujung nyala api atau luas permukaan kerucut nyala.



Gambar 1. Nyala Sebelum *Lift-up* (kiri) dan Setelah *Lift-up* (kanan)

Penelitian tentang fenomena *flame lift-up* telah dilakukan dari aspek rasio udara dan bahan bakar atau *Air Fuel Ratio* (AFR), panjang nyala setelah *lift-up* dan temperatur ring saat *lift-up*. Parameter yang diteliti pada ketiga aspek tersebut adalah laju aliran gas, posisi ring dari ujung burner, diameter dalam ring dan material ring [1-6]. Namun semua penelitian tersebut bertujuan untuk menentukan pengaruh parameter terhadap munculnya fenomena *flame lift-up*. Sedangkan penelitian dasar tentang nyala api belum banyak membahas kondisi apa yang membuat nyala api melompat dari ujung burner ke pemegang nyala yakni ringnya. Untuk itu pada penelitian ini akan dibahas kajian analitis untuk menentukan munculnya fenomena ini berdasarkan konsep regangan nyala atau *flame stretch* [7]. Regangan nyala adalah perubahan sesaat luasan penampang nyala dibagi luasan penampang nyala atau dA/A . Secara visual terlihat nyala api mengalami peregangan atau permukaan nyala (*flame front*) memanjang sebelum nyala melompat. Sedangkan laju regangan nyala adalah regangan nyala dibagi dengan perubahan waktu atau $1/A (dA/dt)$.

Pada konsep regangan nyala dikenal bilangan tanpa dimensi yakni Bilangan Karlovitz. Bilangan Karlovitz dinyatakan sebagai perbandingan dua waktu yakni waktu reaksi kimia dan waktu aliran fisik. Waktu reaksi kimia adalah waktu untuk terjadinya reaksi antara bahan bakar dan oksidator yang merupakan fungsi dari ketebalan nyala dibagi kecepatan nyala. Sedangkan waktu aliran fisik

adalah waktu untuk mengalirnya campuran bahan bakar dan udara yang dapat dinyatakan sebagai kebalikan dari laju regangan nyala [8]. Bilangan Karlovitz ini sering digunakan untuk menentukan kondisi padamnya nyala atau *extinction*. Fenomena *flame lift-up* sendiri terjadi pada kondisi yang mendekati *extinction* sehingga penentuan bilangan Karlovitz menjadi salah satu indikator yang dapat digunakan untuk memprediksi munculnya fenomena tersebut.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Termodinamika Departemen Teknik Mesin FT-UI dengan menggunakan alat *Flame Propagation Stability Unit* yang terdiri dari pengukur dan pengatur laju aliran udara dan bahan bakar yang telah disetarakan dengan *Wet Gas meter*, *fan* dan motor AC. Bahan bakar yang digunakan adalah gas propana sedangkan burnernya adalah tabung atau *barell* dengan diameter dalam 14 mm dan tinggi 38 cm dilengkapi dengan alat pengatur ketinggian ring. Sebuah ring dari baja AISI 304 dengan diameter luar 30 mm, diameter dalam 10 mm dan tebal 5 mm dipasang pada jarak 20 mm di atas ujung burner secara konsentris.

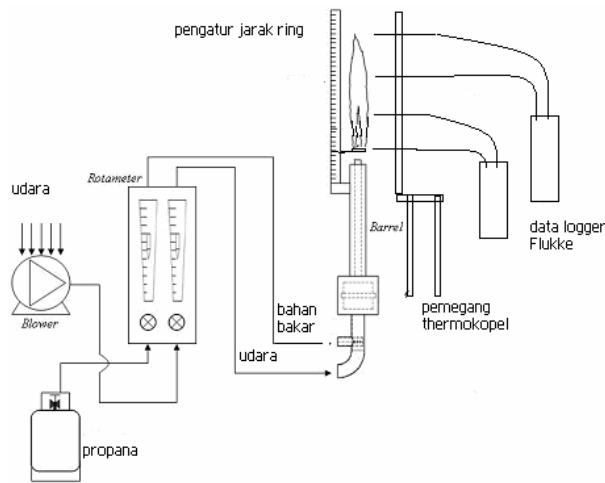
Distribusi temperatur nyala api diukur menggunakan termokopel 200 μm Ni-Cr tanpa koreksi radiasi dan dihubungkan dengan data logger Flukke. Tinggi kerucut nyala diukur dengan mistar baja. Skema penelitian ditampilkan pada Gambar 2. Termokopel dipasang dari pangkal nyala sampai ujung nyala dengan jarak 5 cm. Munculnya fenomena *flame lift-up* diamati pada perubahan AFR. Percobaan dilakukan dengan menetapkan laju aliran gas kemudian mengatur laju aliran udara sampai fenomena nyala api *lift-up* muncul. Saat terjadinya fenomena api *lift-up* maka dilakukan pengukuran laju aliran udara dan tinggi nyala. Pengukuran temperatur dilakukan pada kondisi sesaat sebelum *lift-up* yakni pada kondisi nyala mulai terangkat dari ujung burner dan sesaat setelah *lift-up*. Hasil pengukuran temperatur ini diplot ke dalam grafik distribusi temperatur sepanjang sumbu nyala fungsi jarak dari ujung burner.

Menurut teori dari Zel'dovich ketebalan daerah pemanasan awal dapat diprediksi berdasarkan profil distribusi temperatur yang diturunkan seperti persamaan 1 [7]:

$$\eta_0 = \frac{T_i - T_u}{\left(\frac{dT}{dx}\right)_i} \quad (1)$$

dengan T_i adalah temperatur penyalaan semu ($^{\circ}\text{C}$) and T_u adalah temperatur gas yang belum terbakar ($^{\circ}\text{C}$). Temperatur penyalaan semu ditentukan dari

ordinat grafik dengan absisnya adalah nilai dari gradien atau kemiringan grafik distribusi temperatur atau turunan kedua dari persamaan fungsinya disamakan dengan nol.



Gambar 2. Skema Peralatan

Bilangan Karlovitz pertama kali ditemukan tahun 1953 oleh Karlovitz dkk untuk menjelaskan fenomena regangan nyala yang dinyatakan dalam persamaan 2 [7].

$$K = \frac{\partial(\ln \Delta A)}{\partial t} \frac{\eta_o}{S_u} \quad (2)$$

dengan K adalah Bilangan Karlovitz number, $\frac{\partial(\ln \Delta A)}{\partial t}$

adalah laju regangan nyala, (1/dt), η_o adalah ketebalan daerah pemanasan awal, (m) dan S_u adalah kecepatan nyala laminar (m/s). Laju regangan nyala (*stretchrate*) dapat diturunkan dari elemen nyala pada lokasi radius nyala, r_f bentuk kerucut pada nyala pembakaran menggunakan burner Bunsen seperti ditampilkan pada Persamaan 3 [9].

$$\text{stretchrate} = \frac{U \sin \theta}{r_f} \quad (3)$$

dengan U adalah kecepatan aliran seragam dari campuran bahan bakar dan udara, (m/s), θ adalah sudut puncak dari nyala dan r_f adalah radius nyala (m). Untuk menentukan Bilangan Karlovitz Persamaan 3 disubstitusikan ke Persamaan 2 menjadi Persamaan 4:

$$K = \frac{U \sin \theta \eta_o}{r_f S_u} \quad (4)$$

Kecepatan nyala laminar pada pembakaran menggunakan burner Bunsen dapat diperkirakan dengan menggunakan pendekatan oleh Sharma [8].

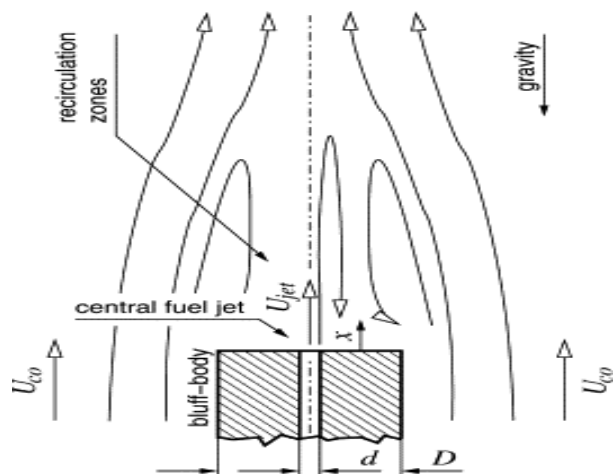
$$S_u = \frac{Q_f}{A_{ff}} = \frac{2Q_f}{\pi r_f \sqrt{h_f^2 + r_f^2}} \quad (5)$$

dengan Q_f adalah laju aliran volume campuran bahan bakar (m^3/dt) dan A_{ff} adalah luas permukaan ujung nyala atau *flame front* (m^2) dan h_f adalah tinggi nyala (m) yakni jarak dari pangkal nyala sampai ujung nyala.

Daerah sebelum pembakaran adalah satu dari 3 daerah pada pembakaran. Nilai ketebalan daerah pemanasan awal sangat dipengaruhi oleh kenaikan temperatur pada gas yang belum terbakar. Hasil perhitungan semua parameter berdasarkan grafik hasil pengukuran temperatur sesaat sebelum dan sesaat setelah *lift-up* akan dibandingkan untuk memperoleh nilai parameter yang konstan sebagai acuan timbulnya fenomena *flame lift-up*.

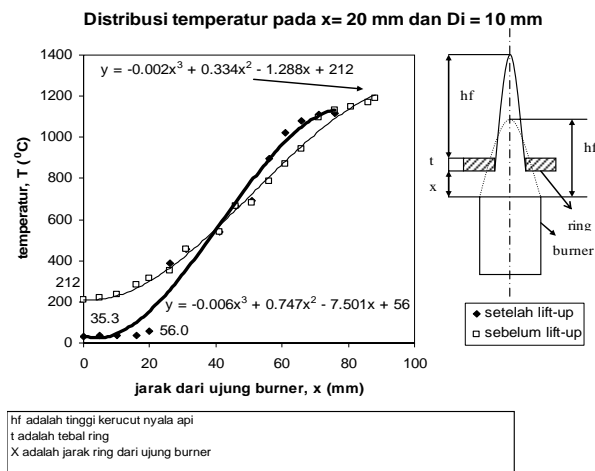
HASIL DAN PEMBAHASAN

Fenomena *flame lift-up* dari hasil pengamatan visual mirip dengan *supported flame* yang dikemukakan oleh Sharma [8] bahwa campuran bahan bakar dan udara dapat dinyalakan diatas kawat yang dipasang pada jarak tertentu dari ujung burner. Kawat akan berfungsi sebagai penyangga nyala atau *flame holder*. Sedangkan menurut Lewis dan von Elbe pada Drysdale [10], nyala diatas penyangga nyala tersebut mengandung sisa nyala api yakni sisa campuran bahan bakar dan udara yang masih dapat terbakar diatas kawat. Hal ini dimungkinkan oleh adanya daerah resirkulasi diatas suatu benda penghalang pada daerah aliran seperti ditampilkan pada Gambar 3. Selain itu pusaran atau *swirl* dapat timbul pada aliran tepat setelah penyangga nyala tersebut. Daerah pusaran merupakan daerah dengan penurunan tekanan akibat adanya kenaikan kecepatan aliran sesuai dengan hukum kekekalan energi. Dengan demikian pusaran ini dapat berfungsi sebagai sumber panas dan sumber radikal aktif dalam hal ini adalah OH dan CH yang merupakan komponen dalam reaksi pembakaran yang belum sempurna.



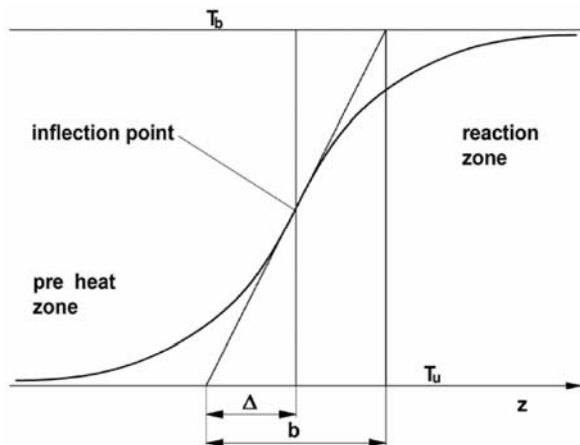
Gambar 3. Daerah Resirkulasi pada Aliran di atas Benda Penghalang [11].

Sedangkan hasil percobaan pada posisi ring 2 cm dari ujung burner dan laju aliran propana dipatok pada skala 2 di rotameter yang setara dengan 23 cm³/dt, fenomena *flame lift-up* terjadi pada laju aliran udara 820 cm³/dt. Sedangkan hasil pengukuran tinggi kerucut nyala sebelum *lift-up* adalah 3,8 cm dan setelah *lift-up* 6,3 cm. Radius pangkal nyala sebelum *lift-up* diasumsikan sama dengan radius burner yakni 0,7 cm dan setelah *lift-up* sama dengan radius lubang ring yakni 0,5 cm. Dari hasil pengukuran temperatur pada sepanjang sumbu nyala sesaat sebelum dan sesaat setelah *lift-up* maka dibuat grafik temperatur fungsi jarak dari ujung burner seperti ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Distribusi Temperatur Nyala Sebelum dan Setelah Lift-up.

Grafik Gambar 4 sesuai dengan grafik profil temperatur pada daerah pembakaran seperti pada Gambar 5. Pada Gambar 5. T_b adalah temperatur nyala dan T_u adalah temperatur gas yang belum terbakar. Titik belok atau *inflection point* adalah titik penentuan temperatur penyalaan semu dimana tercapai kondisi gradien temperatur yang maksimum. Sedangkan Δ adalah tebal daerah pemanasan awal atau *preheat zone thickness*.



Gambar 5. Profil Temperatur pada Daerah Pembakaran [7]

Pada Gambar 4 diperlihatkan 2 grafik yakni yang tipis adalah kondisi sesaat sebelum *lift-up* dan yang tebal adalah sesaat setelah *lift-up*. Grafik sebelum *lift-up* menunjukkan bahwa nyala api masih menempel pada ujung burner dan temperatur nyala tepat di tengah-tengah sumbu pada ujung burner mencapai 212 $^{\circ}\text{C}$. Setelah *lift-up* terlihat tidak ada nyala antara ujung burner dan ring. Sehingga seolah-olah burner diperpanjang sampai ke ring karena temperatur gas antara burner dan ring antara 35 $^{\circ}\text{C}$ s/d 56 $^{\circ}\text{C}$.

Temperatur penyalaan semu kondisi sebelum *lift-up* ditentukan seperti pada Persamaan 6 sesuai persamaan grafik distribusi temperatur pada Gambar 4, yakni

$$T = y = -0,0022x^3 + 0,3339x^2 - 1,2881x + 212 \quad (6)$$

$$\frac{dy}{dx} = -0,0066x^2 + 0,6678x - 1,2881$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -0,0132x + 0,6678 = 0$$

$$x_i = \frac{0,6678}{0,0132} = 50,6$$

$$T(x_i) = -0,0022(50,6)^3 + 0,3339(50,6)^2 - 1,2881(50,6) + 212 = 716^{\circ}\text{C}$$

Ketebalan daerah pemanasan awal dihitung dengan Persamaan 3 dengan terlebih dahulu menentukan kemiringan grafik temperatur pada titik penyalaan semu atau $(dT/dx)_i$ yang hasilnya adalah 15,6 $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ sehingga ketebalan daerah pemanasan awal adalah 3,23 cm sesuai langkah perhitungan berikut:

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_i = -0,0066(50,6)^2 + 0,6678(50,6) - 1,2881 = 15,6^{\circ}\text{C}/\text{mm}$$

$$\eta_0 = \frac{T_i - T_u}{\left(\frac{dT}{dx}\right)_i} = \frac{716^{\circ}\text{C} - 212^{\circ}\text{C}}{15,6^{\circ}\text{C}/\text{mm}} = 32,3\text{mm} = 3,23\text{cm}$$

Kecepatan seragam campuran bahan bakar dan udara ditentukan dari persamaan 7.

$$U = \frac{4Q_f}{\pi D_b^2} = \frac{4(23 + 820)/2}{3,14 \times (1,4)^2} = 274\text{cm}/\text{dt} \quad (7)$$

Laju regangan atau *stretch rate* nyala api ditentukan dari persamaan 3.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{r_f}{\sqrt{r_f^2 + h_f^2}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{0,7}{\sqrt{(0,7)^2 + (3,8)^2}}\right) = 10,4^{\circ}$$

$$\text{stretchrate} = \frac{U \sin \theta}{r_f} = \frac{274 \sin 10,4^{\circ}}{0,7} = 71/\text{dt}$$

Kecepatan nyala ditentukan dengan persamaan 2

$$S_u = \frac{Q_f}{A_{ff}} = \frac{2Q_f}{\pi r_f \sqrt{h_f^2 + r_f^2}} = \frac{2 \times (23 + 820)/2}{3,14 \times 0,7 \times \sqrt{(3,8)^2 + (0,7)^2}} = 99\text{cm}/\text{dt}$$

Bilangan Karlovitz dihitung dengan persamaan 4

$$K = \frac{U \sin \theta \eta_0}{r_f S_u} = \frac{71/\text{dt} \times 3,23\text{cm}}{0,7 \times 99\text{cm}/\text{dt}} = 2,3$$

Sedangkan penentuan Bilangan Karlovitz untuk kondisi setelah penyalaan ditentukan dengan langkah yang sama. Temperatur penyalaan semu kondisi setelah *lift-up* ditentukan seperti Persamaan 8 yang sesuai dengan persamaan grafik pada Gambar 4. yakni :

$$T = y = -0,0053x^3 + 0,6636x^2 - 5,0144x + 56 \quad (8)$$

$$\frac{dy}{dx} = -0,0159x^2 + 1,3356x - 5,0144$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -0,0318x + 1,3356 = 0$$

$$x_i = \frac{1,3356}{0,0318} = 42$$

$$T(x_i) = -0,0053(42)^3 + 0,6636(42)^2 - 5,0144(42) + 56 = 623^{\circ}C$$

Ketebalan daerah pemanasan awal diperoleh 2,46 cm dengan langkah perhitungan seperti berikut.

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_i = -0,0159(42)^2 + 1,3356(42) - 5,0144 = 23^{\circ}C/mm$$

$$\eta_0 = \frac{T_i - T_u}{\left(\frac{dT}{dx}\right)_i} = \frac{623^{\circ}C - 56^{\circ}C}{23^{\circ}C/mm} = 32,3mm = 24,6mm = 2,46cm$$

$$U = \frac{4Q_f}{\pi D_b^2} = \frac{4(23 + 820)/2}{3,14x(1,0)^2} = 536cm/dt$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{r_f}{\sqrt{r_f^2 + h_f^2}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{0,5}{\sqrt{(0,5)^2 + (6,3)^2}}\right) = 4,5^{\circ}$$

$$stretchrate = \frac{U \sin \theta}{r_f} = \frac{536x \sin 4,5^{\circ}}{0,5} = 84/dt$$

$$S_u = \frac{Q_f}{A_{ff}} = \frac{2Q_f}{\pi r_f \sqrt{h_f^2 + r_f^2}} = \frac{2x(23 + 820)/2}{3,14x0,5x\sqrt{(6,3)^2 + (0,5)^2}} = 84cm/dt$$

$$K = \frac{U \sin \theta \eta_0}{r_f S_u} = 84/dtx \frac{2,46cm}{84cm/dt} = 2,46$$

Preheat zone thickness dapat juga ditentukan dari perbandingan diffusivitas panas gas dengan kecepatan nyala seperti pada persamaan 9 [10]:

$$\eta_o = \frac{k}{c_p \rho_u S_u} = \frac{\alpha}{S_u} \quad (9)$$

dengan k adalah konduktivitas thermal dari gas (W/m.C), c_p koefisien panas spesifik gas (J/kg.C), ρ_u adalah massa jenis gas sebelum terbakar (kg/m³) dan α adalah diffusivitas panas dari gas (m²/s). Dengan demikian Bilangan Karlovitz dapat juga ditentukan dengan mensubstitusikan persamaan 6 ke persamaan 4 menjadi :

$$K = \frac{U \sin \theta}{r_f} \frac{\alpha}{(S_u)^2} = \frac{U \sin \theta \eta_o^2}{r_f \alpha} \quad (10)$$

Berdasarkan Persamaan 10 maka diffusivitas panas gas dapat ditentukan. Keseluruhan hasil

perhitungan pada kondisi sesaat sebelum dan sesaat setelah *lift-up* ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Sesaat Sebelum dan Sesaat Setelah *Lift-up*.

	Sebelum <i>lift-up</i>	Setelah <i>lift-up</i>
Ketebalan daerah pemanasan awal (cm)	3,23	2,46
Laju regangan nyala (1/dt)	71	84
Kecepatan nyala Laminer (cm/dt)	99	84
Bilangan Karlovitz	2,3	2,46
Diffusivitas panas (m ² /dt)	3,22 x10 ⁻²	2,04 x10 ⁻²

Ketebalan daerah pemanasan awal pada kondisi setelah *lift-up* mengalami penurunan karena temperatur penyalaan semu setelah *lift-up* juga mengalami penurunan. Hal ini mengindikasikan bahwa terdapat sebagian campuran bahan bakar dan udara terhalang oleh ring sehingga terlepas ke sekeliling dan tidak masuk ke daerah reaksi. Namun porsi ini tidak memberikan kontribusi yang besar karena dari sisi panjang nyala ternyata panjang nyala setelah *lift-up* meningkat. Dari aspek panjang nyala faktor yang lebih berperan adalah kecepatan nyala laminar. Kecepatan nyala laminar sebelum *lift-up* jauh lebih tinggi dari pada setelah *lift-up*. Hal ini menyebabkan panjang nyala sebelum *lift-up* lebih pendek dibandingkan dengan panjang nyala setelah *lift-up*. Kecepatan nyala yang tinggi mengakibatkan campuran bahan bakar dan udara lebih cepat terbakar sehingga dengan laju campuran bahan bakar yang sama akan diperoleh panjang nyala yang lebih pendek. Hasil ini sesuai juga dengan hasil penelitian sebelumnya [6,7].

Penurunan ketebalan daerah pemanasan awal yang diikuti juga dengan penurunan kecepatan nyala laminar jika diperiksa dengan Persamaan 10 menunjukkan bahwa diffusivitas panas menurun setelah terjadinya *lift-up*. Kondisi ini sesuai dengan pengaruh temperatur terhadap diffusivitas panas yakni makin rendah temperaturnya maka diffusivitas panas makin kecil. Pada kondisi setelah *lift-up* baik temperatur penyalaan semu maupun temperatur nyala diujung burner serta setelah ring yakni pada posisi 20 mm, semuanya lebih kecil dari pada kondisi sebelum *lift-up*.

Dari aspek laju regangan nyala jelas terlihat bahwa sebelum *lift-up* regangan nyala lebih rendah dari setelah *lift-up*. Hasil ini jika dibandingkan dengan hasil eksperimen dari penelitian yang lain merupakan laju regangan nyala karena regangan bukan karena kelengkungan atau *curvature* dari nyala [12].

Sedangkan dari Bilangan Karlovitz sesuai dengan perkiraan nilainya hampir sama antara sebelum *lift-up* dan setelah *lift-up*. Perbedaannya

timbul karena kendala jeda pengukuran sesaat dan sebelum lift-up serta faktor pembulatan perhitungan. Bilangan Karlovitz antara 2 dan 2,5 menandakan waktu reaksi kimia lebih lama dari pada waktu yang dibutuhkan untuk aliran fisik. Hasil ini sesuai dengan perubahan sifat campuran yakni nilai diffusivitas panas yang berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa kerugian panas yang terserap oleh material ring cukup besar mengingat ring terbuat dari stainless steel. Hal ini telah terbukti pada penelitian tentang pengaruh material ring terhadap fenomena *flame lift-up* [5,6].

Penentuan Bilangan Karlovitz pada penelitian ini didasarkan pada penentuan ketebalan daerah pemanasan awal yang dihitung berdasarkan distribusi temperatur. Bilangan Karlovitz yang diperoleh cenderung lebih besar [13, 14, 15] jika dibandingkan dengan Bilangan Karlovitz yang dihitung berdasarkan tebal nyala. Hal ini disebabkan oleh penentuan tebal nyala berdasarkan sifat campuran gas seperti pada persamaan 10 cenderung menghasilkan tebal nyala yang sangat kecil [16,17] sehingga Bilangan Karlovitz yang diperoleh juga lebih kecil.

KESIMPULAN

Fenomena *flame lift-up* yang terjadi sangat cepat dapat dianalisis dengan membandingkan kondisi sesaat sebelum *lift-up* dan sesaat setelah *lift-up*. Ketebalan daerah pemanasan awal dan kecepatan nyala menurun setelah terjadinya *lift-up*. Salah satu parameter yang mendekati sama nilainya adalah Bilangan Karlovitz yakni antara 2 sampai 2,5. Bilangan Karlovitz ditentukan berdasarkan ketebalan daerah pemanasan awal yang dihitung berdasarkan distribusi temperatur. Perbedaan nilai perhitungan karena berbagai faktor bukan merupakan kendala untuk menentukan kecenderungan perubahan parameter yang terjadi sesaat sebelum *lift-up* dan sesaat setelah *lift-up*.

DAFTAR PUSTAKA

1. Cokorda Prapti Mahandari, I Made Kartika D, *Flame Lift-up on A Bunsen Burner; A Preliminary Study*. Proceeding Seminar Internasional QIR, UI Depok, Jakarta, EPE-13, 2007.
2. I Made Kartika Dhiputra, Hamdan Hartono A, Cokorda Prapti Mahandari, *Perubahan Panjang Nyala Api pada Fenomena "Flame Lift-up" Akibat Letak Ketinggian Posisi Ring Flame-Hold*, Proceeding Seminar Nasional Teknik Mesin 3, Surabaya, Indonesia, hal 101-104, 2008.
3. I Made Kartika, Bambang Sugiarto, Cokorda Prapti Mahandari, *The Influence of Inside Diameter of Ring on Flame Height and AFR of Flame Lift-up Phenomenon; an Experimental Study*, Proceeding of International Conference of Graduate Engineering and Science (ICGES), UTM Johor, Malaysia, 2008.
4. I Made Kartika Dhiputra, Eko Warsito, Cokorda Prapti Mahandari, *Karlovitz Number for Predicting A flame lift-up on Propane Combustion*, Proceeding The 1st International Meeting on Advances in Thermo-Fluid 26th August 2008, UTM Johor, Malaysia. 2008.
5. I Made Kartika Dhiputra, Bambang Sugiarto, Amri Parlindungan Sitinjak, Cokorda Prapti Mahandari, *Pengaruh Material Ring Pada Fenomena Nyala Api Lift-up*, Proceeding Seminar Nasional Teknik Mesin ITENAS, Bandung, hal TKE 24-29, 28 Oktober 2008.
6. I Made Kartika Dhiputra, Yulianto S. Nugroho, Pratomo Setyadi, Cokorda Prapti Mahandari, *Ring Temperature Effect on Propane Flame lift-up*, Proceeding of International Conference of Graduate Engineering and Science (ICGES), UTM Johor, Malaysia, 2008.
7. Strehlow, Roger A., *Combustion Fundamentals*, McGraw-Hill Book Co, Singapore, 1985.
8. Sharma, S.P., Mohan Chander, *Fuels and Combustion*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1984.
9. Matalon, M, *On the Flame Stretch*, Combust. Sci. Tech. 29, hal, 225-238, 1983.
10. Drysdale, D., *An Introduction to Fire Dynamics*, John Wiley and Sons, Chichester, 1985.
11. Dally, B. B.; Fletcher, D. F.; Masri, A. R. *Flow and mixing fields of turbulent bluff-body jets and flames*, Combustion Theory and Modelling, Volume 2, Issue 2, pp. 193-219, 1998.
12. Law, C.K., Cho, P., *Flame Curvature and Preferential Diffusion in the Burning Intensity of Bunsen Flames*, Twenty-first Symposium on Combustion The Combustion Institute, hal. 1803-1809, 1986.
13. Law C. K., *Dynamics of Stretched Flames*, Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, hal. 1381-1402, 1989.
14. Sung C. J., Liu J. B. and Law C. K., *On the Scalar Structure of Nonequidiffusive Premixed Flames in Counterflow*, Combust. Flame, 106, hal. 168-183, 1996.
15. Dinkelacker F., *Experimental Validation of Flame Regimes for Highly Turbulent Premixed Flames*, Proceedings of ECM2003, Orleans-France, October 25-28, 2003.

16. O'Young F. and Bilger R. W., *Scalar gradient and related quantities in turbulent premixed flames*, Combust. Flame, 109, hal. 682-700, 1997.
17. Gottgens., Mauss F and Peters N., *Analytic Approximations of Burning Velocities and flame thicknesses of lean hydrogen, methane, ethylene, ethane, acetylene and propane flames*. Proc. Combust. Inst. 24, hal. 129-135, 1992.