



UNIVERSITAS INDONESIA

**FENOMENA NYALA TERANGKAT (*LIFTED-FLAME*)
PADA PEMBAKARAN DIFUSI GAS PROPANA**

DISERTASI

**NI KETUT CATURWATI
0606037494**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**FENOMENA NYALA TERANGKAT (*LIFTED-FLAME*)
PADA PEMBAKARAN DIFUSI GAS PROPANA**

DISERTASI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor

**NI KETUT CATURWATI
0606037494**

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

HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :
Nama : Ni Ketut Caturwati
NPM : 0606037494
Program Studi : Pasca Sarjana - Teknik Mesin
Judul Disertasi : Fenomena Nyala Terangkat (*Lifted-Flame*) pada
Pembakaran Difusi Gas Propana

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

DEWAN PENGUJI


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


Kopromotor : Dr.Ir.Harinaldi, M.Eng. 

Tim Penguji : Prof. Dr.Ir. Bambang Sugiarto, MEng. 

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

: Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer, DEA 

: Prof. Dr.-Ing.Ir.Nandy Setiadi Djaya Putra 

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

: Dr.Ir. Adi Suryosatyo, MEng. 

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 14 Juli 2010

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Ni Ketut Caturwati

NPM : 0606037494

Tanda Tangan :

Tanggal : 14 Juli 2010

KATA PENGANTAR / UCAPAN TERIMAKASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan disertasi ini. Penulisan disertasi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Doktor Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa awal perkuliahan hingga sampai pada penyusunan disertasi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan pendidikan S3 saya ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr.Ir.I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing., selaku promotor yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan disertasi ini.
2. Dr.Ir.Harinaldi, M.Eng., selaku ko-promotor yang telah turut serta menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan serta membimbing saya dalam penyusunan disertasi ini.
3. Segenap anggota tim penguji sejak pra-penelitian, pra promosi hingga promosi yang telah memberikan banyak masukan dan saran perbaikan guna peningkatan isi disertasi.
4. Prof. Dr. Ir. T.A.Fauzi Soelaiman, MSME. Guru Besar Institut Teknologi Bandung, yang telah berkenan hadir sebagai penguji Pra Promosi dan Promosi serta memberikan masukan dalam penyempurnaan isi disertasi .
5. Pihak Universitas Sultan Ageng Tirtayasa khususnya teman-teman di Fakultas Teknik yang telah memberikan kesempatan serta dorongan semangat tanpa henti kepada saya untuk dapat menyelesaikan program S-3 di Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
6. Almarhum Ayahanda I Made Mendra, Ibunda Nengah Sikiarti, Ibu mertua Ketut Parwi Inggas, suami tercinta Putu Wisastra Inggas serta anak-anak kami Hindi, Ayu dan Oming yang selalu memberikan dukungan baik dalam bentuk materiil maupun moril kepada saya untuk dapat mengikuti serta menyelesaikan program S-3 ini dengan baik.

7. Teman-teman S-3 Departemen Teknik Mesin angkatan 2006 yang selalu kompak serta teman-teman penghuni Gedung *Engineering Centre* ruang 302 yang mampu membangkitkan semangat dikala saya merasa jenuh serta langkah terhenti karena terbentur suatu rintangan (Terimakasih Prof. Nandy atas ijin penggunaan ruangnya).
8. Teman-teman seperjuangan pada *Flame and Combustion Research Group* Laboratorium Termodinamika, Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia: Ombun Sihombing, Dimitri, Cahyo S dan teman lain yang telah menunjukkan semangat kerja sama yang sangat baik
9. Berbagai pihak lain di sekitar saya yang tak mampu saya uraikan satu persatu turut serta memberikan dorongan serta menciptakan kesempatan untuk menyelesaikan program ini dengan baik. Tanpa dukungan itu semua rasanya mustahil bagi saya untuk menyelesaikan program ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga disertasi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juli 2010

Penulis.

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Ni Ketut Caturwati
NPM : 0606037494
Program Studi : Pasca Sarjana
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Disertasi

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

Fenomena Nyala Terangkat (*Lifted-Flame*) pada Pembakaran Difusi Gas Propana

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan saya sebagai penulis/ pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok
Pada Tanggal: 14 Juli 2010
Yang menyatakan;

(Ni Ketut Caturwati)

ABSTRAK

Nama : Ni Ketut Caturwati
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Fenomena Nyala Terangkat (*Lifted Flame*) pada Pembakaran Difusi Gas Propana

Disertasi ini membahas mengenai fenomena nyala terangkat yang bermanfaat dalam usaha memperpanjang umur pakai nosel *burner*. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen dan komputasi. Hasil penelitian memperlihatkan nyala terangkat erat kaitannya terhadap pola pencampuran udara-bahan bakar. Nosel konik membuat kondisi nyala terangkat mulai terjadi pada nilai Bilangan Reynolds 32 % lebih rendah dibandingkan pada nosel lurus. Sensitivitas *lifted-distance* terhadap laju aliran gas pada nosel konik 125 % lebih tinggi dibandingkan nosel lurus. Pengaruh aliran udara *co-flow* terhadap aliran gas meningkatkan kestabilan *liftoff* terutama pada aliran udara dengan sudut serang 45° terhadap aliran gas dapat menurunkan nilai *lifted-distance* hingga 31 % dari kondisi nyala pada udara diam. Dengan demikian penggunaan saluran gas berbentuk konik pada ujung *burner* dan aliran udara berarah 45° direkomendasikan untuk digunakan dalam sistem pembakaran difusi.

Kata Kunci :
Nyala terangkat, nosel konik, kestabilan *liftoff*.

ABSTRACT

Name : Ni Ketut Caturwati
Study Program : Mechanical Engineering
Title : *Lifted-flame Phenomenon on Propane Diffusion Combustion*

This dissertation is to discuss on a lifted flame phenomenon, which is useful to prolong nozzle burner time usage. The research was conducted by experimental and computational methods. It has been found that there is a correlation between lifted-flame and air-fuel mixing patterns. The lifted-flame condition can be achieved at 32 % of Reynolds number by cone nozzles lower than straight nozzles. Moreover, the sensitivity of lifted-distance of cone nozzle is 125 % higher than straight nozzle. The co-flow of air and gas affect the improvement of the lift-off stability, especially for air with the direction incoming flow 45° of gas stream resulted decreasing the lifted distance at 31% of quiescence-air condition. Therefore, the cone nozzles with 45° direction flow between air and gas is recommended to be used in diffusion combustion system.

Keywords:
Lifted-flame, cone-nozzle, stabilization of liftoff.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR.....	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vii
ABSTRAK	viii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
DAFTAR NOTASI	xx
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 <i>Lifted Flame</i>	4
1.3 Perkembangan Penelitian	5
1.4 Tujuan dan Ruang Lingkup Penelitian	14
1.5 Garis Besar Disertasi	16
2. PERSIAPAN PERALATAN PENELITIAN DAN KALIBRASI	19
2.1 Pendahuluan	19
2.2 Susunan Alat Uji dan Peralatan Uji.....	19
2.2.1 Susunan Alat Uji	19
2.2.2 <i>Burner</i>	20
2.2.3 Peralatan Pendukung.....	21
2.3 Kalibrasi Peralatan Pengukuran.....	23
2.3.1 Alat Ukur Aliran Gas.....	24
2.3.2 <i>Orifice Flow Meter</i> untuk Pengukur Aliran Udara.....	28
2.4 Pengukuran Dimensi Api.....	31
2.4.1 Pengukuran Langsung dengan Mistar.....	31
2.4.2 Pembacaan Gambar dengan Perangkat Lunak Pengolah Citra	31
2.4.3 Penentuan Dimensi Api.....	33
3. <i>LIFTED FLAME</i> PADA UDARA DIAM.....	37
3.1 Pendahuluan.....	37
3.2 Batas Mampu Nyala (<i>Flammability Limit</i>).....	37
3.3 Nyala Api Hasil Pembakaran.....	44
3.3.1 Kecepatan Pembakaran.....	45
3.3.2 Beban Pembakaran (<i>Burning Load</i>).....	48
3.3.3 Tebal Daerah Pemanasan (<i>Preheat-zone</i>).....	48
3.4 Klasifikasi Umum Nyala Api.....	50
3.5 Nyala Difusi Laminer.....	51
3.6 Nyala Difusi Turbulen.....	58
3.7 Nyala Terangkat (<i>Lifted Flame</i>) pada Nyala Difusi.....	62

3.8 Pengaruh Laju Aliran Gas Propana terhadap Nyala Api	66
3.9 Simulasi CFD	75
3.9.1 Membuat Model (<i>Preprocessing</i>)	76
3.9.2 Pemecahan Masalah (<i>Solving</i>)	78
3.9.3 Menampilkan Hasil Simulasi (<i>Postprocessing</i>)	79
3.10 Diskusi	80
3.11 Pengaruh Bentuk Saluran Gas terhadap <i>Liftoff</i>	84
4. PENGARUH SEMBURAN UDARA	
TERHADAP STABILISASI <i>LIFT-OFF</i>	97
4.1 Pengaruh Aliran Udara <i>Co-flow</i>	97
4.1.1 Eksperimen	97
4.1.2 Simulasi dengan CFD dan Diskusi	101
4.2 Pengaruh Arah Aliran Udara.....	111
4.2.1 Eksperimen	111
4.2.2 Diskusi Hasil Eksperimen.....	121
4.2.3 Simulasi dengan CFD.....	122
5. KESIMPULAN	131
DAFTAR REFERENSI	134
LAMPIRAN-LAMPIRAN	137
DAFTAR PUBLIKASI PAPER TERKAIT	141

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Data Penyetaraan Rotameter untuk Gas Propana.....	26
Tabel 2.2	Data Penyetaraan Rotameter untuk Gas Elpiji.....	27
Tabel 2.3.	Penyetaraan <i>Orifice Flowmeter</i> untuk Udara.....	30
Tabel 3.1	Reaksi Pembakaran Stoikiometrik 1 mol Hidrokarbon dengan Udara	38
Tabel 3.2	Batas Mampu Nyala Campuran Udara-bahan bakar pada Tekanan 1 Atmosfir.....	40
Tabel 3.3	Nilai Φ_M , B_M , B_2 untuk Menentukan Kecepatan Laminer Bahan Bakar	47
Tabel 3.4	Temperatur Nyala oleh Lewis dan Von Elbe.....	59
Tabel 3.5	<i>Lifted-distance</i> dan Tinggi Nyala Difusi Propana pada Udara Diam.....	67
Tabel 3.6	Menentukan Konstanta C persamaan 3.60 dari hasil eksperimen.	73
Tabel 3.7	Data Kondisi Batas Untuk Pembakaran Dalam Udara-diam	78
Tabel 3.8	<i>Lifted-distance</i> untuk Bentuk <i>Cone-nozzle</i> , $d = 1.8$ mm	85
Tabel 3.9	<i>Lifted-distance</i> untuk Bentuk Nosel Lurus, $d = 2$ mm	86
Tabel 3.10	<i>Lifted-distance</i> untuk Bentuk Nosel Lurus, $d = 3$ mm	86
Tabel 3.11	<i>Lifted-distance</i> untuk Bentuk Nosel Lurus, $d = 4$ mm	87
Tabel 4.1	Perubahan <i>Lifted-distance</i> Akibat Hembusan Udara	99
Tabel 4.2	Hasil Pengukuran Dimensi Nyala Hasil Pembakaran Difusi Gas Propana. Tanpa Aliran Udara	113
Tabel 4.3	Semburan Udara dengan Cincin Pengarah Udara 0^0	115
Tabel 4.4	Semburan Udara dengan Cincin Pengarah Udara 15^0	116
Tabel 4.5	Semburan Udara dengan Cincin Pengarah Udara 30^0	117
Tabel 4.6	Semburan Udara dengan Cincin Pengarah Udara 45^0	118

Tabel 4.7	Semburan Udara dengan Cincin Pengarah Udara 60°	119
Tabel 4.8	Semburan Udara dengan Cincin Pengarah Udara 75°	120



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Aliran Bahan Bakar Gas Disertai Difusi Udara	4
Gambar 1.2	Skema Burner dalam Eksperimen Corey D. Brown dkk.....	7
Gambar 1.3	Kombinasi Kecepatan Aliran Gas Terhadap Kecepatan Udara <i>Co-flow</i> Untuk Kondisi Stabil Dengan Tinggi <i>Liftoff</i> 2 Inchi	8
Gambar 1.4	Hasil Simulasi Penentuan Pangkal Nyala Difusi Laminer untuk Simulasi Tanpa Pelepasan Panas Pembakaran (kiri) dan Dengan Pelepasan Panas Pembakaran (kanan).	9
Gambar 1.5	Skema Aliran Paralel Udara-bahan bakar Serta Lapisan Pencampuran Udara-bahan bakar.....	9
Gambar 1.6	Struktur Pangkal Nyala <i>Attached-flame</i> untuk Berbagai Nilai Bilangan Damkohler, D_m	10
Gambar 1.7.	Struktur Pangkal Nyala Pada Saat <i>Liftoff</i> Untuk Berbagai Nilai Bilangan Damkohler	11
Gambar 1.8	Pengaruh Pemberian Medan Tegangan Pulsa Terhadap Jarak Angkat Nyala. Kiri Tanpa Medan Tegangan, Kanan Dengan Medan Tegangan.....	12
Gambar 1.9	Profil Nilai Rata-rata Dan Rms Dari : Temperatur, Fraksi Massa Campuran Dan Fraksi Mol OH Untuk Kelinggian Tertentu, x/D , Serta Jarak Dari Sumbu, r/R_f	13
Gambar 1.10	Diagram Alir Riset Phenomena <i>Lifted-flame</i>	18
Gambar 2.1.	Susunan Utama Peralatan Pengujian.....	20
Gambar 2.2.	<i>Burner Gas Tipe Ejected Combustor</i>	20
Gambar 2.3.	(a) Lajuan Gas Pada Ujung <i>Burner</i> (b) Aliran Udara Pada Ujung <i>Burner</i>	21
Gambar 2.4	<i>Wet Gas Meter WE-1.5A</i>	22
Gambar 2.5	<i>Flame Propagation & Stability</i> , Unit P.A. Hilton LTD. C551.....	24
Gambar 2.6	Proses Penyetaraan Pengukuran Aliran Gas	25
Gambar 2.7	Hubungan Antara Laju Aliran Gas Propana Terukur Q_f Terhadap Tinggi Pelampung Pada Rotameter, h_f	26

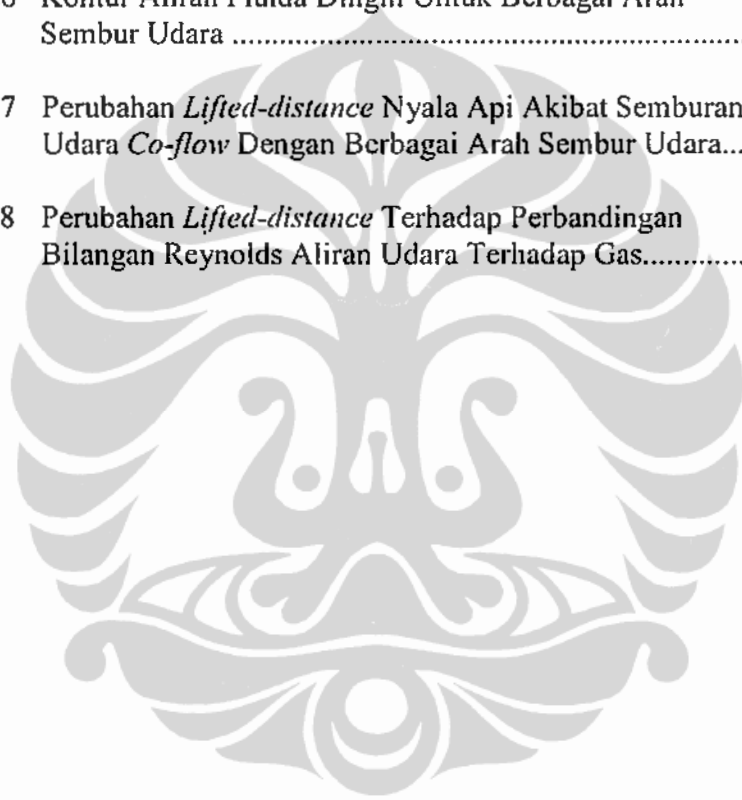
Gambar 2.8	Hubungan Antara Laju Aliran Gas Elpiji Terukur Q_f Terhadap Tinggi Pelampung Rotameter h_r	27
Gambar 2.9	Skema <i>Orifice Flow Meter</i> Untuk Mengukur Aliran Udara.....	28
Gambar 2.10	Penunjukan Nilai Q_a Terhadap Beda Ketinggian Permukaan Cairan h_1 dengan $\Delta Q_a = 0.6$ ml/s.....	29
Gambar 2.11	Pengukuran Dimensi Api Dengan Mistar	31
Gambar 2.12	Penentuan Dimensi Api Melalui Nilai RGB Dengan <i>Adobe Photo Shop</i>	32
Gambar 2.13	Penyetaraan Skala Panjang Mistar Dengan Jumlah Piksel Gambar Yang Dihasilkan Kamera	33
Gambar 2.14	Nilai Intensitas Radiasi Sinar Merah, Hijau dan Biru RGB Dan Sinar Merah R Sepanjang Sumbu Tegak Diatas <i>Burner</i>	34
Gambar 2.15	Nilai RGB Sepanjang Garis Horizontal Dengan Jarak Tertentu Dari Ujung <i>Burner</i>	36
Gambar 2.16	Garis Tengah Nyala Api Difusi Laminer.....	36
Gambar 3.1	Energi Penyalaan Terhadap Persen Bahan Bakar Dalam Campuran Serta Batas Mampu Nyala Campuran Udara-bahan bakar.....	40
Gambar 3.2	Grafik Psikrometrik Udara –uap Air.....	42
Gambar 3.3	Aliran Tunak Dengan Penambahan Kalor	44
Gambar 3.4	Distribusi Temperatur Nyala Api dan <i>Preheat-zone</i>	49
Gambar 3.5	Sebaran Bahan Bakar Keluar Mulut <i>Burner</i> Dengan Diameter Nosel = $2R$	51
Gambar 3.6	Struktur Nyala Api Difusi Laminer.....	56
Gambar 3.7	Pembentukan Jelaga dan Proses Pecahnya Jelaga	57
Gambar 3.8	Tinggi Nyala Api Difusi Laminer Hingga Kondisi Turbulen	58
Gambar 3.9	Korelasi Antara Bilangan Froude Dengan Panjang Nyala Difusi Turbulen	62
Gambar 3.10	Skema <i>Lifted</i> Dari Nyala Difusi	63

Gambar 3.11	Pengukuran Dimensi Api Dengan Kamera Digital	66
Gambar 3.12	Hasil Pengukuran H_f , x_f Nyala Difusi Propana Pada <i>Quiescence-air</i>	67
Gambar 3.13	Tinggi Api, H_f , Hasil Eksperimen dengan Tingkat Kepastian 95 % Serta Hasil Perhitungan menurut Hawthorne dkk.....	69
Gambar 3.14	Nyala Terangkat Dari Pembakaran Gas Propana	70
Gambar 3.15	<i>Lifted-distance</i> Hasil Eksperimen dan Hasil Perhitungan Menurut Persamaan Yang Diberikan Oleh Cha.M.S.....	71
Gambar 3.16	Nilai Konstanta Pengujian Untuk Persamaan 3.60 Diperoleh Nilai C Rata-rata = $50,6 \pm 10,4$ (ketidak pastian 5 %)	74
Gambar 3.17	Panjang Nyala Difusi Gas Propana Terhadap Laju Aliran Gas.....	74
Gambar 3.18	Model Dan Mesh Untuk Aliran Gas Propana Dalam Ruang Bakar	77
Gambar 3.19	Distribusi Temperatur (K) Untuk Kondisi <i>Attached Flame</i> , $Q_f = 21.1$ ml/s	79
Gambar 3.20	Distribusi Temperatur (K) Untuk Kondisi <i>Lifted- Flame</i> $Q_f = 65.1$ ml/s	80
Gambar 3.21	Kontur Aliran Fluida Keluar Nosel, Kondisi <i>Attached</i> $Q_f = 21.1$ ml/s	81
Gambar 3.22	Kontur Aliran Fluida Keluar Nosel, Kondisi <i>Lifted-Flame</i> $Q_f = 65.1$ ml/s	81
Gambar 3.23	Perpotongan Antara Campuran Stoikiometrik dan $S_{L,max}$ Untuk Kondisi <i>Attached</i>	82
Gambar 3.24	Perpotongan Antara Campuran Stoikiometrik Dan $S_{L,max}$ Untuk Kondisi <i>Lifted-Flame</i>	83
Gambar 3.25	Bentuk <i>Cone Nozzles</i> (kiri) dan Bentuk Saluran Gas Propana pada Ujung Burner (kanan).....	84
Gambar 3.26	Bentuk Nosel Lurus dengan Diameter Saluran Gas 2 mm, 3 mm dan 4 mm.....	85
Gambar 3.27	<i>Lifted-distance</i> , x_f , Terhadap Debit Aliran Gas Keluar Nosel Burner, Q_f	87

Gambar 3.28	<i>Lifted-distance</i> , x_f , Terhadap Kecepatan Aliran Gas Keluar Nosel, v_e	88
Gambar 3.29	<i>Lifted-distance</i> Nyala Gas Propana terhadap Nilai Beban Pembakaran (BL) untuk Berbagai Jenis Nosel.....	89
Gambar 3.30	Bilangan Tak Berdimensi <i>Lifted-distance</i> terhadap Bilangan Reynolds Gas Saat Keluar Ujung <i>Burner</i>	90
Gambar 3.31	Pola Aliran Fluida Disekitar Ujung <i>Burner</i> untuk Nosel Konik, $d=1.8$ mm, $Q_f=33.1$ ml/s, Kondisi <i>Liftoff</i>	92
Gambar 3.32	Pola Aliran Fluida Disekitar Ujung <i>Burner</i> untuk Nosel Lurus, $d=2$ mm, $Q_f=33.1$ ml/s, <i>Attached-flame</i>	93
Gambar 3.33	Perpotongan Antara Campuran Stoikiometrik dan $S_{L,max}$ Untuk Nosel Konik dengan Kondisi <i>Liftoff</i>	94
Gambar 3.34	Perpotongan Antara Campuran Stoikiometrik dan $S_{L,max}$ Untuk Nosel Lurus dan kondisi <i>attached</i>	94
Gambar 3.35	Kontur Temperatur Nyala untuk Nosel Konik, Kondisi <i>Lifted</i>	95
Gambar 3.36	Kontur Temperatur Nyala untuk Nosel Lurus, Kondisi <i>Attached</i>	95
Gambar 4.1	Aliran Udara <i>Co-flow</i> Serta Aliran Gas Propana Pada Ujung Bumer.....	98
Gambar 4.2	Perubahan <i>Lifted-distance</i> Akibat Laju Aliran Udara <i>Co-flow</i>	99
Gambar 4.3	Perubahan Nilai <i>Lifted-Distance</i> Terhadap Nilai Perbandingan Bilangan Reynolds Udara (Re_a) Terhadap Bilangan Reynolds Propana (Re_f)	100
Gambar 4.4	Model dan Mesh yang Digunakan untuk Kasus Aliran Udara <i>Co-flow</i> Terhadap Aliran Gas Propana.....	101
Gambar 4.5	Vektor Kecepatan Aliran Gas-udara Dalam Daerah Bakar Untuk (a) Kondisi tanpa injeksi udara, (b) Injeksi Udara 15 ml/s (c) Injeksi Udara 89 ml/s.....	103
Gambar 4.6	Titik Potong Kontur $\phi=1$ dengan $S_{L,max}$: (a) Dalam udara diam (<i>Quiescenc-air</i>) (b) Aliran udara rendah $Q_a=15$ ml/s (c) Aliran Udara $Q_a=89$ ml/s.	105
Gambar 4.7	Batas Mampu Bakar Fluida Campuran Dalam Ruang Bakar (a) Laju Airan Udara 0 ml/s, (b) Laju Aliran Udara 15 ml/s (c) Laju Aliran Udara 89 ml/s.	107

Gambar 4.8	Fraksi Massa Propana Sepanjang Sumbu Axial untuk $Q_f = 81.1$ ml/s dan Semburan Udara <i>Co-flow</i> 15 ml/s dan 89 ml/s.....	108
Gambar 4.9	Sebaran Nilai TKE Sepanjang Sumbu Axial Hasil Simulasi CFD Untuk Aliran Gas Propana 81.1 ml/s Dan Semburan Udara $Q_a = 15$ ml/s dan 89 ml/s.....	109
Gambar 4.10	Distribusi Nilai TKE Dan Kontur $\phi = 1$ (a) Aliran udara 15 ml/s (b) Aliran udara 89 ml/s	110
Gambar 4.11	Cincin-cincin Pengarah Aliran Udara	111
Gambar 4.12	Bentuk Saluran Udara dan Gas Setelah Cincin Pengarah Terpasang.....	111
Gambar 4.13	Dimensi Api Untuk Setiap Perubahan Laju Aliran Gas.	112
Gambar 4.14	Dimensi nyala : H_f , x_f Pembakaran Difusi Gas Propana Tanpa Aliran Udara.	114
Gambar 4.15	Perubahan <i>Lifted-distance</i> akibat semburan udara dengan sudut pengarah 0°	115
Gambar 4.16	Perubahan <i>Lifted-distance</i> Akibat Semburan Udara Dengan Sudut Pengarah 15°	116
Gambar 4.17	Perubahan <i>Lifted-distance</i> Akibat Semburan Udara Dengan Sudut Pengarah 30°	117
Gambar 4.18	Perubahan <i>Lifted-distance</i> Akibat Semburan Udara dengan Sudut Pengarah 45°	118
Gambar 4.19	Perubahan <i>Lifted-distance</i> Akibat Semburan Udara Dengan Sudut Pengarah 60°	119
Gambar 4.20	Perubahan <i>Lifted-distance</i> Akibat Semburan Udara Dengan Sudut Pengarah 75°	120
Gambar 4.21	Perubahan <i>Lifted-distance</i> Akibat Semburan Udara Dengan Cincin Pengarah Udara Memiliki Sudut 0° , 15° , 30° , 45° , 60° dan 70°	121
Gambar 4.22	Model Ruang Bakar dan Mesh pada Kasus Pengarah Aliran Udara	122
Gambar 4.23	Vektor Kecepatan Fluida Pada Zona Bakar Untuk	

	Berbagai Arah Sembur Udara.....	125
Gambar 4.24	Fraksi Massa Propana Sepanjang Sumbu Aksial Untuk Laju Aliran Propana 69 ml/s dan udara 54 ml/s dengan Sudut Pengarah Udara, Hasil Simulasi CFD	126
Gambar 4.25	Nilai TKE Sepanjang Sumbu Aksial Untuk Laju Aliran Propana 69 ml/s Dan Udara 54 ml/s Untuk Berbagai Sudut Pengarah Udara.....	126
Gambar 4.26	Kontur Aliran Fluida Dingin Untuk Berbagai Arah Sembur Udara	128
Gambar 4.27	Perubahan <i>Lifted-distance</i> Nyala Api Akibat Semburan Udara <i>Co-flow</i> Dengan Berbagai Arah Sembur Udara.....	129
Gambar 4.28	Perubahan <i>Lifted-distance</i> Terhadap Perbandingan Bilangan Reynolds Aliran Udara Terhadap Gas.....	129



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	: Gambar Burner	137
Lampiran 2.	: Gambar Nosel Konik pada Ujung Burner	139
Lampiran 3	: Tabel Laju Aliran Udara, Q_a (l/s), Terhadap Beda Ketinggian Permukaan Cairan, h_1 (mm)	140
Lampiran 3.	: Daftar Publikasi Paper dan Jurnal	141



DAFTAR NOTASI

A	Luas penampang	m^2
AFR	<i>Air-Fuel Ratio</i>	-
AFR _s	<i>Air-Fuel Ratio</i> Stoikiometrik	-
AFR _a	<i>Air-Fuel Ratio</i> aktual	-
BL	Beban Pembakaran	W/m^2
C	Konstanta	-
C _p	Panas jenis	$J/kg.^{\circ}C$
d _j	Diameter nosel <i>burner</i>	m
D	Difusivitas massa	m^2/s
E _{ign}	Energi penyalaan minimum	J
Fr	Bilangan Froude	-
Fr _j	Bilangan Froude gas keluar <i>burner</i>	-
f _f	fraksi massa bahan bakar	-
h	Entalpi	J/kg
h _r	Tinggi posisi rotameter	cm
H _f	Tinggi nyala api	m
J _c	Momentum fluida pada mulut <i>burner</i>	$kg.m/s$
k	konduktivitas udara	$W/m.^{\circ}C$
L _r	Panjang nyala	m
LHV	Nilai Pembakaran Terendah	J/kg
m _a	Massa udara	kg
m _f	Massa bahan bakar	kg
m _n	koefisien-koefisien	-
M _a	Berat molekul udara	kg/mol
M _f	Berat molekul bahan bakar	kg/mol
N _a	Jumlah molekul udara	mol
N _f	Jumlah molekul bahan bakar	mol
P	Tekanan	Bar, N/m^2
q	Panas reaksi	J/kg
Q _f	Laju volumetrik aliran bahan bakar gas	m^3/s
Q _a	Laju volumetrik aliran udara	m^3/s
R	Radius nosel	mm
Re	Bilangan Reynolds	-
Re-a	Bilangan Reynold udara keluar burner	-
Re _j	Nilai Re gas keluar nosel <i>burner</i>	-
S _u	Kecepatan rambat gas	m/s
S _l	Kecepatan pembakaran laminar	m/s
S _{L,ref}	S _l pada kondisi standar	m/s
S _C	Bilangan Schmidt	-
T _f	Temperatur nyala	$^{\circ}C$
T _i	Temperatur gas	$^{\circ}C$
T _{ig}	Temperatur ignition/penyalaan	$^{\circ}C$
T _u	Temperatur sebelum terbakar	$^{\circ}C$
T _r	Temperatur lingkungan	$^{\circ}C$
u	Kecepatan	m/s
u _a	Kecepatan udara	m/s

u_c	Kecepatan gas keluar nosel	m/s
v	Volume jenis	kg/m ³
X	<i>Lifted-distance</i> sebelum terjadi <i>blow-off</i>	m
x_f	<i>Lifted-distance</i>	m
Y_f	Fraksi massa bahan bakar	-
$Y_{f,stoic}$	Fraksi massa bahan bakar kondisi stoikiometrik.	

Symbol Yunani (Greek Symbol)

α	Difusivitas thermal	m ² /s
β, γ	Konstanta	-
Δh_c	Panas pembakaran	J/kg
κ	Konduktivitas panas	W/m ²
ρ	Massa jenis	kg/m ³
ρ_c	Massa jenis gas keluar <i>burner</i>	kg/m ³
ρ_f	Massa jenis bahan bakar	kg/m ³
ρ_o	Massa jenis udara lingkungan	kg/m ³
η_0	Tebal daerah pemanasan awal	m
Φ	Rasio ekivalen	-
ν	Viskositas kinematik	m ² /s
μ	Viskositas absolut	N-s/m ²
μ_f	Viskositas absolut bahan bakar	N-s/m ²
ω	Laju pembakaran	kg/m ³ .s

BAB 1 PENDAHULUAN

Energi merupakan motor penggerak berbagai aktivitas manusia. Produksi energi dalam dunia industri sebagian besar bersumber dari hasil pembakaran, dimana pembakaran diartikan sebagai proses reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidator disertai dengan produksi energi panas dalam bentuk pendar cahaya atau nyala api.

Bahan bakar merupakan zat yang mampu melepaskan panas ketika terjadi reaksi oksidasi, sementara oksidator merupakan unsur yang mengandung oksigen (misal: oksigen murni, udara). Proses-proses yang mungkin terjadi selama proses pembakaran antara lain: proses interaksi kimia dan fisika disertai pelepasan energi panas yang berasal dari energi ikatan-ikatan kimia (eksotermis), proses perpindahan panas, proses perpindahan massa, dan pergerakan partikel fluida.

Jenis bahan bakar terbesar yang dipergunakan dewasa ini berasal dari sisa-sisa fosil alam dengan unsur dasar hidrokarbon baik dalam bentuk: padat seperti batubara, cair seperti bensin maupun solar, serta dalam bentuk gas seperti: metana, propana, butana dan lain lain.

1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan dan produksi energi merupakan hal penting dalam kehidupan manusia karena energi merupakan modal dasar dalam setiap aktivitas manusia. Aktivitas manusia mulai dari memasak makanan, pemenuhan sistem penerangan dan sistem transportasi membutuhkan sumber energi. Beberapa sumber energi yang dapat dimanfaatkan guna memenuhi kebutuhan akan energi diantaranya adalah:

- Energi fosil yang sampai saat ini merupakan sumber energi terbesar yang dipergunakan.
- Energi alam terbarukan seperti energi surya, air dan angin.
- Energi nuklir.

Energi fosil merupakan sumber energi yang keberadaannya sangat terbatas karena proses pembentukan fosil menjadi bahan bakar secara alamiah

memerlukan waktu yang sangat lama. Guna mengimbangi peningkatan kebutuhan energi manusia dengan sumber energi terbatas perlu dilakukan usaha penemuan sumber energi alternatif lain atau dengan menggunakan energi fosil yang ada sehemat dan seefisien mungkin.

Energi fosil dalam bentuk minyak bumi selama ini merupakan primadona dalam pemenuhan kebutuhan energi, akibatnya harga minyak dunia semakin meningkat serta menjadi faktor penting yang menentukan kondisi perekonomian dunia. Krisis energi seringkali dikaitkan dengan ketersediaan cadangan minyak bumi. Penemuan cadangan minyak dunia menurun setelah mencapai puncaknya pada tahun 1960-an, sementara hingga saat ini produksi minyak dunia terus meningkat guna mengikuti peningkatan konsumsi energi dunia. Hal ini menimbulkan kekhawatiran akan habisnya cadangan minyak bumi untuk dapat memenuhi kebutuhan energi manusia.

Sebaliknya penggunaan bahan bakar gas mulai digalakkan guna menghemat penggunaan cadangan minyak bumi yang ada disamping makin banyaknya penemuan sumber gas alam serta peningkatan gas yang dihasilkan sebagai hasil samping pengolahan minyak bumi. Selain itu kesulitan penyimpanan gas dalam waktu panjang mendorong pemerintah Indonesia yang merupakan salah satu negara penghasil bahan bakar gas untuk mengutamakan penggunaan bahan bakar gas dalam setiap pemenuhan kebutuhan akan energi. Kebijakan ini dirasa sangat penting dan mendesak hingga dituangkan dalam bentuk Peraturan Pemerintah PP No. 5 tahun 2006 tentang kebijakan energi nasional yang berisi tentang program konversi minyak tanah ke gas. Untuk itu penelitian mengenai proses pembakaran dengan bahan bakar gas sudah selayaknya lebih diperhatikan serta diaktifkan.

Dua hal penting yang harus tetap dilakukan dalam mengatasi krisis energi adalah pemanfaatan energi secara efisien dengan tetap memperhatikan keamanan operasional proses pembakaran. Kedua hal tersebut menjadi dasar dalam merancang ruang bakar industri yang pada umumnya melibatkan ruang pembakaran yang besar serta temperatur bakar yang sangat tinggi dan merata. Disamping dimensi ruang bakar yang besar, distribusi temperatur dalam ruang

bakar perlu dibuat seragam, hal ini dapat diperoleh pada proses pembakaran difusi.

Proses pembakaran difusi/*non-premixed* merupakan proses pembakaran dimana bahan bakar yang dialirkan melalui saluran *burner* dibuat terpisah dari saluran udara yang bertindak sebagai oksidator. Saat kecepatan aliran bahan bakar mencapai nilai tertentu, pangkal nyala bergeser menjauhi ujung *burner*. Hal ini disebabkan adanya kebutuhan bagi udara untuk berdifusi kedalam bahan bakar untuk mencapai kondisi campuran yang memenuhi syarat untuk terbakar. Proses menjauhnya pangkal nyala api dari ujung burner dikenal sebagai proses *lift-off*, sedangkan kondisi nyala api dimana pangkal nyala tidak menyentuh ujung *burner* dikenal sebagai nyala terangkat (*lifted-flame*). Jarak antara pangkal nyala api dengan ujung burner dikenal sebagai jarak angkat (*lifted-distance*) [1].

Operasi pembakaran dalam ruang bakar industri seringkali dilaksanakan dalam jangka waktu yang panjang, kondisi nyala terangkat (*lifted-flame*) menjadi kondisi operasi yang sangat menguntungkan oleh karena ujung *burner* tidak bersentuhan langsung dengan pangkal nyala api yang memiliki temperatur cukup tinggi. Dengan demikian beban temperatur yang dialami ujung *burner* tidak terlampau besar sehingga dapat meningkatkan umur pakai dari nozel *burner* yang terpasang pada ujung *burner*. Selain itu proses pembakaran dengan cara difusi lebih aman karena terhindar dari fenomena serangan balik api (*flash back*), dimana api mengejar bahan bakar hingga ke dalam saluran *burner* apabila suplai bahan bakar menurun hingga batas kecepatan tertentu. Sebaliknya kondisi *flash-back* seringkali dijumpai pada sistem pembakaran premiks yang dapat memicu terjadinya ledakan dalam sistem pembakaran.

Ketika pangkal nyala berada pada ujung *burner* yaitu kondisi *attached* temperatur tinggi api diterima secara konduksi oleh ujung *burner* sehingga ujung *burner* juga memiliki temperatur yang hampir sama dengan temperatur nyala propana yang secara adiabatik memiliki nilai ± 1925 °C [27]. Ketika nyala mulai terangkat *lifted* perpindahan panas dengan cara konduksi memberikan pengaruh yang sangat kecil, perpindahan panas lebih dominan dilakukan secara radiasi dan konveksi yang memberikan beda temperatur sangat besar antara temperatur nyala

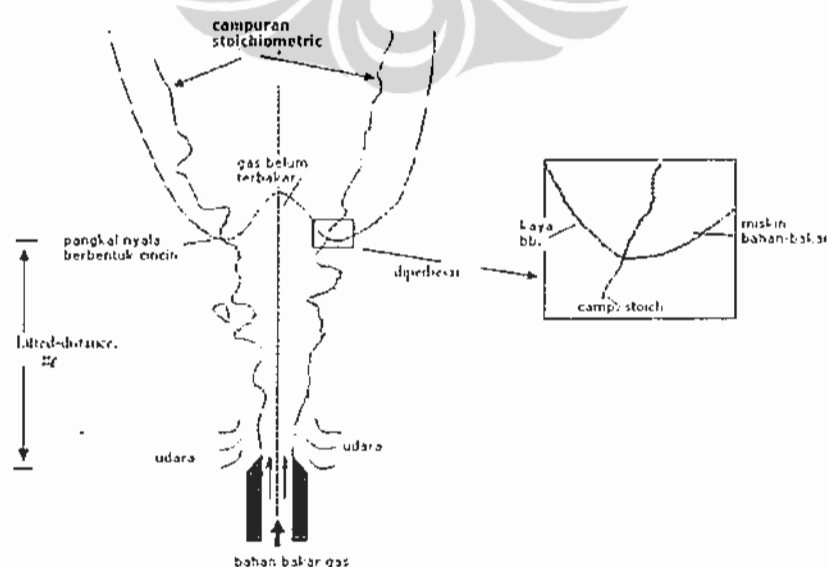
dengan ujung burner hingga beban temperatur pada ujung burner tidak terlampaui besar yang menjaga nosel *burner* tidak leleh/rusak.

Jarak pangkal nyala api yang terlampaui jauh dari ujung *burner* seringkali membuat nyala api tidak stabil yang ditunjukkan oleh adanya getaran nyala api disamping nyala api menjadi mudah padam (*blowoff*). Untuk itu perlu dilakukan penelitian yang lebih dalam mengenai *lifted-flame* khususnya yang berhubungan dengan stabilisasi nyala api.

1.2 Lifted Flame

Nyala api difusi untuk gas dengan laju aliran yang rendah menghasilkan nyala api dengan pangkal nyala berada pada ujung burner, seiring dengan peningkatan laju aliran gas membuat posisi pangkal nyala menjauh dari ujung burner. Kondisi nyala api dengan pangkal nyala berada pada jarak tertentu dari ujung burner dikenal sebagai kondisi *lift-off* seperti terlihat pada Gambar 1.1.

Phenomena ini umum dijumpai pada pembakaran difusi, dimana aliran bahan bakar gas dan udara sebagai oksidator dialirkan terpisah memasuki ruang bakar. Sehingga untuk laju aliran bahan bakar gas yang cukup tinggi dibutuhkan waktu pencampuran antara bahan bakar dan udara yang cukup lama pula untuk memperoleh kondisi campuran yang siap untuk terbakar.



Gambar 1.1 Aliran bahan bakar gas disertai difusi udara.

Sumber : Norbert Peters [1]. telah diolah kembali.

Gambar 1.1 menggambarkan aliran bahan bakar serta proses difusi yang dimulai dari bagian terluar ke bagian dalam. Bagian gambar yang diperbesar menunjukkan daerah dekat sumbu aliran gas merupakan daerah dengan kandungan bahan bakar tertinggi, sedangkan semakin jauh dari sumbu kandungan gas semakin tipis. Pangkal nyala berada pada posisi dimana campuran udara-bahan bakar memiliki nilai fraksi massa sesuai dengan batas mampu nyala dengan ketebalan yang cukup memadai. Bagian sumbu aliran merupakan bagian paling akhir yang mencapai kondisi campuran mampu nyala, sehingga permukaan pada pangkal nyala tampak seperti cincin dengan bagian dalam gelap yang menunjukkan gas belum terbakar akibat kurangnya kandungan oksigen.

1.3 Perkembangan Penelitian

Penelitian mengenai *lifted-flame* dikemukakan pertama kali oleh Wohl *et.al* dalam *The Third Symposium of Combustion* yang menyatakan bahwa nyala difusi dapat terangkat jika gradien kecepatan rata-rata bahan bakar yang keluar dari mulut *burner* melebihi nilai kritisnya, dan akan mencapai kondisi stabil jika nilai *burning velocity* sama dengan kecepatan rata-rata aliran bahan bakar pada posisi tersebut [1].

Selanjutnya Vanquickenborne dan Van Tiggelen mengemukakan bahwa pancaran bahan bakar dan udara sekitarnya benar-benar tercampur sempurna pada pangkal nyala api difusi dan stabilisasi nyala api terjadi pada posisi dimana kecepatan lokal aliran rata-rata sebanding dengan kecepatan pembakaran turbulen, S_T [2].

Eickhoff *et.al* menyatakan bahwa dalam pembakaran difusi sejumlah udara menyusup ke dalam aliran bahan bakar saat pertama keluar dari burner hingga terjadi kondisi premiks. Kondisi premiks ini yang memungkinkan terjadinya pembakaran pada pangkal api (*base-flame*). Selain itu dinyatakan bahwa stabilisasi dikendalikan oleh rambatan nyala turbulen premiks [3].

Selanjutnya Kalghatgi melakukan eksperimen untuk bahan bakar gas Hidrogen, Propana, Metana dan Etilene serta menemukan bahwa tinggi lift-off merupakan fungsi linier dari kecepatan sembur bahan bakar gas (*jet exit velocity*)

u_0 , tidak tergantung dengan diameter saluran bahan bakar, dan berbanding terbalik terhadap kuadrat dari kecepatan pembakaran laminar maksimum [4].

Donnerhack dan Peters melakukan pengukuran tinggi *lift-off* dari nyala metana untuk berbagai diameter nosel dan kecepatan aliran keluar nosel. Dari hasil penelitian diperoleh tinggi maksimum *lift-off* per diameter nosel (X/d) mencapai nilai 40 sebelum kondisi *blow-off* tercapai [5].

Broadwell *et.al* mengusulkan model stabilisasi nyala berdasarkan mekanisme pengangkutan panas hasil reaksi oleh pusaran-pusaran (*vortices*) yang terdapat pada tepi semburan, kemudian berdifusi bersama udara segar ke bagian dalam berikutnya serta membuat campuran tersebut terbakar [6].

Selain itu Miake-Lye dan Hammer meneliti nyala pembakaran gas metana, etilen dan gas alam dengan campuran udara. Hasil penelitian menyatakan bahwa tinggi pangkal nyala meningkat secara linier terhadap kecepatan aliran gas keluar nosel [7].

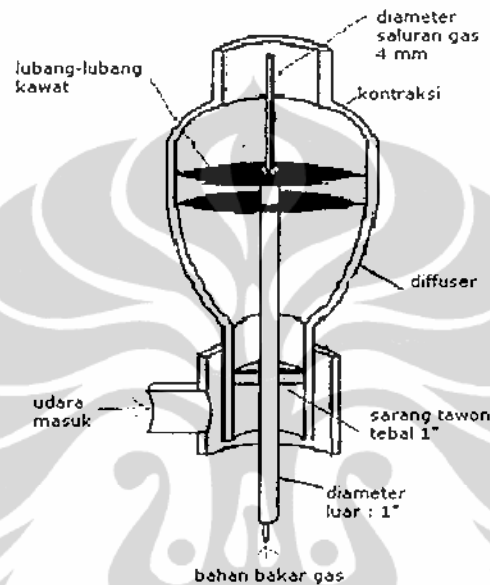
Schefer *et.al* menggunakan *planar imaging* untuk pengukuran konsentrasi CH_4 , CH dan temperatur. Daerah nyala api dinyatakan merupakan daerah dengan konsentrasi CH yang tinggi yang terbentuk di sekitar lapisan terluar semburan. Selanjutnya disimpulkan bahwa propagasi nyala dalam arah tiga dimensi serta gerakan turbulensi pada skala mayor mengendalikan kestabilan nyala [8].

Muñiz dan Mungal menggunakan *particle image velocimetry* (PIV) untuk mengukur medan aliran dalam dua dimensi pada daerah sekitar pangkal api yang terangkat (*lifted flame base*) untuk gas metana dan etilen untuk nilai bilangan Reynolds sebesar 3800 – 22000. Mereka mendapati bahwa kecepatan lokal pada sumbu semburan memiliki nilai mendekati kecepatan pembakaran laminar pada pangkal nyala api, berkisar 1,5 – 3 S_L dimana S_L menyatakan kecepatan laminar pembakaran gas. Selain itu gambar yang dihasilkan dalam penelitian menunjukkan bahwa struktur dari permukaan rambat nyala menyerupai bentuk *triple flames* [9].

Selain penelitian-penelitian mengenai *lifted-flame* yang telah dikemukakan di atas terdapat beberapa penelitian terbaru lainnya antara lain:

1. Penelitian mengenai mekanisme stabilisasi *lifted jet flame* dengan aliran udara *co-flow* dilakukan oleh Corey D. Brown, Kyle A. Watson dan Kevin

M.Lyons yang meneliti pengaruh kecepatan aliran bahan bakar keluar *burner* serta kecepatan aliran *co-flow* udara terhadap tinggi *liftoff* nyala difusi untuk bahan bakar etilen, propana dan metana [10]. Gambar 1.2 memperlihatkan skema *burner* yang dipergunakan dalam penelitian tersebut.

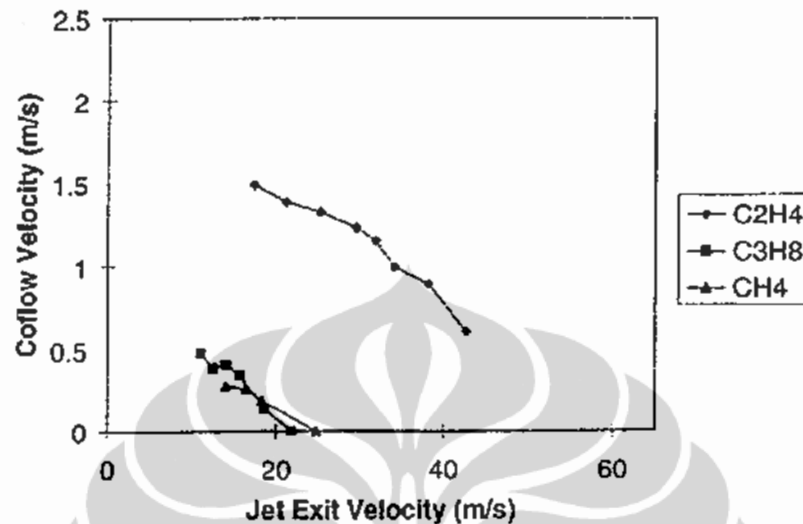


Gambar 1.2 Skema *burner* dalam eksperimen Corey D.Brown dkk.

Sumber : Corey D.Brown *et.al* [10].

Bahan bakar dialirkan melalui saluran bagian dalam *burner* dengan diameter laluan 4 mm. Sedangkan udara dialirkan di bagian luar saluran *burner* dengan susunan peralatan yang menjamin arah aliran udara lurus ke atas. Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan antara kecepatan aliran gas dan udara *co-flow* yang membuat nyala api menjadi stabil yaitu dengan pangkal nyala berada pada jarak 2 inci dari ujung *burner* seperti terlihat pada Gambar 1.3. Semakin besar kecepatan gas, maka aliran udara *co-flow* yang diperlukan menjadi lebih rendah untuk membuat jarak pangkal nyala api terhadap *burner* tetap pada 2 inci. Disamping itu kondisi *lifted* sesaat sebelum *blowout* stabil pada posisi campuran stoikiometrik dengan kecepatan lokal gas sama dengan kecepatan pembakaran turbulen,

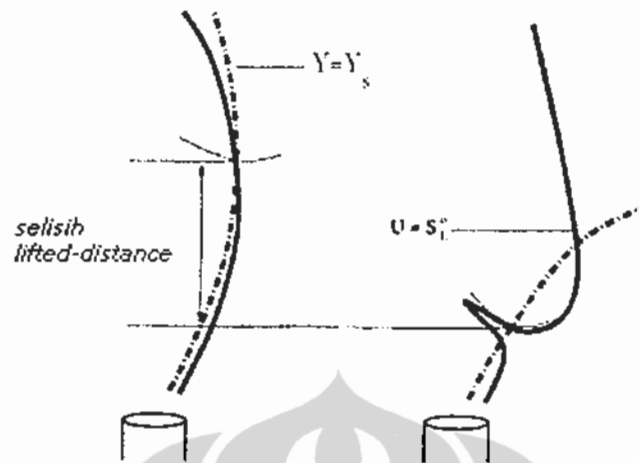
S_T . Sedangkan untuk kondisi *lifted* lainnya kecepatan lokal aliran menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan kondisi *blowout* nya.



Gambar 1.3 Kombinasi kecepatan aliran gas terhadap kecepatan udara *Co-flow* untuk kondisi stabil dengan tinggi *liftoff* 2 inci

Sumber : Corey D.Brown et.al [10].

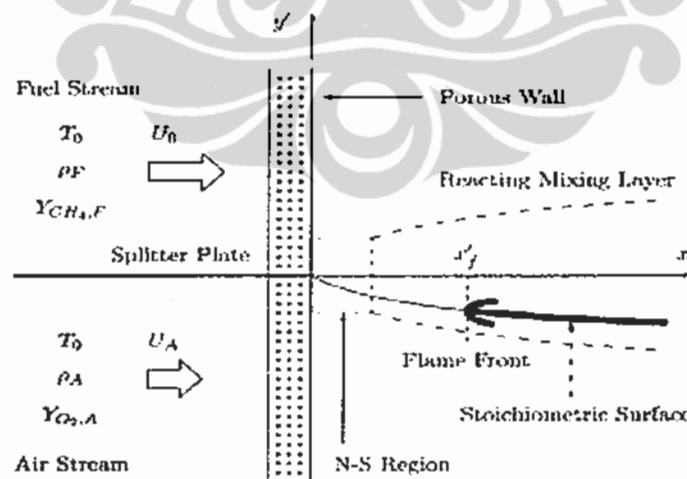
- Penentuan tinggi *liftoff* untuk nyala difusi laminar dilakukan melalui simulasi numerik oleh Joan Boulanger *et.al* (2003). Pangkal nyala diasumsikan berada pada permukaan campuran stoikiometrik dengan kecepatan aliran sesuai dengan kecepatan pembakaran nyala premiks. Dengan menambahkan faktor pelepasan panas pembakaran dalam simulasi diperoleh bahwa pangkal nyala lebih mendekati ujung burner dibandingkan hasil dari simulasi aliran dingin [11]. Simulasi dilakukan dengan *Direct Numerical Simulation Tool* dengan melibatkan persamaan-persamaan: aliran mampu mampat, persamaan temperatur dan spesies sepanjang *triple-flame* dan solusi aliran dingin untuk Landau-Squire Jet. Gambar 1.4 memperlihatkan perbedaan tinggi *liftoff* antara hasil simulasi tanpa memperhitungkan pelepasan panas saat pembakaran dengan simulasi yang memasukkan perhitungan pelepasan panas pembakaran.



Gambar 1.4 Hasil simulasi penentuan pangkal nyala difusi laminar untuk simulasi tanpa pelepasan panas pembakaran (kiri) dan dengan pelepasan panas pembakaran (kanan).

Sumber : Joan Boulanger et. al [11], telah diolah kembali.

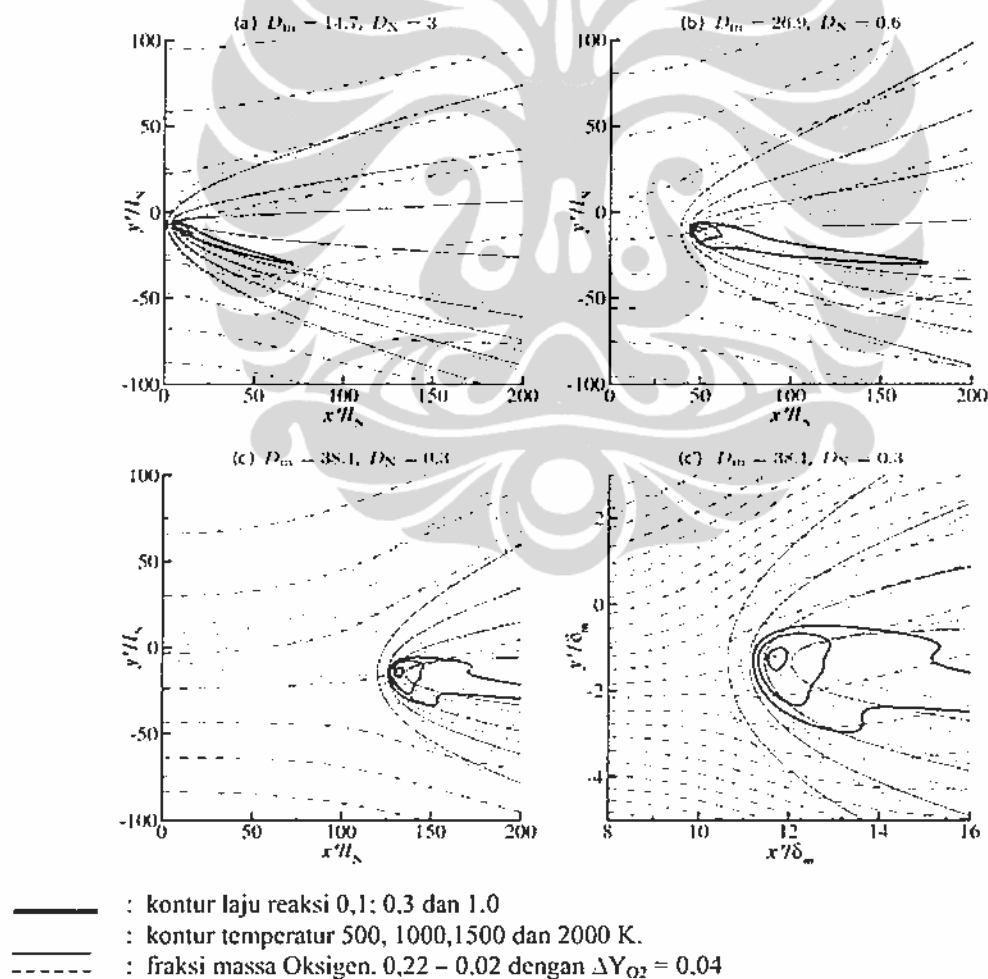
3. Eduardo Fernández-Tarrazo melakukan analisis numerik guna menentukan kondisi *lift-off* dan *blow-off* dalam pembakaran difusi pada lapisan campuran antara bahan bakar (campuran metana dan nitrogen) dengan udara yang disebarkan secara mendatar dan paralel [12].



Gambar 1.5 Skema aliran paralel udara-bahan bakar serta lapisan pencampuran udara-bahan bakar.

Sumber : Eduardo Fernandez-Tarrazo et.al [12].

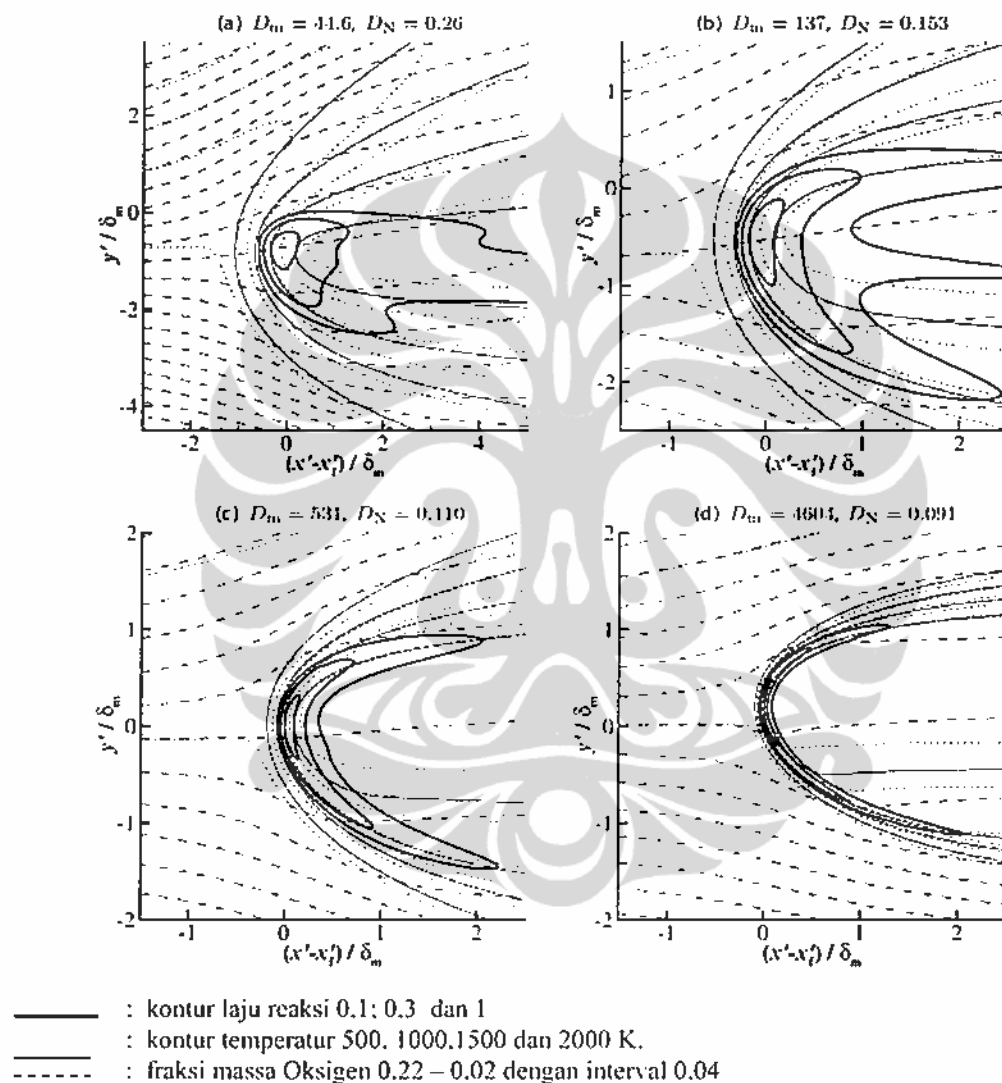
Analisis dilakukan dengan memperhitungkan pengaruh ekspansi termal dengan asumsi reaksi Arrhenius satu tingkat, dimana energi aktivasi E_a dibiarkan bervariasi untuk menghasilkan variasi kecepatan rambat nyala api. Gambar 1.5 memperlihatkan batas pencampuran gas-udara untuk semburan paralel bahan bakar dan udara. *Attached flame* digambarkan sebagai struktur pangkal nyala berada dekat dengan lubang dinding, disepanjang daerah Navier-Stokes (*N-S Region*) dengan nilai Damkohler $D_N = (S_t/U_0)^2$. Posisi pangkal nyala didefinisikan sebagai tempat perpotongan antara permukaan stoikiometrik dengan permukaan bertemperatur 1200 K. Gambar 1.6 menggambarkan kondisi *attached-flame*.



Gambar 1.6 Struktur pangkal nyala *attached-flame* untuk berbagai nilai bilangan Damkohler, D_m .

Sumber : Eduardo Fernandez-Tarrazo et.al [12], telah diolah kembali.

D_m merupakan bilangan Damkohler alternatif berdasarkan waktu tinggal saat melalui pangkal nyala, δ_m/U_0 , dan waktu reaksi kimia, δ_L/U_0 . Nilai Damköhler number dinyatakan sebagai $D_m = (\delta_m/\delta_L)^2$. Gambar 1.7 menggambarkan kondisi *lift-off*, dengan nilai Damkohler number, D_m yang lebih besar.



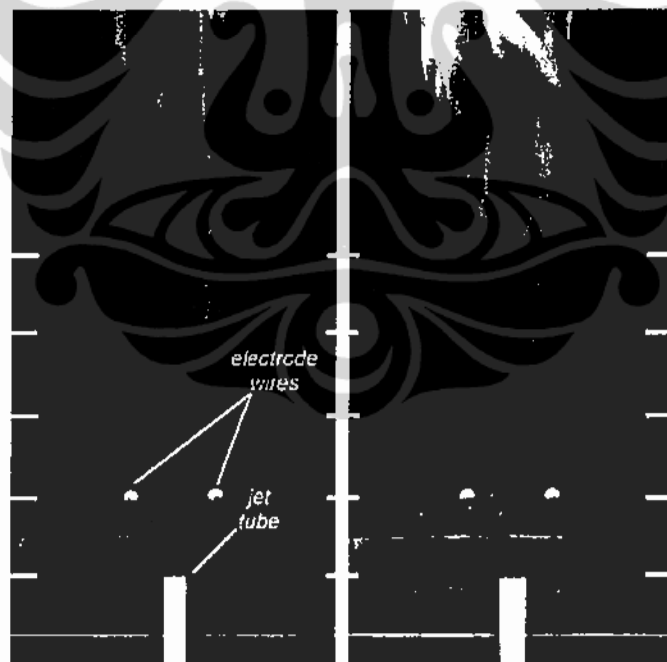
Gambar 1.7. Struktur pangkal nyala pada saat *lift-off* untuk Berbagai nilai Damkohler number.

Sumber : Eduardo Fernandez-Tarrazo et.al [12], telah diolah kembali

- Tahun 2006 Mark A. Mikofski dan kawan-kawan melakukan pengukuran tinggi nyala api difusi laminar dengan *Planar Laser-Induced Fluorescence* (PLIF) terhadap partikel OH dan menemukan bahwa tinggi nyala luminous

lebih tinggi dibanding zone reaksi akibat adanya pendaran jelaga diatas zona reaksi [13].

5. Belakangan ini stabilisasi nyala mengarah pada penerapan teknologi plasma, yaitu dengan memberikan medan beda potensial tinggi gas saat keluar dari nozel. Penelitian semacam ini telah dilakukan oleh K.Criner et.al. Dengan memberikan beda tegangan DC hingga 50 kV pada semburan udara-Propana, dihasilkan penurunan jarak angkat nyala, yang bertujuan untuk meningkatkan kestabilan nyala difusi gas pada campuran miskin bahan bakar. Gambar 1.8 memperlihatkan perbedaan kondisi nyala api tanpa diberikan medan tegangan dan dengan diberikan tegangan berbentuk pulsa dengan frekwensi 200 Hz [14]. Pemberian tegangan ini menimbulkan plasma di sekitar mulut burner hingga meningkatkan proses pencampuran udara-bahan bakar, sehingga jarak angkat nyala menjadi lebih kecil dan nyala menjadi lebih stabil.

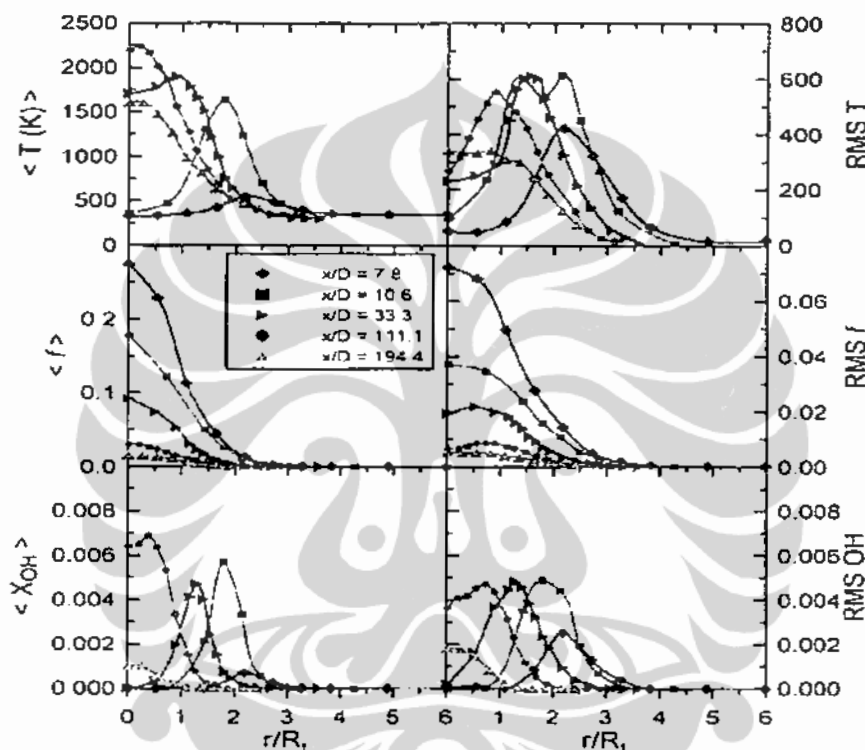


Gambar 1.8 Pengaruh pemberian medan tegangan pulsa terhadap jarak angkat nyala. Kiri tanpa medan tegangan, kanan dengan medan tegangan.

Sumber : K.Criner *et.al* [14].

6. Penelitian yang dilakukan oleh T.S.Cheng *et.al* [15] memberikan gambaran struktur nyala difusi gas hidrogen untuk berbagai posisi ketinggian terhadap

diameter nozel , x/d , serta distribusi temperatur, fraksi massa dan fraksi mol OH rata-rata serta nilai rms sepanjang arah radial (r/R) seperti diperlihatkan pada Gambar 1.9. Dengan menggunakan teknik LIPF (*Laser Induced Predissociative Fluorescence*) dan *Raman Scattering*, profil konsentrasi massa campuran dan konsentrasi mol OH dapat ditentukan.



Gambar 1.9 Profil nilai rata-rata dan rms dari : temperatur, fraksi massa campuran dan fraksi mol OH untuk ketinggian tertentu, x/D , serta jarak dari sumbu, r/R_f .

Sumber : T.S. Cheng et.al [15]

Dari profil temperatur pada Gambar 1.9 terlihat bahwa untuk posisi dekat dengan ujung burner, temperatur tertinggi berada pada jarak r/R_f tertentu. Semakin jauh dari ujung burner temperatur maksimum semakin mendekati sumbu aksial. Hingga pada ketinggian tertentu temperatur maksimum berada pada sumbu aliran gas, yang menunjukkan posisi temperatur maksimum nyala. Profil ini bersesuaian dengan profil konsentrasi OH, sehingga dapat disimpulkan bahwa penyalaan gas Hidrogen erat kaitannya dengan produksi OH, hal yang sama dipergunakan sebagai dasar dari penelitian [13]. Dari profil temperatur dan

konsentrasi OH, menunjukkan bahwa bentuk nyala berbentuk cincin pada pangkal nyala serta berbentuk kerucut seperti terlihat pada Gambar 1.1.

Selain penelitian-penelitian di atas masih banyak penelitian lain yang berkenaan dengan sifat nyala api difusi atau *non-premixed* melalui simulasi numerik [16–19].

1.4 Tujuan dan Ruang Lingkup Penelitian

Seperti telah dikemukakan sebelumnya bahwa proses pembakaran merupakan proses yang sangat penting dalam memanfaatkan energi kimiawi bahan bakar yang akan dipergunakan untuk memenuhi kebutuhan energi manusia. Penggunaan bahan bakar gas dewasa ini dipacu untuk dipergunakan dalam kehidupan sehari-hari baik dalam bidang industri maupun dalam rumah tangga mengingat gas yang diperoleh saat ini tidak mungkin disimpan dalam jangka waktu lama, sementara persediaan bahan bakar minyak dunia semakin menipis. Untuk itu penggunaan energi minyak lebih dihemat dan pemanfaatan bahan bakar gas lebih ditingkatkan.

Proses pembakaran dengan menggunakan bahan bakar gas harus dilakukan secara hati-hati, mengingat sifat gas yang mudah terbakar serta bersifat mudah menyusup ke tempat-tempat sempit sehingga ancaman ledakan akibat kebocoran gas menjadi sangat tinggi.

Selain faktor keamanan dalam proses pembakaran, diperlukan perhatian khusus dalam peningkatan efisiensi proses, sehingga kandungan kalor yang dimiliki gas dapat digunakan secara maksimal dengan membuat semua gas yang dialirkan ke dalam ruang bakar dapat terbakar dengan sempurna tanpa ada kandungan gas yang ikut terbuang bersama gas sisa hasil pembakaran.

Kestabilan nyala terangkat (*lifted-flame*) diupayakan untuk dapat memenuhi kedua aspek yang merupakan tuntutan utama dalam sistem pembakaran yaitu: Pertama, kemudahan nyala api difusi untuk menghasilkan kondisi *liftoff* sehingga memberikan kondisi aman pada ujung *burner* yaitu menghindarkannya dari beban kalor tinggi akibat ujung *burner* bersentuhan secara langsung dengan nyala api.

Kedua, meningkatkan efisiensi proses pembakaran, semakin tinggi *lifted-distance* yang terjadi dalam sistem penyalaan, memberikan kemungkinan semakin

banyak bahan bakar gas yang belum sempat terbakar yang turut serta terbang bersama gas buang.

Sehingga dari kedua aspek tersebut, stabilisasi nyala api diarahkan untuk mendapatkan kemudahan mencapai kondisi *liftoff*, dengan nilai *lifted distance* yang rendah seperti yang disyaratkan oleh Corey D. Brown *et.al* [10] serta K. Criner *et.al* [14].

Penelitian mengenai *lifted-flame* pada pembakaran difusi gas pada umumnya menggunakan *burner* tipe *ejected combustor* dengan saluran bahan bakar gas yang memiliki bentuk lurus [1-15], dengan bentuk seperti ini difusi udara sebagai oksidator ke dalam bahan bakar gas dapat terjadi pada sisi terluar gas yang mudah terjadi pada ujung *burner*. Kemungkinan berbeda dapat terjadi pada nosel *burner* berbentuk konik mengingat arah aliran bahan bakar gas saat keluar nosel *burner* memiliki arah aliran yang cenderung menuju ke sumbu aliran. Hal ini membentuk suatu hipotesa awal bahwa dengan arah aliran gas yang cenderung menuju ke arah sumbu aliran membuat pencampuran udara sekitar dengan bahan bakar gas menjadi lebih sulit terjadi di sekitar mulut *burner*. Hal ini memberikan kemungkinan pangkal nyala api tidak mudah terbentuk pada daerah dekat ujung *burner*, sehingga nyala api lebih mudah membentuk kondisi *liftoff*. Berdasarkan hipotesa awal tersebut disertasi ini dimulai dengan menyelidiki fenomena *lifted-flame* yang terjadi pada nosel *burner* berbentuk konik untuk dibandingkan dengan fenomena *lifted-flame* yang terjadi pada nosel *burner* berbentuk lurus.

Selain itu, pengaruh aliran udara di sekeliling aliran gas terhadap kestabilan *liftoff* diteliti untuk menentukan keterkaitan antara *lifted-distance* yang terjadi terhadap pengaruh debit aliran udara, serta arah serang udara terhadap aliran bahan bakar gas pada saluran gas berbentuk konik. Penelitian ini diharapkan memberikan sumbangan keilmuan terhadap rancangan *burner* untuk sistem pembakaran difusi dengan kestabilan *liftoff* yang tinggi.

Disertasi ini menyajikan hasil penelitian dengan kegiatan penelitian yang dibagi dalam dua kelompok sebagai berikut:

1. Fenomena *lifted-flame* pembakaran difusi gas propana dalam udara diam.
 - Pengaruh debit aliran propana terhadap *lifted-flame* yang terbentuk pada pembakaran difusi gas propana dengan nosel *burner* berbentuk konik.

- Pengaruh bentuk saluran gas propana (nosel) yang terletak pada ujung burner terhadap kondisi *lifted-flame* yang terjadi.
2. Pengaruh hembusan udara terhadap *lifted-distance* pada pembakaran difusi gas propana.
- Pengaruh debit hembusan udara.
 - Pengaruh arah semburan udara.

Hasil penelitian-penelitian sebelumnya [2-19] menunjukkan bahwa nyala terangkat (*lifted-flame*) erat kaitannya dengan distribusi kecepatan, fraksi massa dan turbulensi aliran. Untuk itu dalam penelitian ini dilakukan simulasi fluida dingin (*cold-flow*) dengan CFD (*Computational Fluid Dynamics*) untuk mengetahui kontur kecepatan, fraksi massa gas Propana serta turbulensi aliran untuk setiap faktor yang memberikan pengaruh terhadap stabilisasi nyala dalam kondisi *lifted*.

Tujuan akhir dari penelitian ini adalah mendapatkan gambaran mengenai stabilisasi nyala *liftoff* gas propana yang ditentukan oleh bentuk saluran gas pada ujung burner serta aliran udara disekitar aliran gas.

1.5 Garis Besar Desertasi

Penelitian ini diarahkan untuk mengetahui lebih jauh fenomena *lifted-flame* yang terjadi dalam pembakaran difusi gas sehingga dapat diarahkan lebih lanjut untuk mendesain sistem pembakaran difusi gas yang optimal yaitu yang memenuhi aspek efisiensi serta keamanan operasionalnya.

Penelitian diawali dengan fenomena *lifted-flame* pada nyala difusi gas propana pada kondisi udara diam untuk laluan gas berbentuk konik (menyempit) dengan berbagai nilai laju aliran gas. Dalam kasus ini hendak diketahui hubungan antara laju aliran gas Propana terhadap jarak angkat nyala (*lifted-distance*) untuk kondisi pembakaran dalam udara diam (*quiescence-air*).

Pengaruh bentuk laluan gas pada ujung burner dilakukan dengan membandingkan bentuk laluan menyempit (*cone-nosel*) terhadap bentuk laluan lurus dengan diameter laluan yang bervariasi. Penelitian ini diarahkan untuk dapat menjawab hipotesa awal tentang pengaruh bentuk saluran konik terhadap kemudahan terbentuknya *liftoff*.

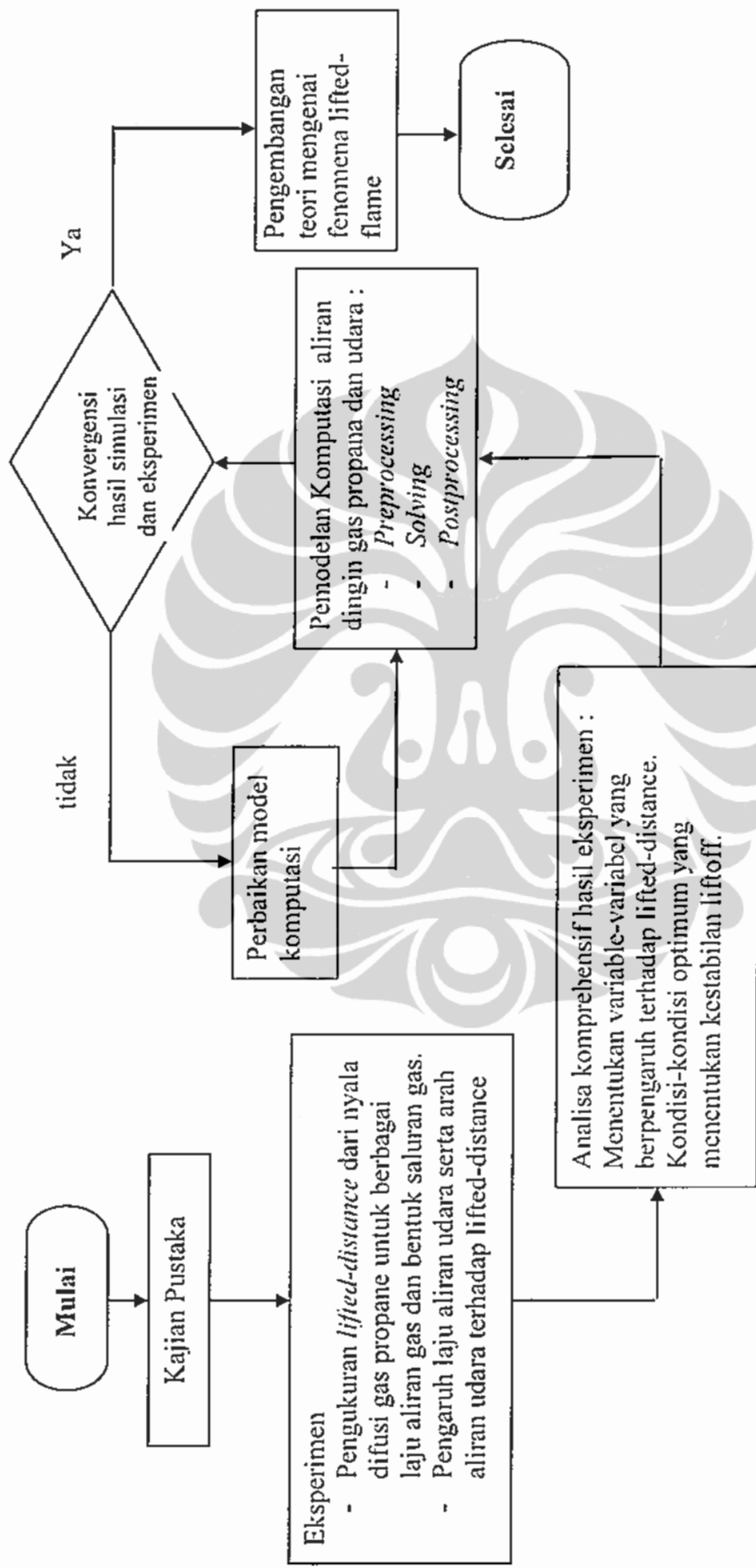
Pengaruh semburan udara *co-flow* terhadap *lifted-distance* diteliti untuk laju aliran gas yang dibuat konstan dengan laju aliran udara yang bervariasi. Dengan demikian perbandingan nilai Bilangan Reynolds aliran udara terhadap gas agar nyala yang dihasilkan berada pada kondisi stabil dapat ditentukan..

Selain variasi laju aliran udara dalam mendapatkan kondisi stabil nyala api liftoff, pengaruh sudut sembur udara terhadap aliran gas juga diteliti guna mendapatkan sudut pengarah udara terbaik dalam upaya mendapatkan kondisi stabil nyala difusi.

Dari hasil penelitian yang dilakukan secara eksperimen tersebut diatas, dilakukan simulasi komputasional dengan CFD (*Computational Fluid Dynamics*) guna mendapatkan variabel-variabel yang tidak dapat diperoleh melalui cara eksperimen. Dengan menggunakan simulasi aliran fluida dingin (*Cold Flow Simulations*), proses pencampuran udara-gas dapat dipelajari dari distribusi fraksi massa propana dalam fluida campuran, distribusi kecepatan aliran fluida serta turbulensi aliran fluida keluar dari ujung *burner*.

Validasi hasil komputasi dilakukan dengan membandingkannya dengan kondisi eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya, yaitu dengan menetapkan kondisi pangkal nyala berada pada kondisi campuran stoikiometrik dengan kecepatan lokal aliran sama dengan kecepatan laminer maksimum yang dimiliki oleh gas propana mengikuti Teori I *Lift-off* [28].

Diagram alir eksperimen yang dilakukan dalam disertasi ini diperlihatkan pada Gambar 1.10. dengan hasil akhir yang diharapkan dapat memberikan kontribusi untuk membuat rancangan *burner* pembakaran difusi gas yang memiliki kemudahan pembentukan nyala *lift-off* serta rancangan aliran udara yang memberikan peningkatan stabilitas nyala api terangkat.



Gambar 1.10. Diagram Alir Riset Phenomena Lifted-flame.

BAB 2 PERSIAPAN PERALATAN PENELITIAN DAN KALIBRASI

2.1 Pendahuluan

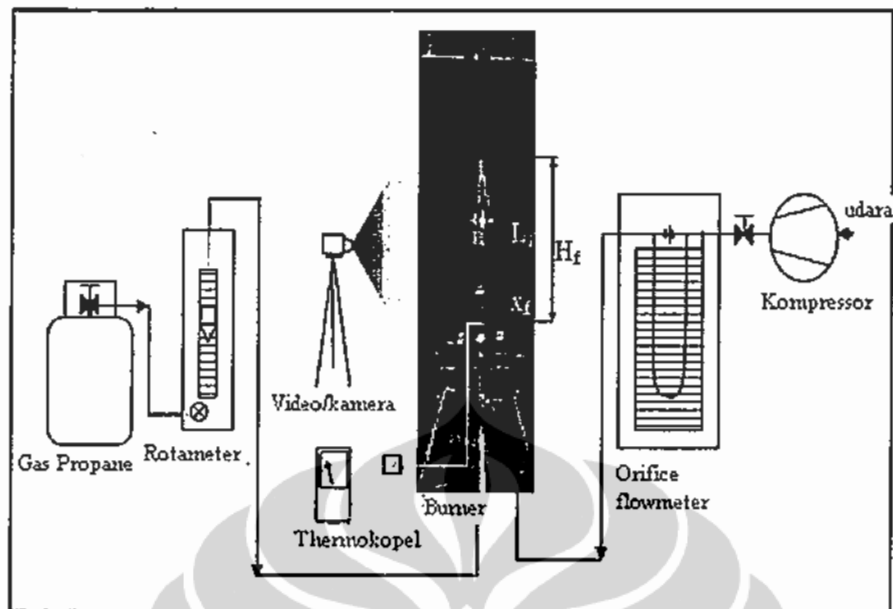
Persiapan peralatan-peralatan sebelum pengujian dilakukan guna memastikan bahwa peralatan dapat bekerja dengan baik. Demikian pula halnya dengan kalibrasi peralatan ukur yang akan digunakan, seperti alat ukur laju aliran gas/udara maupun alat ukur temperatur perlu dilakukan terlebih dahulu guna menjamin kepastian hasil pengukuran.

Berbagai teknik pengukuran dimensi api dengan metode visualisasi digunakan dalam eksperimen ini dari pengukuran secara langsung, dengan mendekatkan mistar ke nyala api, dilanjutkan dengan pengukuran dimensi nyala melalui hasil pengolahan foto dengan membandingkan jarak piksel hasil foto dengan jarak pada mistar yang terdapat dalam foto. Penentuan pangkal nyala dilakukan dengan metode peningkatan nilai indeks RGB (*Red Green Blue*). Dari hasil percobaan terlihat bahwa pada pangkal nyala api terdapat peningkatan nilai RGB tertinggi sepanjang sumbu aksial. Selain itu, distribusi nilai RGB pada kondisi horisontal memperlihatkan bahwa pada pangkal nyala terdapat nilai RGB indeks yang konstan dengan lebar yang sebanding dengan lebar pangkal nyala.

2.2 Susunan Alat Uji dan Peralatan Uji.

2.2.1 Susunan Alat Uji

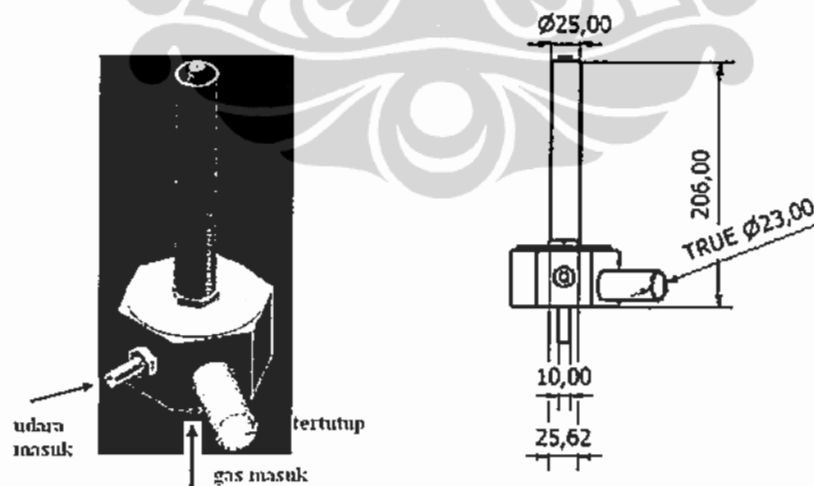
Susunan peralatan uji utama dalam penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 2.1. Bahan bakar gas dialirkan melalui rotameter yang mengatur besarnya laju aliran gas yang akan memasuki *burner*. Selain bahan bakar gas, aliran udara yang menyelimuti aliran gas (*co-flow*) juga disemburkan melalui *burner*. Pengukuran laju aliran udara dilakukan dengan *orifice flow meter* yang dilengkapi dengan manometer pipa U. Pengukuran dimensi api dapat dilakukan secara langsung dengan memberikan skala ukur pada selubung kaca atau menempatkan mistar di samping *burner*. Bentuk



Gambar 2.1. Susunan Utama Peralatan Pengujian.

nyala api yang dihasilkan diabadikan dengan kamera/video kamera untuk selanjutnya dapat dilakukan pengolahan data dimensi api secara tak langsung.

2.2.2 Burner

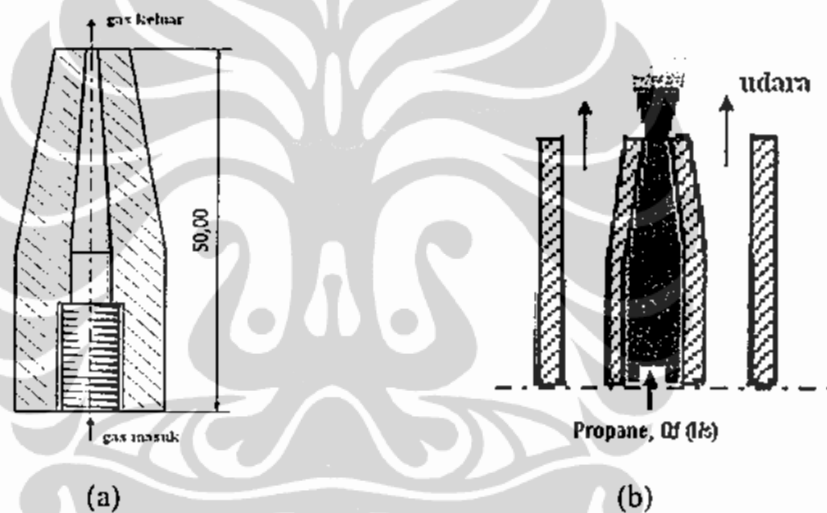


Gambar 2.2. Burner Gas Tipe Ejected Combustor .

Burner yang dipergunakan dalam penelitian adalah burner dengan jenis Ejected Gas Combustor seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.2. Bahan bakar

gas masuk melalui saluran bagian dalam, sedangkan udara dilewatkan melalui saluran bagian luar. Dengan demikian udara dan bahan bakar belum tercampur saat keduanya keluar dari ujung *burner*. Skema yang lebih rinci tentang *burner* yang dipergunakan dalam penelitian ini ditampilkan dalam Lampiran 1-3.

Laluan gas pada ujung *burner* bagian dalam berbentuk nosel dengan diameter keluar gas 1,8 mm, sedangkan tinggi *burner* 206 mm untuk memastikan udara keluar *burner* memiliki arah lurus keatas. Gambar 2.3a .Menunjukkan laluan gas pada ujung *burner*, sedangkan pada Gambar 2.3b. Menunjukkan aliran udara di sekeliling aliran gas (*co-flow*).



Gambar 2.3. (a) Laluan gas pada ujung *burner* / nosel konik
(b) Aliran udara dan gas pada ujung *burner*

2.2.3 Peralatan Pendukung

Peralatan lain pendukung penelitian ini antara lain :

1. *Pressure regulator* alat pengatur tekanan gas yang akan dialirkan menuju rotameter dengan pembatasan tekanan sebesar 1- 2 bar.
2. *Wet gas meter*, digunakan untuk kalibrasi rotameter dan *flowmeter* udara, spesifikasi :
 - Model : WE-1.5A
 - Laju aliran, Max. : 1.5 m³/h Min.: 0.005 m³/h
 - Pabrikan : *Shinagawa Keisokki Seisakusho CO. LTD*
3. Pemantik api gas sistem magnet

4. Termokopel type-K.
5. Saluran pembuangan sisa hasil pembakaran
6. Kamera/video 25 fps untuk mengabadikan gambar nyala api.
7. *Infra-Red Thermometer/Thermograph* NEC versi 4.7. dengan kisaran pengukuran pada temperatur 200 – 2000 °C.
8. *Hygrometer* untuk mengetahui tekanan, temperatur dan kelembaban relatif udara pada saat penelitian dilakukan.

Gambar 2.4 menampilkan penyetera alat ukur laju aliran gas yaitu *Wet Gas Meter*. Dalam satu putaran penuh jarum penunjuk menyatakan volume total gas yang telah dilewatkan sebesar 5 liter. Cara pengoperasian *Wet Gas Meter* WE-1.5A sebelum digunakan sebagai penyetera alat ukur laju aliran adalah sebagai berikut :



Gambar 2.4 *Wet Gas Meter* WE-1.5A

1. Pengisian cairan
Lepaskan tutup untuk memasukkan cairan pada kanan atas alat (bagian depan). Masukkan cairan sampai tinggi permukaan cairan mencapai sekitar 2 mm di atas jarum penunjuk.
2. Pengeringan saluran keluar.
Lepaskan tutup saluran keluar, periksa jika ada cairan yang tersisa. Cairan yang tersisa akan menyebabkan alat tidak bisa bekerja. Jika terdapat cairan sisa di dalam saluran keluar segera keringkan dan kencangkan tutupnya.
3. *Idling*

Alirkan gas memasuki saluran masuk gas hingga jarum penunjuk berputar 20-30 putaran. Setelah itu saluran masuk dan keluar gas dibuka hingga tekanan operasional *Wet Gas Meter* mencapai 1 atmosfer. Atur tinggi permukaan cairan dengan membuka knop pengendali ketinggian cairan hingga sedikit di atas jarum penunjuk. Setelah proses idling ini, *Wet Gas Meter* dapat dipergunakan.

4. Pengeringan

Setelah selesai digunakan untuk pengukuran, *Wet Gas Meter* harus segera dikeringkan dengan melepaskan tutup saluran pembuangan dan membalikkan meteran hingga cairan di dalam tabung keluar semuanya.

Wet Gas Meter dapat dioperasikan pada tekanan maksimal sampai 0,15 kg/cm² (1500 mm H₂O) serta temperatur operasional maksimum 50 °C. Untuk pengukuran gas dengan temperatur dibawah 0 °C cairan air pada *Wet Gas Meter* harus diganti dengan cairan *paraffin*, *electrospark machining oil* atau *trifluorine-contained polymers*.

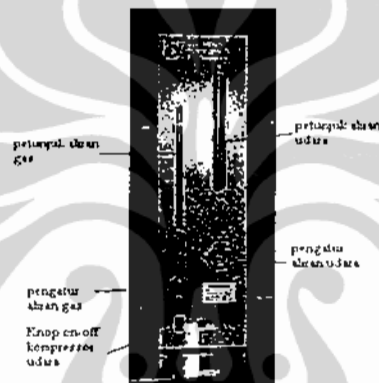
Secara fisik meteran alat (tipe standar) terbuat dari lembaran baja yang telah di galvanisasi dengan lapisan cat *epoxy*. Tabung dan bagian inti terbuat dari kuningan yang dibentuk dengan metode *brazing*. *Packing* terbuat dari karet sintetis (*nitrile rubber*). Dengan demikian gas-gas yang dapat diukur adalah : gas kota, gas alam, gas naphthan, gas hidrokarbon jenuh, karbondioksida, gas nitrogen, gas hidrogen, udara, helium atau *inert gas* lainnya.

2.3 Kalibrasi Peralatan Pengukuran

Alat ukur yang dipergunakan dalam penelitian perlu dikalibrasi terlebih dahulu untuk dapat memastikan kebenaran hasil pengukurannya. Langkah kalibrasi ini sebenarnya adalah menyesuaikan penunjukan hasil pengukuran alat terhadap alat ukur lain yang telah dipercaya kualitas pengukuran yang dihasilkannya. Pada rotameter, besar kecilnya aliran gas yang dilewatkan ditunjukkan oleh posisi pelampung pada tabung berskala, sedangkan pada *orifice flowmeter* selisih tinggi permukaan cairan pada kaki manometer berhubungan dengan besar kecilnya aliran udara yang dilewatkan.

2.3.1 Alat Ukur Aliran Gas.

Penentuan laju aliran gas menuju *burner* menggunakan alat ukur rotameter: *Flame Propagation & Stability, Unit P.A. Hilton LTD. C551*, seperti yang terlihat dalam Gambar 2.5. Alat ukur rotameter unit P.A.Hilton LTD.C551 dilengkapi kompressor udara serta pengatur aliran udara selain pengukur aliran gas. Besarnya aliran gas maupun udara ditunjukkan dengan ketinggian pelampung pada tabung kaca penunjuk aliran serta sangat dipengaruhi oleh jenis gas yang dipergunakan.



Gambar 2.5 *Flame Propagation & Stability, Unit P.A. Hilton LTD. C551*.

Untuk menentukan hubungan antara tinggi pelampung dan debit aliran gas perlu dilakukan penyetaraan alat ukur atau kalibrasi. Penyetaraan dilakukan dengan membandingkan tinggi pelampung yang ditunjuk rotameter dengan laju aliran gas yang terukur melalui *Wet Gas Meter* model WE-1.5A produksi *Shinagawa Keisokki Seisakusho CO.LTD*. Gambar 2.6 memperlihatkan proses penyetaraan alat ukur rotameter. Adapun cara penyetaraan adalah sebagai berikut :

1. Selang gas dari tabung gas bahan bakar dimasukkan pada saluran masuk gas rotameter.
2. Gas keluar rotameter dialirkan ke saluran masuk *Wet Gas Meter*.
3. Bahan bakar gas yang keluar dari *Wet Gas Meter* dialirkan ke saluran *burner* untuk dilakukan pembakaran gas.
4. Atur laju aliran gas melalui putaran pengatur laju aliran gas sedemikian hingga pelampung rotameter pada penunjuk aliran gas berada pada posisi 1 cm.

5. Ukur volume gas yang melewati *Wet Gas Meter* dalam selang waktu tertentu sehingga diperoleh debit aliran gas rata-rata yang dialirkan.
6. Lakukan hal yang sama untuk posisi pelampung 2, 3, 4, dan seterusnya untuk langkah penyetaraan 4 dan 5. Dari data tersebut diperoleh tabel data yang dapat diolah untuk mendapatkan persamaan penunjukan tinggi pelampung terhadap laju aliran gas.



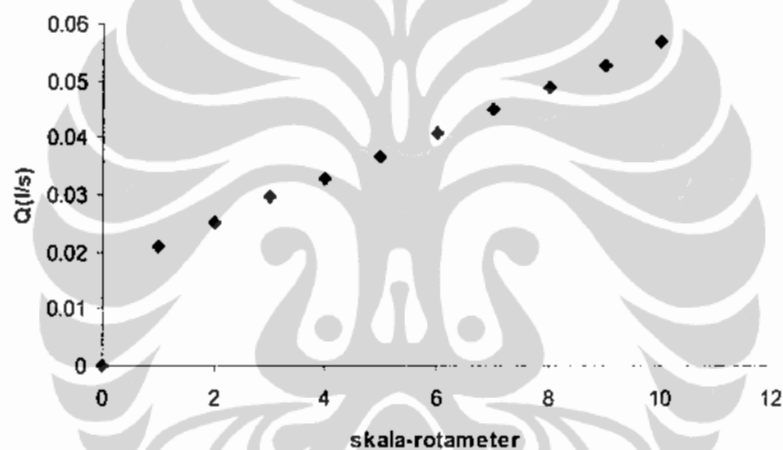
Gambar 2.6 Proses penyetaraan pengukuran aliran gas.

Tabel 2.1 menunjukkan data hasil penyetaraan alat ukur aliran gas rotameter untuk pengukuran gas propana, Gambar 2.7 menunjukkan hubungan tinggi pelampung rotameter terhadap debit aliran gas propana yang terukur. Dari data tersebut diperoleh hubungan antara tinggi pelampung penunjuk aliran gas rotameter, h_r dalam cm, terhadap laju aliran gas propana, Q_r dalam l/s, merupakan persamaan linier untuk tinggi pelampung $h_r > 0$, seperti yang diperlihatkan pada persamaan (2-1) berikut :

$$Q_r = 0,0047.h_r + 0,0117 \quad (2.1)$$

Tabel 2.1 Data penyetaraan rotameter untuk Gas Propana.

Skala Rotameter h_r (cm)	Debit gas Q_r (l/s) $\Delta Q_r = 0.0001$ l/s
0	0
1.0	0.021
2.0	0.025
3.0	0.029
4.0	0.033
5.0	0.037
6.0	0.041
7.0	0.045
8.0	0.049
9.0	0.053
10.0	0.057

Gambar 2.7 Hubungan antara laju aliran gas propana terukur Q_r (l/s) terhadap posisi pelampung pada rotameter, h_r

Nilai ketidak pastian pengukuran (*total error*, ϵ) rata-rata mencapai 0.0001 l/s atau 0.1 ml/s yang diperoleh dari 3x pengambilan data dengan penentuan ketidakpastian menggunakan metode sederhana : $\epsilon = (Q_{r,max} - Q_{r,min})/n$, dengan n merupakan jumlah data pengukuran, $Q_{r,max}$ data pengukuran terbesar dan $Q_{r,min}$ merupakan data pengukuran terkecil.

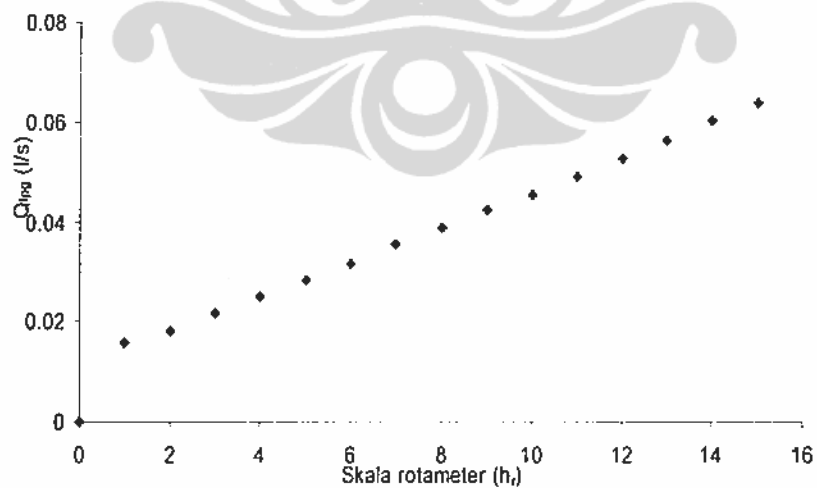
Sedangkan penyetaraan alat ukur aliran gas elpiji dengan rotameter diberikan pada Tabel 2.2 dimana hubungan antara laju aliran terukur terhadap ketinggian pelampung pada rotameter ditunjukkan dalam Gambar 2.8. Dari data penyetaraan tersebut diperoleh hubungan antara laju aliran gas Elpiji, Q_r dalam l/s, terhadap posisi pelampung rotameter, h_r dalam cm. yang diperlihatkan dalam persamaan (2.2).

$$Q_r = 0,0037 h_r + 0,0087 \quad (2.2)$$

Nilai ketidakpastian rata-rata pengukuran rotameter untuk gas elpiji mencapai 0.00017 l/s yang diperoleh dari masing-masing 5x data pengukuran.

Tabel 2.2 Data penyetaraan rotameter untuk Gas Elpiji.

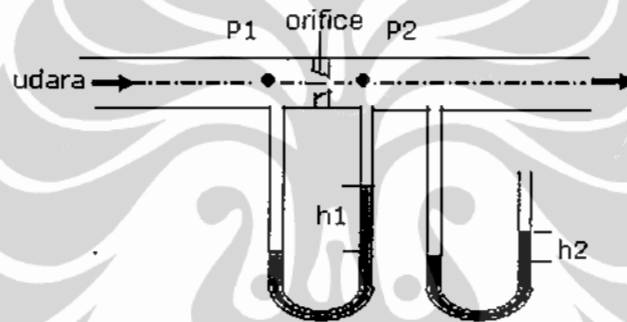
Skala Rotameter h_r (cm)	Debit gas Q_r (l/s) $\Delta Q = 0.0002$ l/s
0	0
1	0.015749
2	0.018078
3	0.021638
4	0.02508
5	0.028315
6	0.031767
7	0.035414
8	0.038824
9	0.042381
10	0.045581
11	0.048928
12	0.05269
13	0.056438
14	0.060171
15	0.064022



Gambar 2.8 Hubungan antara laju aliran gas Elpiji terukur Q_r (l/s) terhadap tinggi pelampung rotameter h_r .

2.3.2 Orifice Flow Meter untuk Pengukur Aliran Udara

Untuk mengukur aliran udara yang akan dialirkan ke dalam *Bunsen-burner* digunakan *orifice flow meter* yang dilengkapi dengan pengukur beda tekanan pipa U. Saluran udara yang menuju *orifice* dihubungkan dengan saluran masuk pipa U yang telah berisi air. Sedangkan saluran udara yang keluar dari *orifice* di hubungkan dengan saluran keluar pipa U. Gambar 2.9 menunjukkan skema alat *orifice flow meter*. Beda ketinggian permukaan cairan h_1 , erat kaitannya dengan laju aliran udara yang melalui *orifice*, sedangkan h_2 menunjukkan tekanan udara setelah keluar dari katup *orifice*.

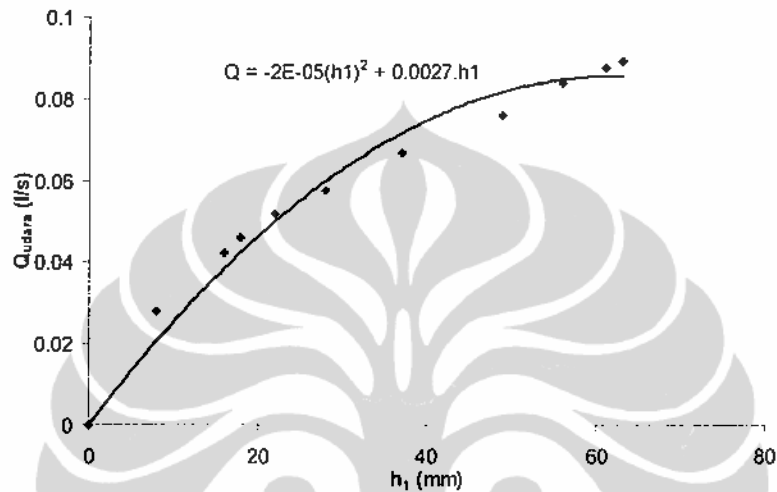


. Gambar 2.9 Skema *Orifice Flow Meter* untuk mengukur aliran udara

Prosedur penyetaraan *flowmeter* udara adalah sbb:

1. Letakkan *wet gas meter* pada posisi setimbang.
2. *Wet gas meter* diisi air sebanyak 5 liter.
3. Pipa U pengukur tekanan udara diisi air secukupnya.
4. Kompresor dinyalakan dan alirkan udara melalui *regulator valve*.
5. Aliran udara diteruskan ke *orifice*.
6. Udara masuk dialirkan ke dalam *orifice*.
7. Udara keluar masuk ke dalam *wet gas meter*.
8. Jarum penunjuk pada *wet gas meter* akan mulai berputar ketika udara mulai memasuki *wet gas meter*, ini menunjukkan total volume udara yang melaluinya.
9. Untuk setiap kondisi beda ketinggian permukaan cairan h_1 , amati total volume udara yang dilewatkan dalam selang waktu tertentu.

Data penyetaraan pengukuran *orifice flowmeter* dengan *wet gas meter* untuk aliran udara diperlihatkan pada Tabel 2.3 sedangkan Gambar 2.10 memperlihatkan hubungan antara beda ketinggian permukaan cairan h_1 terhadap laju aliran udara Q_a .



Gambar 2.10 Penunjukan nilai Q_{udara} (l/s) terhadap beda ketinggian permukaan cairan h_1 (mm), dengan $\Delta Q = 0.6 \text{ ml/s}$

Dari hasil kalibrasi tersebut diperoleh hubungan antara beda tinggi permukaan pipa U pada *orifice flowmeter*, h_1 (mm), terhadap debit aliran udara yang melalui *orifice*, Q_a (l/s) di perlihatkan seperti pada persamaan (2.3) dengan nilai ketidak pastian sebesar 0.0006 l/s yang diperoleh dari 4x pengambilan data.

$$Q_a = -2.10^{-5}.h_1^2 + 0,0027.h_1 \quad (2.3)$$

Tabel 2.3. Penyetaraan *orifice flowmeter* untuk udara ($\Delta Q = 0.0006$ l/s)

H1 (mm)	Vol (liter)	Waktu (s)	Q(l/s)	Q rata (l/s)	h1 (mm)	Q (l/s)
0				0	0	0
8	1	36	0.02748	0.02775	8	0.02775
	2	72.41	0.027762			
	3	108.69	0.027563			
	4	144.16	0.028193			
16	1	23.51	0.042535	0.042028	16	0.042028
	2	47.34	0.041964			
	3	71.17	0.041964			
	4	95.18	0.041649			
18	1	21.55	0.046404	0.045986	18	0.045986
	2	43.18	0.046232			
	3	65.24	0.045331			
	4	86.99	0.045977			
22	1	19.49	0.051308	0.051727	22	0.051727
	2	38.54	0.052493			
	3	57.73	0.05211			
	4	77.34	0.050994			
28	1	17.15	0.058309	0.057517	28	0.057517
	2	34.43	0.05787			
	3	51.74	0.05777			
	4	69.56	0.056117			
37	1	14.73	0.067889	0.066769	37	0.066769
	2	29.76	0.066534			
	3	45.06	0.065359			
	4	59.92	0.067295			
49	1	12.97	0.077101	0.075855	49	0.075855
	2	26.29	0.075075			
	3	39.38	0.076394			
	4	52.74	0.07485			
56	1	11.87	0.084246	0.083612	56	0.083612
	2	23.76	0.084104			
	3	36.14	0.080775			
	4	47.86	0.085324			
61	1	11.14	0.089767	0.087247	61	0.087247
	2	22.75	0.086133			
	3	34.24	0.087032			
	4	45.86	0.086059			
63	1	10.96	0.091241	0.089092	63	0.089
	2	22.17	0.089206			
	3	33.28	0.090009			
	4	44.92	0.085911			

2.4 Pengukuran Dimensi Api

2.4.1 Pengukuran Langsung dengan Mistar

Pengukuran dimensi api pada mulanya dilakukan dengan mistar, jarak ujung *burner* dengan pangkal nyala api maupun ujung api dapat langsung dibaca dari mistar yang dipasang disebelahnya. Gambar 2.12 memperlihatkan metode pengukuran tersebut. Pengukuran dengan cara ini sesuai untuk nyala api yang tenang tidak bergetar. Untuk nyala api yang bergetar karena pengaruh turbulensi aliran, pengukuran cara ini tidak layak untuk dilakukan karena penunjukan yang tidak pernah stabil, untuk itu bantuan kamera sangat diperlukan untuk dapat menentukan posisi api dengan lebih tenang dan stabil pada harga tertentu.



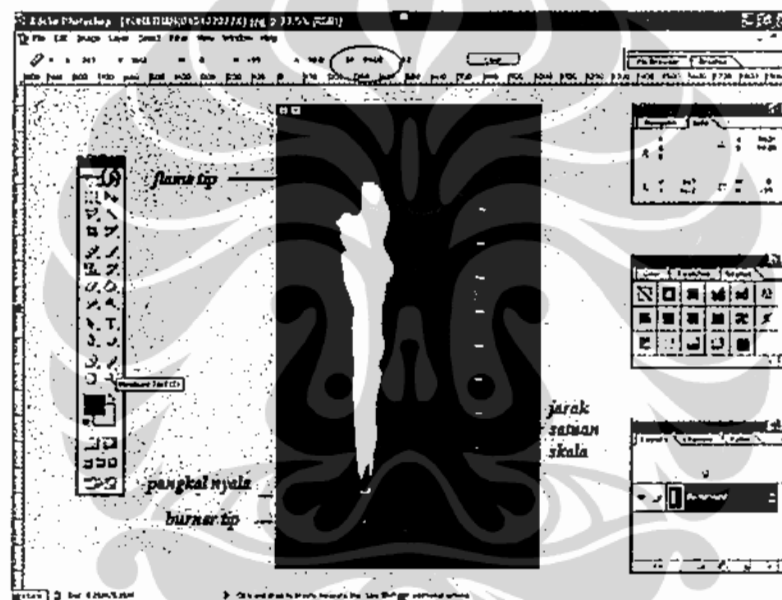
Gambar 2.11 Pengukuran dimensi api dengan mistar.

2.4.2 Pembacaan Gambar dengan Perangkat Lunak Pengolah Citra

Pengukuran dimensi api langsung dengan mistar, menjadi kian rumit mengingat sifat turbulensi dari nyala api, untuk itu pengukuran dimensi api dilakukan dengan mengambil gambar api beberapa kali, kemudian penentuan jarak lifted, tinggi api dan panjang api dilakukan secara statistik dari hasil foto yang telah diolah dengan perangkat lunak *adobe photo shop*. Adapun langkah-langkah yang dilakukan untuk menentukan dimensi api adalah sebagai berikut :

1. Ambil gambar api beberapa kali untuk kondisi tertentu dengan menggunakan kamera.

2. Buka gambar yang diperoleh melalui *Adobe Photo Shop*. Contoh gambar 2.13
3. Dari gambar api yang diperoleh lakukan kalibrasi satuan panjang, yaitu menetapkan satu pixel (jarak satu node dengan node terdekat) pada gambar setara dengan berapa mm. Ini dapat dilakukan dengan membandingkan skala pada mistar sebanding dengan nilai pixel pada gambar dimaksud. Gambar 2.14 memberikan gambaran tentang cara penyetaraan tersebut.

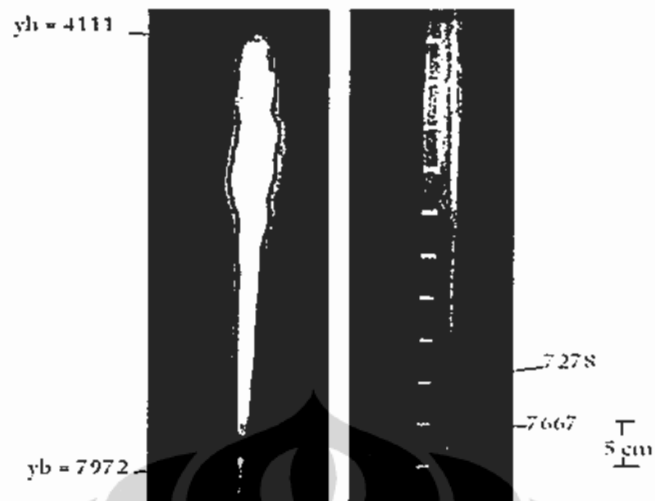


Gambar 2.12 Penentuan dimensi api melalui nilai RGB dengan *Adobe Photo Shop*.

Penyetaraan dilakukan dengan membandingkan satuan piksel per satuan panjang. Contoh, mistar yang digunakan dalam Gambar 2.14 memiliki skala 5 cm pada kondisi riilnya, sedangkan dari pengolahan foto digital diperoleh posisi antara kedua skala tersebut berada pada 7667 dan 7278.

Sehingga nilai penyetaraan ukuran untuk satuan panjang adalah :

$$\frac{\Delta y}{skala} = \frac{7667 - 7278}{50} \text{ piksel/mm} = 7,78 \text{ piksel/mm}$$



Gambar 2.13 Penyetaraan skala panjang mistar dengan jumlah piksel gambar yang dihasilkan kamera

Dengan demikian kemampuan pembacaan skala panjang dengan metode ini sebesar $1/7,78 \text{ mm} = 0,1285 \text{ mm}$.

4. Selanjutnya skala hasil penyetaraan dapat digunakan untuk menentukan ukuran tinggi lifted, tinggi api dan panjang api. Contoh dalam gambar, tinggi api adalah :

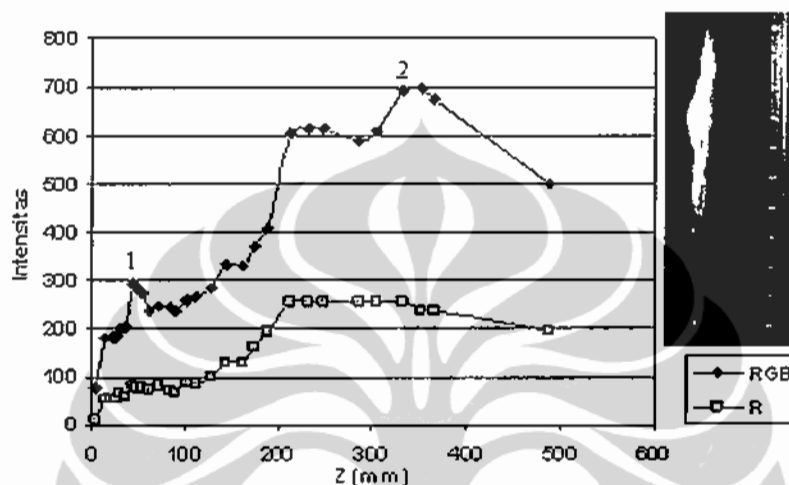
$$(y_h - y_b) \times 0,1285 \text{ mm} = 496,3 \text{ mm}$$

Dalam disertasi ini, cara pengukuran dimensi dengan mengolah gambar hasil kamera ke dalam *Adobe Photo Shop* ini yang paling sering digunakan. Pengukuran dimensi dengan pengolah citra tersebut diatas memberikan nilai ketidakpastian pengukuran yang berasal dari *Systematically error* sebesar 0.1285 mm.

2.4.3 Penentuan Dimensi Api

Tingkat kecerahan nyala api tampak relatif lebih tinggi pada pangkal nyala api seperti yang terlihat dari berbagai pengujian contoh Gambar 2.12, sehingga penentuan posisi pangkal nyala api dengan perangkat lunak *Adobe Photo Shop* dilakukan dengan menjejaki nilai intensitas radiasi dari sinar merah, hijau

dan biru (red-green-blue,RGB) sepanjang sumbu tegak. Gambar 2.15 memperlihatkan nilai intensitas radiasi RGB dan intensitas radiasi R sepanjang sumbu nyala. Nilai RGB puncak menunjukkan tingkat kecerahan tertinggi disekitar posisi tersebut yang erat kaitannya terhadap temperatur maksimum nyala api.



Gambar 2.14. Nilai intensitas radiasi sinar merah, hijau dan biru RGB dan sinar merah R sepanjang sumbu tegak diatas *burner*.

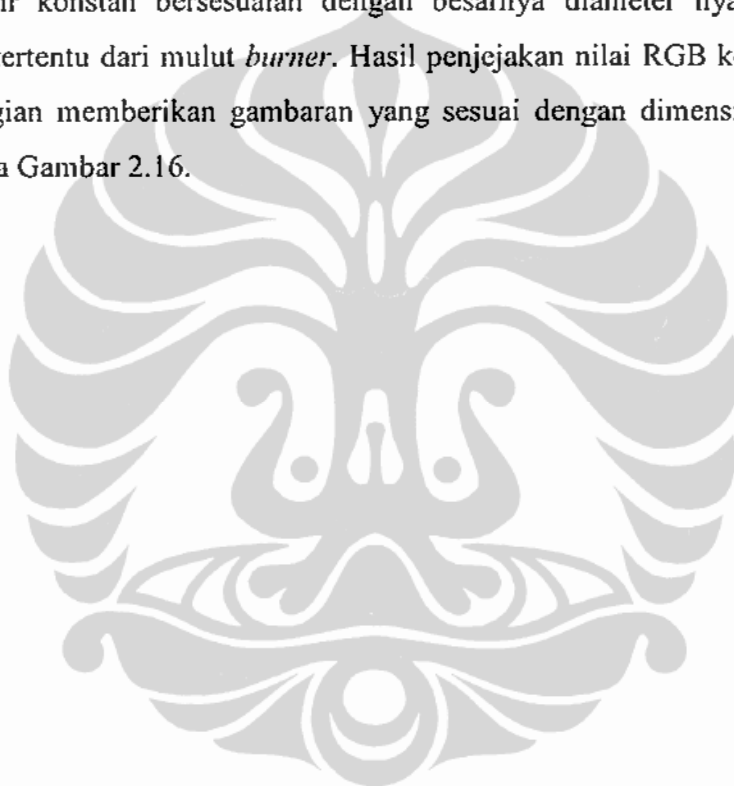
Pangkal nyala api dinyatakan pada posisi puncak pertama dari intensitas radiasi (1) dengan nilai indeks RGB berkisar antara nilai 290-300. Sedangkan puncak nilai RGB ke dua (2) merupakan nilai maksimum RGB nyala api sepanjang sumbu yang menunjukkan posisi temperatur tertinggi api. Gambar 2.14 memperlihatkan posisi puncak pertama intensitas radiasi terdapat pada jarak 44.58 mm diatas *burner* dengan nilai intensitas RGB sebesar 291 sedangkan pengukuran posisi pangkal nyala api secara langsung dengan mistar memberikan nilai 41.0 mm. Dari kedua nilai tersebut pengukuran langsung dengan mistar cenderung kurang memadai untuk digunakan mengingat pengamatan langsung ke arah api memiliki kesulitan yang lebih tinggi akibat nyala api yang cenderung bergetar.

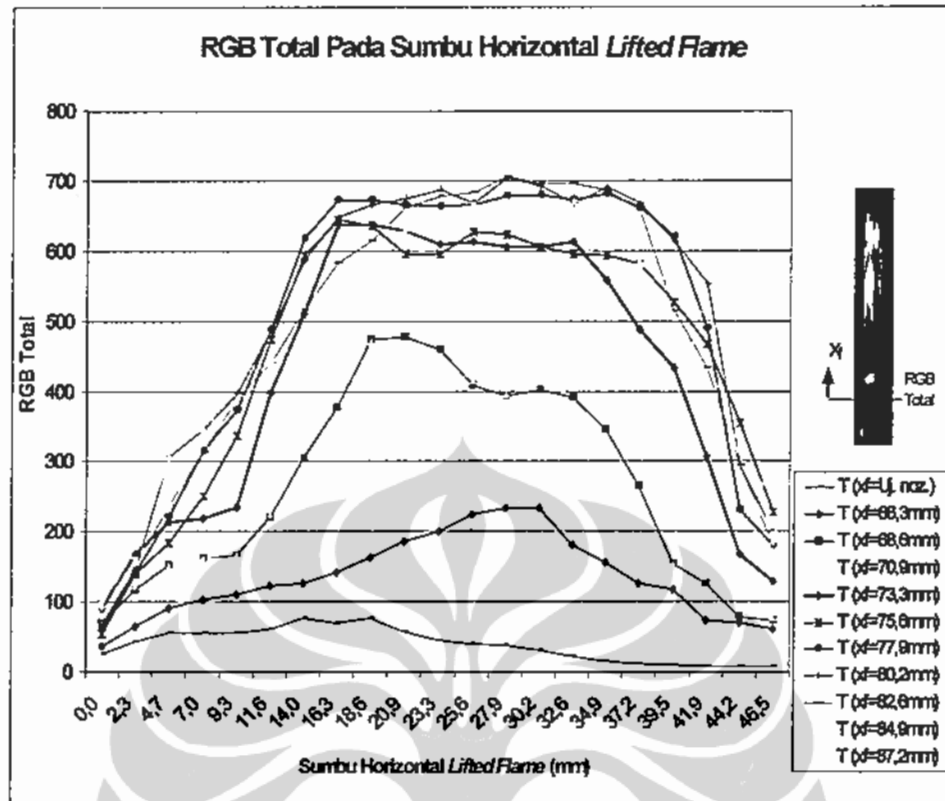
Secara umum penentuan posisi pangkal nyala api dengan penjejakan nilai intensitas radiasi RGB lebih teliti dibandingkan dengan cara pengukuran langsung maupun melalui pengolahan gambar secara langsung. Namun metode RGB lebih rumit dan memakan waktu yang lebih lama.

Selain penjejakan intensitas radiasi sinar (RGB) sepanjang sumbu tegak, dilakukan pula penjejakan nilai intensitas radiasi sinar RGB secara horisontal

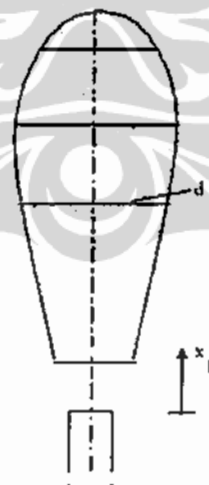
untuk tiap ketinggian z dari ujung *burner*. Hasil penjejakan intensitas radiasi sinar dalam arah horisontal diperlihatkan pada Gambar 2.15. Pangkal nyala api memiliki kontur intensitas radiasi dengan nilai RGB yang hampir konstan sepanjang garis horisontal dengan ketebalan tertentu yang memberikan gambaran tentang diameter pangkal nyala api yang terbentuk. Dari Gambar 2.15 jarak pangkal nyala api terhadap ujung *burner* berkisar pada nilai 68,6 mm – 70,9 mm.

Lebar daerah pada irisan horisontal yang memiliki nilai intensitas RGB yang hampir konstan bersesuaian dengan besarnya diameter nyala api pada ketinggian tertentu dari mulut *burner*. Hasil penjejakan nilai RGB konstan untuk tiap ketinggian memberikan gambaran yang sesuai dengan dimensi api, seperti tampak pada Gambar 2.16.





Gambar 2.15 Nilai RGB sepanjang garis horizontal Dengan jarak tertentu dari ujung *burner*.



Gambar 2.16 Garis tengah nyala api difusi laminar.

BAB 3 LIFTED-FLAME PADA UDARA DIAM

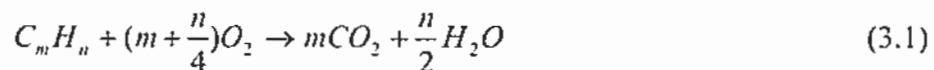
3.1 Pendahuluan

Nyala api pembakaran difusi dengan kondisi *quiescence-air* merupakan kondisi pembakaran terbuka tanpa dinding pembatas sehingga nyala api hasil pembakaran berhubungan langsung dengan kondisi udara lingkungan. Berbagai pengamatan dan hasil penelitian menunjukkan bahwa pada bahan bakar yang mengalir keluar nosel *burner* dengan kecepatan rendah menghasilkan nyala api difusi yang berada pada mulut nosel kondisi ini dikenal dengan kondisi *attached-flame*. Peningkatan kecepatan alir bahan bakar meningkatkan waktu pencampuran (*mixing time*) yang diperlukan, hal ini mengakibatkan panjang zona pencampuran antara udara-bahan bakar yang diperlukan makin bertambah untuk mencapai kondisi campuran yang memenuhi batas kemampuan nyala (*flammability limit*).

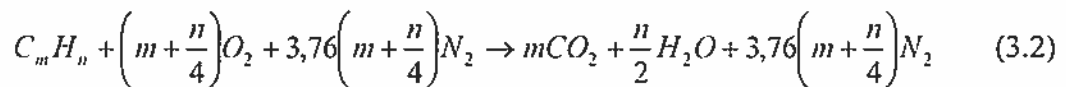
Beberapa penelitian tentang *lifted flame* untuk kondisi *quiescence air* dilakukan dalam penelitian oleh : Lee & Chung [20], Cha & Chung [21] dan Demare & Baillout [22] yang memperlihatkan bahwa pada dasar nyala terangkat (*lifted flame*) terdapat campuran kaya bahan bakar khususnya pada bagian terdekat sumbu api, dilanjutkan nyala campuran premiks yang kaya bahan bakar, selanjutnya nyala premiks turbulen, dan terluar adalah nyala campuran premiks yang miskin bahan bakar.

3.2 Batas Mampu Nyala (*Flammability Limit*)

Untuk bahan bakar hidrokarbon dengan oksigen sebagai oksidatornya, persamaan reaksi pembakaran stoikiometrik dapat dituliskan dalam persamaan reaksi kimia (3.1) berikut:



Apabila udara diasumsikan memiliki kandungan 21% Oksigen dan 79% Nitrogen (persen mol) dipergunakan dalam pembakaran sebagai oksidator maka persamaan reaksi pembakaran stoikiometrik dinyatakan dalam Persamaan (3.2):



Proses pembakaran hidrokarbon yang tidak sempurna menimbulkan terjadinya reaksi oksidasi parsial berupa pembentukan karbon monoksida CO, hidrokarbon tak jenuh hingga dalam bentuk karbon. Tabel 3.1 menampilkan persamaan reaksi pembakaran hidrokarbon dengan udara yang bersifat ideal stoikiometrik sesuai Persamaan (3.2).

Tabel 3.1 Reaksi pembakaran stoikiometrik 1 mol hidrokarbon dengan udara

Nama dan rumus kimia Hidro karbon	Udara yang dibutuhkan, mol	Hasil pembakaran, mol		
		CO ₂	H ₂ O	N ₂
Methane (CH ₄)	9,542	1	2	7,542
Ethane (C ₂ H ₆)	16,647	2	3	13,170
Ethylene (C ₂ H ₄)	14,310	2	2	11,310
Acetylene (C ₂ H ₂)	11,930	2	1	9,430
Propane (C ₃ H ₈)	23,860	3	4	18,820
Propylene (C ₃ H ₆)	21,430	3	3	16,930
Butane (C ₄ H ₁₀)	30,970	4	5	24,470
Butylene (C ₄ H ₈)	28,580	4	4	22,580
Pentane (C ₅ H ₁₂)	38,110	5	6	-

Sumber : Kazantsev E.I.[29], telah diolah kembali.

Untuk menyatakan kondisi campuran udara-bahan bakar sebagai reaktan seringkali dinyatakan dalam nilai AFR yaitu perbandingan antara massa udara (m_a) dengan massa bahan bakar (m_f). Secara matematis AFR dapat dinyatakan dalam Persamaan (3.3) berikut:

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} = \frac{M_a N_a}{M_f N_f} \quad (3.3)$$

Sedangkan untuk menyatakan perbandingan antara kondisi campuran udara-bahan bakar aktual AFR_a terhadap kondisi campuran udara-bahan bakar

stoikiometrik AFR_s diperkenalkan nilai rasio ekivalen (*Equivalent Ratio*), Φ yang dinyatakan dalam Persamaan (3.4).

$$\Phi = \frac{AFR_s}{AFR_a} \quad (3.4)$$

Dimana :

- Jika $\Phi > 1$ berarti reaktan memiliki campuran dengan kandungan bahan bakar yang lebih besar dibandingkan dengan kandungan bahan bakar dalam keadaan stoikiometrik. Nilai rasio ekivalen yang lebih besar dari satu dikenal sebagai campuran yang kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*).
- Jika $\Phi < 1$ menunjukkan reaktan memiliki campuran dengan kandungan bahan bakar lebih kecil dibandingkan reaktan stoikiometrik, hingga campuran ini dikenal sebagai campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*)
- Sedangkan jika $\Phi = 1$ menyatakan campuran dengan kandungan udara-bahan bakar sesuai dengan kondisi campuran stoikiometrik .

Berbagai percobaan memperlihatkan bahwa nyala api dapat menjalar dalam suatu campuran yang memiliki komposisi campuran udara-bahan bakar dalam batas-batas tertentu. Batas terendah komposisi udara-bahan bakar yang mampu bakar dinyatakan sebagai campuran termiskin bahan bakar, Φ_{min} , sedangkan batas tertinggi komposisi udara-bahan bakar dinyatakan sebagai campuran terkaya bahan bakar, Φ_{max} . Batas kemampuan nyala seringkali dinyatakan sebagai persen volume bahan bakar dalam campuran.

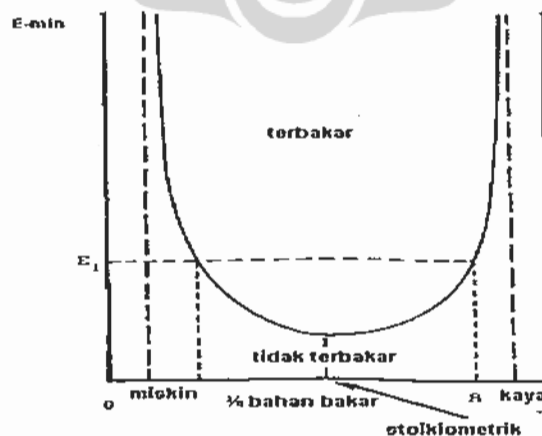
Tabel 3.2 menampilkan batas mampu nyala beberapa campuran udara-bahan bakar pada tekanan atmosfer yang diperoleh melalui pengujian menggunakan metode tabung yaitu dengan menggunakan tabung tegak berdiameter 50 mm serta panjang 1,2 m dilakukan pengujian kemampuan penjalaran nyala api dengan menyulut dari bagian bawah tabung yang berisi campuran udara-bahan bakar didalamnya [24].

Tabel 3.2 Batas mampu nyala campuran udara-bahan bakar pada tekanan 1 atmosfer

Bahan Bakar	Batas Mampu Nyala		
	Φ_{\min}	Φ_{\max}	Massa udara/bahan bakar stoikiometrik
Acetylene, C_2H_2	0,19	∞	13,30
Carbon Monoxide, CO	0,34	6,76	2,46
n-Decane, $C_{10}H_{22}$	0,36	3,92	15,00
Ethane, C_2H_6	0,50	2,72	16,00
Ethylene, C_2H_4	0,41	6,10	14,80
Hydrogen, H_2	0,14	2,54	34,50
Methane, CH_4	0,46	1,64	17,20
Methanol, CH_3OH	0,48	4,08	6,46
n-Octane, C_8H_{18}	0,51	4,25	15,10
Propane, C_3H_8	0,51	2,83	15,60

Sumber : Turns Stephen R. [24], telah diolah kembali.

Kemampuan nyala campuran udara-bahan bakar diperlihatkan dalam Gambar 3.1. Gambar tersebut memperlihatkan campuran udara-bahan bakar dengan komposisi campuran stoikiometrik memerlukan energi penyalaan terendah, sedangkan campuran dengan kondisi miskin bahan bakar maupun kondisi kaya bahan bakar memerlukan energi awal penyalaan yang lebih tinggi [24].



Gambar 3.1 Energi penyalaan terhadap persen bahan bakar dalam campuran serta batas mampu nyala campuran udara-bahan bakar.

Sumber : Turns Stephen R [24], telah diolah kembali.

Batas mampu nyala gas Propana dalam udara kering

Dari Tabel 3.2 batas mampu nyala untuk gas Propana adalah campuran dengan nilai rasio ekivalen Φ berkisar: 0,51 – 2,83 dengan nilai AFR_s: 15,6. Dari data tersebut dapat ditentukan fraksi massa bahan bakar (propana) dalam campuran yang mampu nyala.

$$\Phi_{\min} = \frac{15,6}{AFR_{a-\max}} = 0,51 \quad (3.5)$$

$$AFR_{a-\max} = 30,59$$

$$\Phi_{\max} = \frac{15,6}{AFR_{a-\min}} = 2,83 \quad (3.6)$$

$$AFR_{a-\min} = 5,51$$

Sehingga perbandingan udara-Propana untuk mampu nyala adalah pada campuran dengan nilai AFR = 5,51–30,59. Dengan batas nilai AFR mampu nyala tersebut dapat ditentukan fraksi massa propana dalam campuran untuk mampu nyala yang diturunkan dari Persamaan (3.3) adalah sebagai:

1. Fraksi massa propana untuk campuran termiskin mampu nyala, $Y_{f-\min}$:

$$AFR_{\max} = \frac{m_a}{m_f} = 30,59$$

$$Y_{f-\min} = \frac{m_f}{m_a + m_f} = \frac{m_f}{AFR_{\max} \cdot m_f + m_f} = 0,0316 = 3,16 \%$$

2. . Fraksi massa propana untuk campuran terkaya mampu nyala, $Y_{f-\max}$

$$AFR_{\min} = \frac{m_a}{m_f} = 5,51$$

$$Y_{f-\max} = \frac{m_f}{m_a + m_f} = \frac{m_f}{AFR_{\min} \cdot m_f + m_f} = 0,1536 = 15,36 \%$$

Sehingga fraksi massa Propana dalam campuran Propana – udara kering yang mampu terbakar adalah campuran dengan nilai $Y_f = 3,16 - 15,36 \%$.

Batas mampu nyala gas propana dalam udara basah

Untuk udara dengan kandungan uap air, batas fraksi massa propana dalam campuran yang mampu bakar harus dikoreksi. Jika dari hasil pengukuran

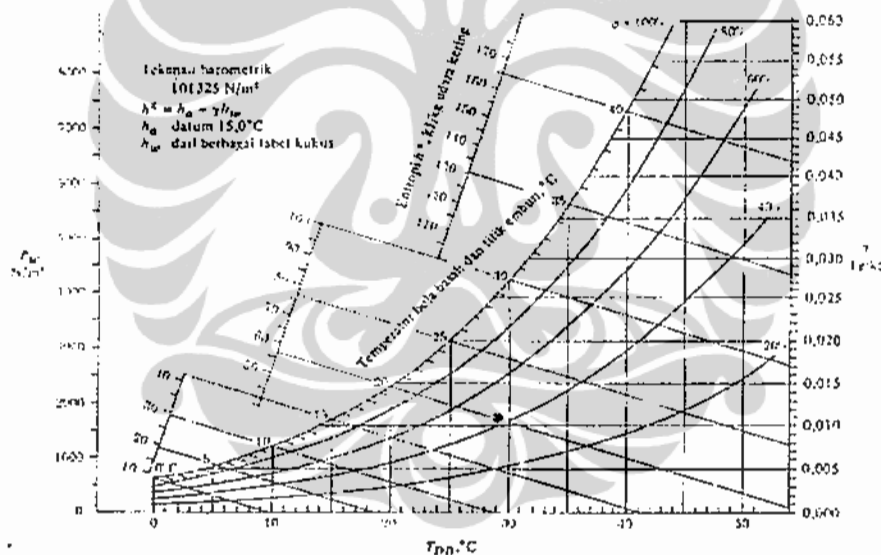
kondisi udara diperoleh: $T = 29^\circ\text{C}$ dengan nilai *Relative Humidity* (RH) = 41% , maka kandungan uap air dalam udara dapat dilihat dari Grafik Psikrometrik udara pada Gambar 3.2. Dari Grafik tersebut diperoleh kandungan uap air dalam udara sebesar 0,011 kg uap air dalam 1 kg udara kering.

Kandungan uap air dalam bentuk perbandingan mol untuk 1000 gram udara kering dapat ditentukan sebagai :

$$H_2O = \frac{11}{BM.H_2O} = \frac{11}{18} = 0,611 \text{ mol}$$

Udara kering

$$\frac{1000}{BM(O_2 + 3,76N_2)} = \frac{1000}{(32 + 3,76 \times 28)} = 7,28 \text{ mol.}$$



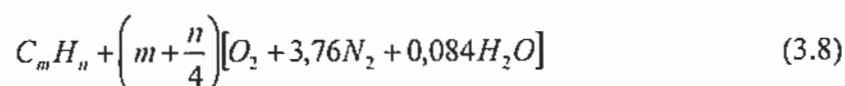
Gambar 3.2 Grafik Psikrometrik udara – uap air

Sumber : Reynolds , Perkins C [25], telah diolah kembali.

Campuran udara uap air dapat dinyatakan sebagai :

$$\begin{aligned} 7,28 (O_2 + 3,76.N_2) + 0,611 H_2O &\approx \\ O_2 + 3,76 N_2 + 0,084. H_2O. &\quad (3.7) \end{aligned}$$

Sehingga reaktan untuk Persamaan (3.2) dapat dituliskan sebagai:



Untuk Propana , C_3H_8 , reaktan untuk Persamaan (3.3) menjadi :



Sehingga AFR stoikiometrik menjadi:

$$AFR_s = \frac{5(32 + 3,76 \times 28 + 0,084 \times 18)}{(12 \times 3 + 1 \times 8)} = 15,77 \quad (3.10)$$

Batas *flammability* campuran untuk udara basah (RH = 41 % dengan T = 29 °C)

Batas AFR maksimum:

$$AFR_{a-maks} = \frac{AFR_s}{\Phi_{min}} = \frac{15,77}{0,51} = 30,92 \quad (3.11)$$

Batas AFR minimum:

$$AFR_{a-min} = \frac{AFR_s}{\Phi_{max}} = \frac{15,77}{2,83} = 5,57 \quad (3.12)$$

Perbandingan udara-gas propana untuk mampu nyala dinyatakan dalam AFR sebesar 5,57 – 30,92. sehingga fraksi massa propana dalam campuran propana-udara basah dinyatakan sebagai:

$$Y_{f,maks} = \frac{m_f}{m_{a-min} + m_f} = \frac{m_f}{AFR_{a-min} \cdot m_f + m_f} = \frac{1}{5,57 + 1} = 0,152 \quad (3.13)$$

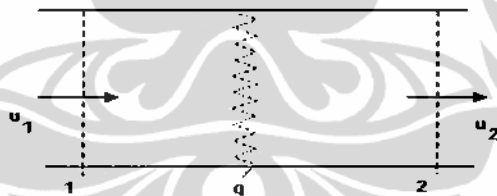
Batas fraksi massa propana minimum dalam campuran mampu nyala:

$$Y_{f,\min} = \frac{m_f}{m_{a-\max} + m_f} = \frac{m_f}{AFR_{a-\max} m_f + m_f} = \frac{1}{30,92 + 1} = 0,031 \quad (3.14)$$

Batas mampu nyala campuran propana dengan udara basah adalah dengan batas fraksi massa propana sebesar $Y_f = 0,031 - 0,152$.

3.3 Nyala Api Hasil Pembakaran

Api sudah dikenal dan digunakan sejak jaman dahulu kala dalam kehidupan manusia, namun nyala api hasil pembakaran gas baru mulai diteliti pada abad 17 dimulai dari penelitian oleh Berthollet, Dalton, Volta dan yang lainnya mengenai komposisi gas yang dapat terbakar. Davy's (1805-1819) menemukan bahwa nyala api premiks tidak dapat menembus lapisan berlubang halus, dengan penemuan ini tercipta lampu aman untuk para penambang. Selanjutnya pada tahun 1855 Bunsen's menemukan suatu *burner* yang dapat digunakan untuk membuat nyala premiks stabil serta menggunakan sistem kontinyu [26].



Gambar 3.3 Aliran tunak dengan penambahan kalor.

Sumber : Strehlow Roger A [26].

Analisa nyala api satu dimensi, kondisi tunak, kecepatan rendah dengan pelepasan energi pembakaran dapat disederhanakan seperti Gambar 3.3. Untuk kasus aliran tunak dengan kecepatan aliran fluida masuk dan keluar masing-masing u_1 dan u_2 dengan tekanan P , massa jenis ρ dan enthalpi h berlaku :

1. Persamaan kekekalan massa:

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 \quad (3.15)$$

2. Persamaan kekekalan momentum:

$$P_1 + \rho_1 u_1^2 = P_2 + \rho_2 u_2^2 \quad (3.16)$$

3. Persamaan kekekalan energi:

$$h_1 + \frac{1}{2} u_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} u_2^2 \quad (3.17)$$

Jika volume jenis $v = 1/\rho$ disubstitusikan pada persamaan kekekalan momentum maka kecepatan masuk dan keluar dapat dinyatakan sebagai:

$$u_1^2 = v_1^2 \left(\frac{P_2 - P_1}{v_1 - v_2} \right) \quad (3.18)$$

$$u_2^2 = v_2^2 \left(\frac{P_2 - P_1}{v_1 - v_2} \right) \quad (3.19)$$

3.3.1 Kecepatan Pembakaran

Pada proses pembakaran, reaksi kimia berlangsung dalam suatu waktu tertentu yang dipengaruhi oleh kondisi dari sistem yang bersangkutan. Kondisi ini antara lain konsentrasi dari senyawa kimia yang bersangkutan, temperatur, tekanan, keberadaan *catulyst* atau *inhibitor*, dan pengaruh radiasi.

Kecepatan reaksi didefinisikan sebagai kecepatan pengurangan konsentrasi zat reaktan atau laju konsumsi zat reaktan. Kecepatan reaksi dapat juga didefinisikan sebagai kecepatan penambahan konsentrasi zat produk. Sehingga satuan dari kecepatan reaksi adalah mol per satuan volume per satuan waktu.

Proses pembakaran biasanya diartikan sebagai proses oksidasi eksotermik. Oksigen didalam udara bereaksi dengan karbon dan hidrogen yang terdapat dalam bahan bakar untuk membentuk karbon monoksida, karbon dioksida dan uap air.

Dengan asumsi nyala api merupakan proses aliran yang stedi/tunak maka kecepatan pembakaran dalam satuan meter per detik dapat ditentukan sebagai [26]:

1. Metode *burner*, dengan pengukuran tinggi nyala .

Dengan mengasumsikan nyala api berbentuk kerucut sederhana untuk laju aliran volumetrik gas Q_f , tinggi api h serta jari-jari pangkal nyala r , maka kecepatan pembakaran S_u dapat dinyatakan sebagai:

$$S_u = \frac{2 \cdot Q_f}{\pi \cdot r \sqrt{h^2 + r^2}} \quad (3.20)$$

2. Metode *burner*, dengan penentuan luas nyala.

Nyala api difoto, selanjutnya luas nyala ditentukan dengan menganggap bentuk nyala silindris serta simetris. Metode ini ditujukan untuk memperbaiki pengukuran tinggi nyala api. Kecepatan pembakaran S_u ditentukan dari laju aliran gas Q_f serta luas selimut nyala api yang dihasilkan A .

$$S_u = \frac{Q_f}{A} \quad (3.21)$$

3. Teknik penurunan tekanan.

Dengan menganggap nyala api sebagai aliran tunak satu dimensi, penurunan tekanan P_1 - P_2 diukur untuk menentukan kecepatan pembakaran S_u . Dengan menggunakan Persaman 3.14 - 3.16 maka penurunan tekanan titik 1 dan 2 pada Gambar 3.3 dapat dinyatakan sebagai :

$$P_2 - P_1 = P_1 \cdot \gamma \cdot (1 - \varepsilon) \cdot M_1^2 \quad (3.22)$$

Dimana ε = perbandingan volume jenis titik 2 dan titik 1, M_1 merupakan angka Mach = S_u/a_1 , a_1 kecepatan suara pada titik 1, sedangkan $\gamma = a_1^2 / P_1 V_1$.

Teknik ini jarang dipakai untuk menentukan kecepatan pembakaran.

4. Metode tabung.

Pengukuran kecepatan pembakaran dengan mengukur kecepatan perambatan nyala api pada tabung mendatar. Namun metode ini tidak dianjurkan untuk digunakan, mengingat nyala api cenderung menyimpang ke arah bawah.

Melghalchi dan Keck [24] secara eksperimen menentukan kecepatan laminar nyala api untuk berbagai campuran bahan bakar – udara yang dipengaruhi oleh temperatur dan tekanan sebagai Persamaan (3.23):

$$S_L = S_{L,ref} \left(\frac{T_u}{T_{u,ref}} \right)^\gamma \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^\beta (1 - 2.1Y_{dil}) \quad (3.23)$$

Y_{dil} mengacu pada resirkulasi gas buang, sedangkan subskrip ref mengacu pada kondisi :

$$T_{u,ref} = 298 \text{ K}$$

$$P_{ref} = 1 \text{ Atm}$$

dan

$$S_{L,ref} = B_M + B_2 (\Phi - \Phi_M)^2$$

Dimana B_M , B_2 dan Φ_M diberikan oleh Tabel 3.3. Sedangkan nilai γ dan β dinyatakan sebagai :

$$\gamma = 2,18 - 0,8(\Phi - 1) \quad \text{dan} \quad \beta = -0,16 + 0,22(\Phi - 1)$$

Tabel 3.3 Nilai Φ_M , B_M , B_2 untuk menentukan kecepatan laminar

Bahan Bakar	Φ_M	B_M (cm/s)	B_2 (cm/s)
Metanol	1,11	36,92	-140,51
Propana	1,08	34,22	-138,65
Isooctan	1,13	26,32	-84,72
RMFD-303	1,13	27,58	-78,34

Sumber : Turns Stephen R. [24]

3.3.2 Beban Pembakaran (*Burning Load*)

Beban pembakaran didefinisikan sebagai perbandingan antara laju kalor pembakaran (laju aliran gas dikalikan nilai kalornya) terhadap luas penampang *burner*:

$$\text{Burning Load (BL)} = \frac{Q_f \times \text{LHV}}{A_{\text{burner}}} \quad (3.24)$$

Di mana :

Q_f = laju aliran gas (m^3/s)

LHV = Nilai pembakaran terendah (J/m^3)

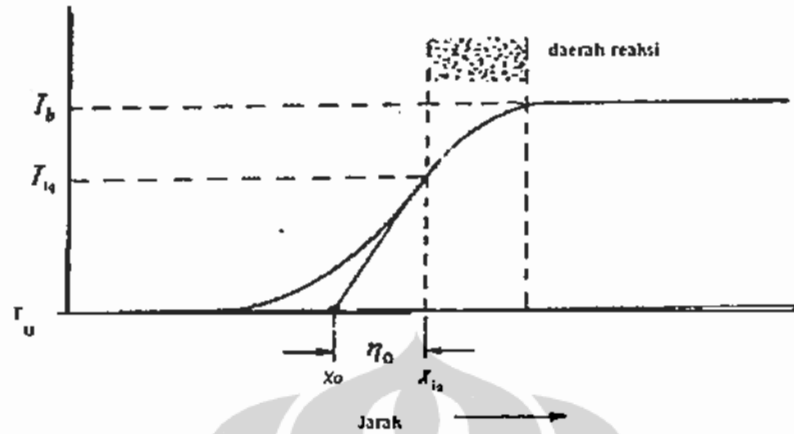
A_{burner} = luas penampang *burner* (m^2)

3.3.3 Tebal daerah pemanasan (*Preheat-zone*)

Nyala api laminar dan aliran tunak satu dimensi merupakan pendekatan nyala api yang dihasilkan dalam pengukuran laboratorium dengan kecepatan rendah. Konsep termal dalam penjalaran nyala api diperkenalkan pertama kali oleh Mallard dan Le Chatelier dan disempurnakan oleh Zel'dovich pada tahun 1940. Asumsi-asumsi yang dipergunakan dalam penyederhanaan masalah tersebut adalah :

1. Nyala api memiliki kecepatan penjalaran yang unik, S_u .
2. Tidak ada rugi-rugi panas disekitar nyala api tetapi konduksi panas dapat terjadi kearah hulu aliran gas.
3. Terdapat daerah reaksi yang sempit dengan temperatur tinggi dimana proses penyalaan (ignition) terjadi dikenal sebagai T_{ig} . Nilai T_{ig} lebih mendekati Temperatur nyala (T_b) daripada temperatur gas sebelum terbakar (T_u).

Dengan melakukan penyederhanaan melalui penetapan harga konstan terhadap: panas reaksi q (J/kg), kapasitas panas c_p ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$), konduktivitas panas κ ($\text{J}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$) dan laju pembakaran ω ($\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{s}$) maka distribusi temperatur disekitar pangkal nyala api dapat digambarkan seperti Gambar 3.4. Di sekitar daerah pangkal nyala terjadi kenaikan temperatur yang jauh lebih tinggi dibandingkan daerah lain.



Gambar 3.4. Distribusi temperatur nyala api dan *preheat-zone*

Sumber : Strehlow Roger A.[26].

Sebelum terjadinya penyalaan, terdapat gas yang belum terbakar yang sedang mengalami pemanasan awal. Tebal daerah pemanasan awal (*preheat-zone*) gas dapat dinyatakan sebagai [26]:

$$\eta_0 = \frac{T_{ig} - T_u}{(dT/dx)_{ig}} \quad (3.25)$$

Dengan menerapkan konsep kekekalan energi pada bidang nyala dengan κ merupakan konduktivitas panas dengan penjalaran konduksi panas hasil reaksi pembakaran diasumsikan ke arah hulu aliran gas diperoleh :

$$\begin{aligned} \kappa \left(\frac{dT}{dx} \right)_{ig} &= \frac{\kappa(T_{ig} - T_u)}{\eta_0} = q\omega\eta_0 \\ &= c_p(T_b - T_u)\omega\eta_0 \end{aligned} \quad (3.26)$$

Dengan nilai temperatur penyalaan (T_{ig}) lebih mendekati temperatur nyala api (T_b), Persamaan (3.26) dapat disederhanakan dengan membuat asumsi:

$$T_{ig} - T_u \cong T_b - T_u$$

sehingga tebal *preheat-zone* η_0 dapat dinyatakan sebagai:

$$\eta_0 \cong \sqrt{\frac{\kappa}{c_p \cdot \omega}} \quad (3.27)$$

Dengan penerapan persamaan kekekalan massa $S_u \rho_1 = \omega \eta_0$ dan persamaan daerah pemanasan awal (3.27) diperoleh persamaan kecepatan nyala api:

$$S_u \cong \frac{1}{\rho_1} \sqrt{\frac{\kappa}{c_p}} \omega \quad (3.28)$$

Sehingga ketebalan *preheat-zone* dari nyala api dinyatakan sebagai [26]:

$$\eta_0 \cong \frac{\kappa}{\rho_1 c_p S_u} = \frac{\alpha}{S_u} \quad (3.29)$$

Dimana α = difusivitas thermal dari gas (m^2/s), ω = laju pembakaran ($kg/m^3 \cdot s$), c_p = kapasitas panas ($J/kg \cdot K$), κ = konduktivitas panas ($J/m \cdot s \cdot K$) dan q = panas reaksi (J/kg).

3.4 Klasifikasi Umum nyala api

Klasifikasi nyala api secara umum dapat dikelompokkan melalui tiga cara yaitu:

1. Berdasarkan cara masuk reaktan ke dalam zona reaksi.

Nyala api yang dihasilkan dalam proses pembakaran gas dikelompokkan sebagai nyala api premiks dan nyala api difusi (*non* premiks). Nyala api premiks dihasilkan dari proses pembakaran dimana bahan bakar gas dan udara sebagai oksidator tercampur sebelum memasuki ruang bakar. Sedangkan nyala api difusi atau yang dikenal sebagai nyala api *non*

premix merupakan nyala api yang dihasilkan dari proses pembakaran dimana bahan bakar gas dan udara memasuki ruang bakar secara terpisah.

2. Berdasarkan sifat dinamik fluida masuk ke dalam zona reaksi.

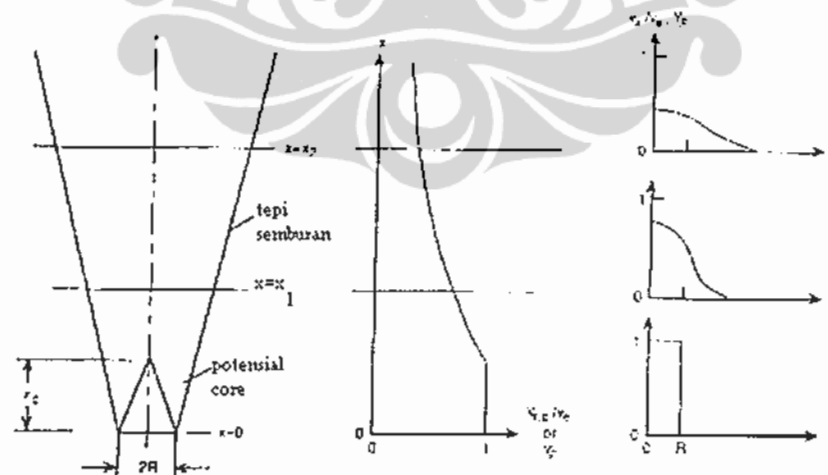
Nyala api dikelompokkan sebagai nyala api laminar dan turbulen berdasarkan sifat fluida bahan bakar memasuki zona pembakaran (reaksi). Sifat dinamik aliran fluida laminar menyebabkan proses transportasi dan pencampuran dilakukan melalui proses molekuler. Sedangkan pada aliran fluida turbulen proses tersebut dibantu oleh pergerakan maskroskopik Eddy.

3. Berdasarkan keadaan fisik awal reaktan.

Nyala api hasil pembakaran dibedakan dari bentuk bahan bakarnya, yaitu : bahan bakar padat seperti batubara, bahan bakar cair dan bahan bakar gas.

3.5 Nyala Difusi Laminar

Nyala laminar terjadi pada laju aliran bahan bakar serta tekanan aliran yang rendah, sehingga seringkali pangkal nyala api menempel pada ujung *burner* (kondisi *attached*). Teori mengenai nyala laminar menjadi pengetahuan dasar untuk dapat memahami teori nyala berikutnya seperti nyala turbulen



Gambar 3.5. Sebaran bahan bakar keluar mulut *burner* dengan diameter nosel = $2R$

Sumber : Turns Stephen R. [24]

Semburan bahan bakar yang keluar dari mulut *burner*/nosel ke udara diam (*quiescent-air*) akan menyebar dengan distribusi konsentrasi massa terhadap udara yang kian menipis dengan bertambahnya jarak terhadap mulut *burner*. Sebaran bahan bakar dapat diperlihatkan seperti Gambar 3.5.

Dengan mengandaikan kecepatan gas keluar mulut nosel seragam, maka semburan gas akan mengembang dengan batas semburan gas dikenal sebagai tepi semburan atau *jet edge*. Sedangkan daerah dimana kecepatan gas serta fraksi massa gas belum mengalami perubahan karena belum terpengaruh oleh gaya geser viskos dan difusi dikenal sebagai *potential-core*.

Jika diasumsikan bahwa laju bahan bakar saat keluar mulut *burner* seragam sama dengan v_c serta tinjauan didasarkan pada aliran fluida tidak bereaksi maka diperoleh kondisi batas yang dapat dinyatakan sebagai:

1. Kecepatan gas keluar dari lubang nosel:

$$v_x(r < R, 0) = v_c \text{ dan } v_x(r > R, 0) = 0 \quad (3.30)$$

2. Fraksi massa gas dalam campuran:

$$Y_F(r \leq R, 0) = 1 \text{ dan } Y_F(r > R, 0) = 0 \quad (3.31)$$

Sepanjang medan aliran gas berlaku:

Aliran momentum gas pada posisi x = Aliran momentum gas pada mulut nosel.

$$2\pi \int_0^{\infty} \rho(r, x) v_x^2(r, x) r dr = \rho_c v_c^2 \pi R^2 \quad (3.32)$$

Aliran massa pada bidang x = aliran massa gas saat keluar nosel.

$$2\pi \int_0^{\infty} \rho(r, x) v_x(r, x) Y_F(r, x) r dr = \rho_c v_c \pi R^2 Y_{F,c} \quad (3.33)$$

Dimana $Y_{F,c} = 1$, merupakan fraksi massa gas saat keluar nosel.

Untuk menentukan kecepatan serta fraksi massa gas sepanjang aliran dibuat asumsi sebagai berikut:

1. Berat molekuler semburan gas tidak berubah, dengan kata lain massa jenis gas konstan.
2. Mengikuti hukum difusi biner sederhana, Hukum Fick's.
3. Difusivitas gas dan momentum sama, Bilangan Schmidt, $S_c = \nu / D = 1$.
Dimana ν = viskositas kinematik (m^2/s), dan D = Difusivitas massa (m^2/s).
4. Hanya memperhitungkan difusi arah radial, arah aksial diabaikan.

Persamaan kekekalan massa sepanjang aliran fluida berlaku:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(v_r r)}{\partial r} = 0 \quad (3.34)$$

Persamaan kekekalan momentum:

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} = \nu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \quad (3.35)$$

Persamaan kekekalan untuk partikel gas berlaku:

$$v_x \frac{\partial Y_F}{\partial x} + v_r \frac{\partial Y_F}{\partial r} = D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial Y_F}{\partial r} \right) \quad (3.36)$$

Dimana:

$$Y_F = \text{Fraksi massa bahan bakar, berlaku } Y_F + Y_{Ox} = 1.$$

Kondisi batas sepanjang sumbu aliran ($r = 0$):

- $v_r(0, x) = 0$; kecepatan arah radial sepanjang sumbu = 0
- $\frac{\partial v_x}{\partial r}(0, x) = 0$; profil kecepatan simetri dan maksimum terhadap sumbu.

- $\frac{\partial Y_F}{\partial r}(0, x) = 0$; Konsentrasi gas simetri terhadap sumbu aliran.

Pada $r \rightarrow \infty$, fluida diam dan konsentrasi gas sama dengan nol.

- $v_x(\infty, x) = 0$
- $Y_F(\infty, x) = 0$

Pada saat gas keluar nosel, diasumsikan kecepatan serta konsentrasi gas seragam:

- $v_x(r \leq R, 0) = v_e$
- $v_x(r \geq R, 0) = 0$
- $Y_F(r \leq R, 0) = Y_{F,e} = 1$
- $Y_F(r \geq R, 0) = 0$

Solusi

Medan aliran diasumsikan memiliki profil kecepatan yang sama sepanjang aliran dan simetri terhadap sumbu sehingga dapat dinyatakan dalam variabel r/x , dan solusi untuk kecepatan radial dan aksial dapat dinyatakan sebagai:

$$v_x = \frac{3}{8\pi} \frac{J_e}{\mu x} \left[1 + \frac{\xi^2}{4} \right]^{-2} \quad (3.37)$$

$$v_r = \left(\frac{3J_e}{16\pi\rho_e} \right)^{1/2} \frac{1}{x} \frac{\xi - \frac{\xi^3}{4}}{\left(1 + \frac{\xi^2}{4} \right)^2} \quad (3.38)$$

Dimana :

$$J_e = \rho_e v_e^2 \pi R^2 \quad : \text{Momentum fluida pada mulut burner}$$

$$\xi = \left(\frac{3\rho_e J_e}{16\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{\mu} \frac{r}{x} \quad : \text{fungsi dalam variabel } r/x$$

Sehingga distribusi kecepatan aksial dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{v_x}{v_e} = 0,375 (\rho_e v_e R / \mu) (x/R)^{-1} \left[1 + \xi^2 / 4 \right]^{-2} \quad (3.39)$$

Dan kecepatan sepanjang sumbu aliran gas, $r = 0$ dan $\xi = 0$.

$$v_{x,0} / v_c = 0,375(\rho_c v_c R / \mu)(x/R)^{-1} \quad (3.40)$$

Jika Bilangan Reynolds dinyatakan sebagai $Re_j = \rho_c v_c R / \mu$; maka kecepatan aksial dapat dinyatakan sebagai:

$$v_x / v_c = 0,375 Re_j \frac{R}{x} \left[1 + \xi^2 / 4 \right]^{-2} \quad (3.41)$$

Sehingga kecepatan gas sebanding dengan Bilangan Reynolds dan berbanding terbalik dengan jarak dari mulut *burner*. Untuk mendapatkan persamaan fraksi masa bahan bakar dalam campuran dapat disederhanakan dengan membuat asumsi nilai Bilangan Schmidt, perbandingan momentum terhadap difusivitas, sama dengan satu. Dengan asumsi tersebut maka fraksi massa bahan bakar dapat dinyatakan sebagai:

$$Y_F = \frac{3}{8\pi} \frac{Q_f}{Dx} \left[1 + \xi^2 / 4 \right]^{-2} \quad (3.42)$$

Dimana $Q_f = v_c \pi R^2$, merupakan laju volumetrik bahan bakar, sehingga Fraksi bahan bakar dalam campuran dapat dinyatakan sebagai:

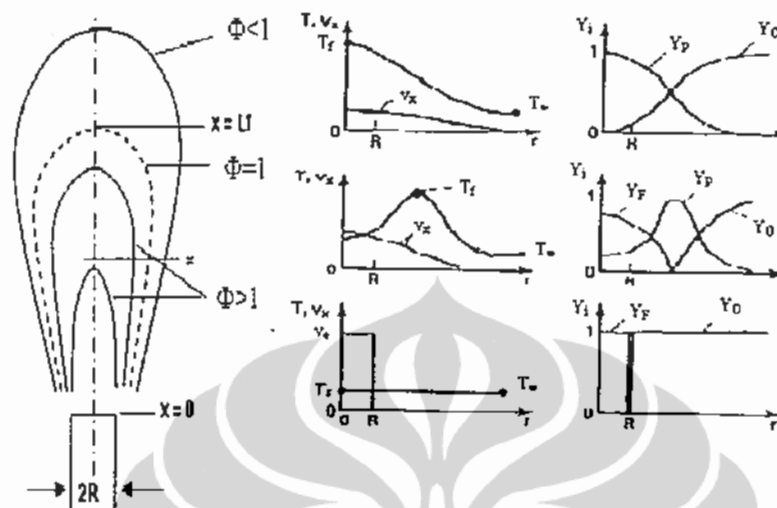
$$Y_F = 0,375 Re_j (x/R)^{-1} \left[1 + \xi^2 / 4 \right]^{-2} \quad (3.43)$$

Fraksi massa bahan bakar sepanjang sumbu dinyatakan sebagai:

$$Y_{F,0} = 0,375 Re_j (x/R)^{-1} \quad (3.44)$$

Persamaan (3.43) berlaku untuk $x > 0$ dan valid untuk $(x/R) > 0,375 Re_j$.

Diskripsi Nyala Api Laminar



Gambar 3.6. Struktur nyala api difusi laminar

Sumber : Turns Stephen R. [24]

Sepanjang arah aliran, gas berdifusi dalam arah radial keluar, sedangkan udara sebagai oksidator berdifusi secara radial ke arah dalam. Permukaan nyala api pada umumnya didefinisikan pada daerah dimana campuran bahan bakar dan oksigen berada dalam kondisi stoichiometris, sehingga posisi dimana pada sumbu aliran memiliki campuran stoikiometrik dapat dinyatakan sebagai ujung dari nyala api, atau dalam bentuk persamaan:

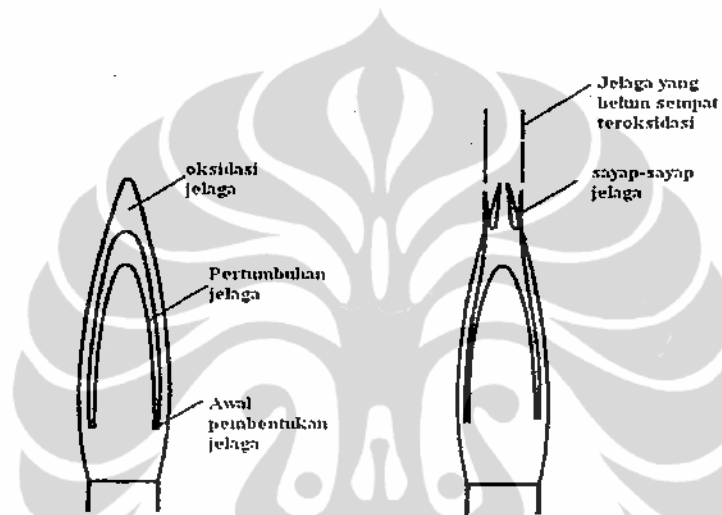
$$\Phi(r=0, x=L_f) = 1 \quad ; L_f \approx \text{panjang api} \quad (3.45)$$

Daerah terjadinya reaksi kimia pada umumnya sangat sempit, yaitu daerah dengan kondisi campuran berada pada batas mampu nyala gas, misal gas propana dengan ratio ekuivalen $\Phi = 0,51 - 2,83$ (sesuai Tabel 3.2). Dari Gambar 3.6 di atas dapat dimengerti mengapa pada pangkal nyala api terdapat lubang hitam pada bagian dalam sehingga nyala api pada pangkal berbentuk cincin pada ketinggian tertentu dari ujung *burner*.

Daerah setelah pangkal nyala, merupakan daerah yang mengandung cukup banyak gas bertemperatur tinggi sehingga gaya apung menjadi lebih dominan.

Dengan adanya gaya apung ini gerak partikel gas dipercepat sehingga terjadi penyempitan nyala api disertai peningkatan gradien konsentrasi gas sehingga proses difusi udara-gas menjadi lebih baik.

Nyala api hidrokarbon seringkali menghasilkan jelaga yang membuat nyala yang dihasilkan memberikan warna kuning atau oranye. Jelaga terbentuk dari sisi bahan bakar pada zona reaksi yang masuk ke daerah oksidasi, seperti pada ujung api yang terlihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Pembentukan jelaga dan dan proses pecahnya jelaga.

Sumber : Turns Stephen R. [24]

Tidak semua bahan bakar dapat teroksidasi sempurna ketika melewati daerah oksidasi bertemperatur tinggi, tergantung dari jenis bahan bakar serta waktu tinggalnya. Sehingga jelaga dapat pecah membentuk asap.

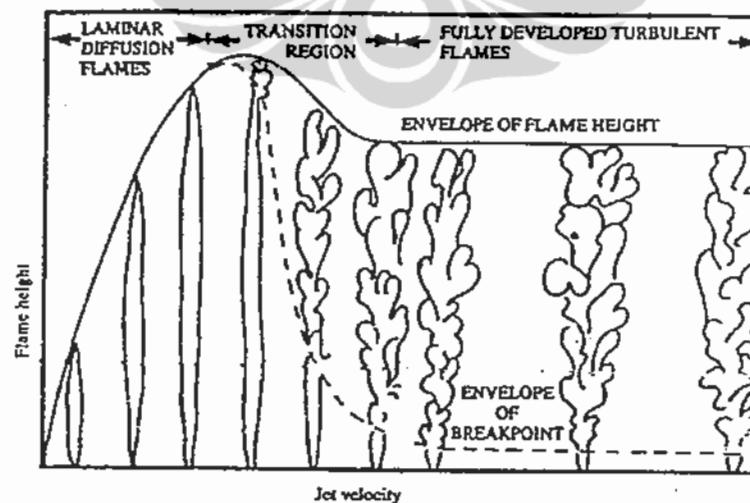
Pada nyala api difusi laminer hubungan antara panjang nyala api terhadap laju volumetrik bahan bakar dapat diturunkan. Dengan mengabaikan pengaruh panas hasil reaksi serta menggunakan definisi panjang nyala api sebagai posisi sepanjang sumbu yang memiliki konsentrasi gas sama dengan nilai stoikiometrik untuk reaksi pembakaran ($\Phi=1$), atau $Y_{F,0} = Y_{F,stoic}$ maka sesuai persamaan (3.42), dengan nilai $\xi = 0$ untuk $r = 0$, maka panjang nyala api (Flame Length, L_f) dapat dinyatakan sebagai:

$$L_f \approx \frac{3}{8\pi} \frac{Q_f}{D Y_{F,stoic}} \quad (3.46)$$

Persamaan diatas menunjukkan panjang nyala api, L_f , semakin besar dengan bertambahnya debit aliran gas, Q_f , serta berbanding terbalik dengan fraksi stoikiometrik bahan bakar yang digunakan dan difusivitas udara-bahan bakar, D . Semakin besar fraksi stoikiometrik bahan bakar, nyala api yang dihasilkan semakin pendek serta sebaliknya. Sedangkan semakin besar debit aliran gas yang diberikan nyala api pembakaran yang dihasilkan makin panjang.

3.6 Nyala Difusi Turbulen

Kecepatan aliran bahan bakar gas yang rendah menghasilkan nyala api laminar, dimana panjang nyala api hanya dikendalikan oleh laju aliran bahan bakar (lihat Persamaan 3.46). Peningkatan kecepatan aliran gas menimbulkan adanya turbulensi sehingga memperlihatkan adanya daerah transisi pada nyala api yang dihasilkan. Peningkatan laju aliran gas berikutnya menghasilkan nyala api yang benar-benar turbulen, dimana panjang nyala api menjadi stabil dan lebih pendek dibandingkan pada saat panjang laminar mencapai nilai maksimumnya.



Gambar 3.8. Tinggi nyala api difusi laminar hingga kondisi turbulen

Sumber : Dougal Drysdale [27]

Hottel dan Hawthorne, 1949, seperti yang tertulis dalam buku Dougal Drysdale [27] menampilkan tinggi nyala pada *cylindrical jet flame* untuk bahan bakar gas kota, seperti pada Gambar 3.8, dimana tinggi nyala per diameter nosel ditentukan oleh Bilangan Reynolds dari aliran bahan bakar. Pada Bilangan Reynolds rendah tinggi nyala api meningkat secara linier terhadap peningkatan Bilangan Reynolds, sedangkan pada nilai Bilangan Reynolds tinggi nyala api memiliki nilai ketinggian mendekati nilai yang konstan.

Peralihan nyala api laminar ke turbulen terjadi pada Bilangan Reynolds bahan bakar melalui nosel diatas nilai 2000 seperti yang dinyatakan oleh Hottel dan Hawthorne, 1949 [27]. Turbulensi tampak pertama kali pada ujung nyala api yang kemudian merambat mendekati nosel *burner*.

Hawthorne, Weddel dan Hottel (1949) menurunkan secara teoritis tinggi nyala api, H_f , untuk nyala api turbulen dengan diameter nosel, d_i (m), temperature nyala, T_f (K), temperature awal T_i (K), berat molekuler rata-rata udara M_{air} dan berat molekuler rata-rata bahan bakar yang keluar nosel M_f dalam persamaan (3.47) berikut:

$$\frac{H_f}{d_i} = \frac{5.3}{C_f} \left[\frac{T_f}{m.T_i} \left(C_f + (1 - C_f) \frac{M_{air}}{M_f} \right) \right]^{1/2} \quad (3.47)$$

Dimana m ratio molar dari reaktan terhadap produk untuk campuran stoikiometrik, $C_f = (1 + r_i)/(1 + r)$, dan r adalah AFR molar stoikiometrik sedangkan r_i adalah AFR molar campuran awal bahan bakar.

Tabel 3.4 Temperatur nyala oleh Lewis dan von Elbe, 1987

Bahan bakar	Konsentrasi bb dalam udara (%)	Temperatur nyala (°C)
Hidrogen	31,6	2045
Metana	10,0	1875
Etana	5,8	1895
Propana	4,2	1925
Butana	3,2	1895
Ethylen	7,0	1975
Propilene	4,5	1935
Acetilen	9,0	2325

Sumber : Dougal Drysdale [27]

Persamaan tersebut mengacu pada momentum turbulen serta mengabaikan pengaruh gaya apung (Nilai Froude tinggi), Temperatur nyala untuk T_f beberapa bahan bakar ditampilkan pada Tabel 3.4.

Metode penentuan panjang api sangat beragam diantaranya adalah: melalui pengamatan secara visual oleh peneliti terlatih, penentuan nilai rata-rata dari panjang api yang tampak pada hasil photo, pengukuran letak temperatur maksimum sepanjang sumbu api menggunakan thermokopel, serta mencari posisi sepanjang sumbu nyala api yang memiliki fraksi campuran rata-rata sama dengan fraksi stoikiometrik-nya dengan menggunakan *gas sampling*. Pengukuran Panjang api berdasarkan nyala api yang tampak cenderung menghasilkan nilai pengukuran yang lebih tinggi dibandingkan pengukuran berdasarkan temperature maksimum maupun konsentrasi stoikiometrik nya.

Faktor-faktor yang mempengaruhi panjang nyala api adalah:

1. Dominasi antara fluks momentum pada semburan awal nosel terhadap gaya apung yang timbul akibat pembakaran, Fr_j .
2. Fraksi stoikiometrik campuran, f_s .
3. Perbandingan antara massa jenis gas keluar nosel terhadap massa jenis udara sekitar, ρ_c / ρ_a .
4. Diameter awal semburan / diameter nosel, d_j .

Faktor pertama merupakan perbandingan antara pengaruh momentum awal semburan gas terhadap gaya apung akibat pembakaran, dinyatakan sebagai bilangan Froude, Fr . Untuk nyala api turbulent, nilai Froude number dinyatakan dalam persamaan (3.48):

$$Fr_j = \frac{v_c \cdot f_s^{3/2}}{\left(\frac{\rho_c}{\rho_a}\right)^{1/4} \left[\frac{\Delta T_f}{T_a} \cdot g \cdot d_j\right]^{1/2}} \quad (3.48)$$

Dimana ΔT_f merupakan temperatur karakteristik yaitu kenaikan temperatur pembakaran, d_j merupakan diameter awal semburan. Bilangan Froude yang rendah menunjukkan gaya apung lebih dominan dibandingkan momentum awal semburan nosel. Sedangkan bilangan Froude yang tinggi menyatakan

momentum awal semburan lebih dominan dalam mengontrol proses pencampuran bahan bakar gas dengan oksidatornya.

Faktor stoikiometrik campuran (f_s) yang rendah, berarti memerlukan udara yang lebih banyak untuk bahan bakar yang disebarkan, sehingga nyala api yang dihasilkan untuk bahan bakar dengan fraksi stoikiometrik yang lebih kecil menghasilkan nyala api yang lebih panjang. Sebagai gambaran, propana memerlukan udara enam kali lebih besar dibandingkan karbon monoksida, dan nyala api propana tujuh kali lebih panjang dibandingkan nyala api karbon monoksida.

Hasil eksperimen (Gambar 3.9) menampilkan pengaruh Bilangan Froude terhadap panjang api dinyatakan dalam dua daerah yaitu daerah dimana gaya apung (*buoyancy*) lebih dominan dibandingkan momentum semburan serta daerah dimana momentum semburan awal gas lebih dominan dibandingkan gaya apung. Dari hasil penelitian tersebut dihasilkan bilangan tanpa dimensi dari nyala api L^* , sebagai :

$$L^* \equiv \frac{L_f \cdot f_s}{d_j (\rho_c / \rho_x)^{1/2}} \quad (3.49)$$

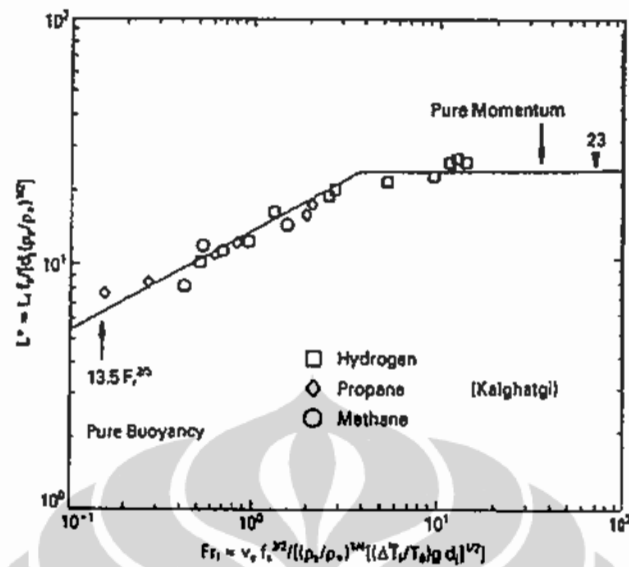
Dan terhadap bilangan Froude didapatkan korelasi sbb:

- Untuk $Fr_f < 5$; gaya apung lebih dominan :

$$L^* = \frac{13.5 \cdot Fr_f^{-2/5}}{(1 + 0.07 \cdot Fr_f^2)^{1/5}} \quad (3.50)$$

- Untuk $Fr_f \geq 5$; Momentum semburan lebih dominan :

$$L^* = 23 \quad (3.51)$$

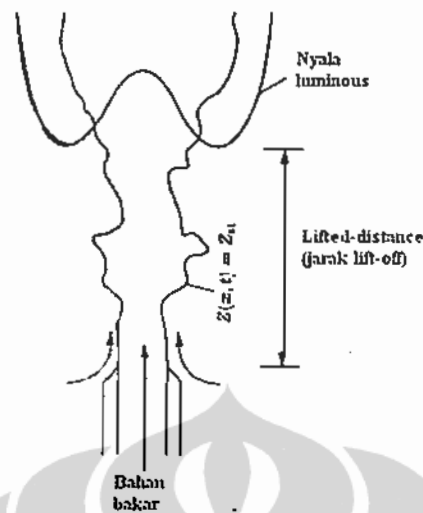


Gambar 3.9. Korelasi antara Bilangan Froude dengan panjang nyala difusi turbulen

Sumber : Turns Stephen R. [24].

3.7 Nyala Terangkat (*Lifted Flame*) pada Nyala Difusi

Pada kecepatan gas keluar *burner* v_c yang rendah, nyala api *turbulent jet flame* dalam kondisi *attached* yaitu pangkal nyala bersentuhan dengan ujung *burner*. Peningkatan kecepatan aliran gas menambah regangan pada nyala api sehingga terjadi luncuran nyala api, yaitu menjauhnya pangkal nyala api dari ujung *burner* hingga tercapai kondisi stabil yang dikenal sebagai kondisi *lift-off*. Kecepatan gas untuk mencapai kondisi ini disebut kecepatan *lift-off* dan jarak antara pangkal nyala api dengan ujung *burner* disebut *lifted-distance*, x_L . Skema *Lifted-flame* pada pembakaran difusi (*lifted jet diffusion flame*) diperlihatkan pada Gambar 3.10. Tinggi *lift-off* meningkat dengan meningkatnya kecepatan aliran gas hingga mencapai tinggi kritisnya sebelum akhirnya terjadi *blow-out*.



Gambar 3.10. Skema lifted dari nyala difusi

Sumber : Norbert Peters [28]

Beberapa teori yang mensyaratkan terjadinya kondisi *Liftoff* [28] antara lain:

a. **Teori I**

Liftoff terjadi pada posisi dimana kecepatan aliran lokal pada kecepatan nyala laminar maksimum sama dengan kecepatan pembakaran turbulen dari suatu nyala premiksed, $v(S_{L,max}) = S_T$.

Teori ini pada mulanya dipakai oleh *Wohl et al.*, *Vanquickenborne and Van Tiggelen*.

b. **Teori II**

Liftoff terjadi pada kondisi dimana laju regangan lokal fluida melampaui laju regangan pemadaman untuk suatu pendaran difusi laminar, $\epsilon > \epsilon_{crit}$.

c. **Teori III**

Liftoff terjadi saat waktu pencampuran lokal lebih kecil dibandingkan waktu kritis reaksi kimia yang dibutuhkan untuk penyalaan, $T_{local\ mixing} < T_{chem.crit}$.

Berdasarkan penggunaan Teori I pada data eksperimen pengukuran *lifted-distance* gas metana, propana dan etilen, **Kalghatgi** memberikan persamaan

lifted-distance untuk nyala api hasil pembakaran hidrokarbon - udara dalam Persamaan (3.52) berikut ini :

$$\frac{\rho_c S_{L,\max} x_f}{\mu_c} = 50 \left(\frac{v_c}{S_{L,\max}} \right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_a} \right)^{1.5} \quad (3.52)$$

Dimana: ρ_c merupakan masa jenis gas keluar nosel *burner*, ρ_a massa jenis udara, $S_{L,\max}$ kecepatan maksimum nyala laminer yang terjadi pada kondisi stoikiometrik, x_f adalah tinggi *liftoff*, v_c kecepatan gas keluar nosel *burner* serta μ_c merupakan viskositas gas saat keluar nosel *burner*.

Lifted-distance maksimum dapat dicapai pada nyala api pembakaran dengan jarak *liftoff* sesaat sebelum terjadi fenomena *blowout*. Dengan menggunakan Teori *Liftoff* 1, dimana diasumsikan pada pangkal nyala api berada dalam kondisi premiks, sehingga *blowout* terjadi pada laju aliran gas dimana kecepatan pembakaran turbulen melebihi kecepatan lokal pada posisi tersebut, $S_{L,\max}$. **Kalghatgi** memberikan Persamaan (3.53) untuk memperkirakan kondisi *blowout* untuk nyala jet-flames.

$$\frac{v_c}{S_{L,\max}} \left(\frac{\rho_c}{\rho_a} \right)^{1.5} = 0.017 \text{Re}_X (1 - 3.5 \cdot 10^{-6} \text{Re}_X) \quad (3.53)$$

Dimana bilangan Reynolds, Re_X , dinyatakan sebagai :

$$\text{Re}_X = \frac{\rho_c \cdot S_{L,\max} \cdot X}{\mu_c} \quad (3.54)$$

X merupakan jarak antara pangkal nyala api terhadap mulut *burner* maksimum yang diperkirakan dapat terjadi pada saat konsentrasi rata-rata bahan bakar mencapai nilai stoikiometrik-nya. Tinggi *liftoff* yang terjadi pada saat *blowout*, X , dapat dinyatakan dalam Persamaan (3.55) berikut dengan d_j merupakan diameter mulut *burner*, $Y_{F,\text{stoich}}$ menyatakan konsentrasi gas dalam campuran stoikiometrik dan $Y_{F,c}$ menunjukkan konsentrasi gas keluar nosel *burner*.

$$X = 4 \left[\frac{Y_{F,e}}{Y_{F,stoich}} \left(\frac{\rho_e}{\rho_\sigma} \right)^{1/2} - 5.8 \right] d_j \quad (3.55)$$

Jarak *liftoff* untuk pembakaran difusi gas Propana pada udara bebas dan ruang terbatas telah diteliti oleh Cha M.S dan Chung S.H [21]. Perbandingan antara *lifted distance* saat mendekati kondisi blowout terhadap diameter nosel mendekati nilai 50 baik untuk kondisi pembakaran propana pada udara bebas maupun pada ruang terbatas. Selain itu hasil penelitiannya menunjukkan bahwa *lifted distance* (\bar{x}_l) untuk pembakaran hasil semburan propana pada udara bebas adalah sebanding dengan kecepatan rata-rata propana keluar nosel *burner*, v_e , dan tidak bergantung terhadap diameter nosel *burner* seperti diperlihatkan pada Persamaan (3.56).

$$\bar{x}_l = 0.002245.v_e - 0.01663 \quad (3.56)$$

Sedangkan *lifted-distance* untuk pembakaran propana pada udara ruang terbatas mengikuti Persamaan (3.57) :

$$\frac{\bar{x}_l}{d_i} = v_e \left(1.02 + \frac{0.0976}{d_d - 0.35} \right) \quad (3.57)$$

Dimana d_i = diameter nosel dan d_d = diameter selubung.

3.8 Pengaruh Laju Aliran Gas Propana terhadap Nyala Api

Susunan utama peralatan pengujian yang dipergunakan ditunjukkan pada Gambar 2.1. Aliran udara dari kompressor tidak diaktifkan serta selubung kaca diatas *burner* pada susunan utama peralatan pengujian dibuka. Gas propana dialirkan secara bertahap melalui nosel dengan diameter laluan 1.8 mm dari aliran terendah yang mampu dibaca alat ukur hingga tercapai kondisi *blow-off* ketika nyala api hasil pembakaran padam dengan bertambahnya aliran bahan bakar. Nyala api yang dihasilkan diamati, dengan penempatan mistar ukur disebelah nyala api dilakukan pengambilan gambar melalui kamera digital. Seperti terlihat pada Gambar 3.11



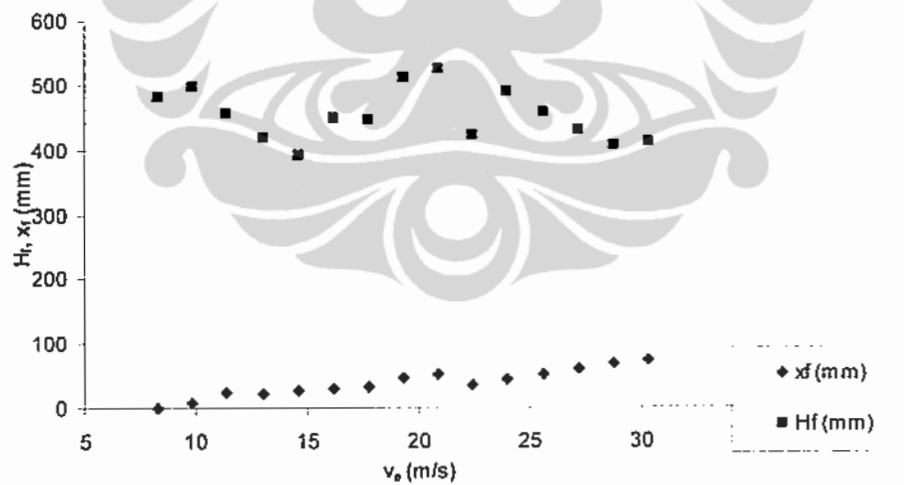
Gambar 3. 11 Pengukuran dimensi api dengan kamera digital

Pengukuran dimensi api dilakukan dengan mengolah gambar yang diperoleh dari kamera digital dengan metode nilai RGB seperti dijelaskan pada sub bab 2.4.3 sebelumnya. Dari hasil kalibrasi panjang skala pada mistar terhadap jumlah pixel pada hasil foto diperoleh pengukuran terkecil yang mampu dibaca sebesar 0,1285 mm. Hasil pengukuran diperlihatkan pada Tabel 3.5, yang secara grafik disajikan pada Gambar 3.12. Nilai Bilangan Reynolds gas keluar burner ditentukan berdasarkan $Re_j = \rho.v_e.d / \mu$.

Tabel 3.5 Lifted-distance dan Tinggi Nyala Difusi Propana pada udara diam.

Q_f (l/s)	x_f (mm)	H_f (mm)
0,0211	0	481,8750
0,0251	7,0675	496,1390
0,0291	24,9300	455,0185
0,0331	20,4300	417,6250
0,0371	26,0000	390,7690
0,0411	30,3300	447,0500
0,0451	33,9200	446,1520
0,0491	47,2880	510,0000
0,0531	51,7900	524,6700
0,0571	35,7200	421,2330
0,0611	44,5800	488,9400
0,0651	51,7900	456,9500
0,0691	58,8000	428,2900
0,0731	67,8500	405,1600
0,0771	73,1100	408,6300

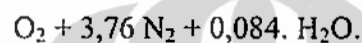
*) Tingkat ketelitian pengukuran x_f , H_f : ± 0.1285 mm dan Q_f : ± 0.1 ml/s



turbulen, yaitu dengan mulai menurunnya nilai H_f . Nilai rata-rata tinggi nyala api turbulen ditentukan sebagai nilai rata-rata dari tinggi nyala api pada debit aliran gas diatas 29,1 ml/s dengan nilai sebesar $446 \pm 77,2$ mm untuk tingkat kepastian 95 % yang ditunjukkan pada Gambar 3.13.

Menurut Persamaan (3.47) yang dikemukakan oleh Hawthorne,Weddel dan Hottel [27] panjang api untuk gas propana yang melalui *burner* berdiameter 1,8 mm adalah :

- o Berat Molekul udara, M_{air} , mengikuti persamaan (3.7) :

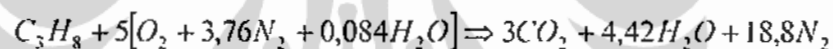


$$M_{air} = 32 + 3,76*28 + 0,084*18 = 2164,512$$

- o Berat Molekul Gas Propana , M_f :



- o Ratio molar reaktan terhadap produk , m :



$$m = 26,22 / 6 = 4,37$$

- o AFR molar stoikiometrik r :

$$r = 5/1 = 5$$

- o AFR molar campuran awal bahan bakar , r_i :

$$r_i = 0 \quad \text{Asumsi bahan bakar propana murni.}$$

$$C_f = (1 + r_i)/(1 + r) = 1/6$$

- o Temperatur nyala Propana menurut Lewis dan Von Elbe yang diberikan pada Tabel 3.4.

$$T_f = 2208 \text{ K}$$

- o Temperatur awal gas Propana

$$T_i = 300 \text{ K}$$

Sehingga Tinggi Nyala Api Turbulen menurut : Hawthorne,Weddel dan Hottel [27], untuk diameter laluan gas sebesar 1,8 mm adalah :

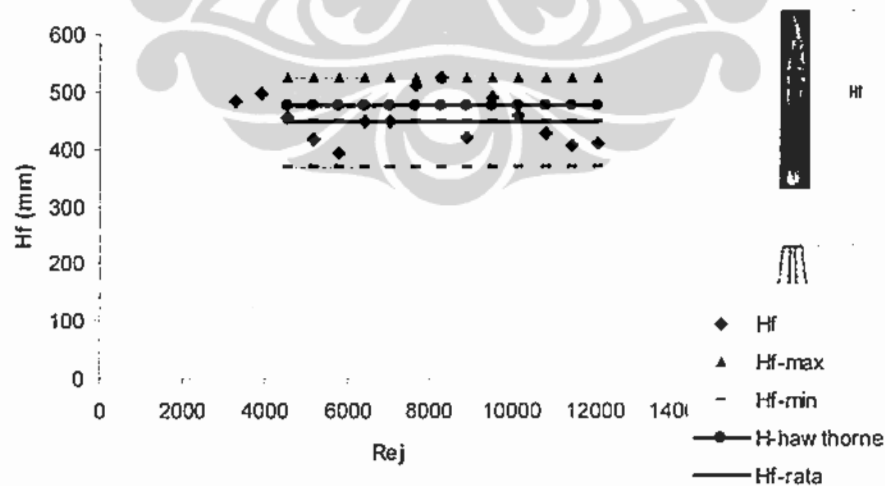
$$\frac{H_f}{d_i} = \frac{5,3}{C_f} \left[\frac{T_f}{m.T_i} \left(C_f + (1 - C_f) \frac{M_{air}}{M_f} \right) \right]^{1,2}$$

$$H_f / d_i = 264,378$$

Atau

$$H_f = 475,88 \text{ mm}$$

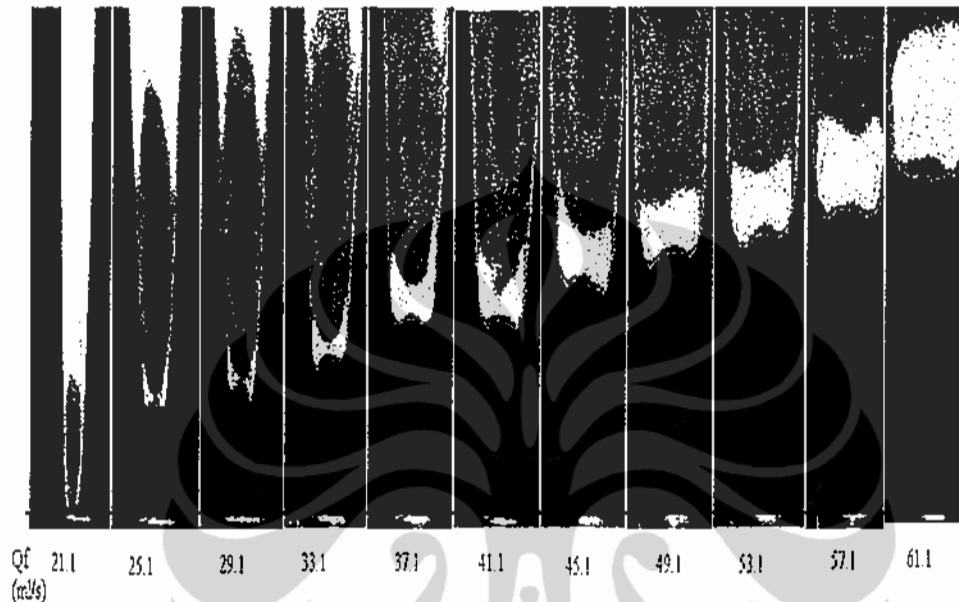
Gambar 3.13 memperlihatkan hasil pengukuran tinggi api, H_f , untuk setiap nilai Bilangan Reynolds aliran gas propana keluar burner. Dengan $Re_j = \rho_f \cdot u_e \cdot d_i / \mu_f$, dimana massa jenis propana $\rho_f = 1.82 \text{ kg/m}^3$ dan viskositas absolut $\mu_f = 8,26 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ [29]. Dan menganggap nyala turbulen mulai terjadi pada debit aliran gas keluar nosel burner sebesar 29,1 ml/s maka tinggi nyala turbulen rata-rata hasil pengukuran $\overline{h_f} = 446 \text{ mm}$ dengan $\overline{h_f} = 77,2 \text{ mm}$ untuk tingkat kepastian 95 %. Sedangkan tinggi nyala turbulen gas propana menurut Hawthorne et.al. sebesar 475 mm untuk diameter jaluan gas sebesar 1,8 mm, nilai tersebut masih di dalam batas nilai pengukuran maksimum – minimum.



Gambar 3.13 Tinggi api, H_f , hasil eksperimen dengan tingkat kepastian 95 % serta hasil perhitungan menurut Hawthorne dkk.

Lifted distance, x_f

Jarak pangkal nyala api meningkat dengan kenaikan laju aliran gas yang keluar dari nosel burner seperti tampak pada Gambar 3.14. Diameter pangkal nyala semakin besar dengan bertambahnya nilai *lifted-distance*.



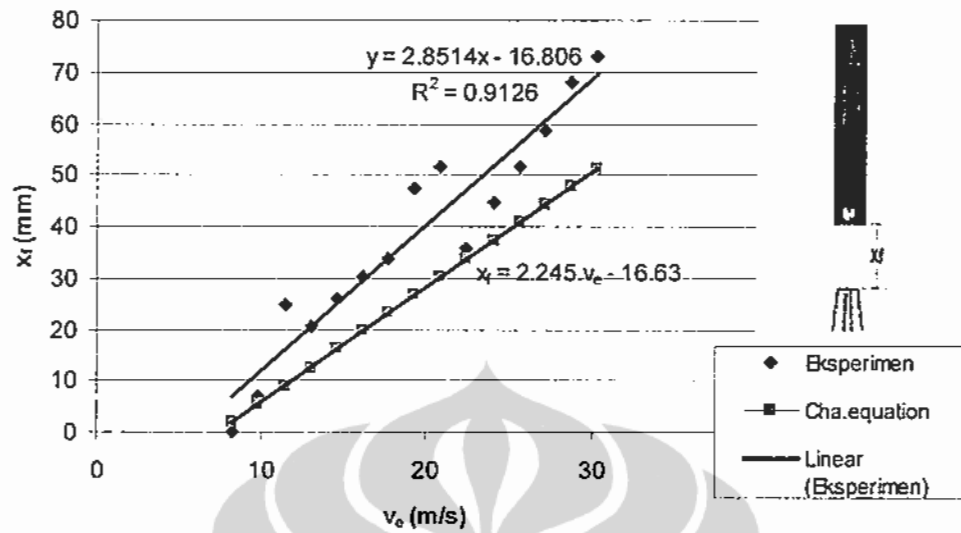
Gambar 3.14 Nyala terangkat dari pembakaran gas Propane.

Hasil pengukuran *lifted-distance* terhadap kecepatan keluar gas melalui mulut *burner* digambarkan kembali pada Gambar 3.15. *Lifted-distance* bertambah secara linier terhadap peningkatan kecepatan aliran gas propana, hasil ini sesuai dengan hasil penelitian Cha, M.S. et al [21]. Dari hasil eksperimen hubungan antara *lifted-distance*, x_f (mm), terhadap kecepatan sembur gas propana, v_e (m/s), dinyatakan dalam persamaan linier menyerupai persamaan linier hasil dari Cha, M.S. [21], sehingga diperoleh persamaan (3-58).

$$x_f = 2,8514.v_e - 16,806 \quad (3.58)$$

Persamaan (3.58) dapat dinyatakan dalam Persamaan (3.59) dengan *lifted-distance* x_f dalam m dan kecepatan sembur gas v_e dalam m/s dengan nilai keterkaitan sebesar 91,3 %

$$x_f = 0,0029 v_e - 0,0168 \quad (3.59)$$



Gambar 3.15. *Lifted-distance* hasil eksperimen dan hasil perhitungan menurut persamaan yang diberikan oleh Cha.M.S [21]

Kedua persamaan, hasil pengujian (3.57) dan persamaan yang dihasilkan Cha.M.S. et all (3.58) memperlihatkan hasil yang sama bahwa *lifted-distance* yang dihasilkan merupakan persamaan linier terhadap kecepatan rata-rata aliran gas keluar *burner*. Gradien *lifted-distance* terhadap kecepatan aliran gas pada persamaan hasil pengujian lebih tinggi dibandingkan persamaan yang diberikan oleh Cha M.S., hal ini menunjukkan kondisi pengujian memiliki sensitivitas lebih tinggi yang diduga berasal dari bentuk saluran gas yang digunakan dalam pengujian yaitu bentuk konis.

Selain persamaan yang diusulkan oleh Cha M.S. et all, berdasarkan Teori I *Liftoff* yang menyatakan bahwa *liftoff* terjadi pada posisi dimana kecepatan aliran lokal sama dengan kecepatan nyala laminar maksimum atau sama dengan kecepatan pembakaran turbulen dari suatu nyala *premix*, $v(S_{l,max}) = S_T$. Berdasarkan teori ini Kalghatgi [4] memberikan persamaan tinggi *liftoff* untuk nyala api hasil pembakaran difusi hidrokarbon-udara seperti dalam persamaan (3.60).

$$\frac{\left(\frac{\rho_c S_{l,max} x_f}{\mu_c} \right)}{\left(\left(\frac{v_e}{S_{l,max}} \right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_a} \right)^{1.5} \right)} = 50 \quad (3.60)$$

Data hasil pengujian dievaluasi mengikuti persamaan yang telah diperkenalkan oleh Kalghatgi [4], dengan membandingkan nilai konstanta pada Persamaan (3.60) dengan konstanta yang diperoleh berdasarkan data pengujian. Persamaan (3.60) ditulis kembali dalam persamaan (3.61) guna menentukan nilai konstanta yang dihasilkan melalui data eksperimen..

$$\frac{\left(\frac{\rho_e S_{L,max} X_f}{\mu_e}\right)}{\left(\left(\frac{v_e}{S_{L,max}}\right)\left(\frac{\rho_e}{\rho_r}\right)^{1,5}\right)} = C_{eks.} \quad (3.61)$$

Kecepatan Nyala Laminer Maksimum, $S_{L,max}$

Jika diasumsikan bahwa kecepatan laminar nyala api berada pada kondisi stoikiometrik nya ($\Phi=1$) maka kecepatan laminar maksimum dapat dicari dengan menggunakan persamaan (3.22) dengan $\Phi_m = 1,08$; $B_M = 34,22$ dan $B_2 = -138,65$ seperti yang diperoleh dari Tabel 3.3 untuk gas propana.

$$T_{u,ref} = 298 \text{ K}$$

$$P_{ref} = 1 \text{ atm}$$

$$\gamma = 2,18 - 0,8(\Phi - 1) = 2,18$$

$$\beta = -0,16 + 0,22(\Phi - 1) = -0,16$$

$$S_{L,ref} = B_M + B_2 (\Phi - \Phi_M)^2 = 34,22 + -138,65 (1-1,08) = 45,26 \text{ cm/s}$$

Untuk persentase resirkulasi gas buang dianggap nol ($Y_{dil} = 0$), maka $S_{L,maks}$ dapat ditentukan sebagai :

$$S_{L,maks} = S_{L,ref} \left(\frac{T_u}{T_{u,ref}}\right)^{\gamma} \left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^{\beta}$$

Jika temperatur gas sebelum terbakar dianggap sama dengan temperatur rujukan, $T_u = T_{u,ref}$, dan tekanan gas keluar nosel *burner* sama dengan tekanan rujukan, $P = P_{ref}$, maka $S_{L,maks} = S_{L,ref} = 45,26 \text{ cm/s}$

Tabel 3.6. Menentukan konstanta C persamaan 3.60 dari hasil eksperimen.

Qf (l/s)	Rej	Xf (mm)	ve (m/s)	$\rho_e \cdot S_{l,max} \cdot x_f / \mu_e$	$(v_e / S_{l,max}) \cdot (\rho_e / \rho_w)^{1,5}$	C_{eksp}
0.0211	3290.271	0	8.295982	0	37.26454392	
0.0251	3914.019	7.068	9.86868	737.9814626	44.32891244	16.64786
0.0291	4537.767	24.93	11.44138	2602.982154	51.39328095	50.6483
0.0331	5161.515	20.43	13.01408	2133.12978	58.45764947	36.49017
0.0371	5785.263	26	14.58677	2714.702607	65.52201799	41.43191
0.0411	6409.011	30.33	16.15947	3166.805003	72.5863865	43.62808
0.0451	7032.759	33.92	17.73217	3541.642786	79.65075502	44.46465
0.0491	7656.507	47.288	19.30487	4937.417573	86.71512353	56.93837
0.0531	8280.255	51.79	20.87757	5407.47877	93.77949205	57.66163
0.0571	8904.003	35.72	22.45026	3729.583736	100.8438606	36.98375
0.0611	9527.751	44.58	24.02296	4654.670855	107.9082291	43.13546
0.0651	10151.5	51.79	25.59566	5407.47877	114.9725976	47.03276
0.0691	10775.25	58.8	27.16836	6139.404358	122.0369661	50.30774
0.0731	11398.99	67.85	28.74106	7084.329689	129.1013346	54.87418
0.0771	12022.74	73.11	30.31375	7633.534908	136.1657031	56.06063

Gas propana yang keluar dari nosel *burner* memiliki nilai [29] :

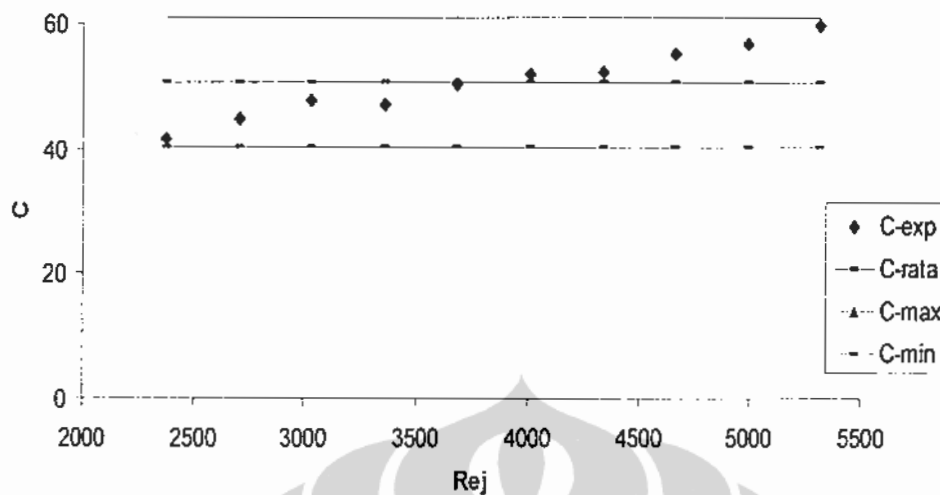
$$\text{Massa jenis, } \rho_e = 1,8616 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Viskositas dinamik, } \mu_e = 8,0696 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$$

$$\text{Massa jenis udara, } \rho_r = 1,16 \text{ kg/m}^3$$

maka perhitungan nilai C_{eksp} untuk Persamaan (3.61) diperlihatkan seperti pada Tabel 3.6.

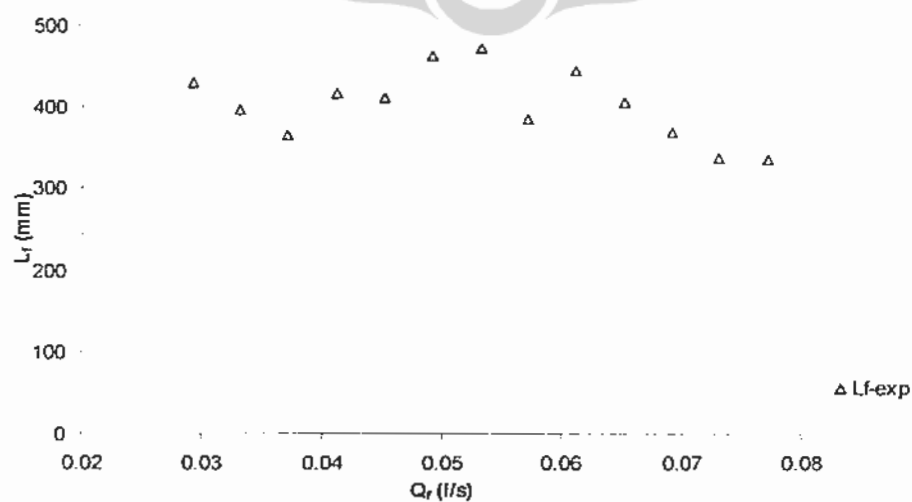
Perhitungan berdasarkan data hasil pengujian diperoleh nilai konstanta C pada Persamaan 3.61 untuk setiap Bilangan Reynolds gas keluar ujung *burner* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.16. Jika kondisi nyala turbulen ditetapkan pada debit aliran gas >29,1 ml/s (sesuai dengan penentuan H_f) maka nilai rata-rata konstanta C_{eksp} pada nyala turbulen gas propana sebesar $50,6 \pm 10,4$ untuk tingkat ketidakpastian sebesar 5 %. Nilai C_{eksp} sangat mendekati nilai yang diberikan oleh Kalghatgi.



Gambar 3.16 Nilai konstanta pengujian untuk kondisi nyala turbulen dengan nilai $C_{eksp} = 50,6 \pm 10,4$ (ketidakpastian = 5 %).

Panjang Nyala

Panjang nyala merupakan selisih antara tinggi nyala terhadap *lifted distance*. Semakin kecil panjang nyala yang dihasilkan menandakan kecepatan reaksi pembakaran semakin meningkat, sesuai dengan penentuan kecepatan reaksi melalui Metode *Burner* baik dengan pengukuran tinggi nyala, persamaan (3.19), maupun dengan penentuan luas selimut nyala, persamaan (3.20).



Panjang nyala turbulen difusi gas Propana , L_f (mm), terhadap laju aliran gas propana, Q_f (l/s), diperlihatkan pada Gambar 3.17, dengan panjang nyala api cenderung bertambah pendek dengan semakin besarnya aliran gas.

3.9 Simulasi CFD

Upaya yang dilakukan untuk memahami fenomena lifted-flame dilakukan dengan membuat simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dari tiap kondisi eksperimen yang telah dilakukan. Simulasi CFD yang dilakukan dalam penelitian ini adalah dengan membuat model komputasional dalam 2 dimensi, dengan sumbu aksisimetrik. Simulasi dilakukan untuk kondisi aliran dingin (*cold-flow*) dan juga simulasi dengan reaksi pembakaran. Dari kedua jenis kondisi simulasi yang dilakukan, simulasi fluida dingin lebih memperlihatkan keterkaitan antara dinamika fluida gas-udara terhadap kondisi *lifted* yang terjadi.

Hasil pemodelan dengan CFD tidak serta merta menunjukkan nilai *lifted-distance* maupun dimensi nyala yang diperlukan, namun perlu dibuatkan suatu defisini mengenai posisi pangkal nyala api dimaksud. Pengukuran secara visual menyatakan posisi pangkal nyala api adalah pada bagian dengan pendar nyala tercerah di sekitar ujung *burner* , pengukuran dengan alat ukur temperatur menyatakan permukaan dengan temperatur tertinggi setelah ujung burner merupakan pangkal nyala api (ini merupakan metode konvensional).

Seiring dengan perkembangan alat ukur, posisi pangkal nyala api dinyatakan sebagai posisi dimana terdapat konsentrasi CH tertinggi di sekitar ujung *burner* seperti yang dinyatakan Schefer dan kawan [8] yang berlaku untuk pembakaran difusi gas hidrokarbon, sedangkan untuk pembakaran difusi gas hidrogen posisi pada pangkal nyala merupakan posisi dengan konsentrasi OH tertinggi disekitar mulut *burner*. TS. Cheng [15].

Penentuan posisi pangkal nyala dengan menggunakan medan aliran dikemukakan oleh Muñiz dan Mungal [9], yang menyatakan bahwa posisi pangkal nyala ditentukan oleh posisi dimana kecepatan lokal sepanjang sumbu nyala memiliki nilai kecepatan sebesar 1.5 – 3 kali kecepatan pembakaran laminar (S_L)

Selain itu Joan Bolanger dan kawan mendefinisikan pangkal nyala merupakan posisi dimana campuran stoikiometrik udara-bahan bakar memiliki

kecepatan pembakaran premiksnya [11], sedangkan Eduardo Fernandez – Tarrazo menyatakan pangkal nyala memiliki kondisi campuran stoikiometrik dengan temperatur 1200 K [12].

Dengan definisi pangkal nyala hasil pengukuran maupun simulasi yang harus didefinisikan terlebih dahulu, dalam disertasi ini pangkal nyala terukur dapat dinyatakan :

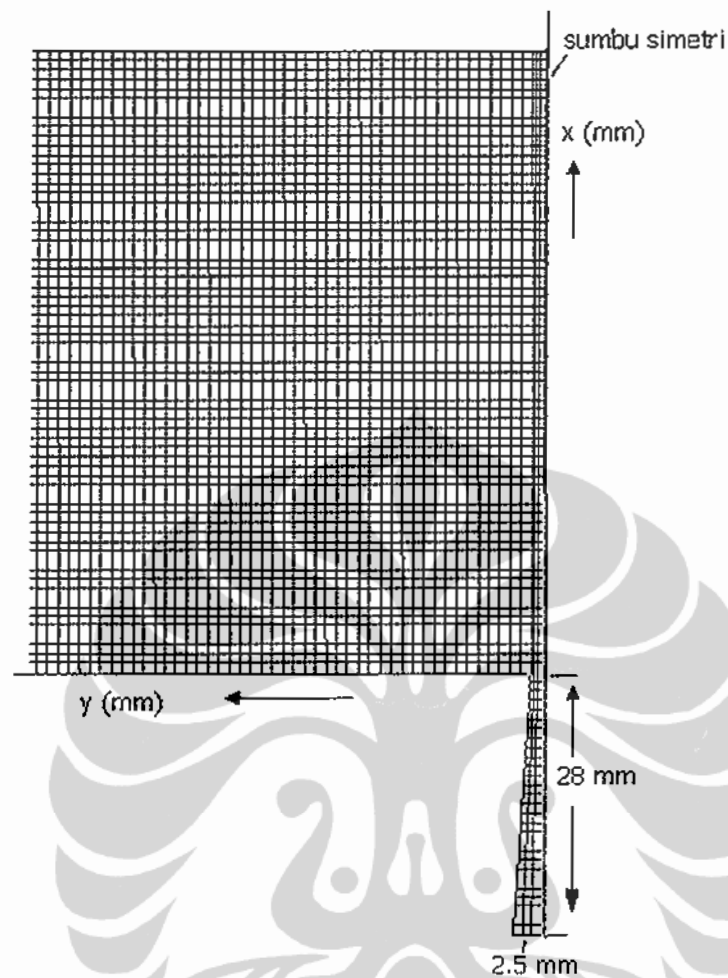
1. Secara visual: posisi pada nyala api yang memberikan pendaran tercerah di sekitar ujung *burner*.
2. Dengan pengolahan citra: pangkal nyala memiliki nilai RGB puncak disekitar ujung *burner* dengan indeks RGB lebih besar 290.
3. Simulasi CFD dengan aliran fluida dingin : posisi pangkal nyala merupakan perpotongan antara kontur kecepatan premiks laminer (S_L) dengan kontur campuran stoikiometrik dengan nilai rasio ekivalen sama dengan satu ($\Phi = 1$).

Proses simulasi CFD dilakukan melalui tiga tahapan utama yaitu : membuat model (*preprocessing*), melakukan perhitungan dengan kondisi-kondisi yang telah diterapkan (*solving*) dan yang terakhir adalah menginterpretasikan hasil simulasi (*postprocessing*).

3.9.1 Membuat Model (*Preprocessing*)

Penggambaran model dilakukan dengan Program Gambit 2.2.30. Model 2-Dimensi dengan aliran gas masuk nosel konik serta area bakar berupa tabung. Dimensi model digambarkan seperti pada Gambar 3.20. dengan diameter input gas 5 mm, diameter nosel pada ujung burner 1,8 mm, panjang nosel 28 mm dan ruang bakar memiliki dimensi panjang 2 m serta diameter 0,5 m.

Pembuatan sel-sel (*meshing*) dilakukan dengan bentuk *quadilateral mesh* (persegi panjang) dalam hal ini ditentukan ukuran mesh: $1 \times 1 \text{ mm}^2$. Model dibuat setengah bagian dengan mendefinisikan sumbu-x sebagai sumbu simetri (*axis*) untuk memperkecil memori yang diperlukan dalam komputasi.



Gambar 3.18 Model dan mesh untuk aliran gas Propana dan ruang bakar dengan dimensi 2000 x 500 mm.

Setelah melakukan *meshing*, tahap selanjutnya adalah penentuan kondisi batas model. Kondisi batas yang diterapkan pada sisi gas memasuki nosel konik didefinisikan sebagai kondisi *velocity inlet*, sedangkan pada batas tepi ruang bakar dikondisikan *velocity inlet* udara dengan kecepatan yang sangat rendah yaitu 0.005 m/s untuk memberikan gambaran bahwa ruang bakar adalah ruang dengan pembatas udara diam. Kondisi batas *velocity inlet* ini dapat digunakan untuk aliran fluida *inkompresibel* seperti udara maupun gas propana yang digunakan.

Sedangkan kondisi gas buang keluar ruang bakar dinyatakan dalam kondisi batas *pressure outlet*, yang sesuai untuk kondisi dengan tekanan statik diketahui sedangkan jumlah gas keluar ditentukan berdasarkan hasil komputasi. Dinding nosel dinyatakan sebagai kondisi *wall*, yaitu permukaan dinding yang

bersentuhan langsung dengan fluida. Tabel 3.7 memberikan data kondisi batas yang diterapkan pada pembakaran difusi propana dalam udara diam .

Simulasi dilakukan untuk dua kondisi nyala yang berbeda, yaitu kondisi pangkal nyala yang menempel pada ujung *burner (attached-flame)* dan kondisi pangkal nyala yang terpisah dari ujung *burner (lifted-flame)*.

Tabel 3.7 Data kondisi batas untuk pembakaran dalam udara-diam

Kondisi batas	Gas masuk <i>Velocity inlet</i>	Dinding Ruang <i>Velocity inlet</i>	Gas buang <i>Pressure-outlet</i>	Dinding Nozel	Sumbu ruang
Attached ($Q_f = 21,1$ ml/s)	Propana : 1,075 (m/s)	Udara : 0,005 (m/s)	Tekanan Atm	<i>Wall</i>	<i>Axis</i>
Lifted ($Q_f = 65,1$ ml/s)	Propana : 3,317 (m/s)	Udara : 0,005 (m/s)	Tekanan Atm	<i>Wall</i>	<i>Axis</i>

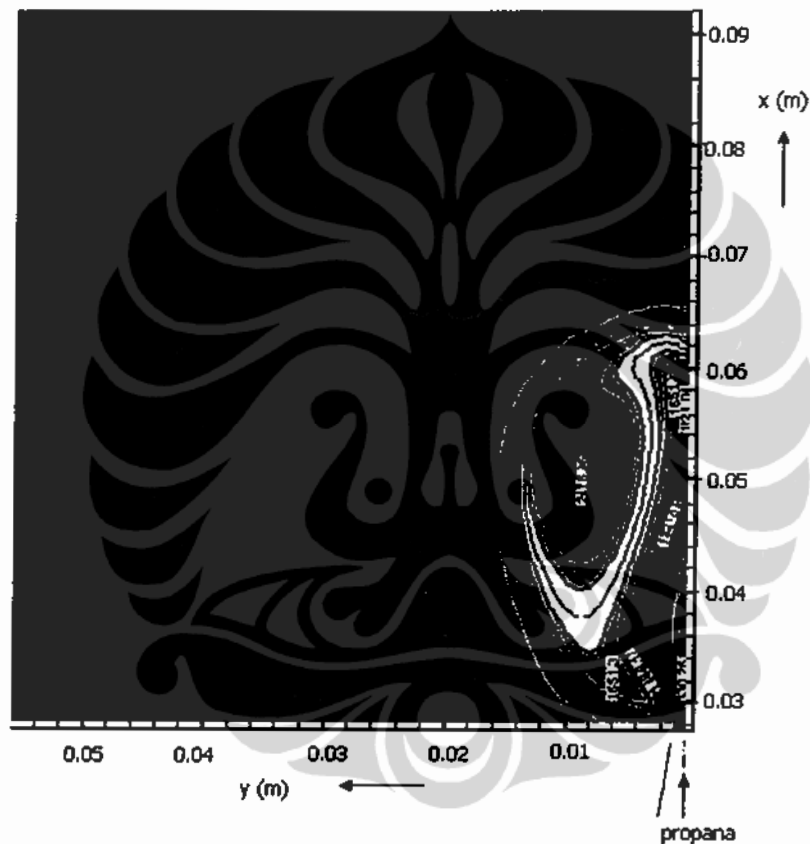
3.9.2 Pemecahan masalah (*Solving*)

Definisi model-model yang dipergunakan dalam pemecahan masalah menjadi sangat penting guna mendapatkan kondisi yang sesuai dengan kondisi aktual sistem. Adapun pemilihan model pemecah masalah antara lain:

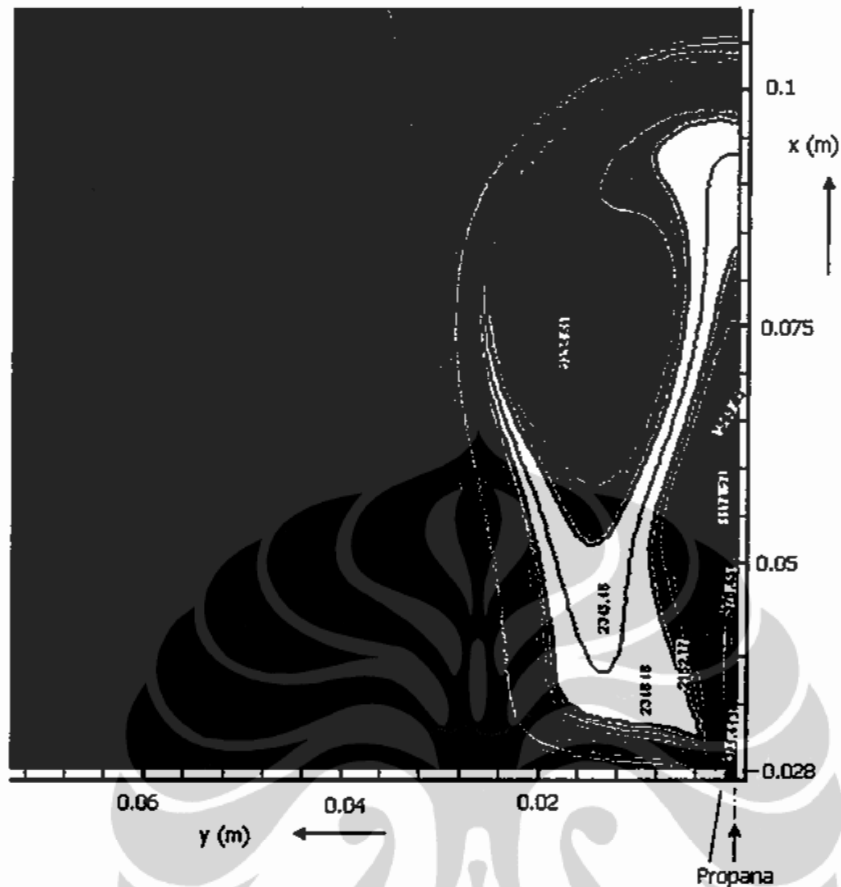
1. Model *axisymmetric* dengan kondisi tunak.
2. Model *viscous* yang digunakan adalah *k-ε standard* dimana model ini sesuai untuk *planar jet* maupun *round jet* seperti yang dikemukakan oleh Arrousi [30]. Model k-ε standard cocok digunakan untuk simulasi aliran fluida dan perpindahan panas [33].
3. Model spesies: *Species Transport.*, yang dapat menyelesaikan masalah dengan atau tanpa reaksi kimia.
4. Model reaksi pembakaran: reaksi **volumetrik** dengan model interaksi reaksi kimia dengan turbulensi menggunakan model *Eddy dissipation*.
5. Kondisi Operasi: Tekanan ruang (1 atm), dengan gaya gravitasi dalam arah x (panjang) -9.8 m/s^2 serta temperatur operasi 300 °K.

3.9.3 Menampilkan hasil simulasi (*postprocessing*)

Setelah dilakukan iterasi dari model fisik serta model pemecahan masalah yang diberikan hasil-hasil simulasi dapat ditampilkan dalam bentuk kontur-kontur yang diinginkan seperti kecepatan, fraksi massa spesies maupun kontur temperatur. Gambar 3.21 dan 3.22 memperlihatkan kontur temperatur untuk simulasi dengan melibatkan reaksi pembakaran untuk kondisi nyala *attached* dan *lifted*.



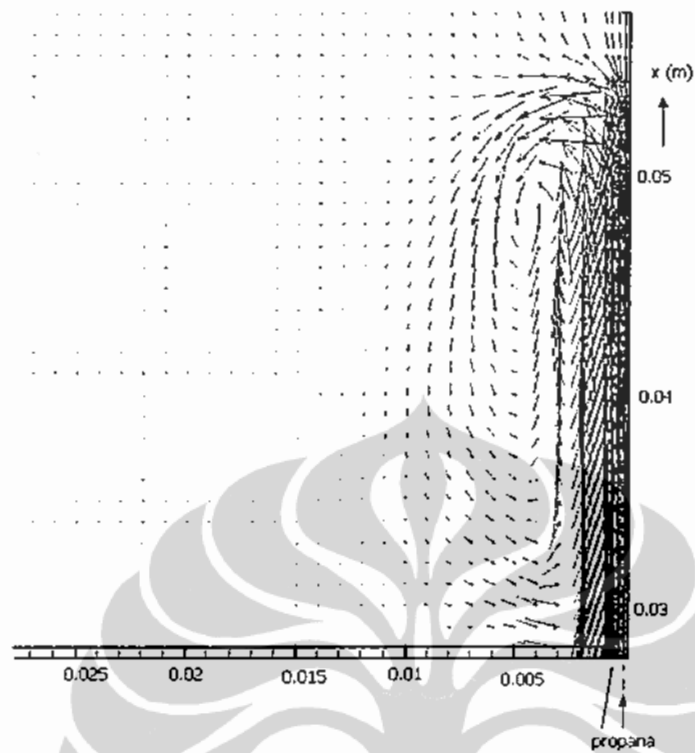
Gambar 3.19. Distribusi temperature ($^{\circ}\text{K}$) untuk kondisi *attached flame*, $Q_f = 21,1 \text{ ml/s}$



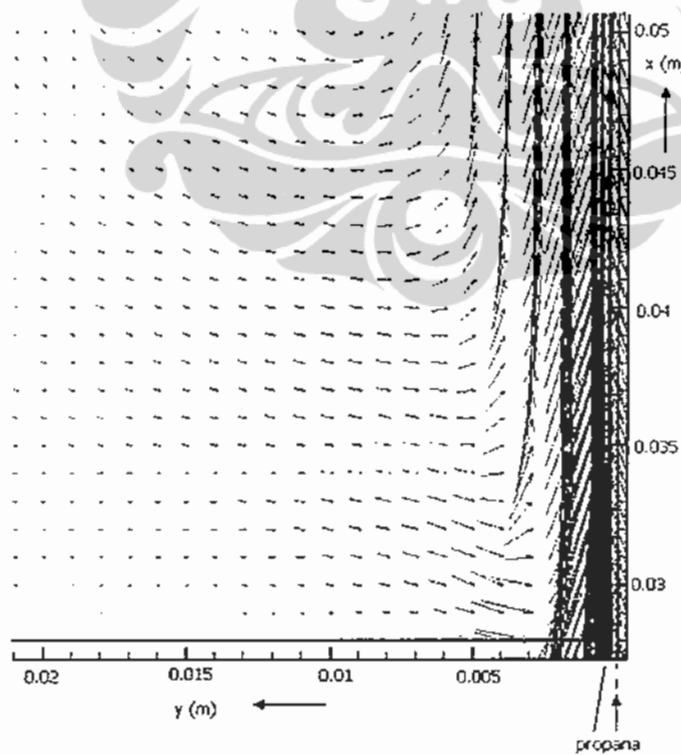
Gambar 3.20 Distribusi temperature ($^{\circ}\text{K}$) untuk kondisi *lifted-flame*, $Q_f = 65.1 \text{ ml/s}$

3.10 Diskusi

Kondisi *attached-flame*, yaitu saat pangkal nyala masih menempel pada mulut burner terjadi pada saat laju aliran gas $21,1 \text{ ml/s}$, peningkatan laju aliran menimbulkan kondisi *liftoff*, yaitu nyala terangkat menjauhi ujung burner. Terangkatnya pangkal nyala api berkaitan erat dengan proses difusi udara terhadap propana. Kontur aliran fluida saat keluar dari ujung nosel dapat digambarkan melalui simulasi aliran gas dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) seperti diperlihatkan pada Gambar 3.23 untuk kondisi *attached* dan Gambar 3.24 untuk kondisi *lifted*.



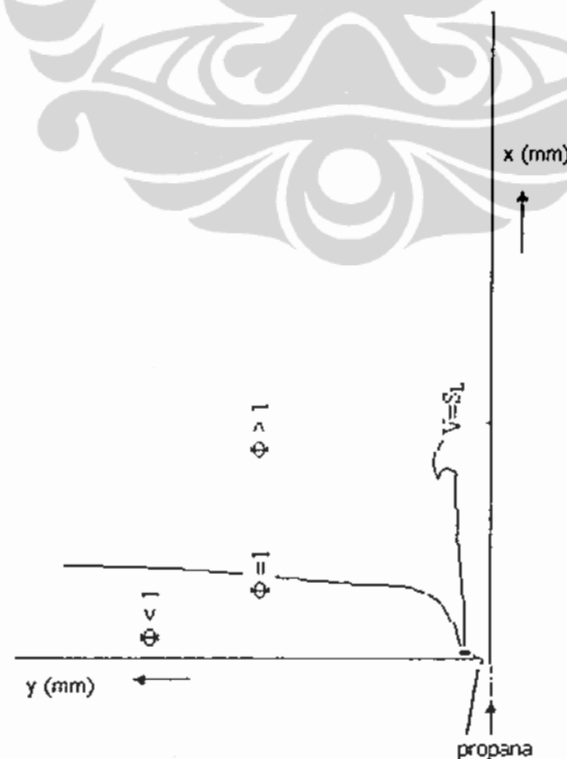
Gambar 3.21 Kontur aliran fluida keluar nosel
kondisi *attached*, $Q_f = 21.1$ ml/s



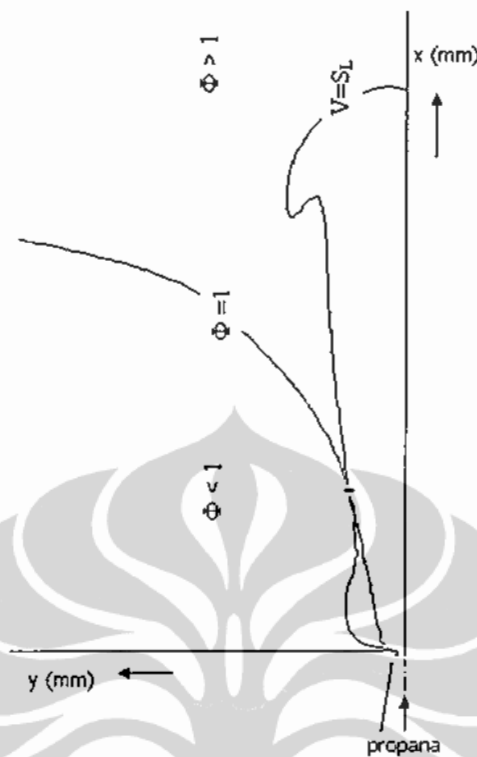
Gambar 3.22 Kontur aliran fluida keluar nosel
kondisi *lifted-flame*, $Q_f = 65.1$ ml/s.

Aliran fluida berkecepatan rendah setelah keluar dari nosel *burner* segera memperlihatkan adanya resirkulasi, yaitu mulai tampak adanya vektor kecepatan yang menjauhi sumbu aksial (memiliki kecepatan aliran radial keluar sumbu). Hal ini menyebabkan difusi gas propana – udara dapat segera terjadi sehingga fluida segera siap untuk mencapai komposisi ideal untuk terbakar. Merujuk pada teori terjadinya liftoff, khususnya Teori I, yang menyatakan bahwa posisi pangkal nyala berada pada kondisi dimana campuran premix memiliki kecepatan aliran laminar maksimum yang memiliki nilai sama dengan kecepatan turbulen pembakaran.

Gambar 3.25 dan Gambar 3.26 memperlihatkan posisi perpotongan antara fluida dengan kondisi stoikiometrik dengan kontur fluida yang memiliki kecepatan sama dengan kecepatan pembakaran laminar maksimum. Kondisi campuran stoikiometrik memiliki nilai rasio ekivalen $\Phi = 1$ untuk temperatur udara 29 °C dan nilai Relative Humidity (RH) = 41 %, maka nilai fraksi massa propana dalam campuran sebesar 5,96 %. Sedangkan kecepatan pembakaran laminar maksimum menurut persamaan (3.22) untuk propana, $S_{L,maks} = 45,26$ cm/s.



Gambar 3.23 Perpotongan antara campuran stoikiometrik dan $S_{L,maks}$ untuk kondisi *attached*



Gambar 3.24 Perpotongan antara campuran stoikiometrik dan $S_{L,maks}$ untuk kondisi *lifted-flame*

Dari Gambar 3.25 dan Gambar 3.26 menunjukkan bahwa perpotongan antara rasio ekivalen $\Phi = 1$ dengan $S_{L,maks}$ untuk laju aliran Propana 21,1 ml/s berada sangat dekat dengan ujung *burner* ($x = 0$), sedangkan untuk laju aliran propana 65,1 ml/s posisi perpotongan tersebut berada pada jarak cukup jauh dari ujung *burner*. Hal ini menunjukkan kesesuaian hasil eksperimen terhadap Teori 1 *liftoff* yang digunakan sebagai dasar pendekatan untuk menerangkan fenomena *lifted-flame* yang terjadi pada nyala difusi propana

Hasil pengukuran rata-rata tinggi api sebesar 452 mm lebih rendah dibandingkan dengan perhitungan tinggi nyala difusi turbulen menurut Hawthorne dan kawan-kawan yang menghasilkan tinggi api sebesar 475,88 mm. Demikian pula terhadap kesesuaian hasil eksperimen persamaan *Lifted-distance* yang dihasilkan sedikit berbeda terhadap rumusan yang dikemukakan oleh Cha M.S dan Chung S.H [3] namun masih mengikuti persamaan linier yang berlaku untuk kondisi nyala *liftoff*, $x_f > 0$, dimana kecepatan aliran gas keluar burner dalam m/s dan *lifted-distance* x_f dalam satuan meter :

$$x_f = 0,0029 v_c - 0,0168$$

Eksperimen

$$\bar{x}_f = 0,002245.v_c - 0,01663$$

Cha M.S dan Chung S.H [3].

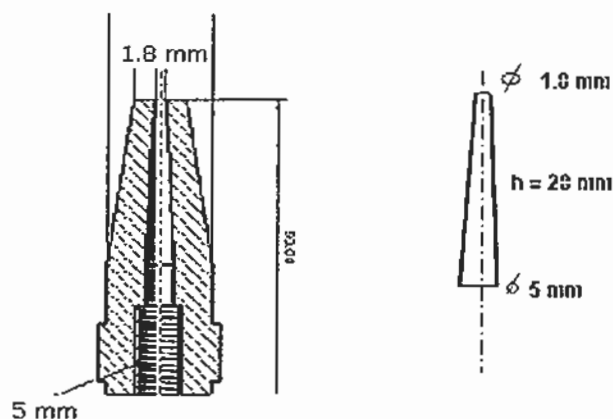
Untuk itu perlu diperhatikan pengaruh bentuk saluran gas pada ujung *burner* terhadap karakteristik *liftoff*, mengingat secara fisik akan berpengaruh terhadap kondisi profil kecepatan awal (*initial velocity profile*) gas setelah keluar dari ujung *burner*.

3.11 Pengaruh Bentuk Saluran Gas terhadap *Liftoff*.

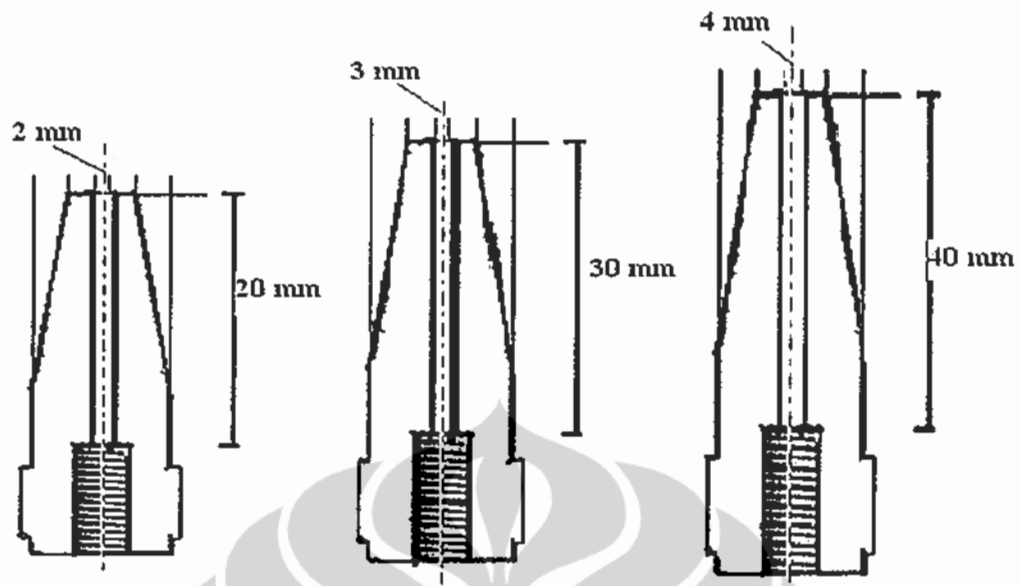
Pengaruh bentuk nosel terhadap *lifted-distance* nyala difusi gas propana dilakukan dengan empat jenis bentuk nosel yaitu satu nosel dengan bentuk saluran dalam menyempit (*cone-nozzle*) dan tiga buah nosel dengan bentuk saluran gas lurus (*straight-nozzle*) dengan rincian sebagai berikut :

Jenis	Diameter ujung <i>burner</i> (mm)	Panjang nosel (mm)
<i>Cone-nozzle</i>	1.8	28
Nosel lurus	2	20
Nosel lurus	3	30
Nosel lurus	4	40

Bentuk *Cone-Nozzle* diperlihatkan dalam Gambar 3.27, sedangkan nosel lurus diperlihatkan dalam Gambar 3.28, dengan perbandingan panjang nosel terhadap diameter ujung burner sebesar 10 kali dalam upaya menstabilkan arah aliran gas dalam saluran nosel.



Gambar 3.25. Bentuk *cone-nozzles* (kiri) dan bentuk saluran gas propana pada ujung burner (kanan).



Gambar 3.26. Bentuk nosel lurus dengan diameter saluran gas 2 mm, 3 mm dan 4 mm

Gas propana dialirkan ke saluran gas pada *burner* melalui rotameter. Pengamatan *lifted-distance* untuk setiap bentuk nosel dilakukan dengan mengubah besaran laju aliran gas. Nyala api yang dihasilkan untuk setiap kondisi ditangkap melalui kamera digital. Metode nilai puncak pertama dari nilai RGB digunakan untuk menentukan nilai *lifted distance*, data pengujian diperlihatkan dalam Tabel 3.8 – 3.11 masing-masing untuk pengamatan *lifted distance* nyala gas melalui *cone-nozzle* berdiameter 1.8 mm, nosel lurus berdiameter 2, 3 dan 4 mm.

Tabel 3.8 *Lifted-distance* untuk bentuk *cone-nozzle*, $d = 1,8$ mm

Rotameter (mm)	Debit gas, Q_f (l/s)	Lifted-distance x_f (mm)
10	0,0211	0,97
20	0,0251	19,15
30	0,0291	20,58
40	0,0331	25,19
50	0,0371	30,19
60	0,0411	32,85
70	0,0451	38,67
80	0,0491	43,39
90	0,0531	47,33
100	0,0571	53,51
110	0,0611	58,94
120	0,0651	66,13

* $\Delta x_f = \pm 0,13$ mm yang merupakan *systematically error*

Tabel 3.9 *Lifted-distance* untuk bentuk nosel lurus, $d = 2$ mm

Rotameter (mm)	Debit gas, Q_r (l/s)	Lifted-distance x_f (mm)
8	0,0203	0
16	0,0235	0
24	0,0267	0
40	0,0331	0
60	0,0411	0
70	0,0451	0
90	0,0531	16,67
100	0,0571	17,50
120	0,0651	25,12
140	0,0731	25,12
160	0,0811	31,65
180	0,0891	33,33
200	0,0971	41,60
220	0,1051	45,07
240	0,1131	48,32
260	0,1211	54,91
280	0,1291	61,63
300	0,1371	61,63

* $\Delta x_f = \pm 0,13$ mm yang merupakan *systematically error*

Tabel 3.10 *Lifted-distance* untuk bentuk nosel lurus, $d = 3$ mm

Rotameter (mm)	Debit gas, Q_r (l/s)	Lifted-distance x_f (mm)
10	0,0211	0
20	0,0251	0
40	0,0331	0
60	0,0411	0
80	0,0491	0
100	0,0571	2,65
120	0,0651	2,66
150	0,0771	18,43
160	0,0811	23,74
180	0,0891	26,86
200	0,0971	34,32
220	0,1051	42,93
240	0,1131	44,60
250	0,1171	44,70
270	0,1251	48,30
300	0,1371	50,00

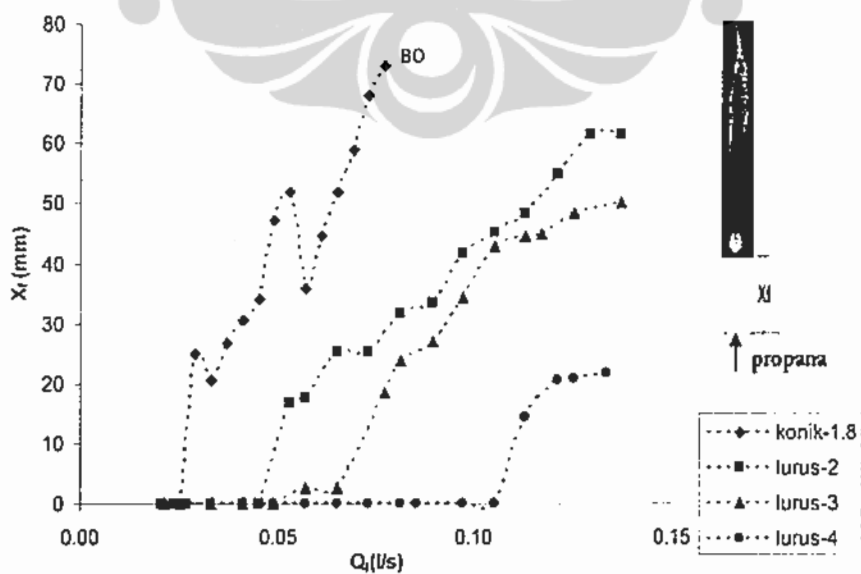
* $\Delta x_f = \pm 0,13$ mm yang merupakan *systematically error*

Tabel 3.11 Lifted-distance untuk bentuk nosel lurus, $d = 4$ mm

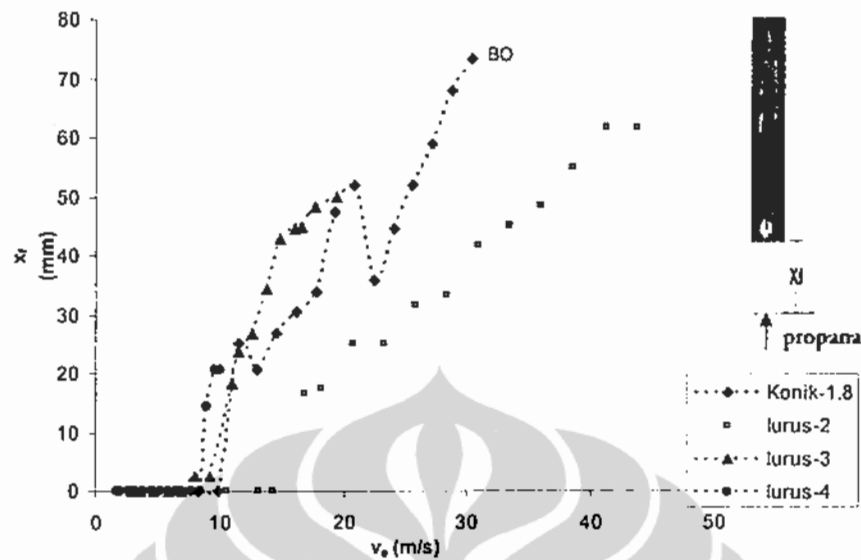
Rotameter (mm)	Debit gas, Q_f (l/s)	Lifted-distance x_f (mm)
10	0,0211	0
20	0,0251	0
40	0,0331	0
60	0,0411	0
80	0,0491	0
100	0,0571	0
120	0,0651	0
140	0,0731	0
160	0,0811	0
170	0,0851	0
200	0,0971	0
220	0,1051	0
240	0,1131	14,27
260	0,1211	20,60
270	0,1251	20,70
290	0,1331	21,71

* $\Delta x_f = \pm 0,13$ mm yang merupakan *systematically error*

Gambar 3.29 menampilkan hasil pengukuran *lifted-distance* terhadap debit aliran gas propana untuk berbagai bentuk ujung nosel yang diberikan, sedangkan Gambar 3.30 menampilkannya terhadap kecepatan rata-rata aliran gas keluar *burner* yang diperoleh dari pembagian debit aliran gas terhadap luas laluan nosel pada ujung *burner*.



Gambar 3.27 Lifted-distance, x_f terhadap debit aliran gas keluar nosel *burner*, Q_f .

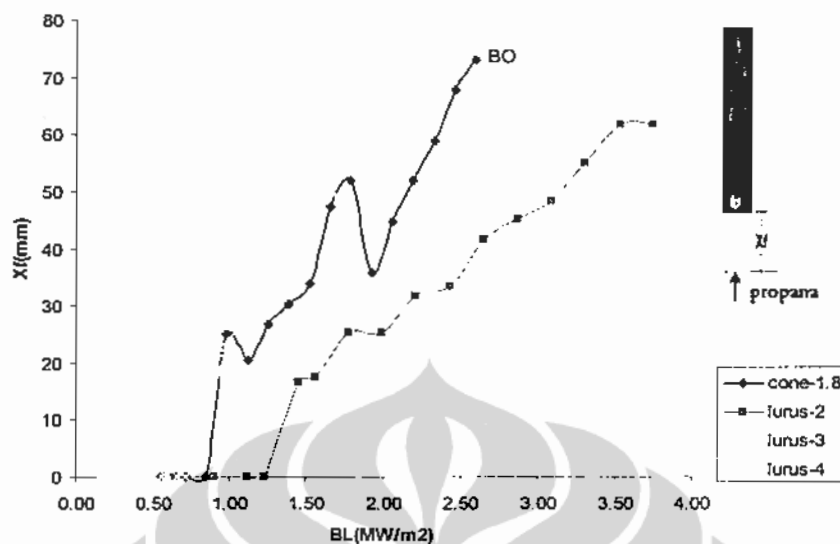


Gambar 3.28 *Lifted-distance*, x_f , terhadap kecepatan aliran gas keluar nosel, v_e

Temperature gas propana saat keluar burner $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ sehingga nilai massa jenis propana $\rho_f = 1,846\text{ kg/m}^3$ serta nilai kalor bawah (LHV) = $46,45\text{ kJ/kg}$ [29]. Hubungan antara *Lifted-distance* terhadap besarnya beban pembakaran (*Burning Load*, BL) ditampilkan pada Gambar 3.31 dengan nilai *Burning Load* dinyatakan seperti pada Persamaan (3.62)

$$BL = \frac{\rho_f \cdot Q_f \cdot LHV}{A} \quad (3.62)$$

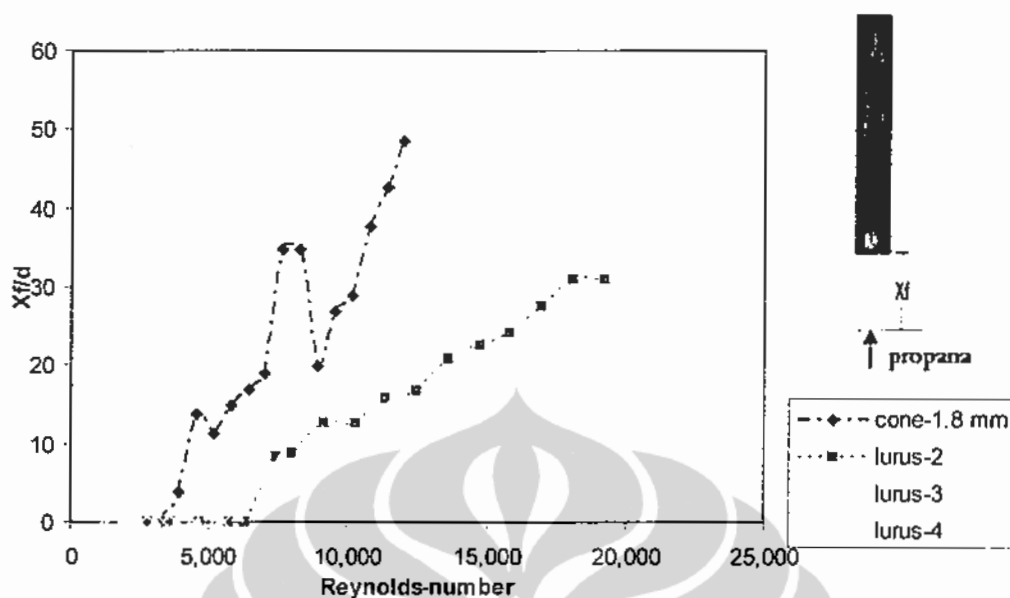
Dimana A merupakan luas laluan gas pada ujung nosel burner.



Gambar 3.29 *Lifted-distance* nyala gas Propana terhadap nilai beban pembakaran (BL) untuk berbagai jenis nosel.

Gambar 3.31 memperlihatkan bahwa untuk bentuk nosel lurus, semakin besar diameter nosel *burner* berdasarkan nilai beban pembakaran (burning load, BL) semakin cepat terjadi lifted yaitu : nosel lurus berdiameter 4 mm mulai terjadi liftoff pada nilai BL 0,77 MW/m², nosel lurus berdiameter 3 mm mulai liftoff pada BL 0,79 MW/m², nosel lurus berdiameter 2 mm mulai liftoff pada nilai BL 1.45 MW/m², sedangkan bentuk nosel konik berdiameter 1.8 mm menunjukkan lifted mulai terjadi pada nilai BL 0.98 dan terjadi Blow-Off (BO) pada beban pembakaran sebesar 2.6 MW/m².

Hal lain yang sangat menarik untuk diamati adalah grafik antara besaran tanpa dimensi yang menunjukkan perbandingan jarak lifted terhadap diameter nosel, x_f/d , dengan nilai Reynolds gas keluar nosel, $Re_j = \rho_c v_c R / \mu$, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.32.



Gambar 3.30 Bilangan tak berdimensi *lifted-distance* terhadap Bilangan Reynold gas saat keluar ujung *burner*

Nozel lurus dengan diameter aliran gas 2, 3 dan 4 mm membentuk persamaan garis yang hampir berimpit yang menghubungkan bilangan tanpa dimensi *lifted-distance* terhadap bilangan tanpa dimensi Reynolds aliran gas keluar nosel. Hal ini menunjukkan bahwa bilangan tanpa dimensi *lifted* hanya dipengaruhi oleh nilai dari bilangan Reynolds aliran gas keluar burner dan tidak dipengaruhi oleh diameter saluran gas pada ujung burner. Sedangkan pada nosel konik, garis yang dibuat pada grafik bilangan tanpa dimensi *lifted-distance* dan bilangan Reynolds tampak terpisah dari grafik dengan bentuk saluran gas lurus.

Dari gambar 3.32 dapat dibuat persamaan *lifted* tanpa dimensi untuk setiap bentuk saluran. Persamaan *lifted* tanpa dimensi untuk bentuk saluran gas konik dapat dinyatakan dalam Persamaan (3.63) dan untuk bentuk saluran gas lurus diberikan dalam Persamaan (3.64).

Persamaan untuk nosel konik :

$$\frac{x_f}{d} = 0.0045 Re_j - 10.791 \quad (3.63)$$

Persamaan untuk nosel lurus :

$$\frac{x_f}{d} = 0.002 Re_j - 7.0756 \quad (3.64)$$

Persamaan (3.63) dan (3.64) berlaku untuk kondisi nyala *liftoff*, dimana pada umumnya aliran gas sudah berada dalam kondisi aliran turbulen, dengan nilai Reynolds diatas 2000, untuk bentuk konis hasil pengukuran menghasilkan dua buah punuk yang dalam persamaan ini tetap dipaksa mengikuti persamaan linier sesuai dengan persamaan yang dihasilkan untuk saluran gas lurus.

Penentuan awal nilai Bilangan Reynolds aliran gas mencapai kondisi *Liftoff* dapat diturunkan dari Persamaan (3.62) dan Persamaan (3.63) yaitu dengan memasukkan nilai $x_f = 0$ sehingga diperoleh :

- Untuk nosel konis, Bilangan Reynolds terkecil terjadinya *liftoff*:

$$Re_{j,0} = 2398$$

- Untuk nosel lurus, Bilangan Reynolds terkecil terjadinya *liftoff*:

$$Re_{j,0} = 3538$$

Sehingga untuk kedua bentuk nosel tersebut dapat dikatakan bahwa awal terbentuknya *liftoff* pada nyala gas dengan nosel berbentuk konik terjadi pada nilai Reynolds aliran gas 32% lebih rendah dibandingkan dengan nosel lurus.

Konstanta pengali Bilangan Reynolds (suku pertama) untuk saluran gas berbentuk konik memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan konstanta suku pertama untuk saluran lurus, ini menunjukkan bahwa bentuk saluran konik memiliki sensitivitas lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk saluran gas lurus. Dari Persamaan (3.61) dan (3.62) maka diperoleh kesimpulan bahwa bentuk nosel konik memiliki sensitivitas *lifted distance* 125 % lebih tinggi dibandingkan sensitivitas nosel lurus terhadap perubahan laju aliran gas.

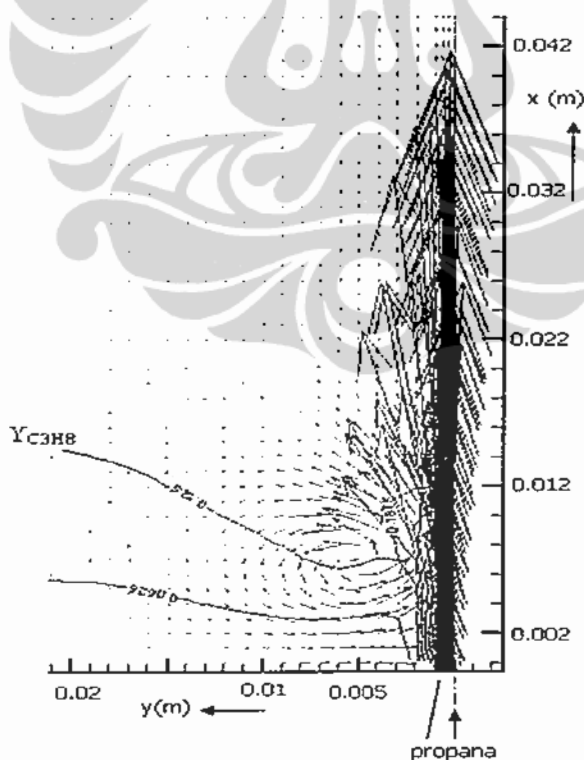
Simulasi aliran fluida dengan CFD dilakukan untuk dapat mengetahui pola aliran fluida serta pola pencampuran antara gas dan udara dalam kaitannya terhadap fenomena *lifted* yang terjadi terhadap bentuk saluran gas pada ujung *burner*.

Simulasi dilakukan untuk kondisi debit aliran gas yang sama antara nosel konik berdiameter 1.8 mm dan nosel lurus berdiameter 2 mm namun kondisi nyala yang berbeda. Untuk memperjelas pengaruh bentuk saluran masuk gas terhadap pola aliran gas di sekitar ujung *burner*, data eksperimen yang digunakan dalam simulasi adalah dengan debit aliran gas sebesar 33,1 ml/s. Karena pada laju

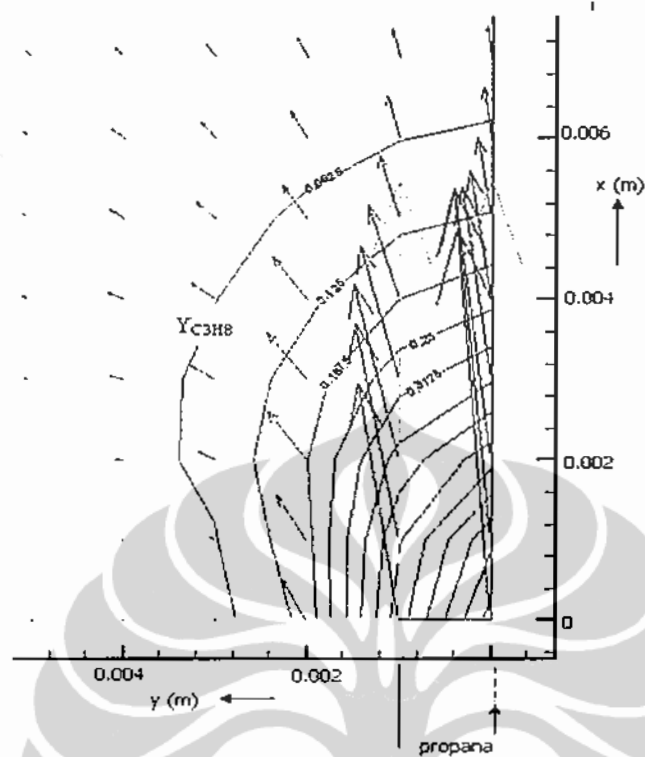
aliran gas sebesar itu nyala api yang terbentuk pada nosel konik menghasilkan nyala api yang sudah berada pada kondisi *liftoff*, sedangkan pada nosel lurus kondisi nyala api masih dalam keadaan *attached*.

Pemodelan dengan CFD mengikuti langkah yang sama dengan yang telah dijelaskan pada sub.bab. 3.9. Ukuran grid 1x1 mm dengan model pemecah masalah (*solver*) antara lain : Model *axisymmetric* dengan kondisi tunak, *k-ε standard*, *species transport*, reaksi volumetrik dengan model reaksi Eddy disipation.

Gambar 3.33 dan 3.34 menggambarkan vektor kecepatan fluida disekitar ujung nosel. Dengan membandingkan ke dua gambar tersebut pusaran atau resirkulasi terjadi pada fluida yang keluar dari ujung burner dengan saluran gas berbentuk konik. Sedangkan pada saluran gas lurus aliran terlihat teratur dan teratur mendekati kondisi laminar hal sebaliknya tampak pada nosel konik yaitu pola aliran bersifat turbulen.

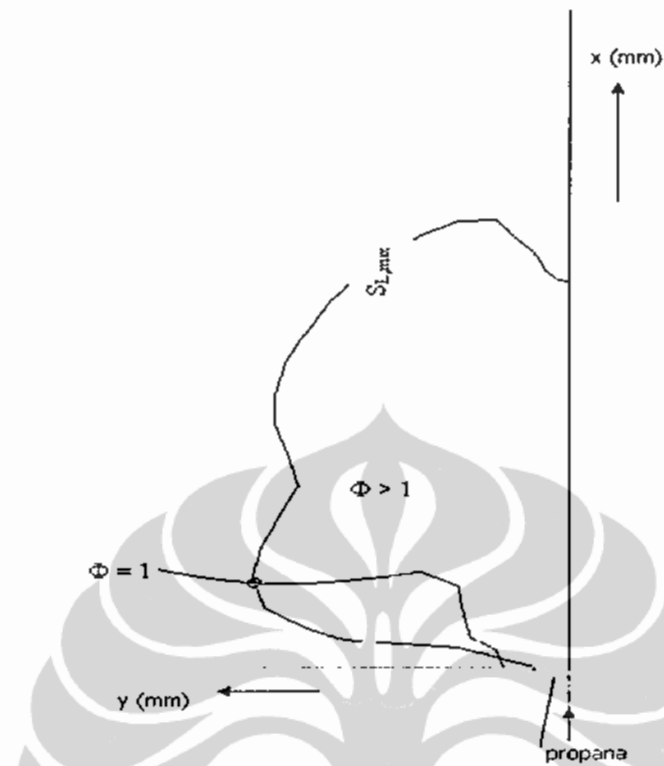


Gambar 3.31 Pola aliran fluida disekitar ujung *burner* untuk nosel konik, $d = 1,8 \text{ mm}$, $Q_f = 33,1 \text{ ml/s}$, kondisi *liftoff*.

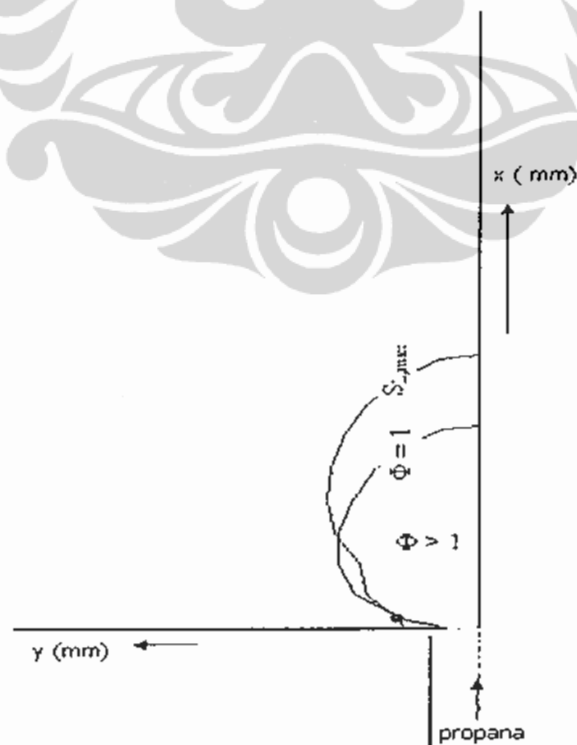


Gambar 3.32 Pola aliran fluida disekitar ujung *burner* untuk nosel lurus, $d = 2\text{mm}$, $Q_f = 33.1\text{ ml/s}$, *attached-flame*.

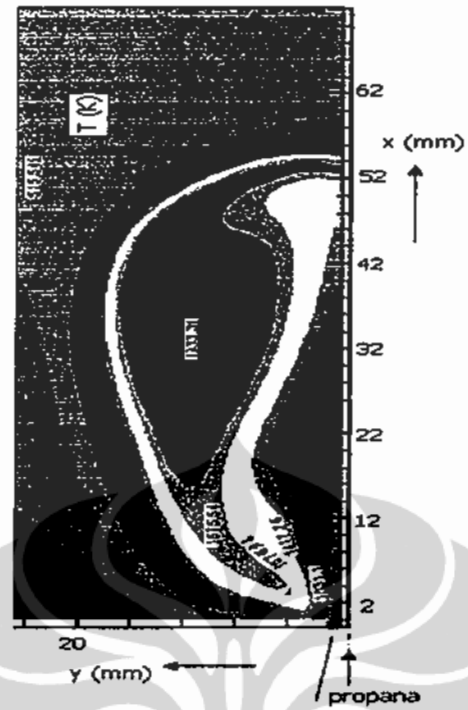
Selain pola aliran, posisi perpotongan antara rasio ekivalen $\Phi = 1$ dan kecepatan pembakaran pembakaran laminar maksimum $S_{l,\text{maks}} = 45.26\text{ cm/s}$ diperoleh dari hasil simulasi fluida dingin CFD diperlihatkan pada Gambar 3.35 untuk nosel konik dengan laju aliran gas 33.1 ml/s dan nyala *lift-off*. Gambar 3.36 menampilkan hasil simulasi untuk nosel lurus dengan laju aliran gas 33.1 ml/s dan kondisi nyala *attached*.



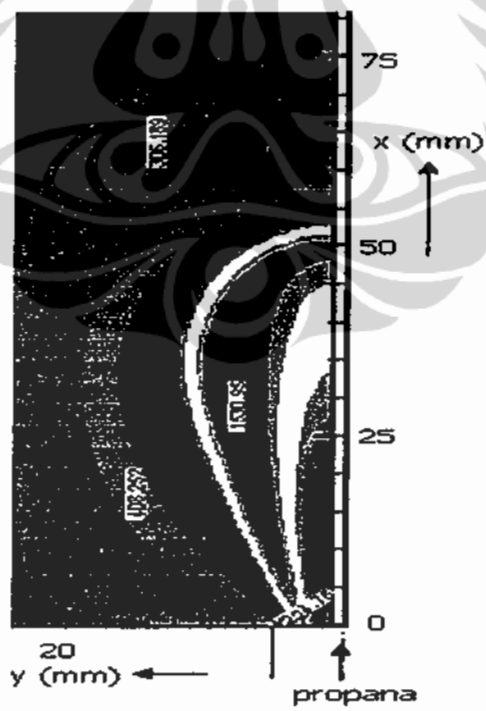
Gambar 3.33 Perpotongan antara campuran stoikiometrik dan $S_{L,max}$ untuk nosel konik dan kondisi *lift-off*.



Gambar 3.34 Perpotongan antara campuran stoikiometrik dan $S_{L,max}$ untuk nosel lurus dan kondisi *attached*.



Gambar 3.35 Kontur temperatur nyala untuk nosel konik, kondisi *lifted*

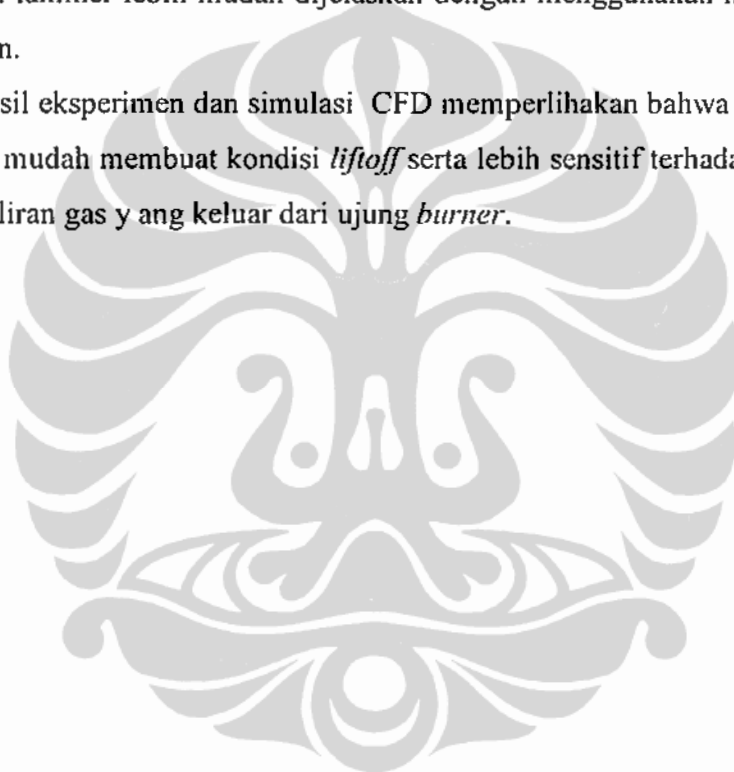


Gambar 3.36 Kontur temperatur nyala untuk nosel lurus, kondisi *attached*

Hasil simulasi dengan model reaksi pembakaran : reaksi volumetrik dengan model interaksi reaksi kimia dengan turbulensi menggunakan model *Eddy dissipation* diperlihatkan pada Gambar 3.37 untuk nosel konik dan Gambar 3.38 untuk nosel lurus pada debit aliran gas yang sama sebesar 33.1 ml/s

Dari gambar-gambar hasil simulasi fluida dingin dan reaksi pembakaran CFD, tampak bahwa teori *lift-off* yang menyatakan posisi pangkal nyala terjadi pada campuran *premix* dengan kecepatan lokal sama dengan kecepatan pembakaran laminer lebih mudah dijelaskan dengan menggunakan hasil simulasi fluida dingin.

Hasil eksperimen dan simulasi CFD memperlihatkan bahwa bentuk nosel konik lebih mudah membuat kondisi *lift-off* serta lebih sensitif terhadap perubahan kecepatan aliran gas yang keluar dari ujung *burner*.



BAB 4 PENGARUH SEMBURAN UDARA TERHADAP STABILISASI *LIFT-OFF*

Penelitian mengenai stabilisasi *lifted-flame* pada pembakaran gas etilene dengan udara *co-flow* telah dilakukan oleh Corey D. Brown dan kawan-kawan [10] yang menyatakan bahwa pada laju aliran udara konstan, peningkatan laju aliran etilene menghasilkan kondisi liftoff yang lebih stabil yaitu *lifted distance* yang lebih rendah, selain itu simulasi numerik untuk nyala difusi dengan penyertaan pelepasan panas nyala api menghasilkan kondisi pangkal nyala api lebih mendekati ujung burner dibandingkan dengan simulasi yang mengabaikan adanya pelepasan panas dari nyala api yang terbentuk [11].

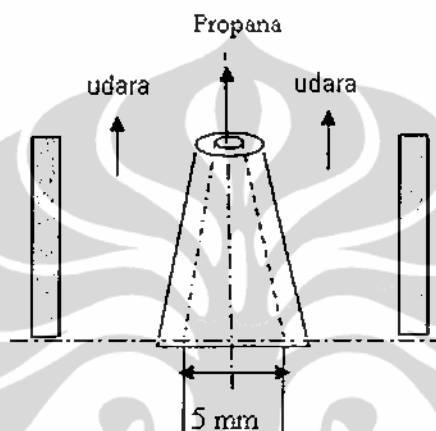
Penelitian ini ditujukan untuk mengetahui lebih dalam pengaruh laju dan arah semburan udara terhadap perubahan *lifted distance* dari nyala difusi gas Propana. Gas Propana dialirkan melalui *cone-nozzle* dengan diameter keluar gas 1,8 mm. Sedangkan udara disemurkan secara *co-flow* di bagian luar gas dengan atau tanpa melalui cincin pengarah yang membentuk sudut aliran terhadap arah aliran gas. Perubahan *lifted distance* untuk setiap kondisi diamati untuk mengetahui pengaruh hembusan udara terhadap kestabilan nyala api yang dihasilkan.

4.1 Pengaruh Aliran Udara *Co-flow*

4.1.1 Eksperimen

Untuk pengujian *lifted distance* dengan aliran udara menyelimuti aliran gas, skema alat uji pada Gambar 2.1 dipergunakan. Awal percobaan selubung kaca dibuka sehingga nyala difusi gas terjadi pada kondisi udara diam (*quiescence-air*). Setelah kondisi liftoff tercapai selubung kaca digunakan dan udara dialirkan perlahan. Perubahan *lifted distance* akibat aliran udara diabadikan dengan video kamera. Dari hasil rekaman menggunakan video kamera dilakukan pemecahan gambar dengan *adobe premiere* sehingga dalam 1 detik pengamatan diperoleh 25 buah gambar. Dari gambar-gambar tersebut dilakukan penentuan *lifted-distance* terukur untuk tiap gambar dengan metode RGB.

Gas Propana dialirkan melalui nosel berbentuk *cone* dengan diameter dalam laluan gas 1,8 mm dan diameter luar 6 mm. Sedangkan udara dialirkan pada annulus antara selubung luar *burner* dengan nosel *burner*, dimana diameter dalam selubung luar *burner* sebesar 25 mm. Gambar 4.1 menunjukkan aliran gas propana dan udara pada ujung *burner*, saat akan keluar menuju ruang pembakaran.



Gambar 4.1 Aliran udara *co-flow* serta aliran gas Propana pada ujung *burner*.

Pengujian awal dengan laju aliran gas Propana sebanyak 0,0811 l/s diperoleh *lifted distance* sebesar 80 mm. Selanjutnya udara dialirkan dengan laju aliran diperbesar secara bertahap, perubahan bentuk nyala api direkam dengan video kamera untuk mengetahui perubahan *lifted-distance* yang terjadi. Tabel 4.1 dan Gambar 4.2 memperlihatkan hasil pengujian yang telah dilakukan. Nilai kecepatan udara serta nilai Bilangan Reynolds aliran udara diperoleh dari perhitungan berikut:

Luas penampang aliran udara, A_a :

$$\text{Diameter saluran udara : } d_1 = 6 \text{ mm}$$

$$d_2 = 25 \text{ mm}$$

$$A_a = \pi \cdot (d_2^2 - d_1^2) / 4 = 462,4 \text{ mm}^2$$

Nilai Bilangan Reynolds aliran udara keluar burner, R_{c-a} :

$$\text{Massa jenis udara pada } T = 29 \text{ }^\circ\text{C dan } P = 1 \text{ atm: } \rho_a = 1,18 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Viskositas kinematik udara: } \mu_a = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2.$$

Diameter hidrolis saluran udara :

$$d_h = A_a / \text{Keliling} - \text{terbasahkan}$$

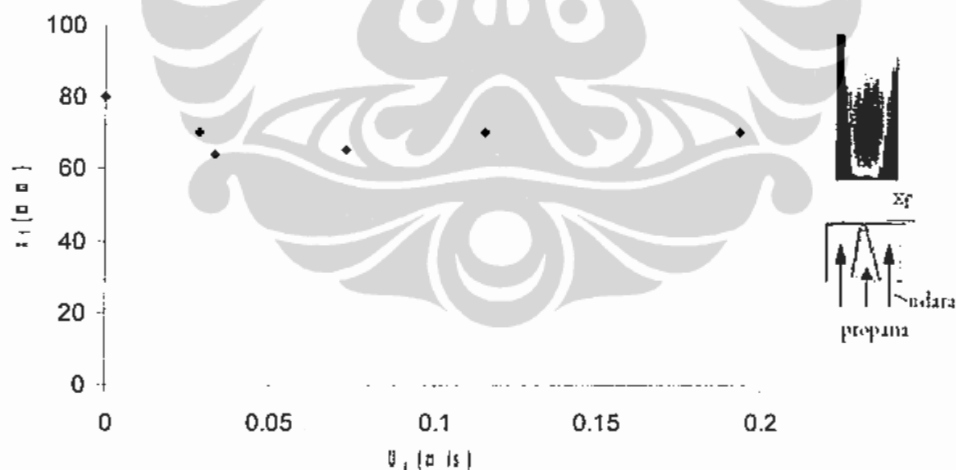
$$d_h = A_a / \pi(d_1 + d_2) = 4,75 \text{ mm}$$

$$R_{e-a} = \frac{\rho_a \cdot u_a \cdot d_h}{\mu_a} = \frac{\rho_a \cdot Q_a \cdot d_h}{\mu_a \cdot A_a}$$

Tabel 4.1 Perubahan *lifted-distance* akibat hembusan udara

Debit udara, Q_a (ml/det)	Kec. Udara rata-rata, v_a (mm/s)	Bilangan Reynolds aliran udara, $Re-a$	Lifted-distance, x_f (mm)
0	0	0	80
13	28,116	8,5184	70
15,48	33,480	10,1436	64
33,88	73,275	22,2005	65
53,28	115,234	34,9127	70
89,32	193,181	58,5285	70

* $\Delta Q_a = 0,6 \text{ ml/s}$; $\Delta x_f = \pm 0,13 \text{ mm}$.



Gambar 4.2 Perubahan Lifted-distance akibat perubahan laju aliran udara co-flow

Debit aliran gas propana pada saat pengujian dibuat konstan sebesar 81,1 ml/s melalui laluan dengan diameter pada ujung nosel sebesar 1,8 mm. sehingga bilangan Reynolds untuk aliran gas propana dapat ditentukan sebagai berikut :

Luas penampang aliran gas, A_f :

$$A_f = \pi \cdot d^2 / 4 = 2,54 \text{ mm}^2$$

Laju aliran gas melalui ujung *burner* :

$$u_e = \frac{Q}{A_f} = 31,87 \text{ m/s}$$

Massa jenis gas propana pada temperatur dan tekanan ruang :

$$\rho_f = 1,82 \text{ kg/m}^3$$

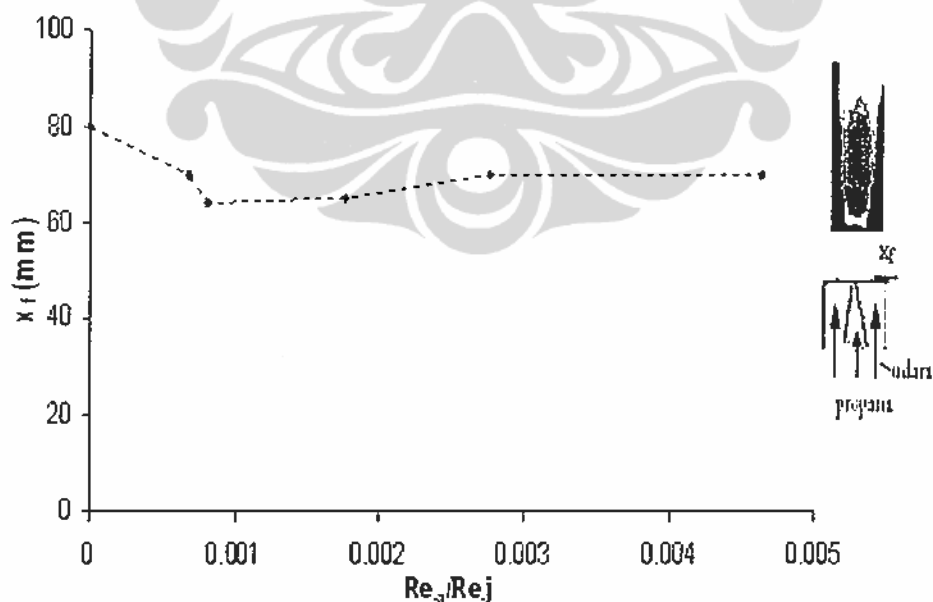
Viskositas kinematika gas pada temperatur dan tekanan ruang :

$$\mu_f = 8,26 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$$

Sehingga nilai Bilangan Reynolds saat gas keluar *burner* sebesar :

$$Re_{-j} = \frac{\rho_f \cdot u_e \cdot d}{\mu_f} = 12646,49$$

Perubahan nilai *lifted-distance* terhadap perubahan perbandingan bilangan Reynolds aliran udara terhadap aliran gas propana (Re_a/Re_j) diperlihatkan pada Gambar 4.3. Penurunan nilai *Lifted-distance* terbesar saat perbandingan bilangan Reynolds udara dan propane mendekati nilai 0.001 (dalam pengujian bernilai 0,0008). Penambahan aliran udara berikutnya mendorong pangkal nyala menjauh kembali dari ujung burner.



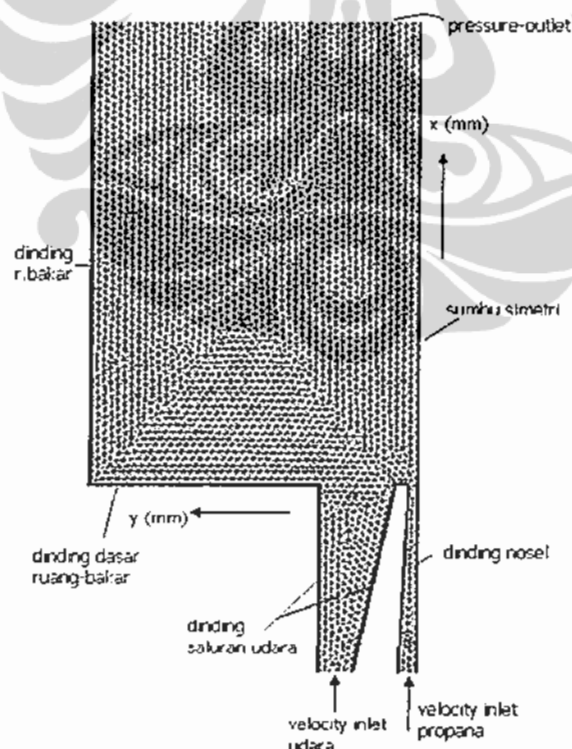
Gambar 4.3 Perubahan nilai *lifted-distance* terhadap nilai perbandingan bilangan Reynolds udara (Re_a) terhadap bilangan Reynolds Propana (Re_j)

Diskusi :

Gambar 4.2 dan dan Tabel 4.1 menunjukkan bahwa pada aliran udara yang cukup rendah hingga 15 ml/s mengakibatkan pangkal nyala bergerak mendekati ujung *burner*. Ini memberikan gambaran bahwa proses pencampuran udara-bahan bakar terjadi lebih cepat dibandingkan pada kondisi udara diam. Peningkatan kecepatan udara memberikan dorongan berupa penambahan momentum udara pada permukaan pangkal nyala hingga pangkal nyala kembali menjauhi ujung burner.

4.1.2 Simulasi dengan CFD dan Diskusi

Simulasi numerik dengan CFD (*Computational Fluid Dynamics*) membantu untuk mengetahui pola aliran fluida serta pencampuran yang terjadi antara bahan bakar dan udara.. Gambar 4.4 memperlihatkan model yang dibuat saat *preprocessing* serta *mesh* yang digunakan adalah elemen *Quad/Tri*.

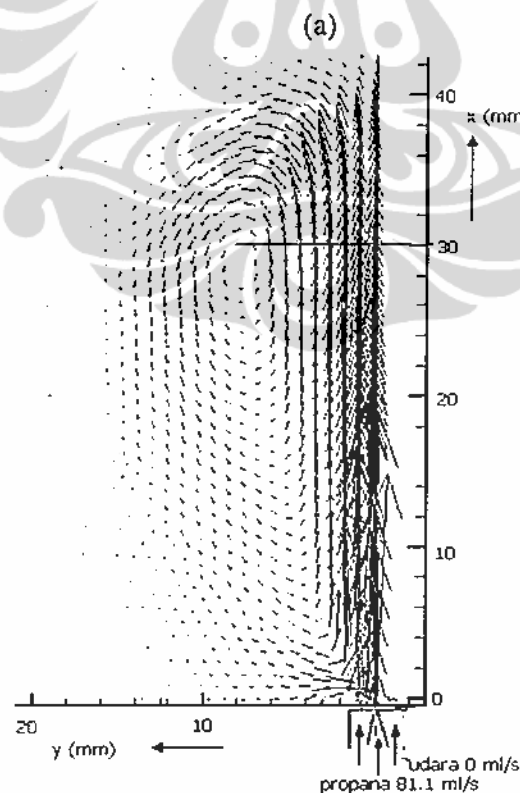


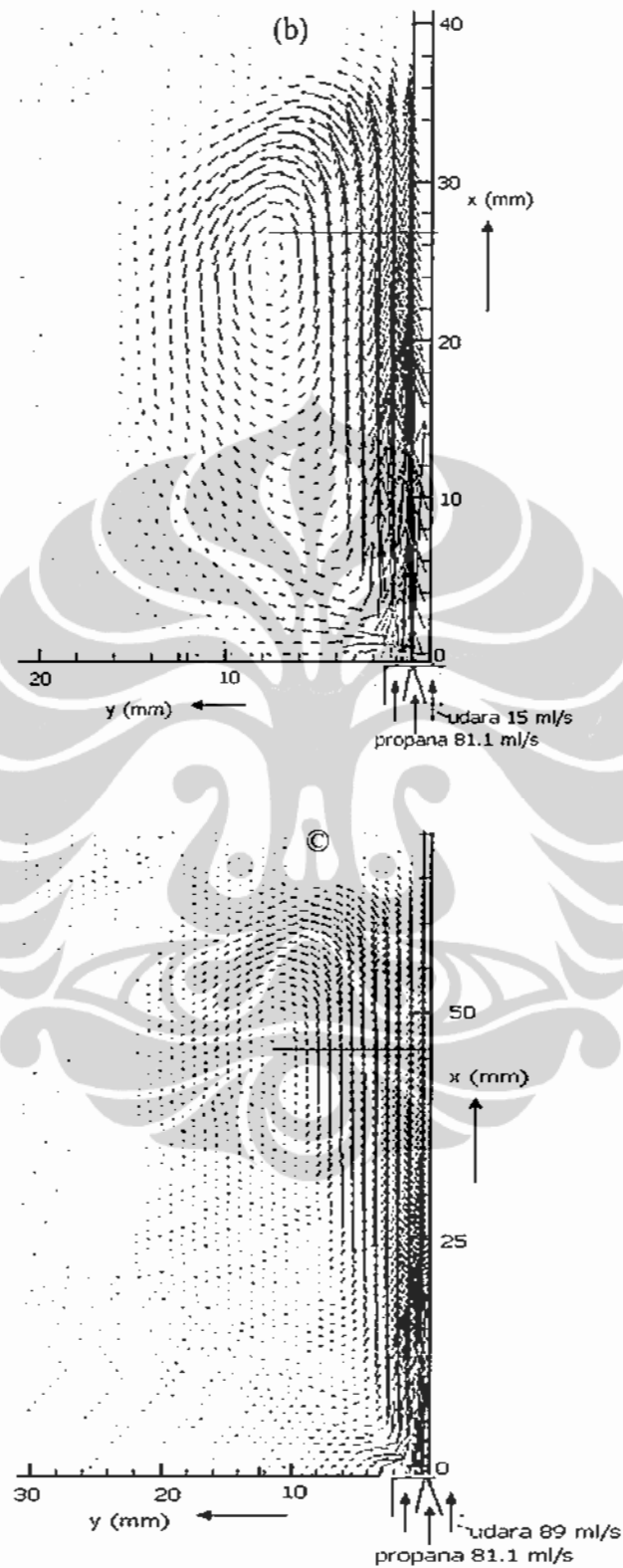
Gambar 4.4 Model dan mesh yang digunakan untuk kasus aliran Udara co-flow terhadap aliran gas Propana.

Dinding ruang bakar didefinisikan sebagai kondisi velocity inlet dengan kecepatan udara sama dengan nol, pada kasus pembakaran difusi gas tanpa aliran paksa udara. Sehingga kondisi dinding ruang bakar dianggap sama dengan kondisi udara atmosfer. Sedangkan pada kasus diberikannya aliran udara, dinding ruang bakar didefinisikan sebagai *wall* untuk menggambarkan adanya selubung kaca sebagai pembatas ruang bakar terhadap udara sekitar. Ukuran ruang bakar dalam model dibuat 1000 mm x 50 mm.

Sisi gas buang didefinisikan sebagai kondisi *Pressure-Outlet* untuk membebaskan debit aliran gas buang sesuai hasil perhitungan/komputasi. Dinding dasar ruang didefinisikan sebagai *velocity inlet* dengan aliran udara sebesar 0 m/s untuk memberikan batas pada dasar ruang bakar bersentuhan langsung dengan udara.

Gambar 4.5 memperlihatkan vektor kecepatan yang terdapat pada ruang bakar untuk kondisi tanpa injeksi udara (a), injeksi udara 15 ml/s (b), dan injeksi udara 89 ml/s (c).

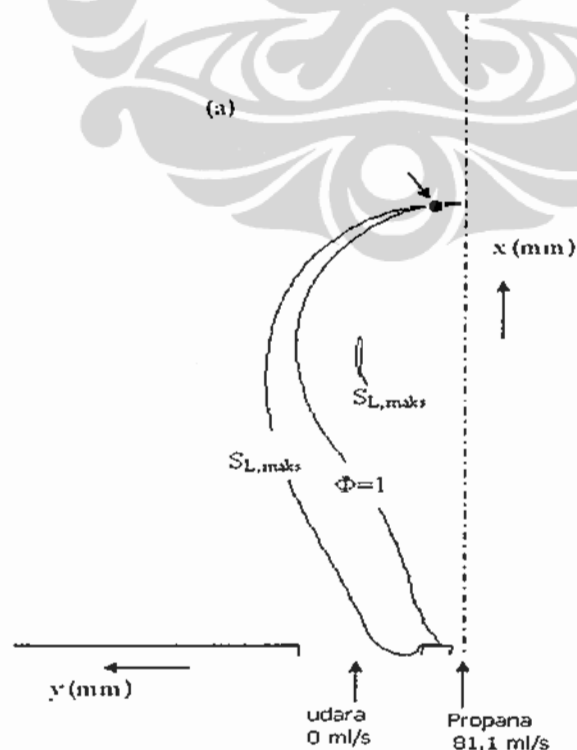


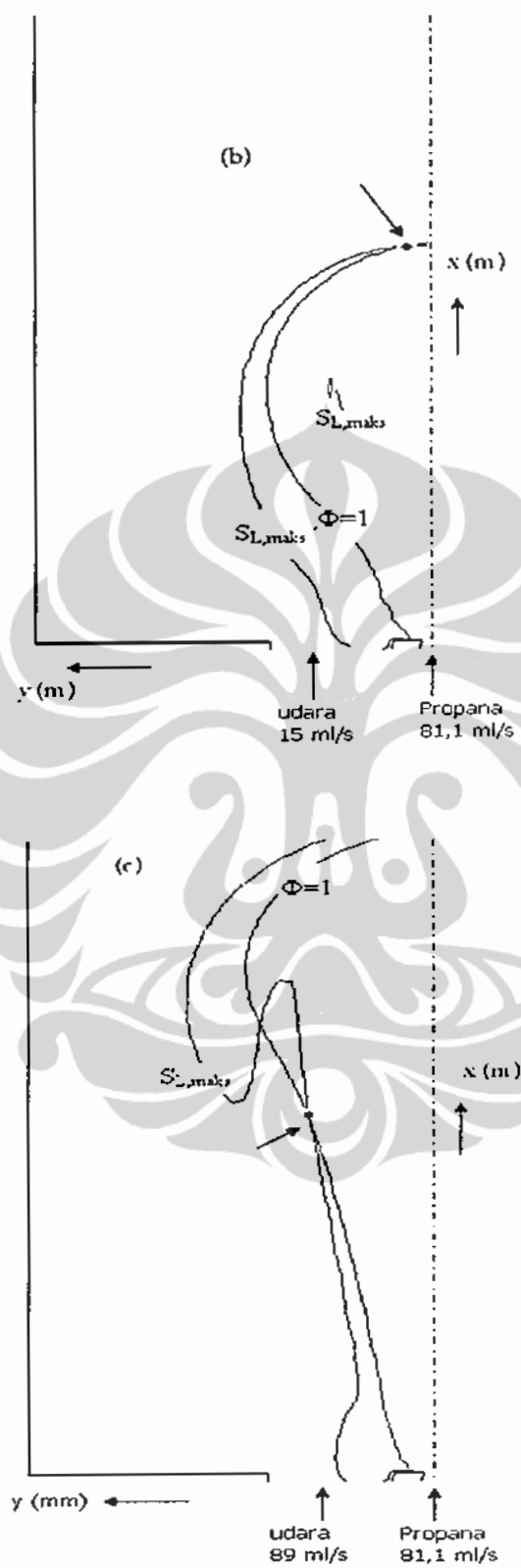


Gambar 4.5. Vektor kecepatan aliran gas-udara dalam daerah bakar untuk (a) Kondisi tanpa injeksi udara, (b) Injeksi udara 15 ml/s, dan (c). injeksi udara 89 ml/s

Aliran udara berkecepatan rendah (15 ml/s) membuat aliran arah keluar sumbu aksial berada pada jarak yang lebih dekat dibandingkan kondisi aliran gas propana tanpa aliran udara dan dengan aliran udara 89 ml/s. Hal ini memberikan ilustrasi bahwa pola aliran radial membentuk pola resirkulasi yang memacu terjadinya proses difusi udara – bahan bakar. Ini terbukti dengan kesesuaian hasil eksperimen yang menunjukkan aliran udara 15 ml/s menyebabkan *lifted-distance* bertambah pendek dibandingkan tanpa aliran udara. Hal sebaliknya, peningkatan kecepatan aliran udara membuat *lifted-distance* kembali bertambah panjang, hal ini dimungkinkan dari adanya peningkatan momentum udara yang mendorong pangkal nyala lebih menjauh dari Ujung burner.

Perpotongan antara kontur campuran stoikiometrik yaitu pada daerah campuran yang memiliki rasio ekivalen sama dengan satu, $\Phi = 1$ atau fraksi massa propana = 0.06, dengan kecepatan local fluida yang sama dengan kecepatan pembakaran laminar maksimum, $S_{L,max} = 0.4526$ m/s (sub bab 3.8) diperlihatkan pada Gambar 4.6 masing-masing untuk kondisi pembakaran difusi gas pada udara diam, dengan aliran udara *co-flow* 15 ml/s dan aliran udara *co-flow* 89 ml/s.

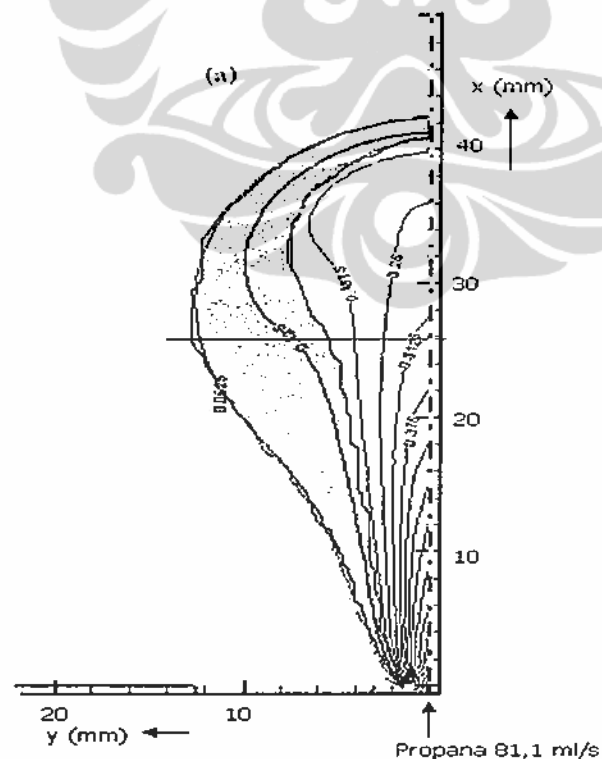


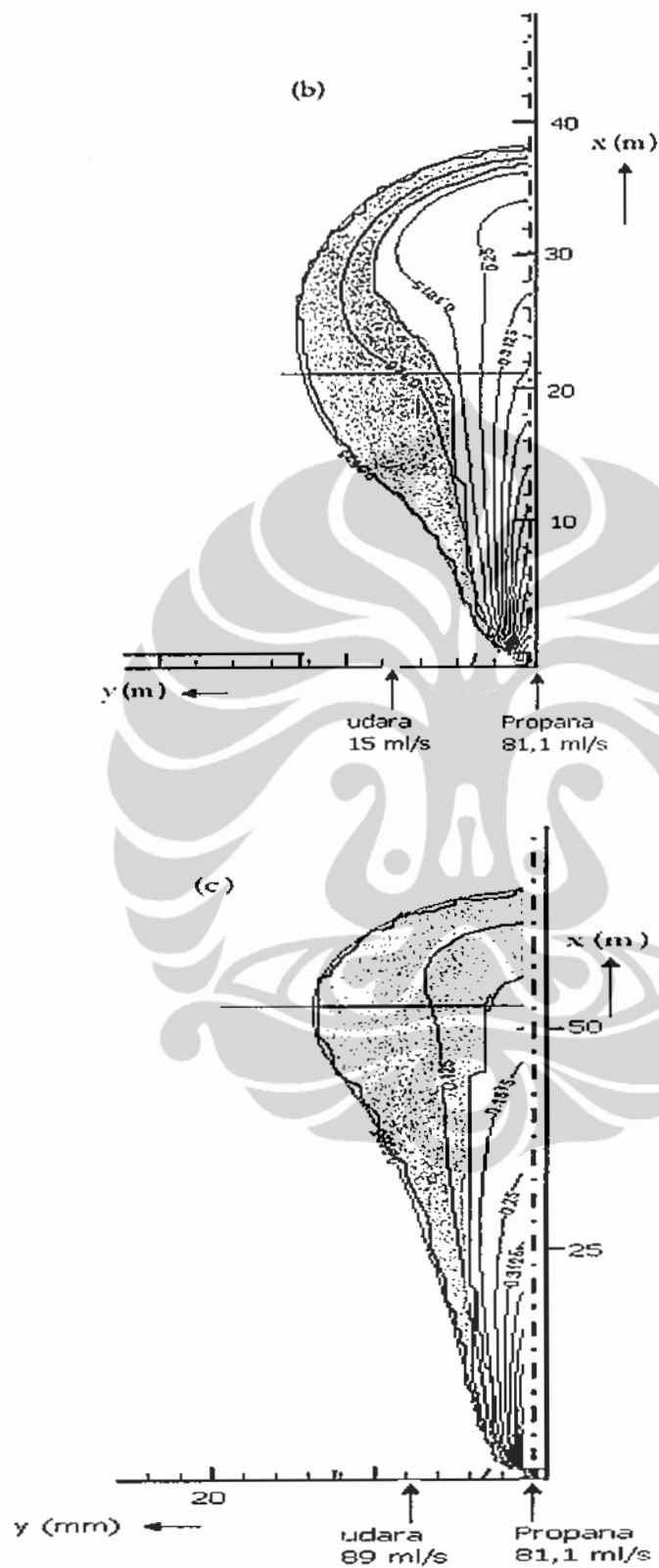


Gambar 4.6. Titik potong kontur $\phi = 1$ dengan $S_{L,max}$
 (a) Dalam udara diam (*Quiescence-air*)
 (b) Aliran udara rendah, $Q_a = 15$ ml/s ; © Aliran udara $Q_a = 89$ ml/s

Posisi titik perpotongan antara kondisi stoikiometrik dengan kecepatan lokal fluida sama dengan kecepatan laminar maksimum bahan bakar ditunjukkan oleh tanda panah dalam gambar. Gambar 4.6 (b) memperlihatkan kondisi pemberian aliran udara yang rendah (15 ml/s) mengakibatkan titik potong garis stoikiometrik dengan kecepatan fluida sama dengan kecepatan laminernya berada pada jarak terdekat dengan Ujung burner, sedangkan pemberian aliran udara berkecepatan 89 ml/s membuat titik perpotongan menjadi bertambah jauh. Kondisi ini bersesuaian dengan hasil eksperimen yang memperlihatkan pemberian aliran udara 15 ml/s membuat pangkal nyala menjadi lebih mendekati ke ujung burner.

Daerah dengan sebaran fluida yang memiliki kondisi campuran mampu bakar (*flammability limit*) untuk gas propana diperlihatkan pada Gambar 4.7. Daerah mampu bakar dinyatakan pada daerah dengan kondisi fraksi massa $Y_{C_3H_8} = 0,013 - 0,152$. Dalam gambar batas terendah fraksi massa propana yang mampu terdeteksi adalah 0,0625.

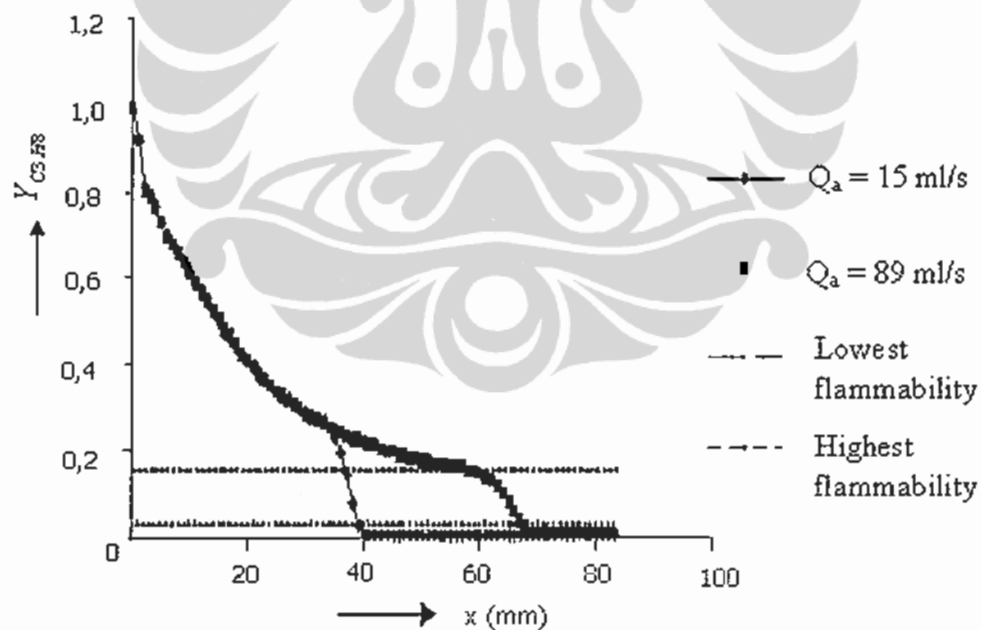




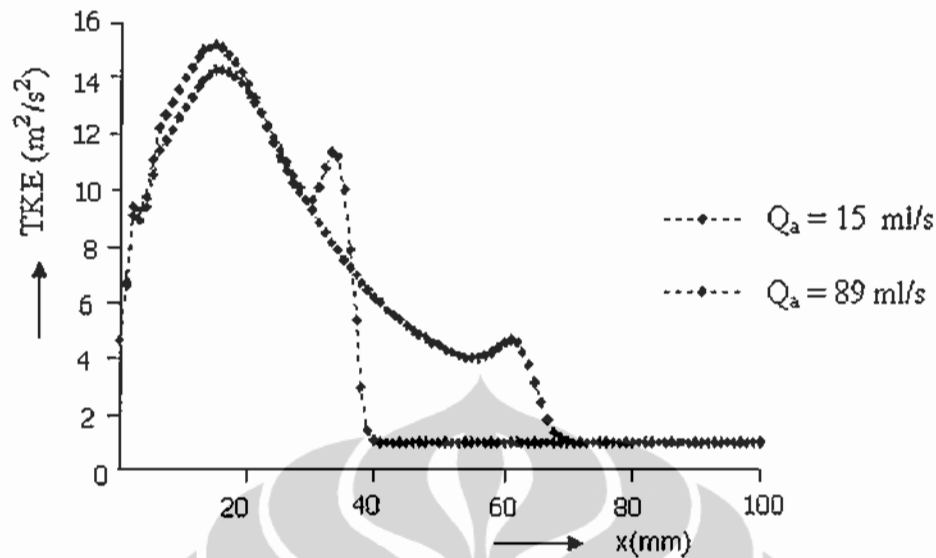
Gambar 4.7 Batas mampu bakar fluida campuran dalam ruang bakar :
 (a) Laju aliran udara 0 ml/s, (b) Laju aliran udara 15 ml/s dan
 (c) Laju aliran udara 89 ml/s

Dari ketiga gambar 4.7, kontur fraksi massa propana untuk aliran udara 15 ml/s memberikan bentuk kontur yang lebih gemuk dan pendek. Dengan demikian aliran udara 15 ml/s memberikan jarak pangkal nyala dengan posisi terdekat dengan ujung *burner*.

Selain kontur aliran fluida dalam daerah pembakaran, kontur fraksi massa gas Propana dalam ruang bakar diperlihatkan pada Gambar 4.7. daerah berwarna kuning merupakan kondisi campuran yang berada pada batas mampu bakar. Distribusi fraksi massa gas Propana sepanjang sumbu axial diperlihatkan melalui Gambar 4.8. Aliran udara berkecepatan 15 ml/s memberikan distribusi fraksi massa propana sepanjang sumbu aksial lebih cepat masuk dalam daerah batas penyalaan (*flammability limit*) yaitu pada nilai $x = 37$ mm dibandingkan dengan aliran udara 89 ml/s memiliki distribusi fraksi massa propana mulai memasuki daerah batas mampu nyala sebesar $x = 58$ mm.

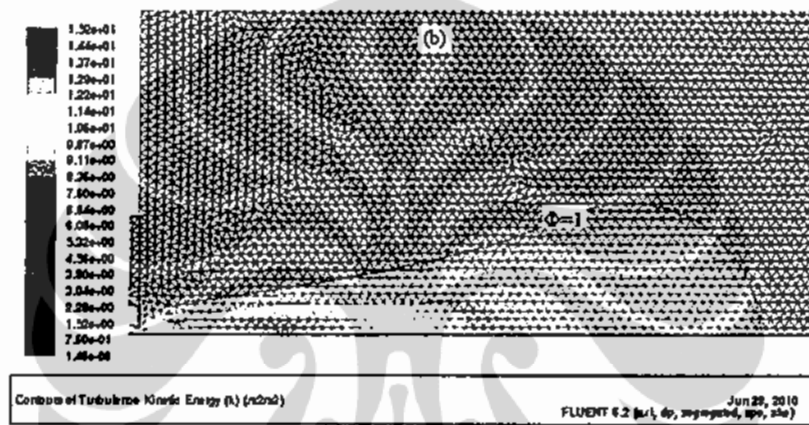
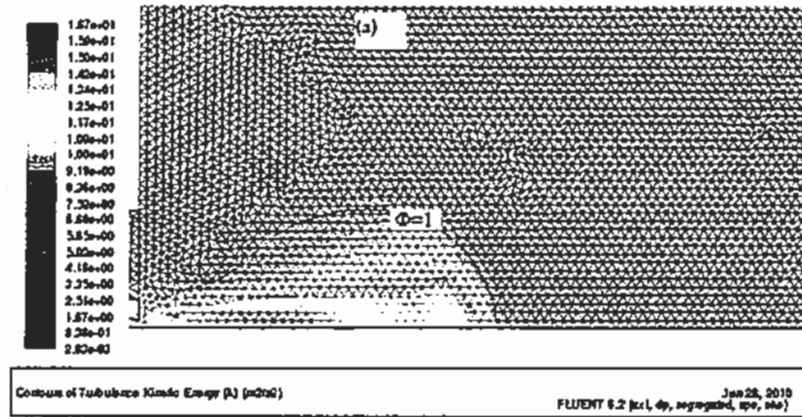


Gambar 4.8 Fraksi massa propana sepanjang sumbu axial untuk $Q_f = 81,1$ ml/s dan semburan udara co-flow 15 ml/s dan 89 ml/s.



Gambar 4.9. Sebaran nilai TKE sepanjang sumbu axial hasil simulasi CFD untuk aliran gas Propana 81.1 ml/s dan semburan udara $Q_a = 15$ ml/s dan 89 ml/s.

Proses pencampuran udara dan bahan bakar gas seringkali dikaitkan dengan sifat turbulensi fluida. Gambar 4.9 memperlihatkan hasil simulasi CFD tampak bahwa nilai TKE (*Turbulence Kinetic Energy*) sepanjang sumbu axial untuk aliran udara 15 ml/s memiliki nilai puncak $15,15 \text{ m}^2/\text{s}^2$ pada jarak $x = 15$ mm yang lebih tinggi dibandingkan aliran udara 89 ml/s sebesar $14,3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ pada jarak $x = 16$ mm. Selain puncak TKE pertama terdapat perbedaan yang sangat mencolok pada nilai serta posisi puncak nilai TKE kedua. Nilai TKE puncak kedua untuk aliran udara 15 ml/s terjadi pada jarak $x = 33$ mm dari mulut burner dengan nilai TKE sebesar $11,36 \text{ m}^2/\text{s}^2$ sedangkan aliran udara 89 ml/s menghasilkan puncak nilai TKE ke dua terjadi pada $x = 61$ mm dengan nilai TKE sebesar $4,63 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Nilai TKE sepanjang sumbu axial dengan jarak dibawah 30 mm untuk kedua jenis aliran berimpit, hal ini disebabkan daerah dekat nosel sangat dipengaruhi oleh aliran gas keluar nosel yang memberikan arah kecepatan radial berharga negatif (vektor kecepatan partikel gas keluar nosel berarah ke pusat sumbu).



Gambar 4.10 Distribusi nilai TKE dan Konkur $\phi=1$
 (a) Aliran udara 15 ml/s
 (b) Aliran udara 89 ml/s

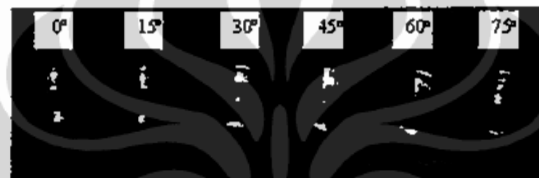
Aliran udara 15 ml/s memberikan nilai puncak TKE sepanjang sumbu aksial lebih dekat mulut *burner* dibandingkan aliran udara 89 ml/s. Hal ini menunjukkan bahwa difusi udara-Propana terjadi lebih dekat ke ujung *burner* untuk aliran udara 15 ml/s dibandingkan dengan hembusan udara sebesar 89 ml/s. Fenomena ini sesuai dengan kondisi pengukuran jarak angkat nyala yang dilakukan dalam eksperimen sebelumnya yang memberikan nilai *lifted-distance* lebih rendah pada kasus aliran udara 15 ml/s dibandingkan dengan aliran udara 89 ml/s.

Distribusi nilai TKE dan konkur rasio ekuivalen dalam ruang bakar untuk aliran udara 15 ml/s dan 89 ml/s diperlihatkan pada Gambar 4.10. Nilai TKE untuk aliran udara 15 ml/s relatif lebih tinggi dibandingkan aliran udara 89 ml/s

dengan nilai maksimum TKE $16,7 \text{ m}^2/\text{s}^2$ untuk aliran 15 ml/s dan $15,2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ untuk aliran udara 89 ml/s . Disamping itu kontur rasio ekivalen $\phi=1$ untuk aliran udara 15 ml/s yang lebih pendek menandakan proses pencampuran udara-bahan bakar lebih cepat dibandingkan aliran udara 89 ml/s . Hal ini sangat sesuai dengan hasil eksperimen yang diperoleh.

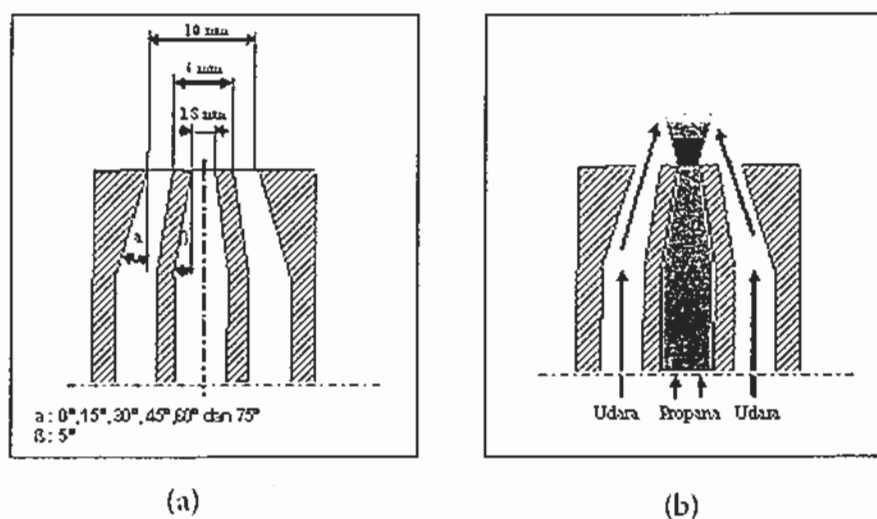
4.2 Pengaruh Arah Aliran Udara

4.2.1 Eksperimen



Gambar 4.11 Cincin-cincin pengarah aliran udara

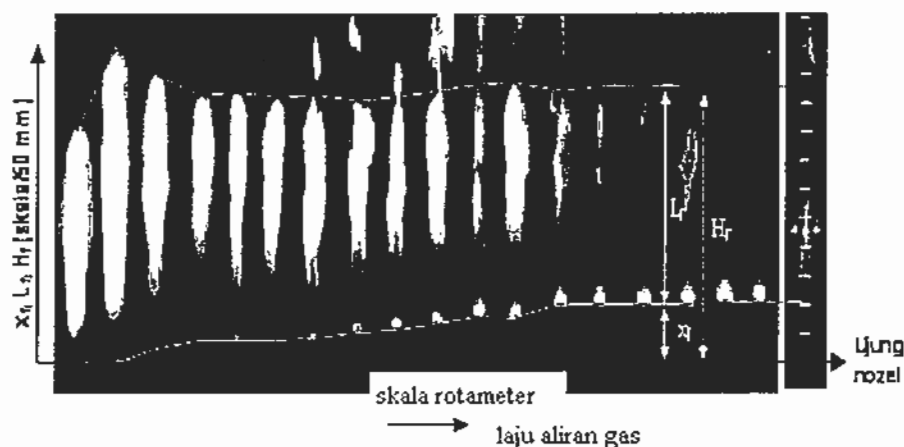
Pengaruh arah semburan udara terhadap perubahan *lifted-distance* nyala difusi gas propana dilakukan dengan menambahkan cincin pengarah aliran udara dengan sudut : 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , dan 75° . Gambar 4.11 memperlihatkan bentuk cincin pengarah udara yang akan dipasang pada ujung burner, sedangkan Gambar 4.12 memperlihatkan saluran udara dan gas pada ujung burner setelah terpasangnya cincin pengarah aliran udara.



Gambar 4.12 Bentuk saluran udara dan gas setelah cincin pengarah terpasang.

Tanpa aliran udara

Gas propana dari tabung propana dialirkan secara bertahap melalui *rotameter* kemudian diteruskan ke *burner* melalui nosel konik yang selanjutnya dialirkan ke dalam ruang bakar yang dibatasi oleh selubung kaca. Gas propana yang terdapat dalam ruang bakar dinyalakan menggunakan pemantik. Laju aliran propana dinaikkan secara bertahap sampai tercapai kondisi nyala api *liftoff* yaitu *lifted-distance* konstan terhadap perubahan laju aliran propana. Dalam penelitian tahap pertama digunakan ring pengarah udara sudut 0° tanpa semburan udara ke dalam ruang bakar. Untuk setiap laju aliran propana, nyala api difusi diamati dan diabadikan dengan video kamera digital dengan kecepatan 25 fps (*frame per secon*). *Lifted-distance* dari nyala api ditentukan dari nilai rata-rata *lifted distance* yang diperoleh dari hasil pengolahan gambar api yang dihasilkan dengan memecah gambar-gambar hasil video kamera dengan perangkat lunak *Adobe Premiere Pro 2.0*. Selanjutnya dilakukan pengolahan gambar dengan *Adobe Photoshop*. Gambar 4.13 menampilkan perubahan dimensi nyala api mengikuti perubahan laju aliran gas Propana. Tampak bahwa *lifted-distance* pada saat skala rotameter mencapai 13 cm atau debit aliran gas propana mencapai 69 ml/s, nilai *lifted distance* x_l relatif tetap mencapai 130 mm. Tabel 4.2 serta Gambar 4.14 menampilkan hasil eksperimen pengukuran dimensi nyala api yang dihasilkan pada pembakaran difusi gas propana tanpa aliran udara.



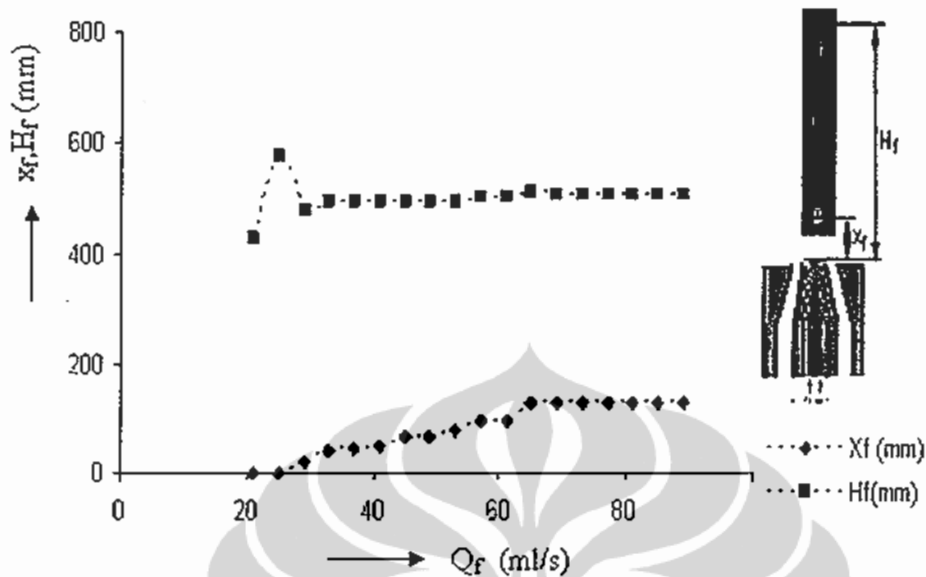
Gambar 4.13 Dimensi api untuk setiap perubahan laju aliran gas.

Dari Gambar 4.14 memperlihatkan pada saat nyala api masih menyentuh ujung burner (*attached*), tinggi api bertambah dengan pertambahan laju aliran bahan bakar. Ini sesuai dengan kondisi nyala laminar, dengan kecepatan sembur bahan bakar rendah. Sedangkan saat nyala terangkat, tinggi nyala api mulai memiliki nilai konstan kondisi ini serupa dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh H.C. Hottel dan W.R. Hawthorne [27].

Panjang nyala semakin pendek dengan bertambahnya kecepatan aliran bahan bakar, hal ini menunjukkan kecepatan pembakaran turbulen yang turut meningkat. Sementara nyala terangkat mulai stabil pada jarak 130 mm di atas ujung burner dengan kecepatan aliran bahan bakar sebesar 65 ml/s.

Tabel 4.2 Hasil pengukuran dimensi nyala hasil pembakaran difusi gas propana tanpa aliran udara.

Laju alir propana Q_f (ml/s)	Lifted-distance x_f (mm)	Tinggi nyala H_f (mm)
21	0	425
25	0	575
29	20	475
33	40	495
37	45	495
41	50	495
45	65	495
49	65	495
53	80	495
57	95	500
61	95	500
65	130	510
69	130	505
73	130	505
77	130	505
81	130	505
85	130	505
89	130	505



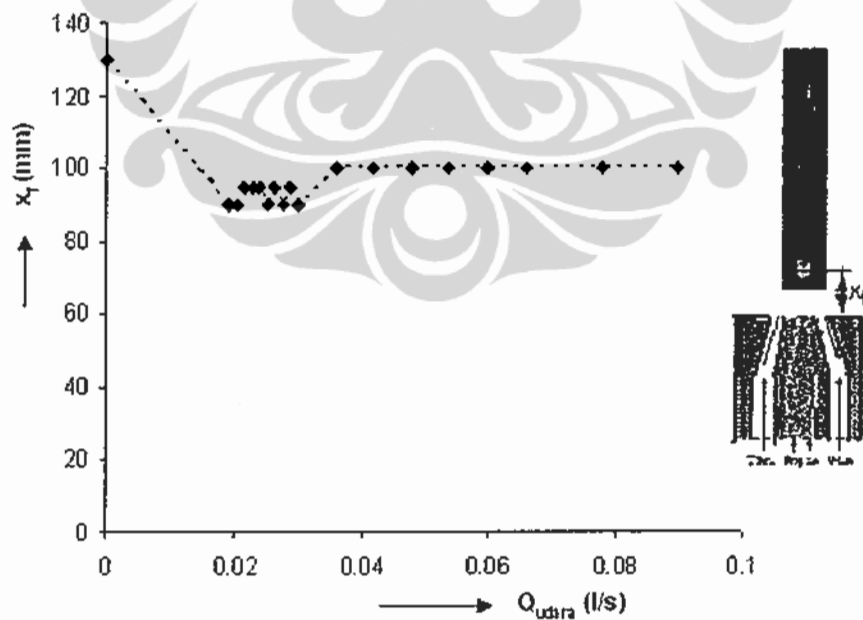
Gambar 4.14 Dimensi nyala : H_f , x_f pembakaran difusi gas Propana tanpa aliran udara.

Pengaruh Aliran udara disekitar aliran bahan bakar

Aliran gas Propane dibuat konstan sebesar 69 ml/s dengan tinggi nyala terangkat sebesar 130 mm, selanjutnya udara dialirkan perlahan dengan kecepatan aliran yang ditingkatkan secara bertahap. Perubahan dimensi nyala api diamati untuk menentukan perubahan *lifted distance* akibat semburan udara. Tabel 4.3 sampai tabel 4.8 serta Gambar 4.15 sampai Gambar 4. 20 menampilkan hasil pengukuran untuk penambahan aliran udara melalui cincin pengarah udara.

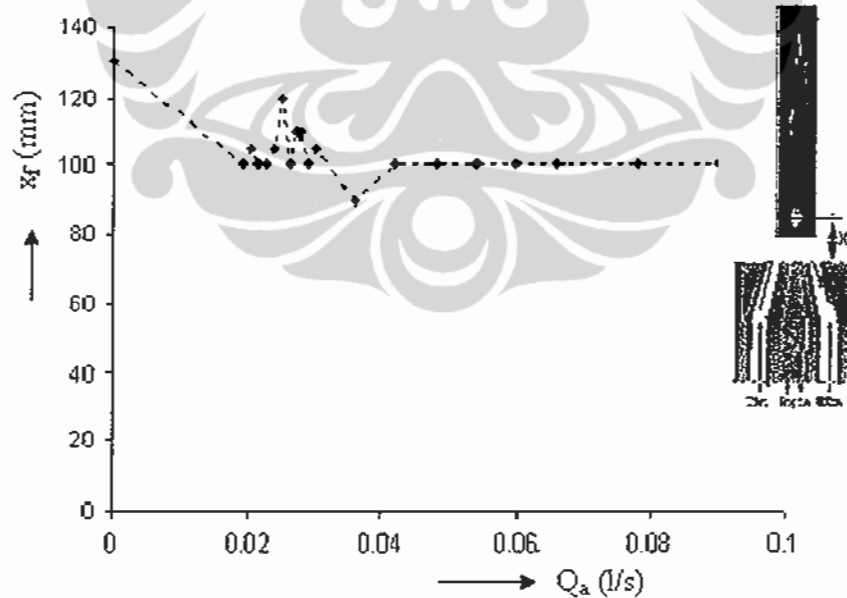
Tabel 4.3 Semburan udara dengan cincin pengarah udara 0° .

Aliran Udara, Q_{air} (l/s)	Lifted-distance, x_f (mm)
0.0179	130
0.0191	90
0.0203	90
0.0215	95
0.0227	95
0.0239	95
0.0251	90
0.0263	95
0.0275	90
0.0287	95
0.0299	90
0.0359	100
0.0419	100
0.0479	100
0.0539	100
0.0599	100
0.0659	100
0.0779	100
0.0899	100

Gambar 4.15 Perubahan *lifted-distance* akibat semburan udara dengan sudut pengarah 0°

Tabel 4.4 Semburan udara dengan cincin pengarah udara 15°.

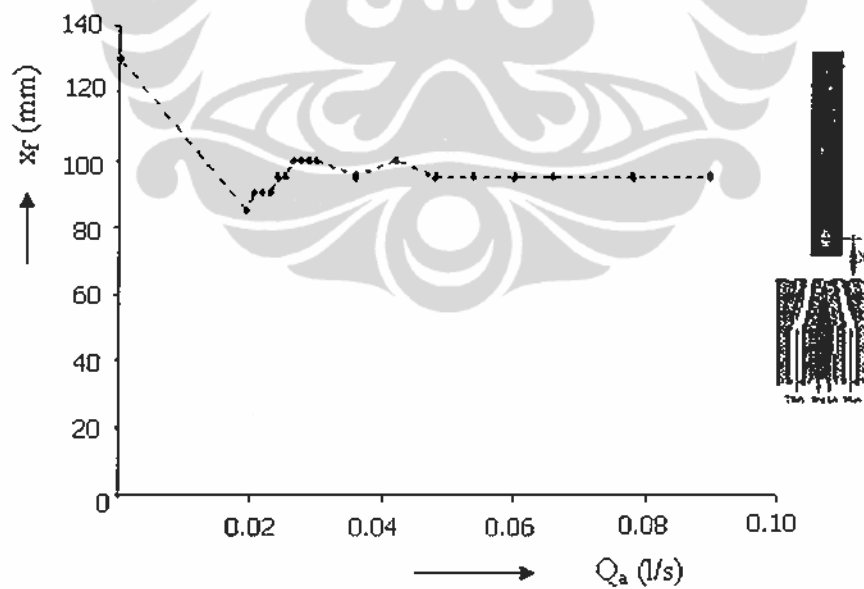
Aliran Udara, Q_{air} (l/s)	Lifted-distance, x_f (mm)
0.0179	130
0.0191	100
0.0203	105
0.0215	100
0.0227	100
0.0239	105
0.0251	120
0.0263	100
0.0275	110
0.0287	100
0.0299	105
0.0359	90
0.0419	100
0.0479	100
0.0539	100
0.0599	100
0.0659	100
0.0779	100
0.0899	100



Gambar 4.16 Perubahan Lifted-distance akibat semburan udara dengan sudut pengarah 15°

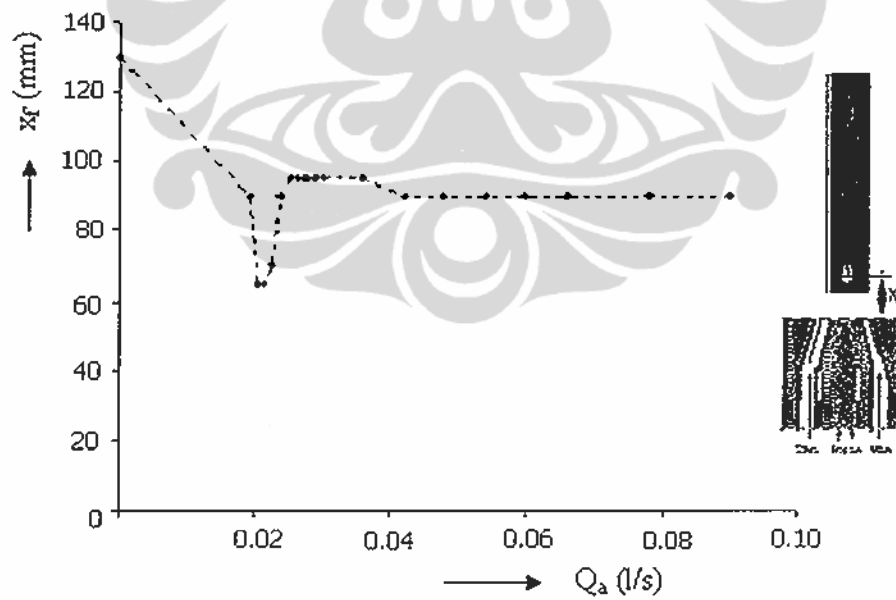
Tabel 4.5 Semburan udara dengan cincin pengarah udara 30⁰.

Aliran Udara, Q_{air} (l/s)	Lifted-distance, x_f (mm)
0.0179	130
0.0191	85
0.0203	90
0.0215	90
0.0227	90
0.0239	95
0.0251	95
0.0263	100
0.0275	100
0.0287	100
0.0299	100
0.0359	95
0.0419	100
0.0479	95
0.0539	95
0.0599	95
0.0659	95
0.0779	95
0.0899	95

Gambar 4.17 Perubahan Lifted-distance akibat semburan udara dengan sudut pengarah 30⁰

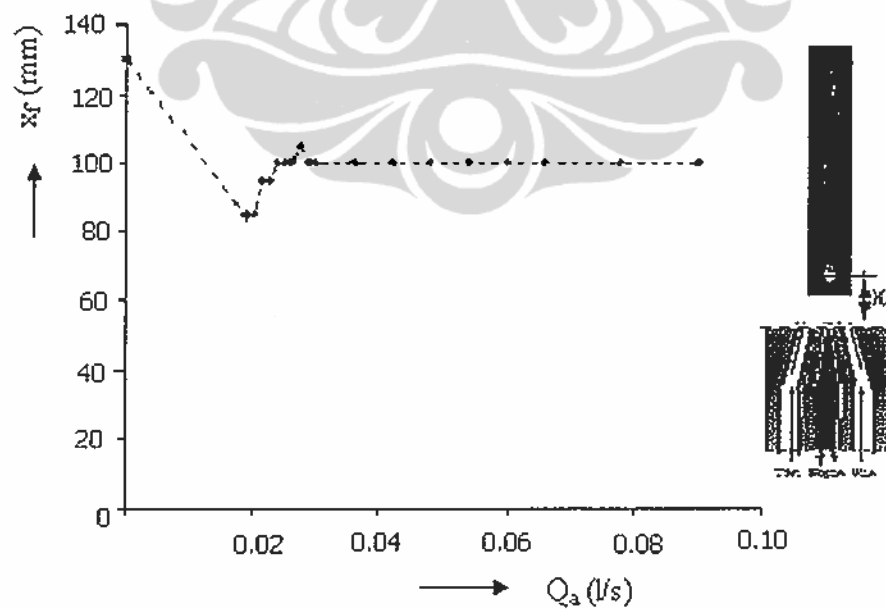
Tabel 4.6 Semburan udara dengan cincin pengarah udara 45⁰.

Aliran Udara, Q_{air} (l/s)	Lifted-distance, x_f (mm)
0.0191	90
0.0203	65
0.0215	65
0.0227	70
0.0239	90
0.0251	95
0.0263	95
0.0275	95
0.0287	95
0.0299	95
0.0359	95
0.0419	90
0.0479	90
0.0539	90
0.0599	90
0.0659	90
0.0779	90
0.0899	90
0.0191	90

Gambar 4.18 Perubahan Lifted-distance akibat semburan udara dengan sudut pengarah 45⁰

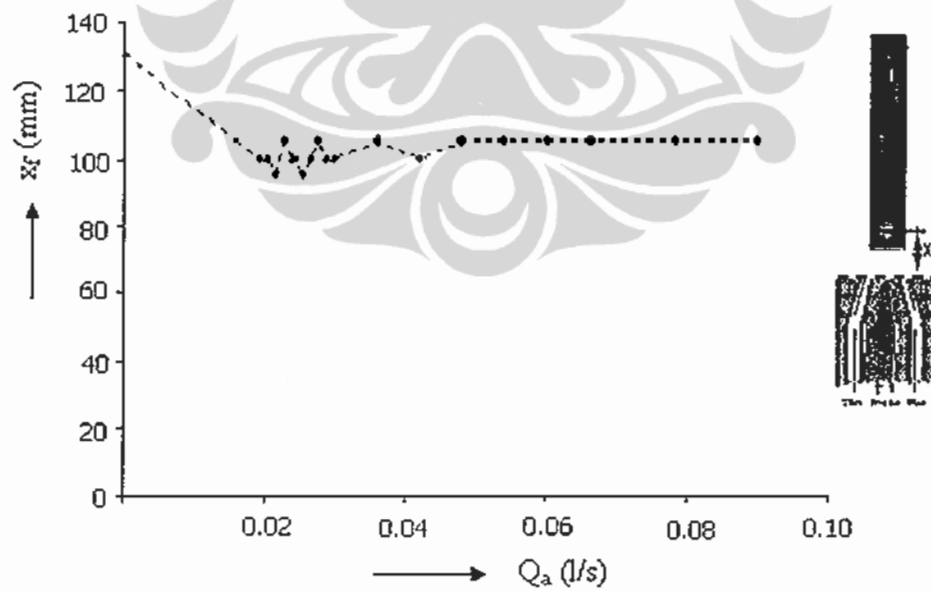
Tabel 4.7 Semburan udara dengan cincin pengarah udara 60° .

Aliran Udara, Q_{air} (l/s)	Lifted-distance, x_f (mm)
0.0179	130
0.0191	85
0.0203	85
0.0215	95
0.0227	95
0.0239	100
0.0251	100
0.0263	100
0.0275	105
0.0287	100
0.0299	100
0.0359	100
0.0419	100
0.0479	100
0.0539	100
0.0599	100
0.0659	100
0.0779	100
0.0899	100

Gambar 4.19 Perubahan Lifted-distance akibat semburan udara dengan sudut pengarah 60°

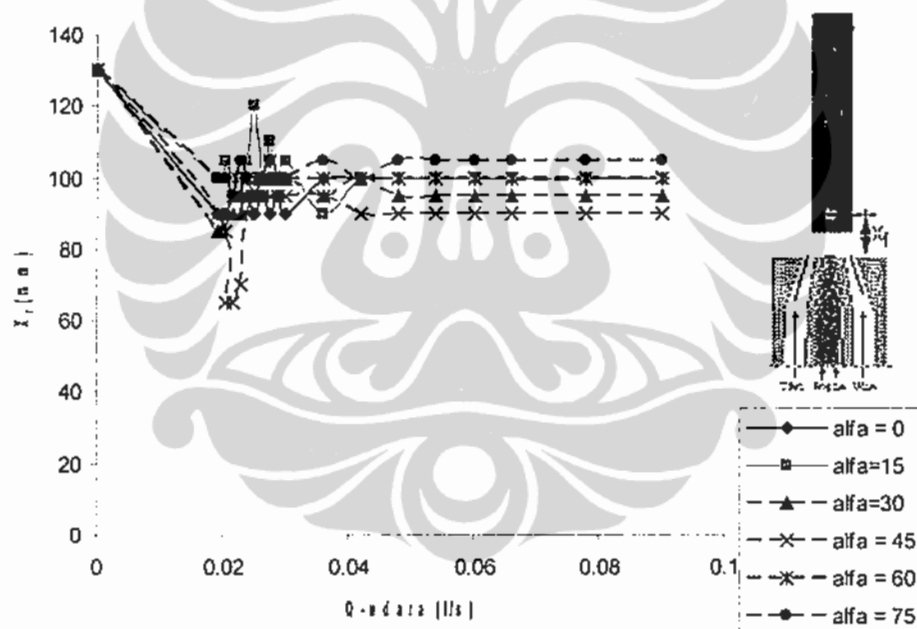
Tabel 4.8 Semburan udara dengan cincin pengarah udara 75° .

Aliran Udara, Q_{air} (l/s)	Lifted-distance, x_f (mm)
0.0179	130
0.0191	100
0.0203	100
0.0215	95
0.0227	105
0.0239	100
0.0251	95
0.0263	100
0.0275	105
0.0287	100
0.0299	100
0.0359	105
0.0419	100
0.0479	105
0.0539	105
0.0599	105
0.0659	105
0.0779	105
0.0899	105

Gambar 4.20 Perubahan Lifted-distance akibat semburan udara dengan sudut pengarah 75°

4.2.2 Diskusi hasil eksperimen

Gambar 4.12 memperlihatkan arah aliran udara dan bahan bakar gas. Sudut cincin pengarah sama dengan 0° menunjukkan arah aliran udara tegak keatas, *co-flow* terhadap aliran gas. Dari data eksperimen yang dituliskan dalam Tabel 4.3 – 4.8, dapat ditampilkan dalam sebuah grafik yang diperlihatkan pada Gambar 4.21. Secara umum adanya aliran udara menimbulkan pemendekan jarak angkat nyala (*lifted-distance*), dalam kecepatan rendah *liftoff* tampak kurang stabil dengan kecenderungan nilai yang berubah-ubah hingga pada suatu kecepatan aliran udara tertentu kondisi *liftoff* menjadi bertambah stabil yaitu *lifted-distance* tidak berubah dengan adanya perubahan semburan udara.

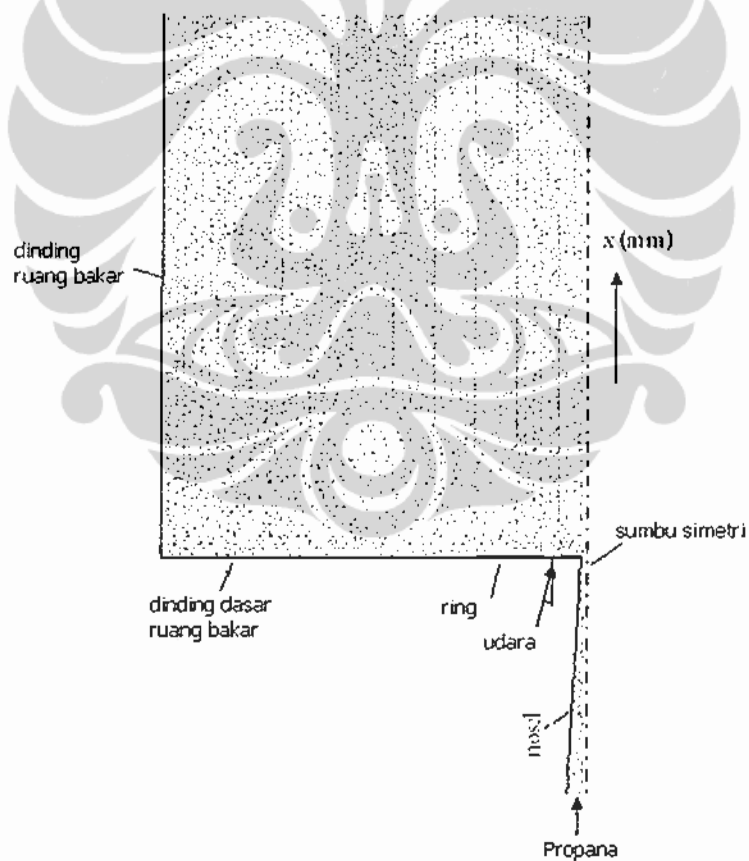


Gambar 4.21 Perubahan *lifted-distance* akibat semburan udara dengan Cincin pengarah udara memiliki sudut 0° , 15° , 30° , 45° , 60° dan 70° .

Dari Gambar 4.21, tampak bahwa *liftoff* mulai stabil pada aliran udara 48 ml/s kecuali untuk udara yang melalui cincin pengarah 45° , kondisi stabil diperoleh lebih awal yaitu pada laju aliran udara 42 ml/s. Selain itu arah aliran udara sebesar 45° , menghasilkan kondisi stabil dengan *lifted distance* terpendek.

4.2.3 Simulasi dengan CFD

Seperti pada kasus-kasus yang telah didiskusikan sebelumnya, kontur aliran fluida serta kontur rasio ekivalen campuran pada ruang bakar segera setelah keluar dari nosel *burner* maupun saluran pengarah udara diduga memiliki kaitan yang sangat erat terhadap keberadaan dari pangkal nyala yang akan terjadi. Untuk itu dilakukan simulasi aliran dingin antara udara dan bahan bakar selepas keluar dari ujung burner. Simulasi yang dilakukan sama dengan sub bab 3.9, hanya pada batas tepi terluar untuk kasus ini menggunakan kondisi batas dinding (*wall*) mengingat pada percobaan ini selubung kaca pada Gambar 2.1 dalam kondisi terpasang, model ruang bakar untuk simulasi komputasi diperlihatkan pada Gambar 4.22 berikut.



Gambar 4.22 Model ruang bakar dan mesh pada kasus pengarah aliran udara

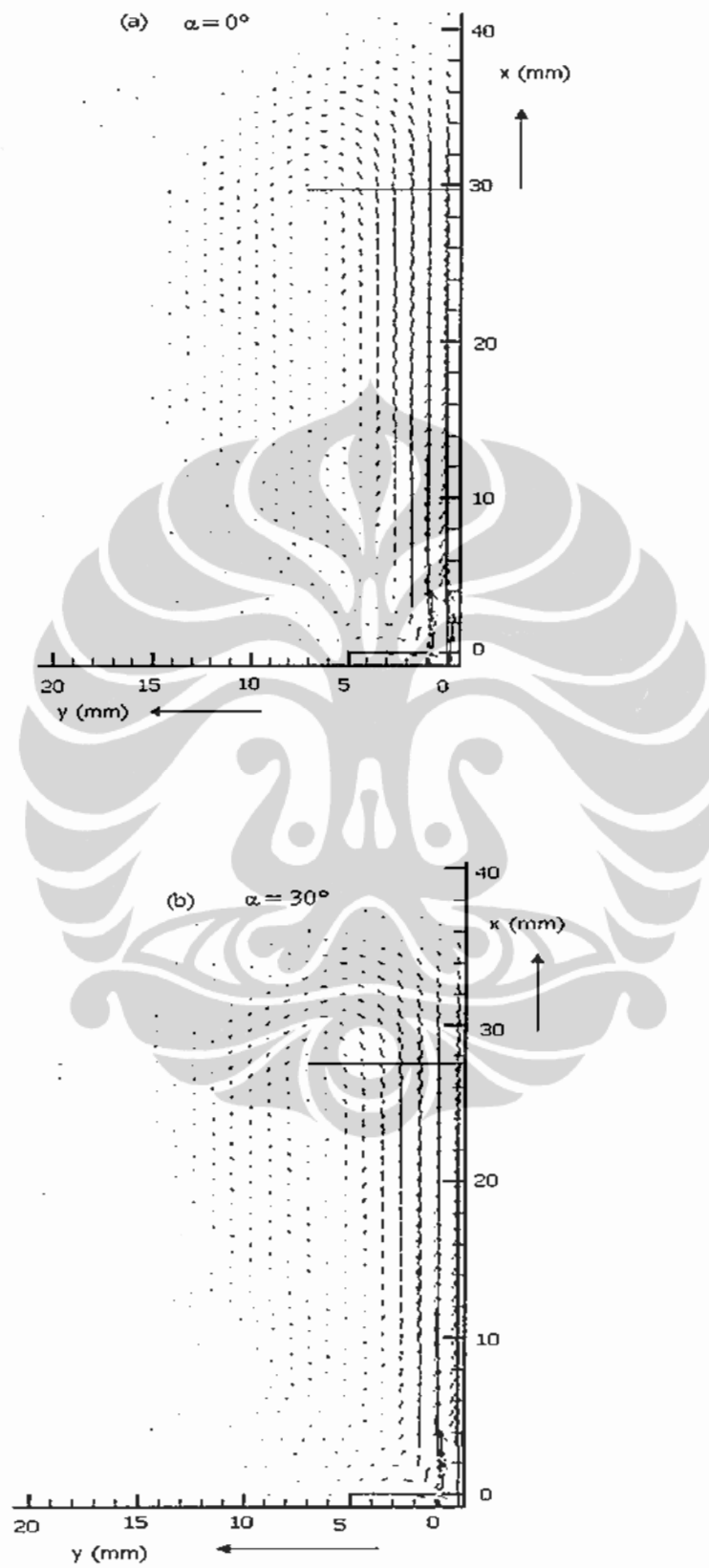
Kondisi batas yang diterapkan :

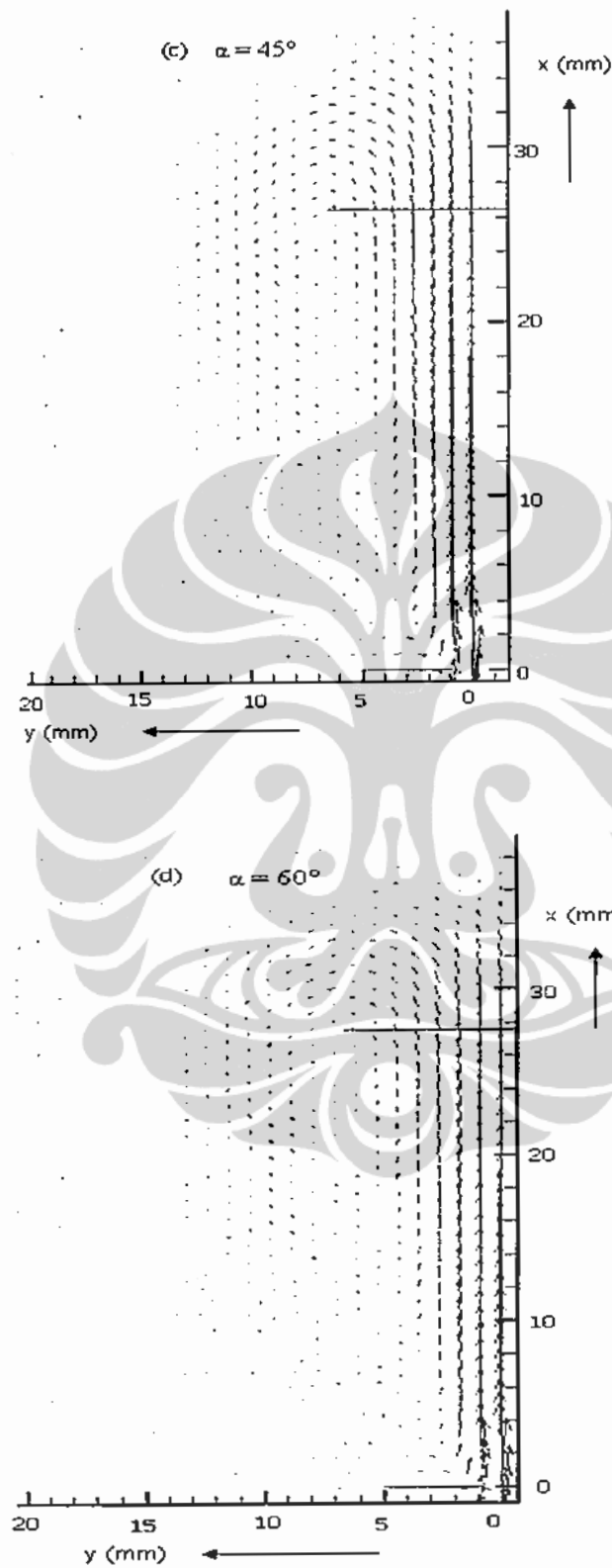
Gas masuk	: <i>Velocity inlet</i> , sesuai dengan kecepatan rata-rata gas propana masuk nosel
Sumbu	: <i>Axis</i>
Dinding nosel & ring	: <i>Wall</i>
Dinding dasar ruang	: <i>velocity inlet</i> , udara berkecepatan 0 m/s.
Dinding ruang bakar	: <i>Wall</i>
Sisi gas buang keluar	: <i>Pressure Outlet</i> , dengan membuat tekanan 1 atm.

Ukuran ruang bakar sebesar $2000 \times 500 \text{ mm}^2$. Dengan sistem meshing quad/tri yaitu perpaduan bentuk persegi dan segitiga.

Gambar 4.21 memperlihatkan pengaruh arah semburan udara terhadap *lifted distance* yang terbentuk. Secara umum *lifted-distance* memendek dengan adanya semburan udara. Dari berbagai arah semburan udara tampak bahwa *lifted-distance* mulai stabil pada debit aliran udara diatas 40 ml/s. Arah semburan udara 45° memberikan nilai pemendekan *lifted-distance* maksimum. Gambar 4.23 memperlihatkan vektor kecepatan disekitar ujung *burner* untuk aliran gas propana sebesar 69 ml/s dengan aliran udara sebesar 54 ml/s untuk sudut pengarah sebesar 0° , 30° , 45° dan 60° .

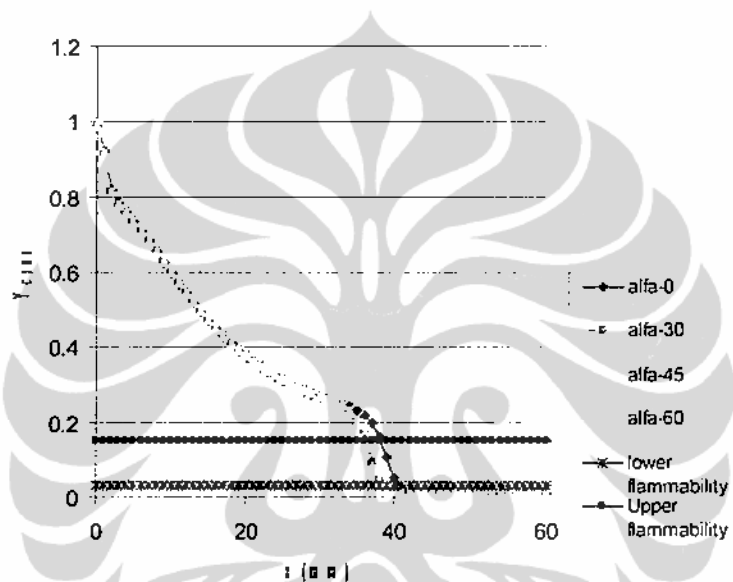
Vektor kecepatan berarah radial keluar pada fluida menandakan adanya turbulensi yang berpengaruh terhadap kecepatan pencampuran udara-bahan bakar.



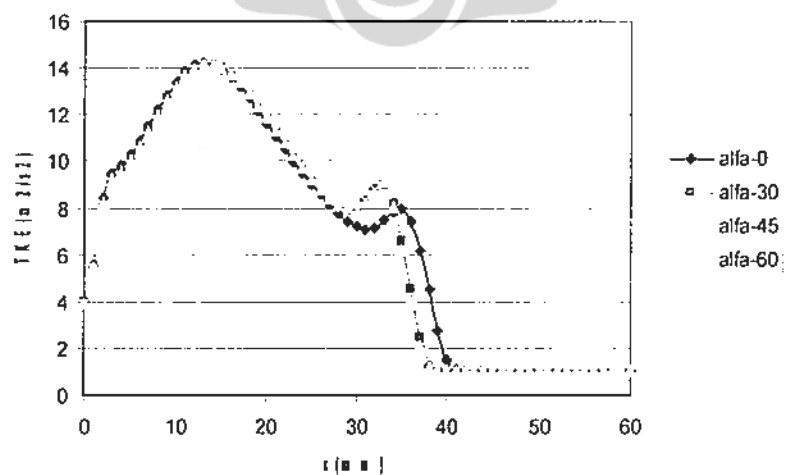


Gambar 4.23 Vektor kecepatan fluida pada zona bakar untuk berbagai arah sembur udara : 0° , 30° , 45° , 60°

Sedangkan dilihat dari distribusi fraksi massa propana sepanjang sumbu aksial terlihat pada arah aliran udara 30° , 45° dan 60° nilai fraksi massa lebih awal memasuki nilai batas mampu nyala campuran udara bahan bakar dibandingkan arah aliran udara 0° , hasil simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 4.24. Sedangkan pada Gambar 4.25 memperlihatkan nilai TKE sepanjang sumbu aksial, dalam gambar diperlihatkan pada sudut pengarah 45° memiliki nilai TKE yang relatif lebih besar dibandingkan dengan sudut pengarah udara lainnya.

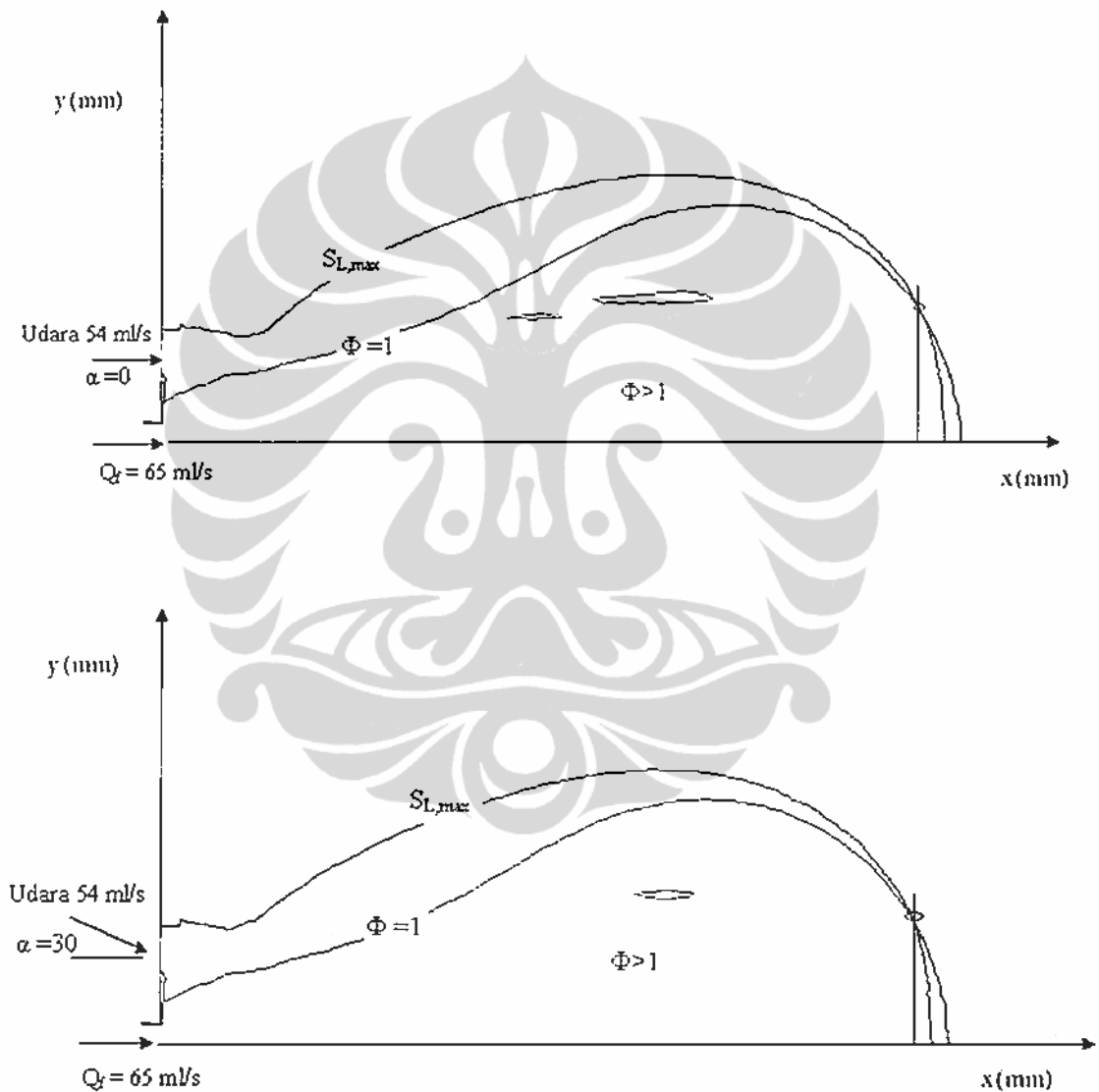


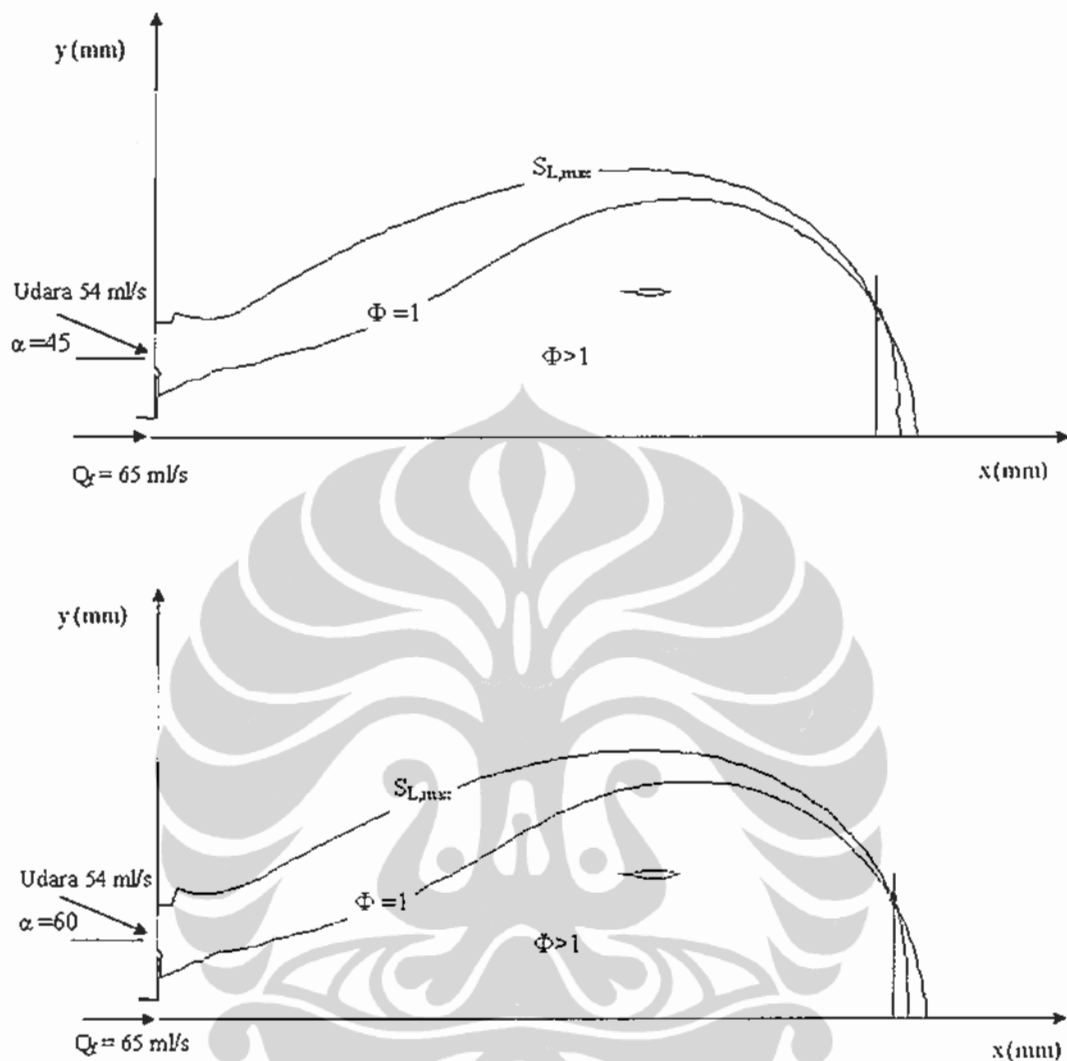
Gambar 4.24 Fraksi massa Propana sepanjang sumbu aksial untuk laju aliran Propana 69 ml/s dan udara 54 ml/s untuk berbagai sudut pengarah udara.



Gambar 4.25 . Nilai TKE sepanjang sumbu aksial untuk laju aliran Propana 69 ml/s dan udara 54 ml/s untuk berbagai sudut pengarah udara.

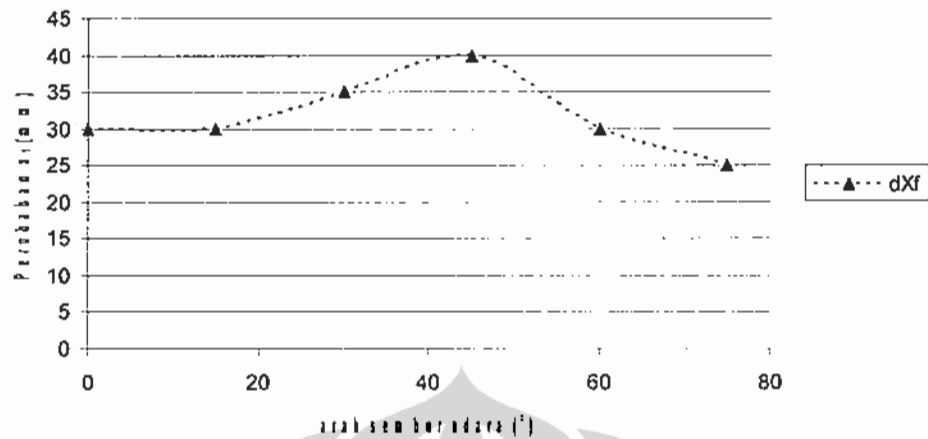
Sesuai dengan teori I mengenai terjadinya *lift-off* yang menyatakan bahwa posisi pangkal nyala merupakan kondisi premix dengan kecepatan lokal sama dengan kecepatan pembakaran laminar, maka Gambar 4.26 memperlihatkan kontur raio ekivalen campuran dan kontur kecepatan dengan nilai sama dengan kecepatan pembakaran laminar untuk berbagai arah sembur udara.





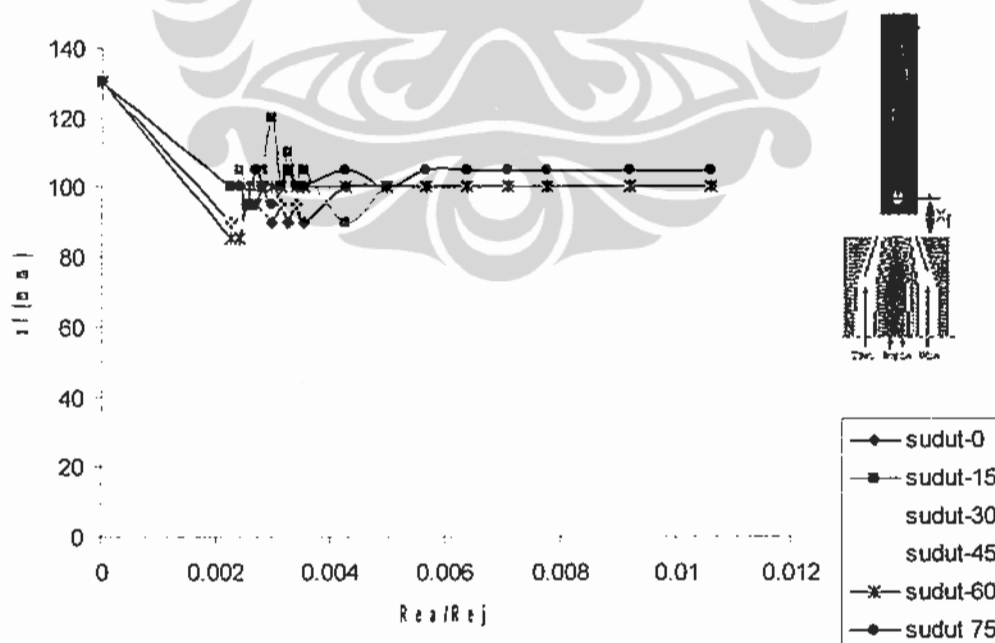
Gambar 4.26 Kontur aliran fluida dingin untuk berbagai arah sembur udara.

Titik potong $\phi = 1$ dan $v = S_{L,\text{max}}$ untuk arah sembur udara sebesar 45° memiliki jarak ke ujung *burner* tekecil, ini sesuai hasil eksperimen yang telah dilakukan. Perubahan jarak angkat nyala terbesar diperoleh untuk aliran udara dengan arah sembur 45° seperti diperlihatkan pada Gambar 4.27 dengan penurunan jarak angkat nyala sebesar 40 mm. Hal ini menunjukkan difusi gas-bahan bakar dengan sudut pengarah udara 45° memiliki kecepatan difusi tertinggi, sehingga memiliki *lifted-distance* terpendek.



Gambar 4.27. Perubahan *lifted-distance* nyala api akibat semburan udara *co-flow* dengan berbagai arah sembur udara.

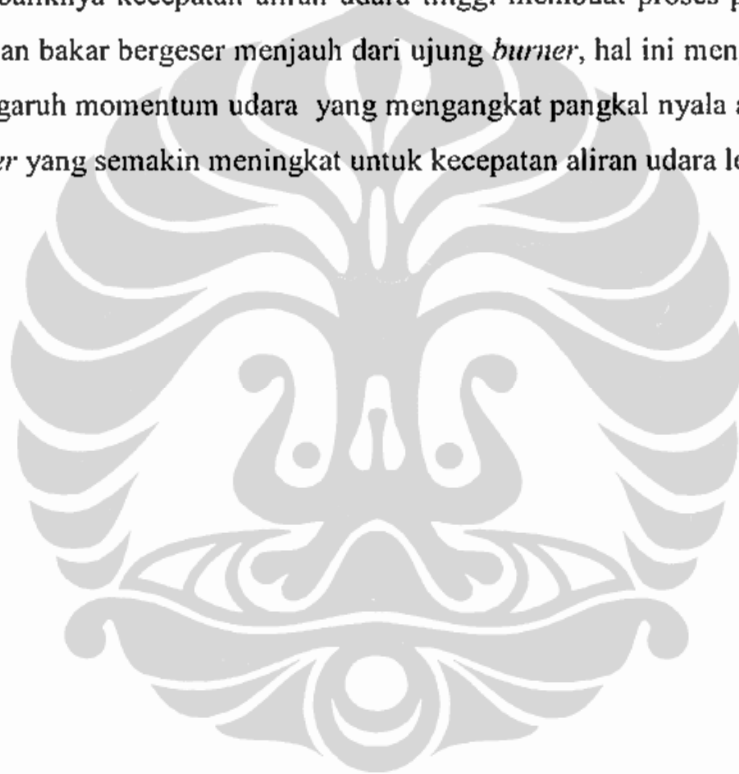
Perbandingan bilangan Reynolds aliran udara dan aliran gas untuk tiap aliran udara dengan sudut cincin pengarah 0° , 15° , 30° , 45° , 60° dan 75° diperlihatkan pada Gambar 4.28.



Gambar 4.28 Perubahan *lifted-distance* terhadap perbandingan Bilangan Reynolds aliran udara terhadap gas.

Kondisi *lifted-flame* paling stabil diperoleh pada aliran udara sangat rendah yaitu dengan perbandingan bilangan Reynolds udara terhadap gas rata-rata sebesar 0.002, dibandingkan dengan kondisi *lifted-flame* paling stabil untuk aliran udara *co-flow* tanpa pengarah udara dengan nilai perbandingan bilangan Reynolds udara terhadap gas sebesar 0.001. Dari kedua penelitian ini dapat disimpulkan bahwa aliran udara berkecepatan rendah memacu proses pencampuran udara bahan bakar dapat segera terjadi di sekitar ujung *burner*.

Sebaliknya kecepatan aliran udara tinggi membuat proses pencampuran udara – bahan bakar bergeser menjauh dari ujung *burner*, hal ini mengindikasikan adanya pengaruh momentum udara yang mengangkat pangkal nyala api menjauhi ujung *burner* yang semakin meningkat untuk kecepatan aliran udara lebih besar.





BAB 5 KESIMPULAN

Gas Propana dengan rumus kimia C_3H_8 merupakan penyusun utama gas Elpiji yang dipasarkan di Indonesia. Daerah mampu nyala gas Propana adalah pada nilai rasio ekivalen sebesar : 0,51 - 2,83 , sehingga untuk gas propana pada kondisi udara ruang ber temperatur $29\text{ }^\circ\text{C}$ serta nilai *Relative Humidity* 41 % maka daerah mampu nyala gas propana adalah pada nilai fraksi massa gas berkisar pada nilai 3,1 - 15,2 %.

Fraksi massa bahan bakar dan kecepatan lokal fluida merupakan faktor penting yang menjamin proses penyalaan dapat terjadi dengan baik. Berdasarkan Teori I *Liftoff* yang mensyaratkan terjadinya *liftoff* adalah pada kecepatan lokal sama dengan kecepatan pembakaran laminar pada nyala premiks, maka penentuan kondisi *liftoff* dalam disertasi ini sebagian besar menggunakan analisa kontur rasio ekivalen propana $\phi=1$ yaitu pada nilai fraksi massa Propana $Y_{C_3H_8} = 5.96\%$, serta kontur kecepatan lokal yang memiliki nilai sama dengan kecepatan pembakaran laminar maksimum $S_{L,max} = 45,26\text{ cm/s}$.

Perpotongan antara kurva $\phi = 1$ dan $v = S_{L,max}$ dalam ruang bakar, yang dihasilkan melalui komputasi memberikan gambaran yang sesuai antara *lifted-distance* hasil eksperimen dengan komputasi.

Pengaruh kecepatan aliran bahan bakar gas keluar ujung *burner* adalah meningkatkan *lifted-distance* secara linier. Semakin besar kecepatan aliran gas maka *lifted-distance* semakin tinggi. Selain itu, peningkatan kecepatan aliran gas membuat panjang nyala menjadi semakin pendek dengan bentuk nyala yang lebih gemuk.

Berdasarkan nilai Bilangan Reynolds aliran gas keluar nosel, Re_j rendah membentuk nyala api yang masih menempel pada ujung burner (*attached-flame*), sedangkan pada Re_j tinggi kondisi pangkal nyala cenderung terangkat (*liftoff*). Pembakaran gas propana dalam udara diam (*quiescence-air*) memperlihatkan nyala mulai terangkat pada nilai Bilangan Reynolds aliran mencapai 3914 dengan kata lain *liftoff* mulai terjadi pada kondisi aliran gas keluar nosel berada pada kondisi turbulen. Hasil simulasi CFD pada Gambar 3.23 dan Gambar 3.24

memperlihatkan bahwa **posisi pusaran erat kaitannya terhadap posisi pangkal nyala yang menentukan kondisi *attached* maupun *lifted*, posisi pusaran dekat ujung burner memberikan kemungkinan nyala api yang dihasilkan merupakan nyala dengan kondisi *attached-flame*.**

Bentuk saluran menyempit nosel konik menghambat difusi udara-bahan bakar sesaat setelah keluar dari ujung burner. Hal ini lebih diakibatkan oleh vektor kecepatan radial saat keluar nosel berharga negatif (kecepatan lebih mengarah ke dalam sumbu) sehingga tidak memberi kesempatan bagi udara untuk berdifusi ke dalam gas atau sebaliknya. Saluran gas berbentuk konik mulai membentuk nyala *liftoff* pada nilai Reynolds aliran gas sebesar 2398 sedangkan untuk saluran gas berbentuk lurus awal terjadi *liftoff* pada nilai Reynolds aliran 3538. **Dengan demikian saluran gas konik membentuk kondisi *liftoff* lebih mudah dibandingkan saluran gas berbentuk lurus.**

Aliran udara rendah disekitar aliran gas (*co-flow*) menimbulkan kondisi *lifted* yang lebih stabil dibandingkan dengan aliran udara dengan kecepatan yang lebih tinggi. Aliran udara yang sangat rendah dengan nilai Bilangan Reynolds aliran udara dibandingkan nilai Bilangan Reynolds aliran gas $Re_a/Re_g = 0,0008$ membuat *lifted distance* bertambah pendek sebesar 20 % dibandingkan *lifted distance* pada kondisi tanpa aliran udara (*quiescence-air*). Hasil eksperimen dan komputasi menunjukkan aliran udara yang lebih besar meningkatkan kembali nilai *lifted-distance*, untuk aliran udara 15 ml/s nilai *lifted distance* mencapai 64 mm sedangkan pada laju aliran gas mencapai 89 ml/s nilai *lifted distance* sebesar 70 mm. simulasi CFD untuk kedua kasus tersebut menyatakan posisi interseksi $\phi = 1$ dan $v = S_{L,max}$ pada aliran udara 15 ml/s lebih mendekati ujung *burner* dibandingkan kondisi aliran udara dengan kecepatan 89 ml/s. Hasil ini menunjukkan bahwa proses difusi udara - bahan bakar sangat dominan dalam mempengaruhi stabilisasi nyala terangkat (*lifted-flame*). **Kecepatan cukup tinggi aliran udara memberikan pengaruh negatif terhadap stabilisasi nyala terangkat, mengingat efek momentum yang diberikan udara terhadap pangkal nyala menyebabkan *lifted-distance* bertambah tinggi.**

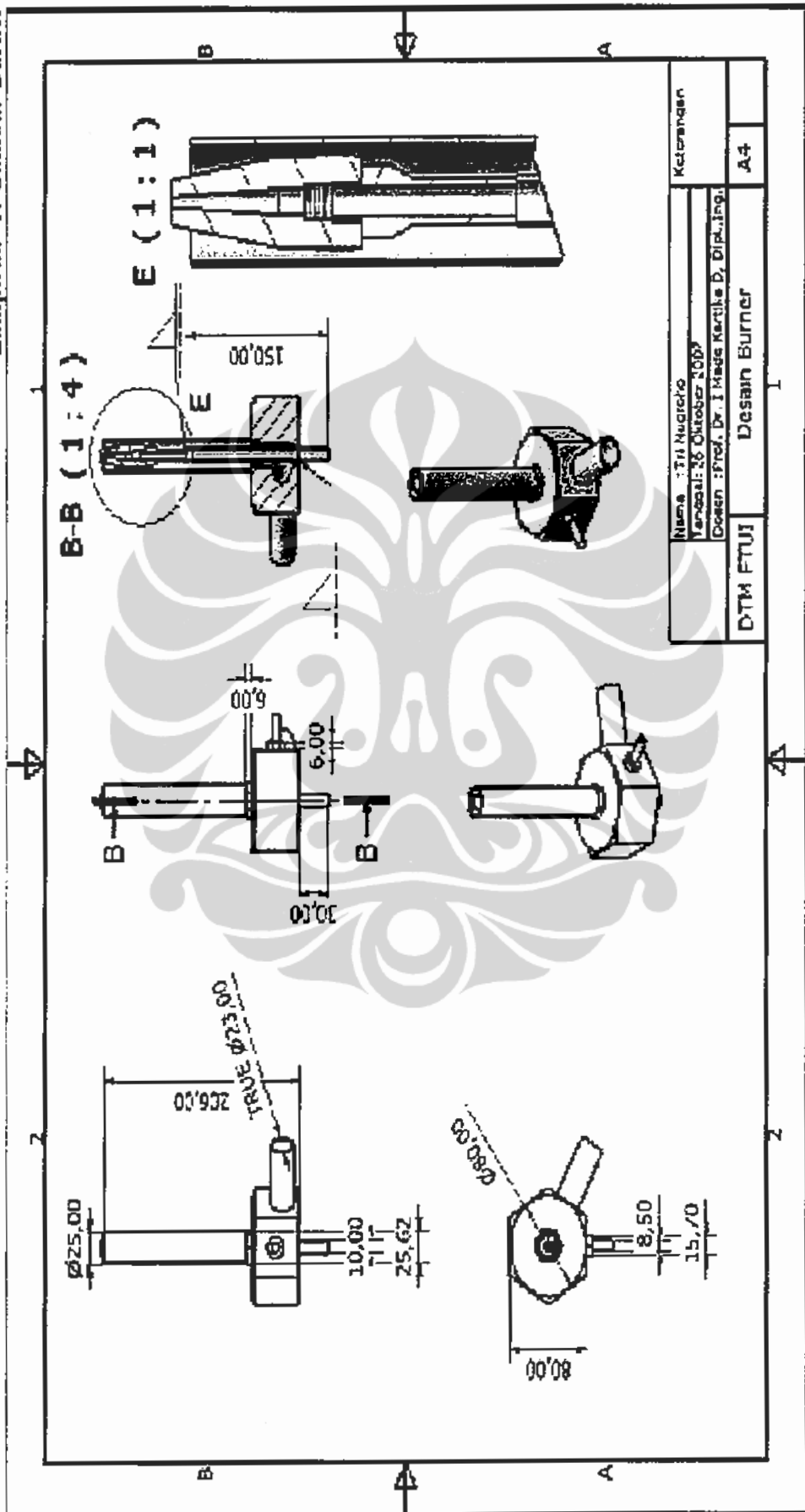
Turbulensi aliran meningkatkan kecepatan pencampuran udara-gas hal ini tampak pada semburan udara dengan cincin pengarah dengan sudut 45°

memberikan nilai *Turbulence Kinetic Energy* (TKE) tertinggi pada fluida campuran disekitar ujung *burner*. Dengan adanya turbulensi tersebut difusi bahan bakar-udara lebih aktif terjadi di sekitar ujung *burner*, sehingga fluida campuran segera memiliki komposisi mampu bakar gas. Hasil eksperimen dan komputasi menunjukkan sudut pengarah udara sebesar 45° memberikan kondisi nyala terangkat yang paling stabil, yaitu memiliki nilai *lifted-distance* terkecil .

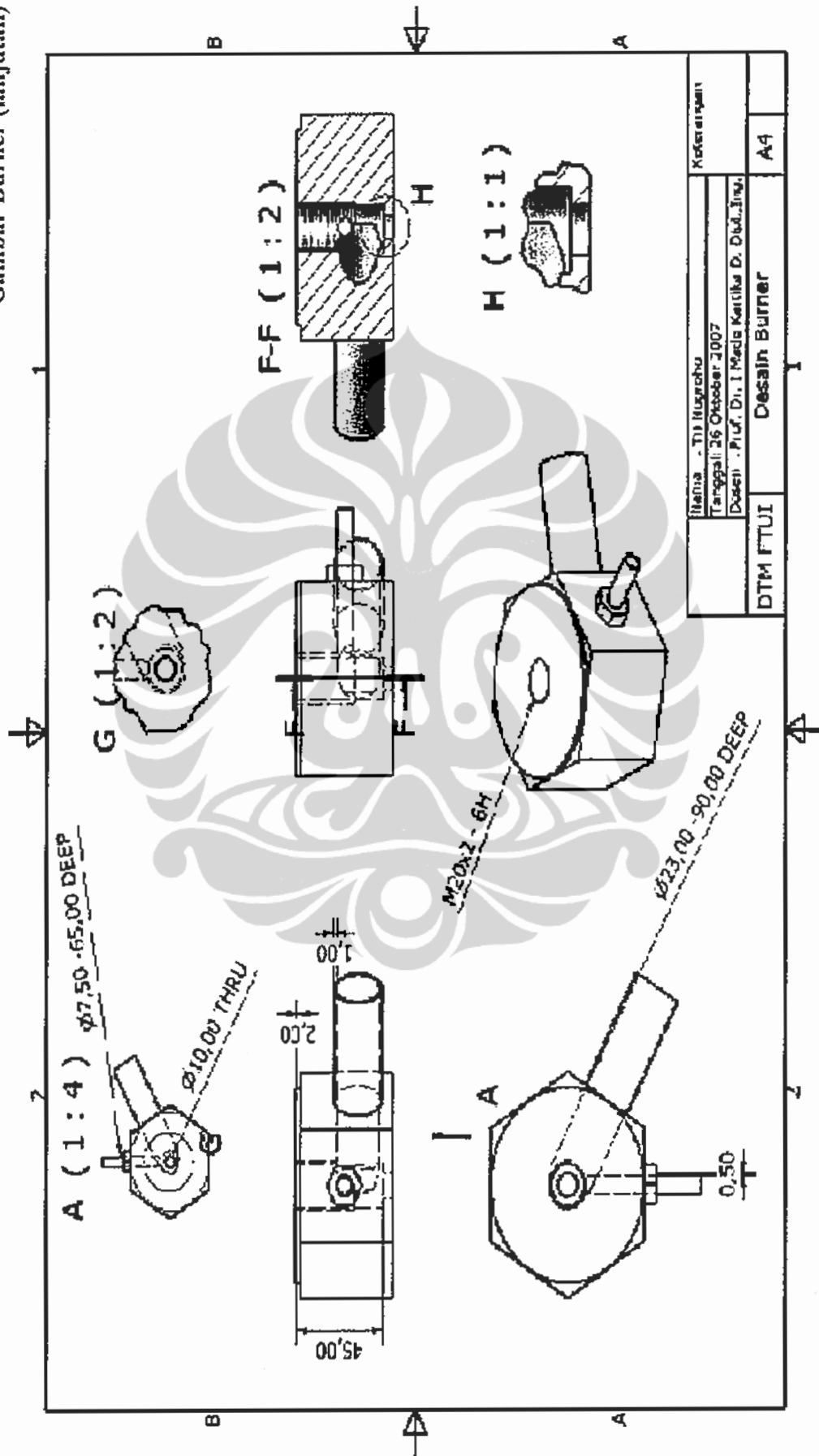




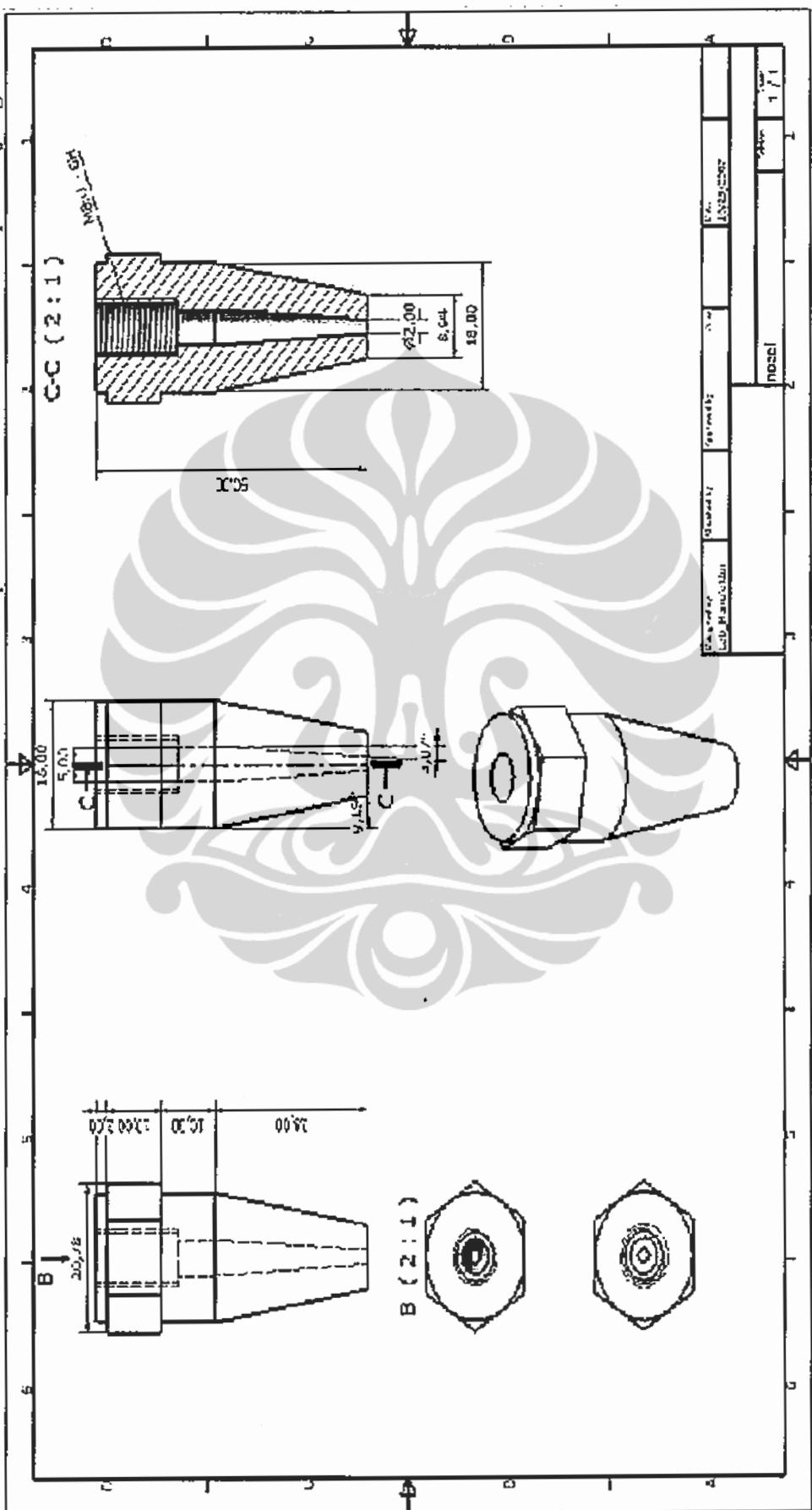
Lampiran -1: Gambar Burner



Gambar Burner (lanjutan)



Lampiran-2 : Gambar Nosel Konik pada Ujung Burner



Lampiran - 3

Tabel Laju Aliran Udara, Q_a (l/s), Terhadap Beda Ketinggian Permukaan Cairan, h_1 (mm) pada *Orifice-Flow Meter*

Q (l/s)	h_1 (mm)	Q (l/s)	h_1 (mm)	Q (l/s)	h_1 (mm)	Q (l/s)	h_1 (mm)
0.001	0.081	0.034	10.797	0.067	37.19	0.099	77.753
0.002	0.1754	0.035	11.367	0.068	38.234	0.1	79.258
0.003	0.2842	0.036	11.951	0.069	39.293	0.101	80.778
0.004	0.4075	0.037	12.549	0.07	40.366	0.102	82.312
0.005	0.5451	0.038	13.161	0.071	41.454	0.103	83.86
0.006	0.697	0.039	13.788	0.072	42.556	0.104	85.423
0.007	0.8634	0.04	14.43	0.073	43.673	0.105	87
0.008	1.0442	0.041	15.086	0.074	44.803	0.106	88.591
0.009	1.2394	0.042	15.756	0.075	45.949	0.107	90.197
0.01	1.449	0.043	16.441	0.076	47.108	0.108	91.818
0.011	1.673	0.044	17.14	0.077	48.282	0.109	93.452
0.012	1.9113	0.045	17.853	0.078	49.471	0.11	95.101
0.013	2.1641	0.046	18.581	0.079	50.674	0.111	96.765
0.014	2.4312	0.047	19.323	0.08	51.891	0.112	98.443
0.015	2.7128	0.048	20.08	0.081	53.122	0.113	100.13
0.016	3.0087	0.049	20.851	0.082	54.368	0.114	101.84
0.017	3.3191	0.05	21.636	0.083	55.629	0.115	103.56
0.018	3.6438	0.051	22.436	0.084	56.904	0.116	105.3
0.019	3.9829	0.052	23.25	0.085	58.193	0.117	107.05
0.02	4.3365	0.053	24.078	0.086	59.496	0.118	108.81
0.021	4.7044	0.054	24.921	0.087	60.814	0.119	110.59
0.022	5.0867	0.055	25.779	0.088	62.147	0.12	112.38
0.023	5.4834	0.056	26.65	0.089	63.494	0.121	114.19
0.024	5.8945	0.057	27.537	0.09	64.855	0.122	116.01
0.025	6.32	0.058	28.437	0.091	66.23	0.123	117.85
0.026	6.7599	0.059	29.352	0.092	67.62	0.124	119.7
0.027	7.2142	0.06	30.281	0.093	69.025	0.125	121.56
0.028	7.6829	0.061	31.225	0.094	70.443	0.126	123.44
0.029	8.166	0.062	32.183	0.095	71.877	0.127	125.34
0.03	8.6634	0.063	33.156	0.096	73.324	0.128	127.25
0.031	9.1753	0.064	34.143	0.097	74.786	0.129	129.17
0.032	9.7016	0.065	35.144	0.098	76.262	0.13	131.11
0.033	10.242	0.066	36.16	0.099	77.753	0.131	133.06



Daftar Publikasi Paper Terkait

1. Seminar Nasional-VI Rekayasa dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri, Kampus Itenas – Bandung, 28 Januari 2008. :

Judul Paper : Pengaruh Variasi Aliran Udara Terhadap Tinggi Lifted-Flame pada Pembakaran Difusi Propana

Penulis : I Made Kartika Dhiputra, Harinaldi, NK. Caturwati

2. Seminar Nasional-VII Rekayasa dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri, Kampus Itenas – Bandung, 28 – 29 Oktober 2009.

Judul Paper : Phenomena Lifted-Flame dalam Pembakaran Gas Propana Secara Difusi.

Penulis : I Made K Dhiputra, NK.Caturwati, Cahyo Wibowo, Dimitri Rulianto

3. Proceedings of The 1st International Meeting on Advances in Thermo-Fluids. Faculty of Mechanical Engineering Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia, 26 th August 2008

Judul Paper : Characteristic of Lifted Flame at Diffusion Combustion of Propane with Various Dimensions of Nozzles Burner.

Penulis : Made K Dhiputra, Harinaldi ,NK.Caturwati

4. Proceedings of The 1st International Meeting on Advances in Thermo-Fluids. Faculty of Mechanical Engineering Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia, 26 th August 2008

Judul Paper : Air-jet Director Angles Influence to Flame Length on Propane Diffusion Combustion with Ejected Combustor Type.

Penulis : I Made Kartika Dhiputra, NK. Caturwati, Ombun Sihombing

5. Sriwijaya International Seminar on Energy Science and Technology (SISEST) Sriwijaya University, Palembang Indonesia, 5th – 6th November 2008.

Judul Paper : Study on Liftoff of Propane Diffusion Flame Based on Karlovitz Number.

Penulis : I Made K.Dhiputra , Harinaldi, NK.Caturwati

6. The 11th International Conference on QiR (Quality in Research), Faculty of Engineering University of Indonesia, Depok, 3rd – 6th August 2009.

Judul Paper : Influence of Air-Injection of Lifted-Distance of A Propana Diffusion Flame.

Penulis : I Made K Dhiputra, Harinaldi , NK.Caturwati.

Penghargaan : The Best Poster

7. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII , Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

Judul Paper : Pengaruh Temperatur Pemanasan Awal Gas Elpiji Terhadap stabilitas Nyala Api Difusi Saat Kondisi Lifted-Flame

Penulis : I Made K.Dhiputra, Dimitri Rulianto, Ni Ketut Caturwati

8. Jurnal Nasional Terakreditasi B : Lemigas Scientific Contributions to Petroleum Science & Technology, Jakarta, December 2009, Volume 32, Number 3 (157 - 238)

Judul Paper : Liftoff Behavior of Propane – Air Diffusion Flames with Axis Symmetric co-Flow Configuration

Penulis : I Made K Dhiputra, Harinaldi , NK.Caturwati.

9. Jurnal Nasional Terakreditasi B : Jurnal Teknik Mesin, Surabaya, Januari 2010, Volume 10, Nomor 1 (1-78).

Judul Paper : Pengaruh Pemanasan Awal Liquid Petroleum Gas (LPG) terhadap Karakteristik Nyala Api Difusi.

Penulis : I Made K Dhiputra, Harinaldi , NK.Caturwati.