

M8-014 Kajian Eksperimental Fenomena *Flame Lift-up*

**I Made Kartika Dhiputra^a, Bambang Sugiarto^b, Yulianto S. Nugroho^c,
Cokorda Prapti Mahandari^d**

^{a,b}*Flame and Combustion Research Group Thermodynamic Laboratory,
Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik*

Universitas Indonesia, Depok 16424

Tel : (021) 7270032. Fax : (021) 7270033

*E-mail : ^adhiputra_made@yahoo.com, ^bbangsugi@eng.ui.ac.id, ^cyulianto@ui.edu
^dpmahandari@yahoo.com*

ABSTRACT

Penelitian tentang fenomena lompatan nyala api atau flame lift-up merupakan penelitian fundamental di bidang pembakaran gas. Fenomena ini dapat dimunculkan pada pembakaran premix menggunakan Bunsen burner yang dipasang penghalang pada jarak tertentu dari ujung burner. Fenomena ini akan muncul saat tercapai laju aliran bahan bakar dan laju aliran udara tertentu. Dengan mempertimbangkan penerapan pada perancangan burner maka dilakukan kajian eksperimental dari aspek munculnya fenomena, panjang nyala setelah lift-up serta temperatur ujung burner setelah lift-up. Keseluruhan hasil kajian eksperimental yang telah dilakukan akan ditampilkan untuk memprediksi parameter yang paling berpengaruh dalam memunculkan fenomena ini. Penghalang yang digunakan adalah ring dengan bentuk yang sama yakni diameter luar dan tebal yang sama, namun berbeda ukuran diameter dalamnya. 2 variasi bahan ring yakni AISI 304 dan keramik juga diteliti pengaruhnya terhadap fenomena ini. Parameter yang diamati adalah perbandingan udara dan bahan bakar atau Air Fuel Ratio (AFR), posisi ring dari ujung burner, panjang nyala setelah lift-up, temperatur ujung burner dan temperatur ring saat lift-up. Pengukuran AFR dilakukan berdasarkan hasil pengukuran laju aliran udara menggunakan orifice flow meter dan pengukuran laju bahan bakar menggunakan rotameter. Panjang nyala setelah lift-up diukur secara visual dengan mistar baja serta dibandingkan dengan pengukuran menggunakan kamera termograph yang dilengkapi dengan perangkat lunak pengolah citra. Kamera termograph utamanya dipergunakan untuk mengukur temperatur ring dan temperatur ujung burner. Pengukuran temperatur juga dilakukan dengan menggunakan thermokopel tipe S berbahan platinum dan rhodium. Hasil eksperimental menunjukkan bahwa fenomena flame lift-up timbul pada AFR yang lebih kecil dari AFR blow-off atau pada pembakaran yang miskin bahan bakar. Pada bahan ring dari keramik flame lift-up terjadi pada AFR yang lebih rendah jika dibandingkan dengan pada bahan AISI 304 namun tetap lebih tinggi dari AFR blow-off. Posisi ring juga mempengaruhi munculnya fenomena flame lift-up yakni semakin rendah posisi ring atau semakin dekat dengan ujung burner maka fenomena flame lift-up akan terjadi pada AFR yang lebih rendah. Diameter dalam ring atau luas penghalang tidak terlalu berpengaruh. Pada AFR tertentu, terdapat rentang posisi penghalang yang memungkinkan terjadinya lift-up. Diatas rentang posisi tersebut nyala api akan padam sedangkan pada posisi dibawah rentang akan membuat nyala kembali menempel pada ujung burner. Temperatur ujung burner setelah lift-up menurun jika dibandingkan dengan kondisi sebelum lift-up atau kondisi tanpa ring. Meskipun hal ini

tidak dapat dibandingkan secara langsung karena AFR untuk terjadinya lift-up jauh lebih tinggi dari pada AFR tanpa ring namun hasil ini sesuai dengan hasil riset tentang simulasi temperatur ujung burner sebagai pengaruh rasio equivalens atau AFR. Hasil ini dapat menjadi pertimbangan penerapan fenomena ini pada rancangan burner untuk mengatasi kerusakan pada ujung burner akibat temperatur tinggi. Penerapan fenomena ini juga membutuhkan kajian tentang panjang nyala. Panjang nyala setelah lift-up sangat dipengaruhi oleh AFR. Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian lain tentang panjang nyala api premix. Makin tinggi AFR maka panjang nyala akan menurun. Hal ini terlihat jelas pada penggunaan bahan ring yang berbeda. Pada bahan ring dari keramik panjang nyala jauh lebih tinggi dibandingkan dengan panjang nyala pada ring dari AISI 304. Mengingat pada dimensi penghalang yang sama namun bahan berbeda tercapai AFR yang berbeda untuk terjadinya lift-up maka bahan ring sangat mempengaruhi munculnya fenomena ini. Bahan ring mempengaruhi temperatur ring yang tercapai saat terjadinya lift-up.

Keywords: flame lift-up, premix, pembakaran

1. Pendahuluan

Kajian tentang pembakaran sangat mempengaruhi kemajuan suatu industri terutama yang berkaitan langsung dengan pembakaran seperti industri pengecoran, pembangkit daya, transportasi, keramik, bahan kimia serta industri lain yang mempergunakan ruang bakar atau tungku. Kajian eksperimental maupun kajian teoritis tentang pembakaran telah banyak dilakukan untuk lebih memahami fenomena pembakaran. Simulasi dengan berbagai macam metode numerik semakin banyak dilakukan didukung kemajuan di bidang teknologi informasi [1-3]. Langkah-langkah tersebut pada dasarnya bertujuan untuk memperoleh metode baru membakar bahan bakar dengan lebih hemat, bersih dan stabil.

Berbagai macam metode telah diteliti baik dari aspek kuantitas dan kualitas aliran campuran udara dan bahan bakar maupun rekayasa peralatan burner. Dari aspek aliran campuran udara dan bahan bakar, salah satu metode untuk memperoleh pembakaran yang bersih adalah pembakaran pada kondisi campuran dengan nilai udara lebih (excess air) yang tinggi atau kaya oksigen atau miskin bahan bakar. Namun kondisi ini sangat mempengaruhi kestabilan nyala karena timbulnya fenomena mudah padam (blow-off). Fenomena pembakaran yang juga berhubungan dengan kestabilan nyala adalah fenomena flashback atau backfire dan liftoff yang telah banyak diteliti secara teoritis maupun eksperimental. Sedangkan dari aspek burnernya, untuk mencapai kestabilan nyala dilakukan penambahan peralatan burner seperti benda padat (bluff-body), penstabil nyala berupa ring, flame holder maupun pembangkit panas seperti ignitors dan pilot flame. Hal inipun telah banyak sekali kajiannya.

Untuk mengembangkan burner yang unjuk kerjanya tinggi dan emisi polutannya rendah dibutuhkan penelitian yang rinci tentang konfigurasi dan perilaku nyala yang mempengaruhi stabilitas nyalanya. Faktor yang membatasi stabilitas nyala adalah kecepatan rambat nyala bagian depan. Sedangkan dari aspek lingkungan rancangan burner yang ada masih cenderung mengeluarkan emisi NO_x yang tinggi. Dari sisi penggunaan burner, kerusakan pada ujung nosel burner sering terjadi. Hal ini disebabkan oleh suhu tinggi dari nyala yang menurunkan ketahanan material nosel. Penggantian nosel disamping menghambat kelangsungan operasi juga membutuhkan dana yang besar. Salah satu alternatif untuk mengatasi hal tersebut adalah pengalihan nyala ke jarak tertentu dari ujung nosel yakni nyala terangkat

atau lifted flame. Nyala terangkat timbul akibat peristiwa lift-off. Namun nyala terangkat memiliki kendala ketidakstabilan yang tinggi [4]

Salah satu cara yang telah terbukti meningkatkan kestabilan nyala adalah penggunaan ring. Penelitian tentang ring penstabil nyala menemukan bahwa selain meningkatkan kestabilan nyala juga menurunkan kadar emisi NOx [5]. Namun pada penelitian tersebut ring dipasang tepat dikeluarkan burner sehingga nyala tetap berpotensi mengganggu ketahanan burner. Dengan memasang ring pada jarak tertentu maka nyala akan berpindah ke ring dan menyala stabil di ring tersebut. Fenomena ini berbeda dengan lift-off dan disebut dengan flame lift-up. Ring dalam hal ini berfungsi juga sebagai pemegang nyala. Penelitian tentang perbedaan karakteristik blow off dari 3 bentuk pemegang nyala yakni silinder pejal, kerucut dan piringan menghasilkan bahwa bentuk silinder memiliki kestabilan nyala yang paling tinggi jika dibandingkan dengan yang lain Hasil ini diperoleh berdasarkan perubahan modulasi kecepatan gas [6].

Kajian eksperimental tentang fenomena flame lift-up dilakukan dengan mempertimbangkan penerapan pada perancangan burner dari aspek munculnya fenomena, panjang nyala setelah lift-up serta temperatur ujung burner setelah lift-up dan temperatur ring.

2. Metode Penelitian

Penelitian fenomena flame lift-up dilakukan dengan menggunakan alat *Flame Propagation Stability Unit* dilengkapi dengan alat pengatur udara dan bahan bakar. 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. Untuk menentukan munculnya fenomena ini dipergunakan 2 jenis material ring yakni baja tahan karat AISI 304 dan keramik berbahan dasar kaolin. Dengan diameter luar yang sama 14 mm dan diameter dalam ring 10 mm. Salah satu ring yang dipergunakan ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ring baja tahan karat AISI 304

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. Laju aliran udara divariasikan pada 6 nilai. Percobaan kemudian dilakukan pada 4 variasi ketinggian ring dari ujung burner yakni 10 mm, 20 mm, 30 mm, dan 40 mm di atas burner masing-masing

pada 6 laju aliran gas. Ring yang digunakan dua jenis yakni baja tahan karat AISI 304 dan ring keramik. Hasil percobaan ditampilkan dalam grafik AFR fungsi beban pembakaran atau Burning Load.

Perbandingan laju udara terhadap bahan bakar atau *AFR* ditentukan dengan Pers. 1

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad (1)$$

dimana \dot{m}_a adalah laju massa udara [kg/dt], \dot{m}_f adalah laju massa bahan bakar , [kg/dt]. Beban pembakaran atau *Burning Load* dihitung dengan menggunakan Pers. 2.

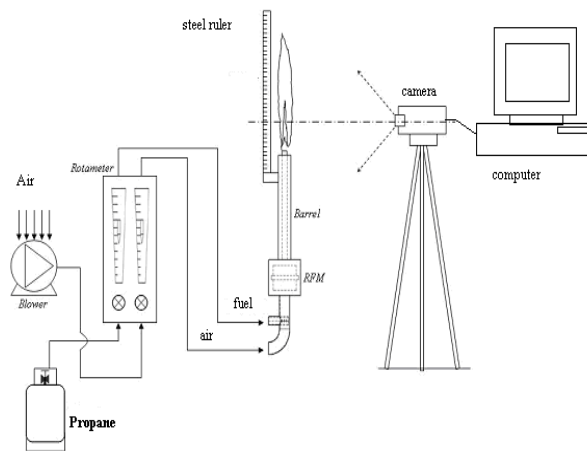
$$BL = \frac{\dot{m}_f \times HV}{A} \quad (2)$$

dimana BL adalah Burning Load, [kW/m²], A adalah luas penampang burner, [m²] dan HV adalah nilai kalor bahan bakar, [Joule/kg]

Sedangkan pengukuran panjang nyala dilakukan dengan pengambilan gambar menggunakan kamera digital serta kamera termograph infra red yang dihubungkan dengan komputer untuk diolah citranya menggunakan perangkat lunak pengolah citra. Selain itu panjang nyala juga diukur menggunakan mistar baja sebagai pembanding. Pengukuran panjang nyala dilakukan bersamaan dengan pengukuran laju aliran udara saat lift-up.

Pengukuran temperatur ujung burner dan temperatur ring hanya dilakukan pada ring AISI 304 menggunakan kamera infra red yang sama dan juga dengan termokopel Ni-Cr ukuran 1mm. Untuk memperoleh perbandingan dengan kondisi tanpa lift-up maka dilakukan juga pengukuran temperatur ujung burner fungsi AFR tanpa menaruh ring diatas burner.

Skema dari alat percobaan ditampilkan pada Gambar 2. dan laju pelepasan panas dari nyala api yang dikaji pada penelitian ini berkisar antara 1.5 KW and 2.5 kW.

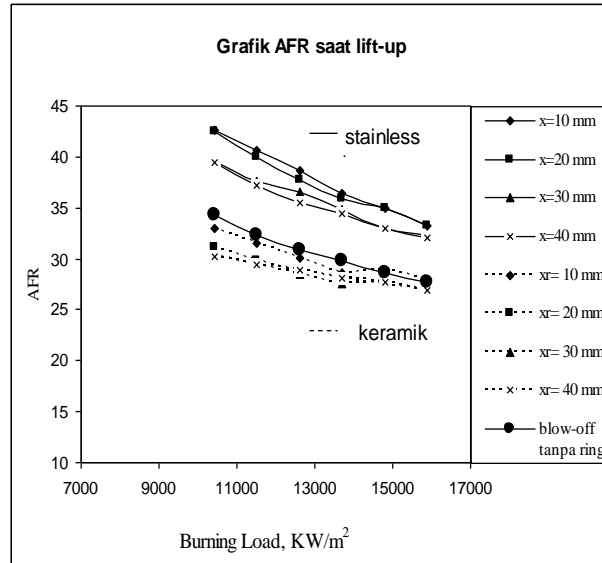


Gambar 2. Skema penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil percobaan penentuan AFR saat lift-up pada empat posisi ring dan enam laju aliran udara saat lift-up pada dua jenis material ring ditampilkan pada grafik AFR fungsi Burning load seperti tampak pada Gambar 3. Grafik garis adalah untuk ring dari baja tahan karat dan grafik putus-putus adalah untuk ring keramik. AFR stoikiometri dari propana berada pada kisaran 24, 8 [7] sehingga dari grafik baik dengan ring keramik maupun ring baja tahan karat tampak bahwa fenomena nyala api lift-up terjadi pada pembakaran yang kurus atau miskin bahan bakar. Namun perbedaannya adalah menggunakan ring keramik AFR saat lift-up pada laju aliran bahan bakar yang tinggi cenderung mendekati AFR blow off.

Secara keseluruhan dengan jelas bahwa jelas terlihat dengan menggunakan ring keramik pada burning load yang sama, fenomena lift-up akan terjadi pada nilai AFR yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa fenomena lift-up tidak hanya dipengaruhi oleh medan aliran campuran gas dan bahan bakar. Karena dengan geometri ring dan burner yang sama namun perbedaan material ring saja telah menurunkan laju aliran udara yang dibutuhkan untuk terjadinya fenomena lift-up. Dari aspek material ring



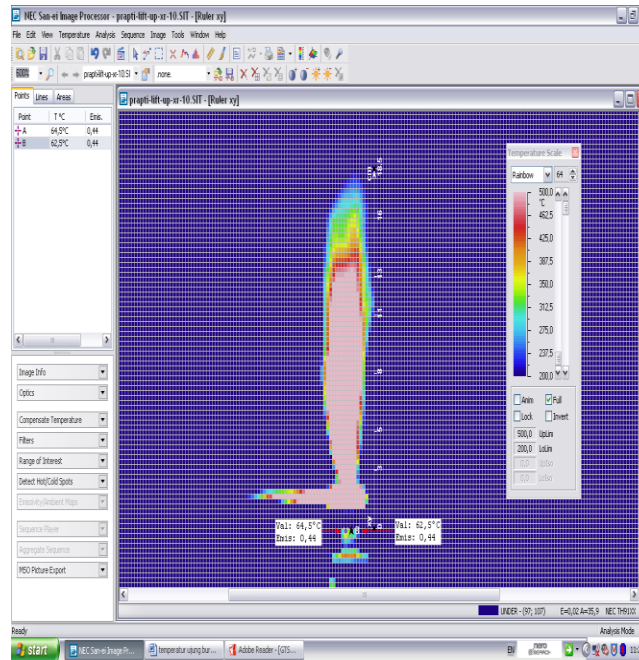
Gambar 3. Grafik AFR saat lift-up

bahwa keramik yang merupakan bahan inert [8] memiliki kapasitas panas konduksi yang jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan baja tahan karat maka temperatur ring diduga mempengaruhi timbulnya fenomena nyala api lift-up. Sehingga pada langkah selanjutnya pengukuran temperatur ring juga dilakukan.

Sedangkan dari aspek posisi ring atau ketinggian ring ternyata diperoleh hasil yang sama seperti penelitian menggunakan ring baja tahan karat bahwa semakin dekat posisi ring justru AFR semakin tinggi [9]. Inilah pengaruh medan aliran campuran udara dan bahan bakar yang terhalang oleh luasan penampang ring. Semakin dekat dengan ujung burner maka hambatan yang ditimbulkan oleh ring semakin besar jika dibandingkan dengan posisi ring lebih jauh dari ujung burner. Untuk itu dibutuhkan momentum aliran campuran bahan bakar yang lebih besar dibandingkan dengan posisi ring yang jauh dari ujung burner. Karena aliran gas telah ditetapkan lajunya maka laju aliran udara harus lebih tinggi untuk menimbulkan momentum aliran campuran udara dan bahan bakar yang lebih besar.

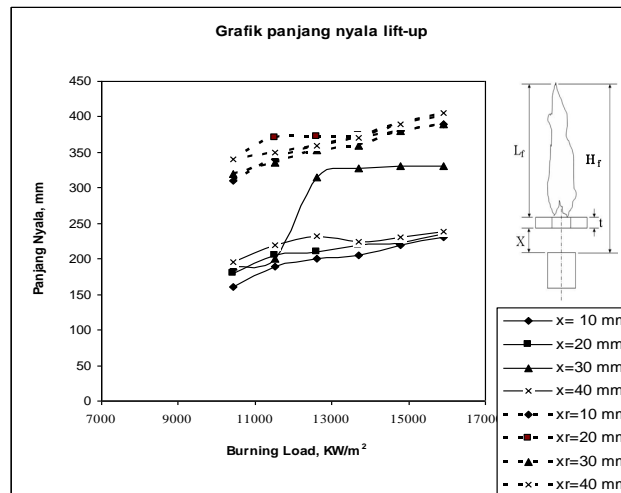
Hal ini juga terjadi apabila laju aliran gas atau burning load dinaikkan pada posisi ketinggian ring yang sama. Nilai AFR untuk terjadinya lift-up akan menurun pada laju aliran bahan bakar yang lebih tinggi yang diwakili oleh kenaikan burning load. Kenaikan laju aliran gas, sedikit menurunkan laju aliran udara yang dibutuhkan karena telah terpenuhinya momentum aliran campuran gas dan bahan bakar untuk terjadinya lift-up sehingga AFR juga menurun seiring kenaikan laju bahan bakar atau burning load.

Pengukuran panjang nyala selain secara visual menggunakan mistar baja dan pemotretan dengan kamera digital, dilakukan juga dengan menganalisa citra dari Infra Red Thermograph yang dilengkapi dengan perangkat lunak pengolahan citra. Hasil pengukuran panjang nyala salah satu pengolahan citranya ditampilkan pada Gambar 4



Gambar 4. Pengolahan citra dengan kamera termograph

Panjang nyala dinyatakan sebagai jarak tepat dari ujung burner sampai citra dengan warna terendah pada nilai emisivitas citra nyala 0.02. Semua hasil pengukuran baik secara visual, pemotretan dan hasil analisis citra dirata-rata dan hasilnya ditampilkan dalam grafik Gambar5.



Gambar 5. Grafik panjang nyala api

Terlihat bahwa tinggi nyala total api lift-up dengan menggunakan ring keramik yang ditampilkan pada grafik garis di atas grafik tinggi nyala total api lift-up dengan menggunakan ring dari baja tahan karat. Hal ini sesuai dengan penurunan nilai AFR-nya pada Gambar 3. dan sesuai pula dengan persamaan panjang nyala api premix yang diusulkan oleh Rokke [10]

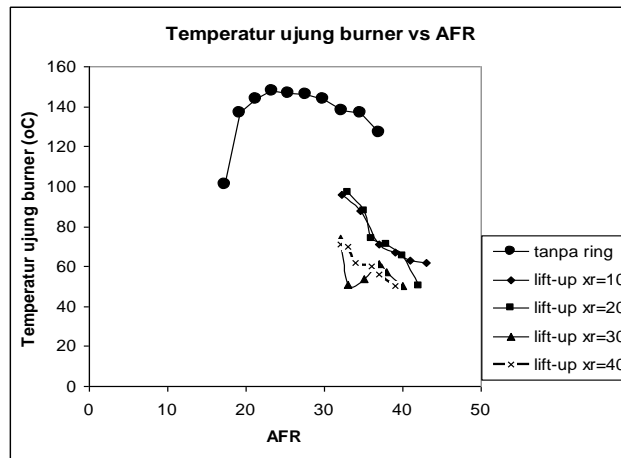
Persamaan empiris dari Rokke adalah seperti pada Pers. 3

$$\frac{L}{d_o} = 33Y_f^{2/5} Fr^{1/5} \quad (3)$$

dimana L adalah panjang nyala api, d_o adalah diameter burner, Y_f adalah fraksi massa bahan bakar dan Fr adalah Bilangan Froude maka dengan naiknya Burning load atau fraksi massa bahan bakar maka panjang nyala api meningkat.

Persamaan Rokke menunjukkan korelasi antara panjang nyala yang sebanding dengan fraksi massa bahan bakar. Semakin turun nilai AFR berarti fraksi massa bahan bakar semakin tinggi sehingga panjang nyala api juga meningkat. Hal ini membuat grafik pada Gambar 3 dan grafik pada Gambar 5 berkebalikan. Perbedaan yang cukup mencolok adalah panjang nyala pada posisi ring 30 mm yang pada ring stainless steel terdapat kenaikan panjang nyala, pada grafik ring keramik tidak terjadi. Pada posisi ketinggian 30 mm justru pada grafik ring keramik terlihat sedikit penurunan panjang nyala. Kondisi ini terjadi diduga karena posisi 30 mm adalah posisi yang sangat dekat dengan ujung nyala luminous. Sedangkan ujung nyala luminous pada pembakaran premix memiliki temperatur yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan nyala dekat ujung burner. Hal lain yang diduga mempengaruhinya adalah kapasitas panas material yang amat berbeda. Baja tahan karat cenderung menyerap energi panas, sedangkan keramik justru sebaliknya tidak banyak menyerap energi panas pembakaran. Namun hal ini perlu dianalisa lebih lanjut dari aspek radiasi nyala, kerugian panas dan temperatur ring saat lift-up.

Hasil pengukuran temperatur ujung burner tanpa lift-up dan ada lift-up pada berbagai posisi ring ditampilkan pada gambar yang sama yakni Gambar 6.



Gambar 6. Grafik temperatur ujung burner

Grafik temperatur ujung burner tanpa lift-up berbentuk parabola dengan temperatur maksimum mendekati AFR stoikiometrik berbasis volume untuk campuran udara dan propana yakni sekitar 24,8. Bentuk grafiknya hampir sama dengan grafik temperatur nyala propana yakni maksimum disekitar pembakaran stoikiometrik. Makin kurus campuran maka temperatur ujung burner juga cenderung makin

menurun. Hasil ini sama seperti hasil simulasi temperature ujung burner dengan pendekatan ujung nyala berbentuk kerucut yang dinyatakan dalam variasi rasio ekuivalens.

Adanya fenomena lift-up menurunkan temperatur ujung burner jika dibandingkan dengan temperatur ujung burner tanpa adanya lift-up. Dua hal diprediksi menyebabkan penurunan temperaturnya yakni AFR yang tinggi atau rasio ekuivalens yang rendah serta jarak nyala yang lebih jauh dari ujung burner. Hal ini selaras dengan pemodelan matematis yang dilakukan pada nyala Bunsen dengan pendekatan ujung nyala berbentuk kerucut yang dinyatakan dalam perubahan jarak stand-off. Persamaan laju kehilangan panas lokal karena konduksi dan radiasi nyala api berdasarkan temperatur nyala api pada pemodelan ini dinyatakan pada Pers. 4 [11].

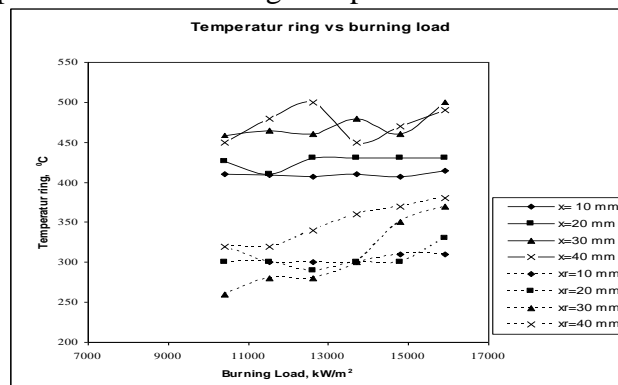
$$Q_l''(y) = \lambda \frac{T_f - T_{rim}}{y + d_s} + \epsilon \sigma (T_f^4 - T_{sink}^4) \quad (4)$$

dimana Q_l'' , adalah kehilangan kalor perunit area, λ adalah konduktivitas panas nyala, T_{sink} adalah diasumsikan 300 K, ϵ adalah emisivitas nyala api diasumsikan tetap, σ adalah konstanta Stefan Boltzman dan d_s adalah jarak pangkal nyala ke ujung burner atau *stand off distance*

Jarak ring yang makin jauh sebanding dengan jarak stand-off pada pemodelan nyala tanpa lift-up, akan menurunkan temperatur ujung burner.

Hasil pengukuran temperatur ring sangat ditentukan oleh waktu pengambilan citra saat fenomena lift-up terjadi. Meskipun keakuratan hasil pengukuran temperatur menggunakan metode infra red untuk keperluan penelitian di laboratorium masih diragukan, namun dengan pembanding hasil pengukuran menggunakan termokopel maka kecenderungan perubahan temperatur yang timbul dapat memberikan petunjuk awal untuk kajian fenomena nyala api lift-up.

Hasil pengukuran ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik temperatur ring

Grafik garis menunjukkan hasil pengukuran dengan ring baja tahan karat sedangkan grafik putus-putus adalah hasil pengukuran dengan ring keramik. Dari Gambar 7 tampak bahwa pada penggunaan ring dari keramik, temperatur ring saat lift-up lebih rendah jika dibandingkan dengan temperatur ring dari

stainless steel. Hal ini sangat dipengaruhi oleh materialnya sendiri. Yang perlu menjadi perhatian adalah pada posisi ring 30 mm, menggunakan ring baja tahan karat, temperatur ring cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan posisi yang lain. Namun sebaliknya pada penggunaan ring keramik temperatur ring pada posisi ini malah cenderung paling rendah terutama pada burning load yang rendah. Hal ini memunculkan dugaan bahwa temperatur ring berkebalikan dengan panjang nyala. Berdasarkan hasil penelitian terdahulu panjang nyala api lift-up pada keramik lebih tinggi jika dibandingkan dengan panjang nyala api lift-up pada penggunaan ring baja tahan karat [12]. Jika ditinjau berdasarkan AFR saat lift-up antara ring baja tahan karat dan ring keramik maka temperatur ring seakan-akan sebanding dengan AFR yakni AFR makin rendah maka temperatur ring juga makin rendah. Hal ini sesuai pula dengan hasil penelitian terdahulu bahwa semakin rendah AFR maka temperatur nyala api semakin rendah. Demikian pula halnya dengan temperatur ring yang dipengaruhi oleh temperatur nyala api jika ditinjau dari persamaan laju kehilangan panas lokal pada Pers 4.

4. Kesimpulan

Kajian eksperimental fenomena flame lift-up sebagai penelitian fundamental terjadi pada pembakaran yang miskin bahan bakar. Dari aspek munculnya fenomena ini sangat ditentukan oleh AFR. AFR saat lift-up sangat dipengaruhi oleh posisi ring dari ujung burner. AFR berkebalikan dengan panjang nyala saat lift-up.

Fenomena lift-up tidak hanya dipengaruhi oleh medan aliran saja tapi juga oleh temperatur ringnya. Pada laju aliran bahan bakar yang tinggi temperatur ring saat lift-up cenderung meningkat. Dari aspek material ring, menggunakan material baja tahan karat, temperatur ring saat lift-up lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan ring dari keramik. Temperatur ring juga berpengaruh terhadap AFR terjadinya lift-up yakni AFR sebanding dengan temperatur ring baik pada material ring baja tahan karat maupun pada keramik

Panjang nyala saat lift-up dipengaruhi juga oleh temperatur ring sehingga pada posisi ring yang mendekati ujung kerucut nyala panjang nyala api mencapai maksimum.

Temperatur ujung burner mengikuti kecenderungan perubahan temperatur nyala api yang menurun seiring dengan penurunan rasio ekuivalens atau kenaikan AFR. Kondisi temperatur ujung burner yang lebih rendah menjadi pertimbangan untuk penerapan fenomena ini pada perancangan burner. Kajian teoritis dari aspek reaksi kinetik dan perpindahan panas perlu dilakukan untuk dapat mengungkapkan penyebab melompatnya nyala api dari ujung burner ke ring.

Ucapan terima kasih

Penelitian ini sepenuhnya dibiayai oleh DRPM UI melalui Program Hibah S3. Ucapan terima kasih disampaikan kepada DRPM UI serta kepada para reviewer Program Hibah S3 atas masukannya saat presentasi proposal program hibah tersebut.

Daftar Acuan

- [1] Eugenio Giacomazzi, Valerio Battaglia and Claudio Bruno, "The Coupling of Turbulence and chemistry in a premixed bluff-body flame as studied by LES", *Combustion and Flame* Volume 138, Issues 4, September 2004, 320-
- [2] A.Kempf, R.P Lindstedt and J. Janicka, "Large-eddy simulation of bluff-body stabilized nonpremixed flame", *Combustion and Flame* Vol 144, Issued 1-2 January 2006, 170-189
- [3] Kai Liu, Stephen B. Pope and David A. Caughey, "Calculation of Bluff-body stabilized flames using a joint probability density function model with detail chemistry", *Combustion and Flame* Volume 141, Issues 1-2, April 2005, pages 89-117
- [4] Chung et. Al, 'Lifted Flames in Laminar Jets of Propane in Coflow air' *Combustion and Flame* 135; 2003 449-462
- [5] M.R. Johnson, L.W Kostiuk, R.K. Cheng 'A Ring Stabilizer for Lean Premixed Turbulent Flames' Combustion Group, energy & Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California, 9472
- [6] Andres A. Chaparro and Baki M. Cetegen, "Blowoff Characteristics of Bluff-body stabilized conical premixed flames under upstream velocity modulation", *Combustion and Flame* Vol 144, Issues 1-2, January 2006 pages 318-335
- [7] Drysdale D. Introduction to Fire Dynamics, 2nd Edn, Wiley, UK, 1998
- [8] P.H Bouma, L.P.H. de Goey, 1999, Premix Combustion on Ceramic Burner, *Combustion and Flame*, 119, halaman 133-143
- [9] Cokorda Prapti Mahandari, I Made Kartika D, 2007, Flame Lift-up on A Bunsen Burner; A Preliminary Study" *Proceeding Seminar Internasional QIR*, UI Depok, Jakarta, EPE-13
- [10] Nils A Rokke, 'A Study of Partially Premixed Unconfined Propane Flames, *Combustion and Flame* 97:88-106
- [11] Ludwig Christian Haber, An investigation into the origin, measurement and application of chemiluminescent light emissions from premixed flames, Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000
- [12] I Made Kartika Dhiputra, Bambang Sugiarto, Cokorda Prapti Mahandari, 'The Influence of Ring on AFR and Flame Height of Flame Lift-up Phenomenon; an Experimental Study", *Proceeding of ICGES* (2008)