



UNIVERSITAS INDONESIA

**FENOMENA *FLAME LIFT-UP*
PADA PEMBAKARAN *PREMIXED GAS PROPANA***

DISERTASI

COKORDA PRAPTI MAHANDARI

0606037525

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM PASCA SARJANA TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**FENOMENA *FLAME LIFT-UP*
PADA PEMBAKARAN *PREMIXED GAS PROPANA***

DISERTASI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor

COKORDA PRAPTI MAHANDARI

0606037525

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM PASCA SARJANA TEKNIK MESIN
KEKHUSUSAN KONVERSI ENERGI
DEPOK
JULI 2010**

ii

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Cokorda Prapti Mahandari

NPM : 0606037525

Tanda tangan : 

Tanggal : 2 Agustus 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :

Nama : Cokorda Prapti Mahandari
NPM : 0606037525
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Disertasi : Fenomena *Flame Lift-up* pada Pembakaran
Premixed Gas Propana

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Pasca Sarjana Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Promotor : Prof. Dr. I Made Kartika D, Dipl.-Ing ()

Kopromotor : Prof. Dr. H. Bambang Sugiarto, MEng ()

: Prof. Dr. Ir. Yulianto S. Nugroho, MSc ()

Tim Penguji : Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer, DEA ()

: Prof. Dr. Ir. T. A. Fauzi Soelaiman, MSME ()

: Prof. Dr.-Ing. Ir. Nandy S. Djaya Putra ()

: Dr. Ir. Harinaldi, MEng ()

: Dr. Ir. Adi Suryosatyo, MEng ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 2 Agustus 2010

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji Syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmatnya saya dapat menyelesaikan disertasi ini. Penulisan disertasi dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Doktor Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan disertasi ini telah saya terima sehingga disertasi ini bisa terwujud. Oleh karena itu saya menyampaikan banyak terima kasih kepada :

1. Prof. Dr. Ir. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing, selaku promotor yang telah memberikan topik *flame lift-up*, fenomena pembakaran yang telah lama ditemukan oleh beliau untuk saya teliti serta menyediakan waktu, tenaga, pikiran dan kesabaran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan disertasi ini.
2. Prof. Dr. Ir. H. Bambang Sugiarto, M.Eng, selaku ko-promotor yang telah menyediakan waktu disela-sela kesibukan sebagai Dekan FT- UI.
3. Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho, MSc., PhD, selaku ko-promotor atas masukannya yang sangat berguna.
4. Anggota Tim Penguji Prof Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer, DEA, Prof Dr. Ir. Tubagus Ahmad Fauzi Soelaiman MSME, Dr. Ir. Adi Suryosaty, MEng atas saran-sarannya.
5. Dr. Ir. Harinaldi., MEng selaku Kepala Departemen Teknik Mesin, anggota Tim Penguji, atas pinjaman wet gas meter-nya, saran serta koreksian yang sangat teliti.
6. Prof Dr. Ir. Nandy Setiadi Djaya Putra selaku anggota Tim Penguji juga atas bantuannya berupa jurnal-jurnal internasional, Dr.-rer.nat. Ir. Yuswan Muharam, MT atas pinjaman CD Chemkin, Dr. Ir. Ganjar Kiswanto, MEng, atas monitoring dan info disertasinya serta seluruh keluarga besar Departemen Teknik Mesin atas segala bantuannya.
7. DRPM UI atas bantuan Hibah Program S3 Kontrak No 242F/DRPM-UI/N1.4/2008

8. Yayasan Pendidikan Gunadarma, Rektor Universitas Gunadarma Prof. Dr. E.S. Margianti, SE., MM dan Pembantu Rektor II Universitas Gunadarma Prof. Suryadi Harmanto, SSi, MM atas ijin dan bantuan dananya sehingga memungkinkan saya menempuh jenjang pendidikan S3.
9. Dr. Asep Juarna SSi, MKom dan keluarga, Trini Saptariani SKom, MM, serta seluruh keluarga besar Universitas Gunadarma yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu atas dukungan dan doanya.
10. PT PLN PJB Suralaya dan PT PJB Paiton atas pinjaman alatnya
11. Zheng Chen, PhD dari Princeton University, Rosyida Permatasari dari UTM, Arjun K.C dari Halifax Kanada dan Gede Shantika dari TU Eindhoven Belanda atas kiriman jurnalnya.
12. Seluruh anggota grup riset *Flame and Combustion*, Bu Catur, Pak Eko, Pak Hamdan, Pak Tomo, Pak Cahyo, Pak Dimitri, Amri, Taufiq, Rahmat, Aye, dan lain lain atas kerjasamanya.
13. Suamiku Nyoman Darma Adi dan anak-anakku Dika, Devinda dan Oni, keluarga besar Puri Kaleran Bangli dan keluarga di Lampung atas dukungan dan doanya.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa memberikan balasan dan perlindungan kepada semua pihak yang telah membantu saya. Saya menyadari bahwa disertasi ini belum sempurna namun saya berharap semoga disertasi ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu khususnya teknik pembakaran.

Depok, Agustus 2010

Cokorda Prapti Mahandari

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
DISERTASI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Cokorda Prapti Mahandari
NPM : 0606037525
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Disertasi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Fenomena *Flame Lift-up* pada Pembakaran *Premixed Gas Propana*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*).

Penggunaan data dan informasi yang tercantum dalam disertasi ini untuk maksud publikasi ilmiah dan populer hanya dapat dilakukan oleh peneliti utama atau atas ijin tertulis dari peneliti utama sebagai penanggungjawab dalam penelitian "*Flame Lift-up*" pada "*Flame and Combustion Research Group*".

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 5 Agustus 2010
Yang menyatakan



(Cokorda Prapti Mahandari)

ABSTRAK

Nama : Cokorda Prapti Mahandari
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Fenomena *Flame Lift-up* pada Pembakaran *Premixed Gas* Propana

Fenomena *flame lift-up* adalah peristiwa melompatnya nyala api dari ujung *burner* ke suatu benda penghalang atau *ring* pada penelitian ini sehingga pangkal nyala berada pada benda penghalang. Faktor penyebab timbulnya fenomena, kestabilan nyala dan panjang nyala *flame lift-up* pada pembakaran *premixed gas* propana telah diteliti secara eksperimental dan teoritis meliputi kajian matematis dan simulasi dengan perangkat lunak CFD dan reaksi kinetik. Fenomena *flame lift-up* timbul karena meningkatnya laju kehilangan kalor dari nyala pada daerah dekat *burner* sehingga terjadi *local extinction* antara ujung *burner* dan *ring*. Meningkatnya laju kehilangan kalor akan meningkatkan kecepatan nyala pada batas mampu nyala. Kecepatan nyala pada batas mampu nyala besarnya sama dengan kecepatan nyala laminar pada *ring* yakni berkisar antara 0,38 - 0,43 m/s sehingga pangkal nyala berpindah ke *ring*. Melompatnya nyala dari ujung *burner* terjadi pada Bilangan Karlovitz sekitar 2,5 dan besarnya sudut ujung *luminous* sekitar 8° . Daerah kestabilan nyala setelah *lift-up* sangat dipengaruhi oleh laju kehilangan kalor. Laju kehilangan kalor dari nyala yang rendah menaikkan daerah kestabilan nyala dan panjang nyala serta temperatur maksimum nyala. Hal ini terbukti pada penggunaan material *ring* dari keramik. Penggunaan *ring* keramik terbukti meningkatkan daerah stabilitas nyala sampai 25%. Demikian pula panjang nyala api *lift-up* dan temperatur maksimum nyala menjadi lebih tinggi pada penggunaan *ring* keramik jika dibandingkan dengan penggunaan *ring stainless steel*.

Kata Kunci:

Pembakaran, premix, *flame lift-up*, kestabilan nyala, panjang nyala

ABSTRACT

Name : Cokorda Prapti Mahandari
Study Program: Mechanical Engineering
Title : Flame Lift-up Phenomenon on Premixed Combustion of Propane

Flame lift-up phenomenon is the occurrence of flame that jumps from tip burner to a bluff body or a ring in this experiment where the flame attached. The main factor for flame lift-up phenomenon, stability and flame length have been studied experimentally and theoretically incorporating mathematical analysis and CFD and kinetic reaction simulation on propane premixed combustion. Flame lift-up phenomenon was due to flame heat loss near the tip burner that promote local extinction and the equilibrium of laminar burning velocity and flammability limit burning velocity that moved to the ring. Flammability limit burning velocity on the ring was in the range of 0.38 – 0.43 m/s. Flame would jump to ring on the Karlovitz number of about 2.5 and the cone angle of about 8° . Flame lift-up stability area governed by heat loss of the flame cum material ring. Smaller heat loss increased flame lift-up stability area, flame length and maximum flame temperature as on ceramic ring. Ceramic ring increased the flame lift-up stability area almost 25%. Using ceramic ring, flame length and maximum flame temperature were also higher comparing to using stainless steel ring.

Keywords:
Combustion, premixed, flame lift-up, flame stability, flame length

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR ISTILAH/SIMBOL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
1. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Masalah Penelitian	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Penelitian	5
1.5 Metode Penelitian	5
1.6 Sistematika Penelitian	7
2. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Pembakaran	8
2.2 Klasifikasi Nyala	9
2.3 Struktur Nyala Api Laminer	11
2.4 Data base Nyala Api <i>Premix</i> Turbulen	15
2.5 Teori dan Pemodelan Pembakaran	18
2.6 Stabilitas Nyala	24
2.7 Panjang Nyala Api	31
2.8 Simulasi dengan Perangkat Lunak	32
3. METODE PENELITIAN	36
3.1 Peralatan Penelitian	37
3.2 Penyetaraan Flowmeter dan Termokopel	39
3.3 Metode Pengambilan Data	42
3.4 Simulasi dengan Perangkat Lunak	46
3.5 Kajian Teoritis Fenomena <i>Flame Lift-up</i> , Kestabilan Nyala dan Panjang Nyala	51
4. FENOMENA FLAME LIFT-UP	54
4.1 Kajian Eksperimental	54
4.2 Analisa Laju Kehilangan Kalor pada Fenomena <i>Flame Lift-up</i> ...	78
4.3 Hasil Simulasi dengan Pendekatan <i>Eddy Dissipation Rate</i>	91
5. KESTABILAN NYALA API SETELAH LIFT-UP	97
5.1 Kestabilan Nyala <i>Lift-up</i>	97
5.2 Kajian Teoritis Fenomena <i>Blow off</i> pada Nyala <i>Lift-up</i>	106

6. PANJANG NYALA API PADA FENOMENA <i>FLAME LIFT-UP</i>	111
6.1 Kajian Eksperimental Panjang Nyala Api <i>Lift-up</i>	111
6.2 Korelasi Panjang Nyala Api <i>Lift-up</i>	122
6.3 Kajian Teoritis Panjang Nyala Api <i>Lift-up</i>	124
7. KESIMPULAN	134
DAFTAR ACUAN	136
LAMPIRAN	



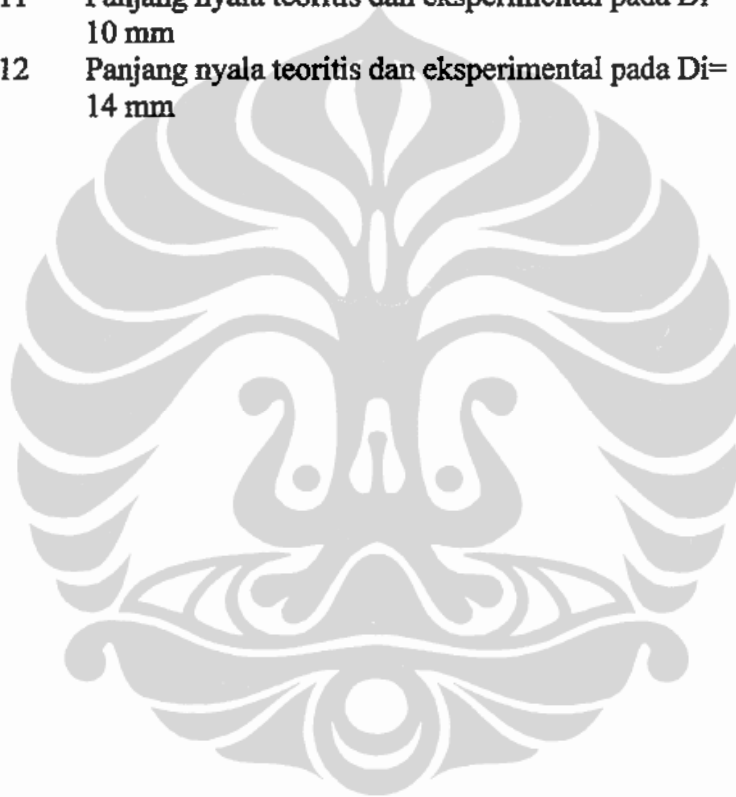
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Nyala api sebelum dan setelah <i>lift-up</i> .	3
Gambar 1.2	Diagram alir penelitian fenomena <i>flame lift-up</i>	6
Gambar 2.1	Struktur nyala api dengan satu langkah asimptotik	11
Gambar 2.2	Kecepatan pembakaran vs <i>equivalens ratio</i>	12
Gambar 2.3	Sketsa vektor kecepatan pembakaran laminar	13
Gambar 2.4	Ilustrasi <i>characteristic thickness</i>	14
Gambar 2.5	Nyala api stasioner isotropis turbulen	16
Gambar 2.6	Nyala api stasioner dengan <i>shear turbulen</i>	17
Gambar 2.7	Daerah pembagian nyala turbulen	20
Gambar 2.8	Perbandingan kecepatan antara simulasi dan eksperimen pada nyala <i>flicker</i>	21
Gambar 2.9	<i>Stretch rate</i> pembakaran propana dan udara	22
Gambar 2.10	Bilangan Karlovitz 1-D untuk nyala campuran propana dan udara	23
Gambar 2.11	Variasi bilangan Karlovitz Lokal berdasarkan ketebalan nyala campuran propana dan udara	23
Gambar 2.12	Diagram stabilitas <i>flashback, lift-off, dan yellow tipping</i> untuk bahan bakar gas industri	24
Gambar 2.13	Perbandingan ketinggian lift-off antara kondisi gravitasi normal dan tanpa gravitasi	26
Gambar 2.14	<i>Residual flame</i> mendekati <i>blow-off</i>	27
Gambar 2.15	Photo percobaan <i>ring stabilizer</i>	28
Gambar 2.16	Distribusi kecepatan kondisi aliran dingin dan pembakaran	
Gambar 3.1.	Diagram alir langkah eksperimental	36
Gambar 3.2	<i>Ring AISI 304</i> variasi diameter dalam	38
Gambar 3.3	Penyetaraan rotameter dengan <i>wet gas meter</i>	40
Gambar 3.4	Grafik penyetaraan laju aliran propana	40
Gambar 3.5	Grafik penyetaraan laju aliran udara	41
Gambar 3.6	Grafik penyetaraan temperatur T1	41
Gambar 3.7	Grafik penyetaraan temperatur T2	42
Gambar 3.8	Skema penelitian menggunakan <i>Infra Red Thermograph</i>	43
Gambar 3.9	Skema pengukuran temperatur nyala menggunakan termokopel	43
Gambar 3.10	Citra pengukuran temperatur ujung <i>burner</i>	44
Gambar 3.11	Citra pengukuran temperatur dan panjang nyala	45
Gambar 3.12	Tampilan data hasil pengukuran dengan <i>Thermograph InfraView</i>	46
Gambar 3.13	Tampilan <i>grid</i>	47
Gambar 3.14	Tampilan aktivasi model pengaruh viskositas	47
Gambar 3.15	Tampilan jenis reaksi yang dipilih	48
Gambar 3.16	Jendela utama aplikasi Aurora	50

Gambar 3.17	Tampilan output dalam bentuk grafik	50
Gambar 4.1	Nyala yang menempel pada <i>ring</i> bagian bawah	56
Gambar 4.2.	Nyala arah radial <i>ring</i>	56
Gambar 4.3	Penurunan konsentrasi bahan bakar	58
Gambar 4.4	Kontur tekanan pada <i>ring</i> $D_i=10$ mm dan $x_r=10$ mm	68
Gambar 4.5	Daerah resirkulasi di atas bluffbody	69
Gambar 4.6	Grafik <i>AFR</i> saat <i>lift-up</i> pada <i>ring stainless steel</i>	69
Gambar 4.7	Grafik <i>AFR</i> saat <i>lift-up</i> untuk <i>ring</i> dari keramik dan <i>stainless steel</i>	70
Gambar 4.8	Rasio equivalens saat <i>lift-up</i>	70
Gambar 4.9	Kontur kecepatan aliran pada simulasi pembakaran <i>premixed</i>	72
Gambar 4.10	Kontur kecepatan aliran pada simulasi aliran dingin	72
Gambar 4.11	Grafik temperatur ujung <i>burner</i>	74
Gambar 4.12	Grafik temperatur ujung <i>burner</i> sebelum dan setelah <i>lift-up</i>	75
Gambar 4.13	Tampilan temperatur maksimum nyala pada kondisi adiabatik	76
Gambar 4.14	Tampilan temperatur nyala pada kondisi terjadi kerugian kalor	76
Gambar 4.15	Temperatur maksimum nyala api	77
Gambar 4.16	Grafik temperatur maksimum nyala api variasi diameter dalam ring	77
Gambar 4.17	Skema bentuk nyala Bunsen	79
Gambar 4.18	Skema model matematis pendekatan kerucut nyala Bunsen	79
Gambar 4.19	Rasio equivalens terhadap jarak <i>lifted</i> dan temperatur ujung <i>burner</i>	81
Gambar 4.20	Laju kehilangan panas pada nyala Bunsen	82
Gambar 4.21	Skema model matematis analisa fenomena <i>lift-up</i>	82
Gambar 4.22	Bilangan Damkohler pada simulasi pembakaran <i>premixed</i>	84
Gambar 4.23	Tampilan hasil simulasi turbulen kinetik reaksi	85
Gambar 4.24	Temperatur maksimum nyala pada <i>ring</i> dari baja	87
Gambar 4.25	Temperatur nyala pada <i>ring</i> keramik	87
Gambar 4.26	Temperatur <i>ring</i> pada <i>ring stainless steel</i>	88
Gambar 4.27	Temperatur <i>ring</i> pada <i>ring</i> keramik	88
Gambar 4.28	Tampilan hasil simulasi temperatur <i>ring</i> setelah <i>lift-up</i>	89
Gambar 4.29	<i>Wake</i> yang terbentuk di atas <i>ring</i> dan di bawah <i>ring</i>	90
Gambar 4.30	Kontur kecepatan pada simulasi pembakaran <i>premixed</i>	90
Gambar 4.31	Kontur kecepatan pada posisi ring 10 mm dan diameter dalam <i>ring</i> 7 mm	91
Gambar 4.32	Kontur kecepatan pada posisi ring 10 mm dan	92

	diameter dalam <i>ring</i> 10 mm	
Gambar 4.33	Kontur kecepatan pada posisi ring 10 mm dan diameter dalam <i>ring</i> 14 mm	92
Gambar 4.34	Kontur kecepatan pada posisi ring 30 mm dan diameter dalam <i>ring</i> 7 mm	93
Gambar 4.35	Kontur kecepatan pada posisi ring 30 mm dan diameter dalam <i>ring</i> 10 mm	93
Gambar 4.36	Kontur kecepatan pada posisi ring 30 mm dan diameter dalam <i>ring</i> 14 mm	94
Gambar 4.37	Kontur temperatur maksimum nyala pada $Di=7$ mm	94
Gambar 4.38	Kontur temperatur maksimum nyala pada $Di=10$ mm	95
Gambar 4.39	Kontur temperatur maksimum nyala pada $Di=14$ mm	95
Gambar 4.40	Kontur k	96
Gambar 4.41	Kontur ϵ	96
Gambar 5.1	Grafik kestabilan nyala gas propana	97
Gambar 5.2	<i>Burning Load</i> saat <i>lift-up</i>	99
Gambar 5.3	Kontur fraksi massa C_3H_8 pada simulasi aliran dingin	100
Gambar 5.4	Grafik <i>AFR</i> saat <i>blow off</i> dan <i>lift-up</i> pada <i>ring</i> $Di=7$ mm	101
Gambar 5.5	Grafik <i>AFR</i> saat <i>blow off</i> dan <i>Lift-up</i> pada <i>ring</i> $Di=10$ mm	102
Gambar 5.6	Grafik <i>AFR</i> saat <i>blow off</i> dan <i>Lift-up</i> pada <i>ring</i> $Di=14$ mm	103
Gambar 5.7	Grafik <i>AFR</i> saat <i>lift-up</i> pada <i>ring</i> diameter dalam 10 mm	104
Gambar 5.8	Daerah kestabilan nyala api <i>lift-up</i> pada <i>ring</i> keramik $Di=10$ mm	105
Gambar 5.9	Tampilan grafik <i>residence time</i> pada $Di=10$ mm dan $x=10$ mm	107
Gambar 5.10	Tampilan grafik <i>residence time</i> pada $Di=10$ mm dan $x=20$ mm	107
Gambar 5.11	Tampilan grafik <i>residence time</i> pada $Di=10$ mm dan $x=30$ mm	108
Gambar 5.12	Tampilan grafik <i>residence time</i> pada $Di=10$ mm dan $x=40$ mm	108
Gambar 6.1	Pengaruh <i>Burning Load</i> pada variasi diameter dalam <i>ring</i>	115
Gambar 6.2	Pengaruh <i>Burning Load</i> pada variasi posisi <i>ring</i>	116
Gambar 6.3	Grafik <i>AFR</i> saat <i>lift-up</i> pada variasi diameter dalam <i>ring</i>	117
Gambar 6.4	Pengaruh posisi <i>ring</i> pada variasi laju aliran bahan bakar	118
Gambar 6.5	Pengaruh diameter dalam <i>ring</i> pada variasi laju aliran bahan bakar	119

Gambar 6.6	Perbandingan grafik panjang nyala <i>ring</i> keramik dan <i>ring stainless steel</i>	121
Gambar 6.7	Perbandingan panjang nyala api <i>ring</i> keramik dan <i>ring stainless steel</i>	121
Gambar 6. 8	Sistem koordinat analisa panjang nyala setelah <i>lift-up</i>	125
Gambar 6. 9	Radius nyala pada variasi fraksi massa oksigen pada gas terbakar	129
Gambar 6. 10	Panjang nyala teoritis dan eksperimental pada $D_i=7\text{mm}$	131
Gambar 6. 11	Panjang nyala teoritis dan eksperimental pada $D_i=10\text{ mm}$	131
Gambar 6. 12	Panjang nyala teoritis dan eksperimental pada $D_i=14\text{ mm}$	132



DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Hasil percobaan tanpa <i>ring</i>	54
Tabel 4.2	Hasil Percobaan dengan <i>ring stainless steel</i> $D_i = 7$ mm	55
Tabel 4.3	Hasil Percobaan dengan <i>ring stainless steel</i> $D_i = 10$ mm	57
Tabel 4.4	Hasil Percobaan dengan <i>ring stainless steel</i> $D_i = 14$ mm	59
Tabel 4.5	Hasil Percobaan dengan <i>ring</i> keramik $D_i = 10$ mm	60
Tabel 4.6a	Hasil perhitungan untuk percobaan tanpa <i>ring</i>	61
Tabel 4.6.b	Hasil pengukuran temperatur tip <i>burner</i>	61
Tabel 4.7	Hasil perhitungan percobaan dengan <i>ring stainless steel</i> $D_i = 7$ mm	64
Tabel 4.8	Hasil perhitungan percobaan dengan <i>ring stainless steel</i> $D_i = 10$ mm	65
Tabel 4.9	Hasil perhitungan percobaan dengan <i>ring stainless steel</i> $D_i = 14$ mm	66
Tabel 4.10	Hasil perhitungan percobaan dengan <i>ring</i> keramik $D_i = 10$ mm	67
Tabel 4.11	Hasil Perhitungan $S_{L,c}$ pada <i>ring</i> AISI 304	86
Tabel 5.1	Hasil Perhitungan daerah kestabilan nyala <i>lift-up</i>	104
Tabel 5.2	Hasil Perhitungan daerah kestabilan nyala <i>lift-up</i> pada <i>ring</i> keramik	106
Tabel 5.3	<i>Blow off residence time</i> dan waktu aliran fisik	109
Tabel 6.1	Hasil perhitungan parameter panjang nyala diameter dalam <i>ring</i> 7 mm	112
Tabel 6.2	Hasil perhitungan parameter panjang nyala diameter dalam <i>ring</i> 10 mm	113
Tabel 6.3	Hasil perhitungan parameter panjang nyala diameter dalam <i>ring</i> 14 mm	114
Tabel 6.4	Hasil perhitungan parameter panjang nyala <i>ring</i> keramik $D_i = 10$ mm	120
Tabel 6.5	Tabel bilangan natural komponen korelasi panjang nyala	124

DAFTAR ISTILAH/SIMBOL

A	Luas penampang	m^2
<i>AFR</i>	<i>Air Fuel Ratio</i>	
BL	<i>Burning Load</i>	W/m^2
C	Konsentrasi molar reaktan atau produk	mol/m^3
Da	Damkohler	
D	Diameter	m
Ea	Energi aktivasi	J/kg
<i>F</i>	Rasio campuran	
<i>FAR</i>	<i>Fuel Air Ratio</i>	
Fr	Bilangan Froude	
H	Tinggi nyala	m
h	Enthalpi	J/kg
HV	<i>Heating Value</i>	J/m^3
k	Konstanta laju reaksi	
K	Bilangan Karlovitz	
Ka	<i>Flame stretch</i>	s^{-1}
K	Konduktivitas thermal	$W/m^2.K$
L	Panjang nyala	m
Le	Bilangan Lewis	
M	Massa molal	
<i>m</i>	Laju massa udara	kg/s
<i>m</i>	Laju massa bahan bakar	kg/s
N	Jumlah mol	
n	Jumlah zat yang bereaksi	
Q	Laju kehilangan kalor	$J/s.m^3$
R	Konstanta gas	
Re	Bilangan Reynolds	
S	Kecepatan pembakaran	m/s
S	Entropi	J/kg.K
T	Temperatur	K
T	Waktu	s
U	Kecepatan campuran	m/s
X	Jarak <i>ring</i> dari ujung burber	m
Y	Fraksi massa	
Ze	Bilangan Z'eldovich	
α	Diffusivitas	m^2/s
ρ	Massa jenis	kg^3/m
ϕ	Rasio Equivalen	
η	Tebal nyala	m
μ	Viskositas	m^2/s^2
ω	Laju pembentukan	kg/s
v	Koefisien stoikiometri	

Subscript

A Udara
Chem. Kimia
B Gas terbakar
b *Backward*
Bf *Back fired*

F *Fuel*
f *Forward*
L Laminer
LO *Lift-off*
Ig *Ignition*
Maks Maksimum
O Oksigen
o,a Oksigen di udara
o,M Oksigen di campuran
U Gas belum terbakar
Res *Resident*
Ref Referensi
St Stoikiometrik
T Turbulen

Superscript

' Reaktan
" Produk
o Kondisi standar

DAFTAR LAMPIRAN

No Lampiran

- 1 Data bahan bakar
- 2 Analisis perhitungan kesalahan dan perambatan kesalahan
- 3 Tabel hasil perhitungan
- 4 Perhitungan $S_{L,c}$
- 5 Perhitungan Bilangan Damkohler
- 6 Tabel perhitungan untuk korelasi panjang nyala
- 7 Tabel perhitungan panjang nyala teoritis



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

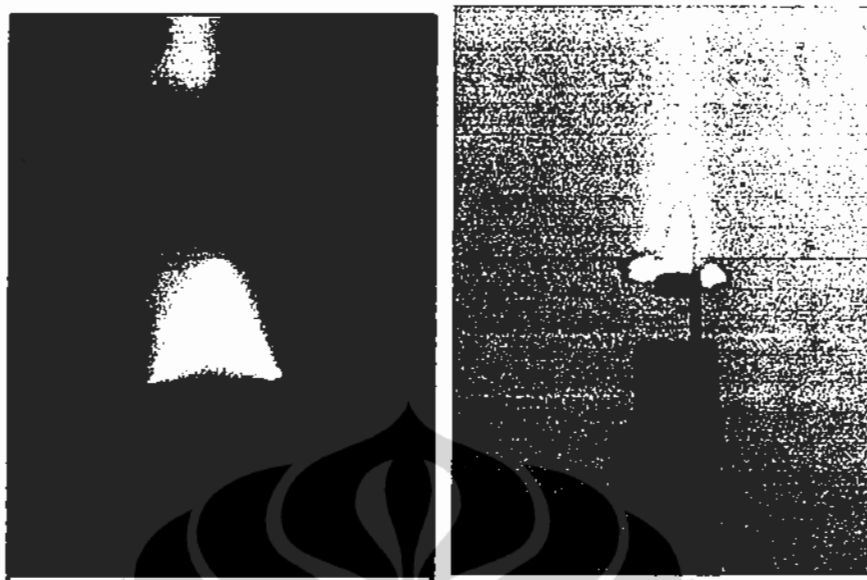
Berbagai langkah untuk memenuhi kebutuhan energi menjadi topik penting seiring dengan semakin berkurangnya sumber energi fosil yang ada. Sistem energi yang ada sekarang sebagian besar masih dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar pada pembangkit listrik tenaga uap, gas serta uap dan gas. Demikian pula halnya dengan sistem transportasi, serta berbagai proses di industri yang membutuhkan sumber panas dari hasil pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar. Kajian tentang pembakaran sangat mempengaruhi penghematan penggunaan bahan bakar yang semakin langka. Kajian eksperimental maupun kajian teoritis tentang pembakaran telah banyak dilakukan untuk lebih memahami fenomena pembakaran [1-5]. Simulasi dengan berbagai macam metode numerik semakin banyak dilakukan didukung kemajuan di bidang teknologi informasi [6-12]. Langkah-langkah tersebut pada dasarnya bertujuan untuk memperoleh metode baru membakar bahan bakar dengan lebih hemat, bersih dan stabil, sehingga pada akhirnya pemenuhan kebutuhan energi yang diperoleh dari proses pembakaran dapat lebih terjamin.

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 *flash back* atau *back fire* dan *lift-off* yang telah banyak diteliti secara teoritis maupun eksperimental. Sedangkan dari aspek *burnernya*, untuk mencapai kestabilan nyala dilakukan penambahan peralatan *burner* seperti benda penghalang (*bluff-body*), penstabil nyala berupa *ring*, *flame holder* maupun pembangkit panas seperti *ignitors* dan *pilot flame* [13-19].

Benda penghalang penstabil nyala atau *bluff body* banyak dipergunakan pada sistem pembakaran untuk propulsi maupun industri. Benda penghalang merupakan alat bantu pembakaran pada *boiler* maupun sistem pembangkit uap serta pada sistem ramjet dan turbojet [14]. Selain itu benda penghalang juga dipergunakan pada kajian dasar dari karakteristik nyala api turbulen serta studi kasus pada simulasi aliran dan telah ditetapkan sebagai salah satu subjek penelitian oleh kelompok peneliti pada *International Workshop on Premixed Flames* [20].

Khusus benda penghalang berbentuk *ring* telah diteliti pengaruhnya terhadap kestabilan nyala. Penelitian tentang *ring* penstabil nyala menemukan bahwa selain meningkatkan kestabilan nyala juga menurunkan kadar emisi NOx [21]. Namun pada penelitian tersebut *ring* dipasang tepat di keluaran *burner* sehingga nyala tetap berpotensi mengganggu ketahanan *burner*. Nyala api yang terletak tepat di ujung *burner* akan menyebabkan adanya kelelahan akibat pemanasan secara langsung karena ujung *burner* menjadi lebih cepat panas dan dapat menyebabkan erosi atau pengotoran atau *fouling*, pada lubang ujung *burner*. 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 [22].

Dengan memasang *ring* pada jarak tertentu nyala dapat berpindah ke *ring* dan menyala stabil di *ring* tersebut. Fenomena ini berbeda dengan *lift-off* dan disebut dengan fenomena nyala api *lift-up* atau *flame lift-up* [23-31]. Fenomena nyala api *lift-up* yang merupakan penelitian dasar ditemukan pada pembakaran *premix* menggunakan *burner* Bunsen serta belum tercatat pada pangkalan data hasil penelitian pada *International Workshop on Premixed Flames*. Nyala pembakaran gas dari *burner* Bunsen dihalangi oleh sebuah *ring* yang dipasang pada ketinggian tertentu dari ujung *burner*. Pada kecepatan aliran udara dan bahan bakar tertentu akan terjadi fenomena *flame lift-up* yakni nyala akan melompat menjauhi ujung *burner* dan menyala stabil di *ring* tidak lagi di mulut *burner* seperti pada Gambar 1.1 [32].



Gambar 1.1. Nyala Api Sebelum dan Setelah *Lift-up*

Sepintas fenomena ini mirip fenomena *lift-off* namun dengan jarak nyala yang lebih jauh dari mulut *burner* dan pada rentang rasio campuran bahan bakar dan udara yang lebih tinggi. Penelitian mengenai fenomena nyala api *lift-up* telah dilakukan secara eksperimental dari aspek diameter dalam *ring*, ketebalan *ring*, sudut *ring*, posisi *ring* dan material *ring*. Namun kajian eksperimental yang dilakukan masih terfokus pada masing-masing parameter yang diteliti serta belum dapat mengungkapkan secara jelas mekanisme terjadinya *lift-up*.

1.2 Masalah Penelitian

Sebagai fenomena yang belum tereksplorasi secara lengkap apabila fenomena ini akan diterapkan pada perancangan *burner* maka dibutuhkan pemahaman nyala api *lift-up* secara menyeluruh terutama tentang faktor-faktor yang mempengaruhi nyala yang sebelumnya berada di ujung *burner* kemudian terlihat melompat ke *ring*. Daerah antara ujung *burner* dan *ring* menjadi penting untuk dianalisis apakah merupakan aliran panas dari campuran udara dan bahan bakar ataukah sudah berupa nyala api yang tidak terlihat. Pada nyala terangkat atau *lifted flame* pembakaran non *premixed*, daerah ini merupakan daerah dingin dari aliran bahan bakar [33].

Dengan tujuan untuk mengatasi temperatur tinggi pada ujung nosel pada *burner* maka perubahan temperatur ujung *burner* antara sebelum dan setelah

flame lift-up serta temperatur maksimum dari nyala api juga harus diketahui untuk kelayakan penerapan fenomena ini pada rancangan *burner*. Sedangkan dari aspek ketahanan material *ring* maka temperatur *ring* juga perlu diketahui.

Nyala terangkat telah diketahui memiliki ketidakstabilan yang tinggi. Selain itu fenomena *flame lift-up* terjadi pada kondisi fraksi massa bahan bakar yang rendah. Fenomena *flame lift-up* juga merupakan nyala yang terangkat dari ujung *burner* namun dengan *ring* sebagai penahannya. Penggunaan *ring* baik posisi *ring* dari ujung *burner* maupun jenis material diteliti pengaruhnya terhadap kestabilan nyalanya.

Pemahaman tentang panjang nyala api setelah *lift-up* juga diperlukan jika fenomena ini akan diterapkan pada *burner* untuk penyesuaian penggunaan *burner* dengan ukuran ruang bakar. Seberapa besar pengaruh diameter dalam *ring*, posisi *ring* dan temperatur *ring* dikaji korelasinya terhadap panjang nyala yang menurut Nils A. Rokke [34] dipengaruhi oleh fraksi massa bahan bakar dan bilangan Froude. Kajian tentang permasalahan-permasalahan tersebut dilakukan tidak hanya secara ekperimental dan simulasi namun perlu dilengkapi dengan analisis teoritisnya.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan umum dari penelitian ini berfokus pada kajian fenomena *flame lift-up* pada pembakaran gas propana. Tujuan khususnya adalah:

1. Memaparkan fenomena *flame lift-up* secara deskriptif berdasarkan hasil eksperimen dan simulasi berbasis *Computational Fluid Dynamic (CFD)* serta meneliti secara teoritis faktor-faktor yang menyebabkan melompatnya nyala api dari ujung *burner* ke *ring*
2. Menentukan daerah kestabilan nyala api setelah *lift-up* berdasarkan diagram Fuidge serta melakukan kajian untuk menentukan kriteria *blow off* dan *local extinction* pada fenomena *flame lift-up*.
3. Menganalisis parameter yang mempengaruhi panjang nyala setelah *lift-up* dan menentukan korelasi panjang nyala api setelah *lift-up* berdasarkan korelasi panjang nyala api premix dari Rokke [34] serta melakukan kajian

teoritis untuk memperoleh persamaan matematis panjang nyala api setelah *lift-up*.

1.4 Batasan Penelitian

Kajian teoritis mengenai penyebab melompatnya nyala dari ujung *burner* ke *ring* dilakukan dengan pendekatan teori Spalding untuk nyala dengan terjadinya kehilangan kalor [35]. Laju kehilangan kalor diperhitungkan sesaat setelah *lift-up* dengan pendekatan nyala pada *burner* Bunsen berbentuk kerucut dan kondisi aliran campuran udara dan propana yang tunak. Hal ini dicapai dengan menjaga tekanan pada tabung propana adalah tetap serta pencatatan pengukuran laju aliran udara dan propana dilakukan pada posisi katup bukaan yang tetap.

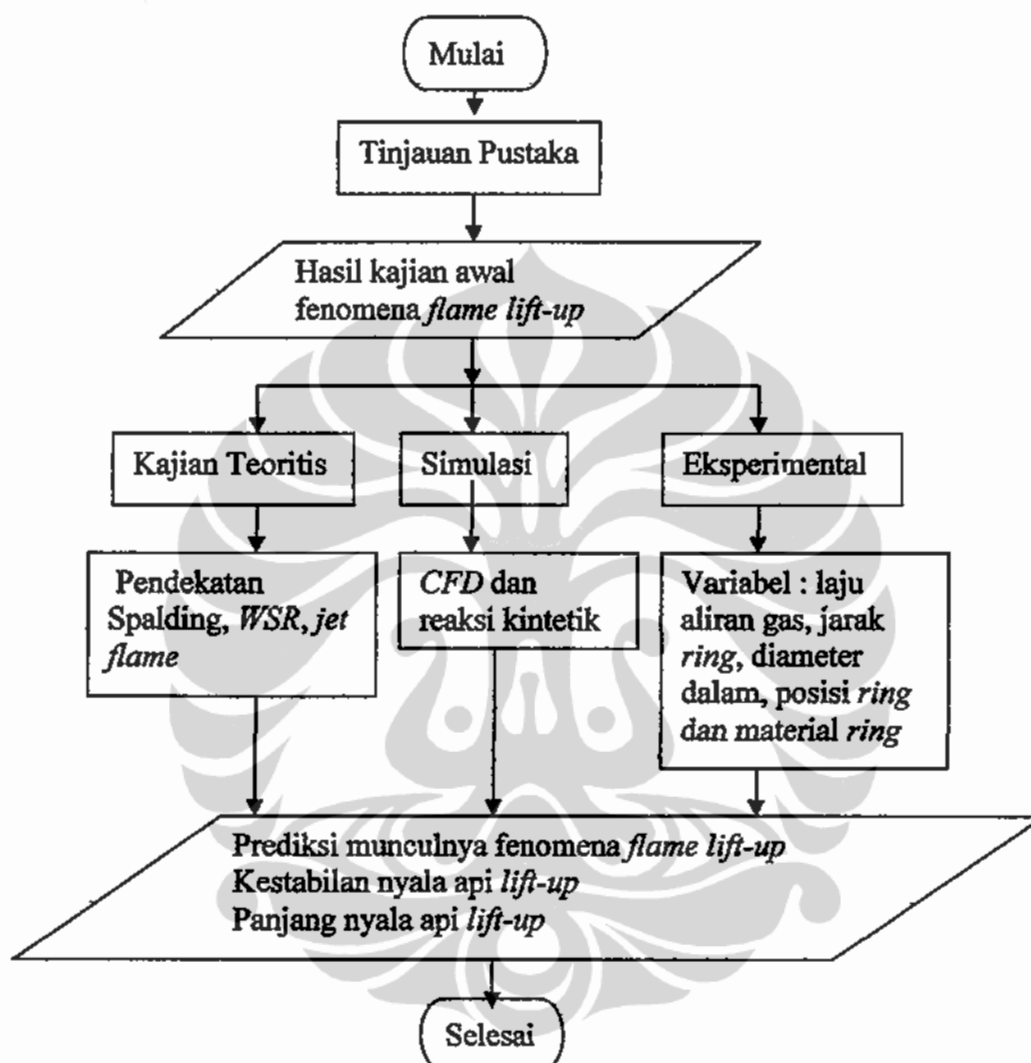
Kerugian energi aliran udara dan propana dari posisi pengukuran ke ujung *burner* diabaikan dan diasumsikan kecepatan campuran udara dan propana adalah tetap. Data kecepatan campuran udara dan propana yang dipergunakan sebagai data masukan saat simulasi dengan *CFD* adalah data kecepatan berdasarkan hasil pengukuran tersebut. Hal ini dijaga pada eksperimen dengan menggunakan selang yang bersih dan tidak terlalu panjang serta posisi selang yang horisontal agar kerugian tekanannya rendah.

Persamaan reaksi kinetik yang digunakan sebagai masukan pada simulasi *CFD* dan pada kajian teoritis panjang nyala setelah *lift-up* adalah reaksi kinetik satu langkah. Sedangkan untuk penentuan *residence time* menggunakan perangkat lunak berbasis reaksi kinetik dipergunakan San Diego Mechanism [36]. Kajian teoritis *blow off* dilakukan berdasarkan pendekatan model *Well Stirred Reactor (WSR)* yang dapat diterapkan pada daerah setelah *bluff body* atau pada daerah resirkulasi [14].

1.5 Metode Penelitian

Penelitian fenomena *flame lift-up* dilaksanakan secara teoritis dan eksperimental. Eksperimen dilakukan di Laboratorium Termodinamika *Flame Combustion Research Group*, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang didahului dengan kajian pustaka tentang berbagai jenis fenomena pembakaran. Sebelum dipergunakan, gas propana diuji komposisi

serta sifat-sifatnya seperti nilai kalor, viskositas dan massa jenisnya. Diagram alir langkah penelitian keseluruhan dari disertasi ini digambarkan sesuai Gambar 1.2.



Gambar 1.2. Diagram Alir Penelitian Fenomena *Flame lift-up*

Kajian teoritis dilakukan untuk menentukan faktor yang mempengaruhi terjadinya fenomena *flame lift-up*, korelasi *blow off* nyala api *lift-up* dan panjang nyala api *lift-up*. Simulasi pembakaran menggunakan perangkat lunak berbasis CFD dilakukan untuk mendukung kajian teoritis dalam menentukan dinamika medan aliran yang tidak diukur secara eksperimental serta distribusi temperatur untuk dibandingkan dengan hasil pengukuran. Sedangkan simulasi menggunakan perangkat lunak reaksi kinetik adalah untuk menentukan *residence time* pada penentuan korelasi *blow off*. Eksperimental dilakukan dengan pengukuran laju

aliran udara dan laju aliran bahan bakar, pengukuran temperatur ujung *burner* sebelum dan setelah *lift-up* serta pengukuran temperatur *ring* menggunakan termokopel dan *Infra Red Thermograph*. Sedangkan pengukuran temperatur maksimum dari nyala dilakukan dengan *Thermograph Infra View*. Hasil eksperimen ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik. Beberapa parameter yang sama dibandingkan hasil eksperimental dan hasil teoritisnya atau hasil simulasinya.

Kestabilan nyala diteliti dengan mengacu pada diagram Fuidge. Untuk itu dibutuhkan perhitungan *AFR* dan *Burning load*. Panjang nyala diukur secara visual, dibandingkan dengan hasil pemotretan serta hasil analisis citra menggunakan perangkat lunak pengolah citra. Dari berbagai faktor yang mempengaruhi tinggi nyala diturunkan suatu persamaan empiris mengacu pada persamaan tinggi nyala dari Nils A. Rokke [34] dengan analisa regresi linier variabel jamak yakni dengan menambahkan pengaruh diameter *ring* dan temperatur *ring* dan temperatur ujung *burner*. Langkah rinci dari metode penelitian ditampilkan pada Bab 3.

1.6. Sistematika Penulisan

Disertasi ini tersusun atas 7 bab. Bab 1 memaparkan pendahuluan yang memuat latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan. Bab 2 memuat tinjauan pustaka secara umum yang berkaitan dengan fenomena pembakaran yang fundamental serta hasil-hasil riset terkini di bidang pembakaran yang berhubungan dengan fenomena *flame lift-up*. Sedangkan Bab 3 menjelaskan metode penelitian meliputi peralatan dan langkah-langkah eksperimental, simulasi dan analisis teoritis. Adapun isi disertasi dijabarkan dalam 3 bab yakni Bab 4 tentang keseluruhan hasil eksperimental dan analisis teoritis faktor-faktor penyebab melompatnya nyala dari ujung *burner* ke *ring*. Sedangkan Bab 5 membahas tentang kestabilan nyala *flame lift-up* dan kajian teoritis *blow off* nyala api *lift-up* serta Bab 6 tentang korelasi dan kajian teoritis panjang nyala setelah *lift-up*. Bab 7 merupakan bab penutup yang memuat kesimpulan dari Bab 4 sampai dengan Bab 6.

BAB 2

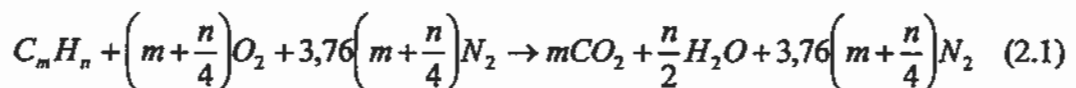
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembakaran

Pembakaran dapat didefinisikan sebagai proses/reaksi oksidasi yang sangat cepat antara bahan bakar (*fuel*) dan oksidator dengan menimbulkan nyala dan panas. Bahan bakar merupakan segala substansi yang melepaskan panas ketika dioksidasi dan secara umum mengandung unsur-unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Sementara oksidator adalah segala substansi yang mengandung oksigen (misalnya udara) yang akan bereaksi dengan bahan bakar.

Fenomena-fenomena yang terjadi pada pembakaran antara lain interaksi proses-proses kimia dan fisika, pelepasan panas yang berasal dari energi ikatan-ikatan kimia, proses perpindahan panas, proses perpindahan massa, dan gerakan fluida. Sehingga kajian pembakaran membutuhkan saling keterkaitan antara ilmu dasar dan turunannya yakni Termodinamika, Mekanika Fluida, Perpindahan Kalor dan Massa, Material, Statistika dan Probabilitas [35].

Pembakaran menghasilkan panas sehingga disebut sebagai proses oksidasi eksotermis. Jika oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran diperoleh dari udara kering, di mana udara kering terdiri dari 21% oksigen dan 78% nitrogen, maka reaksi stoikiometrik pembakaran hidrokarbon murni C_mH_n dapat ditulis dengan persamaan [37] :



Persamaan ini telah disederhanakan karena cukup sulit untuk memastikan proses pembakaran yang sempurna dengan rasio ekivalen yang tepat dari udara. Jika terjadi pembakaran tidak sempurna, maka hasil persamaan di atas CO_2 dan H_2O tidak akan terjadi, akan tetapi terbentuk hasil oksidasi parsial berupa CO , CO_2 , dan H_2O . Juga sering terbentuk hidrokarbon tak jenuh, formaldehida dan kadang-kadang terdapat juga karbon.

Pada temperatur yang sangat tinggi gas-gas pecah atau terdisosiasi menjadi gas-gas yang tak sederhana, dan molekul-molekul dari gas dasar akan terpecah menjadi atom-atom yang membutuhkan panas dan menyebabkan kenaikan temperatur. Reaksi akan bersifat endotermik dan disosiasi tergantung pada temperatur dan waktu kontak.

2.2 Klasifikasi Nyala

Nyala api sebagai hasil pembakaran dapat diklasifikasikan berdasarkan aspek yang berbeda. Berdasarkan kondisi oksidator dan bahan bakar mencapai daerah reaksi nyala maka nyala dapat diklasifikasikan menjadi nyala *non premix*, *partially premix* dan *fully premix*. Berdasarkan kondisi daerah reaksi, nyala dapat diklasifikasikan menjadi *well stirred reactor* (WSR) dan *plug flow reactor*. Sedangkan berdasarkan karakteristik aliran reaktan yang masuk, dapat diklasifikasikan menjadi nyala laminer dan nyala turbulen

Dalam suatu pembakaran premix perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting dalam menentukan hasil proses pembakaran.

Rasio campuran bahan bakar dan udara dapat dinyatakan dalam beberapa parameter yang lazim antara lain *AFR* (*Air Fuel Ratio*), *FAR* (*Fuel Air Ratio*), dan Rasio Ekuivalen (ϕ).

2.2.1 Rasio Udara-Bahan Bakar (*Air Fuel Ratio/AFR*)

Rasio ini merupakan parameter yang paling sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau. Secara simbolis, *AFR* dihitung sebagai [37]:

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} = \frac{M_a N_a}{M_f N_f} \quad (2.2)$$

Dengan \dot{m}_a adalah laju massa udara (kg/dt), \dot{m}_f = laju massa bahan bakar, (kg/s), M_a adalah massa molar udara, N_a adalah jumlah mol udara, M_f adalah massa molar bahan bakar, N_f adalah jumlah mol bahan bakar.

Jika nilai aktual lebih besar dari nilai AFR , maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan sistem dalam proses pembakaran dan dikatakan miskin bahan bakar dan jika nilai aktual lebih kecil dari AFR stoikiometrik maka tidak cukup terdapat udara pada sistem dan dikatakan kaya bahan bakar.

2.2.2 Rasio Bahan Bakar-Udara (*Fuel Air Ratio/FAR*)

Rasio bahan bakar-udara merupakan kebalikan dari AFR yang dirumuskan sebagai berikut [37]:

$$FAR = \frac{m_f}{m_a} = \frac{M_f N_f}{M_a N_a} \quad (2.3)$$

AFR dan FAR dapat juga dinyatakan dalam perbandingan volume. Untuk bahan bakar gas perbandingan volume lebih sering dipergunakan karena sebanding dengan perbandingan jumlah mol.

2.2.3 Rasio Ekuivalen (*Equivalent Ratio, ϕ*)

Rasio ini termasuk juga rasio yang umum digunakan. Rasio ekuivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual atau juga sebagai perbandingan antara rasio bahan bakar-udara (FAR) aktual dengan rasio bahan bakar-udara (FAR) stoikiometrik.

$$\phi = \frac{AFR_s}{AFR_a} = \frac{FAR_a}{FAR_s} \quad (2.4)$$

- $\phi > 1$ terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*)
- $\phi < 1$ campurannya disebut sebagai campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*)
- $\phi = 1$ merupakan campuran stoikiometrik

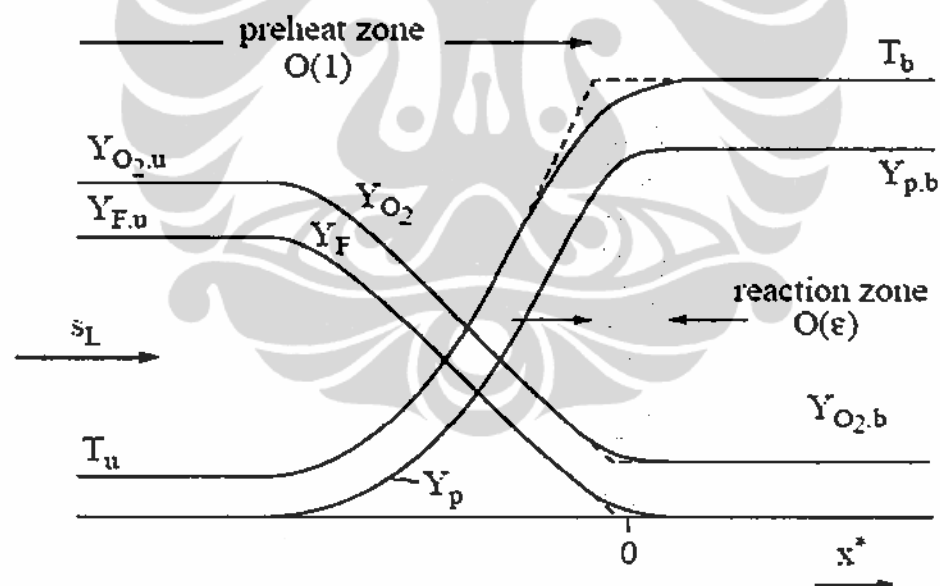
2.2.4 Rasio Campuran (*Mixture Ratio, f*)

Rasio campuran adalah perbandingan antara fraksi massa bahan bakar yang terbakar dengan fraksi massa bahan bakar awal. Rasio campuran berbeda

dengan fraksi massa bahan bakar maupun rasio bahan bakar dan udara. Istilah ini mulai dipergunakan seiring dengan perkembangan penyelesaian masalah pembakaran dengan metode numerik. Rasio campuran memudahkan penyelesaian persamaan differensial maupun integral dari sisi kondisi batas yakni pada daerah bahan bakar maka fraksi massa oksigen adalah 0 sebaliknya fraksi bahan bakar pada kondisi masukan adalah 1.

2.3 Struktur Nyala Api Laminer

Dengan pendekatan satu langkah reaksi, campuran kurus dan nyala api diasumsikan datar, tunak dan arahnya tegak lurus terhadap sumbu x dengan $x \rightarrow -\infty$ adalah gas yang belum terbakar dan $x \rightarrow +\infty$ adalah gas yang terbakar maka struktur nyala dapat disketsa seperti pada Gambar 2.1 [38].



Gambar 2.1. Struktur Nyala Api dengan Satu Langkah Asimtotik [38].

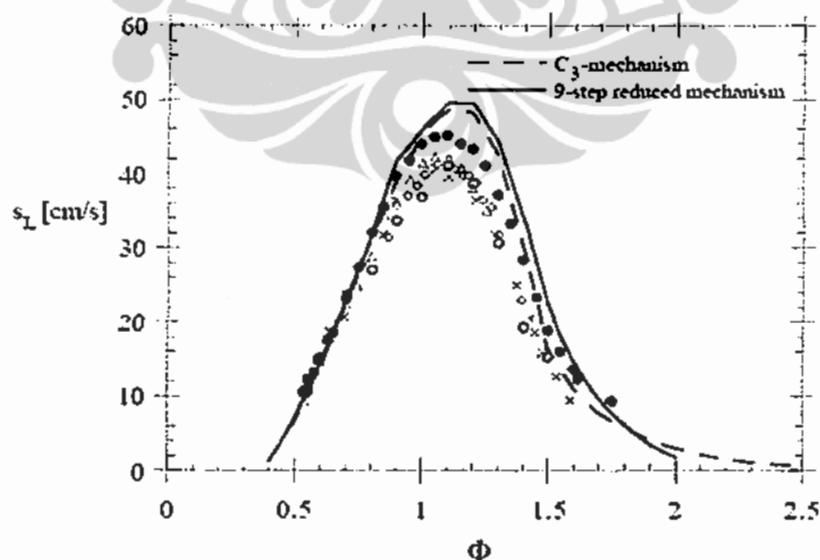
Pada $x \rightarrow -\infty$ fraksi massa bahan bakar dan oksidator dengan kecepatan pembakaran s_L dari daerah *pre heat zone* berdifusi ke daerah reaksi. Reaksi kimia mulai menghasilkan produk P dan fraksi massa bahan bakar mulai berkurang demikian pula dengan fraksi massa oksidator. Temperatur mengalami kenaikan dan mencapai puncaknya setelah keluar dari daerah reaksi. Keluar dari daerah reaksi fraksi bahan bakar menjadi nol, sedangkan fraksi oksidator menjadi $Y_{O_2,b}$.

Thermal flame theory dari Zel'dovich dan Frank-Kamenetzki pada Kuo [35] merupakan salah satu contoh klasik dari konsep asimptotik satu langkah reaksi dan mendefinisikan Bilangan Zel'dovich sebagai kebalikan dari energi aktivasi tanpa dimensi yakni [38]:

$$Ze = \frac{Ea(T_b - T_\infty)}{RT_b^2} \quad (2.5)$$

Sedangkan parameter fundamental dari nyala *premixed* yakni kecepatan pembakaran, dapat ditentukan dari persamaan kekekalan massa, species dan temperatur diselesaikan secara numerik dengan memasukkan kondisi batas untuk fraksi massa dan temperatur, gradient kondisi batas disamakan dengan nol.

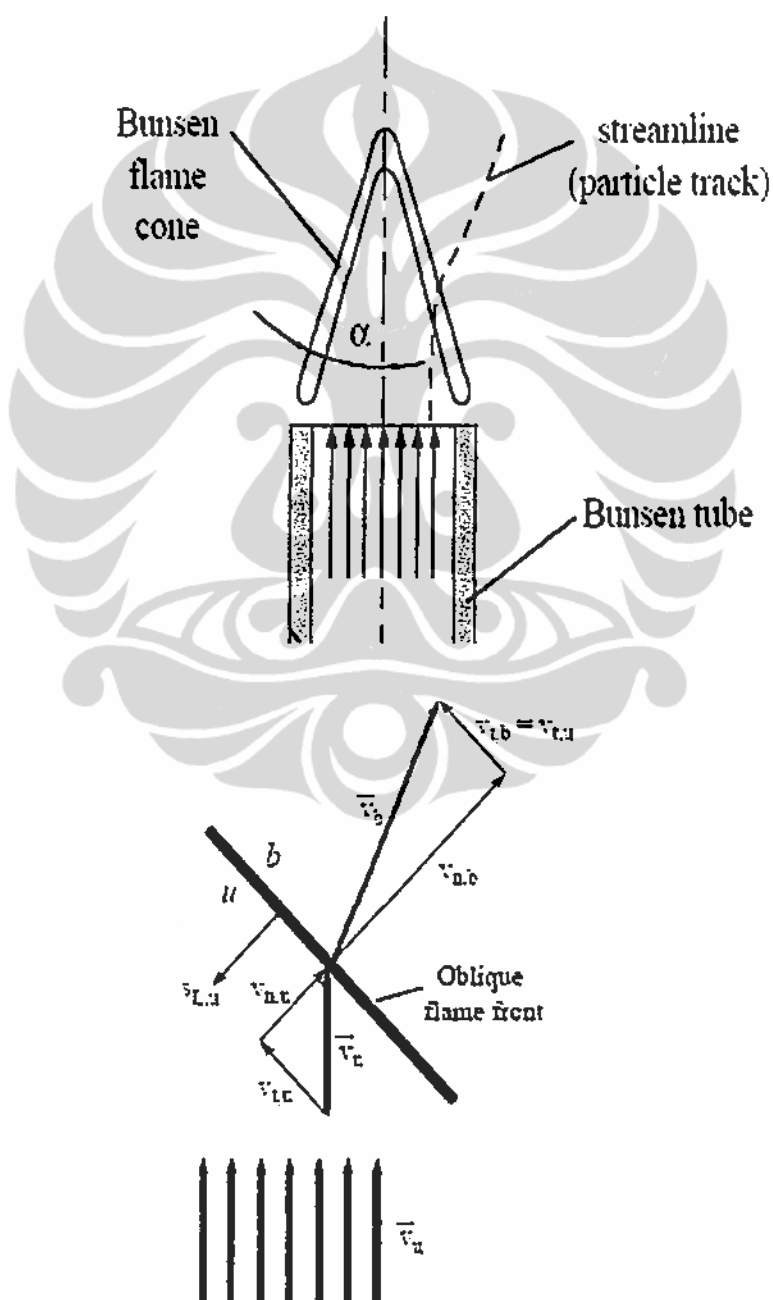
Kecepatan pembakaran didefinisikan sebagai kecepatan lokal dari campuran reaktan tegak lurus terhadap daerah reaksi, searah dengan laju gas ke daerah reaksi. Kecepatan pembakaran sangat dipengaruhi oleh temperatur nyala api. Pada kondisi adiabatik, variasi kecepatan nyala pada berbagai nilai rasio ekuivalens hanya dipengaruhi oleh temperatur nyala adiabatik. Salah satu contoh hasil penentuan kecepatan pembakaran propana-udara ditampilkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Kecepatan Pembakaran vs Rasio Ekuivalen [38].

Nilai kecepatan pembakaran laminar mencapai maksimum pada rasio ekuivalen sedikit lebih besar dari 1. Kecenderungan kurva ini mirip seperti distribusi temperatur nyala maksimum [35]

Sedangkan pada pembakaran menggunakan *burner* Bunsen konsep dasar tentang kecepatan nyala laminar dapat digambarkan pada nyala kerucut Bunsen seperti sketsa pada Gambar 2.3. Kecepatan pembakaran laminar adalah kecepatan permukaan nyala api yang tegak lurus terhadap permukaan nyala ke arah campuran yang belum terbakar. Pada kondisi tunak maka kecepatan pembakaran laminar akan sama dengan kecepatan campuran tegak lurus terhadap permukaan nyala.



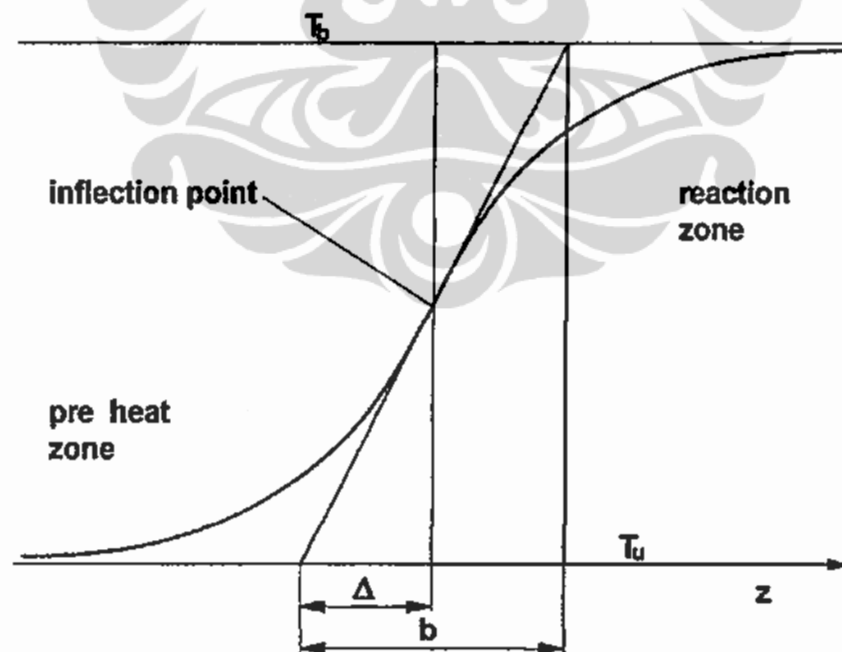
Gambar 2.3. Sketsa Vektor Kecepatan Pembakaran Laminar [38].

Kecepatan pembakaran laminar dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.6 [35,38]

$$S_{L,u} = v_u \sin \alpha = U \sin \alpha \quad (2.6)$$

Selain kecepatan pembakaran, tebal nyala juga merupakan parameter yang penting pada nyala *premixed* laminar. Tebal nyala dipergunakan untuk memprediksi karakteristik waktu reaksi kimia pada penentuan bilangan Karlovitz. Namun masih ditemukan ketidakseragaman tentang definisi dan rumus tebal nyala untuk penentuan Bilangan Karlovitz. *Preheat zone thickness*, *reaction zone thickness* atau *thermal flame thickness* dan *characteristic thickness* adalah beberapa istilah yang sering dipergunakan. *Characteristic thickness* seperti yang diperkenalkan oleh Zel'dovich diilustrasikan pada Gambar 2.4. dan dihitung dengan Persamaan 2.7 [39]

$$\eta = \frac{k}{c_p \rho S_L} \quad (2.7)$$



Gambar 2.4. Ilustrasi *Charateristic Thickness* [40]

Ketidakteragaman dalam penentuan *characteristic thickness* sendiri juga ditemukan dengan rumus yang berbeda. Berdasarkan difusivitas panas dari campuran belum terbakar seperti pada Persamaan 2.7 beberapa penelitian

menghasilkan nilai *characteristic thickness* yang relatif kecil [40-42], sedangkan pada penelitian yang lain berdasarkan temperatur menghasilkan nilai *characteristic thickness* yang lebih besar [43,44].

Istilah *thermal flame thickness* dengan rumus yang didasarkan dari *gradient* temperatur maksimum seperti pada Persamaan 2.8. cenderung lebih banyak digunakan [40,45]

$$\eta = \frac{T_b - T_u}{(dT/dx)_{maks}} \quad (2.8)$$

2.4 Data Base Nyala Api Premix Turbulen

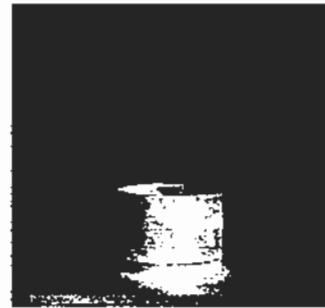
Sebuah kelompok riset dalam bidang nyala api *premix* yakni *International Working Group on Premixed Flame* telah membuat pangkalan data atau *data base* tentang nyala api *premix* yang diklasifikasikan menjadi nyala api stasioner dengan *shear turbulence*, nyala api stasioner dengan *isotropic turbulence* dan nyala api tidak stasioner [20].

Pada Gambar 2.5 ditampilkan kategori nyala api stasioner dengan *isotropic turbulence* yang ditandai dengan distribusi kecepatan rata-rata dan rms yang datar melewati mulut *burner* serta campuran hampir homogen dan kurus. Intensitas turbulensi dikendalikan plat atau *grid*. Yang termasuk dalam katagori ini adalah *Oblique Flame*, *Envelope Flame*, dan *Unattached Flame*. *Oblique Flame* terbagi menjadi 2 yakni *Plane-Symmetric Oblique Flame* dan *Axi-symmetric Oblique Flame*. *Envelope Flame* terbagi menjadi 2 katagori juga yakni *Plane-Symmetric Envelope Flame* dan *Axi-symmetric Envelope Flame*. *Unattached Flame* terbagi menjadi 2 katagori *Unattached flames in impinging flows* dan *Unattached flames in swirl-generated diverging flows*. Keseluruhan katagori nyala api stasioner dengan *isotropic turbulence* sesuai dengan notasi pada Gambar 2.5 adalah sebagai berikut:

- a. *Plane-Symmetric Oblique Flame* adalah nyala berbentuk V yang distabilkan oleh kawat kecil.



**a. Plane-Symmetric
Oblique Flame**



**b. Axi-symmetric
Oblique Flame**



**c. Plane-Symmetric
Envelope Flame**



**d. Axi-symmetric
Envelope Flame**



**e. Unattached flames in
impinging flows**



**f. Unattached flames in
swirl-generated
diverging Flow**

Gambar 2.5. Nyala Api Stasioner Isotropis Turbulen [20]

- b. *Axi-symmetric Oblique Flame* adalah nyala berbentuk kerucut terbalik akibat adanya benda penghalang yang sangat kecil ditempatkan tepat di ujung *burner* dan ditengah-tengah penampang *burner*.
- c. *Plane-Symmetric Envelope Flame* terbentuk dari *burner* persegi panjang atau slot *burner* dengan lebar yang terbatas untuk menjaga bentuk nyala.
- d. *Axi-symmetric Envelope Flame* lebih dikenal dengan nyala Bunsen turbulen dengan kondisi pembakaran yang miskin bahan bakar.
- e. *Unattached flames in impinging flow* adalah nyala yang terbentuk dari aliran divergen pada perambatan pembakaran premix dan ditahan oleh sebuah plat diam (*stagnation plate*) sehingga nyala tertahan pada jarak tertentu dari plat.
- f. *Unattached flames in swirl-generated diverging flows* adalah nyala yang terbentuk dari aliran divergen yang dihasilkan oleh olakan rendah (*low swirl*) aliran turbulen pada daerah tepi. Pada daerah tengah-tengah tidak terjadi olakan.

Pada Gambar 2.6 ditampilkan kategori nyala api stasioner dengan *shear turbulence* yang ditandai dengan distribusi aliran yang tidak seragam, gradient kecepatan yang besar dan terdapat puncak rms.



a. Piloted jet flame

b. Flame Stabilized by a large bluff body

c. High-swirl flame generated by a vane swirler

Gambar 2.6. Nyala Api Stasioner dengan *Shear Turbulen* [20]

Non-isotropic turbulence timbul karena tegangan geser. Yang termasuk pada katagori ini adalah *Piloted Jet Flame*, *Flame Stabilized by a large bluff body* dan *High-swirl Flame generated by a vane-swirler*.

- a. *Piloted Jet Flame* adalah nyala sangat panjang dan lurus yang terbentuk dari aliran campuran udara dan bahan bakar yang menyerupai aliran *fully developed* pada pipa. Nyala dibatasi oleh lapisan pencampuran (*mixing layer*) dan distabilkan oleh *pilot flame* akibat kecepatan aliran yang sangat tinggi pada ujung *burner*.
- b. *Flame Stabilized by a large bluff body* adalah nyala yang terbentuk dari penggunaan benda penghalang yang luas penampangnya lebih besar dari luas penampang *burner*. Ukuran dan bentuk aerodinamis dari benda penghalang serta laju kehilangan kalor ke benda penghalang menjadi parameter penting yang mempengaruhi sifat nyalanya.
- c. *High-swirl Flame generated by a vane-swirler* adalah nyala yang terbentuk dari olakan tinggi (*high swirl*) aliran yang ditimbulkan oleh sudu-sudu pada tengah-tengah *burner*. Nyala timbul pada daerah diluar *wake*.

2.5 Teori dan Pemodelan Pembakaran

2.5.1 Pembakaran Laminer

Kajian teoritis tentang pembakaran telah berkembang lama diawali oleh teori detonasi oleh Chapman Jouguet, teori nyala difusi oleh Burke-Schuman, teori pembakaran spontan atau energi aktivasi asimptotik oleh Frank-Kamenetskii, teori deflagrasi oleh Zeldovich serta pendekatan asimptotik menggunakan Bilangan Peclet oleh Darrieus-Landau. Sebagian besar kajian matematikanya merupakan penerapan konsep asimptotik yang membutuhkan parameter yang besar dan koordinat ruang sebagai dasarnya [46].

Kajian teoritis meskipun dengan pendekatan yang sederhana terbukti lebih memperjelas pemahaman fisik dari pembakaran. Namun demikian penyesuaian model matematis menjadi penting saat terjadi perbedaan dengan hasil eksperimental atau penyelesaian numerik. Perkembangan komputasi numerik juga terjadi pada kajian pembakaran seiring dengan perkembangan teknologi

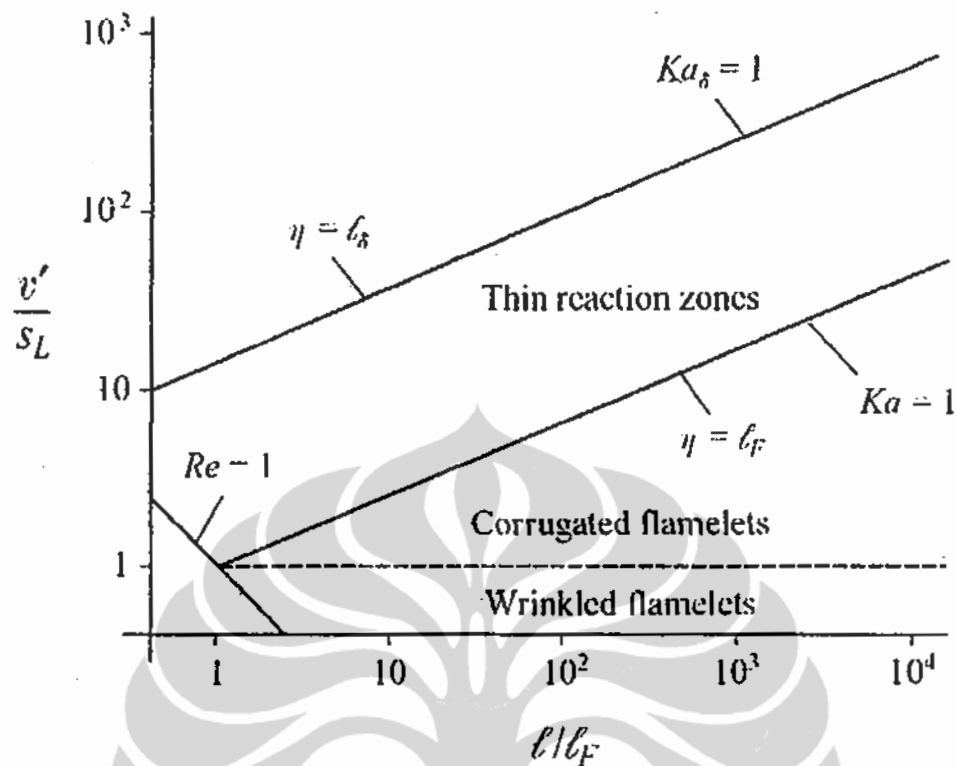
informasi. Hal ini tidak berarti penyelesaian numerik menyelesaikan kesulitan pemahaman tentang pembakaran karena penyelesaian numerik masih relatif lebih sederhana jika dibandingkan dengan penyelesaian mekanisme reaksi.

Pembakaran mungkin merupakan fenomena klasik paling rumit yang baru sedikit dapat diungkapkan secara teoritis. Mekanisme reaksi yang banyak, yang berbeda untuk tiap jenis bahan bakar, perambatan nyala, aliran multidimensi yang tunak atau transient, yang kompresibel dan inkompresibel, laminar atau turbulen, viskos atau non viskos, kerugian kalor, mempengaruhi struktur nyala sekaligus kajian teoritisnya. Analisis non-linier (*weakly non-linear theory*) melahirkan teori percabangan (*bifurcation theory*) yakni penggunaan persamaan eksplisit pada permukaan nyala seperti kelengkungan nyala (*curvature*), peregangan (*stretch*), vortisitas [47-48].

2.5.2 Pembakaran Turbulen

Pemodelan pembakaran turbulen diawali oleh Damkohler pada tahun 1940 mengenai pengaruh intensitas turbulensi pada struktur nyala. Kemudian Schelkin, pada tahun 1943 menyatakan pengaruh waktu terhadap kecepatan pembakaran turbulen dan dilanjutkan oleh Karlovitz, Summerfield dan Kovaszny [35]. Dengan mengacu pada metode pembakaran laminar pada tahun 1982 ditemukan analisa asimptotik skala jamak (*multiple-scale asymptotic analyses*) yang digunakan untuk memprediksi kecepatan pembakaran laminar. Pada pembakaran premix, pendekatan asimptotik ini membagi daerah pembakaran turbulen sesuai diagram pada Gambar 2.7.

Metode pemodelan untuk pembakaran premix turbulen sebagian besar berdasarkan pada pendekatan Persamaan G (*G-equation*) antara lain: Reynold Average Navier-Stokes Simulation (RANS), *Direct Numerical Simulation* (DNS) dan *Large Eddy Simulation* (LES). Metode pemodelan yang berdasarkan konsep probabilitas adalah metode PDF atau *Probability Density Function* yang memisahkan antara model kimiawi dengan pencampuran molekuler. Sedangkan untuk pembakaran non *premixed* diperkenalkan konsep *flamelet* dan *mixture fraction based model* [49].



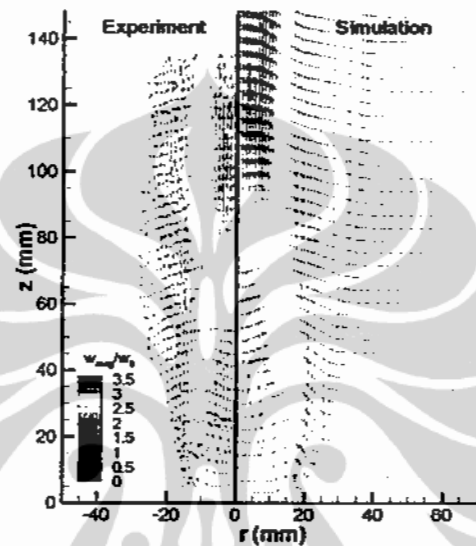
Gambar 2.7. Daerah Pembagian Nyala Turbulen [49]

Penelitian terbaru yang dipublikasi di jurnal internasional tentang nyala *premix* adalah analisa permukaan normal dan kelengkungan nyala turbulen dengan metode *cross-plane tomography* [1]. Tiga jenis nyala turbulen dengan variasi Bilangan Markstein telah diteliti. Dua faktor utama yang menyebabkan distribusi kelengkungan nyala tidak simetris adalah ketidakstabilan difusivitas termal dan terbentuknya ceruk nyala.

Pendekatan berbasis model *flamelet* juga dilakukan oleh peneliti dari Amerika yakni pada perbandingan nyala *premix* campuran metana dan udara. Metode simulasinya adalah *Direct Numerical Simulation* sedangkan perhitungan model *flameletnya* adalah metode perhitungan regangan nyala laminar. Fokus penelitiannya adalah kajian penerapan metode perhitungan regangan nyala laminar pada nyala turbulen di daerah reaksi. Parameter yang dikaji adalah pergeseran kecepatan dan kecepatan konsumsi bahan bakar. Pada bilangan Damkohler yang tinggi diperoleh kesesuaian pergeseran kecepatan antara hasil simulasi dan perhitungan. Namun pada bilangan Damkohler yang rendah terjadi penurunan respon dari regangan. Pada kecepatan konsumsi bahan bakar terdapat

ketidaksesuaian yang besar disebabkan oleh berbagai macam faktor dan juga gangguan karena fluktuasi regangan [50].

Sedangkan pada aspek nyala premix turbulen telah dilakukan simulasi dan eksperimen dari dinamika nyala *flickers* [51]. Perbandingan kecepatan campuran ditampilkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Perbandingan Kecepatan Antara Simulasi dan Eksperimen pada Nyala *Flicker* [51]

Dari aspek *flame stretch* penentuan bilangan Karlovitz 1-D, bilangan Karlovitz lokal dan *stretch rate* dari regangan nyala premix saat akan padam atau *extinction* telah diteliti oleh S.H. Chung et al [52]. Bilangan Karlovitz dinyatakan sebagai perbandingan dua waktu yakni waktu reaksi kimia dan waktu aliran fisik. Waktu reaksi kimia merupakan fungsi dari tebal nyala dibagi kecepatan nyala. Sedangkan waktu aliran fisik sama dengan kebalikan dari *flame stretch*. Berdasarkan definisi ini Bilangan Karlovitz merupakan kebalikan dari Bilangan Damkohler. Bilangan Karlovitz pada penelitian ini dinyatakan dengan Persamaan 2.9 [52]:

$$K = \frac{\eta}{S_L} Ka \quad (2.9)$$

Tebal nyala dihitung berdasarkan persamaan Zheldovich seperti pada Persamaan 2.7 sedangkan persamaan difusivitas termal atau α adalah [52]

$$\alpha = \frac{k}{\rho_u c_p} \quad (2.10)$$

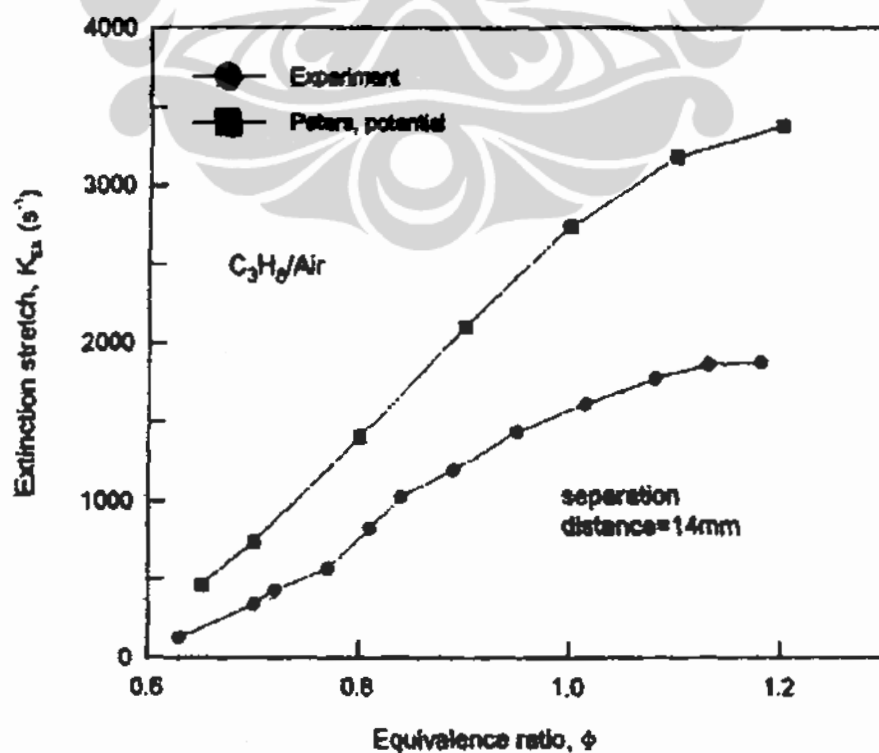
Jika disubstitusikan akan diperoleh 2 persamaan waktu reaksi kimia yakni $\frac{\alpha}{S_L^2}$

dan $\frac{\eta}{S_L}$. Penentuan bilangan Karlovitz pada kondisi tidak ada *stretch* atau 1-D

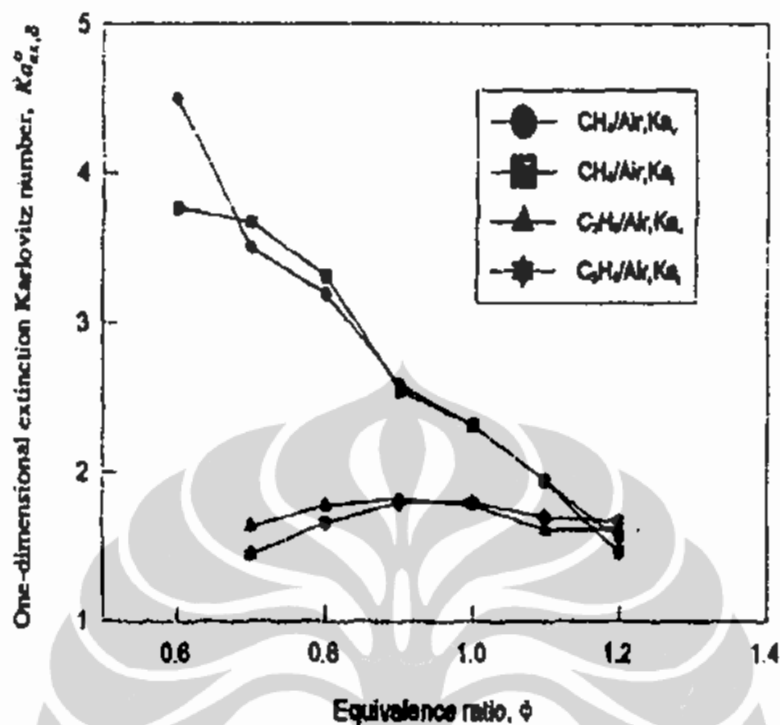
dapat dihitung dengan 2 persamaan yakni berdasarkan kecepatan nyala dan berdasarkan tebal nyala yang ditentukan berdasarkan suhu nyala seperti pada Persamaan 2.11 [52]:

$$K = \frac{\alpha}{S_L^2} Ka \quad \text{atau} \quad K = \frac{\eta}{S_L} Ka \quad (2.11)$$

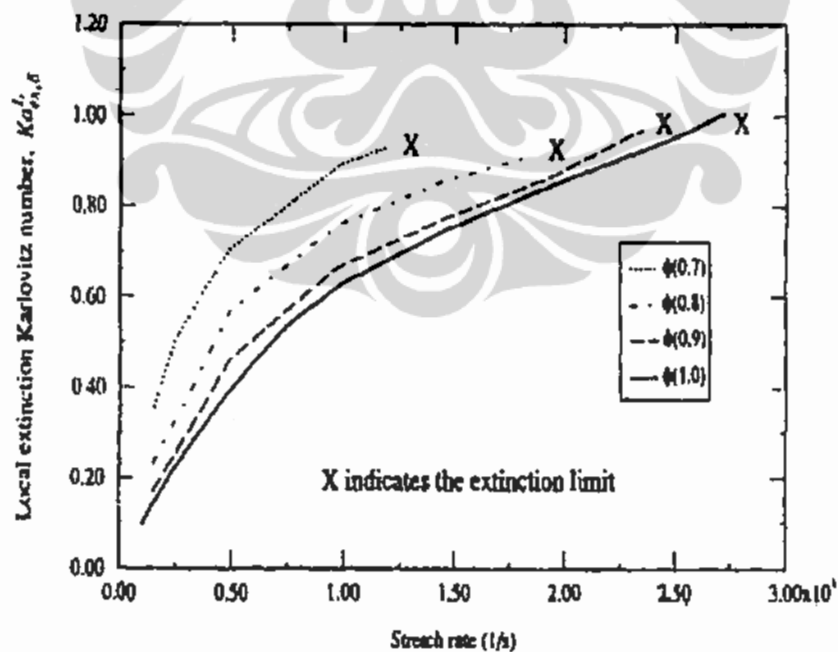
Grafik-grafik yang ditampilkan pada Gambar 2.9, 2.10 dan 2.11 dapat memberikan gambaran tentang faktor-faktor yang mempengaruhi *extinction*.



Gambar 2.9. *Stretch Rate* Pembakaran Propana dan Udara [52]



Gambar 2.10. Bilangan Karlovitz 1-D Nyala Campuran Propana dan Udara [52]



Gambar 2.11. Variasi Bilangan Karlovitz Lokal Berdasarkan Ketebalan Nyala Campuran Propana dan Udara [52]

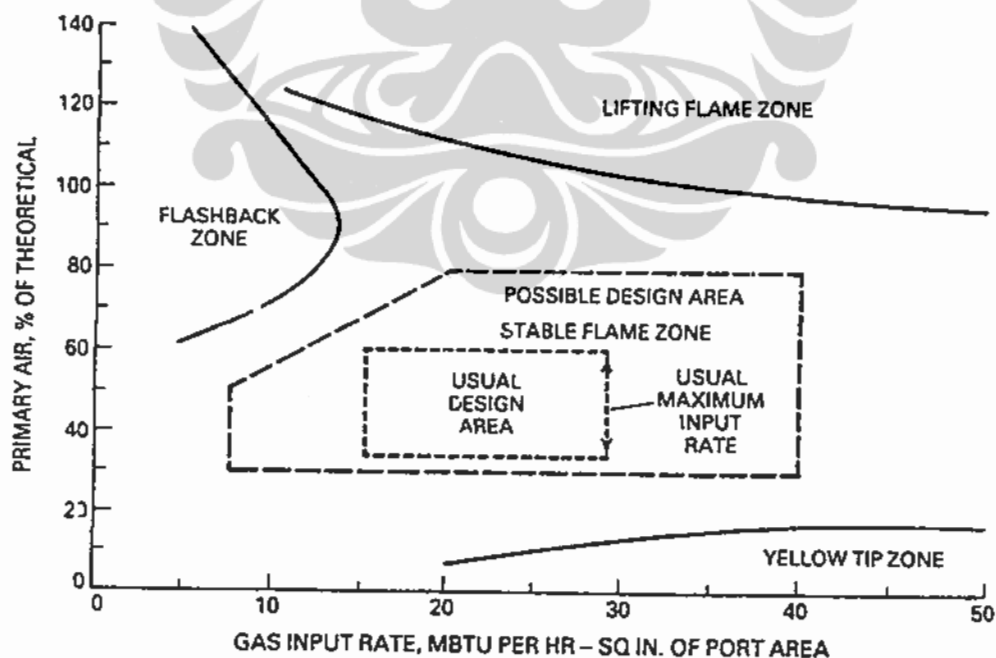
Gambar 2.9 memperlihatkan kesamaan kecenderungan *stretch rate* antara hasil eksperimen dengan perhitungan numerik. Gambar 2.10 memperlihatkan

variasi bilangan Karlovitz 1-D yang berkisar antara 1-5. Ditemukan pula bahwa perhitungan bilangan Karlovitz berdasarkan profil kecepatan dan profil suhu mempunyai kesamaan. Gambar 2.11 memperlihatkan bahwa bilangan Karlovitz lokal pada kondisi *extinction* adalah mendekati 1.

Penelitian lain yang membahas Bilangan Karlovitz adalah korelasi antara laju nyala dengan regangan nyala pada nyala turbulen udara dan metana [53].

2.6 Stabilitas Nyala

Kestabilan nyala api dapat dinyatakan dari berbagai macam parameter antara lain batas mampu nyala, gradient kecepatan nyala, kerugian kalor dan daerah stabilitas nyala. Daerah stabilitas nyala adalah luasan pada Grafik Fuidge yang dibatasi oleh daerah *flash back*, *yellow tip* dan *blow off* seperti pada Gambar 2.12 [54]. Daerah operasi sebelah kiri mengakibatkan terjadinya *flashback*, sementara itu untuk menghindari terjadinya *flashback* daerah kerja dirancang pada sisi kanannya yaitu pada daerah stabilitas nyala.



Gambar 2.12. Diagram Stabilitas *Flashback*, *Lift-off*, dan *Yellow Tipping* untuk Bahan Bakar Gas Industri [54]

2.6.1 *Flashback*

Flashback terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih cepat daripada kecepatan campuran udara-bahan bakar sehingga nyala api merambat kembali ke dalam tabung pembakar. Fenomena ini kadang disebut juga *back fire* atau *light back*.

Flashback tidak hanya mengganggu, tetapi juga dari sisi keamanan bisa menjadi berbahaya. Fenomena *flashback* berhubungan dengan kecepatan nyala laminar lokal dan kecepatan aliran lokal. *Flashback* secara umum merupakan kejadian sesaat jika aliran bahan bakar dikurangi atau ditutup. Ketika kecepatan nyala lokal melebihi kecepatan aliran lokal, perambatan nyala menjauh melalui tabung. Saat aliran bahan bakar dihentikan, nyala akan membalik atau *flashback*.

Kajian eksperimental maupun numerik tentang *flash back* pada *burner* dengan penambahan media yang porous dilakukan dengan pendekatan model perpindahan kalor yang sederhana dan stasioner [55,56]. Kajian *flash back* dengan simulasi numerik 1D untuk kondisi tunak dan transient juga dilakukan pada *burner* dengan penambahan busa berbahan keramik [57]. Simulasi numerik pada kondisi tunak menunjukkan terdapat kondisi operasi yang solusinya tidak terselesaikan. Hal ini terlihat pada simulasi transient sebagai daerah terjadinya *flash back*. *Flash back* terjadi karena kenaikan kecepatan pembakaran pada daerah porous akibat dari ketidakseimbangan kalor radiasi dengan kalor konveksi di dalam media porous tersebut.

2.6.2 *Lift-off*

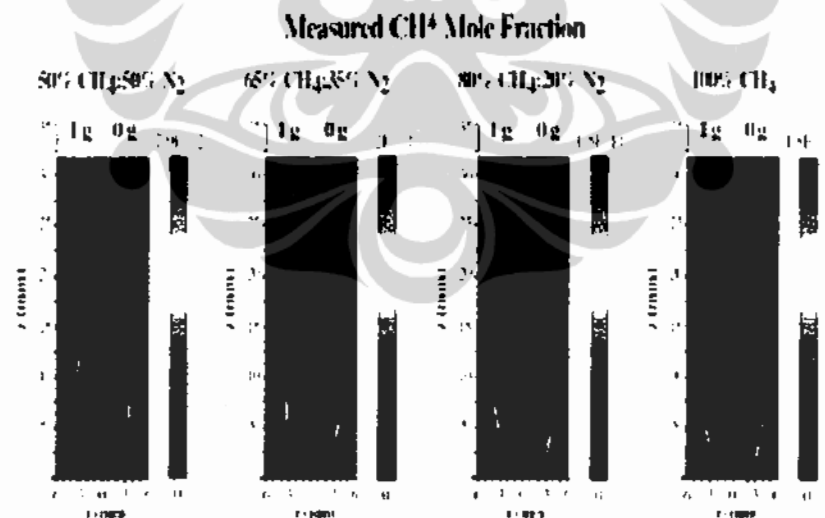
Lift-off adalah kondisi di mana nyala api tidak menyentuh permukaan mulut tabung pembakar, tetapi agak stabil pada jarak tertentu dari tabung pembakar. Sama seperti halnya *flashback*, fenomena *lift-off* juga berhubungan dengan kecepatan nyala api laminar lokal dan kecepatan aliran lokal yang sebanding.

Fenomena nyala api terangkat (*lift-off*) sangat tergantung pada nyala api lokal dan sifat aliran dekat ujung (mulut) tabung pembakar. Apabila kecepatan aliran cukup rendah, ujung bawah nyala api berada sangat dekat dengan ujung

tabung pembakar. Jika kecepatan dinaikkan, maka sudut kerucut nyala turun sesuai dengan kondisi $\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{S_L}{V_u}\right)$ dan ujung nyala bergeser sedikit ke bawah.

Dengan meningkatkan kecepatan aliran hingga tercapai kecepatan kritis, ujung nyala akan meloncat ke posisi jauh dari ujung (mulut) pembakar dan nyala dikatakan terangkat. Kondisi nyala terangkat inilah yang dinamakan sebagai *lift-off*, dan jika kecepatan aliran terus dinaikkan, maka nyala akan padam dan kondisi ini tidak diinginkan.

Dari banyak riset tentang fenomena *lift-off* yang sebagian besar memberikan kesimpulan yang sama bahwa *lift-off* terjadi karena keseimbangan kecepatan pembakaran dengan kecepatan aliran. Salah satu yang menarik untuk dikemukakan adalah perbandingan ketinggian *lift-off* antara kondisi gravitasi normal dan gravitasi rendah pada nyala diffusi laminar seperti tampak pada Gambar 2.13. Pada kondisi tanpa gravitasi dengan fraksi bahan bakar yang sama ternyata ketinggian *lift-off* menurun [58].



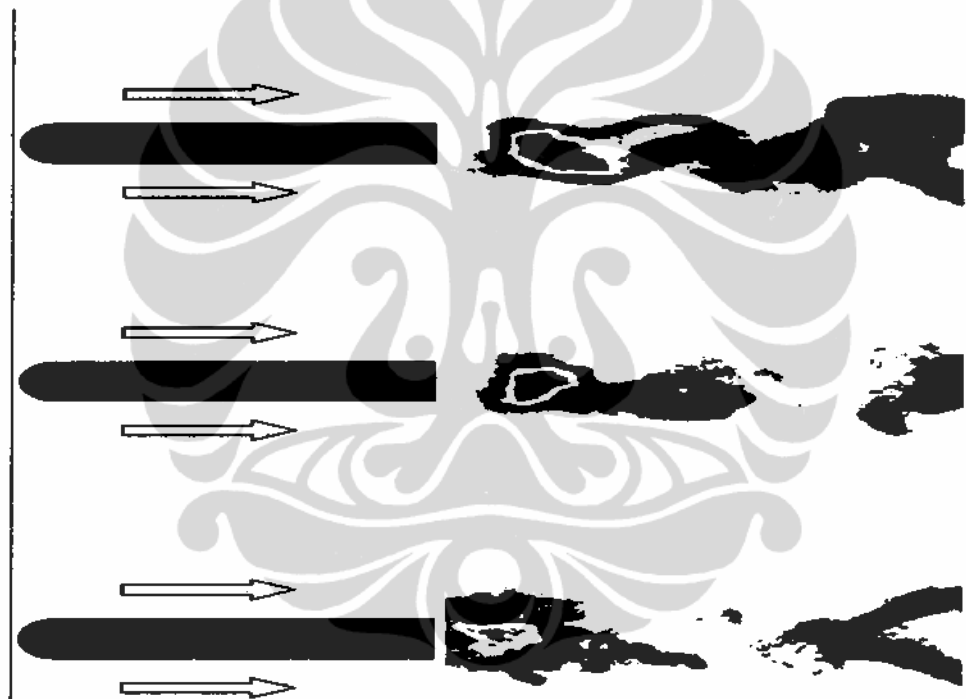
Gambar 2.13. Perbandingan Ketinggian *Lift-off* Antara Kondisi Gravitasi Normal dan Tanpa Gravitasi [58]

2.6.3 *Blow-off*

Blow-off merupakan suatu keadaan di mana nyala api padam akibat dari batas kecepatan aliran lebih besar dari laju nyala atau kecepatan pembakaran.

Kondisi seperti ini juga sangat dihindari. Penelitian tentang *blow off* yang dilakukan bersamaan dengan kondisi *lift-off* menunjukkan bahwa pada fraksi massa bahan bakar yang rendah maka kecepatan *blow off* juga menurun secara linier menjadi lebih rendah dari kecepatan aliran saat *lift-off*. Hal ini yang mengakibatkan pada fraksi massa bahan bakar yang rendah tidak dapat terjadi *lift-off* karena nyala langsung *blow off* tanpa sempat mengalami *lift-off* [69].

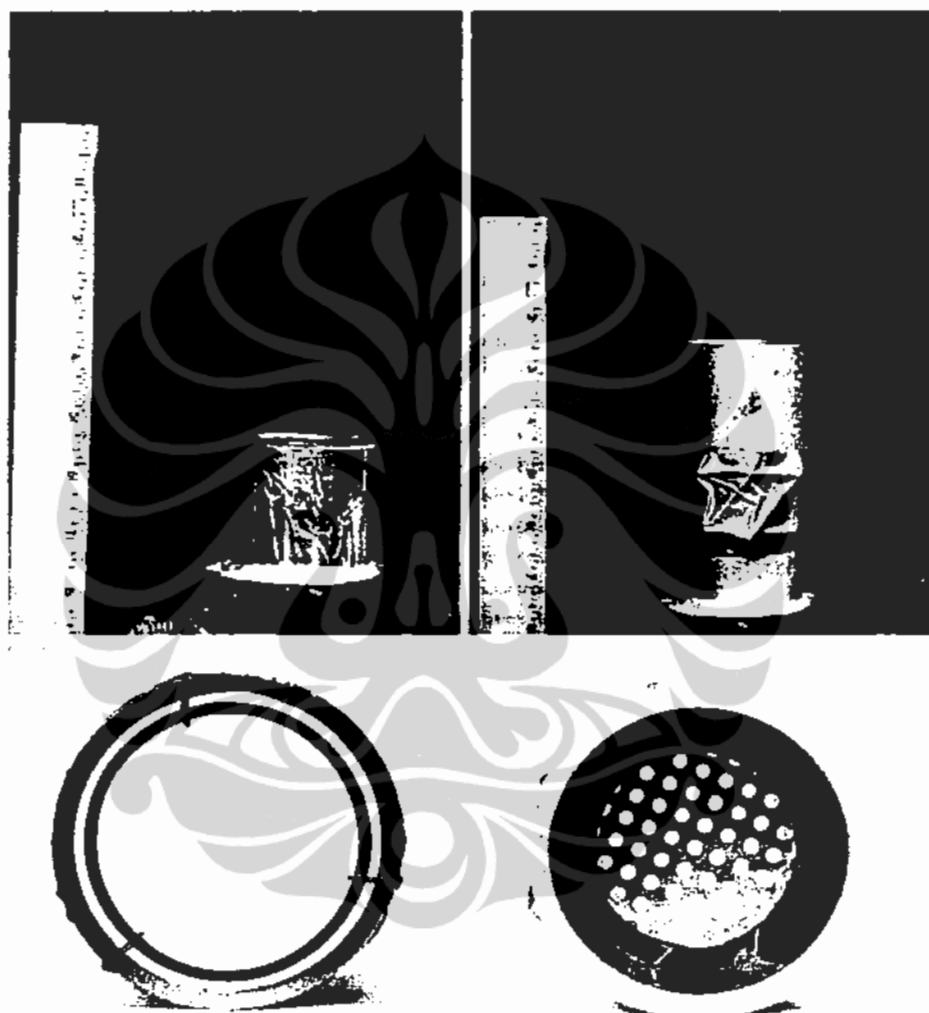
Sebaliknya pada kecepatan aliran yang tinggi dan bilangan Reynold yang tinggi mendekati *blow-off* dapat terjadi '*residual flame*' dan padamnya api di lokasi nyala seperti tampak pada Gambar 2.14 [14].



Gambar 2.14. *Residual Flame* mendekati *Blow-off* [14]

Aspek utama perancangan *burner* dalam hubungannya dengan nyala adalah stabilitas nyala. Salah satu metode unik untuk memperluas daerah kestabilan nyala adalah dengan memasang *ring* pada ujung keluaran *burner* [21]. Pada eksperimen yang dilakukan di *Lawrence Berkeley National Laboratory* Amerika diperoleh bahwa daerah nyala akan lebih luas dengan semakin mengecilnya diameter luar *ring*. Peningkatan celah antara diameter luar *ring* dengan diameter dalam tabung juga meningkatkan ketahanan terhadap fenomena *blow off* dan *flash back*. Hal ini diduga karena adanya daerah resirkulasi di dalam

daerah gelap. Penggunaan *ring* ini juga merubah tinggi nyala premix yang dipengaruhi oleh daerah resirkulasi. Daerah resirkulasi menyebabkan terjadinya perubahan kecepatan dan arah partikel gas yang belum terbakar. Photo percobaan dapat dilihat pada Gambar 2.15.



LBNL low-NO_x burner showing 20-kW flame at 25 vol % excess air and 15-ppm NO_x (3 vol % O₂). Left: With ring stabilizer insert. Right: Without insert.

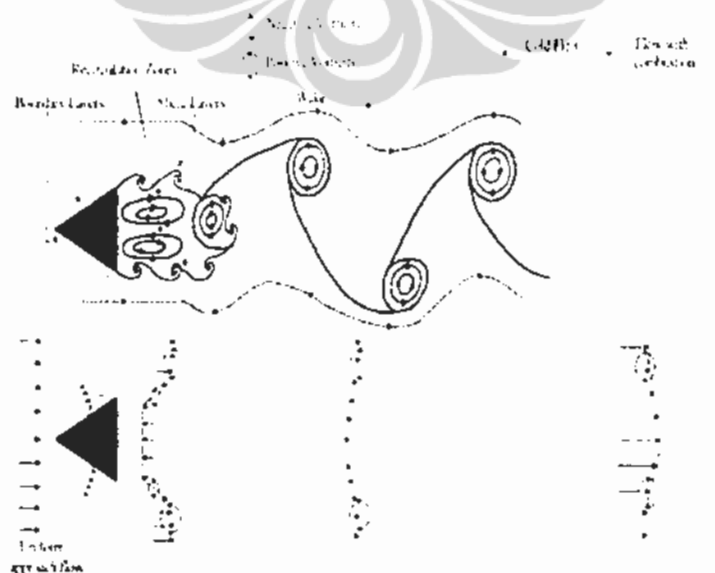
Gambar 2.15. Photo Percobaan *Ring Stabilizer* [21]

Umumnya daerah resirkulasi pada proses pembakaran sengaja dibuat dengan memasang *bluff-body*. Penelitian tentang fenomena aliran melewati suatu *bluff-body* juga telah diawali sejak tahun 70-an. Pembahasannya masih terpusat pada aspek mekanika fluidanya saja yakni pada aspek turbulensi aliran fluida. Sedangkan pengaruh turbulensi aliran sekaligus reaksi kimia pada proses pembakaran baru diawali tahun 1980-an. Kebanyakan penelitian tentang daerah

resirkulasi pada pembakaran membahas tentang visualisasi aliran baik dalam tingkat simulasi maupun penggunaan peralatan yang canggih seperti *Phase Doppler Anemometry (PDA)*, *Laser Doppler Velocimetry (LDV)*, *Particle Image Velocimetry (PIV)*, *Fluid Image Velocimetry (FIV)*, *Laser Induced Fluorescence (LIF)* dll. Pembahasan daerah resirkulasi sebagai fungsi dari parameter aliran fluida dan sekaligus reaksi kimia awal tahun 2000 telah mulai dipublikasikan [7].

Penelitian yang mempergunakan pemegang nyala (*flame holder*) pada pembakaran premix adalah karakteristik *blow off* pada 3 jenis pemegang nyala yakni bentuk rod, piringan dan kerucut terpancung. Parameter yang diubah pada percobaan adalah kecepatan aliran campuran dari propana dan udara. Pada kecepatan campuran yang rendah ditemukan bahwa pada ketiga pemegang nyala kondisi nyala lebih stabil karena *blow off* terjadi pada rasio ekuivalen yang lebih rendah. Namun pada kecepatan campuran yang tinggi pemegang nyala bentuk piringan dan kerucut kurang stabil. Sedangkan pada pemegang nyala bentuk rod masih diperoleh kestabilan nyala. Analisis medan aliran juga dilakukan dengan menggunakan *Particle Image Velocimetry (PIV)* [3].

Perbedaan profil kecepatan aliran dingin dan aliran eksotermis atau pembakaran pada aliran setelah *bluff body* ditampilkan oleh kelompok peneliti dari *Georgia Institute of Technology* seperti tampak pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Distribusi Kecepatan Kondisi Aliran Dingin dan Pembakaran [14]

Aliran setelah *bluff body* pada aliran dingin adalah berupa *wake* sedangkan pada kondisi pembakaran menyerupai aliran jet [14].

2.6.4 *Lift-up*

Lift-up adalah kondisi saat pangkal nyala api terlihat berpindah dari sebelumnya pada ujung *burner* menuju benda penghalang. Pada pembakaran premix kondisi *lift-up* terjadi pada pembakaran yang miskin bahan bakar. Jenis material benda penghalang mempengaruhi temperatur dan besarnya *AFR* untuk terjadinya *lift-up* [28-32]. Hal ini berhubungan dengan laju kehilangan kalor benda penghalang seperti pada kondisi *flame stabilized by a large bluff body* [20].

Penelitian tentang kondisi *lift-up* masih terbatas pada hasil kajian eksperimental menggunakan *ring* sebagai benda penghalang. Parameter penelitian belum mencakup laju kehilangan kalor dan ukuran daerah resirkulasi namun masih terfokus pada pengaruh laju aliran bahan bakar, jarak benda penghalang dari ujung *burner*, diameter dalam *ring* dan jenis material *ring* terhadap *AFR* saat *lift-up*, temperatur *ring* dan temperatur ujung *burner* serta panjang nyala setelah *lift-up*.

AFR saat *lift-up* sangat dipengaruhi oleh posisi *ring* dari ujung *burner*. Makin tinggi posisi *ring* dari ujung *burner* maka *AFR* semakin besar. Hal ini berkebalikan dengan panjang nyala saat *lift-up*.

Fenomena *lift-up* tidak hanya dipengaruhi oleh medan aliran saja tapi juga oleh temperatur *ring*nya. Hal ini didukung oleh hasil eksperimental pada material *ring* yang berbeda namun geometri dan posisi *ring* serta *burning load* yang sama diperoleh *AFR* yang berbeda untuk terjadinya *lift-up*. Material *ring* mempengaruhi temperatur *ring*. 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 eksperimental dan teoritis dari aspek reaksi kinetik dan perpindahan kalor perlu dilakukan untuk dapat mengungkapkan penyebab melompatnya nyala api dari ujung *burner* ke *ring* [32]. Demikian pula penelitian tentang panjang nyala api setelah *lift-up* perlu dilakukan jika fenomena ini akan diterapkan pada rancangan *burner*.

2.7 Panjang Nyala Api

Sebagian besar penelitian tentang panjang nyala api adalah untuk mengidentifikasi bilangan tanpa dimensi yang paling berpengaruh terhadap panjang nyala api. Bilangan Froude, bilangan Richardson, perbandingan momentum, perbandingan temperatur adalah kelompok bilangan tanpa dimensi yang digunakan pada penentuan panjang nyala api difusi [60-65].

Perbedaan persamaan panjang nyala api yang diperoleh sebagian besar disebabkan oleh perbedaan metode pengukurannya. Kalghatgi [61] menggunakan kamera dengan kecepatan 1/30 detik dan tiga kali pengambilan gambar untuk menghitung panjang nyala rata-ratanya. Sugawa dan Sakai [63] mengukur panjang nyala api menggunakan kamera video dan rata-rata panjang nyala dari sembilan pengambilan gambar. Faktor lain yang mempengaruhi perbedaan hasil pengukuran adalah faktor ketahanan retina mata pengamat. Salah satu metode untuk mengatasi hal ini adalah metode yang ditawarkan oleh Hawthorne dkk [62] adalah konsep panjang nyala api kimiawi. Panjang nyala api kimiawi adalah jarak sampai ujung api dimana fraksi mol bahan bakar mencapai 0,0005 pada sumbu nyala api.

Sonju dan Hustad [64] mengembangkan persamaan matematis menggunakan bilangan Froude, Fr , untuk menentukan panjang nyala api difusi seperti Persamaan 2.12.

$$\frac{L}{d_o} = 27 Fr^{1/5} \quad (2.12)$$

Persamaan panjang nyala api difusi ini diperoleh dari hasil penelitian pembakaran propana dan juga pembakaran metana dengan panjang nyala api yang mencapai hampir 8 meter.

Sedangkan penelitian tentang panjang nyala api premix masih agak jarang, salah satunya adalah yang dilakukan oleh Rokke [34]. Mengacu pada persamaan dari Sonju dan Hustad persamaan matematis untuk menentukan panjang nyala api premix diusulkan oleh Rokke menggunakan bilangan tanpa dimensi fraksi massa bahan bakar dan bilangan Froude seperti Persamaan 2.13 [34].

$$\frac{L}{d_o} = 33 Y_f^{2/5} Fr^{1/5} \quad (2.13)$$

Penelitian oleh Rokke menggunakan propana dengan fraksi massa propana antara 0,15 sampai 1,0. Persamaan ini berlaku pada pada bilangan Froude, $Fr \leq 10^4$. Khusus tentang metode pengukuran panjang nyala yang terbaru yakni pengukuran panjang nyala dengan analisa pencitraan struktur nyala berbasis CFD telah dilakukan dengan mengambil contoh penerapan pada pembakaran difusi dari propana [66].

Semua persamaan tersebut menunjukkan bahwa faktor stabilitas internal dari pembakaran mempunyai pengaruh yang dominan terhadap panjang nyala api. Selain itu diffusivitas thermal yang berhubungan dengan laju reaksi juga berperan terhadap panjang nyala api dan kecepatan nyala.

2.8 Simulasi dengan Perangkat Lunak Komputer

Pemodelan pembakaran banyak melibatkan persamaan differensial yang solusinya membutuhkan pendekatan non-linier. Pada dinamika fluida persamaan diferensial diselesaikan dengan metode komputasi atau *Computational Fluid Dynamic (CFD)*. Beberapa vendor perangkat lunak komersial berbasis CFD adalah ANSYS-CFX, Fluent Inc., Aerosoft Inc., Numeca International s.a., CFD Research Corporation dan CD Adapco.

Perangkat lunak Fluent dapat digunakan untuk menganalisis aliran sub sonik, sampai hypersonik. Fluent dapat menyelesaikan persamaan integral untuk

konservasi massa, momentum, energi, dan persamaan skalar lainnya seperti pada kasus aliran turbulen dan persamaan konsentrasi kimia.

Simulasi dengan perangkat lunak Fluent dilakukan setelah proses konfigurasi *burner* dan proses *meshing* pada perangkat lunak Gambit. *Mesh* yang dapat dilakukan oleh gambit ada beberapa macam, diantaranya hexagonal dan tetrahedral. *Mesh* hexagonal digunakan untuk domain yang teratur sedangkan *mesh* tetrahedral digunakan untuk domain yang lebih rumit dan tidak teratur karena bentuknya dapat disesuaikan dengan kondisi.

Bahan bakar dan oksidator pembakaran *premixed* memasuki zona reaksi dalam keadaan tercampur dalam format *mixture*, dengan komposisi fraksi massa yang ditentukan. Di dalam melakukan simulasi *premixed* dalam software Fluent ada beberapa skema yang dapat dipakai, *species transport* dan PDF (*Probability Density Function*).

Fluent dapat memodelkan *species transport* dengan atau tanpa reaksi kimia. Reaksi kimia yang dapat dimodelkan diantaranya

1. Reaksi fase gas yang melibatkan NO_x dan formasi polutan lainnya.
2. Reaksi permukaan (misal deposisi uap kimia) yang mana reaksi ini muncul di batas solid (*wall*)
3. Reaksi permukaan partikel (misal pembakaran arang atau *charcoal*) dengan reaksi muncul di permukaan partikel yang telah terdiskritisasi.

Fluent dapat memodelkan pencampuran dan transport spesies kimia dengan menyelesaikan persamaan konservasi yang mendeskripsikan konveksi, difusi dan reaksi sumber untuk setiap komponen spesies yang ada. Dalam spesies transport Fluent memprediksi fraksi massa untuk setiap spesies Y melalui persamaan konveksi-difusi untuk setiap i spesies seperti pada Persamaan 2.14 sampai Persamaan 2.16 [67].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (2.14)$$

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (2.15)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.16)$$

Pada persamaan 2.15 G_k mewakili pembentukan energi kinetik turbulen berdasarkan kenaikan rata-rata kecepatan. G_b adalah pembentukan energi kinetik turbulen berdasarkan *buoyancy*. Y_M mewakili kontribusi dilatasi yang berfluktuasi pada turbulensi yang dapat terkompresi. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, and $C_{3\varepsilon}$ adalah konstanta. Persamaan reaksi yang dipakai pada komputasi adalah persamaan Arrhenius yang dinyatakan dalam Persamaan 2.17 [67].

$$\sum_{r=1}^n \nu'_{r,k} M_r \xleftrightarrow[k_{b,k}]{k_{f,k}} \sum_{r=1}^n \nu''_{r,k} M_r \quad (2.17)$$

Persamaan 2.16 berlaku untuk reaksi yang *reversibel* maupun *irreversibel*. Pada Fluent dianggap tidak dapat dibalik secara standar, sehingga $k_{b,k}$ dapat diabaikan. Laju molar pembentukan/penghancuran zat i' pada reaksi k , $R_{i,k}$ pada persamaan laju reaksi, ditentukan oleh Persamaan 2.18 [67].

$$R_{r,k} = \Gamma (\nu'_{r,k} - \nu''_{r,k}) \left(k_{f,k} \prod_{j=1}^n [C_j]^{\eta_{j,k}} - k_{b,k} \prod_{j=1}^n [C_j]^{\eta_{j,k}} \right) \quad (2.18)$$

dan Γ mewakili pengaruh zat/benda ketiga pada laju reaksi, yang dinyatakan dalam Persamaan 2.19 [67]

$$\Gamma = \sum_j^N \gamma_{j,k} C_j \quad (2.19)$$

dimana C_{jk} adalah efisiensi benda ketiga dari zat j^{th} . Secara standar Fluent tidak memasukkan pengaruh benda ketiga pada perhitungan laju reaksi. Konstanta laju reaksi maju pada reaksi k , $k_{f,k}$, dihitung menggunakan persamaan Arrhenius yakni Persamaan 2.20 [35,67].

$$k_{f,k} = A_k T^{\beta_k} \exp(-Ea/RT) \quad (2.20)$$

Jika reaksinya dapat dibalik, maka laju reaksi mundurnya dihitung dari laju reaksi maju menggunakan Persamaan 2.21 [67].

$$k_{b,k} = \frac{k_{f,k}}{K_k} \quad (2.21)$$

dengan K_k adalah konstanta equilibrium untuk reaksi k yang dihitung dengan Persamaan 2.22 [67]:

$$K_k = \exp\left(\frac{\Delta S_k^o}{R} - \frac{\Delta H_k^o}{RT}\right) \left(\frac{P}{RT}\right)^{\sum_{i=1}^{n_R} \eta_{f,k}^i} \quad (2.22)$$

Eksponennya mewakili perubahan dari persamaan energi bebas Gibbs dan komponennya dihitung dengan Persamaan 2.23 [67]:

$$\frac{\Delta S_k^o}{R} = \sum_{i=1}^N (\nu_{i,k}^* - \nu_{i,k}^{\cdot}) \frac{S_i^o}{R} \quad (2.23)$$

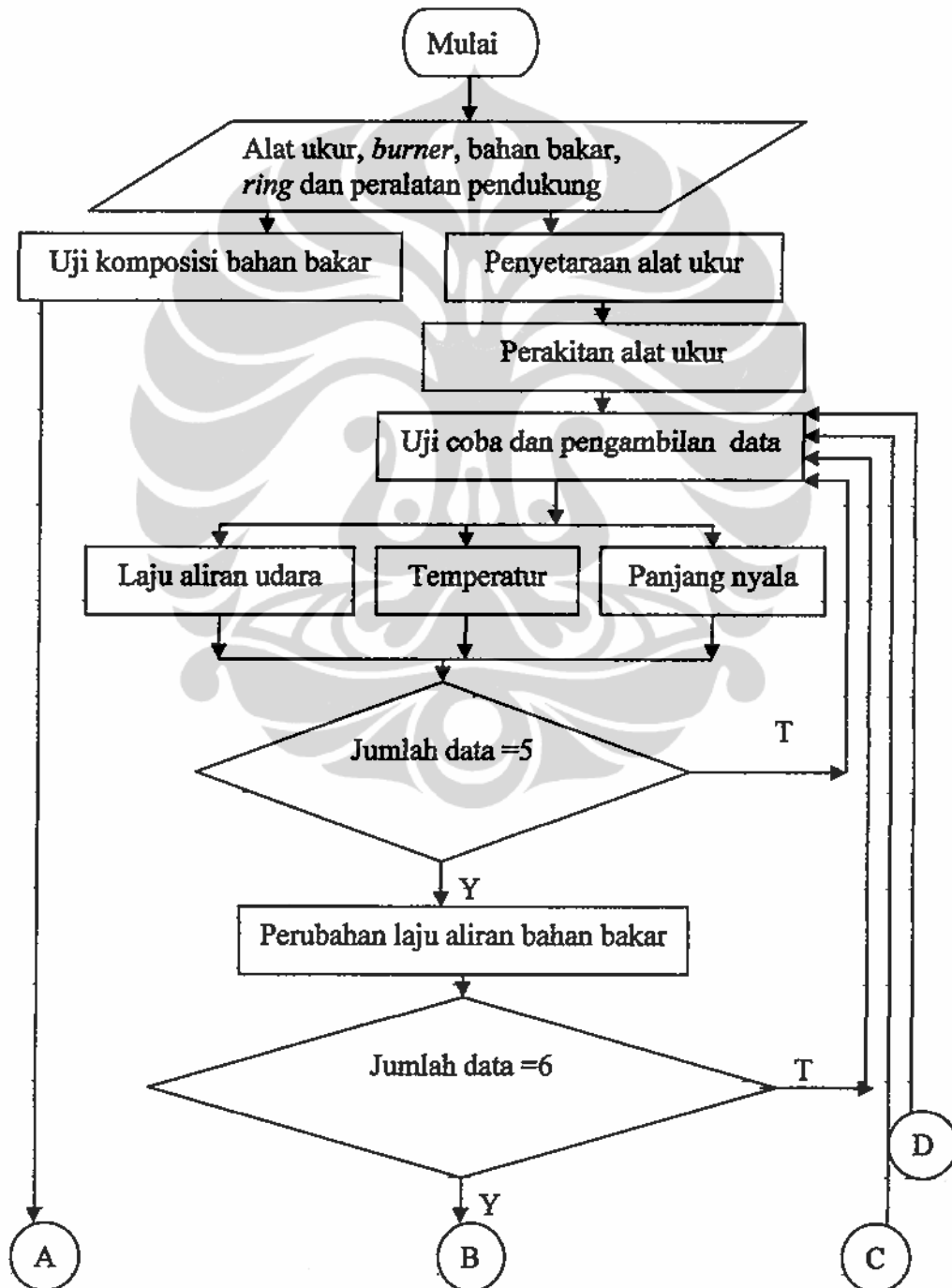
$$\frac{\Delta H_k^o}{RT} = \sum_{i=1}^N (\nu_{i,k}^* - \nu_{i,k}^{\cdot}) \frac{H_i^o}{RT} \quad (2.24)$$

Selain dari aspek dinamika fluida permasalahan pembakaran dapat diselesaikan dari sisi persamaan reaksi kinetik yang kompleks menggunakan perangkat lunak CHEMKIN yang dikeluarkan oleh Reaction Design Inc. Khusus untuk masalah pembakaran beberapa paket program yang tersedia adalah AURORA, OPPDIF, PASR, PLUG dan PREMIX [68].

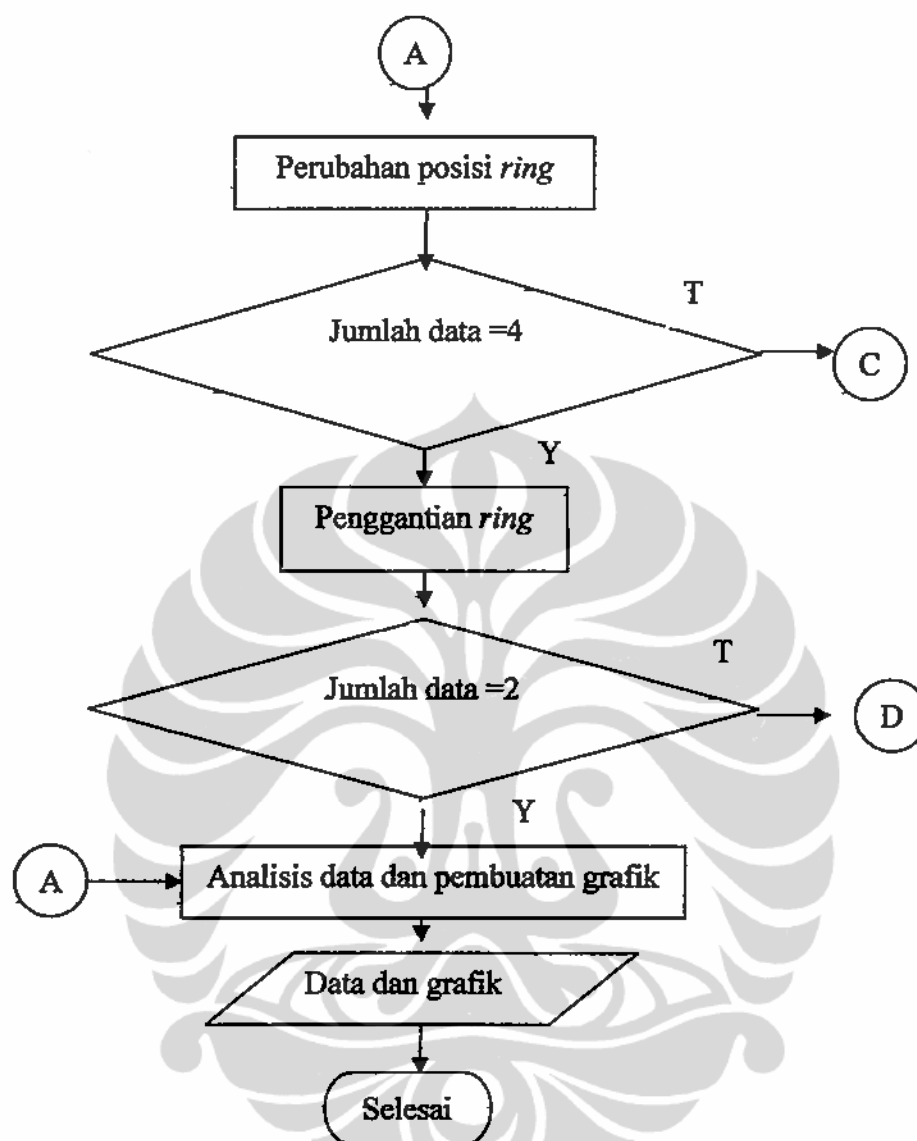
AURORA dipergunakan untuk kasus tunak dan transient pada suatu jaringan reaktor termasuk plasma, gas dan reaksi permukaan dengan pendekatan *Well Stirred Reactor* atau *Perfectly Stirred Reactor*. Sedangkan OPPDIF adalah untuk kasus pembakaran difusi yang *counter flow*. PASR untuk analisis pencampuran dan reaksi kinetik pada *Partially Stirred Reactor*. PLUG adalah paket program untuk pemodelan *Plug flow Reactor* dengan fase gas. PREMIX dipergunakan untuk mensimulasikan aliran tunak, laminer 1-D dari pembakaran *premixed*.

BAB 3
METODE PENELITIAN

Penelitian fenomena flame *lift-up* dilaksanakan secara eksperimen dan teoritis. Eksperimen dilaksanakan di laboratorium dengan langkah-langkah seperti pada diagram alir Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Langkah Eksperimental



Gambar 3.1. (Sambungan)

Fenomena *flame lift-up* diteliti dengan menggunakan bahan bakar gas propana yang berasal dari sejenis refrigeran hidrokarbon yaitu Hycool HCR-22 dengan komposisi 98% propana seperti ditampilkan pada Lampiran 1.

3.1 Peralatan Penelitian

3.1.1 Bunsen Burner

Alat utama yang digunakan pada penelitian ini adalah Bunsen Burner *Flame Propagation and Stability Unit* P.A. Hilton LTD C551, yang dilengkapi dengan *flowmeter* penunjuk aliran udara dan gas dengan indikator dalam satuan

cm (*centimeter*) dan dapat dibaca langsung untuk pengambilan data. Alat ini dilengkapi dengan fan motor AC dan sekering pengaman 2 A, 220 V.

3.1.2 Tabung Pembakar (*Barrel*)

Tabung pembakar yang digunakan pada penelitian ini memiliki diameter 14 mm dan panjang 385 mm

3.1.3 *Orifice Flowmeter*

Pengukuran laju aliran udara dilakukan juga dengan menggunakan manometer *orifice* yang disetarakan juga dengan *wet gas meter*

3.1.4 *Ring Stabilizer*

Ring Stabilizer yang digunakan adalah dari dua jenis material yakni *ring stainless steel* AISI 304 dan keramik dengan bahan dasar kaolin. *Ring* AISI 304 divariasikan diameter dalamnya yakni 7 mm, 10 mm dan 14 mm dengan diameter luar yang sama yakni 30 mm dan tebal 5 mm seperti pada Gambar 3.2



Gambar 3.2. *Ring* AISI 304 variasi diameter dalam

Sedangkan *ring* keramik dibuat hanya 1 yakni diameter dalam 10 mm diameter luar 30 mm dan tebal 5 mm.

3.1.5 Termokopel dan Data logger

Termokopel yang dipergunakan adalah termokopel 200 μm Ni-Cr tanpa koreksi radiasi dan dilengkapi dengan data logger Fluke.

3.1.6 *Infra Red Thermograph* dan *Thermograph Infra View*

Khusus untuk mengukur permukaan *ring*, ujung *burner* dan panjang nyala dipergunakan juga kamera *Infra Red Thermograph*. Sedangkan untuk pengukuran temperatur maksimum nyala api dipergunakan *Thermograph Infra View*. Kedua alat ini telah dilengkapi dengan perangkat lunak pengolah citra dan pemroses data sehingga hasil pengukuran dapat disimpan langsung di komputer. Penyetaraan kedua alat ukur ini telah dilakukan oleh pemasok.

3.1.7 Peralatan Pendukung

Peralatan pendukung terdiri dari:

1. *Pressure Regulator*, alat pengatur tekanan gas yang masuk ke dalam rotameter dan dibatasi sebesar 2,5 bar.
2. Pemantik api gas sistem magnet.
3. *Ring Adjuster* untuk mengatur ketinggian *ring* yang dilengkapi dengan mistar.
4. Mistar baja untuk pengukuran tinggi nyala api.
5. Kamera digital untuk pengambilan gambar fenomena nyala api
6. *Hygrometer* untuk mengukur temperatur dan juga *Relative Humidity* ruangan saat pengambilan data.

3.2 Penyetaraan *Flowmeter* dan Termokopel

Sebelum dirangkai alat ukur disetarakan terlebih dahulu dengan alat ukur standar. *Flowmeter* yang terdapat pada unit P.A. Hilton memiliki skala baca dalam cm yang dapat dibaca langsung dalam percobaan, tetapi dalam pengolahan data, ukuran dalam cm tersebut harus dikonversikan terlebih dahulu menjadi satuan kapasitas aliran dalam $\frac{m^3}{s}$.

Alat yang digunakan untuk menyetarakan *flowmeter* atau rotameter ini yaitu *Type-WE-25 Wet Gas Meter*. Alat ini memiliki temperatur maksimum 60 °C dan tekanan maksimum 1000 mmH₂O. *Burner* ini memiliki volume 5 L, jadi jika jarum besar melakukan satu putaran maka telah mengalirkan 5 L cairan pengisi. Laju aliran gas yang diukur dapat diketahui dengan mencatat waktu tempuh aliran gas tersebut dalam melakukan satu putaran atau sebesar 5 L.

Langkah-langkah penggunaan *wet gas meter* dilakukan sesuai dengan pedoman penggunaan alat tersebut terutama mengenai penempatan, pengaturan ketinggian cairan, pengeringan dan pemeriksaan kebocoran.

3.2.1 Penyetaraan Laju Aliran Gas Propana dan Udara

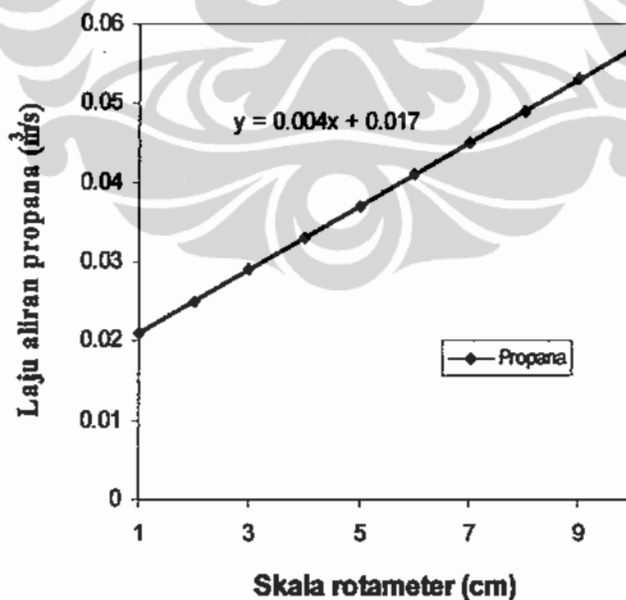
Penyetaraan laju aliran gas propana dilakukan dengan mengalirkan gas melalui rotameter pada skala 1 cm dan. Kemudian dialirkan ke *wet gas meter* seperti pada Gambar 3.3 dan diukur kapasitas aliran gas dengan mencatat waktu

yang dibutuhkan untuk volume gas yang melalui *wet gas meter*. Penyetaraan dilakukan dengan kenaikan skala rotameter 1 cm. Hasil pengukuran ditampilkan dalam bentuk grafik penyetaraan pada Gambar 3.4.

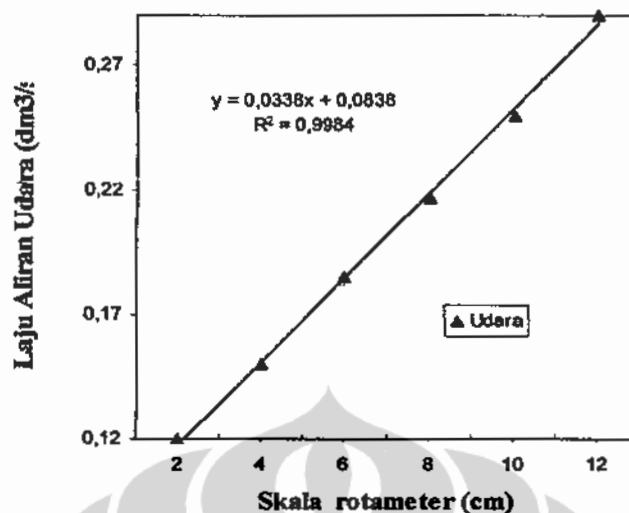


Gambar 3.3. Penyetaraan Rotameter dengan *Wet Gas Meter*

Penyetaraan laju aliran udara dilakukan dengan langkah yang sama namun dengan kenaikan skala rotameter 2 cm dan hasil pengukuran ditampilkan dalam bentuk grafik penyetaraan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.4. Grafik Penyetaraan Laju Aliran Propana



Gambar 3.5. Grafik Penyetaraan Laju Aliran Udara

3.2.2 Penyetaraan Termokopel Tipe-K dengan Termometer standar

Pengukuran dengan termokopel Tipe K dilakukan dengan pembacaan pada Data Logger Fluke yang masing-masing memiliki 2 kanal untuk pembacaan T1 dan T2. Penyetaraan termokopel Ni-Cr atau Tipe-K dilakukan dengan mengukur temperatur air menggunakan termometer air raksa sebagai pembanding atau standarnya. Kabel termokopel tipe-K bersamaan dengan thermometer standar dicelupkan ke dalam air yang dipanaskan, kemudian hasil pembacaan termokopel dibuat penyetaraannya dengan hasil pembacaan thermometer yang ditampilkan pada Gambar 3.6. dan 3.7.

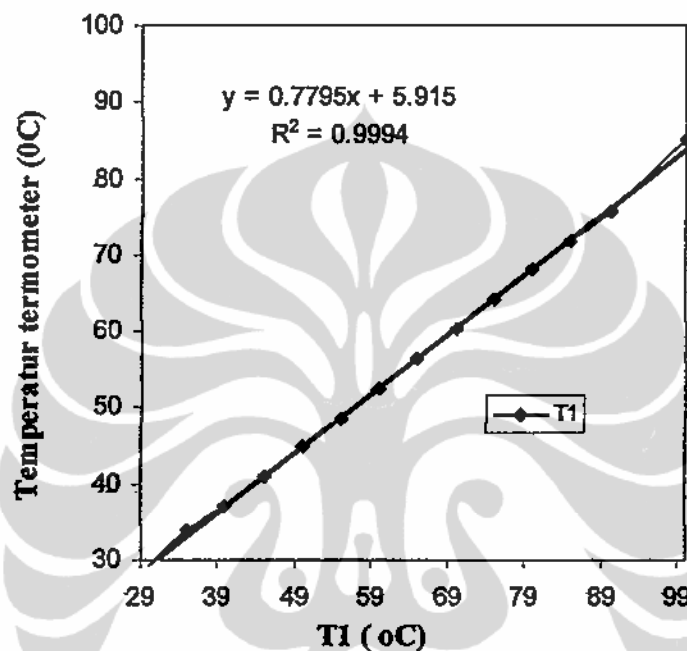
Setelah alat ukur disetarakan penelitian dilakukan dengan merangkai seluruh peralatan dan alat ukur. Pengukuran temperatur *ring*, ujung *burner* dan panjang nyala menggunakan *Infra Red Thermograph* dilakukan dengan merangkainya seperti skema Gambar 3.8. Demikian pula pengukuran temperatur maksimum nyala api dengan menggunakan *Thermograph Infra View*.

Sedangkan pengukuran temperatur nyala menggunakan termokopel dilakukan seperti pada Gambar 3.9.

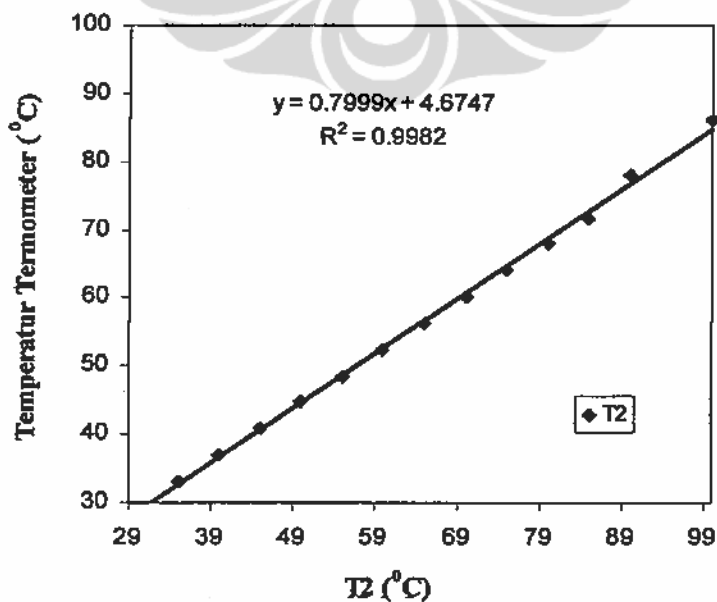
3.3 Metode Pengambilan Data

Percobaan dilakukan pada dua kondisi yaitu tanpa menggunakan *ring* dan dengan menggunakan *ring*. Percobaan tanpa *ring* bertujuan untuk menentukan daerah kestabilan nyala gas propana dan temperatur ujung *burner*

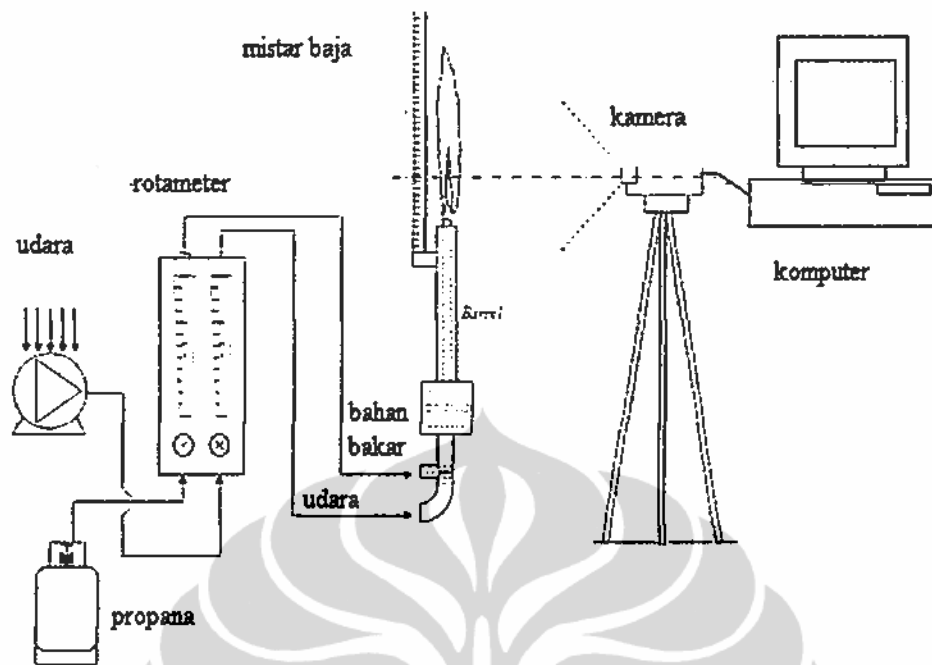
pada kondisi nyala tepat di mulut *burner*. Sedangkan percobaan menggunakan *ring* untuk menentukan parameter terjadinya fenomena *flame lift-up* seperti temperatur *ring*, temperatur ujung *burner*, kestabilan nyala api *lift-up* serta panjang nyala setelah *lift-up*.



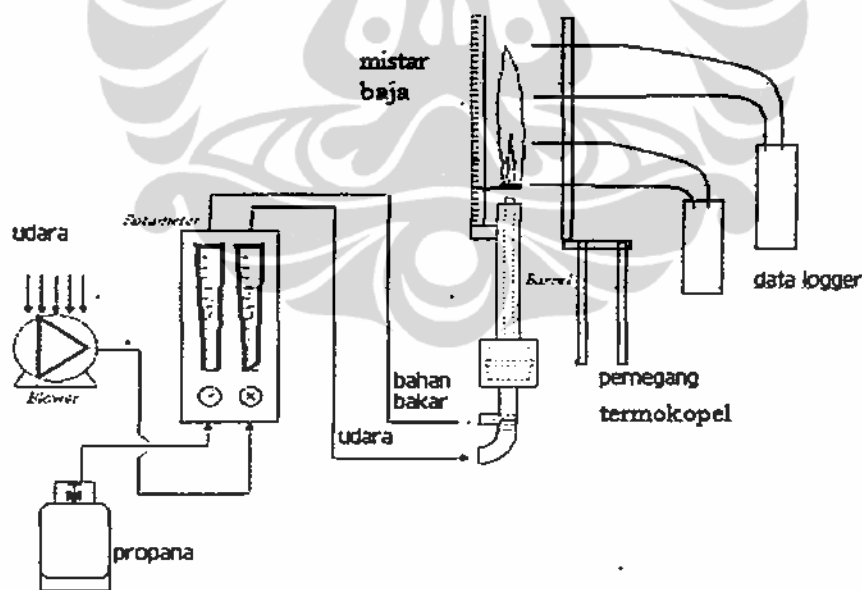
Gambar 3.6. Grafik Penyetaraan Temperatur T1



Gambar 3.7. Grafik Penyetaraan Temperatur T2



Gambar 3.8. Skema Penelitian Menggunakan *Infra Red Thermograph* dan *Thermograph InfraView*

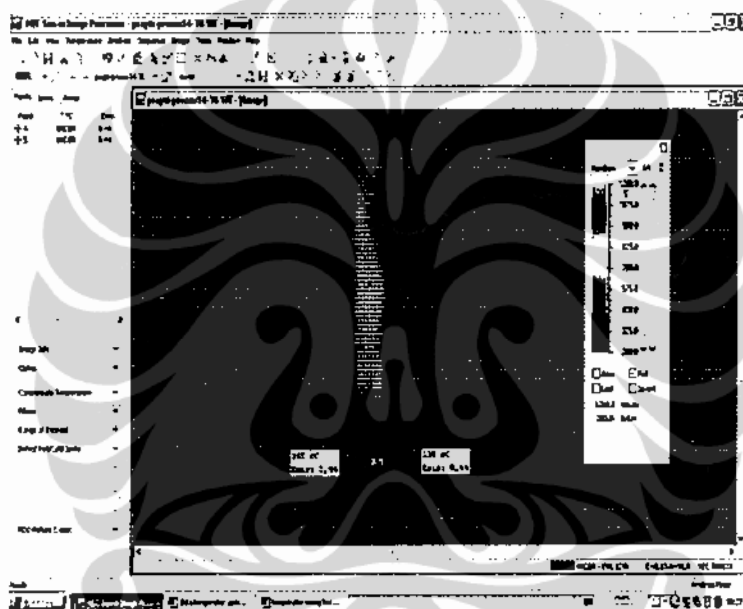


Gambar 3.9. Skema Pengukuran Temperatur Nyala Menggunakan Termokopel

3.3.1 Percobaan Tanpa Menggunakan *Ring*

Setelah peralatan dan alat ukur terpasang seperti skema Gambar 3.8 dan Gambar 3.9 namun tanpa *ring* dilakukan uji coba dan persiapan lembar pengambilan data yang sesuai. Pengukuran *yellow tipping*, *flash back* dan *lift-off*

atau *blow off* dan pengukuran temperatur ujung *burner* dilakukan dengan mengatur laju aliran udara pada laju aliran gas yang tetap. Pengukuran temperatur ujung *burner* dilakukan dengan termokopel dan *Infra Red Thermograph*. Percobaan diulangi pada kenaikan laju aliran gas skala 0,5 cm pada rotameter. Salah satu citra hasil pengukuran temperatur ujung *burner* menggunakan *Infra Red Thermograph* ditampilkan pada Gambar 3.10. Nilai emisivitas disesuaikan dengan material *burner* yakni *stainless steel* atau baja tahan karat dengan emisivitas 0,44.



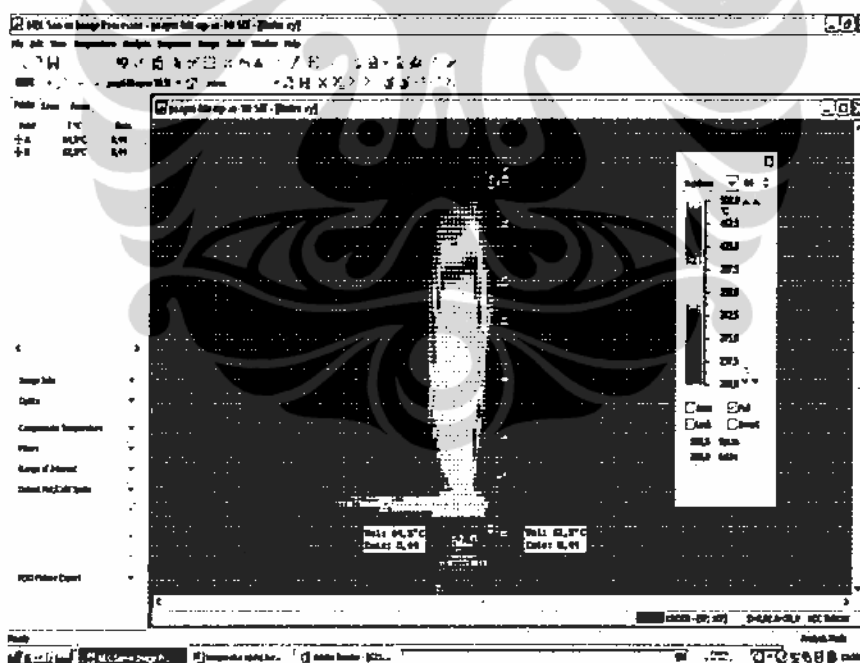
Gambar 3.10. Citra Pengukuran Temperatur Ujung *Burner*

3.3.2 Percobaan dengan Menggunakan *Ring*

Setelah peralatan dan alat ukur terpasang seperti skema Gambar 3.8 dan Gambar 3.9 dan *ring* yang sesuai telah terpasang secara konsentris pada jarak tertentu dari ujung *burner* dilakukan uji coba dan persiapan lembar pengambilan data yang sesuai. Pengukuran saat *lift-up*, temperatur *ring*, temperatur ujung *burner*, temperatur maksimum nyala, panjang nyala dan *blow off* dilakukan dengan mengendalikan laju aliran udara pada laju aliran gas tertentu. Saat terjadinya *lift-up* yakni pangkal nyala mulai terangkat ke *ring* laju aliran udara yang ditunjukkan skala pada rotameter dicatat dan panjang nyala dari pembacaan pada mistar baja dicatat. Saat bersamaan juga nyala dipotret menggunakan kamera digital dan citra disimpan dengan memotret menggunakan kamera *Infra Red*

Thermograph. Demikian pula pengukuran temperatur maksimum nyala api menggunakan *Thermograph Infra View*. Temperatur ujung *burner* dan temperatur *ring* diukur pula menggunakan thermokopel type K. Laju aliran udara dinaikkan perlahan untuk mencapai kondisi *blow off* dan laju aliran udara yang terbaca pada skala rotameter dicatat. Percobaan diulangi pada kenaikan laju aliran gas 1 cm kemudian diulangi kembali pada kenaikan jarak *ring* 0,5 cm. Keseluruhan percobaan dengan *ring* ini dilakukan kembali dengan diameter dalam *ring* yang berbeda kemudian diulangi kembali dengan jenis material *ring* yang berbeda.

Salah satu citra pengukuran ujung *burner*, temperatur *ring* dan panjang nyala menggunakan perangkat lunak pengolah citra ditampilkan pada Gambar 3.11. Sedangkan hasil pengukuran temperatur nyala maksimum menggunakan *Thermograph Infra View* adalah berupa lembaran kumpulan data seperti pada Gambar 3.12.



Gambar 3.11. Citra Pengukuran Temperatur dan Panjang Nyala

Dalam pengukuran suhu *ring*, besaran yang digunakan adalah $^{\circ}\text{C}$. Penelitian ini menetapkan nilai aliran dari gas adalah sebesar 0,5, 1, 1,5, dan 2 cm. Penempatan posisi *ring* adalah pada ketinggian 10, 20 dan 30 mm, di atas ujung *burner*. Aliran udara dicatat pada saat terjadinya fenomena *lift-up* dan diukur tinggi nyala api *premix* dari ujung *burner*.

Time	Temp	Sensor 1
8:42:23 PM	308.5	30.3
8:42:24 PM	308.5	30.3
8:42:25 PM	308.7	30.3
8:42:26 PM	308.3	30.3
8:42:27 PM	308.8	30.3
8:42:28 PM	310.0	30.3
8:42:29 PM	308.9	30.3
8:42:30 PM	310.4	30.3
8:42:31 PM	310.8	30.3
8:42:32 PM	311.1	30.3
8:42:33 PM	311.0	30.3
8:42:34 PM	311.0	30.3
8:42:35 PM	310.3	30.4
8:42:36 PM	308.8	30.3
8:42:37 PM	308.8	30.3
8:42:38 PM	310.0	30.3
8:42:39 PM	310.0	30.3
8:42:40 PM	309.3	30.3
8:42:41 PM	307.9	30.4
8:42:42 PM	307.5	30.4
8:42:43 PM	307.7	30.4
8:42:44 PM	307.1	30.4
8:42:45 PM	307.1	30.3
8:42:46 PM	306.5	30.3
8:42:47 PM	307.1	30.3
8:42:48 PM	308.3	30.3
8:42:49 PM	307.8	30.3
8:42:50 PM	308.2	30.4
8:42:51 PM	308.2	30.3

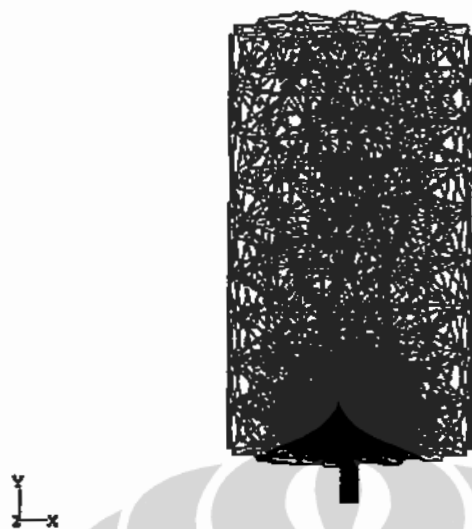
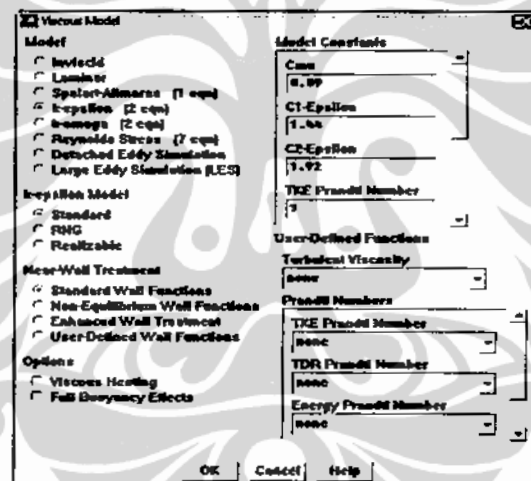
Gambar 3.12. Tampilan Data Hasil Pengukuran dengan *Thermograph Infra View*

3.4 Simulasi dengan Perangkat Lunak

Simulasi CFD dilakukan menggunakan perangkat lunak komersial Fluent 6.2 untuk mengetahui medan aliran melewati *ring* serta distribusi temperatur pada *ring*. Konfigurasi *burner* dibuat dengan perangkat lunak Solidwork. Sedangkan proses *meshing* menggunakan Gambit. Simulasi dilakukan dengan konfigurasi *burner* Bunsen dengan posisi *ring* 1, 2 dan 3 cm dari ujung *burner* untuk diameter dalam *ring* 0,7, 0,1, dan 1,4 cm. Parameter input yakni fraksi massa propana dan kecepatan campuran disesuaikan dengan tabel hasil eksperimen.

Sesuai dengan langkah-langkah yang disusun berurutan pada pilihan menu yang tersedia dari kiri ke kanan pada tampilan jendela utama Fluent dilakukan pemeriksaan *grid*, penentuan skala satuan dan penampilan *grid* seperti pada Gambar 3.13.

Model penyelesaian yang dipilih adalah turbulensi $k-\epsilon$ dengan k adalah energi kinetik dan ϵ adalah laju disipasi. Koefisien-koefisien pada persamaan ini antara lain C_{μ} adalah 0,09, $C_{1,\epsilon}$ adalah 1,44 dan $C_{2,\epsilon}$ adalah 1,92 [69] seperti pada tampilan Gambar 3.14. Bilangan Schmidt untuk propana ditetapkan 1,366 [22].

Gambar 3.13. Tampilan *Grid*

Gambar 3.14. Tampilan Aktivasi Model Pengaruh Viskositas

Penentuan konstanta-konstanta tersebut disesuaikan dengan Bilangan Reynolds yang cukup tinggi yakni diatas 50.000. Persamaan *species transport* diaktifkan dengan pilihan reaksi volumetris dan jenis reaksi adalah *eddy dissipation rate* [70].

Jenis dan sifat material dapat dipilih dari *data base* Fluent maupun didefinisikan dengan menginputkan sifatnya. Penentuan material fluida untuk simulasi *species transport* adalah *mixture-material*, yang merupakan campuran dari beberapa spesies yakni untuk kondisi inlet adalah [71]:

- [2] Keramik dengan massa jenis adalah 2325 kg/m^3 , koefisien panas spesifik, C_p adalah 960 J/kg.K dan konduktivitas panas $1,3 \text{ W/m.K}$

Kondisi batas ditentukan sesuai dengan kondisi masing-masing bagian seperti pada kondisi *inlet* dimasukkan data fraksi massa campuran, kecepatan campuran dan tekanannya. Pada bagian *ring* yang ditetapkan sebagai daerah padat dimasukkan data ketebalan *ring* dan perpindahan panas konduksi yang terjadi serta temperatur awal *ring*.

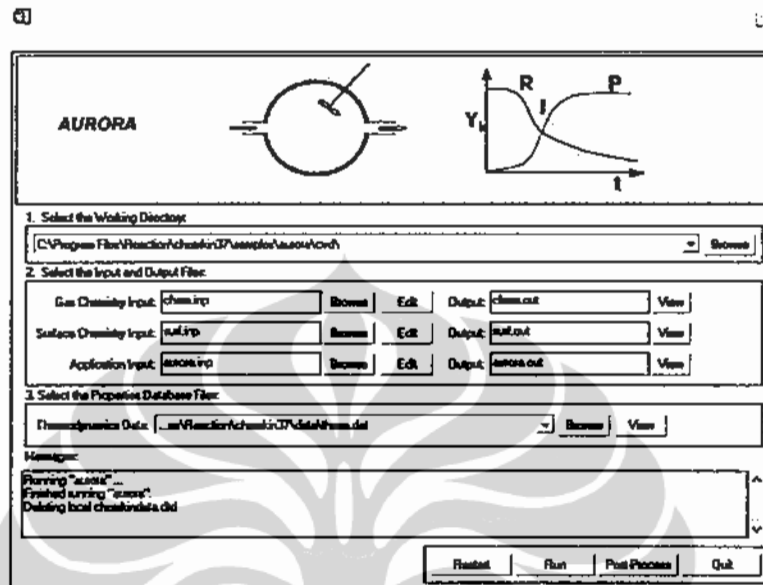
Kondisi operasi merupakan kondisi dimana domain tersebut bekerja. Nilai yang dimasukkan adalah tekanan yang terjadi selama operasi yakni tekanan atmosfer karena kondisi *burner* adalah kondisi terbuka. Nilai percepatan gravitasi dimasukkan $9,8 \text{ m}^2/\text{s}^2$ sesuai dengan arah sumbu kerja yakni sumbu Y. Massa jenis campuran juga ditetapkan sebagai nilai masukan pada daerah kerja.

Simulasi pembakaran dengan mengaktifkan model *premix combustion* juga dilakukan pada diameter dalam *ring* $0,7 \text{ cm}$ dan posisi *ring* 3 cm . Penyalaan yang digunakan pada simulasi ini adalah *spark ignition* dengan menentukan posisi imajiner dari *spark* pada tepi *tip burner* serta energi penyalaan minimum untuk propana adalah $0,25 \text{ mJ}$. Pada simulasi ini dimasukkan energi penyalaan pada kondisi superkritis yakni $1,23 \text{ mJ}$ karena kondisi masukan sangat kurus [73].

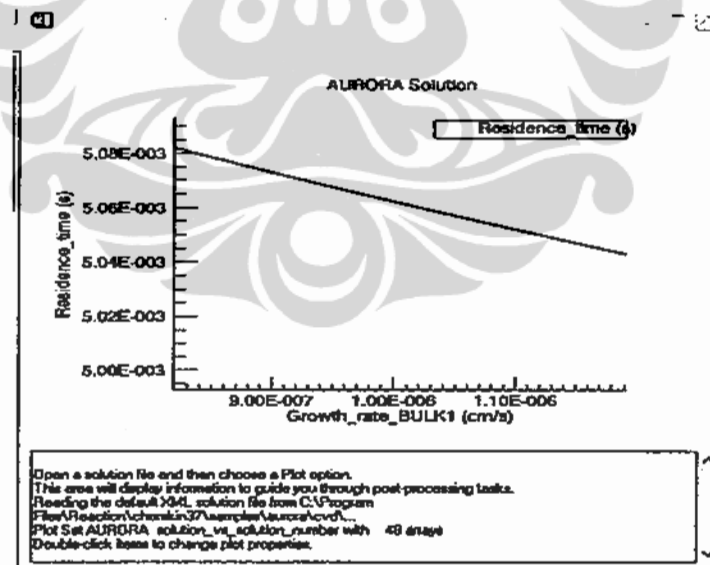
Hasil simulasi yang ditampilkan adalah pola medan aliran melewati *ring*, distribusi temperatur nyala dari ujung *burner* sampai ujung nyala serta temperatur *ring* dengan terlebih dahulu melakukan iterasi sampai diperoleh hasil yang konvergen.

Simulasi dengan perangkat lunak Chemkin juga dilakukan untuk menentukan *blow off residence time* [14,74]. Aplikasi yang digunakan adalah AURORA atau yang sesuai dengan pendekatan *WSR* atau *PSR*. Simulasi dilakukan dengan terlebih dahulu menyusun persamaan reaksi yang dibuat dalam file dengan *extension .txt* sebagai file masukan yang dijalankan pada *gas chemistry input*. Persamaan reaksi disusun sesuai dengan GRI Mech 3 [36]. Sedangkan program untuk penentuan *blow off residence time* dibuat dengan menggunakan file *aurora.inp* yang terdapat pada *application input* dengan menyesuaikan kondisi nyala dan memasukkan nilai laju aliran volume reaktan. Simulasi dapat dijalankan dari jendela utama aplikasi AURORA seperti tampak

pada Gambar 3.16. Hasil simulasi dapat ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 3.17.



Gambar 3.16. Jendela Utama Aplikasi AURORA



Gambar 3.17. Tampilan Output dalam Bentuk Grafik

Penentuan temperatur nyala untuk perhitungan laju kehilangan kalor pada pendekatan Spalding dilakukan dengan menggunakan aplikasi PREMIX. File input untuk *gas chemistry input* dapat dipergunakan *file* yang sama namun untuk *application input* digunakan *file* premix.inp dengan memasukkan nilai tekanan

reaktan dan laju aliran reaktan yang sesuai. Hasil penentuan temperatur nyala juga dapat ditampilkan dalam bentuk grafik.

3.5 Kajian Teoritis Fenomena *Flame Lift-up*, Kestabilan Nyala dan Panjang Nyala

Untuk menjelaskan terjadinya fenomena *flame lift-up* dilakukan analisis laju kehilangan kalor dari nyala sesuai dengan pendekatan Spalding. Didefinisikan oleh Spalding kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala yang merupakan fungsi laju kehilangan kalor dari nyala seperti pada Persamaan 3.1 [35].

$$S_{L,c} = \frac{1}{C_p \rho_u} \sqrt{\frac{k_f Q_{loss}}{(T_f - T_u) K_c \lambda_c^+}} \quad (3.1)$$

Dengan mengacu pada terjadinya *lift-off* yakni keseimbangan kecepatan pembakaran dengan kecepatan aliran maka terjadinya *lift-up* adalah saat tercapai keseimbangan kecepatan pembakaran dengan kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala. Hal ini sesuai juga dengan teori perambatan nyala.

Penentuan laju kehilangan kalor ditentukan dengan pendekatan nyala Bunsen berbentuk kerucut. Besarnya laju kehilangan kalor dari nyala digunakan untuk menentukan kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala seperti pada Persamaan 3.1.

Kestabilan nyala api setelah *lift-up* dianalisis daerah stabilitas nyalanya berdasarkan diagram Fuidge [23] dengan menentukan *AFR* dan beban pembakaran atau *Burning Load*. *AFR* ditentukan dengan Persamaan 2.2 dan *Burning Load* dihitung dengan Persamaan 3.2.

$$BL = \frac{\eta \gamma \times HV}{A} \quad (3.2)$$

Berdasarkan kurva *blow off* setelah *lift-up* dan kurva awal terjadinya *lift-up* pada Fuidge diagram dihitung luasan daerah di bawah kurva yang menunjukkan daerah kestabilan nyala api setelah *lift-up*. Daerah ini juga dibandingkan dengan daerah antara kurva *blow off* tanpa adanya fenomena *flame lift-up* dan kurva *blow off* setelah *lift-up*.

Kajian teoritis tentang fenomena *blow off* dari nyala api setelah *lift-up* juga dilakukan dengan pendekatan korelasi *blow off* yang umum digunakan yakni Bilangan Damkohler. Bilangan Damkohler dinyatakan sebagai rasio waktu aliran

fisik atau *flow time* dan waktu reaksi kimia atau *chemical time* [14]. Waktu aliran fisik ditentukan rasio skala panjang karakteristik dan skala kecepatan aliran seperti pada Persamaan 3.3 [14].

$$\tau_{flow} = \frac{D_{ref}}{U_{ref}} \quad (3.3)$$

D_{ref} adalah lebar dari *bluff body* dan $U_{ref} = U(1-BR)$ dengan BR adalah *blockage ratio* dari *bluff body* yakni rasio maksimum luas penampang *ring* dengan luas penampang lubang *ring*.

Chemical time ditentukan dari *blow off residence time* ditentukan dari hasil simulasi menggunakan perangkat lunak CHEMKIN berdasarkan Persamaan 3.4 [68]:

$$\tau_{res} = \frac{\rho V}{\left[\sum_{i=1}^{N_{fuel(j)}} \dot{m}_i^{(j)} + \sum_{r=1}^{N_{ox}} \dot{m}_r^{(r)} R_{rj} \right]} \quad (3.4)$$

Kajian tentang panjang nyala api *lift-up* terlebih dahulu dilakukan secara grafis dengan membandingkan pengaruh *AFR*, posisi *ring* dan material *ring* terhadap panjang nyala api. Berdasarkan hasil eksperimental ditentukan korelasi panjang nyala berdasarkan korelasi Rokke dengan metode regresi linier dengan menambahkan pengaruh Bilangan Lewis, perbandingan jarak *ring* dengan diameter dalam *ring*, perbandingan antara selisih temperatur *ring* dan temperatur ujung *burner* dengan temperatur *ring*.

Kajian teoritis panjang nyala juga dilakukan dengan penggabungan persamaan kekekalan massa, momentum, konsentrasi dan energi pada kondisi aliran pancaran atau *jet flow*. Pendekatan ini mengacu pada kondisi aliran setelah *bluff body* yang mirip dengan aliran pancaran [14, 75]. Terlebih dahulu diturunkan radius nyala atau lokasi pada tepi nyala dengan fraksi massa bahan bakar adalah 0,0005 [63] atau perubahan parameter atau *progress variable* yang dapat dinyatakan dalam pengurangan temperatur atau pengurangan fraksi massa dari gas yang terbakar sebagai fungsi dari sumbu nyala. Panjang nyala api premix dapat ditentukan dengan mencari solusi pada turunan fungsi kedua sama dengan nol. *Progress variabel* pada pembakaran *premixed* identik dengan rasio campuran

pada pembakaran *non premixed* yakni *progress variable* = 0 adalah kondisi *unburnt gas* sama dengan kondisi rasio campuran = 1. Sebaliknya *progress variabel* = 1 yakni pada kondisi *burnt gas* identik dengan fraksi campuran = 0 pada pembakaran *non premixed*.

Perhitungan panjang nyala berdasarkan persamaan matematika kemudian dibandingkan dengan panjang nyala dari hasil pengukuran pada percobaan di laboratorium dan ditampilkan dalam bentuk grafik.



BAB 4

FENOMENA FLAME LIFT-UP

Kajian tentang fenomena *flame lift-up* dilakukan secara eksperimen dan teoritis serta simulasi menggunakan perangkat lunak komputer. Pada 4.1 ditampilkan data-data hasil kajian eksperimental secara keseluruhan serta hasil pengamatan secara visual mengenai fenomena *flame lift-up*. Kajian teoritis mengenai terjadinya fenomena *flame lift-up* berdasarkan teori kehilangan kalor dari Spalding dipaparkan pada Sub Bab 4.2 dengan didukung hasil simulasi menggunakan Fluent 6.2.

4.1 Kajian Eksperimental

4.1.1 Hasil Percobaan

Percobaan menggunakan *burner* Bunsen dilakukan tanpa *ring* atau tanpa adanya fenomena *flame lift-up* terlebih dahulu, untuk memperoleh daerah kestabilan nyala gas propana, kondisi *blow off* serta pengukuran temperatur ujung *burner*. Percobaan dengan *ring* dilakukan untuk memperoleh data-data yang diukur saat terjadinya *lift-up* serta saat *blow off* setelah *lift-up*. Tabel 4.1 adalah hasil percobaan tanpa *ring* atau tanpa fenomena *lift-up* untuk menentukan daerah kestabilan nyala berdasarkan kurva *yellow tip* dan kurva *lift-off* atau *blow off* serta kurva *flash back*. Tabel 4.2 sampai dengan Tabel 4.4 adalah hasil percobaan dengan fenomena *lift-up* yakni dengan *ring stainless steel* AISI 304 dan Tabel 4.5 dengan *ring* keramik diameter dalam 10 mm.

Tabel 4.1. Hasil Percobaan Tanpa Ring

Laju aliran propana ($10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$)	Laju aliran udara ($10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$)				
	<i>Yellow Tip</i>	<i>Flash back1</i>	<i>Flash back 2</i>	<i>Lift off</i>	<i>Blow off</i>
1,9	15,1	55,7	48,9	62,5	74,3
2,1	20,2	56,4	50,6	60,8	77,7
2,3	23,6	55,3	52,3	61,5	81,7
2,5	25,3			57,4	85,4
2,7	25,9			55,7	88,8
2,9	28,7			52,3	91,5
3,1	30,3			92,9	93,0

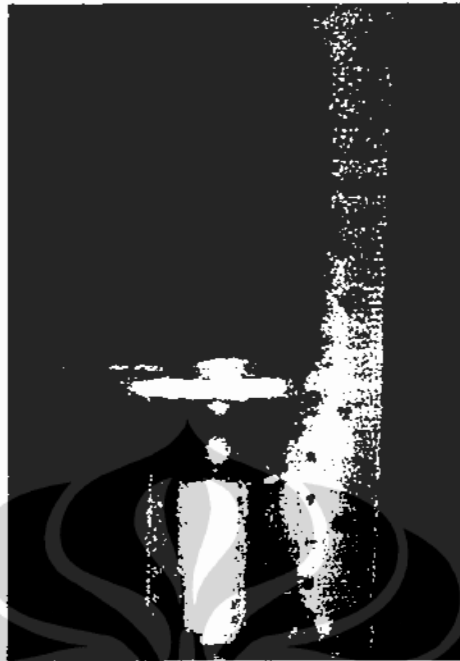
Tabel 4.2. Hasil Percobaan dengan *Ring Stainless Steel* $D_i = 7$ mm

Do : 30 mm

Di : 7 mm

Ketinggian Ring (x) (mm)	Laju Aliran Gas ($10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$)	Laju Aliran Udara ($10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$)		Tinggi Nyala Api (mm)
		<i>lift-up</i>	<i>blow-off</i>	
10	1,9	7,67	7,94	185
	2,1	8,07	8,34	190
	2,3	8,41	8,65	195
	2,5	8,78	9,02	200
	2,7	9,09	9,39	205
	2,9	9,42	9,63	210
20	1,9	7,50	7,87	140
	2,1	7,80	8,11	155
	2,3	8,17	8,41	165
	2,5	8,54	8,81	175
	2,7	8,88	9,19	190
	2,9	9,19	9,46	200
30	1,9	7,43	7,73	145
	2,1	7,73	8,04	150
	2,3	8,11	8,31	160
	2,5	8,48	8,71	165
	2,7	8,78	9,02	170
	2,9	9,15	9,29	175
40	1,9	7,50	7,67	135
	2,1	7,80	7,94	145
	2,3	8,17	8,31	150
	2,5	8,54	8,65	165
	2,7	8,85	8,95	175
	2,9	9,15	9,22	185

Pada percobaan dengan *ring* diameter 7 mm dan laju aliran bahan bakar $2,9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ terlihat bahwa pada posisi *ring* 10 mm setelah fenomena *flame lift-up* nyala kadang tidak sepenuhnya berada diatas *ring* namun sebagian cenderung tetap menempel di ujung *burner* seperti pada Gambar 4.1. Nyala ini hampir serupa dengan *unattached flames in impinging flows* [20].



Gambar 4.1. Nyala yang Menempel pada *Ring* Bagian Bawah

Pada posisi *ring* 20 mm dan 40 mm nyala melompat ke *ring* dan dapat sepenuhnya di atas *ring*. Bagian nyala tepat keluar dari lubang *ring* terpencar ke arah radial sehingga membuat radius nyala tepat di *ring* lebih besar dari radius *ring* sendiri seperti pada Gambar 4.2. Hal ini disebabkan oleh porsi campuran yang tidak melewati lubang *ring*, cukup besar dan kemudian terbakar di sekeliling *ring*.



Gambar 4.2. Nyala Arah Radial *Ring*

Tabel 4.3. Hasil Percobaan dengan *Ring Stainless Steel* Di =10 mm

Do : 30 mm

Di : 10 mm

Ketinggian <i>Ring</i> (x) (mm)	Laju Aliran Gas (10^{-5} m^3/s)	Laju Aliran Udara ($10^{-5} m^3/s$)		Tinggi Nyala Api (mm)	Tempera tur <i>ring</i> ($^{\circ}C$)	Tempera tur ti <i>ring</i> ($^{\circ}C$)
		<i>lift-up</i>	<i>blow-off</i>			
10	1,9	7,77	8,11	150	724,23	55,83
	2,1	8,17	8,54	180	778,99	56,21
	2,3	8,58	8,88	190	751,88	46,92
	2,5	8,81	9,12	195	764,27	56,60
	2,7	9,19	9,42	210	792,31	55,83
	2,9	9,49	9,63	220	817,10	53,50
20	1,9	7,50	8,07	160	805,48	49,24
	2,1	7,87	8,41	185	842,66	51,25
	2,3	8,24	8,68	190	859,71	48,16
	2,5	8,54	8,98	200	893,79	55,28
	2,7	8,95	9,42	203	906,18	53,73
	2,9	9,22	9,63	215	872,87	51,56
30	1,9	7,40	7,53	160	713,31	70,23
	2,1	7,70	7,90	170	832,59	61,48
	2,3	8,14	8,41	285	948,78	58,92
	2,5	8,38	8,71	298	968,92	56,60
	2,7	8,78	8,92	300	985,19	58,23
	2,9	9,19	9,36	300	1009,98	55,98
40	1,9	7,26	7,50	155		
	2,1	7,63	7,80	180		
	2,3	8,07	8,17	192		
	2,5	8,48	8,61	185		
	2,7	8,78	8,92	190		
	2,9	9,15	9,29	199		

Pada posisi *ring* 40 mm nyala api sedikit susah mencapai *lift-up* karena sangat mudah terjadi *blow off* saat laju kenaikan udara diperbesar. Nyala yang terpecah ke arah radial dari *ring* pun telah berkurang karena campuran yang tidak melewati lubang *ring* bercampur dengan udara sekitar sehingga batas mampu nyala dari campuran telah terlewati. Hal ini tampak pada hasil simulasi Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Penurunan Konsentrasi Bahan Bakar

Pada percobaan dengan diameter dalam *ring* 10 mm dan posisi 10 mm nyala dapat sepenuhnya berada di atas *ring* jika dibandingkan dengan diameter dalam *ring* 7 mm. Pada posisi 30 mm tercapai panjang nyala yang maksimum jika dibandingkan dengan posisi *ring* yang lain. Sedangkan pada posisi *ring* 40 mm nyala api pada *ring* yang ke arah radial telah berkurang dan turbulensi aliran juga telah jauh berkurang dibandingkan dengan posisi yang lebih rendah.

Kerucut nyala juga tidak terlihat jelas batasnya menandakan nyala yang sangat miskin bahan bakar karena pada daerah antara ujung *ring* dan *ring* terjadi pencampuran dengan udara.

Pada percobaan dengan diameter dalam *ring* 14 mm dan posisi *ring* 10 mm nyala sangat stabil di atas *ring* meskipun turbulensi aliran tampak paling dominan ditandai dengan timbulnya suara berdengung dari dalam tabung. Kerucut nyala pada posisi 40 mm sama sekali tidak terlihat karena nyala sangat tipis. Demikian pula porsi nyala pada *ring* ke arah radial *ring* tidak ada lagi. Hal ini menandakan campuran yang terbakar hanya yang melalui lubang *ring* saja sedangkan campuran yang tidak melewati lubang *ring* sudah melewati batas mampu nyalanya akibat bercampur dengan udara. Pada posisi *ring* yang lebih tinggi setelah *lift-up* tidak lagi terdengar suara mendengung namun sebelum *lift-up* saat aliran udara diperbesar suara mendengung sangat keras.

Tabel 4.4. Hasil Percobaan dengan *Ring Stainless Steel* $D_i = 14$ mm

Do : 30 mm

Di : 14 mm

Ketinggian <i>Ring</i> (x) (mm)	Laju Aliran Gas (10^{-5} m^3/s)	Laju Aliran Udara (10^{-5} m^3/s)		Tinggi Nyala Api (mm)
		<i>lift-up</i>	<i>blow-off</i>	
10	1,9	7,43	7,90	190
	2,1	7,90	8,21	195
	2,3	8,34	8,68	205
	2,5	8,71	9,02	210
	2,7	9,02	9,39	230
	2,9	9,32	9,69	255
20	1,9	7,40	7,60	180
	2,1	7,77	7,94	195
	2,3	8,14	8,27	220
	2,5	8,41	8,58	240
	2,7	8,78	8,98	255
	2,9	9,12	9,36	265
30	1,9	7,36	7,53	210
	2,1	7,70	7,80	220
	2,3	8,07	8,24	225
	2,5	8,38	8,58	240
	2,7	8,75	8,92	250
	2,9	9,09	9,22	255
40	1,9	7,19	7,40	205
	2,1	7,63	7,73	220
	2,3	7,94	8,07	225
	2,5	8,34	8,44	240
	2,7	8,71	8,81	250
	2,9	9,09	9,19	260

Hasil percobaan dengan *ring* keramik diameter dalam 10 mm ditampilkan pada Tabel 4.5. Fenomena *flame lift-up* terjadi pada laju aliran udara yang jauh lebih rendah dari laju aliran udara pada *ring stainless steel*. Nyala setelah *lift-up* terlihat lebih panjang. Pada posisi *ring* 10 mm tetap terlihat turbulensi yang lebih tinggi ditandai dengan terpencarnya nyala ke arah radial *ring*. Rentang laju aliran udara antara saat terjadinya *lift-up* dengan saat *blow off* juga lebih besar.

Tabel 4.5. Hasil Percobaan dengan Ring Keramik Di =10 mm

Ketinggian Ring (x) (mm)	Laju Aliran Gas ($10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$)	Laju Aliran Udara ($10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$)		Tinggi Nyala Api (mm)
		<i>lift-up</i>	<i>Blow-off</i>	
10	1,9	6,26	6,517	295
	2,1	6,63	6,762	325
	2,3	6,93	7,015	345
	2,5	7,16	7,425	355
	2,7	7,79	7,695	365
	2,9	8,11	7,772	375
20	1,9	5,90	6,593	315
	2,1	6,26	7,119	345
	2,3	6,63	7,797	347
	2,5	7,01	7,925	349
	2,7	7,39	8,262	365
	2,9	7,79	8,613	375
30	1,9	5,76	6,593	285
	2,1	6,19	7,098	300
	2,3	6,56	7,774	318
	2,5	6,89	8,275	325
	2,7	7,47	8,262	345
	2,9	7,79	8,265	355
40	1,9	5,73	6,517	295
	2,1	6,19	6,783	305
	2,3	6,63	7,084	315
	2,5	7,01	7,475	325
	2,7	7,47	7,722	345
	2,9	7,79	8,033	360

Hasil pengukuran laju aliran udara dan laju aliran gas propana yang disetarakan dengan *wet gas meter* menunjukkan bahwa faktor kesalahan sistematis adalah sama dengan faktor kesalahan *wet gas meter* yakni sebesar 0,1 %. Kesalahan acak setiap pengukuran yang diulang 5 kali menimbulkan kesalahan acak yang berkisar antara 2-3 %. Analisis kesalahan secara rinci ditampilkan pada Lampiran 2.

Berdasarkan tabel-tabel hasil eksperimen kemudian dihitung debit aliran bahan bakar yakni propana berdasarkan tabel penyetaraan bahan bakar dan debit

udara berdasarkan tabel penyetaraan udara, *Burning Load*, *AFR*, fraksi mol bahan bakar, fraksi massa bahan bakar dan equivalen ratio. Hasil perhitungannya ditampilkan pada Tabel 4.6 sampai dengan Tabel 4.10 sedangkan contoh perhitungannya secara rinci ditampilkan pada Lampiran 3.

Hasil perhitungan dari percobaan tanpa *ring* ditampilkan dengan 2 tabel yang berbeda yakni untuk penentuan daerah kestabilan nyala berdasarkan kondisi *yellow tip*, *flash back* dan *lift-off* dan hasil pengukuran temperatur ujung *burner* pada variasi *AFR* yang berbeda.

Tabel 4.6a. Hasil Perhitungan untuk Percobaan Tanpa *Ring*

<i>Burning load</i> (kW/m ²)	<i>AFR</i>				
	<i>Yellow Tip</i>	<i>Flash Back1</i>	<i>Flash Back2</i>	<i>Lift off</i>	<i>Blow off</i>
10.417	8,0	29,3	25,8	32,9	39,1
11.513	9,6	26,8	24,1	28,9	37,0
12.610	10,3	24,0	22,7	26,8	35,5
13.706	10,1			22,9	34,2
14.803	9,6			20,6	32,9
15.899	9,9			18,0	31,6
16.996	9,8				30,0

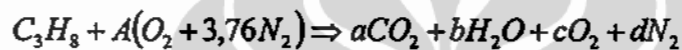
Tabel 4.6.b. Hasil Pengukuran Temperatur Ujung *Burner*

<i>AFR</i>	17,3	19,2	21,2	23,3	25,4	27,6	29,9	32,2	34,6
Temperatur <i>Tip burner</i>	101	137	144	148	147	146	144	138	137

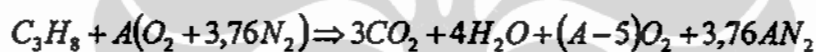
Pengukuran *yellow tip* hanya sampai tujuh variasi laju aliran gas karena dengan kenaikan laju aliran gas fenomena *yellow tip* diperoleh hampir pada laju aliran yang sama. Sedangkan *flash back* diperoleh hanya pada tiga nilai laju aliran karena setelah itu nyala sudah langsung *lift-off* bahkan *blow off*. Demikian pula halnya pengukuran *lift-off*. Pada laju aliran gas yang lebih tinggi tidak timbul *lift-off* tapi nyala langsung *blow-off*. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan nilai *blow off* sebagai pengaruh dari diameter *burner* [35,55].

Pengukuran daerah kestabilan nyala dilakukan hanya sampai indikator laju aliran gas 4 cm karena keterbatasan indikator laju pengukuran udara yang hanya sampai 30 cm. Sedangkan untuk pengukuran temperatur ujung *burner* diperoleh lebih banyak variasi pengukuran karena pada satu nilai laju aliran gas dapat diperoleh lebih banyak variasi laju aliran udara atau *AFR*.

Penentuan *AFR* yang digunakan adalah *AFR* dalam perbandingan volume yang sesuai dengan perbandingan molar karena bahan bakar berwujud gas. Sedangkan penentuan *AFR* stoikiometrik propana dapat ditentukan dari kebutuhan O_2 sebesar 5 mol berdasarkan persamaan reaksi [37] :



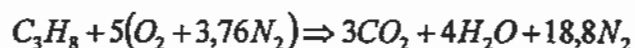
Berdasarkan hukum kekekalan massa maka persamaan akan berubah menjadi



Kondisi stoikiometri akan tercapai pada kondisi hasil reaksi tidak terdapat O_2 sehingga $A=5$.

Dengan asumsi kandungan oksigen dalam udara adalah 21% maka untuk setiap volume oksigen terdapat 1/21% volume udara atau 4,76 volume udara. Volume gas identik dengan jumlah mol, sehingga *AFR* stoikiometri propana yang membutuhkan 5 mol O_2 maka udara yang dibutuhkan adalah $5 \times 4,76 = 23,8$

AFR (*Air Fuel Ratio*) dapat juga dinyatakan dalam perbandingan antara massa udara dan massa bahan bakar. *AFR* stoikiometrik propana sesuai dengan persamaan reaksi :



maka

$$AFR = \frac{\text{massa udara}}{\text{massa bahan bakar}} = \frac{A(32 + 3,76 \times 28)}{(3 \times 12 + 8)} = 3,12A$$

Sehingga *AFR* stokiometrik propana dalam perbandingan massa adalah $3,12 \times 5 = 15,6$. Sedangkan *AFR* stoikiometrik dalam perbandingan volume adalah 23,8.

Pada penelitian ini kondisi kelembaban udara juga diperhitungkan dengan mengukur kelembaban udara relatif selama percobaan dan diperoleh rata-rata kelembaban relatif adalah 41%. Pada temperatur $29^{\circ}C$ berdasarkan diagram

psikometrik diperoleh rasio kelembaban adalah 0,011 yakni dalam 1000 gram udara kering terdapat 11 gram uap air. Massa uap air diperhitungkan dalam persamaan reaksi sehingga *AFR* stoikiometrik berubah menjadi 15,8 atau *AFR* dalam perbandingan volume menjadi 24,8.

Nilai kesalahan pada penentuan *AFR*, fraksi massa propana, dan *Burning Load* timbul dari perambatan kesalahan pengukuran laju aliran udara dan laju aliran bahan bakar. Dengan mengacu pada penurunan persamaan perambatan kesalahan berdasarkan Teorema Pythagoras [76] maka kesalahan penentuan *AFR* dihitung berdasarkan Persamaan 4.1:

$$\left(\frac{\Delta AFR}{AFR}\right)^2 = \left(\frac{\Delta Q_a}{Q_a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q_f}{Q_f}\right)^2 \quad (4.1)$$

Kesalahan penentuan fraksi massa propana dihitung berdasarkan kesalahan penentuan massa campuran dan massa propana. Persamaan untuk menentukan kesalahan massa campuran adalah:

$$(\Delta m)^2 = (\Delta m_f)^2 + (\Delta m_a)^2 \quad (4.2)$$

$$(\Delta m_f)^2 = (\Delta Q_f)^2 + (\Delta \rho_f)^2 \quad (4.3)$$

$$(\Delta m_a)^2 = (\Delta Q_a)^2 + (\Delta \rho_a)^2 \quad (4.4)$$

Penentuan kesalahan fraksi massa propana dapat ditentukan dari Persamaan 4.5.

$$\left(\frac{\Delta Y_f}{Y_f}\right)^2 = \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q_f}{Q_f}\right)^2 \quad (4.5)$$

Penentuan kesalahan *Burning Load* dilakukan dengan menentukan terlebih dahulu kesalahan penentuan kesalahan luas penampang *burner* yakni:

$$\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 = 2\left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 \quad (4.6)$$

$$\left(\frac{\Delta BL}{BL}\right)^2 = \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_f}{m_f}\right)^2 \quad (4.7)$$

Penentuan kesalahan masing-masing parameter tersebut ditampilkan pada Lampiran 4. dengan memperhitungkan pula kesalahan acak karena pengulangan pengukuran masing-masing parameter.

Tabel 4.7. Hasil Perhitungan Percobaan dengan *Ring Stainless Steel* $D_i = 7$ mm

Do : 30 mm

Di : 7 mm

Ketinggian Ring (x) (mm)	Burning load (kW/m ²)	AFR		Rasio equiv	Fraksi massa propana	Fraksi mol propana
		lift-up	blow-off			
10	10.417	40,3	42	0,59	0,035	0,023
	11.513	38,4	40	0,62	0,037	0,025
	12.610	36,6	38	0,65	0,039	0,026
	13.706	35,1	36	0,68	0,040	0,027
	14.803	33,6	35	0,71	0,042	0,028
	15.899	32,5	33	0,73	0,044	0,029
20	10.417	39,5	41	0,60	0,036	0,024
	11.513	37,1	39	0,64	0,038	0,025
	12.610	35,5	37	0,67	0,040	0,027
	13.706	34,2	35	0,70	0,041	0,028
	14.803	32,9	34	0,72	0,043	0,029
	15.899	31,7	33	0,75	0,045	0,030
30	10.417	39,1	41	0,61	0,036	0,024
	11.513	36,8	38	0,65	0,039	0,026
	12.610	35,2	36	0,68	0,040	0,027
	13.706	33,9	35	0,70	0,042	0,028
	14.803	32,5	33	0,73	0,044	0,029
	15.899	31,6	32	0,75	0,045	0,030
40	10.417	39,5	40	0,60	0,036	0,024
	11.513	37,1	38	0,64	0,038	0,025
	12.610	35,5	36	0,67	0,040	0,027
	13.706	34,2	35	0,70	0,041	0,028
	14.803	32,8	33	0,73	0,043	0,029
	15.899	31,6	32	0,75	0,045	0,030

Tabel 4.7. menampilkan hasil perhitungan dari hasil percobaan dengan *ring stainless steel* diameter dalam 7 mm. Sesuai rumus untuk menentukan AFR maka laju aliran volume udara saat *lift-up* sebanding dengan AFR saat *lift-up*. Demikian pula nilai *Burning Load* yang sebanding dengan laju aliran volume bahan bakar. Sedangkan nilai rasio equivalen berbanding terbalik dengan AFR karena AFR stoikiometrik propana konstan.

Tabel 4.8. Hasil Perhitungan Percobaan dengan Ring Stainless Steel $D_i = 10$ mm

Do : 30 mm

Di : 10 mm

Ketinggian Ring (x) (mm)	Burning load (kW/m ²)	AFR		Rasio equiv	Fraksi massa propana	Fraksi mol propana
		lift-up	blow-off			
10	10.417	40,9	42,7	0,58	0,035	0,023
	11.513	38,9	40,7	0,61	0,037	0,024
	12.610	37,3	38,6	0,64	0,038	0,025
	13.706	35,3	36,5	0,68	0,040	0,027
	14.803	34,0	34,9	0,70	0,042	0,028
	15.899	32,7	33,2	0,73	0,043	0,029
20	10.417	39,5	42,5	0,60	0,036	0,024
	11.513	37,5	40,0	0,64	0,038	0,025
	12.610	35,8	37,7	0,66	0,040	0,026
	13.706	34,2	35,9	0,70	0,041	0,028
	14.803	33,1	34,9	0,72	0,043	0,028
	15.899	31,8	33,2	0,75	0,044	0,030
30	10.417	38,9	39,6	0,61	0,037	0,024
	11.513	36,7	37,6	0,65	0,039	0,026
	12.610	35,4	36,6	0,67	0,040	0,027
	13.706	33,5	34,9	0,71	0,042	0,028
	14.803	32,5	33,0	0,73	0,044	0,029
	15.899	31,7	32,3	0,75	0,045	0,030
40	10.417	38,2	39,5	0,62	0,037	0,025
	11.513	36,3	37,1	0,65	0,039	0,026
	12.610	35,1	35,5	0,68	0,040	0,027
	13.706	33,9	34,4	0,70	0,042	0,028
	14.803	32,5	33,0	0,73	0,044	0,029
	15.899	31,33	32,0	0,75	0,045	0,030

Hasil perhitungan percobaan dengan ring stainless steel diameter dalam 10 dan 14 mm ditampilkan pada Tabel 4.8 dan 4.9. Antara fraksi massa bahan bakar, fraksi massa udara dan rasio equivalens mempunyai kecenderungan yang sama yakni agak semakin tinggi jika laju aliran volume bahan bakar meningkat. Hal ini berulang pada posisi ring yang berbeda.

Tabel 4.9. Hasil Perhitungan Percobaan dengan Ring Stainless Steel $D_i = 14$ mm

Do : 30 mm

Di : 14 mm

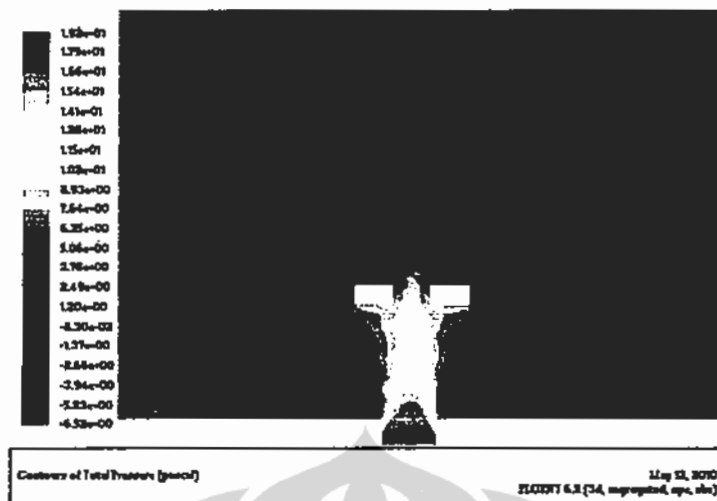
Ketinggian Ring (x) (mm)	Burning Load (kW/m ²)	AFR		Rasio equiv	Fraksi massa propana	Fraksi mol propana
		lift-up	blow-off			
10	10.417	39,1	41,6	0,61	0,036	0,024
	11.513	37,6	39,1	0,63	0,038	0,025
	12.610	36,3	37,7	0,66	0,039	0,026
	13.706	34,9	36,1	0,68	0,041	0,027
	14.803	33,4	34,8	0,71	0,042	0,028
	15.899	32,1	33,4	0,74	0,044	0,029
20	10.417	38,9	40,0	0,61	0,037	0,024
	11.513	37,0	37,8	0,64	0,038	0,026
	12.610	35,4	36,0	0,67	0,040	0,027
	13.706	33,6	34,3	0,71	0,042	0,028
	14.803	32,5	33,3	0,73	0,044	0,029
	15.899	31,4	32,3	0,76	0,045	0,030
30	10.417	38,7	39,6	0,61	0,037	0,024
	11.513	36,7	37,1	0,65	0,039	0,026
	12.610	35,1	35,8	0,68	0,040	0,027
	13.706	33,5	34,3	0,71	0,042	0,028
	14.803	32,4	33,0	0,73	0,044	0,029
	15.899	31,3	31,8	0,76	0,045	0,030
40	10.417	37,9	38,9	0,63	0,038	0,025
	11.513	36,3	36,8	0,65	0,039	0,026
	12.610	34,5	35,1	0,69	0,041	0,027
	13.706	33,4	33,8	0,71	0,042	0,028
	14.803	32,3	32,6	0,74	0,044	0,029
	15.899	31,3	31,7	0,76	0,045	0,030

Berdasarkan pengamatan nilai fraksi massa propana dan equivalen rasio lebih kecil dari 1 maka fenomena *flame lift-up* terjadi pada pembakaran yang miskin bahan bakar. Besaran fraksi massa bahan bakar dibutuhkan untuk data masukan saat simulasi menggunakan Fluent. Sedangkan fraksi mol propana digunakan sebagai data masukan penentuan temperatur dan *blow off resident time* saat simulasi menggunakan modul PREMIX dan AURORA pada Chemkin.

Tabel 4.10. Hasil Perhitungan Percobaan dengan Ring Keramik Di =10 mm

Ketinggian Ring (x) (mm)	Burning load (kW/m ²)	AFR		Rasio equiv	Fraksi massa propana	Fraksi mol propana
		lift-up	blow-off			
10	10.417	33,0	34,3	0,72	0,043	0,029
	11.513	31,6	32,2	0,75	0,045	0,030
	12.610	30,1	30,5	0,79	0,047	0,031
	13.706	28,6	29,7	0,83	0,049	0,033
	14.803	28,8	28,5	0,83	0,049	0,033
	15.899	28,0	26,8	0,85	0,050	0,034
20	10.417	31,1	34,7	0,77	0,045	0,030
	11.513	29,8	33,9	0,80	0,047	0,031
	12.610	28,8	33,9	0,83	0,049	0,033
	13.706	28,0	31,7	0,85	0,050	0,033
	14.803	27,4	30,6	0,87	0,051	0,034
	15.899	26,9	29,7	0,89	0,052	0,035
30	10.417	30,3	34,7	0,78	0,047	0,031
	11.513	29,5	33,8	0,81	0,048	0,032
	12.610	28,5	33,8	0,83	0,049	0,033
	13.706	27,6	33,1	0,86	0,051	0,034
	14.803	27,7	30,6	0,86	0,051	0,034
	15.899	26,9	28,5	0,89	0,052	0,035
40	10.417	30,1	34,3	0,79	0,047	0,031
	11.513	29,5	32,3	0,81	0,048	0,032
	12.610	28,8	30,8	0,83	0,049	0,033
	13.706	28,0	29,9	0,85	0,050	0,033
	14.803	27,7	28,6	0,86	0,051	0,034
	15.899	26,9	27,7	0,89	0,052	0,035

Dari hasil pengamatan visual saat percobaan, fenomena *flame lift-up* terjadi jika debit campuran yang meningkat khususnya kenaikan debit udara. Medan aliran dan momentum aliran khususnya resirkulasi aliran membuat nyala api melompat ke *ring*. Resirkulasi aliran terjadi akibat adanya *adverse pressure gradient* seperti terlihat pada hasil simulasi medan aliran Gambar 4.4. Tekanan terendah terjadi pada daerah di atas *ring* yang disebut dengan *wake*.

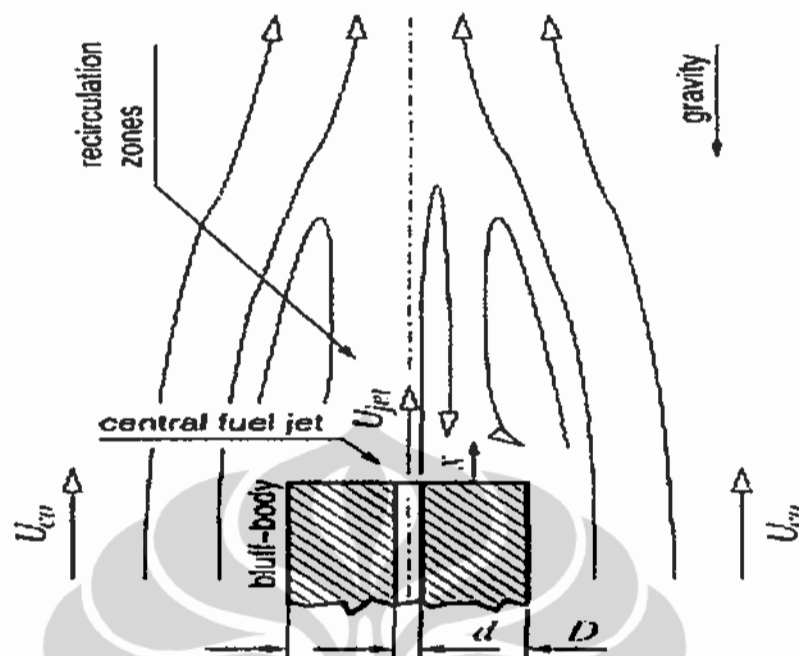


Gambar 4.4. Kontur Tekanan pada Ring $D_i=10$ mm dan $x_r=30$ mm

Nyala api setelah *lift-up* mirip dengan *supported flame* yang dikemukakan oleh Sharma [54] bahwa campuran bahan bakar dan udara dapat dinyalakan di atas kawat yang dipasang pada jarak tertentu dari ujung *ring*. Kawat akan berfungsi sebagai penyangga nyala atau *flame holder*. Sedangkan menurut Lewis dan von Elbe pada Drysdale [39], nyala di atas penyangga nyala tersebut mengandung sisa nyala api atau *residual flame* yakni sisa campuran bahan bakar dan udara yang masih dapat terbakar di atas kawat. Hal ini dimungkinkan oleh adanya daerah resirkulasi di atas suatu benda penghalang pada daerah aliran seperti ditampilkan pada Gambar 4.5 [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.

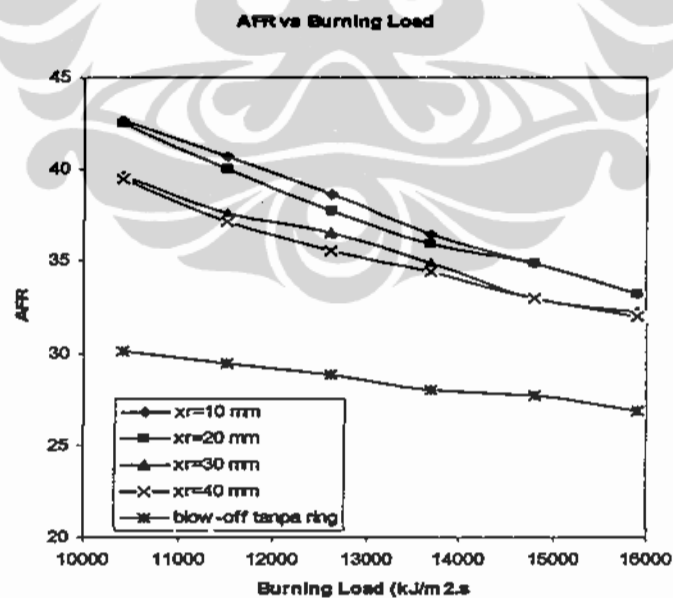
4.1.2 Pengaruh *AFR* dan Rasio Equivalens pada Fenomena *Flame Lift-up*

Analisa grafik tentang pengaruh *AFR* saat lift telah dilakukan baik pada *ring stainless steel* maupun *ring keramik* [29,32,77,78]. Dengan *ring stainless steel* fenomena *flame lift-up* terjadi pada pembakaran yang kurus pada kisaran *AFR* 32 sampai dengan 41. Jika dibandingkan dengan *AFR blow off* tanpa *ring* fenomena *flame lift-up* terjadi pada *AFR* yang hampir sama dengan *AFR blow off*



Gambar 4.5. Daerah Resirkulasi di Atas *Bluff Body* [3]

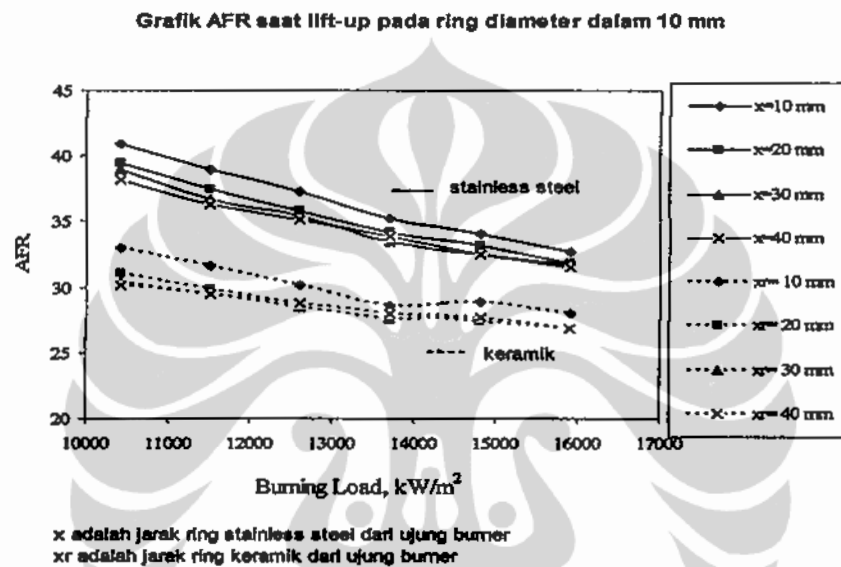
kecuali pada posisi *ring* 10 mm terjadi pada *AFR* lebih besar dari *AFR blow off*. Hal ini tampak pada Gambar 4.6.



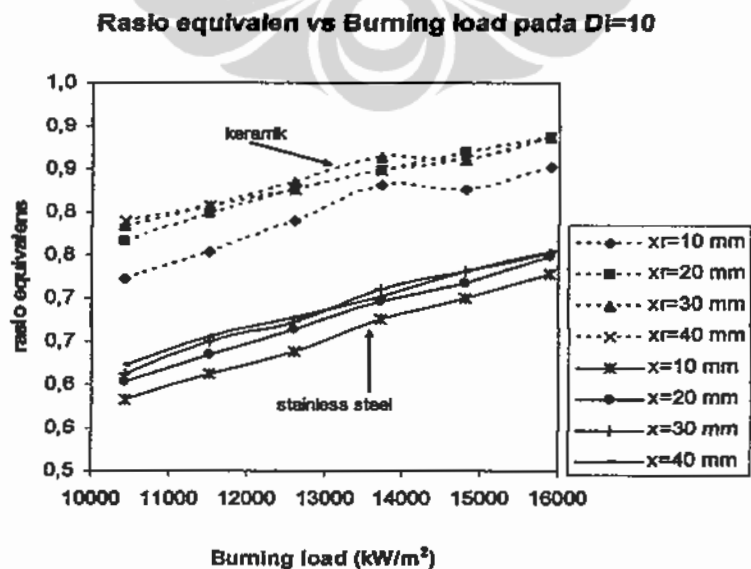
Gambar 4.6. Grafik *AFR* Saat *lift-up* pada *Ring Stainless Steel*

Sedangkan *AFR blow off* setelah *lift-up* dibandingkan dengan *AFR blow off* tanpa *ring* diperoleh grafik *AFR blow off lift-up* jauh diatas *AFR blow off* tanpa *ring* [77,78]. Hal ini akan dibahas pada analisa kestabilan nyala di Bab 5.

Posisi *ring* juga terlihat mempengaruhi terjadinya fenomena ini yakni nyala melompat pada *AFR* yang lebih tinggi dengan posisi *ring* yang semakin dekat dengan ujung *burner*. Jika dibandingkan antara *ring* dari keramik dan *ring* dari *stainless steel* ternyata *AFR* saat *lift-up* untuk *ring* dari keramik lebih rendah dari pada *ring* dari *stainless steel* seperti tampak pada Gambar 4.7. Identik dengan ini rasio equivalens ditampilkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.7. Grafik *AFR* Saat *Lift-up* untuk *Ring* dari Keramik dan *Stainless Steel*



Gambar 4.8. Rasio Equivalen Saat *Lift-up*

Hal ini menunjukkan bahwa kejadian melompatnya nyala api ke *ring* tidak hanya disebabkan oleh resirkulasi aliran. Ukuran geometri *ring* keramik dan *ring stainless steel* sama, sehingga medan aliran yang terjadi juga sama. Namun campuran bahan bakar dan udara yang berada pada aliran di atas *ring* berbeda. Hal ini disebabkan oleh material *ring* yang berbeda konduktivitas panasnya. *Ring* dari *stainless steel* akan menyerap lebih banyak kalor hasil pembakaran dibandingkan dengan *ring* dari keramik. Berdasarkan persamaan kecepatan pembakaran laminar pada kondisi nyala yang mengalami kehilangan kalor atau pendinginan oleh Spalding pada Kuo maka kecepatan pembakaran laminar pada batas mampu nyala dapat dinyatakan dengan Persamaan 4.8 [35].

$$S_{L,c} = \frac{1}{C_p \rho_u} \sqrt{\frac{k_f Q_{loss}}{(T_f - T_u) K_c \lambda_c^+}} \quad (4.8)$$

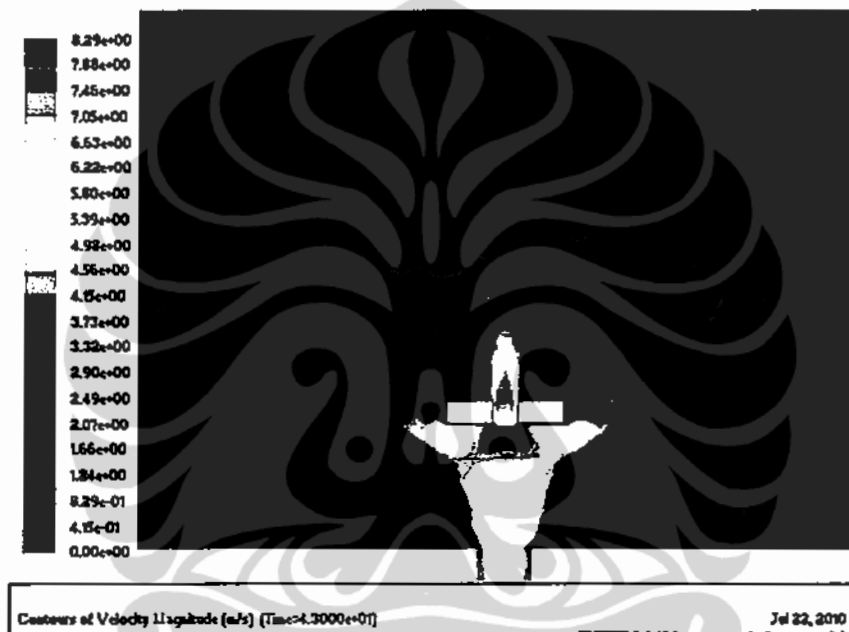
Dengan $S_{L,c}$ adalah kecepatan pembakaran laminar pada batas mampu nyala, (m/s), C_p adalah koefisien panas spesifik, (J/kg.K), ρ_u adalah massa jenis campuran bahan bakar dan udara yang belum terbakar, (kg/m^3), T_f adalah temperatur nyala, (K), T_u adalah temperatur campuran gas yang belum terbakar, (K), K_c adalah rasio laju kehilangan kalor dengan laju kalor dari reaksi kimia, λ_c^+ , adalah rasio laju kalor karena reaksi dengan laju kalor karena perbedaan temperatur gas terbakar dan gas belum terbakar, k_b adalah konduktivitas termal dari gas terbakar (J/m.s.K) dan Q_{loss} adalah laju kehilangan kalor per unit volume, (J/s.m^3)

Dari Persamaan 4.1. semakin besar laju kehilangan kalor maka kecepatan pembakaran laminar pada batas mampu nyala semakin tinggi. Sedangkan untuk berlangsungnya perambatan nyala, kecepatan pembakaran laminar harus lebih tinggi dari kecepatan pembakaran laminar pada batas mampu nyala atau $S_L > S_{L,c}$ dengan S_L pada nyala bunsen dapat dinyatakan dengan Persamaan 4.9 [35,38,39,55]:

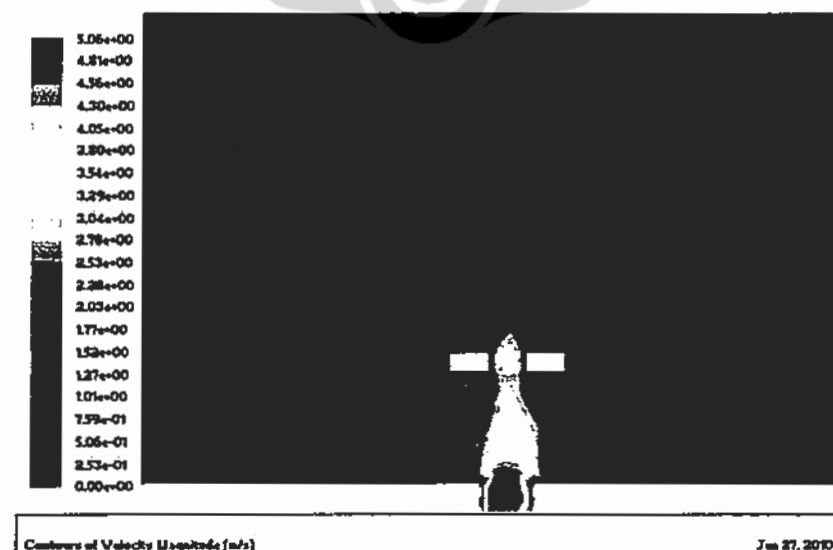
$$S_L = U \sin \alpha \quad (4.9)$$

Hal inilah yang merupakan faktor utama penyebab nyala tidak dapat bertahan di daerah antara ujung *burner* dan *ring* sehingga nyala seakan-akan melompat ke

ring. Nyala pada ujung *burner* sesungguhnya mencapai kondisi *blow off* karena pada daerah tersebut terjadi laju kehilangan kalor yang besar sehingga $S_{L,c}$ meningkat dan S_L tidak mampu mengimbangnya. Nyala akan mencari lokasi nyala yang mampu menyeimbangkan antara $S_L=S_{L,c}$. Lokasi tersebut adalah tepat di *ring* dimana terdapat daerah stagnasi aliran yang memicu kenaikan laju aliran setelah melewati daerah stagnasi. Hal ini tampak pada hasil simulasi pembakaran *premixed* salah satunya pada diameter *ring* 7 mm dan posisi *ring* 30 mm seperti ditampilkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9. Kontur Kecepatan Aliran pada Simulasi Pembakaran *Premixed*



Gambar 4.10. Kontur Kecepatan Aliran pada Simulasi Aliran Dingin

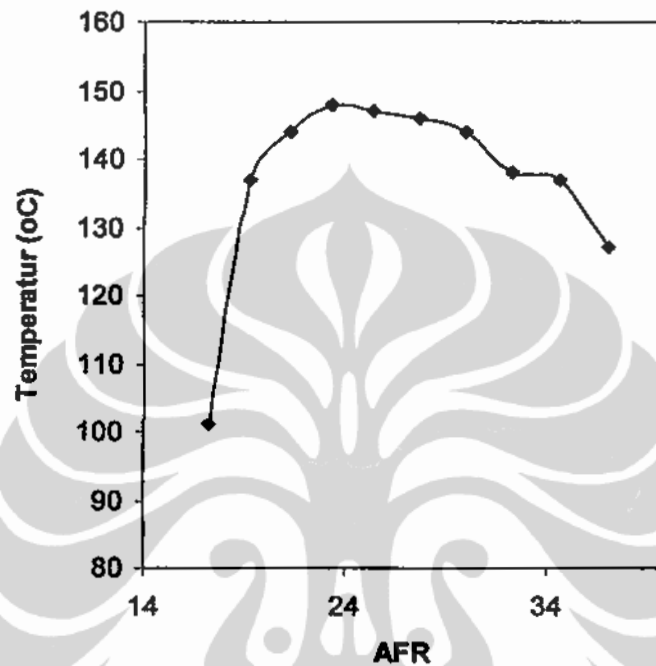
Kecepatan aliran yang keluar ujung *burner* atau kondisi *inlet* pada domain dengan warna kuning kehijauan adalah 5,1 m/s sedangkan kecepatan aliran setelah *ring* yang berwarna merah maksimum 7,3 m/s. Hasil ini berbeda dengan simulasi aliran dingin yang mengikuti konsep dinamika fluida yakni kecepatan aliran setelah *ring* tetap lebih rendah dari aliran keluar dari ujung *burner* seperti pada hasil simulasi Gambar 4.10. Hasil simulasi ini sesuai juga dengan distribusi kecepatan pada *bluff body* berbentuk segitiga yang ditampilkan pada Gambar 2.16 [14]. Distribusi kecepatan sebelum dan setelah pembakaran menunjukkan terjadinya peningkatan kecepatan.

Berdasarkan konsep laju kehilangan kalor dari nyala akibat adanya *ring* maka terjadi laju kehilangan kalor dari nyala ke *ring*. Hal ini menimbulkan peningkatan laju kecepatan pembakaran laminar pada batas mampu nyala atau S_{LC} . Hal ini juga menjelaskan kenapa *AFR* untuk *lift-up* pada penggunaan *ring stainless steel* lebih tinggi dari pada dengan *ring* keramik. Pada *ring* keramik laju kehilangan kalor dari pembakaran tidak sebesar pada *ring stainless steel* karena konduktivitas panas keramik yang rendah. Sehingga akibatnya kecepatan pembakaran pada batas mampu nyalanya juga lebih rendah dari pada *ring stainless steel*. Pada kondisi laju aliran bahan bakar yang konstan maka pada kecepatan campuran yang lebih rendah telah tercapai keseimbangan dengan kecepatan pembakaran pada batas mampu nyalanya. Sebaliknya pada *ring stainless steel*, laju kehilangan kalor lebih besar sehingga kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala juga meningkat. Untuk itu dibutuhkan laju aliran campuran yang lebih tinggi untuk tercapainya keseimbangan kecepatan pembakaran. Hal ini yang membuat kondisi *lift-up* untuk *ring* dari bahan *stainless steel* terjadi pada *AFR* yang lebih tinggi.

4.1.3 Temperatur Ujung *Burner* atau *Tip Burner*

Pengukuran temperatur ujung *burner* dilakukan pada rentang *AFR* sebelum *blow off* menggunakan tabung atau *barrel* dengan tinggi 38 cm dan diameter dalam 14 mm dengan memvariasikan laju aliran udara dan laju aliran bahan bakar [78,79]. Contoh analisis pencitraan hasil pengukuran temperatur ujung *burner* adalah seperti pada gambar 3.10. Selain itu temperatur ujung *burner*

juga diukur menggunakan termokopel type K. Hasil pengukuran variasi *AFR* ditampilkan pada Tabel 4.1. kemudian dibuat dalam grafik seperti pada Gambar 4.11.

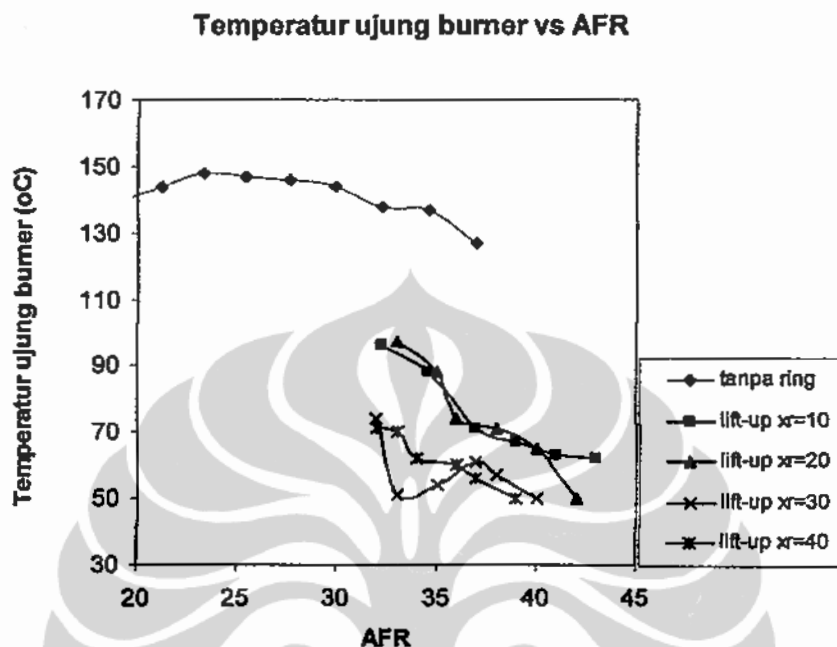


Gambar 4.11. Grafik Temperatur Ujung *Burner*

Grafik temperatur ujung *burner* 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 temperatur ujung *burner* dengan pendekatan ujung nyala berbentuk kerucut yang dinyatakan dalam variasi rasio ekuivalens.

Pengukuran ujung *burner* untuk kondisi setelah *lift-up* dilakukan juga dengan *Infra Red Thermograph* dan analisa pencitraannya ditampilkan pada Gambar 3.11 dan termokopel type K [79]. Hasil pengukuran temperatur ujung *burner* pada variasi posisi *ring* dari ujung *burner* ditampilkan pada Tabel 4.3. Untuk mempermudah membandingkannya maka dibuat grafik temperatur ujung

burner setelah *lift-up* bersama-sama dengan temperatur ujung *burner* tanpa ada fenomena *flame lift-up* pada satu grafik seperti tampak pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12. Grafik Temperatur Ujung *Burner* Sebelum dan Setelah *Lift-up*

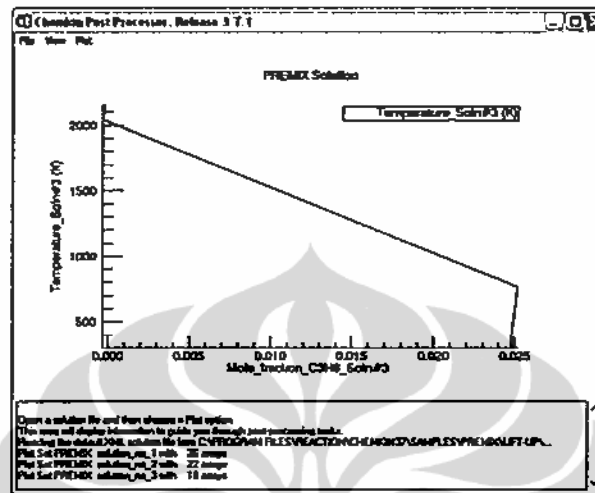
Fenomena *lift-up* menurunkan temperatur ujung *burner* jika dibandingkan dengan temperatur ujung *burner* tanpa adanya *lift-up*. Dua hal diprediksi menyebabkan penurunannya yakni *AFR* yang tinggi atau rasio ekuivalens yang rendah serta jarak nyala yang lebih jauh dari ujung *burner*.

4.1.4 Temperatur Maksimum Nyala Api

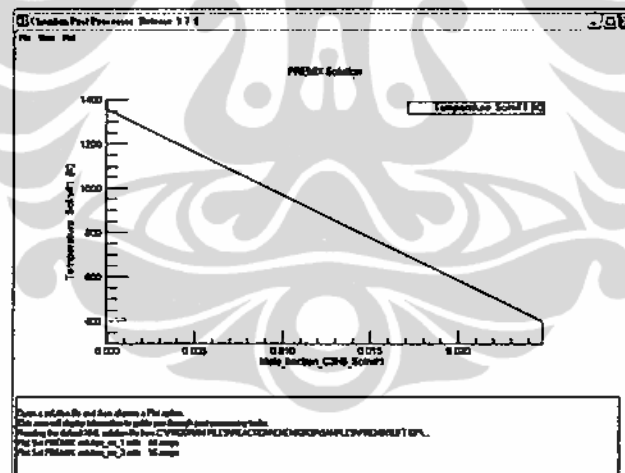
Pengukuran temperatur maksimum nyala api dilakukan saat terjadinya *lift-up* dengan menggunakan *Thermograph InfraView*. Hasil pengukuran ini dibandingkan dengan hasil simulasi CFD dengan pendekatan *eddy disipation rate* serta hasil penentuan temperatur nyala dengan aplikasi PREMIX yakni model *Free Propagation Flame* pada Chemkin dan input reaksi sesuai dengan GRI. Mech 3.1

Temperatur maksimum nyala api pembakaran *premixed* propana pada kondisi adiabatik atau tanpa kerugian kalor adalah 2164 K. Hasil ini berdasarkan penentuan temperatur nyala dengan aplikasi PREMIX yakni model *Free Propagation Flame* pada Chemkin dan input reaksi sesuai dengan GRI. Mech 3.1

dengan asumsi tidak ada laju kerugian kalor seperti pada Gambar 4.13. Sedangkan jika terjadi kerugian kalor maka temperatur nyala diperoleh akan menurun seperti pada tampilan Gambar 4.14.



Gambar 4.13. Tampilan Temperatur Maksimum Nyala pada Kondisi Adiabatis

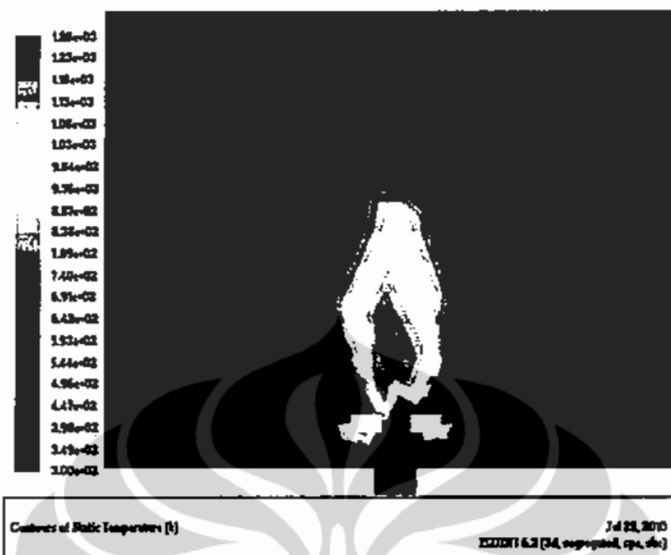


Gambar 4.14. Tampilan Temperatur Nyala pada Kondisi Terjadi Kerugian Kalor

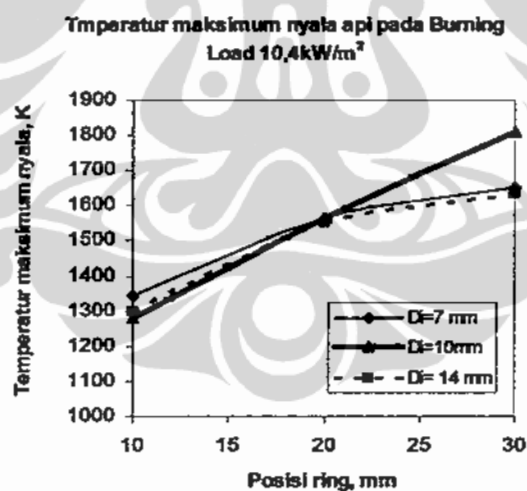
Pendekatan model *eddy dissipation rate* menghasilkan tampilan simulasi dari temperatur maksimum salah satunya seperti pada Gambar 4.15.

Fenomena *lift-up* terjadi pada *AFR* yang berbeda sekaligus pada kerugian kalor yang berbeda. Temperatur maksimum nyala api pada *Burning Load* yang sama namun pada berbagai variasi posisi *ring stainless steel* atau *AFR* saat *lift-up* yang berbeda ditampilkan pada Gambar 4.16. Dari grafik tersebut terlihat bahwa semakin tinggi posisi *ring* dari ujung *burner* maka temperatur maksimum nyala

api semakin tinggi. Hal ini tentunya karena pengaruh fraksi massa propana yang sedikit meningkat akibat *AFR* yang menurun pada *Burning Load* yang tetap.



Gambar 4.15. Temperatur Maksimum Nyala Api



Gambar 4.16. Grafik Temperatur Maksimum Nyala Api Variasi Diameter Dalam Ring

Temperatur nyala api sangat berhubungan dengan laju kehilangan kalor dari nyala. Semakin tinggi posisi *ring* maka temperatur nyala semakin tinggi namun belum dapat disimpulkan bahwa terjadi penurunan laju kehilangan kalor dari nyala.

Hasil pengukuran menggunakan *Thermograph Infra View* menunjukkan kecenderungan yang berbeda. Demikian pula besarnya temperatur nyala

maksimum yang terukur terdapat selisih yang cukup besar yakni pada rentang 30-150K.

Sedangkan hasil simulasi menggunakan modul PREMIX pada Chemkin menunjukkan kesesuaian dengan hasil simulasi menggunakan Fluent. Rata-rata perbedaannya antara 5 – 20K.

Kajian teoritis tentang perpindahan panas pada fenomena flame *lift-up* serta laju kehilangan kalor berdasarkan Teori Spalding tentang laju kehilangan kalor atau kondisi nyala dengan adanya pendinginan dilakukan pada kajian teoritis berikut ini.

4.2 Analisa Laju Kehilangan Kalor pada Fenomena Flame *Lift-up*

Analisa laju kehilangan kalor pada fenomena flame *lift-up* dilakukan dengan mengacu pada pemodelan matematis laju kehilangan panas dari nyala Bunsen. Analisis dilakukan dengan pendekatan bahwa nyala Bunsen berbentuk kerucut nyala dari bentuk dasar yang seperti tabung yang diilustrasikan pada Gambar 4.17 dan 4.18 [80].

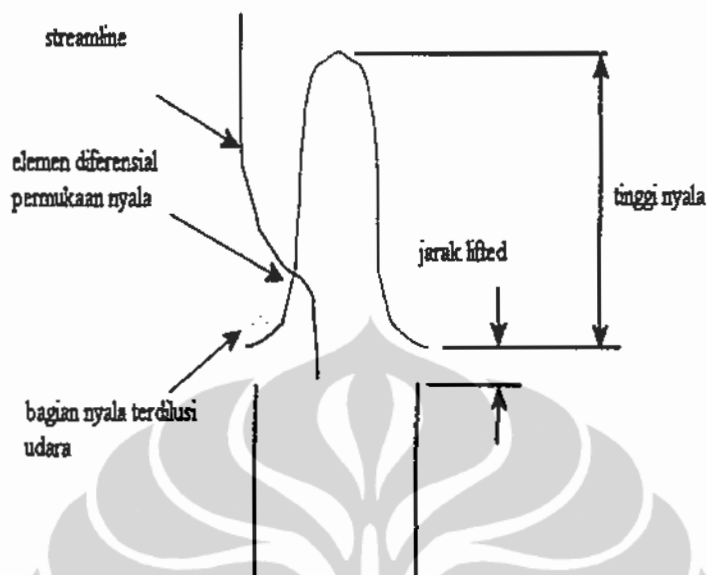
Kelengkungan nyala Bunsen diabaikan dalam pendekatan nyala berbentuk kerucut ini. Kerucut nyala dibagi dalam elemen differensial permukaan nyala yang berubah menurut fungsi r atau jari jari kerucut dan h atau tinggi. Lokasi dari elemen nyala yakni sumbu y yang berawal dari posisi ujung kerucut nyala ke bawah tersebut menentukan kehilangan panas dan rasio ekuivalen campuran bahan bakar dan udara yang masuk ke elemen nyala.

Persamaan untuk menganalisis laju kehilangan panas diawali dengan persamaan kekekalan energi dan kekekalan konsentrasi seperti pada Persamaan 4.3 dan 4.4.

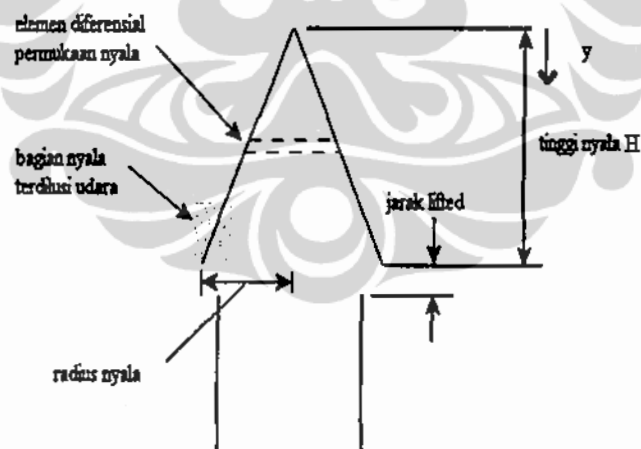
$$\rho A \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{M} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{1}{c_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \rho Y_k V_k c_{pk} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \omega_k h_k \dot{W}_k = 0 \quad (4.3)$$

$$\rho A \frac{\partial Y_k}{\partial t} + \dot{M} \frac{\partial Y_k}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho A Y_k V_k) - A \omega_k \dot{W}_k = 0 \quad k=1, \dots, K \quad (4.4)$$

Persamaan kekekalan energi kemudian ditambahkan laju kehilangan panas sehingga Persamaan 4.3 menjadi Persamaan 4.5



Gambar 4.17. Skema Bentuk Nyala Bunsen [80].



Gambar 4.18. Skema Model Matematis Pendekatan Kerucut Nyala Bunsen [80]

$$\rho A \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{M} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{1}{c_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \rho Y_k V_k c_{pk} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \varpi_k h_k W_k + \frac{\dot{Q}_{loss}}{c_p} = 0 \quad (4.5)$$

Sedangkan laju reaksi harus ditentukan secara kuantitatif pula dengan persamaan Arrhenius yakni:

$$k_f = [A]^n [B]^m AT^\beta e^{\frac{E_a}{R_s T}} \quad (4.6)$$

Laju kehilangan panas lokal karena konduksi dan radiasi nyala api berdasarkan temperatur nyala api dinyatakan dalam Persamaan 4.7 [80]:

$$Q_i(y) = \lambda \frac{T_f - T_{rim}}{y + d_s} + \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_{sink}^4) \quad (4.7)$$

dengan :

Q_i = kehilangan kalor per unit area

k =konduktivitas panas nyala =0,04 W/mK

T_{sink} = 300 K

ε =emisivitas nyala api diasumsikan konstant=0,005

σ = konstanta Stefan Boltzman = $5,6 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

d_s = jarak *lifted* atau *stand off distance*

T_f = temperatur nyala

T_{rim} = temperatur ujung *ring*

Sedangkan rasio ekuivalen lokal dapat ditentukan dengan menggabungkan hasil empiris dari lokasi konsentrasi reaktan yang mulai berubah seperti pada Persamaan 4.8.

$$\phi_{lokal}(y) = \begin{cases} \frac{\phi_o - \phi_l}{bh_{ch} - 1} (e^{by} - 1) + \phi_l & \text{untuk } y < (h_{ch}) \\ \phi_o & \text{untuk } y \geq h_{ch} \end{cases} \quad (4.8)$$

dengan:

ϕ_l = *lean ekuivalen rasio* di tepi *flame*

ϕ_o = ekuivalen rasio campuran masuk/mainstream

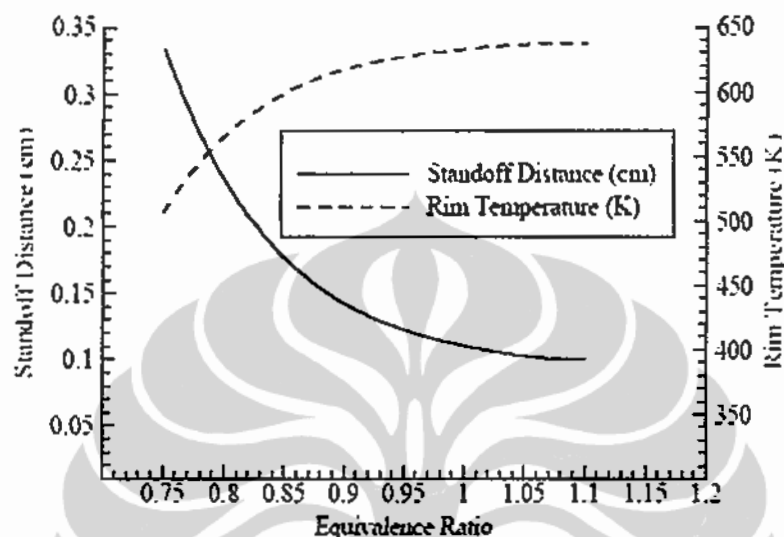
b = parameter campuran

h_{ch} = tinggi lokasi ϕ_o , dibawah h_{ch} ekuivalen rasio tidak berubah

Laju kehilangan panas seluruh permukaan kerucut nyala dinyatakan pada persamaan integral seperti pada Persamaan 4.9 [80].

$$F_{total} = \int_0^H F(\phi, Q_i) \pi R \left(1 - \frac{y}{H}\right) \sqrt{1 + \left(\frac{R}{H}\right)^2} dy \quad (4.9.)$$

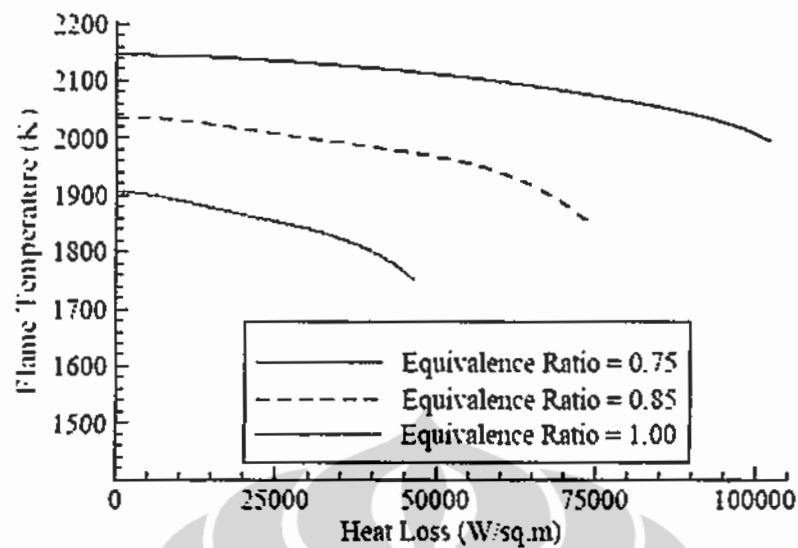
Pada Gambar 4.19 ditampilkan grafik pengaruh perubahan rasio equivalen terhadap temperatur ujung *burner* dan jarak liftednya.



Gambar 4.19. Rasio Equivalens Terhadap Jarak Lifted dan Temperatur Ujung *Burner* [80]

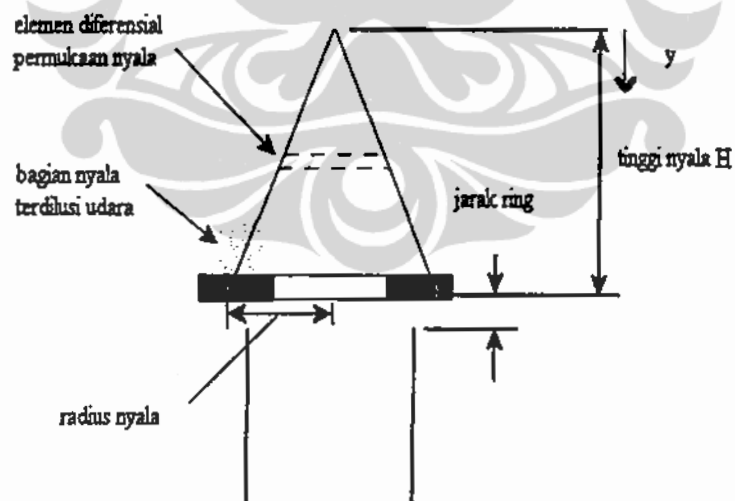
Hasil eksperimental tentang temperatur ujung *burner* tanpa *lift-up* selaras dengan hasil simulasi ini yakni pada rasio equivalen yang rendah atau nilai *AFR* yang tinggi diatas *AFR* stoikiometrik maka temperatur ujung *burner* makin rendah seperti pada Gambar 4.9. Namun pada *AFR* yang rendah, profil temperatur tidak terlalu mendekati hasil simulasi. Hal ini karena keterbatasan alat ukur serta kendala pengaturan laju aliran bahan bakar yang terbatas sehingga variasi *AFR* rendah agak sulit diperoleh.

Pada Gambar 4.20 tampak bahwa temperatur nyala api meningkat jika laju kehilangan panas sedikit menurun. Kecenderungan ini berlaku untuk semua nilai rasio equivalen. Namun dengan kondisi stoikiometrik yang memiliki temperatur nyala api yang paling tinggi maka laju kehilangan panas yang tinggi juga terjadi pada kondisi ini.



Gambar 4.20. Laju Kehilangan Panas pada Nyala Bunsen [80]

Untuk kondisi fenomena setelah terjadinya *lift-up* pendekatan laju kehilangan panas dapat ditentukan dengan menambahkan laju perpindahan panas konduksi dari nyala api ke *ring* serta perpindahan panas konveksi ke udara sekitar seperti pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21. Skema Model Matematis Analisis Fenomena *Lift-up*

Persamaan 4.7 juga ditambahkan yakni konduksi ke *ring* serta konveksi ke udara sekitar seperti pada Persamaan 4.10.

$$Q'_l(y) = k_f \frac{T_f - T_b}{y + x_r} + \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_s^4) + k_f \frac{T_f - T_r}{y} + h(T_f - T_s) \quad (4.10)$$

Nilai h untuk *flame* berkisar antara $0,005-0,01 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ [81].

Laju kehilangan kalor diperhitungkan untuk menentukan kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala seperti pada Persamaan 4.7 yang disubstitusikan ke Persamaan 4.9. dengan hanya memasukkan pengaruh laju kehilangan kalor per unit area. Rasio ekuivalen diasumsikan sama dengan rasio ekuivalen campuran pada kondisi masuk. Hal ini dilakukan karena rasio ekuivalen untuk terjadinya *lift-up* adalah pada nilai yang relatif rendah. Laju kehilangan kalor dari nyala meliputi seluruh permukaan kerucut nyala dapat ditentukan dengan Persamaan 4.11

$$Q_{total} = \int_0^H \phi \left(k_f \frac{T_f - T_b}{y + x_r} + \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_s^4) + k_f \frac{T_f - T_r}{y} + h(T_f - T_s) \right) \pi R \left(1 - \frac{y}{H} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{R}{H} \right)^2} dy \quad (4.11)$$

$$Q_{total} = \int_0^H \phi \pi R \sqrt{1 + \left(\frac{R}{H} \right)^2} \left\{ k_f (T_f - T_b) \left(\frac{1}{y + x_r} - \frac{y}{H(y + x_r)} \right) + \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_s^4) \left(1 - \frac{y}{H} \right) + k_f (T_f - T_r) \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{H} \right) + h(T_f - T_s) \left(1 - \frac{y}{H} \right) \right\} dy \quad (4.12)$$

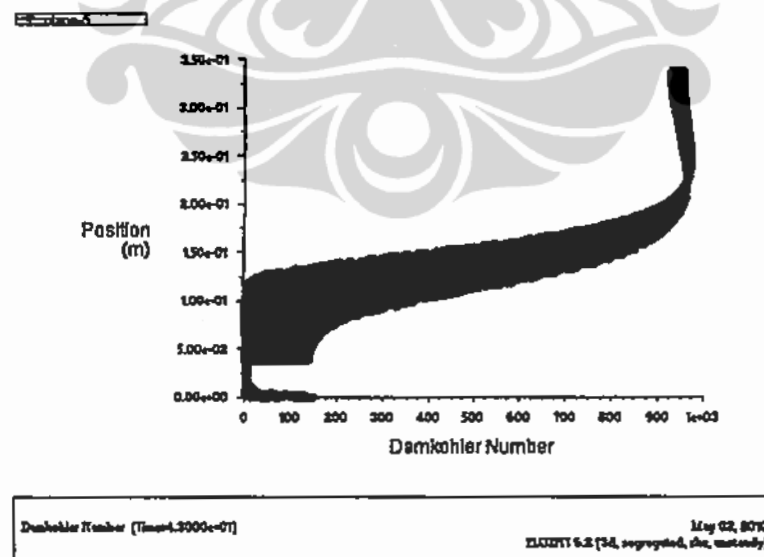
$$Q_{total} = \phi \pi R \sqrt{1 + \left(\frac{R}{H} \right)^2} \left\{ k_f (T_f - T_b) \left(\ln(y + x_r) - \left(\frac{1}{H} - \frac{x_r}{H} \right) \ln(y + x_r) \right) + \left[\{ \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_s^4) + h(T_f - T_s) \} \left(y - \frac{y^2}{2H} \right) + (k_f + h)(T_f - T_r) \left(\ln(y) - \frac{y}{H} \right) \right] \right\} \Bigg|_0^H \quad (4.13)$$

$$Q_{total} = \phi \pi R \sqrt{1 + \left(\frac{R}{H} \right)^2} \left\{ k_f (T_f - T_b) \left(\ln \left(\frac{H}{x_r} + 1 \right) \left(1 - \frac{x_r}{H} \right) \right) + \left[\{ \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_s^4) + h(T_f - T_s) \} \left(\frac{H}{2} \right) + k_f (T_f - T_r) (\ln H - 1) \right] \right\} \quad (4.14)$$

Q total berdasarkan pendekatan kerucut nyala Bunsen ini dapat disubstitusikan ke Persamaan 4.1. yakni pendekatan Spalding untuk menentukan kecepatan pembakaran laminer pada batas mampu nyala. Suku-suku persamaan ini menentukan besarnya laju kehilangan kalor dari nyala serta $S_{L,c}$. Pada suku

pertama selisih temperatur nyala dengan temperatur *ring* dan perbandingan tinggi nyala dengan jarak *ring*. Nilai minimum pada suku pertama diperoleh pada $H=x_r$. Berdasarkan hasil eksperimental jika *ring* ditempatkan pada jarak yang sama dengan ketinggian kerucut nyala bunsen maka fenomena *flame lift-up* tidak akan terjadi.

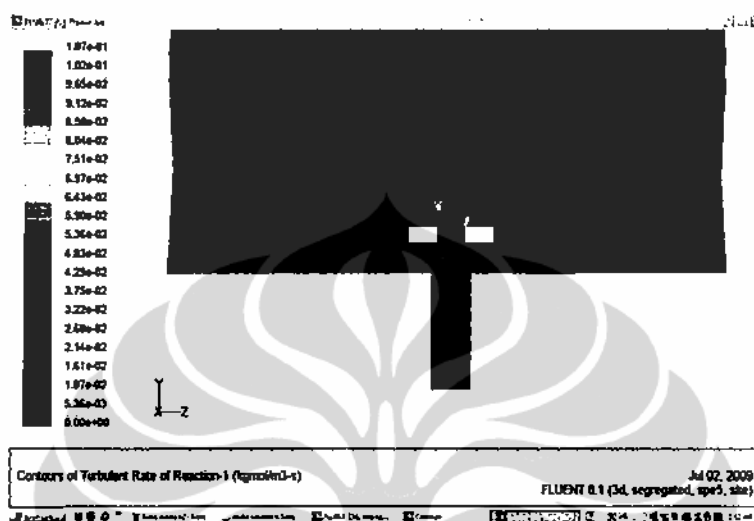
Dengan mengacu pada pendekatan Spalding tentang perambatan nyala maka fenomena *flame lift-up* diprediksi timbul pada keseimbangan kecepatan pembakaran laminar, S_L dengan kecepatan pembakaran saat mampu nyala, $S_{L,c}$. Pendekatan Spalding menyatakan bahwa nyala akan merambat jika $S_L > S_{L,c}$ [35]. Jika $S_L < S_{L,c}$ maka nyala tidak mampu merambat atau *blow off*. Hal inilah yang terjadi pada daerah pangkal nyala sehingga fenomena *lift-up* muncul akibat kejadian *local extinction* pada daerah antara ujung *burner* dengan *ring*. Hal ini hampir sama dengan hasil penelitian tentang *residual flame* [14]. Hasil simulasi pembakaran *premixed* terutama plot nilai Bilangan Damkohler yang ditampilkan pada Gambar 4.22. juga menunjukkan bahwa pada daerah antara ujung *burner* dan *ring* nilai Bilangan Damkohler menurun dengan drastis.



Gambar 4.22. Bilangan Damkohler pada Simulasi Pembakaran *Premixed*

Hal ini mengindikasikan nyala tidak mampu merambat pada daerah tersebut dan posisi yang sama untuk terjadinya perambatan nyala seperti pada posisi *lifted distance* dari ujung *burner* sebelum *lift-up* adalah pada *ring*. Kondisi

ini seakan-akan memperpanjang ujung *burner* ke *ring* sehingga pangkal nyala berpindah ke *ring*. Hasil simulasi aliran dingin juga mendukung kondisi ini yakni kontur laju reaksi seperti pada Gambar 4.23. Laju reaksi tertinggi terjadi di atas *ring* dan di bawah *ring* tidak terjadi reaksi.



Gambar 4.23. Tampilan Hasil Simulasi Turbulen Kinetik Reaksi.

Kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala dihitung sesuai Persamaan 4.1. dengan memasukkan nilai Q_{loss} berdasarkan Q_{total} dari Persamaan 4.14 dibagi volume kerucut nyala. Temperatur nyala ditentukan dari hasil aplikasi PREMIX di Chemkin pada Gambar 4.13 untuk kondisi tanpa adanya kerugian kalor sehingga diperoleh temperatur nyala adalah 2164 K.

Perhitungan rinci tentang penentuan kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala ditampilkan pada Lampiran 5. Menggunakan konsep bahwa fenomena *flame lift-up* terjadi pada $S_{L,c}=S_L$ dapat ditentukan sudut kerucut nyala, α berdasarkan kecepatan pembakaran laminar dengan pendekatan nyala Bunsen *ring* sesuai Persamaan 4.2. Nilai α jika dibandingkan dengan hasil analisis regangan nyala menggunakan Bilangan Karlovitz ternyata hampir mendekati sama [82] yakni pada penelitian ini rata-rata adalah 4° yakni setengah sudut kerucut nyala 8° . T_u diasumsikan sama dengan 10% dari selisih temperatur nyala [39] dan temperatur ujung *burner*. Hasil perhitungan $S_{L,c}$ ditampilkan pada Tabel 4.11.

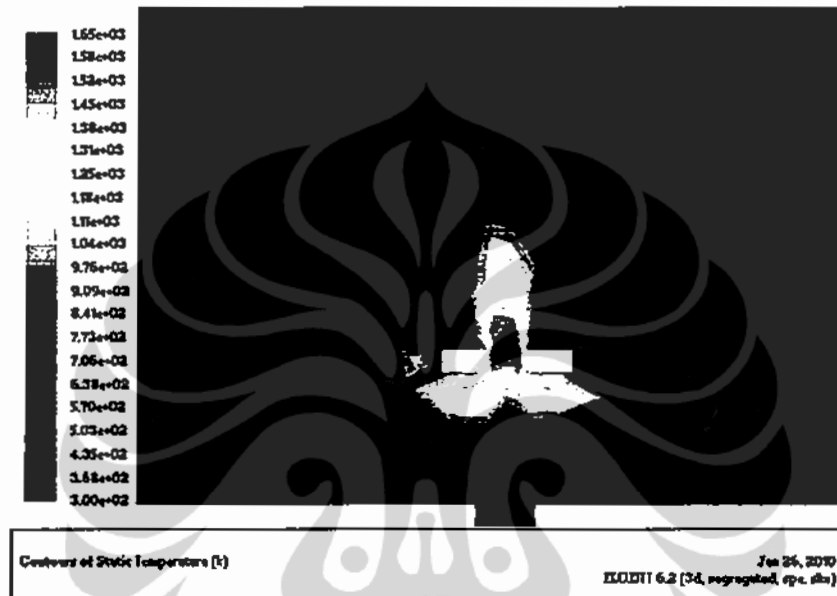
Tabel 4.11. Hasil Perhitungan $S_{L,c}$ pada Ring AISI 304 Di 10 mm

Xr (mm)	Rasio ekuivalen	$S_{L,c}$ (m/s)	U (m/s)	α
10	0,58	0,39	5,0	4,4
	0,61	0,40	5,3	4,2
	0,64	0,41	5,5	4,1
	0,68	0,41	5,7	4,1
	0,70	0,42	5,9	4,0
	0,73	0,43	6,1	3,9
20	0,60	0,37	4,8	4,3
	0,64	0,38	5,1	4,2
	0,66	0,39	5,3	4,1
	0,70	0,40	5,5	4,0
	0,72	0,40	5,8	3,9
	0,75	0,41	6,0	3,8
30	0,61	0,38	4,8	4,4
	0,65	0,38	5,0	4,3
	0,67	0,38	5,3	4,1
	0,71	0,39	5,4	4,0
	0,73	0,40	5,7	3,9
	0,75	0,40	5,8	3,8

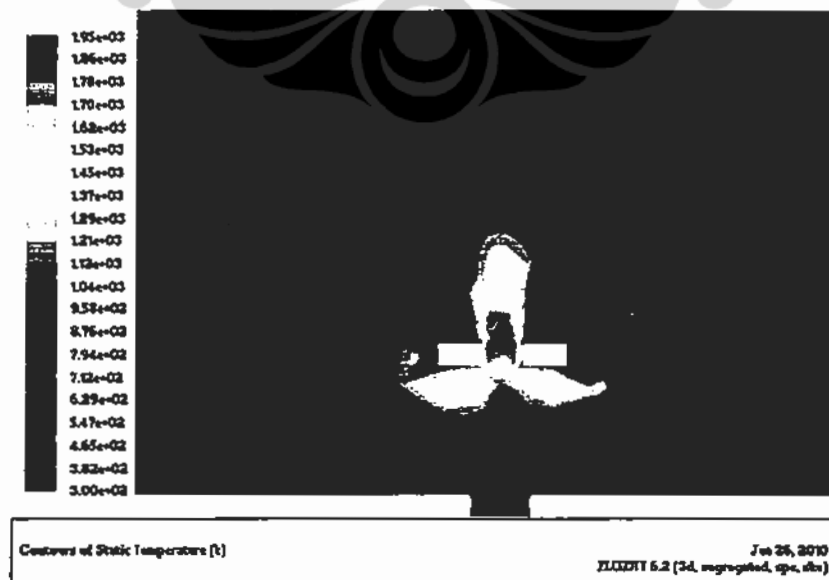
$S_{L,c}$ ditentukan oleh besarnya laju kehilangan kalor dari nyala dan temperatur nyala seperti pada Persamaan 4.1. Hasil simulasi yang menampilkan bahwa temperatur nyala meningkat dengan kenaikan posisi *ring*, berarti laju kehilangan kalor juga menurun dengan kenaikan posisi *ring*. Namun dengan terjadinya peningkatan $S_{L,c}$ berarti rentang penurunan laju kehilangan kalor tidak sebesar rentang naiknya temperatur nyala pada kasus adanya *ring* ini. Daerah resirkulasi di atas *ring* berperan menjaga momentum aliran dan kalor dari nyala sehingga tetap terjadi kenaikan temperatur nyala dan kenaikan kecepatan aliran

Jika dibandingkan antara *ring stainless steel* dan *ring keramik* maka laju kehilangan kalor dari nyala ke *ring keramik* lebih rendah yang terlihat pada temperatur nyalanya. Hal ini terlihat pada hasil simulasi dengan mengaktifkan konduksi ke *ring* serta menentukan sifat bahan yang sesuai dengan *ring* ditampilkan pada Gambar 4.24 dan 4.25. Gambar 4.24 untuk *ring* dari steel

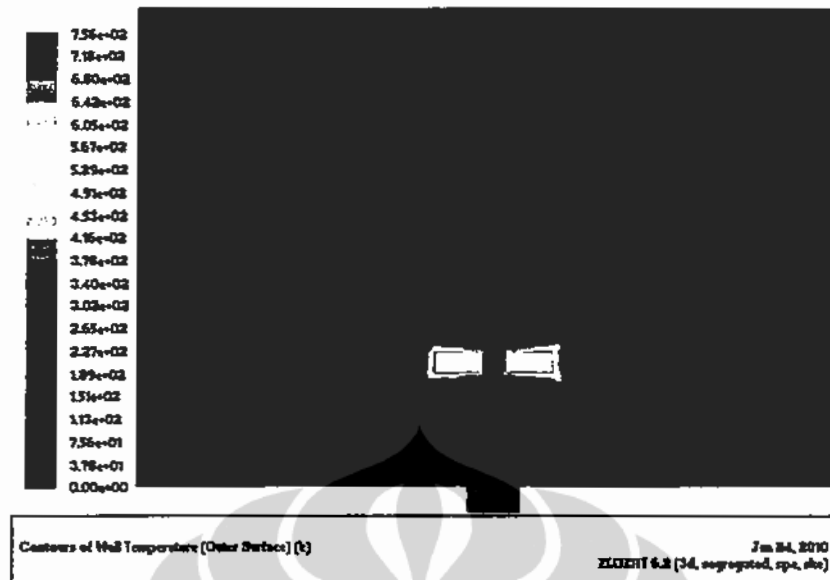
sedangkan Gambar 4.25 untuk *ring* dari keramik. Temperatur maksimum dari nyala pada *ring stainless steel* adalah 1652 K. Sedangkan menggunakan *ring* keramik tercapai temperatur maksimum 1951 K. Hal ini disebabkan oleh kondisi terjadinya lift-up pada *ring* dari keramik adalah pada rasio equivalen yang tinggi. Hasil ini sesuai dengan distribusi temperatur pada pembakaran propana yang maksimum pada kondisi campuran mendekati stoikiometrik [35, 39].



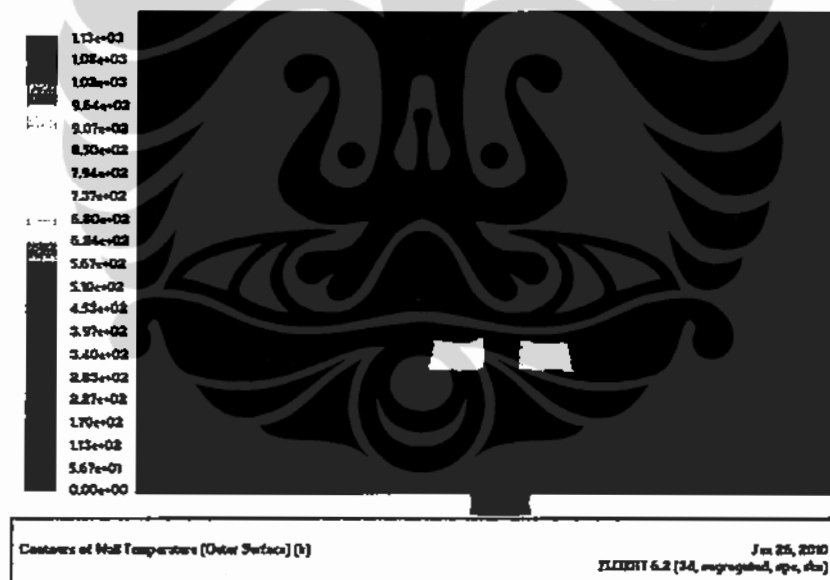
Gambar 4.24. Temperatur Maksimum Nyala pada *Ring* dari *Stainless Steel*



Gambar 4.25. Temperatur Nyala pada *Ring* Keramik



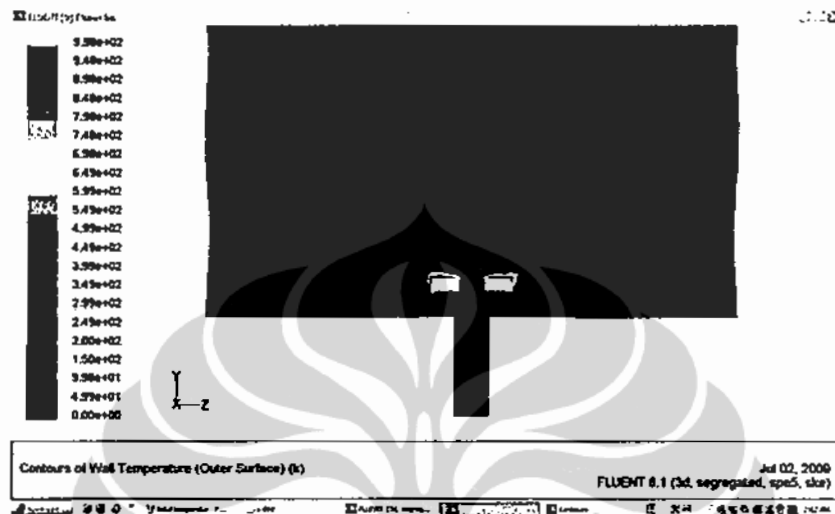
Gambar 4.26. Temperatur *Ring* pada *Ring Stainless Steel*



Gambar 4.27. Temperatur *Ring* pada *Ring Keramik*

Laju kehilangan kalor dari nyala juga mengubah temperatur *ring*. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh temperatur *ring stainless steel* adalah 756 K sedangkan temperatur *ring* keramik 1130 K seperti tampak pada Gambar 4.26 dan 4.27. Temperatur *ring stainless steel* sesuai dengan hasil pengukuran menggunakan *Infra Red Thermograph*.

Hasil simulasi yang ditampilkan pada Gambar 4.28 juga menunjukkan bahwa setelah *lift-up* temperatur *ring* bagian atas jauh lebih tinggi dari pada temperatur permukaan *ring* bagian bawah [31].



Gambar 4.28. Tampilan Hasil Simulasi Temperatur *Ring* Setelah Lift-up

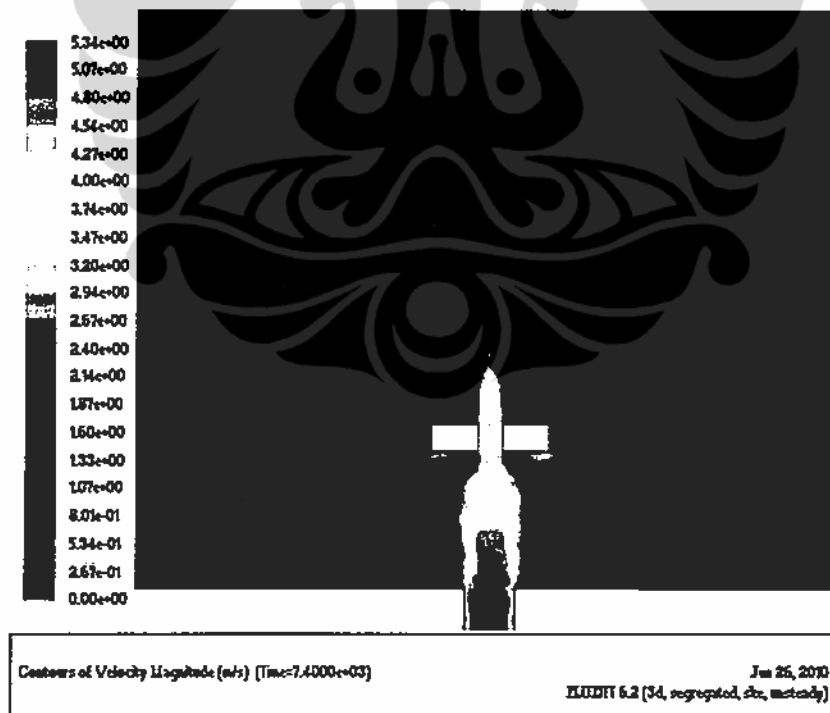
Hal ini menandakan bahwa terjadi pendinginan dari aliran campuran bahan bakar dan udara. Hasil ini sesuai juga dengan kajian teoritis tentang kerugian kalor dari nyala ke *ring* serta potensi daerah di atas *ring* sebagai sumber panas. Hal ini banyak dikemukakan dari hasil penelitian daerah *wake* dari aliran resirkulasi di atas *ring*.

Resirkulasi pada penelitian ini tidak terbentuk di atas *ring* saja namun terjadi juga di bawah *ring*. Hal ini tampak pada hasil simulasi pembakaran *premixed* seperti ditampilkan pada Gambar 4.29 dan 4.30 pada diameter dalam *ring* 7 mm dan posisi 30 mm serta pada laju fraksi massa bahan bakar yang lebih tinggi dari laju bahan bakar untuk terjadinya *lift-up* pada posisi *ring* ini.

Temperatur ujung *burner* juga dipengaruhi oleh konduktivitas panas dari material *ring*. Hasil eksperimen yang menunjukkan bahwa temperatur ujung *burner* akan semakin rendah dengan munculnya fenomena *flame lift-up* terlihat dari persamaan 4.10 bahwa semakin besar jarak *ring* dari ujung *burner* maka temperatur ujung *burner* semakin rendah.



Gambar 4.29. *Wake* yang Terbentuk di Atas *Ring* dan di Bawah *Ring*



Gambar 4.30. Kontur Kecepatan pada Simulasi Pembakaran *Premixed*

Simulasi dengan mengaktifkan fitur pembakaran *premixed* membutuhkan optimasi *mesh* yang teliti. Kendala ini dapat diatasi dengan memilih model reaksi *eddy dissipation rate* yang juga mempresentasikan reaksi pembakaran [70].

4.3 Hasil Simulasi dengan Pendekatan *Eddy Dissipation Rate*

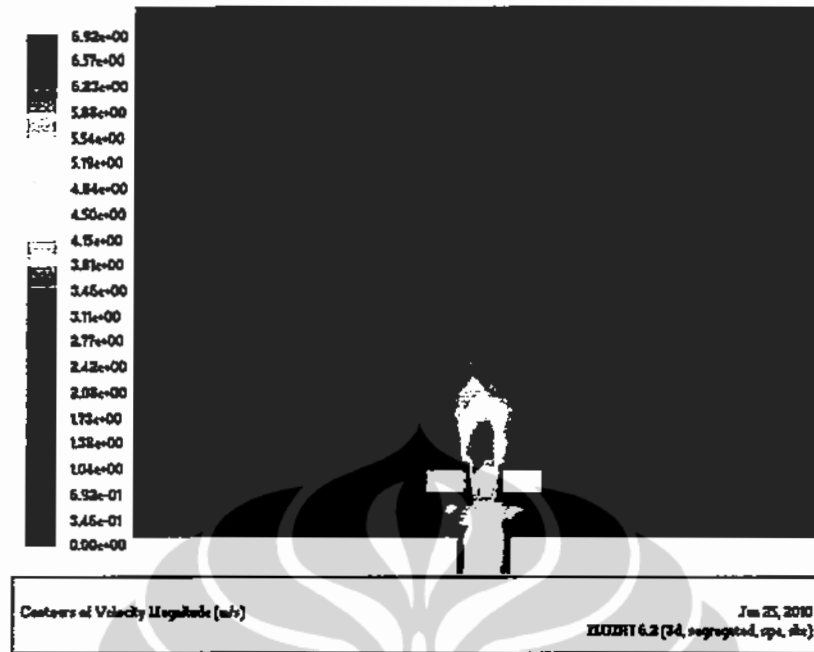
Kondisi pembakaran dapat disimulasikan dengan pendekatan *eddy dissipation rate* [70]. Pada Gambar 4.29, 4.30, 4.31 ditampilkan berturut-turut hasil simulasi besarnya kecepatan aliran setelah melewati *ring* pada posisi 10 mm.



Gambar 4.31. Kontur Kecepatan pada Posisi *Ring* 10 mm dan Diameter Dalam *Ring* 7 mm

Pada posisi 10 mm, diameter dalam *ring* 7 mm tercapai kecepatan aliran maksimum 7,35 m/s dengan kecepatan campuran masuk adalah 5,1 m/s. Pada diameter 10 mm kecepatan maksimumnya adalah 6,92 m/s dan kecepatan campuran masuknya adalah 4,9 m/s sedangkan pada diameter 14 mm dengan kecepatan campuran masuk yang sama untuk terjadinya *lift-up* terjadi kecepatan maksimum 6,32 m/s. Peningkatan kecepatan akan semakin berkurang dengan naiknya posisi *ring* maupun diameter dalam *ring*.

Pada posisi 30 mm kecenderungannya adalah sama. Pada posisi 10 mm terjadi rasio kecepatan campuran terhadap kecepatan maksimum antara sekitar 0,7 sedangkan pada posisi 30 mm rasionya adalah sekitar 0,8. Hal ini berhubungan dengan hambatan gravitasi aliran yang semakin bertambah dengan makin jauhnya jarak *ring* dari ujung *burner*.

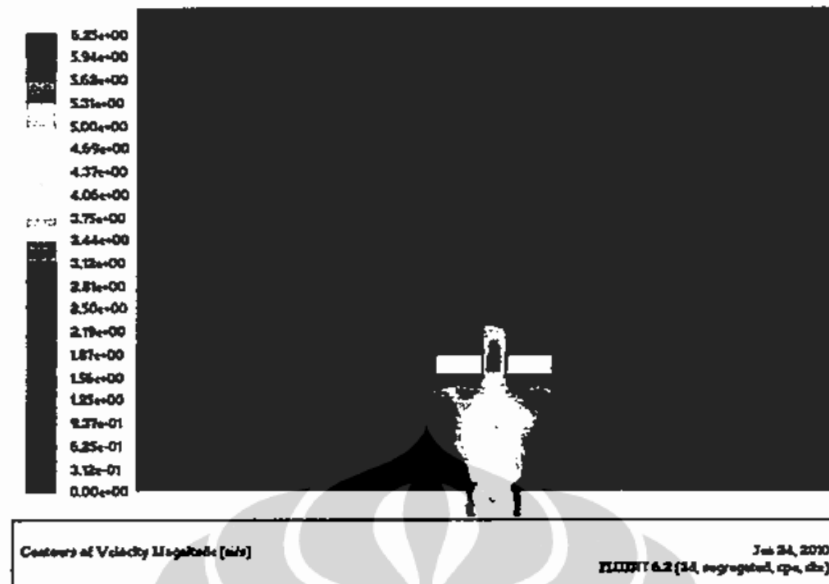


Gambar 4.32. Kontur Kecepatan pada Posisi *Ring* 30 mm Diameter Dalam *Ring* 10 mm

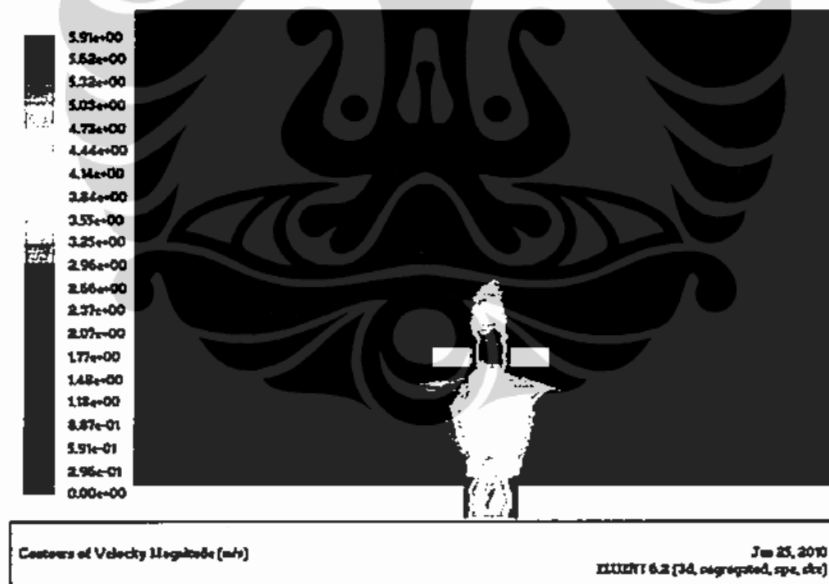


Gambar 4.33. Kontur Kecepatan pada Posisi *Ring* 30 mm dan Diameter Dalam *Ring* 14 mm

Sebagai perbandingan ditampilkan pula hasil simulasi pada posisi 30 mm dengan *Burning Load* yang sama namun tentunya pada *AFR* yang berbeda-beda



Gambar 4.34. Kontur Kecepatan pada Posisi *Ring* 30 mm dan Diameter Dalam *Ring* 7 mm



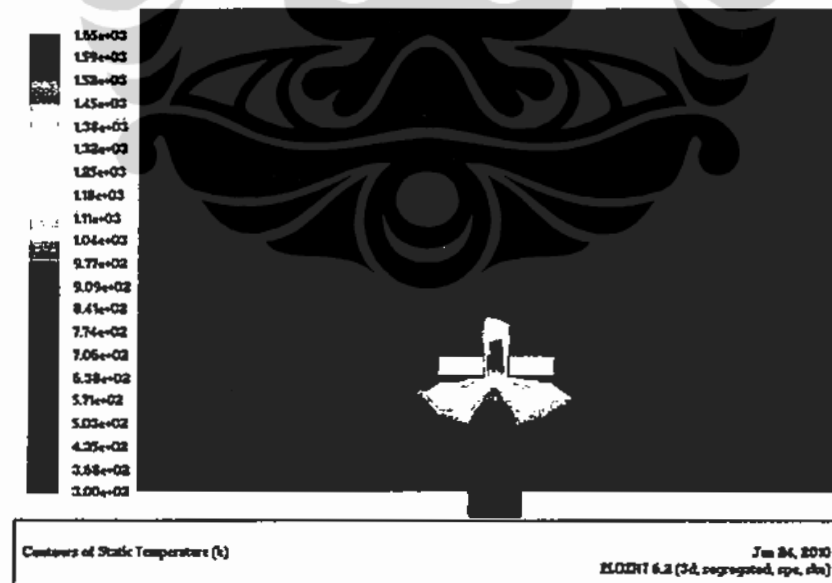
Gambar 4.35. Kontur Kecepatan pada Posisi *Ring* 30 mm dan Diameter Dalam *Ring* 10 mm

karena fenomena *flame lift-up* munculnya pada *AFR* yang berbeda. Diameter dalam *ring* berbanding terbalik dengan kenaikan kecepatan aliran. Kecepatan aliran makin tinggi pada diameter dalam *ring* yang lebih kecil. Pada diameter dalam *ring* 7 mm kecepatan maksimumnya adalah 6,25 m/s pada kecepatan input

5,1 m/s. Pada diameter dalam *ring* 10 mm kecepatan maksimumnya 5,91 m/s pada kecepatan input 5 m/s.



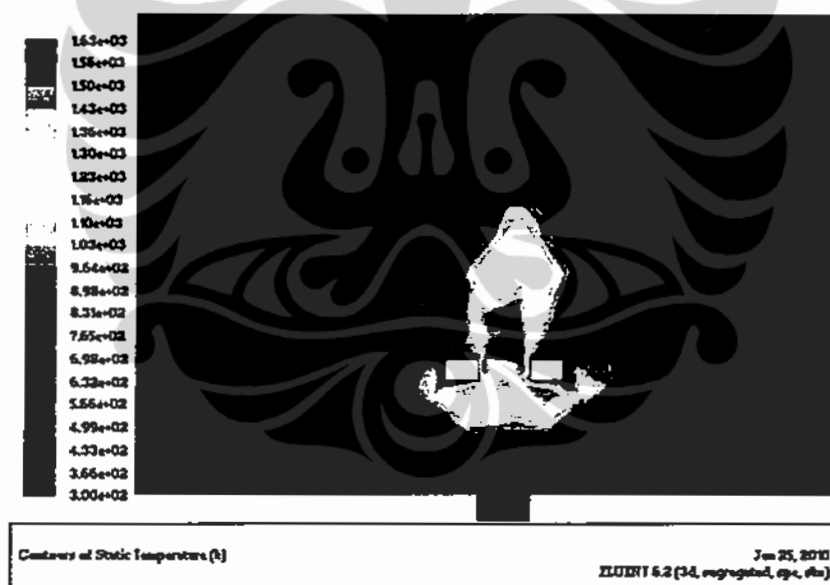
Gambar 4.36. Kontur Kecepatan pada Posisi *Ring* 30 mm dan Diameter Dalam *Ring* 14 mm



Gambar 4.37. Kontur Temperatur Maksimum Nyala pada $Di = 7$ mm



Gambar 4.38. Kontur Temperatur Maksimum Nyala pada $D_i = 10$ mm



Gambar 4.39. Kontur Temperatur Maksimum Nyala pada $D_i = 14$ mm

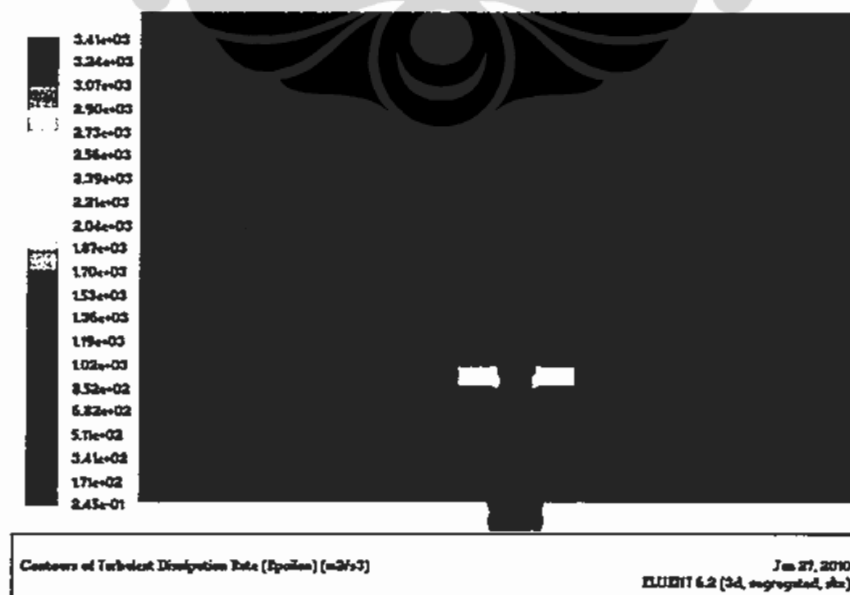
Temperatur maksimum nyala api pada posisi 30 mm dan berbagai diameter dalam *ring* juga ditampilkan pada Gambar 4.37 sampai Gambar 4.39. Temperatur nyala api *lift-up* pada diameter dalam *ring* 7 mm adalah 1650 K dan pada diameter dalam *ring* 14 mm adalah 1630 K.

Berdasarkan hasil simulasi ini terlihat bahwa temperatur maksimum nyala api pada diameter 10 mm paling tinggi mencapai 1814 K. Hasil ini sesuai dengan dugaan bahwa laju kehilangan kalor dari nyala paling rendah pada posisi ini.

Pendekatan model *eddy dissipation rate* didukung oleh hasil simulasi aliran dingin berdasarkan besarnya nilai k dan ϵ atau energi kinetik turbulen dan laju dissipasi [70]. Besarnya k adalah maksimum $2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ sedangkan laju dissipasi adalah $3410 \text{ m}^2/\text{s}^2$ seperti pada tampilan simulasi pada Gambar 4.40 dan 4.41.



Gambar 4.40. Kontur k



Gambar 4.41. Kontur ϵ

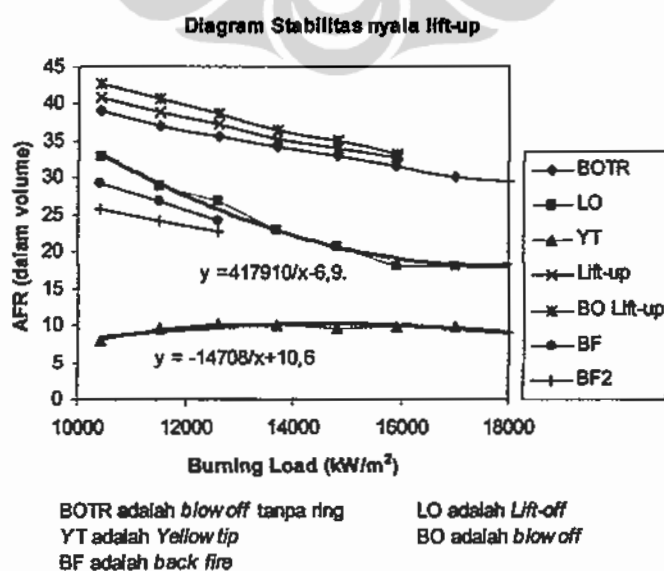
BAB 5

KESTABILAN NYALA API SETELAH *LIFT-UP*

Kestabilan nyala api suatu bahan bakar terjadi pada daerah stabilitas nyala pada diagram Fuidge. Daerah stabilitas nyala dibatasi oleh kurva *yellow tip* di bagian bawah, kurva *flashback* di sisi kiri dan kurva *lift-off* di bagian atas. Hasil eksperimen tentang kestabilan nyala *lift-up* dinyatakan dalam perbandingan daerah stabilitas nyala api *lift-up* dengan daerah stabilitas nyala untuk bahan bakar propana [83]. Pengaruh posisi *ring*, diameter dalam *ring* dan material *ring* ditampilkan juga dalam analisa grafik kestabilan nyala. Kajian teoritis kondisi *blow-off* dilakukan berdasarkan korelasi yang umum dipergunakan yakni Bilangan Damkohler.

5.1 Daerah Kestabilan Nyala Api Setelah *Lift-up*

Grafik Fuidge untuk menentukan daerah stabilitas nyala propana ditentukan berdasarkan Tabel 4.6 yang dibuat berdasarkan Tabel 4.1. tentang hasil percobaan tanpa *ring*. Kurva *lift-up* dan kurva *blow off* setelah *lift-up* dibuat pada satu grafik pada Gambar 5.1 yakni kurva saat *lift-up* untuk diameter dalam *ring* 10 mm dan posisi *ring* 10 mm. Kurva *blow off* setelah *lift-up* dibuat dari data pada Tabel 4.8.



Gambar 5.1. Grafik Kestabilan Nyala Api Gas Propana

Terlihat bahwa fenomena *lift-up* terjadi pada daerah sedikit diatas *blow-off* tanpa *ring*. *AFR* stoikiometri dari propana adalah 23,8 sehingga dari grafik tampak bahwa fenomena nyala api *lift-up* terjadi pada pembakaran yang kurus atau miskin bahan bakar.

Luas daerah stabilitas nyala dapat dihitung dengan persamaan integral selisih dua kurva. Luas daerah stabilitas nyala api propana tanpa *ring* atau tanpa fenomena *lift-up* adalah luas daerah *lift of* sesuai Persamaan 5.1 dikurangi luas daerah *flash back* sesuai Persamaan 5.2. menjadi Persamaan 5.3.

$$A_{LO} = \left| \int_{x_1}^{x_2} f_{LO} - f_{YT} dx \right| \quad (5.1)$$

$$= 111413 \text{ kW} / \text{m}^2$$

$$A_{BF} = \int_{x_3}^{x_4} f_{BF} dx - \int_{x_1}^{x_2} f_{BF2} dx \quad (5.2)$$

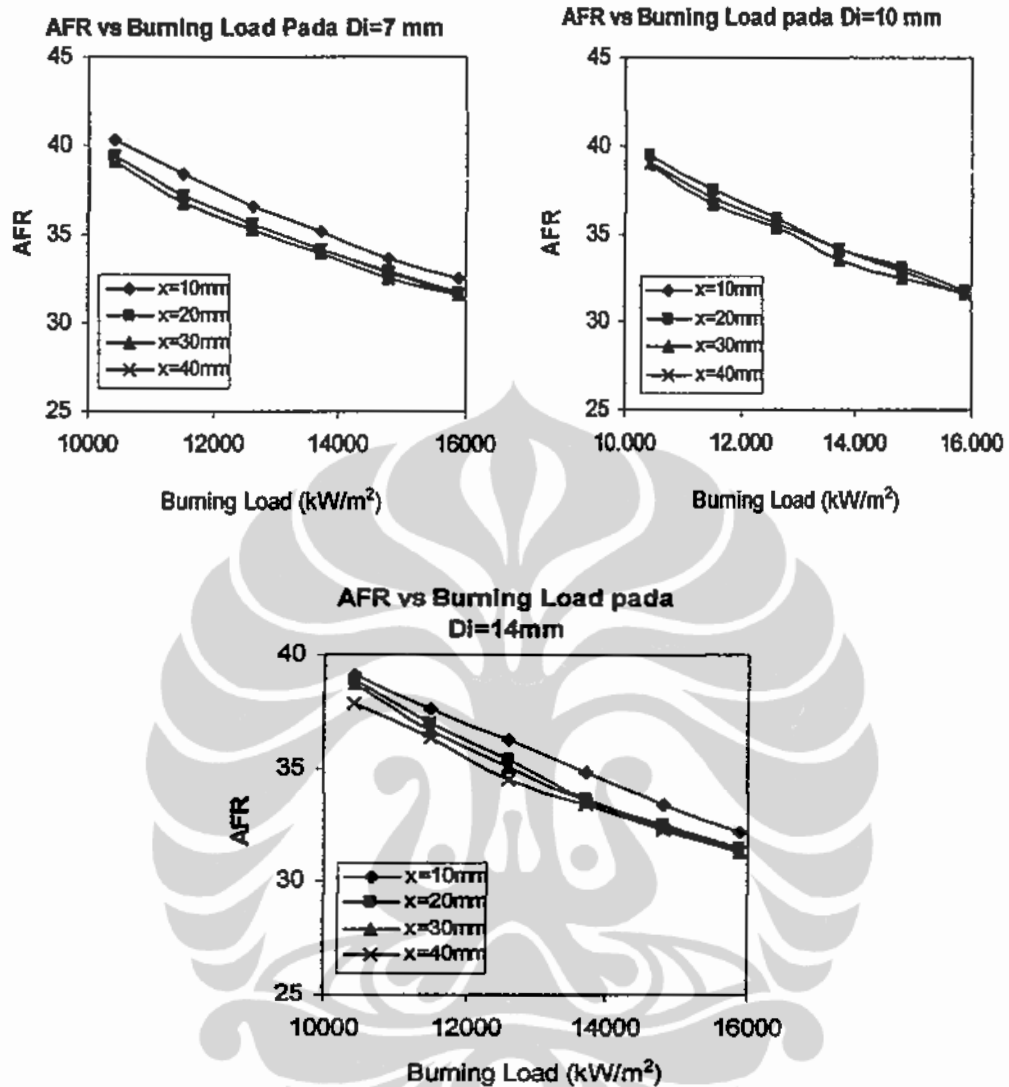
$$= 5484 \text{ kW} / \text{m}^2$$

Luas daerah kestabilan nyala dapat ditentukan dari Persamaan 5.3. yakni:

$$A_{LO} - A_{BF} = 105929,2 \text{ kW} / \text{m}^2 \quad (5.3)$$

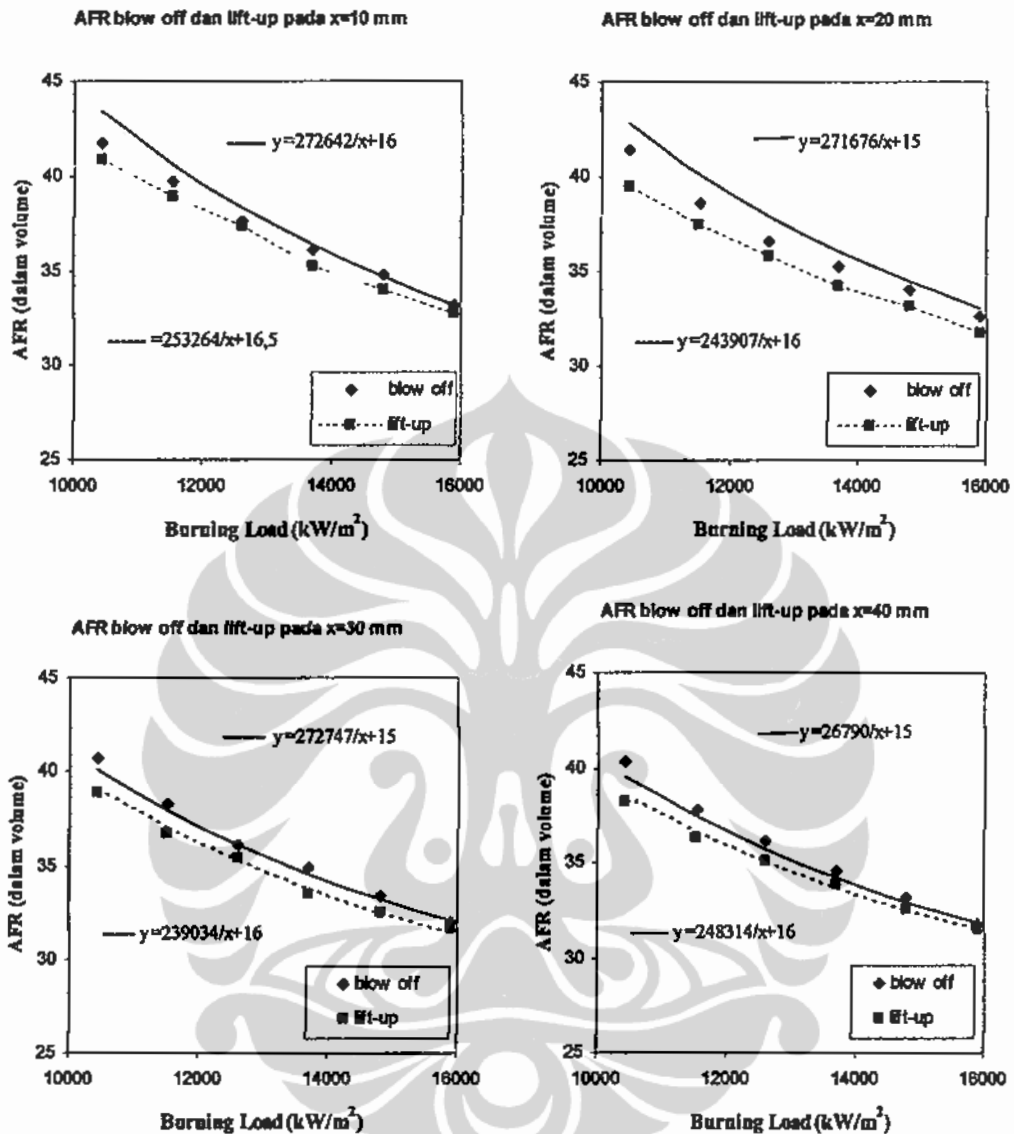
Penggunaan *ring* atau dengan adanya flame *lift-up* menambah daerah kestabilan nyala karena kurva *lift-up* berada diatas kurva lift-off [23]. Daerah stabilitas nyala *lift-up* dinyatakan sebagai daerah antara kurva tepat terjadinya *lift-up* sampai dengan *blow off*. Jika dibandingkan dengan daerah stabilitas nyala propana maka daerah stabilitas nyala api *lift-up* sangat kecil.

AFR saat *lift-up* berubah seiring dengan perubahan *Burning Load* seperti tampak pada Gambar 5.2. Hasil ini sesuai dengan konsep *AFR* yakni makin tinggi *Burning Load* yang identik dengan laju aliran bahan bakar pada luas penampang *burner* konstan dan asumsi kondisi tunak maka *AFR* makin rendah. Namun kecenderungan perubahan *AFR* akibat perubahan diameter dalam *ring* pada ketiga grafik menunjukkan bahwa pengaruh diameter dalam *ring* tidak terlalu besar. Pada ketiga grafik pengaruh posisi *ring* juga sama yakni *AFR* pada posisi *ring* makin dekat ujung *burner* makin meningkatkan *AFR* untuk terjadinya *lift-up*. Pada posisi dekat ujung *burner* makin meningkatkan *AFR* untuk terjadinya *lift-up*.



Gambar 5.2. *Burning Load* Saat *Lift-up*

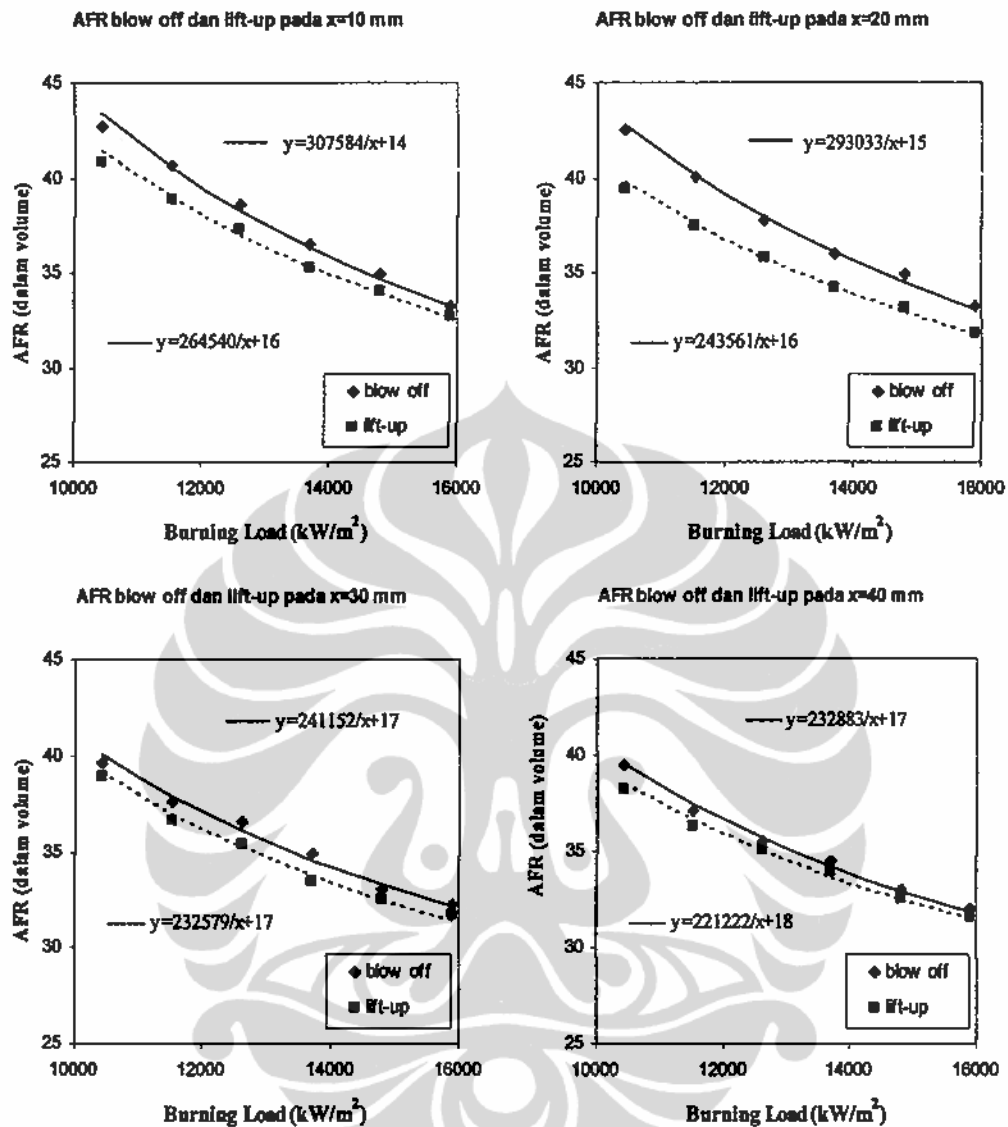
Pada posisi *ring* yang lebih tinggi, *AFR* untuk terjadinya *lift-up* makin mendekati *AFR blow off* tanpa *ring*. Hal ini sesuai dengan dengan analisa pada Bab 4 bahwa makin jauh dari *burner* dibutuhkan kecepatan campuran yang lebih tinggi untuk mengimbangi kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala. Fraksi massa bahan bakar atau rasio equivalen semakin berkurang akibat bercampur dengan udara sekitar seperti tampak pada hasil simulasi aliran dingin kontur fraksi massa propana Gambar 5.3. Warna merah menunjukkan fraksi massa propana yang tinggi saat baru keluar dari ujung *burner* dan menjadi hijau atau lebih rendah. Hal ini mengindikasikan terjadi pencampuran dengan udara sekitar yang mengakibatkan penurunan fraksi massa propana.



Gambar 5.4. Grafik AFR Saat *Blow off* dan *Lift-up* pada Ring Di = 7 mm

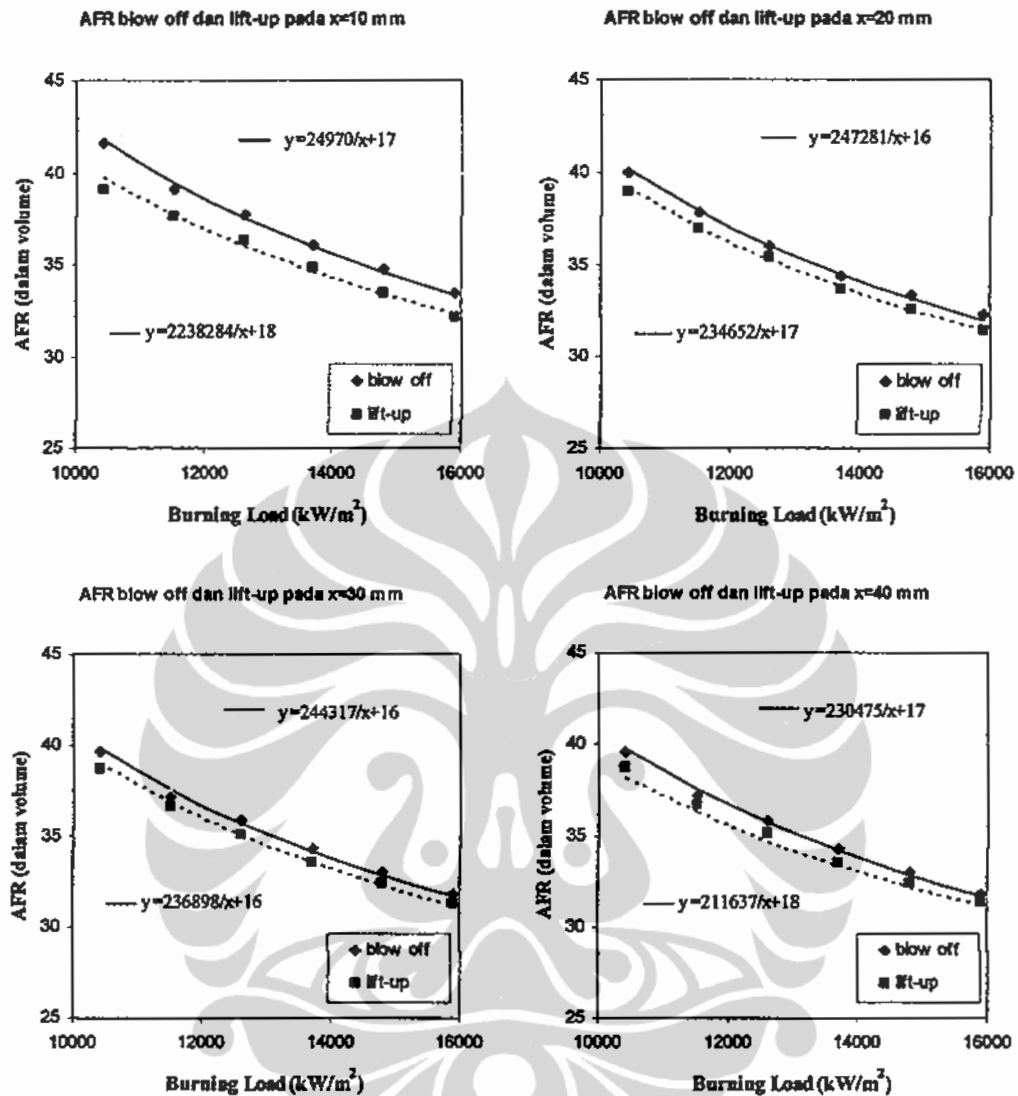
Kestabilan nyala tergantung pada laju kehilangan kalor dari nyala dan kecepatan pembakaran. Laju kehilangan kalor yang besar akan menurunkan daerah kestabilan nyala. Demikian pula kecepatan pembakaran yang tinggi menurunkan daerah kestabilan nyala. Kecepatan pembakaran meningkat akan mempercepat proses pembakaran sehingga rentang waktu untuk terjadinya pembakaran menjadi lebih singkat. Kondisi *flame lift-up* yang terjadi pada pembakaran yang miskin bahan bakar membuat peningkatan luas daerah kestabilan nyala juga kecil.

Berdasarkan pengamatan dari kurva-kurva maka peningkatan tertinggi terjadi pada diameter 10 mm dan posisi 20 mm. Sedangkan yang terendah adalah pada diameter dalam *ring* 14 mm dan posisi 30 mm.



Gambar 5.5. Grafik AFR Saat *Blow off* dan *Lift-up* pada Ring $D_i = 10$ mm

Hasil perhitungan daerah kestabilan nyala pada ketiga ukuran diameter dalam ring serta posisi ring sesuai Persamaan 5.1 s/d 5.3 ditampilkan pada Tabel 5.1. Kenaikan luas daerah kestabilan nyala ditentukan dari integral selisih kurva blow setelah lift-up dengan kurva saat lift-up. Adapun batas integral adalah *Burning Load* terendah dan tertinggi yakni rentang pengujian $10,4 - 15,9 \text{ kW/m}^2$. Persentase kenaikan daerah stabilitas yang paling tinggi adalah pada diameter dalam ring 10 mm dan posisi ring 20 mm.



Gambar 5.6. Grafik AFR Saat *Blow off* dan *Lift-up* pada Ring Di = 14 mm

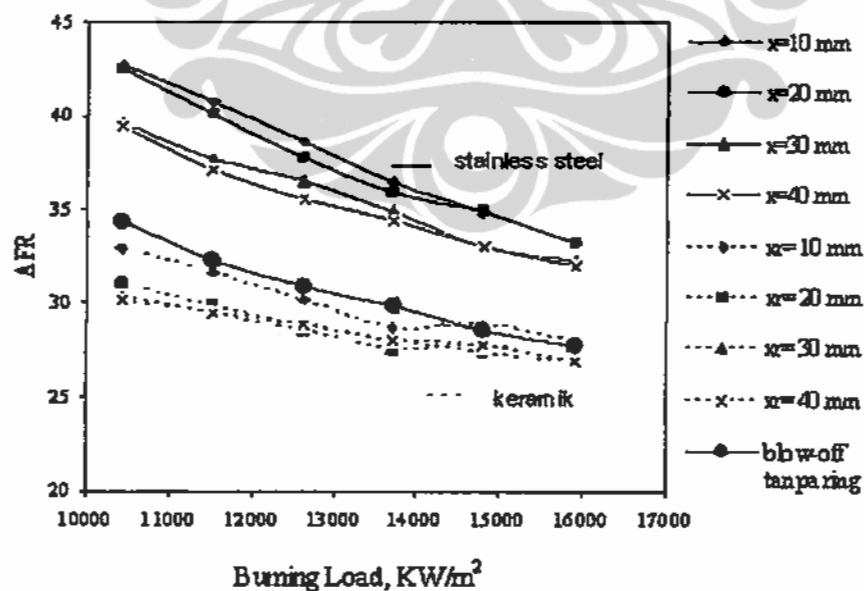
5.1.2 Pengaruh Material Ring terhadap Kestabilan Nyala Api Setelah *Lift-up*

Berbeda halnya dengan *ring stainless steel* yang AFR saat *lift-up*-nya selalu diatas AFR *blow off* tanpa *ring* maka pada *ring* keramik ternyata fenomena *flame lift-up* hampir selalu terjadi pada kondisi AFR dibawah AFR *blow off* tanpa *ring* seperti tampak pada Gambar 5.7.

Untuk *ring stainless steel* ternyata *ring* memang berfungsi sebagai *ring* penstabil nyala karena fenomena terjadi pada AFR diatas AFR *blow-off*. Tidak demikian halnya dengan *ring* dari keramik. Kisaran AFR *lift-up* untuk *ring* dari keramik adalah sekitar 27 sampai dengan 33 sedangkan interval AFR *blow off* adalah sekitar 31 s/d 36 tergantung pada posisi *ring* keramik dari ujung *burner*.

Tabel 5.1. Hasil Perhitungan Daerah Kestabilan Nyala *Lift-up*.

Diameter dalam ring	Posisi ring	Kenaikan daerah stabilitas nyala (kW/m^2)	Persentase kenaikan (%)
$D_i=7 \text{ mm}$	10	7486	7,0
	20	8481	8,0
	30	6490	6,1
	40	3155	3,0
$D_i=10 \text{ mm}$	10	7633	7,2
	20	13733	13,0
	30	6392	6,0
	40	4172	4,0
$D_i=14 \text{ mm}$	10	10521	9,9
	20	5440	5,1
	30	4807	4,5
	40	3362	3,2

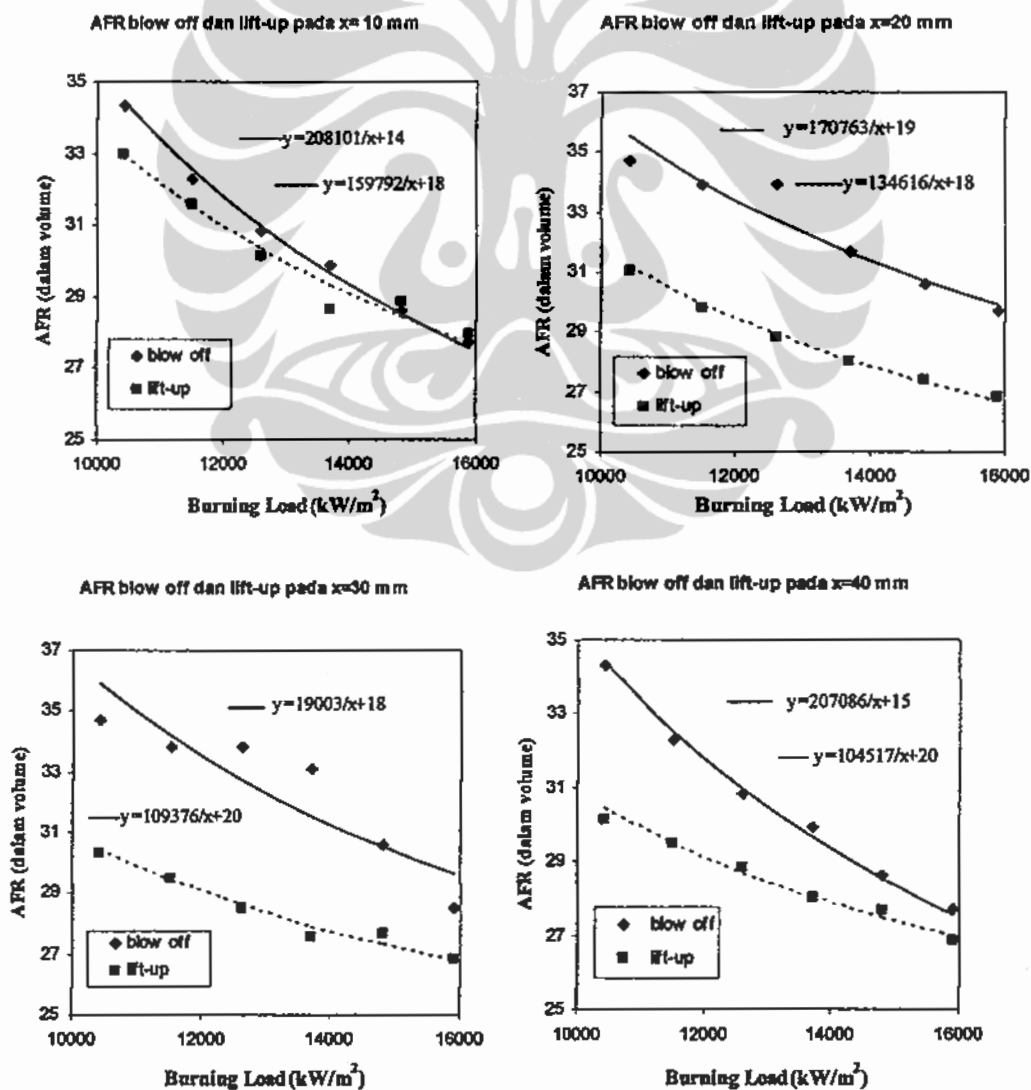


x adalah jarak ring stainless steel dari ujung burner
 xr adalah jarak ring keramik dari ujung burner

Gambar 5.7. Grafik *AFR* Saat *Lift-up* pada Ring Diameter Dalam 10 mm

Fenomena *lift-up* pada *ring* keramik terjadi pada *AFR* dibawah *AFR blow-off* tanpa *ring* meskipun masih pada kisaran diatas *AFR* stoikiometrik [78].

Sedangkan daerah kestabilan nyala api *lift-up* lebih luas dari pada menggunakan *ring* berbahan *stainless steel* seperti pada Gambar 5.8. Kestabilan nyala tertinggi terjadi pada posisi *ring* 20 mm dan 30 mm yakni 27398 kW/m² dengan persentase 25,8 seperti pada Tabel 5.2. Pengaruh laju kehilangan kalor dari nyala sangat terlihat pada luas daerah kestabilan nyala dari perbedaan material *ring* ini. Kondisi pada *ring* keramik juga menunjukkan pengaruh medan aliran terhadap kestabilan nyala berdasarkan perbedaan yang mencolok antara posisi 10 mm dan posisi 40 mm terhadap posisi 20 mm dan 30 mm.



Gambar 5.8. Daerah Kestabilan Nyala Api *Lift-up* pada *Ring* Keramik Di =10mm

Tabel 5.2. Hasil Perhitungan Daerah Kestabilan Nyala Api *Lift-up* pada *Ring* Keramik

Diameter dalam <i>ring</i>	Posisi <i>ring</i> , x_r (mm)	Daerah stabilitas nyala (kW/m^2)	Rasio daerah kestabilan nyala (%)
$D_i = 10$ mm	10	2344	2,2
	20	27227	25,7
	30	27398	25,8
	40	11651	11,0

Laju kehilangan kalor yang rendah pada penggunaan *ring* keramik membuat daerah kestabilan nyala menjadi lebih besar.

5.2 Kajian Teoritis Fenomena *Blow off* pada Nyala *Lift-up*

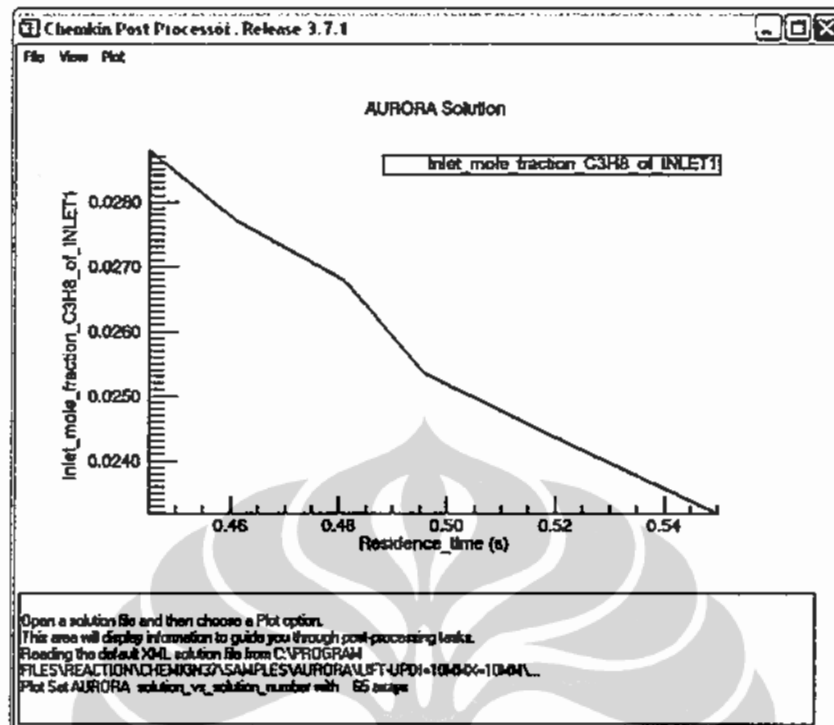
Dua pendekatan dalam kajian *blow off* adalah berdasarkan model *Well Stirred Reactor (WSR)* yang menghasilkan bilangan Damkohler dan berdasarkan model perambatan nyala. Model *WSR* mengasumsikan bahwa kestabilan nyala terjadi saat pencampuran dan turbulensi lebih cepat dari pada reaksi kimia atau nyala tetap terjadi jika cukup waktu untuk berlangsungnya pembakaran.

Pada nyala *lift-up* korelasi *blow off* didasarkan pada bilangan Damkohler atau perbandingan waktu aliran fisik dan waktu aliran kimia seperti pada Persamaan 5.4. [14]

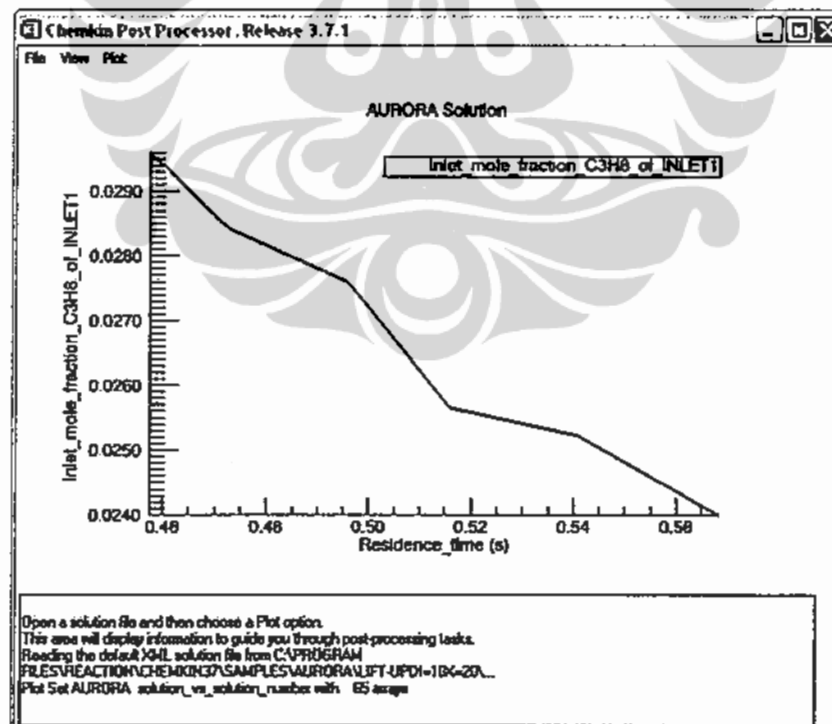
$$Da = \frac{\tau_{flow}}{\tau_{chem}} \quad (5.4)$$

Sesuai dengan langkah pada metode penelitian di Bab 3 maka waktu aliran kimia adalah *blow off residence time* yang ditentukan dengan AURORA di CHEMKIN. Tampilan hasil perhitungan *blow off residence time* ditampilkan pada Gambar 5.9, 5.10, 5.11 dan 5.12.

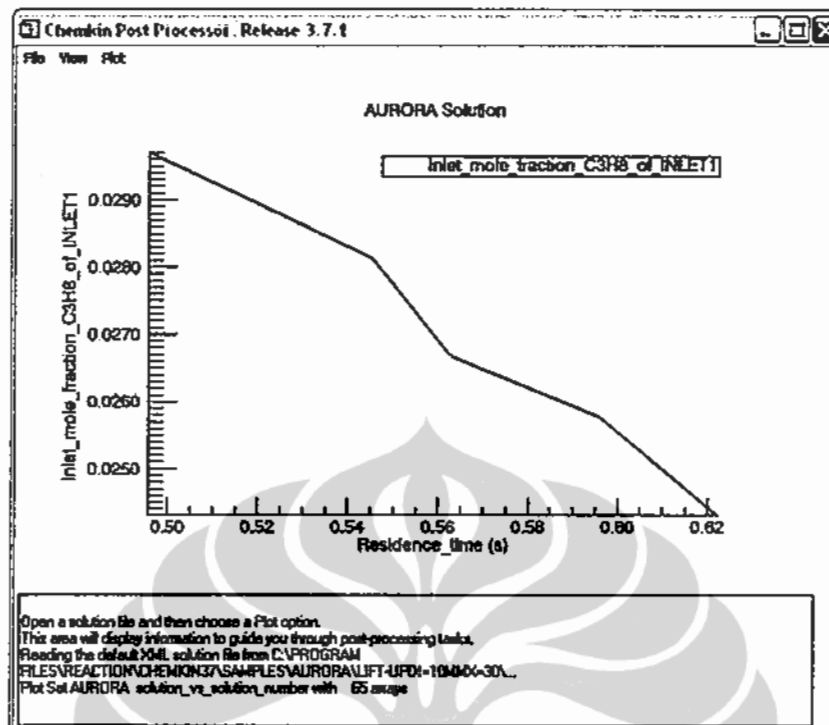
Waktu aliran fisik dihitung berdasarkan Persamaan 3.3. dengan menentukan *blockage ratio* untuk kondisi *bluff body* dengan *ring* diameter dalam 10 mm dan diameter luar 30 mm adalah 0,5 dan hasil perhitungan waktu aliran fisik, waktu aliran kimia atau *blow off residence time* dan Bilangan Damkohler



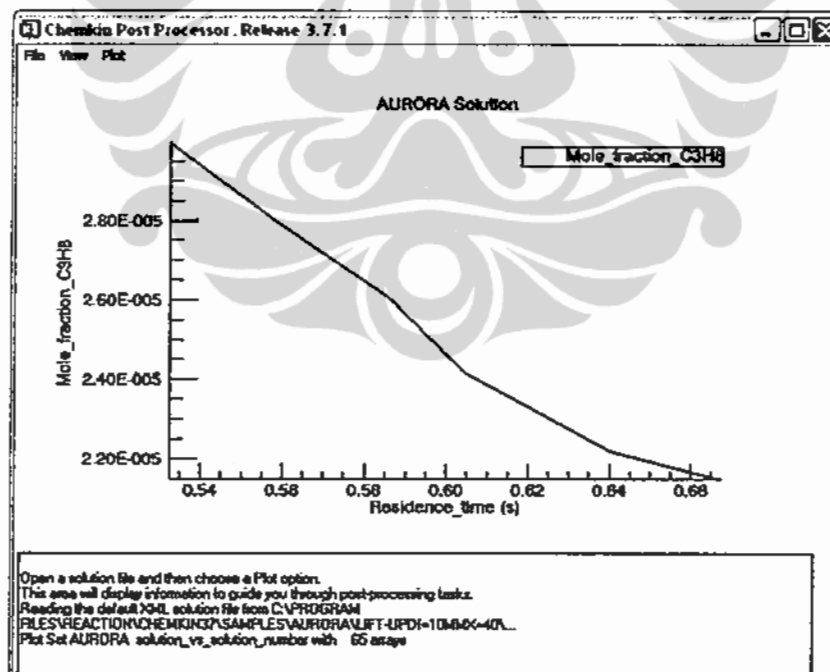
Gambar 5.9. Grafik *Blow off Residence Time* pada $D_i=10$ mm dan $x=10$ mm



Gambar 5.10. Grafik *Blow off Residence Time* pada $D_i=10$ mm dan $x=20$ mm



Gambar 5.11. Grafik *Blow off Residence Time* pada $D_i=10$ mm dan $x=30$ mm



Gambar 5.12. Grafik *Blow off Residence Time* pada $D_i=10$ mm dan $x=40$ mm

ditampilkan pada Tabel 5.3. Sedangkan langkah perhitungan secara rinci ditampilkan pada Lampiran 7.

Tabel 5.3. *Blow off Residence Time* dan Waktu Aliran Fisik

Ketinggian Ring (x) (mm)	<i>Blow off Residence time</i>	Waktu aliran fisik	Bilangan Damkohler	Bilangan Karlovitz
10	0,68	0,00193	0,0040	252
	0,62	0,00184	0,0042	238
	0,59	0,00175	0,0042	238
	0,58	0,00170	0,0042	240
	0,55	0,00163	0,0042	238
	0,53	0,00157	0,0042	237
20	0,7	0,00200	0,0040	250
	0,65	0,00190	0,0042	241
	0,65	0,00182	0,0042	241
	0,56	0,00175	0,0042	240
	0,57	0,00167	0,0042	240
	0,55	0,00162	0,0042	239
30	0,70	0,00203	0,0041	245
	0,66	0,00195	0,0042	239
	0,62	0,00184	0,0042	237
	0,60	0,00178	0,0042	236
	0,58	0,00170	0,0041	241
	0,55	0,00162	0,0042	239
40	0,71	0,00193	0,0040	252
	0,66	0,00184	0,0042	238
	0,62	0,00175	0,0042	238
	0,60	0,00170	0,0042	240
	0,57	0,00163	0,0042	238
	0,55	0,00157	0,0042	237

Dari Tabel 5.3 terlihat bahwa korelasi *blow off* terjadi pada Bilangan Damkohler yang lebih kecil dari 1 sehingga dengan mengacu pada literatur dari Fox [84] dapat dinyatakan dalam Bilangan Karlovitz. Bilangan Karlovitz yang dipergunakan adalah perbandingan dari waktu kimia dengan waktu aliran turbulen. Bilangan Karlovitz ini mempunyai korelasi dengan Bilangan Karlovitz yang ditentukan berdasarkan tebal nyala seperti pada Persamaan 5.5 [38,84,85]:

$$Ka_{\eta} = \frac{Ka}{100} \quad (5.5)$$

Bilangan Karlovitz dari Tabel 5.3 jika dimasukkan ke Persamaan 5.4 maka diperoleh Bilangan Karlovitz antara 2,3 dan 2,5. Nilai ini jika dibandingkan

dengan Bilangan Karlovitz yang ditentukan berdasarkan tebal nyala [82] juga memiliki kisaran sekitar 2,3.

Kondisi *blow off* yang dianalisa pada Bab 5 ini adalah kondisi keseluruhan nyala telah padam atau dengan pendekatan bahwa waktu aliran fisik lebih besar dari pada waktu aliran kimia. Jika dibandingkan dengan analisa laju kehilangan kalor pada Bab 4 maka kondisi *lokal extinction* diperoleh berdasarkan pendekatan model perambatan nyala atau regangan nyala terutama untuk kondisi di pangkal nyala. Perambatan nyala pada pangkal nyala akan menimbulkan regangan yang mengarah ke *lokal extinction*. Sedangkan kajian *blow off* dengan pendekatan *WSR* dapat dikorelasikan dengan pendekatan perambatan nyala hanya pada ujung nyala.



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* Termodinamika 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

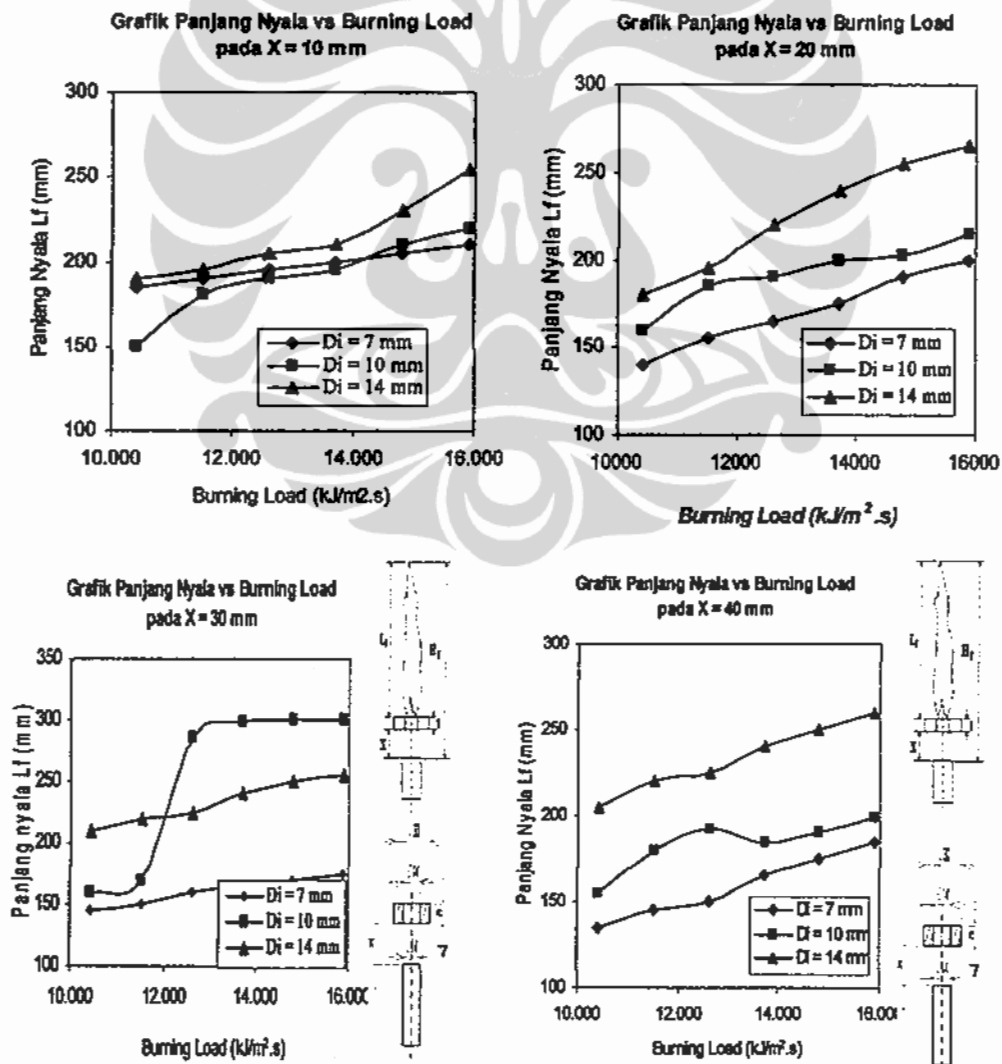
X (mm)	V_f (L/s)	V_a (L/s)	AFR	Y_f	BL (kW/m ²)	L_f (mm)
10	0,019	0,743	39,10	0,036	10.417	190
	0,021	0,790	37,63	0,038	11.513	195
	0,023	0,834	36,27	0,039	12.610	205
	0,025	0,871	34,85	0,041	13.706	210
	0,027	0,902	33,40	0,043	14.803	230
	0,029	0,932	32,14	0,044	15.899	255
20	0,019	0,740	38,92	0,046	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*

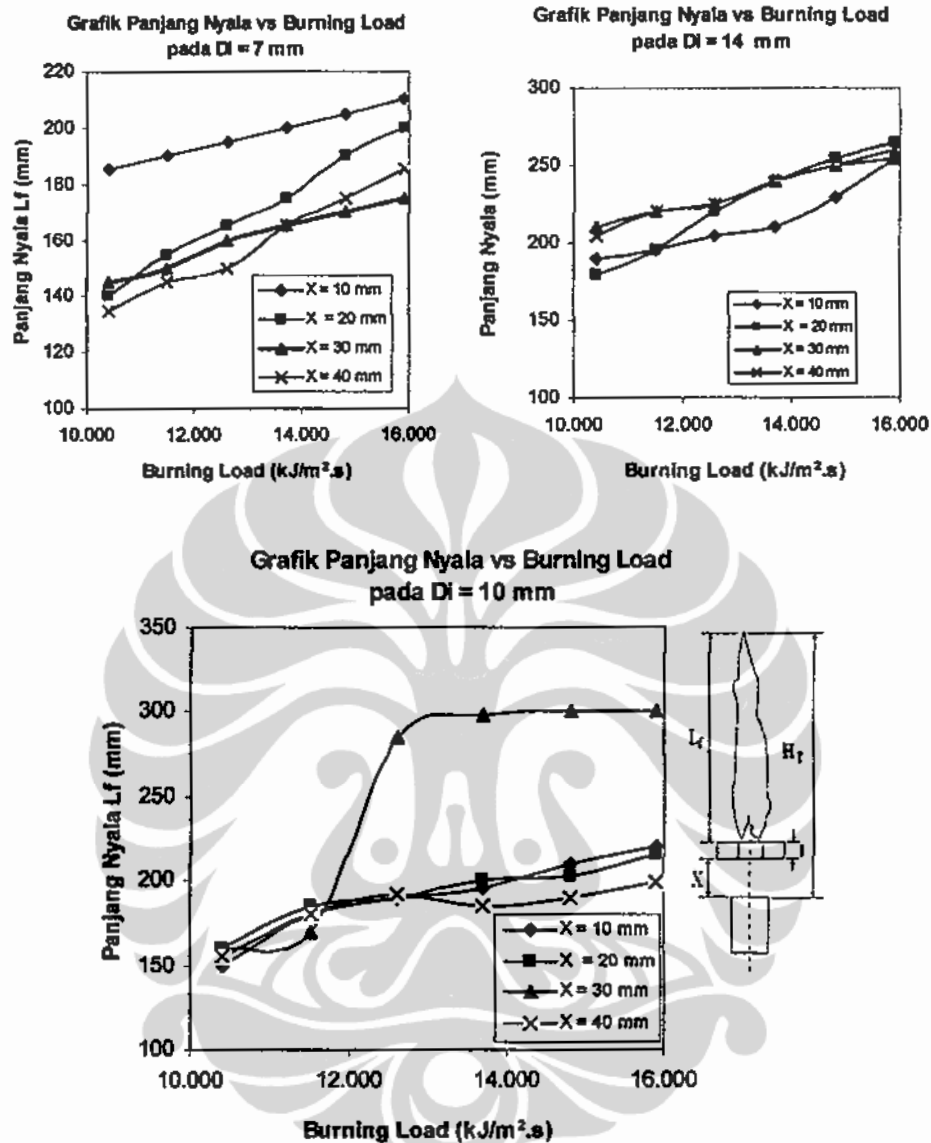
Kecenderungan pengaruh *Burning Load* terhadap panjang nyala digambarkan dalam grafik Gambar 6.1 pada variasi diameter dalam *ring* dan Gambar 6.2 pada variasi posisi *ring*. Sesuai dengan persamaan empiris dari Rokke [34] dengan naiknya *Burning Load* atau fraksi massa bahan bakar maka panjang nyala 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.



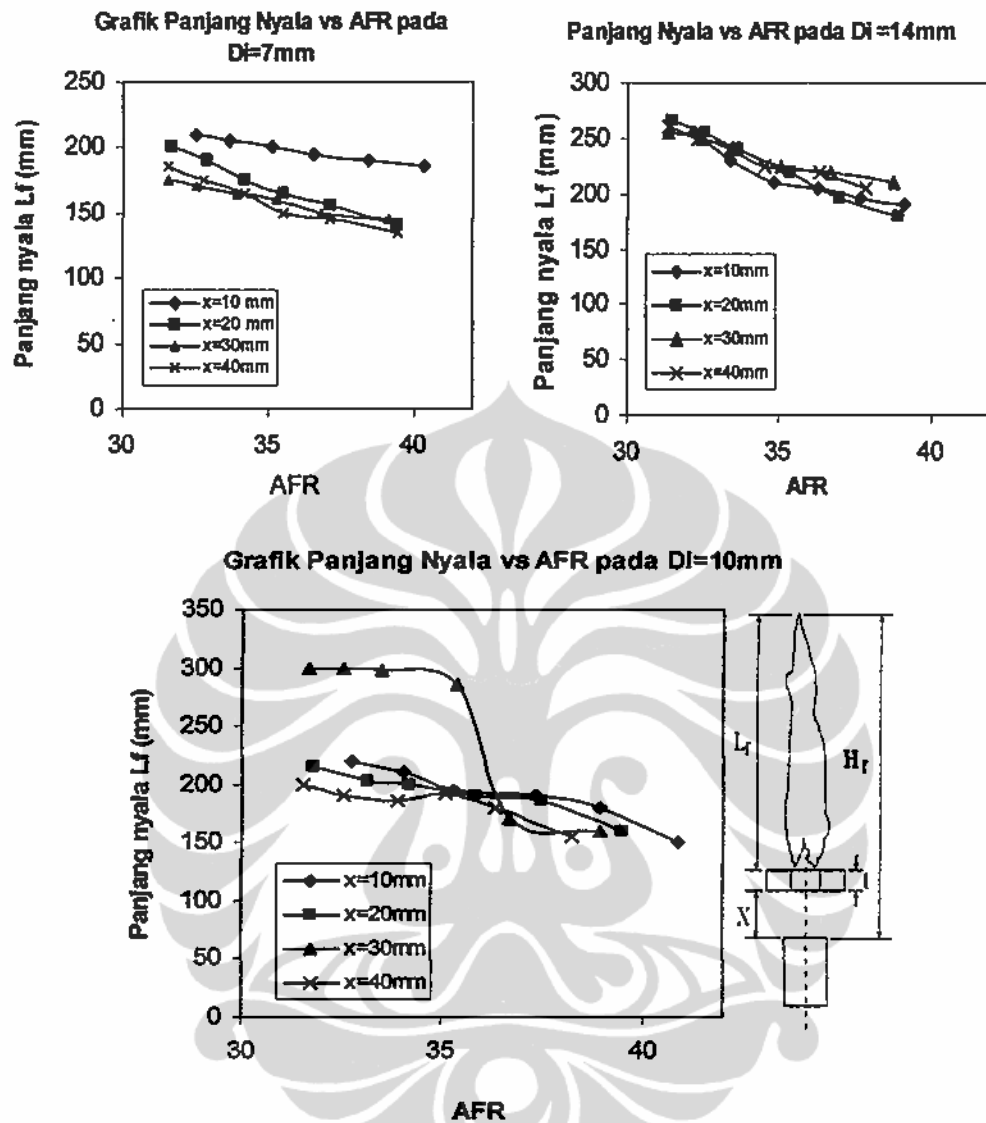
Gambar 6.1. Pengaruh *Burning Load* pada Variasi Diameter Dalam *Ring*



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

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

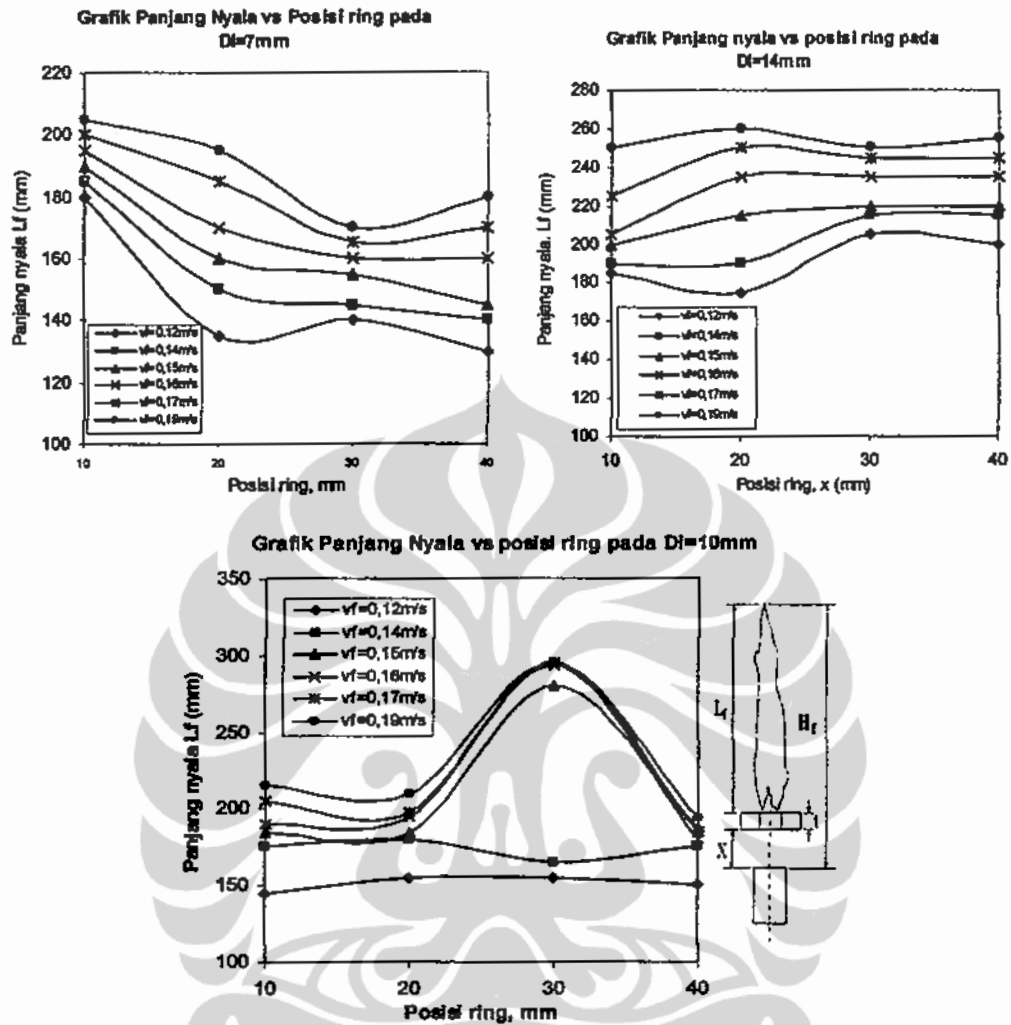
Panjang nyala api dibuat juga grafiknya pada variasi *AFR* seperti ditampilkan pada Gambar 6.3. Panjang nyala api berkebalikan dengan *AFR* yakni *AFR* meningkat maka panjang nyala api menurun. Hal ini juga sesuai dengan persamaan panjang nyala api *premixed* yang diusulkan oleh Rokke [34]. Persamaan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

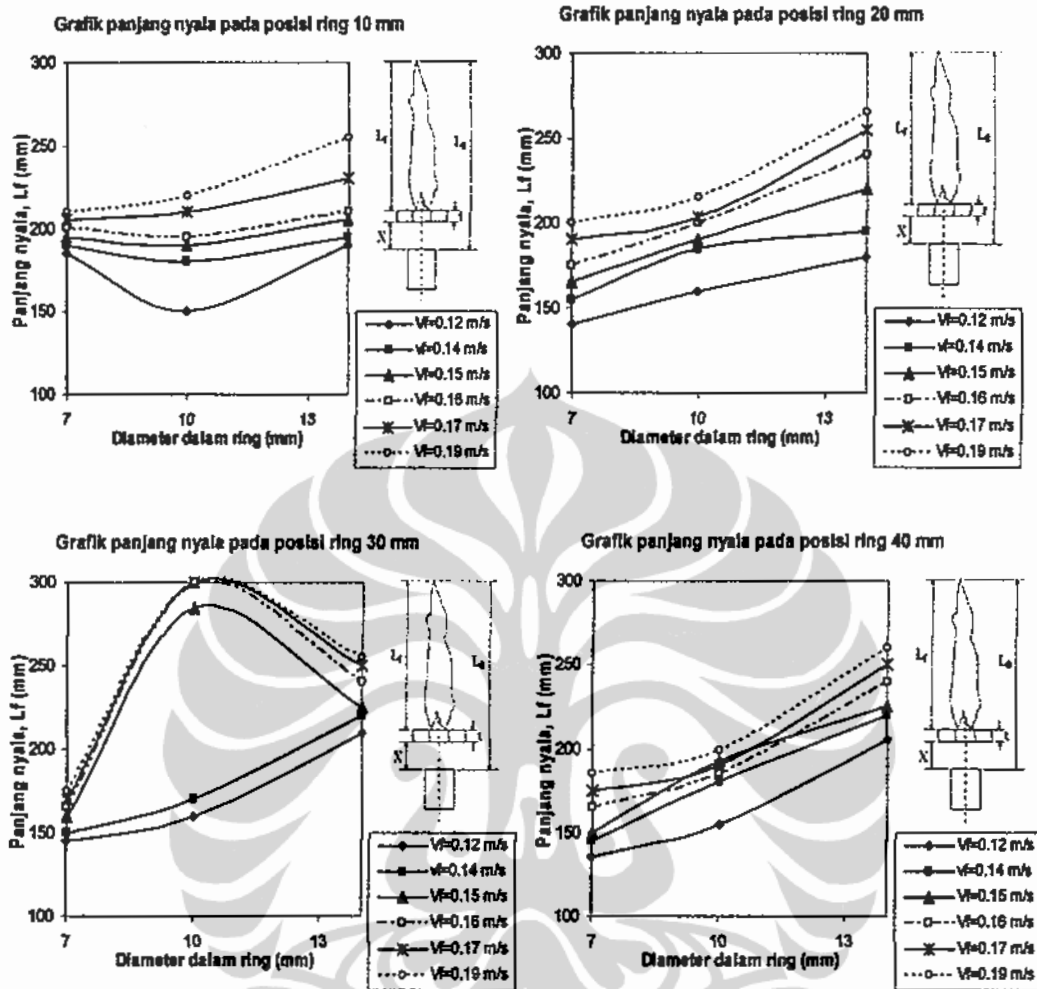
Grafik pengaruh posisi *ring* ditampilkan pada Gambar 6.4. Sangat jelas terlihat bahwa panjang nyala pada posisi 30 mm dan diameter dalam *ring* 30 mm serta laju aliran bahan bakar yang tinggi panjang nyala mencapai maksimum. Pengaruh temperatur *ring stainless steel* yang tinggi dibandingkan dengan 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 $0,162\text{ m/dt}$ 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*.

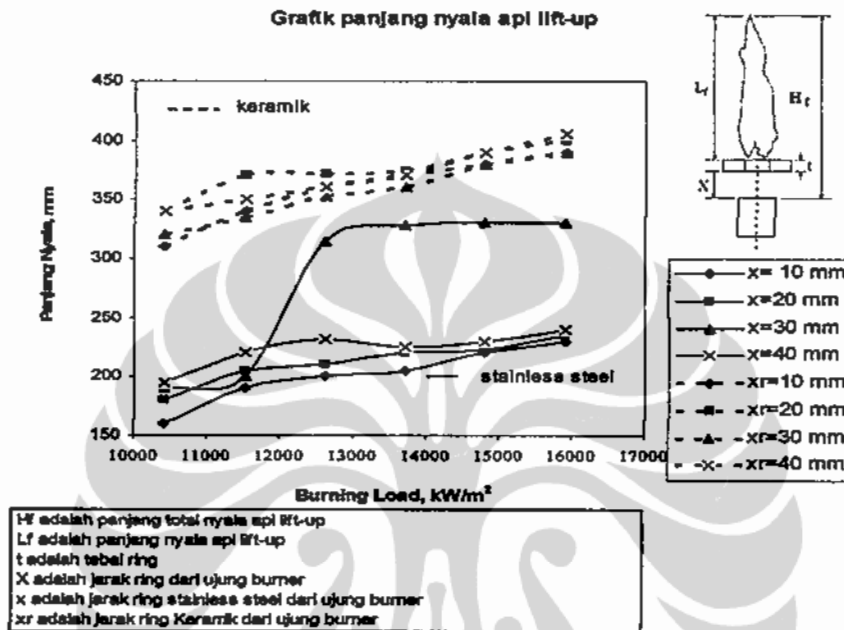
Pengaruh material ring terhadap panjang nyala api diperlihatkan grafiknya pada Gambar 6.6. Terlihat bahwa panjang nyala api *lift-up* dengan menggunakan

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

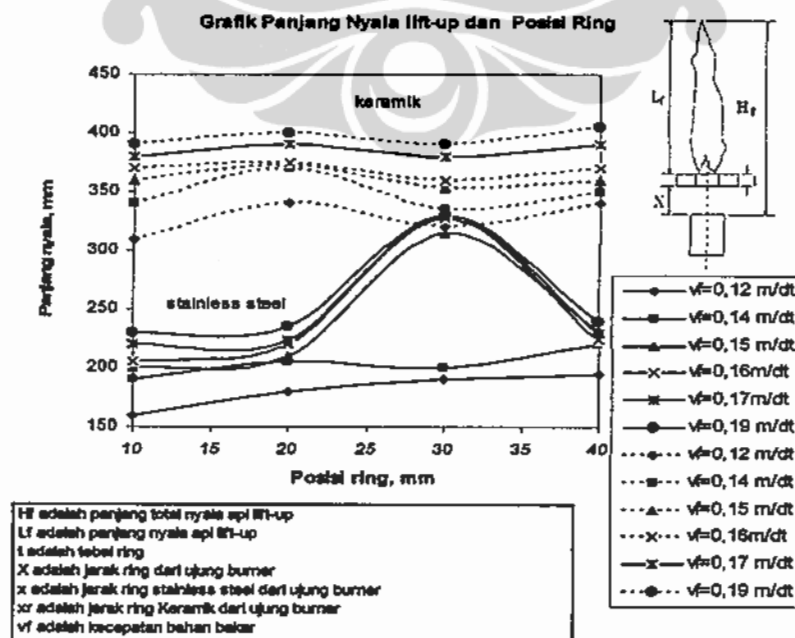
X (mm)	V _f (L/s)	V _a (L/s)	AFR	Y _f	BL (kW/m ²)	L _f (mm)
10	0,019	0,626	33,0	0,043	10.417	295
	0,021	0,663	31,6	0,045	11.513	325
	0,023	0,693	30,1	0,047	12.610	345
	0,025	0,716	28,6	0,049	13.706	355
	0,027	0,779	28,8	0,049	14.803	365
	0,029	0,811	28,0	0,050	15.899	375
20	0,019	0,590	31,1	0,043	10.417	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]

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

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 :

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

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/D_i	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

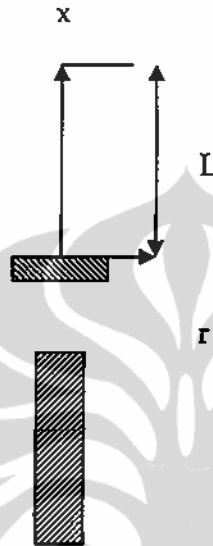
6.3 Kajian Teoritis Panjang Nyala Api Setelah *Lift-up*

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]:

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

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

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

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

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

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

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

Persamaan 6.17. dapat dinyatakan dalam Bilangan Reynolds menjadi:

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

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

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

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

$$\frac{r}{x} = \frac{16}{\sqrt{3} Re_{d_0}} \sqrt{\frac{3 Re_{d_0} r_0}{16 x f} - 1} \quad (6.24)$$

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]:

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

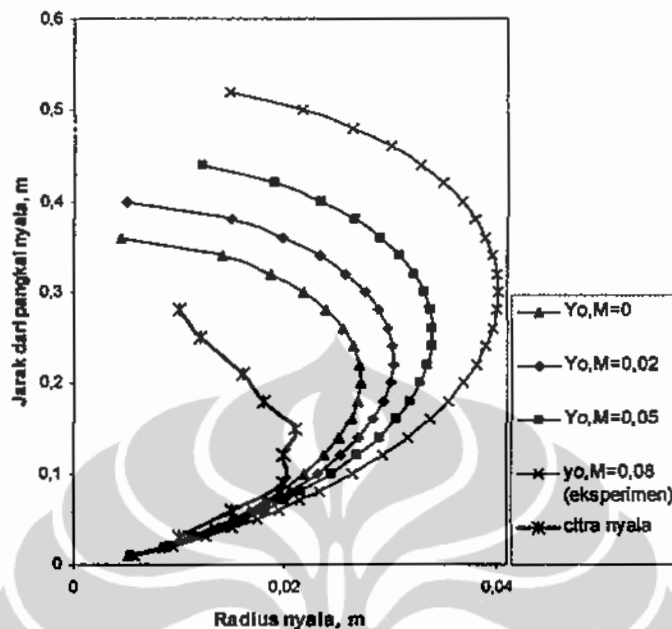
Sehingga f dapat disubstitusikan ke Persamaan 6.24 dan pada permukaan nyala $r = r_{flame}$ dan Bilangan Reynolds adalah Bilangan Reynolds untuk nyala yakni kondisi nyala laminar dengan $Re_f \approx 4$ [85] diperoleh radius nyala sebagai fungsi x dapat diturunkan seperti Persamaan 6.27:

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

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

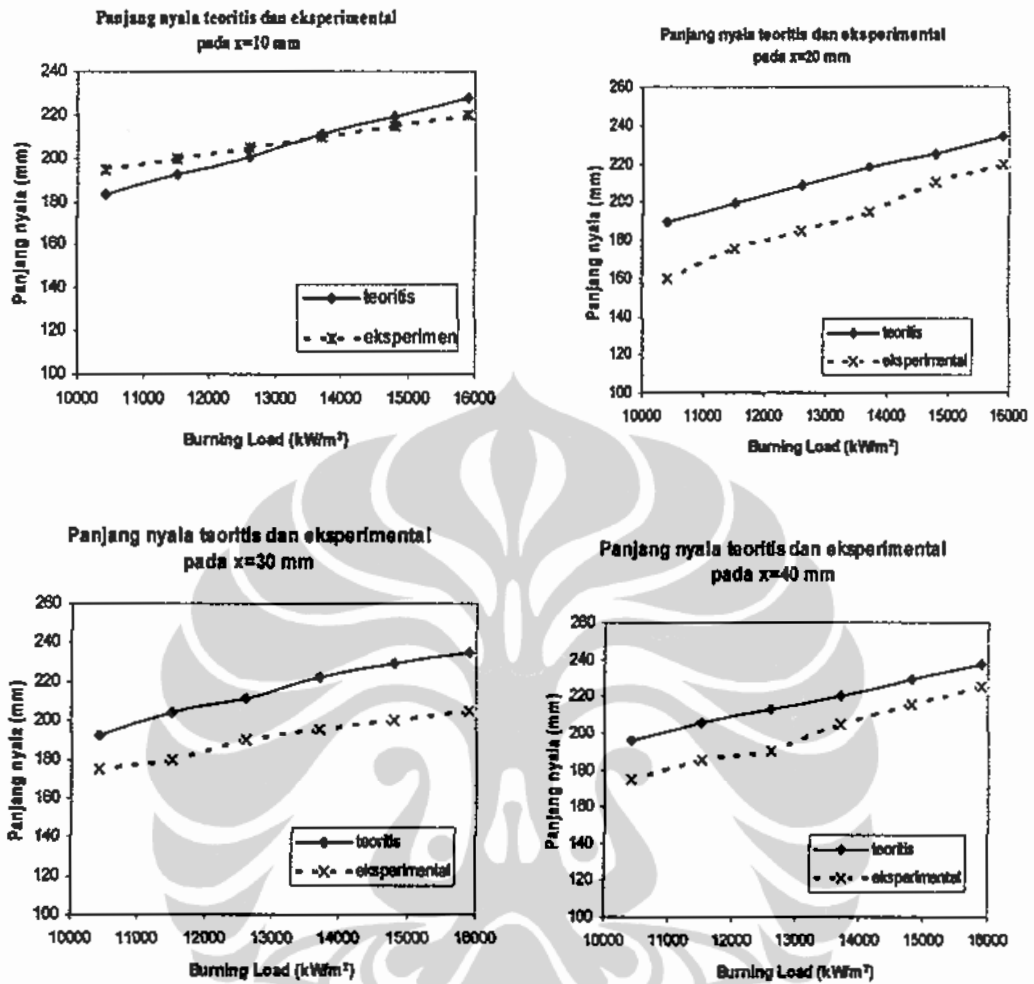
$$\frac{x_{flame}}{r_o} = \frac{3}{16} \text{Re}_f \left[\frac{1 + (F/O)_{st} Y_{O,A}}{(F/O)_{st} Y_{O,A} f} \right] = \frac{3}{16} \text{Re}_f \left[\frac{1 + (F/O)_{st} Y_{O,A}}{(F/O)_{st} Y_{O,A} (1 + AFR)} \right] \quad (6.32)$$

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.

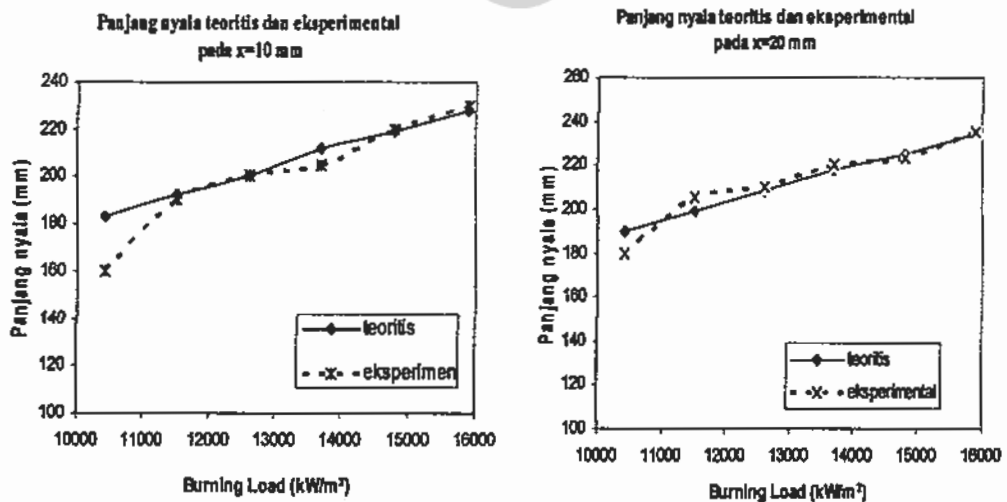
Berdasarkan persamaan 6.32 dihitung panjang nyala teoritis dan dibandingkan dengan panjang nyala hasil eksperimen dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 6.10 sampai 6.12.

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.

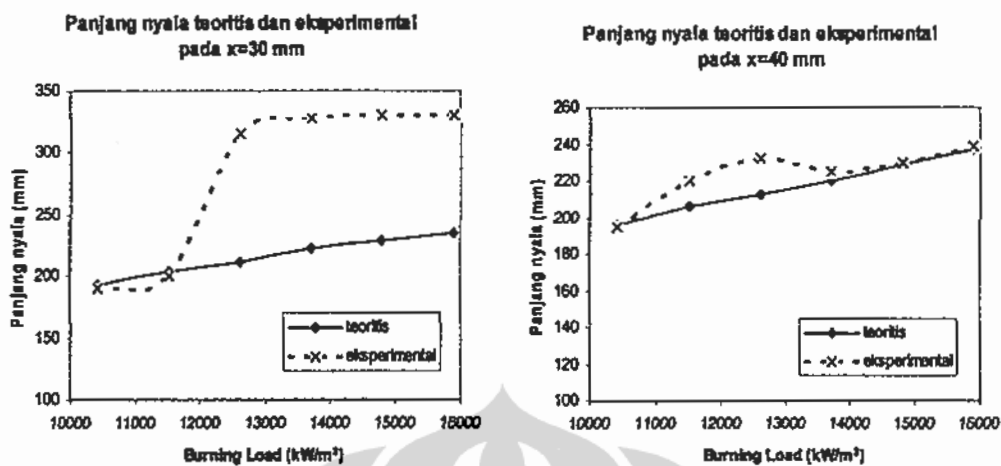
Perbedaan perhitungan dan pengukuran panjang nyala disebabkan juga oleh kendala saat pengukuran yakni tekanan tabung bahan bakar yang berkurang seiring dengan kenaikan laju aliran bahan bakar. Namun berdasarkan kecenderungan perubahan panjang nyala yang menurun seiring dengan kenaikan *AFR* sesuai dengan 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.



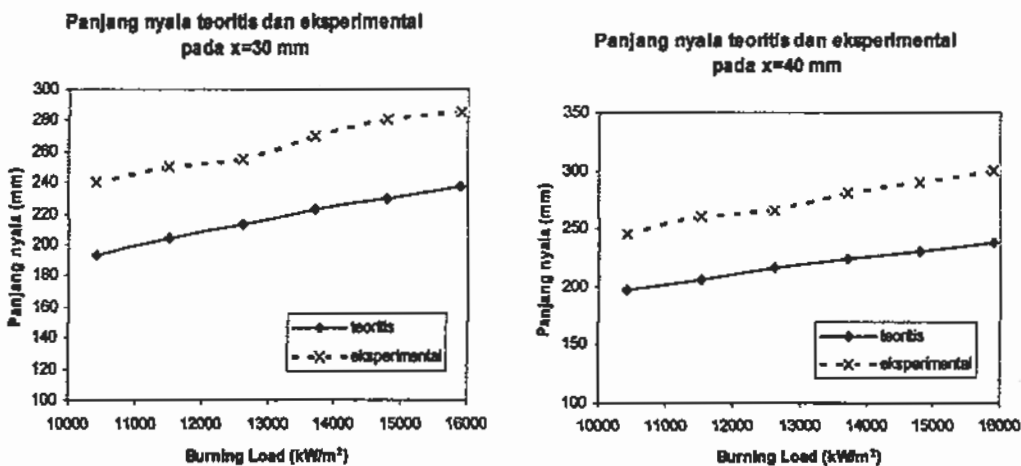
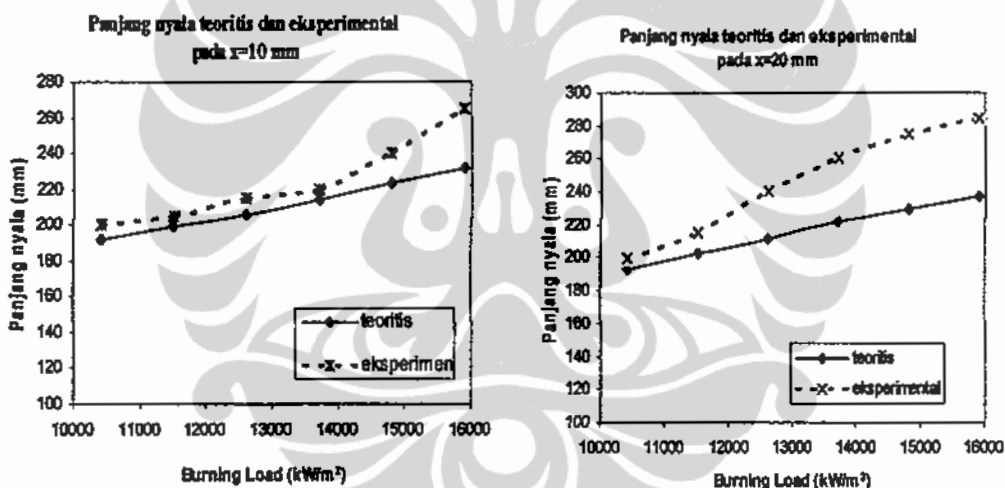
Gambar 6.10. Panjang Nyala Teoritis dan Eksperimental pada Di=7 mm



Gambar 6.11. Panjang Nyala Teoritis dan Eksperimental pada Di=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%.



BAB 7

KESIMPULAN

Fenomena *flame lift-up* ternyata adalah peristiwa berpindahnya seluruh pangkal nyala api yang terlihat secara visual dari sebelumnya pada ujung *burner* menuju *ring* yang ditempatkan pada jarak lebih kecil dari ujung kerucut nyala pada Bunsen *burner*. Pangkal nyala merupakan daerah lokasi keseimbangan antara kecepatan pembakaran laminar, S_L dengan kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala, $S_{L,c}$ yang besarnya berkisar antara 0,37–4,3 m/s. Kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala sangat ditentukan oleh laju kehilangan kalor dari nyala. Laju kehilangan kalor dari nyala ditentukan oleh temperatur nyala yang merupakan fungsi dari kecepatan campuran dan *AFR* atau rasio ekuivalen.

Fenomena *flame lift-up* terjadi karena laju kehilangan kalor antara ujung *burner* dan *ring*. Keseimbangan kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala dengan kecepatan pembakaran laminar bergeser ke *ring* karena pada *ring* terjadi kenaikan laju aliran. Hal ini didukung oleh hasil simulasi medan aliran setelah pembakaran yang berbeda dengan medan aliran dingin. Pada daerah antara ujung *burner* dan *ring* terjadi *local extinction* akibat kecepatan pada batas mampu nyala tidak dapat diimbangi oleh kecepatan aliran. Hal ini sesuai dengan hasil simulasi pembakaran yakni nilai Bilangan Damkohler yang hampir sama antara ujung *burner* dan *ring*.

Blow off terjadi akibat kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala lebih tinggi dari kecepatan pembakaran laminar atau waktu untuk terjadinya reaksi kimia lebih rendah dari pada waktu aliran fisik aliran atau *residence time*. Korelasi *blow off* pada *flame lift-up* dengan mengacu pada korelasi *blow off* untuk aliran pada *bluffbody* yakni pendekatan WSR atau PSR terjadi pada Bilangan Damkohler sekitar 0,004 atau Bilangan Karlovitz sekitar 236-252. Hasil ini berkorelasi dengan prediksi timbulnya fenomena *flame lift-up* berdasarkan Bilangan Karlovitz tebal nyala sekitar 2,5.

Daerah kestabilan nyala *lift-up* makin besar jika laju kehilangan kalor dari nyala makin kecil. Hal ini diperoleh pada *ring* berbahan keramik yang dapat

meningkatkan daerah kestabilan nyala sampai 25%. Posisi optimum dari *ring* agar tercapai daerah kestabilan nyala yang tinggi adalah antara 20-30 mm.

Panjang nyala api setelah *lift-up* menunjukkan kesesuaian pengaruh laju kehilangan kalor pada fenomena *flame lift-up*. Laju kehilangan kalor yang rendah membuat panjang nyala yang lebih tinggi. Demikian pula pengaruh rasio equivalen atau fraksi massa bahan bakar yang besar terhadap panjang nyala terdapat kesesuaian antara hasil eksperimen dengan kajian teoritis. Berdasarkan kajian teoritis pendekatan nyala setelah *ring* adalah nyala pancaran atau *jet flame* diperoleh persamaan panjang nyala sebagai berikut:

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

Panjang nyala setelah *lift-up* dipengaruhi oleh *AFR* dan Bilangan Reynold. *AFR* adalah keselarasan dengan fraksi massa bahan bakar sedangkan Bilangan Reynold merupakan representasi dari pengaruh geometri *burner* dan *ring*, kecepatan campuran dan sifat campuran yang sangat dipengaruhi oleh temperatur nyala.

Kajian fenomena *flame lift-up* baru pada tahap pengaruh laju kehilangan kalor dari nyala. Selanjutnya penelitian dapat dikembangkan pada pendekatan regangan nyala dengan memperhitungkan kelengkungan (*curvature*) nyala Bunsen. Demikian pula pengaruh daerah resirkulasi maupun panjang daerah resirkulasi atau efek turbulensi aliran, kekasaran permukaan *ring*, tebal *ring* dan diameter *burner* yang belum dibahas pada kajian eksperimental ini. Sedangkan dari aspek panjang nyala, penentuan panjang nyala secara matematis dapat dilanjutkan dengan memperhitungkan pengaruh suhu atau memasukkan pengaruh perubahan entalpi.

DAFTAR ACUAN

- [1] Yunh-Cheng Chen, Munki Kim, Jeongjae Han, Sangwook Yun dan Youngbin Yoon, 'Analysis of flame surface normal and curvature measured in turbulent Premixed stagnation-point flames with crossed-plane tomography, *Proceeding of the Combustion Institute*, 31 (2007) hal. 1327-1335
- [2] Eduardo Fernandez-Tarrazo, Marcos Vera dan Amable Linan, "Liftoff and blowoff of a diffusion flame between parallel streams of fuel and air", *Combustion and Flame* 144 (2006) hal 261-276
- [3] Andres A. Chaparro dan Baki M. Cetegen, Blowoff Characteristics of Bluff-body stabilized conical premixed flames under upstream velocity modulation, *Combustion and Flame* Vol 144, Issues 1-2, (2006) hal. 318-335
- [4] Yung-cheng Chen, Chia-chi Chang, Kuo-Long Pan dan Jing-Tang Yang, "Flame Lift-off and Stabilization Mechanisms of Nonpremixed Jet flames on a Bluff-body Burner", *Combustion And Flame*, Volume 115, Issues 1-2, (1998), hal. 51-65
- [5] Al-Abdeli, Yasir M. dan Masri, Assaad R., "Stability characteristics and flowfields of turbulent non-premixed swirling flames", *Proceedings of the Physical Society*, Volume 7, Issue 4, (2003) hal. 731-766
- [6] Vatistas, G. H., Lin, S., Kwok, C. K. dan Lilley, D. G., "Bluff-body flameholder wakes - A simple numerical solution," AIAA, SAE, and ASME, Joint Propulsion Conference, 18th, Cleveland, OH, June 21-23, (1982), AIAA 7 p. National Research Council06/1982
- [7] Dally, B. B.; Fletcher, D. F. dan Masri, A. R. "Flow and mixing fields of turbulent bluff-body jets and flames", *Combustion Theory and Modelling*, Volume 2, Issue 2, (1998) hal. 193-219
- [8] Leonard, Andy D.; Smith, Clifford E. dan van Erp, Chris, "Large eddy simulation of blowout of a bluff-body stabilized flame in a duct", AIAA, SAE, ASME, and ASEE, Joint Propulsion Conference, 27th, Sacramento, CA, June 24-26, 1991. 14p

- [9] Eugenio Giacomazzi, Valerio Battaglia dan 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, (2004), hal. 320-335
- [10] A. Kempf, R.P Lindstedt dan J. Janicka, "Large-eddy simulation of bluff-body stabilized nonpremixed flame", *Combustion and Flame* Vol 144, Issued 1 (2006), hal. 170-189
- [11] V. Moureau, P. Minot, H. Pitsch dan C. Bérat, A ghost-fluid method for large-eddy simulations of premixed combustion in complex geometries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 221, issue 2 (2007), hal 600-614
- [12] Kai Liu, Stephen B. Pope dan 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, (2005), hal. 89-117
- [13] Stevan Nemoda, Vukman Bakic, Simeon Oka, Goran Zivkovic dan Nenad Crnomarkovic, "Experimental and numerical investigation of gaseous fuel combustion in swirl chamber", *International Journal of Thermal Sciences* Volume 44, Issue 10, (2005), hal. 973-985
- [14] Santosh J. Shanbhogue., Sajjad Husain dan Tim Lieuwen, Lean Blow off of Bluff body Stabilized Flames: Scaling and Dynamic, *Progress in Energy and Combustion Science*, 35, (2009) hal. 98-120
- [15] Raju, M. S dan Krishnamurthy, L., Computational fluid dynamic studies of certain ducted bluff-body flowfields relevant to turbojet combustors. Volume 2: Time-Average Flowfield Prediction for a Proposed Center Body Combustor, Dayton Univ of Research Inst. , NTIS, (1986)
- [16] Fujii, S.; Gomi, M. dan Eguchi, K., Cold flow tests of a bluff-body flame stabilizer, ASME, Transactions, Journal of Fluids Engineering, vol. 100, (1978), hal. 323-332
- [17] Roquemore, W. M.; Tankin, R. S.; Chiu, H. H. dan Lottes, S. A., "The role of vortex shedding in a bluff-body combustor", IN: Experimental measurements and techniques in turbulent reactive and non-reactive flows; Proceedings of the Winter Annual Meeting, New Orleans, LA, December 9-14, 1984 (A86-11932 02-35). New York, ASME, (1984), hal 159-174

- [18] Escudier, M. P. dan Keller, J. J. Recirculation in swirling flow – A manifestation of vortex breakdown, *AIAA Journal* (ISSN 0001-1452), vol. 23, (1985), hal. 111-116
- [19] Dorofeev S. B. ; Efimenko A. A. ; Kochurko A. S. dan Kuznetsov M. S. , Industrial Fuel Ignition Condition by Flame Radiation, *Journal of loss prevention in the process industries* ISSN 0950-4230 CODEN JLPJIE9 , vol. 6, (1993), hal. 159-163
- [20] Gouldin F. dan Cheng RK., International Workshop on Premixed Turbulent Flame, terdapat pada <http://eetd.lbl.gov/aet/combustion/workshop/workshop.html>
- [21] Johnson, M.R., Kostiuik, L.W. dan Cheng, R.K., ‘ A ring Stabilizer for Lean Premixed Turbulent Flames’ Combustion Group, Energy & Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkely, California, 94720
- [22] Chung et. Al, ‘ Lifted Flames in Laminar Jets of Propane in Coflow air’ *Combustion and Flame* 135, (2003) hal. 449-462
- [23] Laura S, Pengaruh Diameter Dalam ring Stabilizer terhadap Stabilitas Nyala api pada Bunsen burner standar, Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2005
- [24] David Butarbutar, ‘Pengaruh Sudut Flame Holder Ring Stabilizer terhadap Stabilitas Nyala Api pada Bunsen’s Burner Standar, Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2005
- [25] Paulus Ary Prabowo, Pengaruh Ketebalan Ring Stabilizer terhadap Stabilitas Nyala Api pada Bunsen’s Burner, Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2005
- [26] Sigit Wibowo, Pengaruh Perubahan Diameter Dalam Ring Stabilizer terhadap Stabilitas Nyala Api pada Bunsen’s Burner Standar, Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2005
- [27] Rachmat Harris Firmansyah, Penelitian Kestabilan dan Panjang Nyala Api Premix akibat Variasi Diameter Dalam Ring Menggunakan Gas Propana pada Bunsen Burner, Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2007

- [28] Amri Parlindungan Sitinjak Pengaruh Temperatur Ring pada Fenomena Flame Lift-up Pembakaran Propana Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2007
- [29] Taufiq, Perbandingan Temperatur ring Stainless steel dan Temperatur ring Keramik pada Fenomena "Flame Lift-up", Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2008
- [30] Hamdan Hartono Alif, Korelasi Panjang Nyala Api Lit-up Pada Pembakaran Non Difusi Gas Propana, Tesis Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2008
- [31] Pratomo Setyadi, Pengaruh Material Ring pada Fenomena Flame lift-up Pembakaran Gas Propana , Tesis Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2009
- [32] I Made Kartika Dhiputra, Bambang Sugiarto, Yulianto S. Nugroho, Cokorda Prapti Mahandari, Kajian Eksperimental Fenomena *Flame Lift-up*, Proceeding SNTTM VIII 11-14 Agustus 2009
- [33] B.J. Lee and S.H. Chung, 'Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet, *Combustion and Flame* 109; 1997, 1630-172
- [34] Nils A Rokke, 'A Study of Partially Premixed Unconfined Propane Flames, *Combustion and Flame* 97, (1986) hal 88-106
- [35] Kenneth Kuan-yun Kuo, '*Principle of Combustion*', John Wiley & Sons 1986
- [36] Chemical-kinetic mechanism for Combustion Application, <http://www.mae.ucsd.edu/wcombustion/cermech/>, diakses tanggal 22 Desember 2009
- [37] Glassman I., *Combustion*, Academic Press, New York, 1996
- [38] Kennel, C., Mauss, F., Peters, N., Reduced Kinetic Mechanisms for Premixed Propane-Air Flames, in „Reduced Kinetic Mechanisms for Application in Combustion Systems”, Peters, N and Rogg, B., editors, *Lecture Notes in Physics* hal 121-140, Springer Verlag Berlin, 1997
- [39] Drysdale, D., *An Introduction to Fire Dynamics*, John Wiley & Sons England, 2004

- [40] O'Young F. dan Bilger R. W., "Scalar gradient and related quantities in turbulent premixed flames" *Combust. Flame*, 109, (1997), hal. 682-700
- [41] Gottgens., Mauss F dan Peters N., "Analytic Approximations of Burning Velocities and flame thicknesses of lean hydrogen, methane, ethylene, ethane, acetylene and propane flames" *Proc. Combust. Inst.* 24, (1992), hal. 129-135
- [42] Law C. K., "Dynamics of Stretched Flames," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, (1989)* hal. 1381-1402
- [43] Sung C. J., Liu J. B. dan Law C. K., "On the Scalar Structure of Nonequidiffusive Premixed Flames in Counterflow," *Combust. Flame*, 106, (1996), hal. 168-183
- [44] Dinkelacker F., "Experimental Validation of Flame Regimes for Highly Turbulent Premixed Flames", *Proceedings of ECM2003, Orleans-France, October 25-28, 2003.*
- [45] Strehlow, Roger., A, *Combustion Fundamentals*' McGraw-Hill Book Co, Singapore 1985.
- [46] J. Buckmaster, P.Clavin, A. Linan, M Matalon, N. Peters, G. Sivashinsky dan F.A. Williams, *Combustion Theory and Modeling, Proceeding of The Combustion Institute*, 29, (2004)
- [47] G.I Shivansky, C.K Law. dan G. Joulin, *Combust. Sci. Tech.* 28, (1982), hal 155-174
- [48] J.W Dold dan G. Joulin, Numerical Study of Premixed Laminar Flame Propagation in a Closed Tube with a Full Navier Stokes approach, *Combustion and Flames* 100, (1995), hal 450-456
- [49] N. Peters, *Turbulent Combustion*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, ISBN 0 52166082 3, 2000
- [50] Evatt R. Hawkes dan Jacquelin H. Chen,'Comparison of Direct numerical Simulation of lean premixed methane-air with strained laminar flame calculation' *Combustion and Flame*, 144 (2006) hal. 112-125
- [51] I.G. Shepherd, R.K. Cheng, and M.S. Day, 'The Dynamics of Flame Flicker in Conical Premixed Flames: An Experimental and Numerical Study',

Lawrence Berkeley National Laboratory¹, Cyclotron Road 70-108B
Berkeley, CA 94720, USA

- [52] Chung S.H, dan Chung, D.H,' Local Extinction Karlovitz Number for Premixed Flames' *Combustion and Flame* 106, (1996) hal. 515-520
- [53] Jacqueline H, Chen dan Hong G. IM, 'Correlation of Flame Speed with Stretch in Turbulent Premixed Methane/Air Flames', Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, (1995) hal. 819-826
- [54] SP Sharma dan Chander Mohan, *Fuels and Combustion*, Bombay: Tata McGraw-Hill,1984
- [55] P.H. Bouma, Methane-Air Combustion on a Ceramic Foam Surface Burners, PhD Dissertation, Eindhoven University of Technology, 1997
- [56] R. Mital, J.P. Gore, R. Viskanta dan A.C. McIntosh, Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, (1998) hal. 3163-3171
- [57] F.A. Lammers dan L.P.H. de Goey, A Numerical Study of Flash Back of Laminar Premixed Flames in Ceramic-Foam Surface Burners, *Combustion and Flame* 133, (2003) hal 47-61
- [58] Kevin T. Walsh, Joseph Fielding, Mitchell D. Smooke, Marshall B. Long dan Amable Linan, A Comparison of computational and Experimental of lift-off Heights of Coflow Laminar Diffusion Flames, *Proceeding of the Combustion Institute*, 30, (2005) hal 357-365
- [59] J. Lee dan S.H. Chung., Characteristic of Reattachment and Blow Out of Laminar Lifted Flame in Partially Premixed Propane Jet, *Combustion and Flame* 127, (2001) hal 2194-2204
- [60] Heskestad G. 'Turbulent jet diffusion flames: consolidation of flame height data' *Combustion and Flame* 118, (1999) hal. 51-60
- [61] Becker HA dan Liang D, 'Visible length of vertical free turbulent diffusion flames' *Combustion and Flame*, 32 (1978) hal. 115-137
- [62] Kalghatgi GT 'Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent diffusion flames in still air' *Combust. Sci Tech*, 41 (1984) hal.17-29

- [63] Hawthorne WR, Weddell DS dan Hottel HC. 'Mixing and combustion in turbulent gas jets' 3rd Symp. (Int.) Combust, Williams and Wilkins, Baltimore, (1949), hal 266-288
- [64] Sugawa O dan Sakai K. 'Flame length and width produced by ejected propane gas fuel from a pipe' 13th Meeting of the UJNR Panel on Research and Safety, NISTIR 6030, (1997), hal. 401-411
- [65] Sonju OK dan Hustad J. An experimental study of turbulent jet diffusion flames, 9th ICODERS, Poitiers, France, 1983, AIAA, 1984
- [66] P.S. Cumber dan M. Spearpoint A computational flame length methodology for propane jet fires, Fire Safety Journal Volume 41, Issue 3 (2006) , hal. 215-228
- [67] Fluent 6.0 Software User's Guide, Fluent Inc, 2001
- [68] R.J. Kee, F.M. Rupley, J.A. Miller, M.E. Meeks, H.K. Moffat, A.E. Lutz, G. Dixon-Lewis, M.M Smooke, J.Warnatz, G.H. Evans, R.S. Larson, R.E. Mitchell, L.R Petzold, W.C. Reynolds, M. Caracotsios, W.E Stewart, P.Glarborg, C. Wang, O.Adugun, W.G.Houf, C.P. Chou dan S.F. Miller, Chemkin Collection Release 3.7.1, Reaction Design, Inc, San Diego, CA, 2003
- [69] B.E Launder dan D.B Spalding, The Numerical Computation of Turbulent Flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3 (1974), hal. 269-289
- [70] Bhaskar T dan Pramod S. Mehta, A. Multi Zone Diesel Combustion Model using Eddy Dissipation Concept, The Fourth International Symposium COMODIA 98 (1998) hal 135-140
- [71] Robert H Pery, Don W. Green dan James O. Maloney, Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw- Hill, New York, 1997
- [72] David Incropera dan Frank De Witt, Introduction to Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, Singapore, 1987
- [73] Thomas B. Jones, Minimum Capacitancy energy for Ignition http://teacher.nslr.rochester.edu/phy_labs/diakses pada tanggal 14 Agustus 2007

- [74] Qingguo Zhang, Lean Blow off Characteristic of Swirling $H_2/CO/CH_4$ Flames, disertasi Georgia Institute of Technology, 2008
- [75] Longwell JP, Frost EE dan Weiss MA, Flame Stability in Bluff body Recirculation Zone, *Industrial Engineering Chemistry* (1953) hal 1629-1633
- [76] B.E Noltingk, *Instrumentation Reference Book, Second Edition*, Butterworth-Heinemann Oxford, 2000
- [77] Cokorda Prapti Mahandari dan I Made Kartika D, Flame Lift-up on A Bunsen Burner; A Preliminary Study” *Proceeding Seminar Internasional QIR, UI Depok, Jakarta, (2007) EPE-13*
- [78] I Made Kartika Dhiputra, Bambang Sugiarto, Amri Parlindungan Sitinjak dan Cokorda Prapti Mahandari, Pengaruh Material Ring pada Fenomena Nyala Api Lift-up, *Proceeding Seminar Nasional ITENAS Bandung (2008)*
- [79] I Made Kartika Dhiputra, dan Cokorda Prapti Mahandari, Burner Tip Temperatur on Flame Lift-up Phenomenon, *Proceeding QIR UI (2009)*
- [80] 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.
- [81] FESHE (Fire and Emergency Services in Higher Education) Course in Fire Dynamic, US Department of Homeland Services, Summer 2007
- [82] I Made Kartika Dhiputra, Bambang Sugiarto, Yulianto S. Nugroho dan Cokorda Prapti Mahandari, Perubahan Preheat Zone Thickness dan Bilangan Karlovitz pada Fenomena Flame Lift-up Pembakaran Gas Propana Menggunakan Burner Bunsen, *Jurnal Teknik Mesin UK Petra vol 11 No 1 (2009)*, hal. 46-52
- [83] Martin Haryanto, Analisa Kestabilan Nyala Propana dan LPG pada Pembakaran Menggunakan Bunsen Burner, Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2002
- [84] Fox R, *Computational Model for Turbulent Reacting Flow*, Cambridge University Press, 2003
- [85] Denise Veynante dan Luc Vervisch, *Turbulent Combustion Modeling, Progress in Energy and Combustion Science*, 2002

- [86] I Made Kartika Dhiputra dan Cokorda Prapti Mahandari, Panjang Nyala Api pada Fenomena Flame Lift-up Pembakaran Propana Menggunakan Bunsen Burner, Jurnal Teknik Mesin ITS, Vol 10 No 1, (2010), hal 39-45
- [87] Pierre Louis, Pengaruh Diameter luar ring stabilizer terhadap tinggi nyala premix Bunsen burner, Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2004
- [88] H. Schlichting, Boundary Layer Theory, 6 ed Chapter XL, McGraw-Hill Book Co., New York, 1986



Hycool® HCR-22
DROP IN SUBSTITUTE FOR R-22

PT. CITRA TOTAL BUANA BIRU
Jl. P. Diponegoro 108, Bekasi Timur, INDONESIA
Phone: (62-21) 88-33-57-51 or 52
Facsimile: (62-21) 88-33-57-53

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

Date Issued: 6 Juni 2001

IDENTIFICATION			
Product Name:	Hycool HCR-22	UN Number:	1075
Dangerous Good:	Class 2	Subs diary Risk:	None
Poisons Schedule:	None Allocated	Manufacture Code:	HCR-22
Refrigerant Class	A3	Non Toxic	Flammable
US NFPA Classification	Health:1	Flammability:3	Reactivity:0
Application standard:	BS 4434-1995 SNI-06-6501.2- 2000	AS/NS 1677-1998 SNI-06-6501.1- 2000	SNI-06-6500-2000
Use:	A gas used as refrigerant for replacement of R-22, stored under pressure		
PHYSICAL PROPERTIES			
Appearance:	Rapidly evaporating liquid or gas, colorless, and odorless		
Normal Boiling Point (NBP).	°C	-41.8	
Density of liquid @ NBP	kg/m ³	549	
Density of Vapor @ NBP	kg/m ³	2.40	
Melting Point	°C	-185	
Solubility in water		very slight	
Vapor pressure at 20°C	bar	8.37	
Auto ignition temperature	°C	450	
Lower Flammability Limit	% vol	2.1 in air	
Upper Flammability Limit	% vol	9.6 in air	
Evaporation rate		Rapid	
% volatility	%	100	
INGREDIENT			
Chemical entity	Proportion		
Propane	0 – 98 %		
Normal butane	0 – 2%		
Iso butane	0 – 2 %		

Lampiran 2: Analisis Kesalahan dan Perambatan Kesalahan

1. Kesalahan acak dari hasil pengukuran laju aliran udara masing-masing diulang 5 kali pengukuran

$$\Delta Q_a = \frac{\sqrt{\sum (Q_a - \bar{Q}_a)^2}}{5} = \frac{\sqrt{0,01}}{5} = 0,021/s \text{ atau } 2,26 \%$$

2. Kesalahan sistematis dari pengukuran laju aliran udara adalah berdasarkan kesalahan penyetaraan dengan *wet gas meter* yakni sebesar $1-R^2=1-0,9984=0,0016$ atau 0,16 %
3. Kesalahan total pengukuran laju aliran udara adalah 2,42%. Kesalahan total pengukuran laju aliran bahan bakar dihitung dengan metode yang sama menghasilkan kesalahan total 2,1 %
4. Perambatan kesalahan pada perhitungan AFR dihitung dengan Persamaan 4.1 yakni :

$$\left(\frac{\Delta AFR}{40,35}\right)^2 = \left(\frac{0,0216}{0,767}\right)^2 + \left(\frac{0,000399}{0,019}\right)^2$$

$$\Delta AFR = \sqrt{2,009} = 1,41 \text{ atau } 3,4 \%$$

5. Perambatan kesalahan perhitungan laju aliran massa udara ditentukan dengan Persamaan 4.4. dengan terlebih dahulu menentukan kesalahan penentuan massa jenis udara $1,23 \text{ kg/m}^3$ adalah 0,01/2 atau $0,005 \text{ kg/m}^3$. Perambatan kesalahan laju aliran massa adalah:

$$(\Delta m_o) = \sqrt{0,0216^2 + 0,005^2} = 0,022$$

6. Dengan langkah yang sama maka perambatan kesalahan laju aliran massa bahan bakar adalah 0,005. Perambatan kesalahan laju massa campuran ditentukan dengan Persamaan 4.2 yaitu :

$$\Delta m = \sqrt{0,022^2 + 0,005^2} = 0,023$$

7. Perambatan kesalahan perhitungan fraksi massa propana ditentukan dengan Persamaan 4.5.

$$\left(\frac{\Delta Y_f}{Y_f}\right)^2 = \left(\frac{0,023}{0,977}\right)^2 + \left(\frac{0,000399}{0,019}\right)^2$$

$$\Delta Y_f = \sqrt{0,000006} = 0,0025 \text{ atau } 5,2 \%$$

Lampiran 3: Tabel Hasil Perhitungan

1. Tabel Hasil Perhitungan AFR

Diameter dalam Ring DI = 7 mm & X = 10 mm

Flow BBG	Mass flow BBG	Kec, Fuel	Debit Udara	M flow Udra	M flow Camp	Frakel Massa BBG	Rho Camp	Kec, Udra	Kec, Camp	Frakel mol BBG	AFR
litr/s	kg/s x 10 ⁻³	m/s	litr/s	kg/s x 10 ⁻³	kg/s x 10 ⁻³	BBG	kg/m ³	m/s	m/s		m ³ /ma
Q	m	v	Q	mf	ma		pa	va	vm	xf	AFR
0,019	0,046	0,12	0,767	0,943	0,977	0,047	1,258	4,982	5,106	0,03	40,35
0,021	0,050	0,14	0,807	0,993	1,031	0,049	1,260	5,246	5,382	0,03	38,43
0,023	0,055	0,15	0,841	1,034	1,076	0,051	1,261	5,465	5,615	0,03	36,56
0,025	0,060	0,16	0,878	1,080	1,126	0,053	1,262	5,707	5,870	0,04	35,12
0,027	0,065	0,18	0,909	1,117	1,167	0,056	1,264	5,905	6,080	0,04	33,65
0,029	0,070	0,19	0,942	1,159	1,212	0,057	1,265	6,125	6,313	0,04	32,49

Diameter dalam Ring DI = 7 mm & X = 20 mm

Flow BBG	Mass flow BBG	Kec, Fuel	Debit Udara	M flow Udra	M flow Camp	Frakel Massa BBG	Rho Camp	Kec, Udra	Kec, Camp	Frakel mol BBG	AFR
litr/s	kg/s x 10 ⁻³	m/s	litr/s	kg/s x 10 ⁻³	kg/s x 10 ⁻³	BBG	kg/m ³	m/s	m/s		m ³ /ma
Q	m	v								xf	AFR
0,019	0,046	0,123	0,750	0,922	0,968	0,047	1,259	4,872	4,996	0,03	39,46
0,021	0,050	0,136	0,780	0,959	1,010	0,050	1,261	5,070	5,207	0,03	37,15
0,023	0,055	0,149	0,817	1,005	1,060	0,052	1,262	5,312	5,461	0,03	35,63
0,025	0,060	0,162	0,854	1,051	1,111	0,054	1,263	5,553	5,716	0,04	34,18
0,027	0,065	0,175	0,888	1,093	1,157	0,056	1,265	5,773	5,948	0,04	32,90
0,029	0,070	0,188	0,919	1,130	1,200	0,058	1,266	5,971	6,159	0,04	31,68

Diameter dalam Ring DI = 7 mm & X = 30 mm

Flow BBG	Mass flw BBG	Kec, Fuel	Debit Udara	M flw Udara	M flw Camp	Fraksi Massa BBG	Rho Camp	Kec, Udara	Kec, Camp	Fraksi mol BBG	AFR
ltr/s	kg/s	m/s	ltr/s	kg/s	kg/s	BBG	kg/m ³	m/s	m/s		
	$\times 10^{-3}$			$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$						
0,019	0,046	0,123489	0,743	0,914	0,959	0,048	1,259	4,828	4,952	0,03	39,10
0,021	0,050	0,136488	0,773	0,951	1,002	0,050	1,261	5,026	5,163	0,03	36,82
0,023	0,055	0,149487	0,811	0,997	1,052	0,052	1,262	5,268	5,417	0,04	35,24
0,025	0,060	0,162486	0,848	1,043	1,103	0,054	1,264	5,509	5,672	0,04	33,91
0,027	0,065	0,175484	0,878	1,080	1,145	0,057	1,265	5,707	5,883	0,04	32,52
0,029	0,070	0,188483	0,915	1,126	1,195	0,058	1,266	5,949	6,137	0,04	31,56

Diameter dalam Ring DI = 7 mm & X = 40 mm

Flow BBG	Mass flw BBG	Kec, Fuel	Debit Udara	M flw Udara	M flw Camp	Fraksi Massa BBG	Rho Camp	Kec, Udara	Kec, Camp	Fraksi mol BBG	AFR
ltr/s	kg/s	m/s	ltr/s	kg/s	kg/s	BBG	kg/m ³	m/s	m/s		
	$\times 10^{-3}$			$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$						
0,019	0,046	0,123489	0,750	0,922	0,968	0,047	1,259	4,872	4,996	0,03	39,46
0,021	0,050	0,136488	0,780	0,959	1,010	0,050	1,261	5,070	5,207	0,03	37,15
0,023	0,055	0,149487	0,817	1,005	1,060	0,052	1,262	5,312	5,461	0,03	35,53
0,025	0,060	0,162486	0,854	1,051	1,111	0,054	1,263	5,553	5,716	0,04	34,18
0,027	0,065	0,175484	0,885	1,088	1,163	0,056	1,265	5,751	5,927	0,04	32,77
0,029	0,070	0,188483	0,915	1,126	1,195	0,058	1,266	5,949	6,137	0,04	31,56

Diameter dalam Ring DI = 10 mm & X = 10 mm

Flow BBG	Mass flw BBG	Kec, Fuel	Debit Udara	M flw Udara	M flw Camp	Fraksi Massa BBG	Rho Camp	Kec, Udara	Kec Camp	Fraksi mol BBG	AFR
ltr/s	kg/s $\times 10^{-3}$	m/s	ltr/s	kg/s $\times 10^{-3}$	kg/s $\times 10^{-3}$		kg/m ³	m/s	m/s		
			Q	m						χ	AFR
0,019	0,046	0,123489	0,777	0,955	1,001	0,048	1,258	5,048	5,172	0,03	40,88
0,021	0,050	0,136488	0,817	1,005	1,056	0,050	1,259	5,312	5,448	0,03	38,92
0,023	0,055	0,149487	0,858	1,055	1,110	0,052	1,261	5,575	5,725	0,03	37,30
0,025	0,060	0,162485	0,881	1,084	1,144	0,055	1,262	5,729	5,892	0,04	35,26
0,027	0,065	0,175484	0,919	1,130	1,195	0,057	1,263	5,971	6,146	0,04	34,02
0,029	0,070	0,188483	0,949	1,167	1,237	0,060	1,265	6,168	6,357	0,04	32,73

Diameter dalam Ring DI = 10 mm & X = 20 mm

Flow BBG	Mass flw BBG	Kec, Fuel	Debit Udara	M flw Udara	M flw Camp	Fraksi Maassa BBG	Rho Camp	Kec, Udara	Kec Camp	Fraksi mol BBG	AFR
ltr/s	kg/s $\times 10^{-3}$	m/s	ltr/s	kg/s $\times 10^{-3}$	kg/s $\times 10^{-3}$		kg/m ³	m/s	m/s		
		v	Q	m							
0,019	0,046	0,123	0,750	0,922	0,968	0,038	1,259	4,872	4,986	0,03	39,46
0,021	0,050	0,136	0,787	0,968	1,018	0,039	1,260	5,114	5,250	0,03	37,47
0,023	0,055	0,149	0,824	1,014	1,069	0,041	1,262	5,358	5,505	0,03	35,83
0,025	0,060	0,162	0,854	1,051	1,111	0,043	1,263	5,553	5,716	0,04	34,18
0,027	0,065	0,175	0,895	1,101	1,166	0,045	1,264	5,817	5,992	0,04	33,15
0,029	0,070	0,188	0,922	1,134	1,204	0,047	1,266	5,993	6,161	0,04	31,79

Diameter dalam Ring DI = 10 mm & X = 30 mm

Flow BBG	Mass flw BBG	Kec, Fuel	Debit Udara	M flw Udara	M flw Camp	Fraksi Maassa	Rho Camp	Kec, Udra	Kec Camp	Fraksi mol BBG	AFR
ltr/s	kg/s $\times 10^{-3}$	m/s	ltr/s	kg/s $\times 10^{-3}$	kg/s $\times 10^{-3}$	BBG	kg/m ³	m/s	m/s	χ_f	
Q	m	v									
			0,740	0,910	0,955	0,038	1,259	4,806	4,930	0,03	38,92
0,019	0,046	0,123	0,770	0,947	0,997	0,040	1,261	5,004	5,141	0,03	36,66
0,021	0,050	0,136	0,814	1,001	1,056	0,042	1,262	5,290	5,439	0,03	35,39
0,023	0,055	0,149	0,838	1,030	1,090	0,044	1,264	5,444	5,606	0,04	33,50
0,025	0,060	0,162	0,878	1,080	1,145	0,045	1,265	5,707	5,883	0,04	32,52
0,027	0,065	0,175	0,919	1,130	1,200	0,047	1,266	5,971	6,159	0,04	31,68
0,029	0,070	0,188	0,915	1,126	1,195	0,068	1,266	5,949	6,137	0,04	31,56

Diameter dalam Ring DI = 10 mm & X = 40 mm

Flow BBG	Mass flw BBG	Kec, Fuel	Debit Udara	M flw Udara	M flw Camp	Fraksi Maassa	Rho Camp	Kec, Udra	Kec Camp	Fraksi mol BBG	AFR
ltr/s	kg/s $\times 10^{-3}$	m/s	ltr/s	kg/s $\times 10^{-3}$	kg/s $\times 10^{-3}$	BBG	kg/m ³	m/s	m/s	χ_f	
Q	m	v	Q	m							
0,019	0,046	0,123	0,726	0,893	0,939	0,039	1,260	4,719	4,842	0,03	38,21
0,021	0,050	0,136	0,763	0,939	0,989	0,041	1,261	4,960	5,097	0,03	36,34
0,023	0,055	0,149	0,807	0,993	1,048	0,042	1,262	5,246	5,395	0,04	35,09
0,025	0,060	0,162	0,848	1,043	1,103	0,044	1,284	5,509	5,672	0,04	33,91
0,027	0,065	0,175	0,878	1,080	1,145	0,045	1,265	5,707	5,883	0,04	32,52
0,029	0,070	0,188	0,915	1,126	1,195	0,047	1,266	5,949	6,137	0,04	31,56

Diameter dalam Ring DI = 14 mm & X = 10 mm

Flow BBG	Mass flow BBG	Kec, Fuel	Debit Udara	M flow Udara	M flow Camp	Fraksi Masa	Rho Camp	Kec, Udra	Kec Camp	Fraksi mol BBG	AFR
ltr/s	kg/s	m/s	ltr/s	kg/s	kg/s	BBG	kg/m ³	m/s	m/s	Fuel	v/v
Q	$\times 10^{-3}$	v	Q	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$					χ_f	
0,019	0,046	0,12	0,743	0,914	0,958	0,050	1,259	4,717	4,952	0,03	39,10
0,021	0,050	0,14	0,790	0,972	1,022	0,052	1,260	5,013	5,272	0,03	37,63
0,023	0,055	0,15	0,834	1,026	1,081	0,054	1,261	5,287	5,571	0,03	36,27
0,025	0,060	0,16	0,871	1,072	1,132	0,056	1,263	5,517	5,826	0,04	34,85
0,027	0,065	0,18	0,902	1,109	1,174	0,058	1,264	5,703	6,036	0,04	33,40
0,029	0,070	0,19	0,932	1,147	1,216	0,061	1,265	5,890	6,247	0,04	32,14

Diameter dalam Ring DI = 14 mm & X = 20 mm

Flow BBG	Mass flow BBG	Kec, Fuel	Debit Udara	M flow Udara	M flow Camp	Fraksi Masa	Rho Camp	Kec, Udra	Kec Camp	Fraksi mol BBG	AFR
ltr/s	kg/s	m/s	ltr/s	kg/s	kg/s	BBG	kg/m ³	m/s	m/s	Fuel	v/v
Q	$\times 10^{-3}$	v	Q	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$					χ_f	
0,019	0,046	0,12	0,740	0,910	0,910	0,050	1,259	4,695	4,930	0,03	38,92
0,021	0,050	0,14	0,777	0,955	0,955	0,053	1,261	4,925	5,185	0,03	36,99
0,023	0,055	0,15	0,814	1,001	1,001	0,055	1,262	5,155	5,439	0,03	35,39
0,025	0,060	0,16	0,841	1,034	1,034	0,058	1,264	5,319	5,628	0,04	33,64
0,027	0,065	0,18	0,878	1,080	1,080	0,060	1,265	5,550	5,883	0,04	32,52
0,029	0,070	0,19	0,912	1,122	1,122	0,062	1,266	5,758	6,115	0,04	31,44

Diameter dalam Ring DI = 14 mm & X = 30 mm

Flow BBG	Mass flw BBG	Kec, Fuel	Debit Udara	M flw Udara	M flw Camp	Fraksi Massa	Rho Camp	Kec, Udara	Kec Camp	Fraksi mol BBG	AFR
ltr/s	kg/s $\times 10^{-3}$	m/s	ltr/s	kg/s $\times 10^{-3}$	kg/s $\times 10^{-3}$	BBG	kg/m ³	m/s	m/s	Fuel	
Q	m	v								χ_f	
0,019	0,046	0,12	0,736	0,805	0,951	0,050	1,259	4,673	4,908	0,03	38,74
0,021	0,050	0,14	0,770	0,947	0,997	0,053	1,261	4,881	5,141	0,03	36,68
0,023	0,055	0,15	0,807	0,993	1,048	0,056	1,262	5,111	5,395	0,04	35,09
0,025	0,060	0,16	0,838	1,030	1,090	0,058	1,264	5,297	5,606	0,04	33,50
0,027	0,065	0,18	0,875	1,076	1,141	0,060	1,265	5,528	5,861	0,04	32,40
			0,909	1,117	1,187	0,062	1,266	5,736	6,093	0,04	31,33

Diameter dalam Ring DI = 14 mm & X = 40 mm

Flow BBG	Mass flw BBG	Kec, Fuel	Debit Udara	M flw Udara	M flw Camp	Fraksi Massa	Rho Camp	Kec, Udara	Kec Camp	Fraksi mol BBG	AFR
ltr/s	kg/s $\times 10^{-3}$	m/s	ltr/s	kg/s $\times 10^{-3}$	kg/s $\times 10^{-3}$	BBG	kg/m ³	m/s	m/s	Fuel	
Q	m	v	Q	m						χ_f	
0,019	0,046	0,12	0,719	0,885	0,930	0,052	1,260	4,563	4,798	0,03	37,85
0,021	0,050	0,14	0,763	0,939	0,989	0,054	1,261	4,837	5,097	0,03	36,34
0,023	0,055	0,15	0,794	0,976	1,031	0,057	1,263	5,023	5,307	0,04	34,50
0,025	0,060	0,16	0,834	1,028	1,086	0,058	1,264	5,276	5,584	0,04	33,37
0,027	0,065	0,18	0,871	1,072	1,137	0,060	1,265	5,506	5,839	0,04	32,27
0,029	0,070	0,19	0,909	1,117	1,187	0,062	1,266	5,736	6,093	0,04	31,33

Lampiran 4. Perhitungan $S_{L,c}$

D=	14	mm	Diameter barel
A =	0.00015	m ²	Luas Barel
LHV =	46.348	MJ/kg	Nilai Kalor BGG
ρf =	2.4	kg/m ³	Densitas BGG
ρa =	1.23	kg/m ³	Densitas Udara
μa =	1.8E-05	kg/(ms)	viskositas udara
μf =	8E-06	kg/(ms)	viskositas propana
kg =	0.018	W/m.K	Konduktivitas propana
C _{pg} =	2.24	kJ/kg.K	Kapasitas panas propana
kf =	0.04	W/mK	
K _{cλc+} =	0.169		
ε =	0.005		
σ =	5.6E-08	W/m ² .K ⁴	
R =	0.015	m	
T _s =	304	K	
T _{fa} =	2164		

$$S_{L,c} = \frac{1}{C_p \rho_u} \sqrt{\frac{k_f Q_{loss}}{(T_f - T_u) K_c \lambda_c^+}}$$

$$Q_{total} = \phi \pi R \sqrt{1 + \left(\frac{R}{H}\right)^2} \left[k_f (T_f - T_b) \ln \left(\frac{H}{d_s} + 1 \right) \left(1 - \frac{d_s}{H} \right) + \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_s^4) \left(\frac{H}{2} \right) + k_f (T_f - T_r) (\ln H - 1) \right]$$

Lampiran 4: (Lanjutan)

Φ	H (m)	Tfa (K)	eg(Tfa-Ts4)	Tb	Tr	Qb	Qrad	Qring	Qloss/vol	Cp	Tu	Tfa-Tu	rho u	SL,c
0.59	0.053	2164	24551	329	997	110	651	184	1069405	999	428.55	1735	1.258	0.304
0.62	0.055	2164	24551	329	1052	112	675	173	1101133	999	434.41	1730	1.259	0.309
0.65	0.058	2164	24551	320	1025	117	712	175	1142131	999	422.41	1742	1.261	0.313
0.68	0.059	2164	24551	330	1037	118	724	173	1186047	999	433.33	1731	1.262	0.319
0.71	0.061	2164	24551	329	1065	120	749	167	1221909	999	435.36	1729	1.263	0.324
0.73	0.064	2164	24551	327	1090	124	786	161	1236209	999	435.51	1728	1.265	0.326
0.6	0.060	2164	24551	322	1078	68	737	166	983595	999	430.09	1734	1.259	0.291
0.64	0.061	2164	24551	324	1116	69	749	159	1038967	999	435.82	1728	1.260	0.300
0.67	0.063	2164	24551	321	1133	72	773	155	1077096	999	434.43	1730	1.262	0.305
0.7	0.064	2164	24551	328	1167	72	786	150	1115468	999	444.96	1719	1.263	0.311
0.72	0.066	2164	24551	327	1179	75	810	146	1137980	999	444.65	1719	1.264	0.313
0.75	0.068	2164	24551	325	1146	77	835	150	1183816	999	439.15	1725	1.266	0.319
0.61	0.068	2164	24551	343	986	48	835	174	958094	999	441.86	1722	1.259	0.288
0.65	0.069	2164	24551	334	1106	49	847	156	1001311	999	445.04	1719	1.261	0.295
0.68	0.073	2164	24551	332	1222	53	896	136	1020790	999	454.1	1710	1.262	0.298
0.7	0.075	2164	24551	330	1242	55	921	132	1043525	999	453.79	1710	1.264	0.301
0.73	0.078	2164	24551	331	1258	58	958	129	1079392	999	457.05	1707	1.265	0.306
0.75	0.079	2164	24551	328	1283	59	970	125	1103559	999	457.28	1707	1.266	0.309

Lampiran 5: Perhitungan Bilangan Damkohler

D0	0.03	D _i	0.01	U	U _{ref}	t	flow time	Damkohler	Karlovitz
0.00063	0.00008	0.12500	5.17158	10.34317	0.02000	0.00193	0.68	0.0040	252
0.00063	0.00008	0.12500	5.44820	10.89840	0.02000	0.00184	0.62	0.0042	238
0.00063	0.00008	0.12600	5.72481	11.44963	0.02000	0.00175	0.59	0.0042	238
0.00063	0.00008	0.12500	5.89159	11.78318	0.02000	0.00170	0.577	0.0042	240
0.00063	0.00008	0.12500	6.14624	12.29247	0.02000	0.00163	0.55	0.0042	238
0.00063	0.00008	0.12500	6.35695	12.71390	0.02000	0.00157	0.53	0.0042	237
0.00063	0.00008	0.12500	4.99584	9.99168	0.02000	0.00200	0.7	0.0040	250
0.00063	0.00008	0.12500	5.25049	10.50097	0.02000	0.00190	0.649	0.0042	241
0.00063	0.00008	0.12500	5.50513	11.01027	0.02000	0.00182	0.619	0.0042	241
0.00063	0.00008	0.12500	5.71585	11.43169	0.02000	0.00175	0.595	0.0042	240
0.00063	0.00008	0.12500	5.99246	11.98492	0.02000	0.00167	0.567	0.0042	240
0.00063	0.00008	0.12500	6.18120	12.36241	0.02000	0.00162	0.549	0.0042	239
0.00063	0.00008	0.12500	4.92994	9.85987	0.02000	0.00203	0.7	0.0041	245
0.00063	0.00008	0.12500	5.14	10.28129	0.02000	0.00195	0.66	0.0042	239
0.00063	0.00008	0.12500	5.44	10.87846	0.02000	0.00184	0.62	0.0042	237
0.00063	0.00008	0.12500	5.61	11.21201	0.02000	0.00178	0.6	0.0042	236
0.00063	0.00008	0.12500	5.88	11.76524	0.02000	0.00170	0.58	0.0041	241
0.00063	0.00008	0.12500	6.16	12.31847	0.02000	0.00162	0.55	0.0042	239

Tabel 1. Hasil Pengukuran dan perhitungan AFR dan *Burning Load* tanpa ring

indikator aliran gas (cm)	Kapasitas aliran gas (m ³ /s)	indikator aliran udara (cm)	Kapasitas aliran udara (m ³ /s)	AFR
0,5	0,000019	19,5	0,777	36,99
1	0,000021	20,5	0,817	35,53
1,5	0,000023	21,7	0,854	34,18
2	0,000025	22,8	0,888	32,90
2,5	0,000027	23,8	0,915	31,56
3	0,000029	24,6	0,743	39,10

Tabel 2. Hasil pengukuran dan perhitungan AFR dan *Burning Load* dengan ring (Do = 30 mm; Di = 7 mm dan x = 10mm)

ketinggian ring (mm)	indikator aliran gas (cm)	Kapasitas aliran gas x10 ⁻³ (m ³ /s)	Mass flow gas (mg)	Mass flow gas (kg/s)	Kapasitas aliran udara va (m ³ /s)	Mass flow Udara (kg/s)	Densitas Camp (kg/m ³)	Kec. Udara va (m/s)	Kec Camp vc (m/s)	Visc Camp (m/s ²)	Fraksi mol BGG (χ)	Bil. Reynold (Re)	Bil. Froud (Fr)	Bil. Lewis (Le)	AFR	Burning Load (kJ/m ² s)
10	0,5	0,019	0,035	0,976	0,794	0,976	1,244	5,158	5,281	0,00000108	0,0227	10,417	85,096	203	41,77	10,417
	1,0	0,021	0,038	1,026	0,834	1,026	1,244	5,422	5,558	0,00000114	0,0238	11,513	85,313	225	39,72	11,513
	1,5	0,023	0,042	1,063	1,063	0,865	1,245	5,619	5,769	0,00000120	0,0252	12,610	83,963	242	37,59	12,610
	2,0	0,025	0,046	1,109	1,109	0,902	1,246	5,861	6,023	0,00000125	0,0262	13,706	84,255	264	36,07	13,706
	2,5	0,027	0,049	1,155	1,155	0,939	1,246	6,103	6,278	0,00000129	0,0271	14,803	84,787	287	34,78	14,803
	3,0	0,029	0,053	1,184	1,184	0,963	1,247	6,256	6,445	0,00000135	0,0284	15,899	83,237	302	33,19	15,899

Lampiran 6: (Lanjutan)

Tabel 3 Tabel Fraksi mol, bilangan Re, Fr, AFR dan Burning Load dengan ring (Do = 30 mm; Di = 7 mm dan x = 20 mm)

ketinggian ring	X	indikator aliran gas	Kapasitas aliran gas vg $\times 10^{-3}$ (m^3/s)	Mass flow gas mg kg/s	Kapasitas aliran udara va $\times 10^{-3}$ (m^3/s)	Mass flow udara ma kg/s	Densitas Camp pc kg/m ³	Kec. Udara va m/s	Kec Camp vc m/s	Visc Camp μ m/s ²	Fraksi mol BBG χ	Bil. Reynold Re	Bil. Froud Fr	Bil. Lewis Le	AFR	Burning Load (kJ/m ² s)
10	(mm)	0,5	0,019	0,035	0,787	0,968	1,244	5,114	5,237	0,00000109	0,0229	83.694	200	0,120	41,41	10.417
		1,0	0,021	0,038	0,811	0,997	1,245	5,268	5,404	0,00000117	0,0245	80.682	213	0,117	38,60	11.513
		1,5	0,023	0,042	0,841	1,034	1,246	5,465	5,615	0,00000123	0,0258	79.571	230	0,112	36,56	12.610
		2,0	0,025	0,046	0,881	1,084	1,246	5,729	5,892	0,00000127	0,0268	80.630	253	0,107	35,26	13.706
		2,5	0,027	0,049	0,919	1,130	1,247	5,971	6,146	0,00000132	0,0277	81.286	275	0,103	34,02	14.803
		3,0	0,029	0,053	0,946	1,163	1,248	6,146	6,335	0,00000138	0,0289	80.442	292	0,100	32,61	15.899

Tabel Fraksi mol, bilangan Re, Fr, Le AFR dan Burning Load dengan ring (Do = 30 mm; Di = 7 mm dan x = 30 mm)

ketinggian ring	X	indikator aliran gas	Kapasitas aliran gas vg $\times 10^{-3}$ (m^3/s)	Mass flow gas mg kg/s	Kapasitas aliran udara va $\times 10^{-3}$ (m^3/s)	Mass flow udara ma kg/s	Densitas Camp pc kg/m ³	Kec. Udara va m/s	Kec Camp vc m/s	Visc Camp μ m/s ²	Fraksi mol BBG χ	Bil. Reynold Re	Bil. Froud Fr	Bil. Lewis Le	AFR	Burning Load (kJ/m ² s)
10	(mm)	0,5	0,019	0,035	0,773	0,951	1,244	5,026	5,150	0,00000111	0,0233	80.923	193	0,122	40,70	10.417
		1,0	0,021	0,038	0,804	0,989	1,245	5,224	5,360	0,00000118	0,0247	79.383	209	0,118	38,27	11.513
		1,5	0,023	0,042	0,831	1,022	1,246	5,400	5,549	0,00000125	0,0261	77.725	224	0,114	36,12	12.610
		2,0	0,025	0,046	0,871	1,072	1,246	5,663	5,826	0,00000129	0,0271	78.847	247	0,108	34,85	13.706
		2,5	0,027	0,049	0,902	1,109	1,247	5,861	6,036	0,00000134	0,0282	78.424	265	0,104	33,40	14.803
		3,0	0,029	0,053	0,929	1,142	1,248	6,037	6,225	0,00000140	0,0294	77.695	282	0,101	32,03	15.899

Lampiran 7. Tabel Perhitungan Panjang Nyala Teoritis

Di = 7 mm

Re	F/Ost	Yo,A	AFR	ro (mm)	1+AFR		Lf teoritis (mm)	Lf exp. (mm)
4.00	0.06	0.23	40.90	15	41.90	0.75	183	195
4.00	0.06	0.23	38.90	15	39.90	0.75	192	200
4.00	0.06	0.23	37.30	15	38.30	0.75	200	205
4.00	0.06	0.23	35.30	15	36.30	0.75	212	210
4.00	0.06	0.23	34.00	15	35.00	0.75	219	215
4.00	0.06	0.23	32.70	15	33.70	0.75	228	220
4.00	0.06	0.23	39.50	15	40.50	0.75	190	160
4.00	0.06	0.23	37.50	15	38.50	0.75	199	175
4.00	0.06	0.23	35.80	15	36.80	0.75	209	185
4.00	0.06	0.23	34.20	15	35.20	0.75	218	195
4.00	0.06	0.23	33.10	15	34.10	0.75	225	210
4.00	0.06	0.23	31.80	15	32.80	0.75	234	220
4.00	0.06	0.23	38.90	15	39.90	0.75	192	175
4.00	0.06	0.23	36.70	15	37.70	0.75	204	180
4.00	0.06	0.23	35.40	15	36.40	0.75	211	190
4.00	0.06	0.23	33.50	15	34.50	0.75	223	195
4.00	0.06	0.23	32.50	15	33.50	0.75	229	200
4.00	0.06	0.23	31.70	15	32.70	0.75	235	205
4.00	0.06	0.23	38.20	15	39.20	0.75	196	175
4.00	0.06	0.23	36.30	15	37.30	0.75	206	185
4.00	0.06	0.23	35.10	15	36.10	0.75	213	190
4.00	0.06	0.23	33.90	15	34.90	0.75	220	205
4.00	0.06	0.23	32.50	15	33.50	0.75	229	215
4.00	0.06	0.23	31.33	15	32.33	0.75	237	225

Di = 10 mm

Re	F/Ost	Yo,A	AFR	ro (mm)	1+AFR		Lf teoritis (mm)	Lf exp. (mm)
4.00	0.06	0.23	40.90	15	41.90	0.75	183	160
4.00	0.06	0.23	38.90	15	39.90	0.75	192	190
4.00	0.06	0.23	37.30	15	38.30	0.75	200	200
4.00	0.06	0.23	35.30	15	36.30	0.75	212	205
4.00	0.06	0.23	34.00	15	35.00	0.75	219	220
4.00	0.06	0.23	32.70	15	33.70	0.75	228	230
4.00	0.06	0.23	39.50	15	40.50	0.75	190	180
4.00	0.06	0.23	37.50	15	38.50	0.75	199	205
4.00	0.06	0.23	35.80	15	36.80	0.75	209	210
4.00	0.06	0.23	34.20	15	35.20	0.75	218	220
4.00	0.06	0.23	33.10	15	34.10	0.75	225	223
4.00	0.06	0.23	31.80	15	32.80	0.75	234	235
4.00	0.06	0.23	38.90	15	39.90	0.75	192	190
4.00	0.06	0.23	36.70	15	37.70	0.75	204	200
4.00	0.06	0.23	35.40	15	36.40	0.75	211	315
4.00	0.06	0.23	33.50	15	34.50	0.75	223	328
4.00	0.06	0.23	32.50	15	33.50	0.75	229	330
4.00	0.06	0.23	31.70	15	32.70	0.75	235	330
4.00	0.06	0.23	38.20	15	39.20	0.75	196	195
4.00	0.06	0.23	36.30	15	37.30	0.75	206	220

Lampiran 7: (Lanjutan)

Re	F/Ost	Yo,A	AFR	ro(mm)	1+AFR		Lf teoritis (mm)	Lf exp (mm)
4.00	0.06	0.23	35.10	15	36.10	0.75	213	232
4.00	0.06	0.23	33.90	15	34.90	0.75	220	225
4.00	0.06	0.23	32.50	15	33.50	0.75	229	230
4.00	0.06	0.23	31.33	15	32.33	0.75	237	239

Di= 14 mm

Re	F/Ost	Yo,A	AFR	ro (mm)	1+AFR		Lf teoritis (mm)	Lf exp. (mm)
4.00	0.06	0.23	39.10	15	40.10	0.75	191	200
4.00	0.06	0.23	37.60	15	38.60	0.75	199	205
4.00	0.06	0.23	36.30	15	37.30	0.75	206	215
4.00	0.06	0.23	34.90	15	35.90	0.75	214	220
4.00	0.06	0.23	33.40	15	34.40	0.75	223	240
4.00	0.06	0.23	32.10	15	33.10	0.75	232	265
4.00	0.06	0.23	38.90	15	39.90	0.75	192	200
4.00	0.06	0.23	37.00	15	38.00	0.75	202	215
4.00	0.06	0.23	35.40	15	36.40	0.75	211	240
4.00	0.06	0.23	33.60	15	34.60	0.75	222	260
4.00	0.06	0.23	32.50	15	33.50	0.75	229	275
4.00	0.06	0.23	31.40	15	32.40	0.75	237	285
4.00	0.06	0.23	38.70	15	39.70	0.75	193	240
4.00	0.06	0.23	36.70	15	37.70	0.75	204	250
4.00	0.06	0.23	35.10	15	36.10	0.75	213	255
4.00	0.06	0.23	33.50	15	34.50	0.75	223	270
4.00	0.06	0.23	32.40	15	33.40	0.75	230	280
4.00	0.06	0.23	31.30	15	32.30	0.75	238	285
4.00	0.06	0.23	37.90	15	38.90	0.75	197	245
4.00	0.06	0.23	36.30	15	37.30	0.75	206	260
4.00	0.06	0.23	34.50	15	35.50	0.75	216	265
4.00	0.06	0.23	33.40	15	34.40	0.75	223	280
4.00	0.06	0.23	32.30	15	33.30	0.75	231	290
4.00	0.06	0.23	31.30	15	32.30	0.75	238	300