

BAB 6

PANJANG NYALA API PADA FENOMENA *FLAME LIFT-UP*

Panjang nyala api setelah *lift-up* dinyatakan sebagai jarak terjauh dari permukaan *ring* sampai ujung nyala. Kajian eksperimental tentang panjang nyala api *lift-up* dinyatakan berdasarkan parameter tertentu terhadap panjang nyala. Korelasi panjang nyala dengan parameter tersebut akan diturunkan dengan mengacu pada persamaan panjang nyala *premixed* dari Nils A. Rokke [34] serta hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Tim kelompok riset *Flames and Combustion Lab Thermodinamika FT-UI* [30,31]. Sedangkan kajian teoritis dilakukan dengan pendekatan aliran pancaran (*jet*) seperti yang dinyatakan oleh Longwell, dkk [75] bahwa aliran setelah *bluff body* dapat dianggap sebagai aliran jet. Pendekatan aliran pancaran telah diterapkan pada penentuan panjang nyala difusi [35].

Pengukuran panjang nyala api *lift-up* 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 pengolah citra. Penentuan panjang nyala diukur pada ujung nyala warna terendah pada nilai emisivitas citra nyala 0,02. Berdasarkan hasil pengukuran secara visual, pemotretan menggunakan kamera digital dan menggunakan *Infra Red Thermograph* dilakukan penentuan panjang nyala *lift-up* rata-rata dan hasilnya telah ditampilkan pada Tabel 4. 1.

6.1 Kajian Eksperimental Panjang Nyala Api *Lift-up*

Grafik panjang nyala dibuat untuk mengetahui kecenderungan pengaruh *AFR*, *Burning Load*, posisi *ring* dan diameter dalam *ring* terhadap panjang nyala setelah *lift-up*. Geometri *ring* mempengaruhi medan aliran campuran. Sedangkan pengaruh temperatur terhadap panjang nyala ditentukan dari penggunaan *ring* dari bahan keramik namun pada geometri *ring* yang sama yakni diameter dalam 10 mm, diameter luar *ring* 30 mm dan tebal *ring* 5 mm. Berdasarkan Tabel 4.2 tentang hasil percobaan dengan menggunakan *ring* AISI 304 dibuat Tabel 6.1, 6.2 dan 6.3 tentang pengaruh *Burning Load*, *AFR* dan fraksi massa bahan bakar serta

Tabel 6.1. Hasil Perhitungan Parameter Panjang Nyala Diameter Dalam *Ring* 7 mm

X (mm)	V _f (L/s)	V _a (L/s)	AFR	Y _f	BL (kW/m ²)	L _f (mm)
10	0,019	0,767	40,35	0,034	10.417	185
	0,021	0,807	38,43	0,036	11.513	190
	0,023	0,841	36,56	0,038	12.610	195
	0,025	0,878	35,12	0,039	13.706	200
	0,027	0,909	33,65	0,041	14.803	205
	0,029	0,942	32,49	0,043	15.899	210
20	0,019	0,750	39,46	0,034	10.417	140
	0,021	0,780	37,15	0,037	11.513	155
	0,023	0,817	35,53	0,039	12.610	165
	0,025	0,854	34,18	0,040	13.706	175
	0,027	0,888	32,90	0,042	14.803	190
	0,029	0,919	31,68	0,043	15.899	200
30	0,019	0,743	39,10	0,035	10.417	145
	0,021	0,773	36,82	0,037	11.513	150
	0,023	0,811	35,24	0,039	12.610	160
	0,025	0,848	33,91	0,041	13.706	165
	0,027	0,878	32,52	0,042	14.803	170
	0,029	0,915	31,56	0,044	15.899	175
40	0,019	0,750	39,46	0,035	10.417	135
	0,021	0,780	37,15	0,038	11.513	145
	0,023	0,817	35,53	0,039	12.610	150
	0,025	0,854	34,18	0,041	13.706	165
	0,027	0,885	32,77	0,043	14.803	175
	0,029	0,915	31,56	0,044	15.899	185

perbandingan selisih temperatur *ring* dan temperatur *tip burner* dengan temperatur *ring* terhadap panjang nyala. Berdasarkan tabel-tabel tersebut maka dibuat grafik yang menggambarkan kecenderungan pengaruh masing-masing parameter terhadap panjang nyala api. Selain itu parameter yang berhubungan dengan bilangan tanpa dimensi yang akan dipergunakan pada penentuan korelasi panjang nyala juga dihitung dan hasilnya selengkapnya ditampilkan pada Lampiran 7.

Analisa kesalahan pengukuran panjang nyala secara rinci ditampilkan pada Lampiran 2.

Tabel 6.2. Hasil Perhitungan Parameter Panjang Nyala
Diameter Dalam Ring 10 mm

X (mm)	V_f (L/s)	V_a (L/s)	AFR	Y_f	BL (kW/m ²)	Lf (mm)	$\Delta T/Tr$
10	0,019	0,777	40,88	0,035	10.417	150	0,67
	0,021	0,817	38,92	0,036	11.513	180	0,69
	0,023	0,858	37,30	0,038	12.610	190	0,69
	0,025	0,881	35,26	0,041	13.706	195	0,68
	0,027	0,919	34,02	0,042	14.803	210	0,69
	0,029	0,949	32,73	0,045	15.899	220	0,70
20	0,019	0,750	39,46	0,035	10.417	160	0,70
	0,021	0,787	37,47	0,037	11.513	185	0,71
	0,023	0,824	35,83	0,039	12.610	190	0,72
	0,025	0,854	34,18	0,041	13.706	200	0,72
	0,027	0,895	33,15	0,042	14.803	203	0,72
	0,029	0,922	31,79	0,045	15.899	215	0,72
30	0,019	0,740	38,92	0,037	10.417	160	0,65
	0,021	0,770	36,66	0,039	11.513	170	0,70
	0,023	0,814	35,39	0,040	12.610	285	0,73
	0,025	0,838	33,50	0,042	13.706	298	0,73
	0,027	0,878	32,52	0,045	14.803	300	0,74
	0,029	0,919	31,68	0,046	15.899	300	0,74
40	0,019	0,726	38,21	0,038	10.417	155	
	0,021	0,763	36,34	0,040	11.513	180	
	0,023	0,807	35,09	0,042	12.610	192	
	0,025	0,848	33,91	0,043	13.706	185	
	0,027	0,878	32,52	0,045	14.803	190	
	0,029	0,915	31,56	0,046	15.899	199	

Pada tabel-tabel hasil perhitungan selain AFR dan Burning Load yang dihitung untuk dibuat grafiknya, ditampilkan juga fraksi massa bahan bakar. Parameter ini dibutuhkan saat penentuan korelasi panjang nyala *premix* yang mengacu pada korelasi Rokke. Sedangkan untuk diameter 10 mm ditampilkan juga parameter rasio antara perbedaan temperatur *ring* dengan temperatur ujung *burner* dan temperatur *ring*. Parameter ini dipergunakan pada penentuan korelasi panjang nyala dengan memodifikasi korelasi panjang nyala sebelumnya. Parameter ini dihitung sampai posisi *ring* 30 mm karena pada posisi *ring* 40 mm temperatur *ring* sudah tidak dapat diukur lagi.

Tabel 6.3. Hasil Perhitungan Parameter Panjang Nyala
Diameter Dalam Ring 14 mm

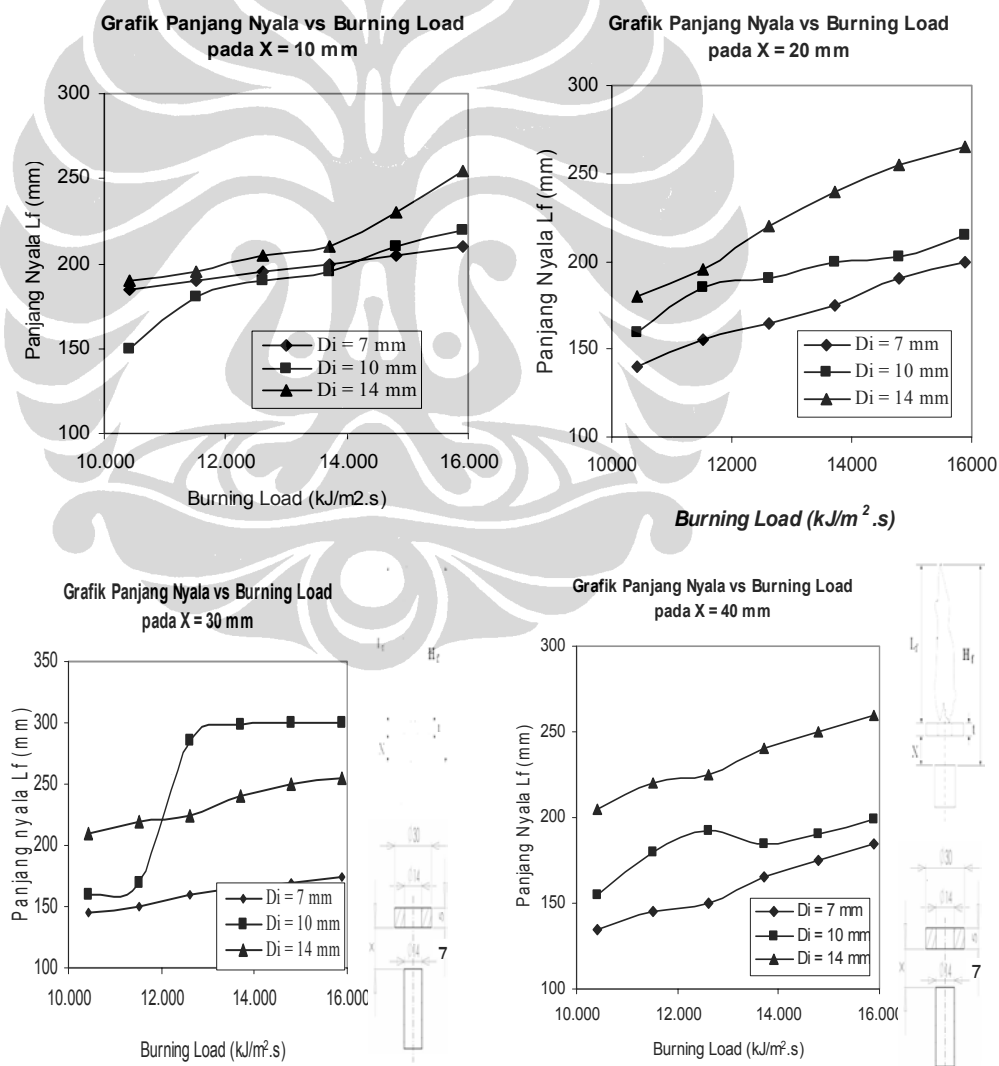
X (mm)	V _f (L/s)	V _a (L/s)	AFR	Y _f	BL (kW/m ²)	L _f (mm)
10	0,019	0,743	39,10	0,036	10.417	190
	0,021	0,790	37,63	0,038	11.513	195
	0,023	0,834	36,27	0,039	12.610	205
	0,025	0,871	34,85	0,041	13.706	210
	0,027	0,902	33,40	0,043	14.803	230
	0,029	0,932	32,14	0,044	15.899	255
20	0,019	0,740	38,92	0,046	10.417	180
	0,021	0,777	36,99	0,048	11.513	195
	0,023	0,814	35,39	0,051	12.610	220
	0,025	0,841	33,64	0,053	13.706	240
	0,027	0,878	32,52	0,055	14.803	255
	0,029	0,912	31,44	0,056	15.899	265
30	0,019	0,736	38,74	0,037	10.417	210
	0,021	0,770	36,66	0,040	11.513	220
	0,023	0,807	35,09	0,041	12.610	225
	0,025	0,838	33,50	0,043	13.706	240
	0,027	0,875	32,40	0,045	14.803	250
	0,029	0,909	31,33	0,047	15.899	255
40	0,019	0,719	37,85	0,038	10.417	205
	0,021	0,763	36,34	0,040	11.513	220
	0,023	0,794	34,50	0,042	12.610	225
	0,025	0,834	33,37	0,044	13.706	240
	0,027	0,871	32,27	0,045	14.803	250
	0,029	0,909	31,33	0,047	15.899	260

6.1.1 Pengaruh *Burning Load* terhadap Panjang Nyala Api *Lift-up*

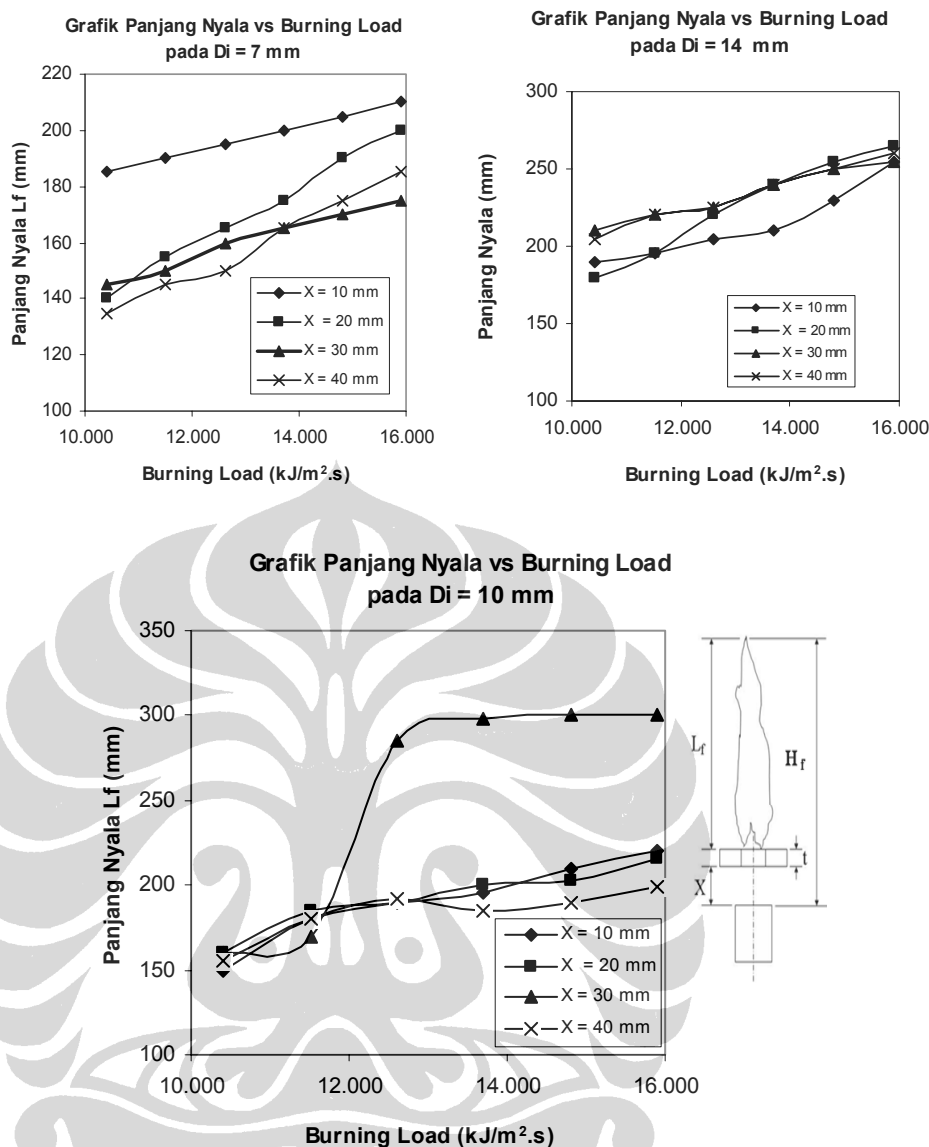
Kecenderungan pengaruh *Burning Load* terhadap panjang nyala digambarkan dalam grafik Gambar 6.1 pada variasi diameter dalam *ring* dan Gambar 6.2 pada variasi posisi *ring*. Sesuai dengan persamaan empiris dari Rokke [34] dengan naiknya *Burning Load* atau fraksi massa bahan bakar maka panjang nyala api meningkat. Hal yang menarik adalah pada posisi 30 mm serta pada laju bahan bakar yang agak tinggi tampak kenaikan panjang nyala api yang paling menonjol dibandingkan dengan yang lain. Kondisi ini terjadi diduga karena posisi 30 mm adalah posisi yang sangat dekat dengan ujung nyala luminous dari kerucut nyala sebelum *lift-up*. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh juga temperatur

maksimum nyala api terjadi pada posisi 30 mm yang menunjukkan bahwa laju kehilangan kalor dari nyala adalah paling rendah.

Ujung nyala luminous pada pembakaran *premixed* memiliki temperatur yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan nyala dekat ujung *burner* [56]. Pada posisi *ring* ini kerugian panas dari nyala api yang terserap oleh *ring* akan paling rendah karena perbedaan temperatur antara nyala dan *ring* paling rendah sehingga terjadi panjang nyala yang maksimum. Pada posisi *ring* yang sama, pengaruh diameter dalam *ring* terlihat jelas menaikkan panjang nyala atau sebanding dengan panjang nyala. Hasil ini juga sesuai dengan korelasi Rokke. Sedangkan pada diameter yang sama pengaruh posisi *ring* terlihat jelas hanya pada diameter *ring* terkecil saja yakni posisi *ring* berbanding terbalik dengan panjang nyala.



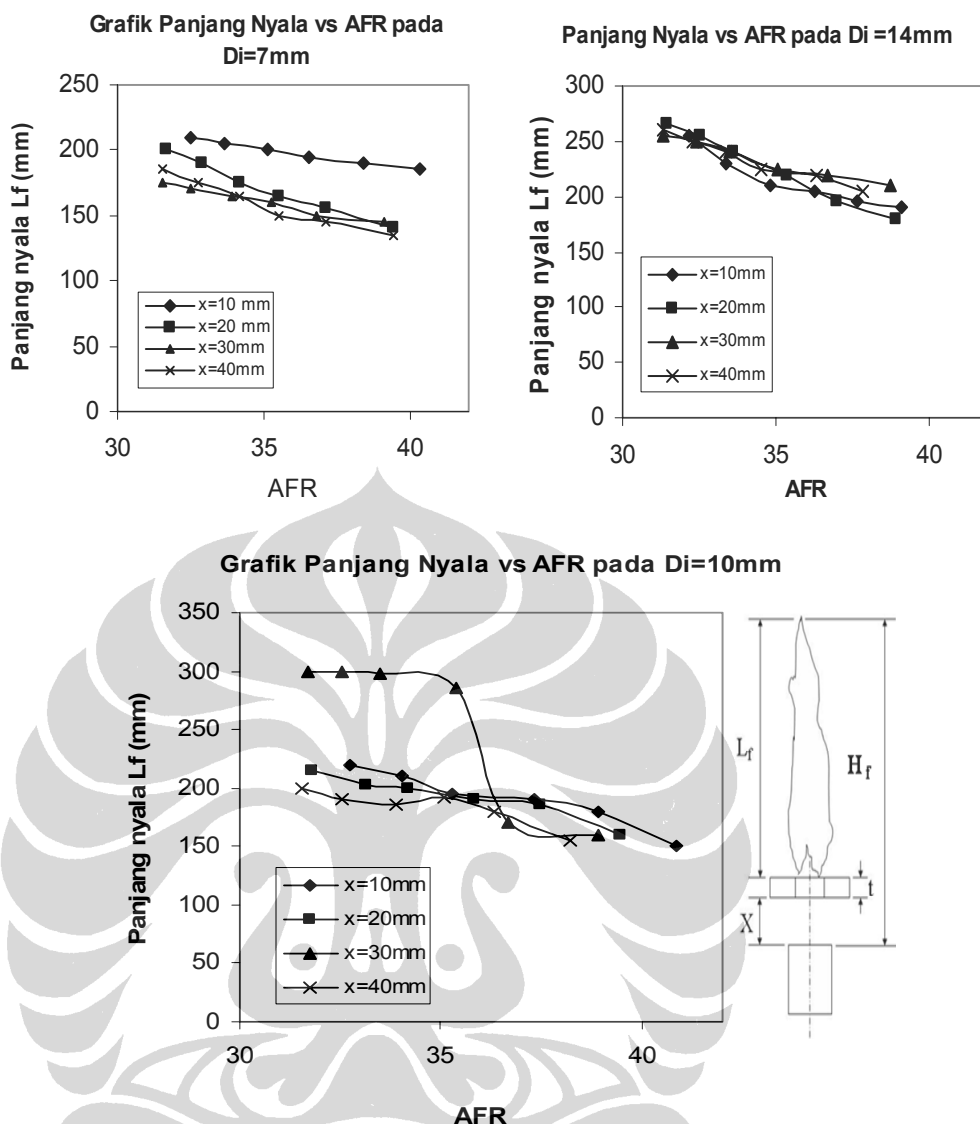
Gambar 6.1. Pengaruh *Burning Load* pada Variasi Diameter Dalam *Ring*



Gambar 6.2. Pengaruh *Burning Load* pada Variasi Posisi *Ring*

6.1.2 Pengaruh *AFR* terhadap Panjang Nyala Api *Lift-up*

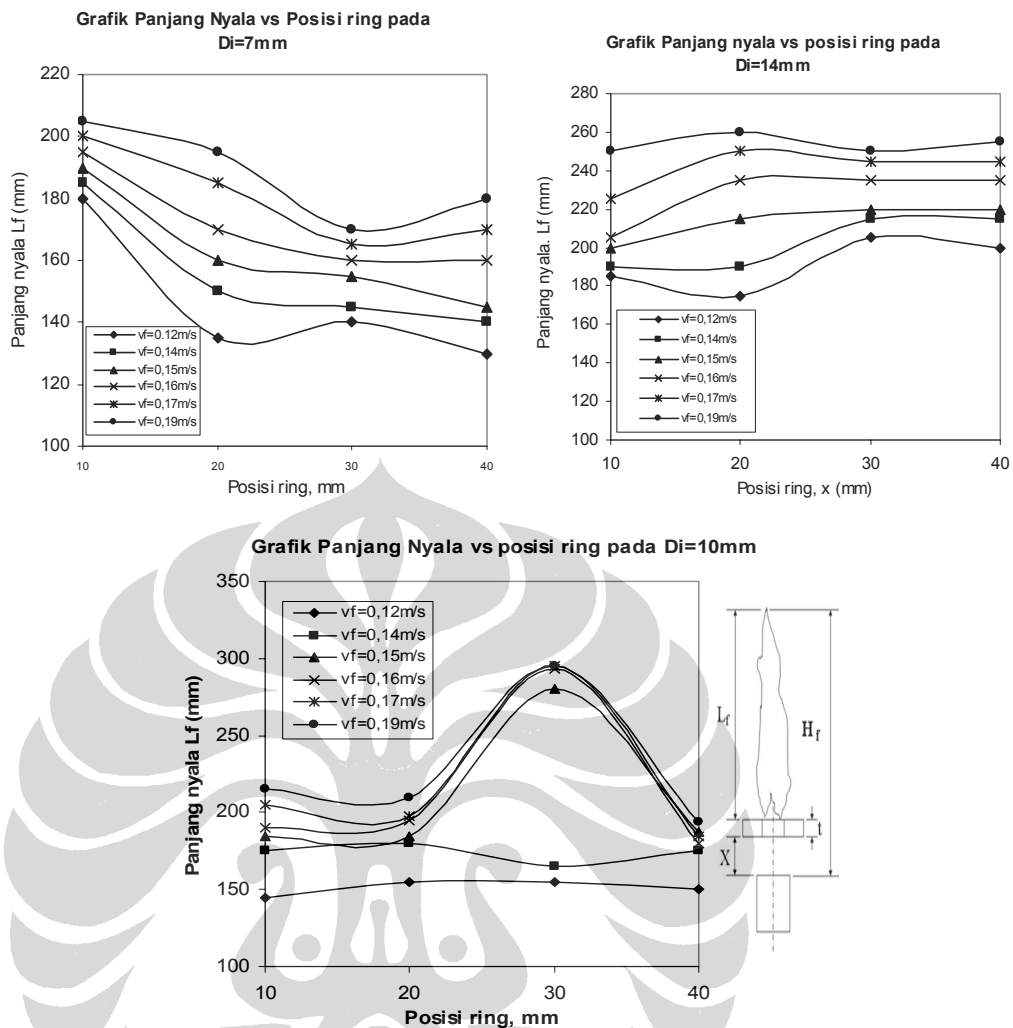
Panjang nyala api dibuat juga grafiknya pada variasi *AFR* seperti ditampilkan pada Gambar 6.3. Panjang nyala api berkebalikan dengan *AFR* yakni *AFR* meningkat maka panjang nyala api menurun. Hal ini juga sesuai dengan persamaan panjang nyala api *premixed* yang diusulkan oleh Rokke [34]. Persamaan 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.



Gambar 6.3. Grafik *AFR* Saat *Lift-up* pada Variasi Diameter Dalam *ring*

6.1.3 Pengaruh Posisi *Ring* terhadap Panjang Nyala Api *Lift-up*

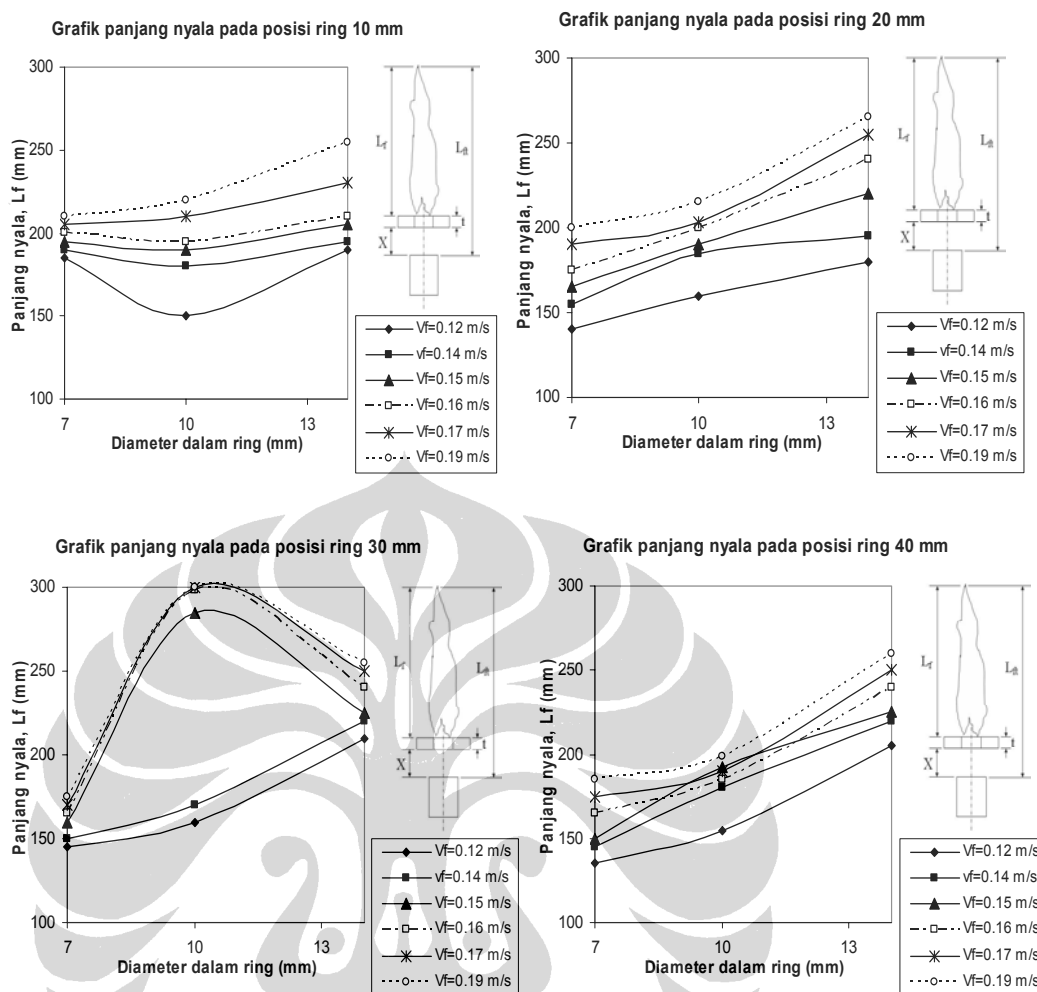
Grafik pengaruh posisi *ring* ditampilkan pada Gambar 6.4. Sangat jelas terlihat bahwa panjang nyala pada posisi 30 mm dan diameter dalam *ring* 30 mm serta laju aliran bahan bakar yang tinggi panjang nyala mencapai maksimum. Pengaruh temperatur *ring stainless steel* yang tinggi dibandingkan dengan pada posisi *ring* yang lain mempengaruhi laju kehilangan kalor dari nyala. Tingginya temperatur *ring* diakibatkan temperatur nyala yang tinggi akibat daerah resirkulasi yang paling dominan. Hal ini telah dibuktikan dari hasil simulasi pada Bab 4. Laju kalor yang rendah pada posisi *ring* 30 mm dan diameter dalam *ring* 10 mm ini menyebabkan panjang nyala yang maksimum pada posisi ini.



Gambar 6.4. Pengaruh Posisi *Ring* pada Variasi Laju Aliran Bahan Bakar

6.1.4 Pengaruh Diameter Dalam *Ring* terhadap Panjang Nyala Api *Lift-up*

Pengaruh diameter dalam *ring* terhadap panjang nyala api ditampilkan pada Gambar 6.5. Berbeda dengan pada *AFR* saat *lift-up*, pengaruh diameter dalam *ring* terhadap panjang nyala api *lift-up* cukup signifikan. Jika mengacu ke persamaan Rokke, diameter dalam *ring* berpengaruh kepada kecepatan aliran yang mempengaruhi Bilangan Froude. Semakin besar diameter dalam *ring* kecepatan campuran tepat setelah *ring* akan menurun sehingga Bilangan Froude akan menurun juga dan panjang nyala nyala *lift-up* akan meningkat karena faktor eksponensial yang lebih kecil dari 1 atau pada persamaan Rokke adalah $1/5$. Terlihat kembali pada posisi 30 mm dan diameter dalam 10 mm serta kecepatan bahan bakar diatas 0,162 m/dt panjang nyala api *lift-up* tercapai maksimum.



Gambar 6.5. Pengaruh Diameter Dalam *Ring* pada Variasi Laju Aliran Bahan Bakar

6.1.5 Pengaruh Material *Ring* terhadap Panjang Nyala

Material *ring* yang berbeda konduktivitas panasnya dipergunakan untuk menentukan pengaruh perpindahan panas atau temperatur terhadap fenomena *lift-up*. *Ring* dari bahan keramik dengan bahan dasar kaolin dibuat dengan dimensi yang sama dengan *ring* dari *stainless steel* untuk memperoleh efek medan aliran yang sama. Berdasarkan Tabel 4.3. tentang hasil percobaan dengan *ring* keramik dibuat Tabel 6.4. sebagai dasar pembuatan grafik panjang nyala yang akan dibandingkan langsung dengan grafik panjang nyala *ring stainless steel*.

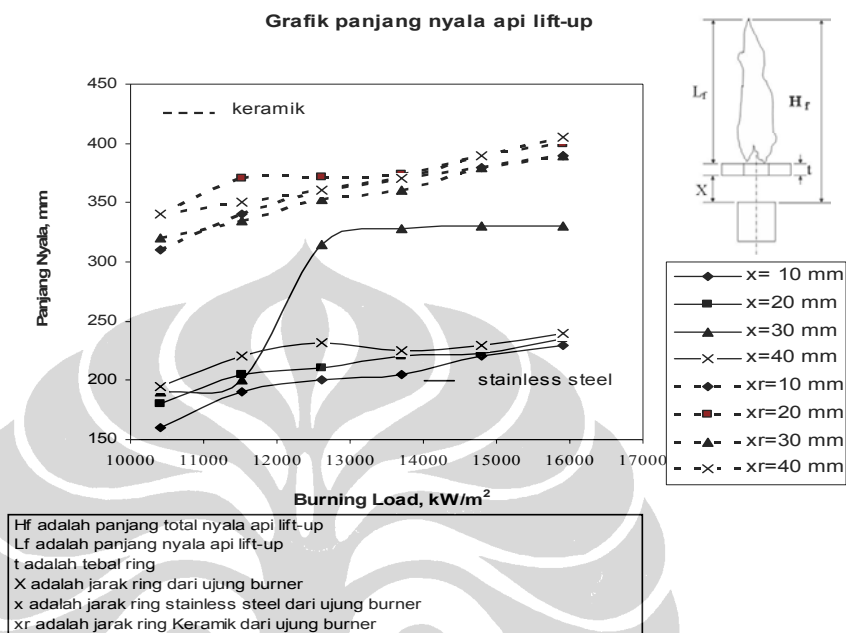
Pengaruh material *ring* terhadap panjang nyala api diperlihatkan grafiknya pada Gambar 6.6. Terlihat bahwa panjang nyala api *lift-up* dengan menggunakan

Tabel 6.4. Hasil Perhitungan Parameter Panjang Nyala *Ring* Keramik Di =10 mm

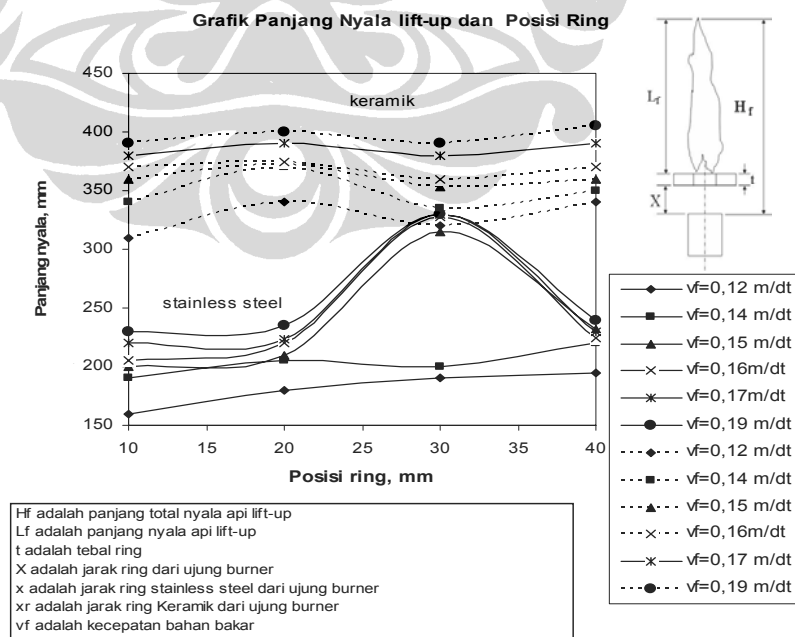
X (mm)	V _f (L/s)	V _a (L/s)	AFR	Y _f	BL (kW/m ²)	L _f (mm)
10	0,019	0,626	33,0	0,043	10.417	295
	0,021	0,663	31,6	0,045	11.513	325
	0,023	0,693	30,1	0,047	12.610	345
	0,025	0,716	28,6	0,049	13.706	355
	0,027	0,779	28,8	0,049	14.803	365
	0,029	0,811	28,0	0,050	15.899	375
20	0,019	0,590	31,1	0,043	10.417	315
	0,021	0,626	29,8	0,045	11.513	345
	0,023	0,663	28,8	0,047	12.610	347
	0,025	0,701	28,0	0,049	13.706	349
	0,027	0,739	27,4	0,049	14.803	365
	0,029	0,779	26,9	0,050	15.899	375
30	0,019	0,576	30,3	0,043	10.417	285
	0,021	0,619	29,5	0,045	11.513	300
	0,023	0,656	28,5	0,047	12.610	318
	0,025	0,689	27,6	0,049	13.706	325
	0,027	0,747	27,7	0,049	14.803	345
	0,029	0,779	26,9	0,050	15.899	355
40	0,019	0,573	30,1	0,043	10.417	295
	0,021	0,619	29,5	0,045	11.513	305
	0,023	0,663	28,8	0,047	12.610	315
	0,025	0,701	28,0	0,049	13.706	325
	0,027	0,747	27,7	0,049	14.803	345
	0,029	0,779	26,9	0,050	15.899	360

ring keramik berada di atas grafik panjang nyala total api *lift-up* dengan menggunakan *ring stainless steel* [86]. Hal ini sesuai dengan penurunan nilai *AFR*-nya pada Gambar 5.3 dan sesuai pula dengan persamaan panjang nyala api *premixed* yang diusulkan oleh Rokke [34]. 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 5.3 dan grafik pada Gambar 6.6 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. Hal ini lebih jelas terlihat pada grafik panjang nyala dengan posisi *ring* pada Gambar 6.7.

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.3. dan 6.6 maka terlihat jelas bahwa *AFR* yang lebih rendah pada *ring* keramik atau kecepatan pembakaran yang lebih rendah akan meningkatkan panjang nyala api. Kecepatan nyala sangat tergantung pada laju aliran campuran bahan bakar dan udara sesuai dengan rumus



Gambar 6.6. Perbandingan Grafik Panjang Nyala *Ring* Keramik dan *Ring* Stainless steel



Gambar 6.7. Perbandingan Panjang Nyala Api *Ring* Keramik dan *Ring* Stainless Steel

pendekatan kecepatan nyala laminar oleh Sharma & Mohan [54]. Pada luas penampang *burner* yang sama maka kecepatan campuran udara dan bahan bakar hanya dipengaruhi oleh laju aliran volumetris campuran udara dan bahan bakar yang sebanding dengan perbandingan campuran udara dan bahan bakar. Dengan demikian nilai *AFR* dapat dikorelasikan dengan kecepatan nyala. Hal sebaliknya terjadi pada *ring* dari *stainless steel*. 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 *premixed* memiliki temperatur yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan nyala dekat ujung *burner*. Hal lain yang diduga mempengaruhinya adalah kapasitas panas material yang amat berbeda. *Stainless steel* cenderung melepaskan energi panas jika telah mencapai temperatur tinggi, sedangkan keramik justru sebaliknya menyerap energi panas pembakaran karena kondisinya yang lebih rendah dari temperatur nyala disekitarnya. Hal ini juga didukung oleh penelitian dengan menggunakan *burner* keramik yang ternyata karakteristiknya seperti *burner* berpendingin air [55]. Namun hal ini perlu dianalisa lebih lanjut dari aspek radiasi nyala, kerugian panas dan temperatur *ring* saat *lift-up*.

Dengan rendahnya hasil pengukuran temperatur *ring* keramik dibandingkan dengan temperatur *ring stainless steel* maka kerugian panas dari nyala api yang terserap oleh *ring* keramik akan lebih sedikit sehingga secara keseluruhan tercapai panjang nyala yang lebih panjang dibandingkan dengan *ring* dari *stainless steel*.

6.2 Korelasi Panjang Nyala *Lift-up*

Panjang nyala api *premix* juga dipengaruhi oleh bilangan Lewis yang merupakan rasio momentum aliran terhadap gaya apung. Persamaan Rokke mengenai korelasi panjang nyala api *premixed* yang semula seperti Persamaan 2.11 di koreksi dengan bilangan Lewis, menjadi [87]:

$$\frac{L}{d_b} = 16Y_f^{0.3} Fr^{0.2} Le^{-0.1} \quad (6.1)$$

Untuk korelasi panjang nyala api *lift-up* yang merupakan jarak dari nyala di ujung *ring* ke ujung nyala api *lift-up* dikoreksi kembali dengan menambahkan parameter rasio jarak dengan diameter dalam *ring* sehingga diperoleh korelasi seperti pada Persamaan 6.2. [30]

$$\frac{L_f}{d_b} = 0,123 Y_f^{0,27} Fr^{2,85} Le^{4,58} (X / D_{ir})^{0,01} \quad (6.2)$$

Namun kesesuaian data hasil experiment dengan korelasi tersebut sekitar 75%. Kemudian dilakukan penambahan parameter lagi yakni *thermal drive potensial*, yakni rasio selisih temperatur *ring* dan temperatur *tip burner* dengan temperatur *ring* yang dinyatakan dengan T^* [31]:

$$T^* = \frac{T_{ring} - T_{tip}}{T_{ring}} \quad (6.3)$$

dengan T_{ring} dan T_{tip} dianalisa pada satuan Celcius dan juga Kelvin. Penentuan korelasi panjang nyala dilakukan dengan regresi linier telah ditemukan dengan menetapkan satuan temperatur yang lebih optimal adalah dalam Kelvin dengan acuan penentuan korelasi dari Tabel 6.5. Adapun korelasinya adalah :

$$\frac{L_f}{d_b} = 19,7 Y_f^{0,13} . Fr^{0,4} . Le^{0,24} . X^{0,14} . T^{*2,4} \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

Kesesuaian data eksperimental dengan korelasi ini adalah 86% yang ditentukan dari hasil regresi linier variabel jamak dengan bantuan perangkat lunak pengolah data. Persamaan 6.4. menunjukkan bahwa semakin besar temperatur *ring*, maka akan memperbesar nilai panjang nyala api. Perpindahan panas dari *ring* ke campuran yang belum terbakar, membantu penyalaan sehingga memperpanjang nyala api. Namun dari hasil analisis statistik ternyata parameter bilangan Froude, Lewis, dan ratio jarak *ring* dan diameter dalam *ring* tidak signifikan pengaruhnya terhadap panjang nyala api setelah *lift-up*. Hal ini mengindikasikan bahwa panjang nyala setelah *lift-up* tidak mengikuti mekanisme yang sama dengan mekanisme stabilisasi nyala yang diturunkan menjadi korelasi pada Persamaan 6.1. Analisis statistik penentuan korelasi panjang nyala ditampilkan secara rinci pada Lampiran 3 serta penentuan parameter antara lain

Burning Load, *AFR*, fraksi massa bahan bakar, bilangan Froude, Bilangan Lewis dan bilangan Reynold. Hasil regresi variabel jamak juga ditampilkan untuk uji statistik.

Tabel 6.5. Tabel Bilangan Natural Komponen Korelasi Panjang Nyala [31]

$\ln Y_f$	$\ln Fr$	$\ln Le$	$\ln X$	$\ln T^*$	$\ln L_f/D_b$
Fraksi massa			X/Di	T*	L_f/D_b
X1	X2	X3	X4	X5	Y
-3.251	5.1814	-2.0589	-0.0100	-0.4001	2.436116
-3.214	5.3111	-2.124	-0.01005	-0.375	2.607967
-3.191	5.4485	-2.192	-0.01005	-0.374	2.65926
-3.171	5.5771	-2.257	-0.01005	-0.382	2.683953
-3.124	5.6422	-2.289	-0.01005	-0.369	2.75457
-3.093	5.7257	-2.331	-0.01005	-0.356	2.799022
-3.251	5.3841	-2.059	-0.01005	-0.355	2.5539
-3.197	5.4711	-2.204	0.693147	-0.343	2.683953
-3.170	5.5397	-2.238	0.693147	-0.333	2.70805
-3.148	5.6132	-2.275	0.693147	-0.330	2.75457
-3.109	5.7116	-2.324	0.693147	-0.324	2.768114
-3.075	5.7592	-2.348	0.693147	-0.333	2.820528
-3.228	5.2512	-2.036	1.098612	-0.428	2.607967
-3.179	5.3523	-2.090	1.098612	-0.360	2.65926
-3.149	5.4794	-2.153	1.098612	-0.317	3.113515
-3.120	5.5551	-2.208	1.098612	-0.308	3.153956
-3.101	5.6066	-2.268	1.098612	-0.305	3.160035
-3.064	5.7053	-2.304	1.098612	-0.296	3.160035

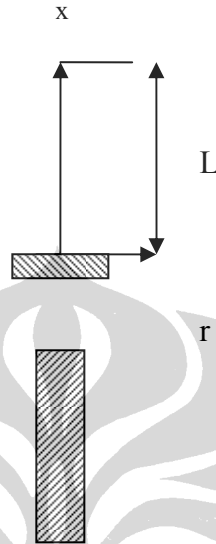
6.3 Kajian Teoritis Panjang Nyala Api Setelah *Lift-up*

Dengan mengacu pada kondisi nyala setelah *ring* adalah mendekati kondisi nyala pancaran atau *jet flame* [14, 75] serta asumsi pembakaran sistem reaksi kimia sederhana oleh Spalding yakni bilangan Schmidt, bilangan Prandtl dan bilangan Lewis sama dengan 1, dilakukan pendekatan yang sama namun pada kondisi nyala berada tepat pada *ring* sehingga sifat-sifat fluida adalah sifat-sifat nyala yang diasumsikan sebagai gas panas dengan temperatur mendekati temperatur *ring*. Sistem koordinat adalah silinder dengan asumsi aliran ke arah sumbu θ adalah konstan.

Persamaan kontinuitas ke arah x dan r adalah [35] :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho ur) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho vr) = 0 \quad (6.5)$$

Persamaan kekekalan momentum aksial adalah:



Gambar 6. 8. Sistem Koordinat Analisa Panjang Nyala Setelah *Lift-up*

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uru) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho vr u) = \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (6.6)$$

Persamaan kekekalan konsentrasi bahan bakar:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho ur Y_F) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho vr Y_F) = \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho D_F r \frac{\partial Y_F}{\partial r} \right) + r \omega_F \quad (6.7)$$

Persamaan kekekalan konsentrasi oksidator:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho ur Y_O) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho vr Y_O) = \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho D_O r \frac{\partial Y_O}{\partial r} \right) + r \omega_O \quad (6.8)$$

Dengan asumsi SCRS (*simple chemically reacting system*) diperoleh persamaan

$$\omega_F = \left(\frac{F}{O} \right)_{st} \omega_O \quad (6.9)$$

Dengan fraksi campuran adalah f

$$f = \frac{\zeta_M - \zeta_A}{\zeta_F - \zeta_A} \quad (6.10)$$

Dan didefinisikan sebuah sifat kekekalan yang tidak tergantung pada sumber dan tujuan yakni [35]:

$$\zeta \equiv Y_F - \left(\frac{F}{O}\right)_{st} Y_O \quad (6.11)$$

Maka persamaan kekekalan konsentrasi bahan bakar dan oksidator dapat digabung menjadi

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u r \zeta) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v r \zeta) = \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial \zeta}{\partial r} \right) \quad (6.12)$$

Atau jika dinyatakan dalam fraksi campuran menjadi :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u r f) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v r f) = \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial f}{\partial r} \right) \quad (6.13)$$

Fraksi campuran, f atau *mixture fraction* adalah perbandingan total fraksi massa bahan bakar terbakar dengan yang belum terbakar dengan total fraksi massa campuran tidak terbakar [35,38,49]. Nilai f berubah mulai dari $f=0$ pada oksidator dan $f=1$ pada bahan bakar saja dan dapat dinyatakan dalam persamaan 6.14

$$f = \frac{[Y_F - (F/O)_{st} Y_O]_M + (F/O)_{st} Y_{O,A}}{1 + (F/O)_{st} Y_{O,A}} \quad (6.14)$$

Fraksi campuran berbeda dengan fraksi massa bahan bakar maupun rasio bahan bakar dengan udara. Parameter f pembakaran *non premixed* identik dengan *progress variabel*, c pada pembakaran *premixed* yakni pada $f=1$ identik dengan $c=0$ atau kondisi campuran yang belum terbakar (*unburnt gas*) dan pada $f=0$ identik dengan $c=1$ atau kondisi campuran terbakar (*burnt gas*). Parameter f selanjutnya terus digunakan karena memudahkan penyelesaian persamaan differensial yakni pada kondisi batas radius nyala sama dengan tak terhingga maka $f=0$ [85].

Dengan

$$h = C_p T + Y_F \Delta H_r \quad (6.15)$$

Maka persamaan kekekalan energi dinyatakan seperti pada Persamaan 6.16:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u r h) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v r h) = \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial h}{\partial r} \right) \quad (6.16)$$

Dengan persamaan yang identik antara Persamaan 6.6, 6.13 dan 6.16 serta kondisi batas yang sama yakni :

$$\text{Pada } r \rightarrow \infty \quad \begin{cases} u = 0 \\ f = 0 \\ h = h_\infty \end{cases}$$

Maka sesuai dengan konsep Schlichting [88]:

$$\frac{ux}{I_u} = \frac{fx}{I_f} = \frac{(h-h_\infty)x}{I_h} = \frac{3}{4} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4}\zeta^2\right)^2} \quad (6.17)$$

Dengan

$$I_u = \frac{1}{\nu} \int_0^\infty u^2 r dr = \frac{1}{\nu} \left(\frac{1}{2} u_0^2 r_0^2 \right) \quad (6.18)$$

$$I_f = \frac{1}{\nu} \int_0^\infty u f r dr = \frac{1}{\nu} \left(\frac{1}{2} u_0 r_0^2 \right) \quad (6.19)$$

$$I_h = \frac{1}{\nu} \int_0^\infty u (h-h_\infty) r dr = \frac{u_0 (h-h_\infty) r_0^2}{2\nu} \quad (6.20)$$

Dengan mensubstitusikan Bilangan Reynolds adalah

$$\text{Re} = \frac{u_0 2r_0}{\nu} \quad (6.21)$$

Persamaan 6.17. dapat dinyatakan dalam Bilangan Reynolds menjadi:

$$\frac{ux}{u_0 r_0} \frac{1}{\text{Re}_{d_0}} = \frac{fx}{r_0} \frac{1}{\text{Re}_{d_0}} = \frac{(h-h_\infty)x}{h_0-h_\infty} \frac{1}{r_0} \frac{1}{\text{Re}_{d_0}} = \frac{\frac{3}{16}}{\left(1 + \frac{3}{256} \text{Re}_{d_0}^2 r^2 / x^2\right)^2} \quad (6.22)$$

Dengan kondisi fenomena *flame lift-up* ditimbulkan oleh perubahan *AFR* maka persamaan 6.22 diselesaikan seperti berikut:

$$\frac{fx}{r_0} \frac{1}{\text{Re}_{d_0}} = \frac{\frac{3}{16}}{\left(1 + \frac{3}{256} \text{Re}_{d_0}^2 r^2 / x^2\right)^2} \quad (6.23)$$

Persamaan 6.23 dapat diubah ke dalam bentuk $r = F(x)$ menjadi :

$$\frac{r}{x} = \frac{16}{\sqrt{3} \text{Re}_{d_0}} \sqrt{\sqrt{\frac{3}{16} \frac{\text{Re}_{d_0} r_0}{xf}} - 1} \quad (6.24)$$

Untuk kondisi pembakaran *premixed*, tepat dipermukaan nyala akan tercapai fraksi massa bahan bakar setelah pembakaran adalah mendekati nol, $Y_{F,M}=0$ atau *progress variable* =1. Pada kondisi ini f dapat dinyatakan dengan Persamaan 6.25 [35,38,47,]:

$$f = f_{st} \frac{Y_{o,A} - Y_{o,M}}{Y_{o,A}} \quad (6.25)$$

f_{st} dapat dinyatakan dalam persamaan 6.26 yakni [35]:

$$f_{st} = \frac{(F/O)_{st} Y_{o,A}}{1 + (F/O)_{st} Y_{o,A}} \quad (6.26)$$

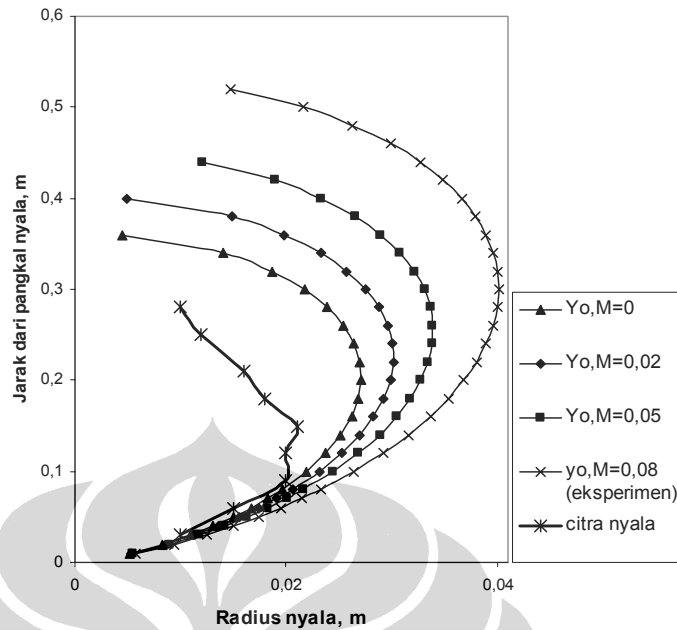
Sehingga f dapat disubstitusikan ke Persamaan 6.24 dan pada permukaan nyala $r = r_{flame}$ dan Bilangan Reynolds adalah Bilangan Reynolds untuk nyala yakni kondisi nyala laminar dengan $Re_f \approx 4$ [85] diperoleh radius nyala sebagai fungsi x dapat diturunkan seperti Persamaan 6.27:

$$\frac{r_{flame}}{x} = \frac{16}{\sqrt{3} Re_f} \sqrt{\frac{3}{16} \frac{Re_f r_0}{x f_{st} \frac{Y_{o,A} - Y_{o,M}}{Y_{o,A}}} - 1} \quad (6.27)$$

Dengan AFR_{st} dalam massa adalah 15,6 maka $(F/O)_{st}$ untuk propana adalah 1/15,6 atau 0,0641 dan sesuai persamaan 6.26 maka f_{st} untuk propana adalah:

$$f_{st} = \frac{(1/15,6).(0,232)}{1 + (1/15,6).(0,232)} = 0,0145$$

Persamaan 6.27 dapat diplot dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 6.9. Nilai $Y_{O,M}$ ditentukan 0,02 dan 0,05 dan nilai x ditentukan dengan rentang 0,01 m. Grafik radius nyala fungsi jarak dari pangkal nyala pada kondisi eksperimental yakni fraksi massa oksigen pada gas terbakar, $Y_{O,M}$ adalah 0,8 juga digambarkan pada grafik yang sama. Sedangkan kondisi radius nyala berdasarkan citra hasil pemotretan menggunakan *Thermograph Infra Red* ditampilkan pula dengan grafik warna hitam. Ternyata terjadi penyimpangan yang cukup besar terutama pada kelengkungan tepi nyala. Hal ini merupakan akibat dari pendekatan reaksi yang sederhana pada pendekatan teoritis.



Gambar 6.9. Radius Nyala pada Variasi Fraksi Massa Oksigen pada Gas Terbakar
Berdasarkan geometri nyala, pada $r_{flame} = 0$ maka akan tercapai x yang maksimum panjang nyala atau $x = x_{flame}$. Persamaan panjang nyala dapat dinyatakan sebagai fungsi dari fraksi campuran dengan mengacu pada Persamaan 6.27 menjadi:

$$\frac{x_{flame}}{r_0} = \frac{3}{16} \frac{Re_f}{f_{st} \left(\frac{Y_{O,A} - Y_{O,M}}{Y_{O,A}} \right)} \quad (6.28)$$

f_{st} dapat dinyatakan seperti pada persamaan 6.26 maka Persamaan 6.28 menjadi

$$\frac{x_{flame}}{r_0} = \frac{3}{16} Re_f \left[\frac{1 + (F/O)_{st} Y_{O,A}}{(F/O)_{st} (Y_{O,A} - Y_{O,M})} \right] \quad (6.29)$$

Dengan $Y_{O,A}$ adalah fraksi massa oksigen di udara yakni 0,232 [85] maka $Y_{O,M}$ dapat ditentukan dari persamaan 6.30:

$$\begin{aligned} Y_{O,M} &= Y_{O,A}(1-f) \\ Y_{O,A} - Y_{O,M} &= Y_{O,A}f \end{aligned} \quad (6.30)$$

Dan untuk kondisi pembakaran yang miskin bahan bakar seperti pada fenomena *flame lift-up* ini maka f dapat didekati dengan persamaan 6.31 [35]

$$f \approx \frac{Y_F}{Y_F + Y_{O,A}} \approx \frac{(F/O)}{1 + (F/O)} \approx \frac{1}{1 + AFR} \quad (6.31)$$

Maka Persamaan 6.30 menjadi

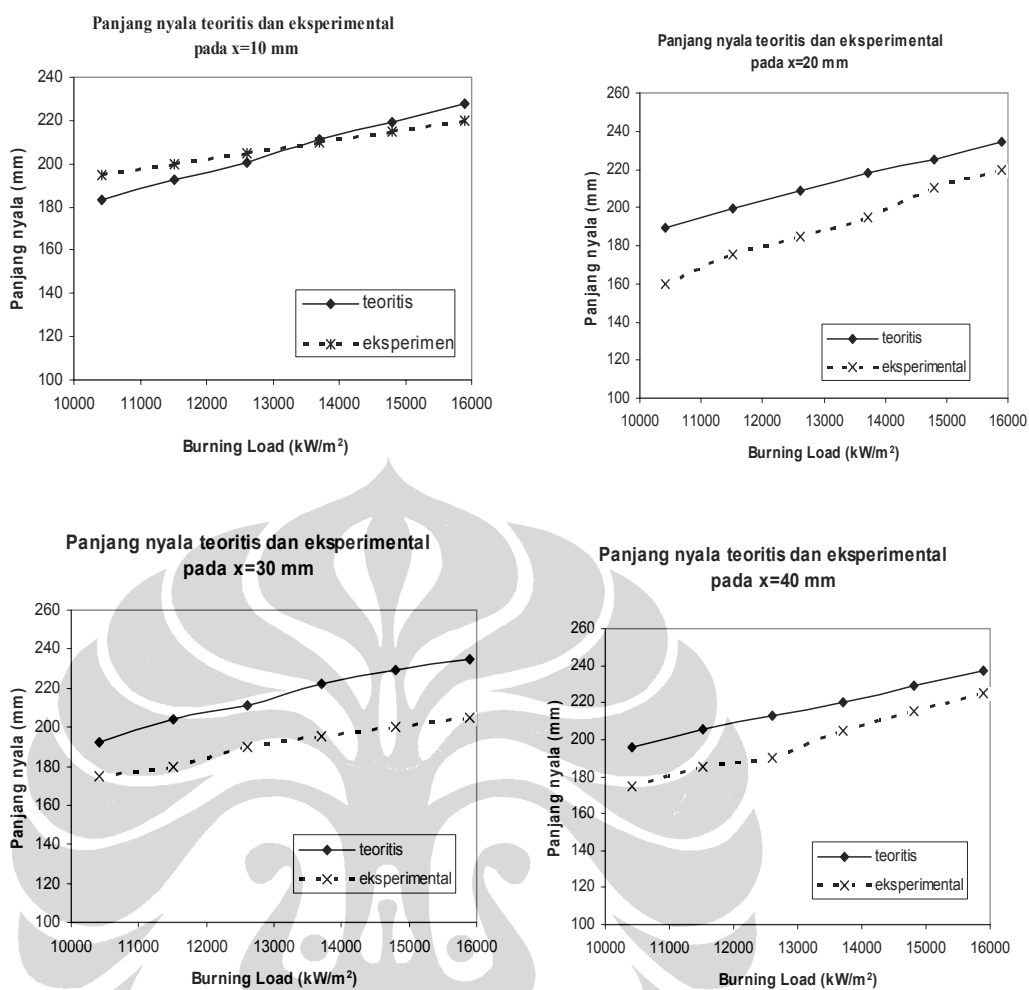
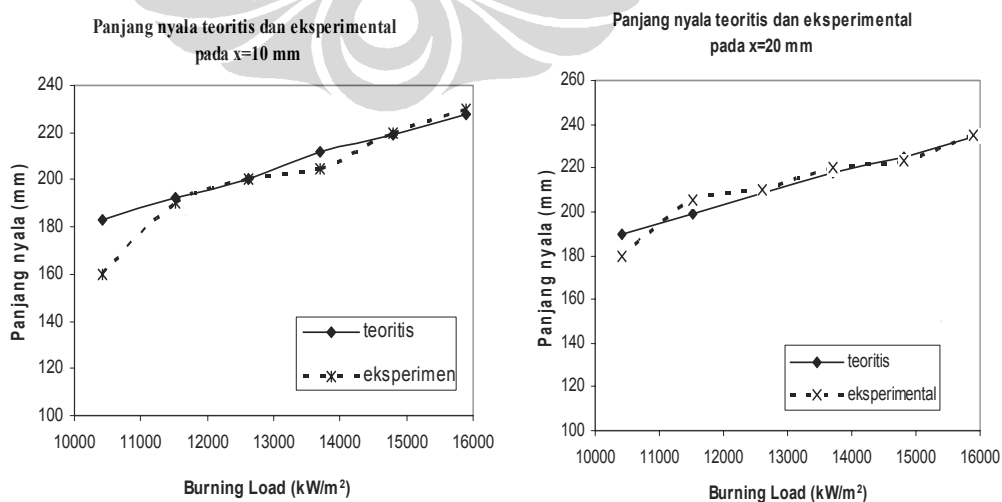
$$\frac{x_{flame}}{r_o} = \frac{3}{16} \text{Re}_f \left[\frac{1 + (F/O)_{st} Y_{0,A}}{(F/O)_{st} Y_{0,A} f} \right] = \frac{3}{16} \text{Re}_f \left[\frac{1 + (F/O)_{st} Y_{0,A}}{(F/O)_{st} Y_{0,A} (1 + AFR)} \right] \quad (6.32)$$

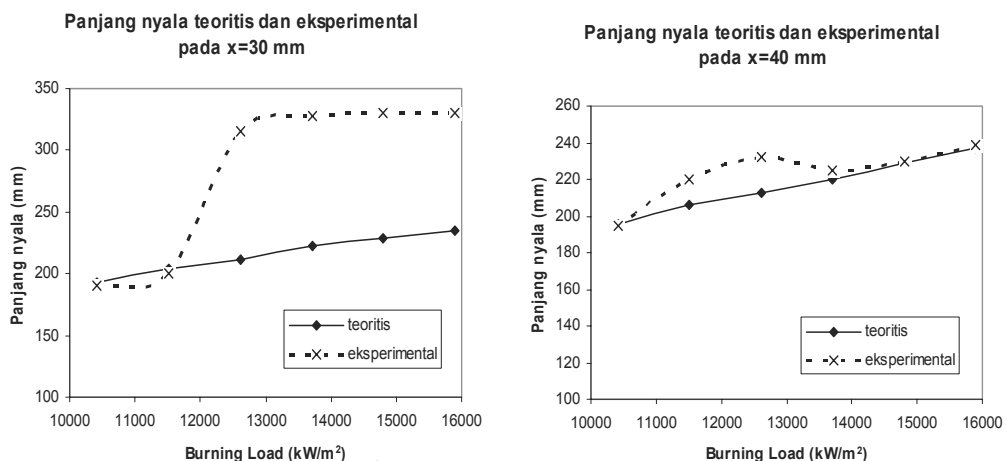
Jika dinyatakan dengan fraksi massa oksidator yang menurun maka panjang nyala akan naik. Hal ini sesuai dengan hasil eksperimental penggunaan *ring* keramik dengan *ring stainless steel*, dimana kondisi *lift-up* menggunakan *ring* keramik terjadi pada *AFR* yang lebih rendah pada *Burning Load* yang sama atau fraksi massa udara lebih rendah terbukti panjang nyalanya lebih tinggi. Berdasarkan konsep laju kehilangan kalor dari nyala juga terbukti bahwa makin rendah laju kehilangan kalor seperti pada penggunaan *ring* keramik menghasilkan peningkatan panjang nyala.

Berdasarkan persamaan 6.32 dihitung panjang nyala teoritis dan dibandingkan dengan panjang nyala hasil eksperimen dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 6.10 sampai 6.12.

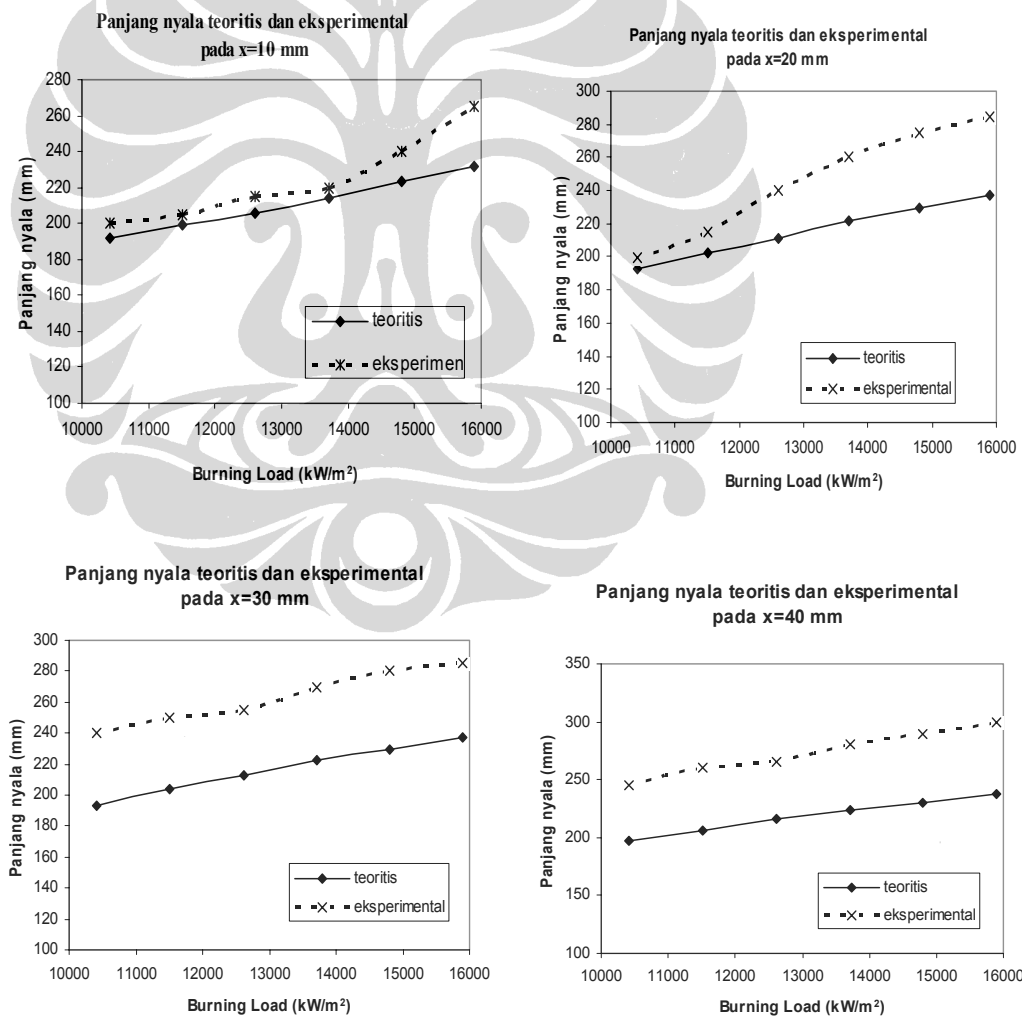
Dari Gambar 6.10 sampai dengan 6.12 tampak bahwa grafik perhitungan panjang nyala teoritis selalu berada di atas grafik pengukuran panjang nyala eksperimental. Hal ini disebabkan oleh asumsi reaksi sederhana dan kondisi tunak. Selain itu faktor temperatur *ring* yang meningkat juga tidak diperhitungkan sehingga terjadi penyimpangan pada posisi 30 mm pada laju aliran yang tinggi.

Perbedaan perhitungan dan pengukuran panjang nyala disebabkan juga oleh kendala saat pengukuran yakni tekanan tabung bahan bakar yang berkurang seiring dengan kenaikan laju aliran bahan bakar. Namun berdasarkan kecenderungan perubahan panjang nyala yang menurun seiring dengan kenaikan *AFR* sesuai dengan hasil eksperimental penggunaan *ring* keramik. Pada *ring* keramik fenomena *flame lift-up* terjadi pada *AFR* yang lebih rendah dan diperoleh panjang nyala yang lebih tinggi.

Gambar 6.10. Panjang Nyala Teoritis dan Eksperimental pada $D_i=7$ mmGambar 6.11. Panjang Nyala Teoritis dan Eksperimental pada $D_i=10$ mm



Gambar 6.11. Sambungan



Gambar 6.12. Panjang Nyala Teoritis dan Eksperimental pada Di=14 mm

Persamaan teoritis yang diperoleh membutuhkan lebih banyak data dan variasi parameter seperti geometri *ring*, diameter *burner*, serta material *ring* untuk mengujinya. Namun dengan data penelitian *flame lift-up* yang ada dan berdasarkan tampilan grafik perbandingan panjang nyala teoritis dan panjang nyala hasil eksperimen diperoleh kesalahan berkisar 4-5%.

