



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS PENGARUH SEMBURAN UDARA TERHADAP
PERUBAHAN TINGGI *LIFTED FLAME* DIFUSI DENGAN
VARIASI PEMANASAN AWAL BAHAN BAKAR LPG PADA
BUNSEN BURNER**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik

CAHYO SETYO WIBOWO

0706256934

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM PASCASARJANA BIDANG ILMU TEKNIK
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

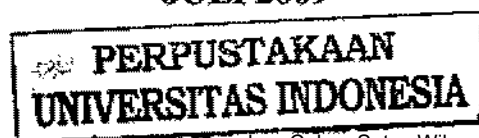
**ANALISIS PENGARUH SEMBURAN UDARA TERHADAP
PERUBAHAN TINGGI *LIFTED FLAME* DIFUSI DENGAN
VARIASI PEMANASAN AWAL BAHAN BAKAR LPG PADA
BUNSEN BURNER**

TESIS

CAHYO SETYO WIBOWO

0706256934

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM PASCASARJANA BIDANG ILMU TEKNIK
DEPOK
JULI 2009**



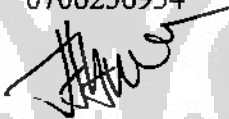
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun di rujuk
telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Cahyo Setyo Wibowo

NPM : 0706256934

Tanda tangan :



Tanggal : 26 Juni 2009

Universitas Indonesia

PERNYATAAN PUBLIKASI

Penelitian ini merupakan bagian dari kegiatan penelitian jangka panjang mengenai "Fenomena *Lifted Flame* pada Nyala Api Difusi" dengan peneliti utama, yaitu :

Prof. Dr. Ir. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing.

Penggunaan data dan informasi yang tercantum dalam tesis ini untuk maksud publikasi ilmiah dan populer hanya dapat dilakukan oleh peneliti utama atau atas ijin tertulis dari peneliti utama.

Depok, Juli 2009

Peneliti Utama,


Prof. Dr. Ir. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing.

NIP. 130 70 2237


Cahyo Setyo Wibowo

NPM. 07 06 25 69 34

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Cahyo Setyo Wibowo
NPM : 0706256934
Program Studi : Konversi Energi
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Judul Karya : Tesis

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

"Analisis Pengaruh Semburan Udara Terhadap Perubahan Tinggi *Lifted Flame* Difusi Dengan Variasi Pemanasan Awal Bahan Bakar LPG Pada Bunsen Burner"
berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan. Mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tesis saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada Tanggal : 14 Juli 2009

Yang menyatakan



(Cahyo Setyo Wibowo)

Universitas Indonesia

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Cahyo Setyo Wibowo
NPM : 0706256934
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Semburan Udara Terhadap
Perubahan Tinggi *Lifted Flame* Difusi Dengan
Variasi Pemanasan Awal Bahan Bakar LPG Pada
Bunsen Burner

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Pascasarjana Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing

Penguji : Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto M.Eng

Penguji : Ir. Yulianto Sulistyono Nugroho M.Sc, Ph.D

Penguji : Dr. Ir. Adi Surjasatyo M.Eng

Ditetapkan di :

Tanggal : Juli 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamu 'alaikum Wr. Wb.

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Alloh SWT, atas ridlo-Nya, Tesis ini dapat diselesaikan dengan baik yang merupakan syarat untuk mendapatkan gelar Magister Teknik.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Keluarga tercinta, yaitu istri saya : Hetty, anak-anak saya Nasywa dan Gayatri serta orangtua yang telah memberikan kasih sayang dan dukungan moril ;
2. Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, PPPTMGB " Lemigas", yang telah mendanai seluruh biaya pendidikan program pascasarjana penulis ;
3. Prof. Dr. Ir. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing, selaku pembimbing penelitian, yang telah banyak meluangkan waktu untuk membimbing penulis hingga penelitian Tesis ini selesai;
4. DR. Ir. Ahmad Indra S, selaku pembimbing akademis;
5. Ni Ketut Caturwati, Dimitri, Pratomo, Tondi, Ombun dan Jonathan rekan *Research Sub Group Diffusion Flame and Combustion* selaku mahasiswa yang sedang melakukan penelitian pembakaran gas secara difusi;
6. Dosen dan staff Fakultas Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah membantu dan memberikan semangat kepada penulis.
7. Rekan-rekan S2 Teknik Mesin 2007 dan atasan di kantor PPPTMGB "Lemigas" antara lain : Mardono, Daru Siswanto, Maymuchar, Herry Widhiarto, Setyo Widodo, Reza S, Edi Wibowo, Wawan S yang telah banyak membantu penulis.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tesis ini masih banyak kekurangan, penulis mengharapkan saran dari para pembaca agar menjadi masukan untuk penelitian selanjutnya. Semoga tesis ini bermanfaat bagi para pembaca.

Wassalamu 'alaikum Wr. Wb.

Depok, Juni 2009

Penulis,

Universitas Indonesia

ABSTRAK

Nama : Cahyo Setyo Wibowo
Program Studi: Teknik Mesin
Judul : Analisis Pengaruh Semburan Udara Terhadap Perubahan Tinggi
Lifted Flame Difusi Dengan Variasi Pemanasan Awal Bahan Bakar
LPG Pada Bunsen Burner

Hampir semua aktifitas industri melibatkan proses pembakaran baik sebagai unit utama maupun sebagai bagian dari unit penyedia energi dalam sistem utilitasnya. Nyala difusi merupakan salah satu proses pembakaran yang memiliki aplikasi sangat luas. Tinggi lifted nyala api difusi sangat menentukan kualitas pembakaran. Laju alir semburan udara mempengaruhi tinggi lifted nyala api difusi. Pada penelitian ini, dilakukan variasi laju alir semburan udara untuk mengetahui tinggi lifted nyala difusi. Pengaruh pemanasan awal bahan bakar LPG pada Bunsen Burner juga diamati. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi laju alir semburan udara awal menyebabkan tinggi lifted flame akan mengalami penurunan akibat fenomena flame approach. Kecepatan pembakaran maksimum berada pada Q udara 0,25 L/s dan Q bahan bakar 0,0455 L/s yaitu dengan kecepatan pembakaran turbulen (S_T) 19,15 m/s. Pemanasan awal menyebabkan tinggi lifted nyala api difusi mengalami penurunan.

Kata kunci: *Lifted Flame*, kecepatan pembakaran, pemanasan awal,

ABSTRACT

Name : Cahyo Setyo Wibowo
Study Program: Mechanical Engineering
Title : Analysis of Effect Air injection on Lifted
Flame Phenomenon with Preheated LPG Variation Using Bunsen
Burner

Almost all industrial activity use combustion process as their energy system supply for utilities. Diffusion flame is one type of combustion widely used in industry. Lifted flame distance is one parameter contributing in combustion quality, influenced by air injection flowrate. This research conduct air injection flowrate effect to lifted flame distance from diffusion type combustion. Fuel (LPG) treatment was carry out to find out heating effect on burning characteristics. This research show that air injection flowrate cause lifted flame distance tends to decrease at the early combustion. Maximum burning velocity in the range of Q_{air} 0.25 L/s and Q_{fuel} 0.0455L/s, with turbulence burning velocity (S_{T1}) 19,15 m/s. Fuel preheating cause lifted flame of burning diffusion tends to decreased.

Keywords: Lifted flame, burning velocity, preheat,

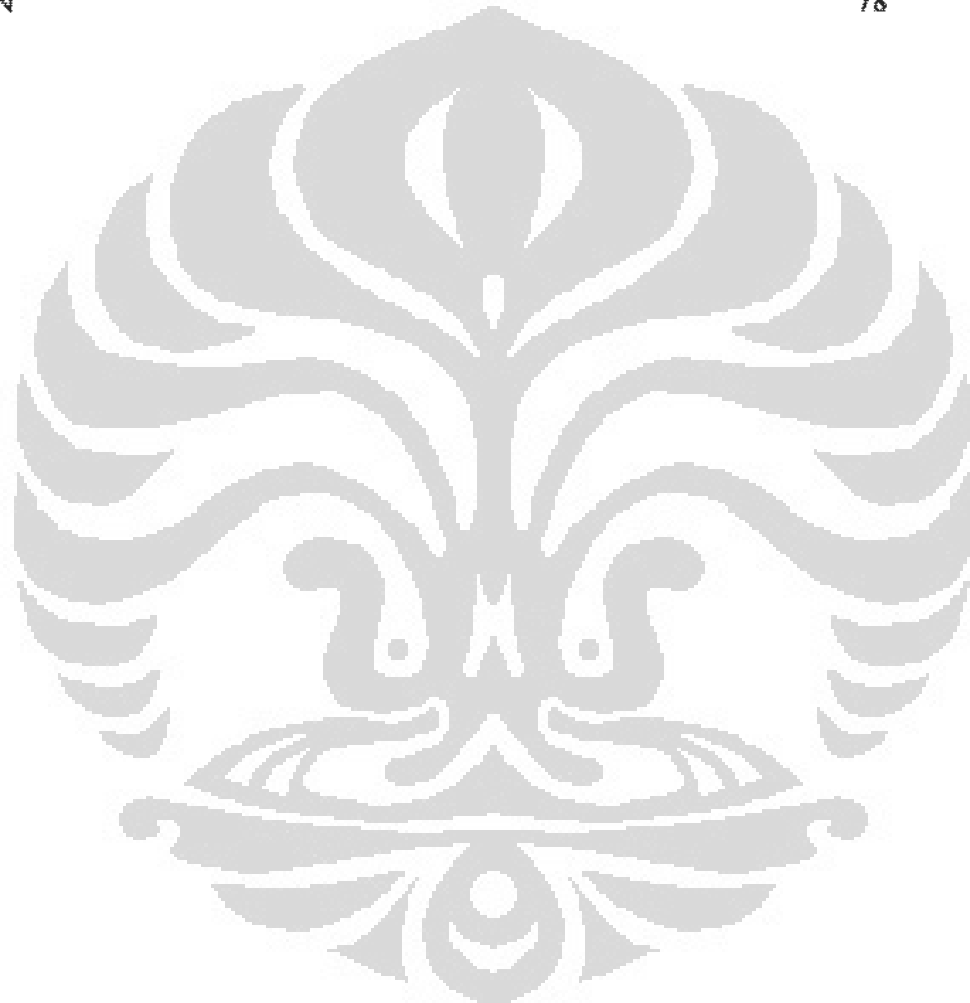
DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	ii
PERNYATAAN PUBLIKASI	iii
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	iv
PENGESAHAN	v
UCAPAN TERIMA KASIH	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR SIMBOL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Manfaat Penelitian	5
1.4 Rumusan Masalah	5
1.5 Batasan Masalah	6
1.6 Metodologi Penelitian	6
1.7 Jadwal Kegiatan	8
1.8 Sistematika Penulisan	8
BAB II DASAR TEORI	10
2.1 Proses dan Reaksi Pembakaran	10
2.2 Bahan Bakar Gas	10
2.2.1 Gas Alam	12
2.2.2 Gas Buatan	13
2.3 Campuran Udara – Bahan Bakar	14
2.3.1 Rasio Udara – Bahan Bakar	14

2.3.2 Rasio Bahan Bakar - Udara	14
2.3.3 Rasio Ekuivalen	15
2.3.4 Udara Berlebih	15
2.4 Beban Pembakaran	16
2.5 Fenomena Lifted flame	16
2.6 Karakteristik Nyala	19
2.5.1 Batas Mampu Nyala (Flamability Limits)	19
2.5.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Karakteristik Nyala	20
2.7 Nyala Api (Flame)	20
2.7.1 Nyala Api Difusi	21
2.7.2 Nyala Api Difusi Jet-Turbulen	27
2.8 Analisis Kecepatan dan Reynolds Number	
Campuran Udara – Bahan Bakar	29
2.9 Kecepatan Pembakaran (Burning Velocity)	30
2.9.1 Kecepatan Pembakaran Laminar	30
2.9.2 Kecepatan Pembakaran Turbulen	31
2.10 Pola Aliran Semburan Udara - Bahan Bakar Nyala Api Difusi	33
2.10.1 Semburan Aliran Menyilang (Confined Transverse Jet)	34
2.10.2 Semburan Aliran Membujur (Confined Longitudinal Jet)	34
2.11 Fenomena Blow-Off	36
2.12 Fenomena Flashback	36
BAB III METODE PENELITIAN	38
3.1 Peralatan Penelitian	38
3.1.1 Peralatan Utama	38
3.2 Peralatan Pendukung	40
3.3 Penyesuaian Skala Rotameter	41
3.3.1 Langkah-langkah persiapan alat	41
3.3.2 Langkah-langkah penyesuaian skala rotameter	42
3.3.3 Hasil penyesuaian skala flowmeter bahan bakar (rotameter)	43
3.4 Kalibrasi Flowmeter Udara	44

3.5 Kalibrasi Alat Ukur Temperatur	45
3.5.1 Langkah-langkah kalibrasi	45
3.5.2 Hasil Kalibrasi	45
3.6 Metode Pengambilan Data	47
3.7 Prosedur Percobaan	48
3.7.1 Persiapan Awal Peralatan Uji	48
3.7.2 Pengukuran temperatur dari burner tip hingga dan temperatur pemanasan	48
3.7.3 Perhitungan nilai interpolasi berdasarkan literatur	49
3.8 Kondisi Lingkungan	49
BAB IV HASIL DAN ANALISA	50
4.1 Pembakaran Stoikiometri	50
4.2 Analisa Dimensi Api	52
4.2.1 Lifted Flame Tanpa Pemanasan awal	54
4.2.2 Panjang Nyala Api Tanpa Pemanasan awal	55
4.3 Dimensi Nyala Api Dengan Pemanasan awal	56
4.3.1 Tinggi Lifted Flame	59
4.3.2 Panjang nyala api (Lf)	62
4.4 Analisa Gambar Hasil Foto	66
4.4.1 Tanpa Pemanasan	66
4.4.2 Dengan Pemanasan	67
4.4.3 Efek Pemanasan	68
4.5 Analisa Temperatur	69
4.5.1 Temperatur Bahan Bakar	69
4.5.2 Temperatur Tip Burner (TTB)	70
4.6 Analisa Perhitungan	71
4.6.1 Reynolds Number LPG Pada Ujung Nosel	71
4.7 Kecepatan Pembakaran	72
4.7.1 Kecepatan pembakaran laminar	73

4.7.2 Kecepatan pembakaran turbulen	73
4.7.3 Grafik Kecepatan Pembakaran	73
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	75
5.1 KESIMPULAN	75
5.2 SARAN	75
DAFTAR ACUAN	76
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN	78



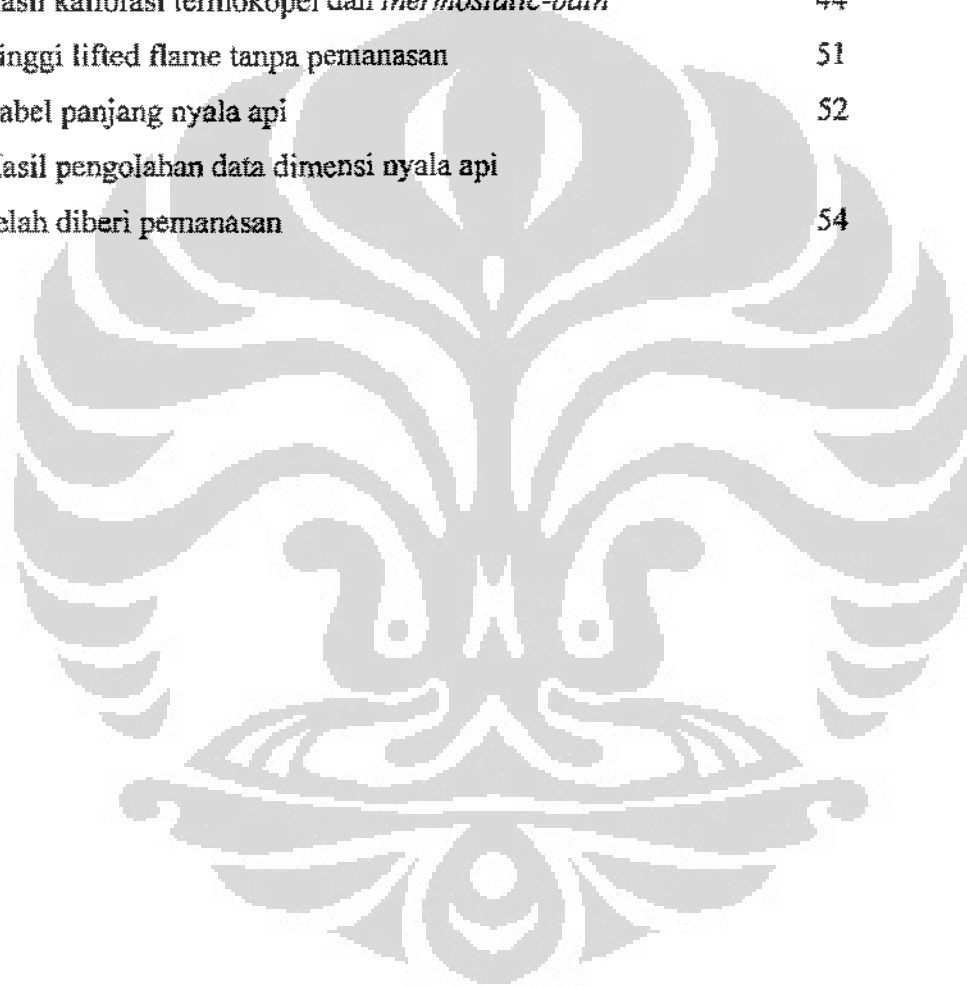
DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Sebaran bahan bakar keluar mulut <i>burner</i>	16
Gambar 2.2 <i>Over-ventilated</i> dan <i>Under-ventilated</i> pada nyala api difusi	21
Gambar 2.3 Tipe-tipe nyala api difusi	22
Gambar 2.4 Perubahan bentuk api terhadap kecepatan aliran bahan bakar	24
Gambar 2.5 Diagram komposisi nyala api difusi dengan bahan bakar hidrogen	24
Gambar 2.6 Diagram profil konsentrasi pada nyala api difusi tipe laminar	25
Gambar 2.7 Diagram stabilitas dan <i>lifted flame</i> pada nyala api difusi	26
Gambar 2.8 Grafik fungsi probabilitas massa jenis pada jarak radial tertentu. (a). Grafik pdf. (b). Grafik profil temperatur pada posisi tertentu.	27
Gambar 2.9. Efek <i>Reynolds number</i> terhadap kecepatan pembakaran	30
Gambar 2.10. <i>Flame front conical.</i>	30
Gambar 2.11. Pola aliran semburan meyilang (<i>transverse flow jet</i>).	32
Gambar 2.12. Pola aliran semburan membujur	33
Gambar 2.13. Peralatan untuk menghasilkan nyala api difusi semburan <i>longitudinal.</i>	33
Gambar 2.14. Pola aliran semburan <i>logitudinal.</i>	34
Gambar 2.15 Diagram stabilitas <i>flashback</i> , <i>lift-off</i> , dan <i>yellow tipping</i> untuk bahan bakar gas industry	35
Gambar 3.1 Gambar skema peralatan penelitian <i>Bunsen Burner</i> <i>Flame Propagation and Stability Unit P.A Hilton</i> <i>LTD C551</i> yang telah dimodifikasi	36
Gambar 3.2 Gambar burner	37

Gambar 3.3 <i>Thermostatic bath</i> dengan koil didalamnya	38
Gambar 3.4 Gambar Prosedur Kalibrasi Rotameter	41
Gambar 3.5 Grafik Penyesuaian Laju Aliran LPG Terhadap <i>Rotameter</i>	42
Gambar 3.6 Grafik Penyesuaian Laju Aliran Udara Terhadap <i>Flowmeter</i>	42
Gambar 3.7 Gambar grafik kalibrasi termokopel	44
Gambar 3.8 Gambar grafik kalibrasi <i>thermostatic bath</i>	45
Gambar 4.1 Cara penentuan dimensi api menggunakan adobe photoshop	50
Gambar 4.2 Grafik tinggi lifted flame dengan variasi jumlah udara dan bahan bakar	51
Gambar 4.3 Grafik panjang nyala api tanpa pemanasan	52
Gambar 4.4 Gambar nyala api tanpa pemanasan awal dengan variasi semburan udara	53
Gambar 4.5 Grafik tinggi lifted flame dengan pemanasan awal 70 ⁰ C	56
Gambar 4.6 Grafik tinggi lifted flame dengan pemanasan awal 80 ⁰ C	57
Gambar 4.7 Grafik tinggi lifted flame dengan pemanasan awal 90 ⁰ C	57
Gambar 4.8 Grafik tinggi lifted flame dengan pemanasan awal 100 ⁰ C	58
Gambar 4.9 Grafik tinggi lifted flame pada rata-rata Q_f	58
Gambar 4.10 Grafik panjang nyala api dengan pemanasan awal 70 ⁰ C	60
Gambar 4.11 Grafik panjang nyala api dengan pemanasan awal 80 ⁰ C	60
Gambar 4.12 Grafik panjang nyala api dengan pemanasan awal 90 ⁰ C	61
Gambar 4.13 Grafik panjang nyala api dengan pemanasan awal 100 ⁰ C	61
Gambar 4.14 Grafik panjang nyala api pada rata-rata Q_f dengan variasi pemanasan awal	62
Gambar 4.15 Gambar dimensi nyala api tanpa pemanasan Q_f : 0,039 L/s	63
Gambar 4.16 Dimensi nyala api dengan pemanasan awal 100 ⁰ C	64
Gambar 4.17 Dimensi nyala api dengan variasi pemanasan	65
Gambar 4.18 Grafik perbedaan temperatur masuk dan keluar dengan variasi pemanasan	67
Gambar 4.19 Grafik perbandingan variasi pemanasan terhadap temperatur tip burner	68

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Batas Mampu Nyala	18
Tabel 3.1 Penyetaraan pembacaan rotameter bahan bakar LPG	41
Tabel 3.2. Data pembacaan rotameter udara	42
Tabel 3.3 Hasil kalibrasi termokopel dan <i>thermostatic-bath</i>	44
Tabel 4.1 Tinggi lifted flame tanpa pemanasan	51
Tabel 4.2 Tabel panjang nyala api	52
Tabel 4.3 Hasil pengolahan data dimensi nyala api setelah diberi pemanasan	54



DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Dimensi
ρ_{LPG}	Massa jenis LPG	kg/m^3
ρ_{but}	Masa jenis butana	kg/m^3
ρ_{prop}	Massa jenis propana	kg/m^3
ν_{LPG}	Viskositas kinematic LPG	m^2/s
ν_{prop}	Viskositas kinematic propana	m^2/s
ν_{but}	Viskositas kinematic butana	m^2/s
T_u	Temperatur <i>unburned gas</i>	$^{\circ}C$
X_f	Ketinggian <i>lifted flame</i>	m
L_f	Panjang Nyala api	m
T_u	Temperatur pada awal <i>preheat zone</i>	$^{\circ}C$
α_s	<i>Thermal diffusivity</i> stoikiometri	m^2/s
v	Kecepatan aliran gas	m/s
S_u	Kecepatan pembakaran	m/s
d	Diameter nosel	m
T_{TB}	Temperatur Tip <i>burner</i>	$^{\circ}C$
T_{in}	Temperatur masuk pemanasan	$^{\circ}C$
T_{out}	Temperatur keluar pemanasan	$^{\circ}C$
A_{ff}	Luas <i>flame front</i>	m^2
Q_f	Laju aliran volume bahan bakar gas	m^3/s
Q_a	Laju aliran volume Udara	m^3/s
Φ	Rasio ekivalen	(-)
BL	<i>Burning load</i>	MW/m^2
LHV	Lower Heating Value	MJ/kg
A_b	Luas penampang barrel	m^2
S_L°	Kecepatan pembakaran Laminar	m/s
S_T°	Kecepatan pembakaran Turbulen	m/s
A_2	Luas ujung nosel	m^2

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Efisiensi penggunaan energi dalam suatu industri merupakan suatu keharusan. Hal ini berkaitan dengan biaya yang dikeluarkan untuk mendapatkan energi menempati porsi yang signifikan. Dalam lingkup nasional, upaya efisiensi energi di sektor industri maupun sektor lainnya sangat sesuai dengan Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 Bab I Pasal 1 ayat 7, tentang konservasi energi yaitu penggunaan energi secara efisien dan rasional tanpa mengurangi penggunaan energi yang memang benar-benar diperlukan. Penerapan konservasi energi adalah upaya yang dilakukan untuk mengatasi permasalahan ketersediaan dan meningkatnya harga bahan bakar fosil. Salah satu bentuk upaya efisiensi tersebut adalah peningkatan efisiensi penggunaan bahan bakar yang dilakukan oleh sektor industri, yaitu dengan meningkatkan kehandalan dan efisiensi sistem pembakaran pada peralatan produksi.

Proses pembakaran adalah proses reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidator dengan melibatkan pelepasan energi dalam bentuk panas dalam jumlah yang signifikan. Pembakaran merupakan bagian sangat penting dalam kegiatan industri yang memanfaatkan bahan bakar sebagai sumber energi. Saat ini hampir semua industri melibatkan proses pembakaran sebagai salah satu unit penyedia energi dalam sistem utilitasnya. Beberapa industri bahkan menggunakan pembakaran sebagai unit utamanya, seperti industri pembangkit listrik. Jenis industri lainnya memanfaatkan proses pembakaran sebagai unit pendukung yang memiliki peran vital, seperti pada Industri Logam, Industri Kimia, dan sebagainya. Proses pembakaran yang tidak sesuai dengan kebutuhan peralatan sering kali menyebabkan terjadinya kendala yang dapat mengganggu proses produksi. Kondisi ini pada akhirnya mengakibatkan penggunaan bahan bakar yang lebih boros dan biaya perawatan peralatan produksi meningkat.

Kebutuhan yang sangat besar serta menipisnya ketersediaan bahan bakar fosil jelas menjadi pertimbangan utama dalam upaya peningkatan efisiensi

pembakaran dalam industri. Selain efisiensi pembakaran yang diinginkan, faktor keselamatan juga merupakan parameter penting yang harus diperhitungkan dalam proses pembakaran. Hal ini disebabkan pada ruang pembakaran (*burner*) yang rentan terhadap terjadinya kerusakan berupa keretakan dan/atau kebocoran dinding ruang bakar maupun pada *nozzle* bahan bakar. Kerusakan pada dinding pembakar biasanya terjadi karena menempelnya jelaga dari sisa bahan bakar yang belum terbakar dan titik-titik api akibat dari kurang stabilnya bentuk api atau lidah api. Fenomena ini dapat menyebabkan keretakan dan bahkan dapat menyebabkan timbulnya lubang.

Kerusakan pada *nozzle* merupakan permasalahan yang sering timbul di *burner*. Hal ini disebabkan oleh beban pemanasan yang tinggi selama proses pembakaran terus menerus pada temperatur tinggi. Jarak antara nosel dengan *flame front* (dasar api) juga merupakan faktor penting yang menjadi penyebab kerusakan *nozzle*. Semakin dekat *flame front* dengan nosel maka temperatur yang diterima oleh nosel akan semakin tinggi, begitu juga sebaliknya. Pemahaman yang baik dan tepat mengenai karakteristik nyala api dan proses pembakaran harus dipahami secara menyeluruh, tidak hanya secara teori melainkan juga harus didukung dengan melakukan percobaan atau eksperimen.

Salah satu fenomena yang terjadi pada proses pembakaran nyala difusi adalah *lifted flame*, yaitu suatu kondisi dimana pangkal nyala api terangkat dan berada pada jarak tertentu dari mulut *burner*. Kondisi *lifted-flame* dapat terjadi dalam pembakaran difusi karena udara sebagai oksidator tidak tercampur dengan bahan bakar ketika keluar dari mulut *burner*. Kondisi ini mengakibatkan bahan bakar dan udara memerlukan waktu untuk berdifusi hingga terjadi campuran yang siap untuk proses pembakaran.

Penelitian awal mengenai *lifted flame* dalam pembakaran difusi diawali oleh Wohl et.al. pada tahun 1949 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 aliran bahan bakar pada posisi tersebut.

Penelitian lanjutan telah dilakukan oleh beberapa peneliti untuk mengoptimalkan proses pembakaran dan fenomena yang terjadi. Eickhoff et.al. (1984) menyatakan bahwa dalam pembakaran difusi sejumlah udara menyusup ke dalam aliran bahan bakar hingga terjadi kondisi *pre-mixed*. Kondisi premixed ini yang memungkinkan terjadinya pangkal nyala pembakaran difusi. Selain itu dinyatakan pula bahwa stabilisasi nyala dipengaruhi oleh rambatan nyala premixed turbulen. Kaighatgi (1984) melakukan eksperimen untuk Hidrogen, Propana, Methana dan ethylene menemukan bahwa tinggi lift-off merupakan fungsi linier dari kecepatan sembur (jet exit velocity) u_0 , tidak tergantung dari diameter tube, dan berbanding terbalik terhadap kuadrat dari kecepatan pembakaran laminar maksimum. Miake-Lye and Hammer (1988) meneliti Nyala Methane, Ethylene, dan gas alam dengan campuran udara, diperoleh bahwa tinggi Lift-off fungsi linier dari kecepatan sembur.

Schefer et al. (1994) menggunakan *planar imaging* pengukuran CH_4 , CH dan temperatur, menemukan daerah nyala merupakan konsentrasi CH tinggi, terbentuk disekitar lapisan terluar semburan. Selanjutnya disimpulkan bahwa propagasi nyala dalam tiga dimensi dan gerakan mayor scale turbulence mengontrol kestabilan nyala.

Vanquickenborne dan Van Tiggelen (1996) menyatakan bahwa udara dan bahan bakar tercampur sempurna pada dasar nyala difusi dan kestabilan tercapai jika kecepatan aliran campuran stoikiometri sama dengan kecepatan pembakaran nyala api. Eduardo Fernandez-Tarrazo (2005) melakukan analisa numerik guna menentukan kondisi lift-off dan blow-off dalam pembakaran difusi pada lapisan campuran antara bahan bakar dan udara yang disemburkan secara paralel dengan arah horisontal.

Mark A. Mikofski et.al. (2006) melakukan pengukuran nyala difusi laminar dengan Planar Laser-Induced Fluorescence (PLIF) dan menemukan bahwa tinggi nyala luminous lebih tinggi dibanding tinggi zone reaksi akibat adanya pendaran jelaga di atas zona reaksi. Manav Tyagi dkk (2007) melakukan studi numerik dan analitik tentang respons osilasi dari nyala difusi.

Pada tahun 2007 di laboratorium *Thermodynamic Research Group Flame and Combustion* Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia telah dilakukan

penelitian pengamatan pengaruh variasi sudut ring pengarah udara, α : 0° , 15° , 30° , 45° , 60° dan 75° terhadap panjang nyala api difusi meliputi jarak *lifted flame*, tinggi nyala api difusi dan temperatur ujung *nozzle*. Pada penelitian tersebut digunakan propana dengan kemurnian 95 % sebagai bahan bakar dan kamera video untuk menangkap dan merekam fenomena yang terjadi. Hasil dari penelitian tersebut, yaitu pada nyala api difusi kondisi *lift-off* diperoleh *Reynolds number* propane 8.619, jarak *lifted flame* 105,4 mm, panjang nyala api difusi 344,6 mm dan *burning velocity* 239,2 mm/dtk. Dengan menggunakan ring pengarah injeksi udara sudut 45° dan *Reynolds number* campuran udara-propana 6.482 s/d 6.513 diperoleh jarak *lifted flame* menjadi sebesar 65,4 mm, panjang nyala api difusi menjadi 410,3 mm, kecepatan pembakaran menjadi 290,64 mm/dtk dan temperatur ujung *nozzle* dari $52,4^\circ\text{C}$ menjadi $54,6^\circ\text{C}$ [1]

Dengan adanya fenomena *lifted flame* dalam proses pembakaran difusi, maka keandalan dan efisiensi sistem pembakaran dapat diatur. Karena besar energi hasil reaksi pembakaran nyala api difusi berkaitan erat dengan panjang nyala api difusi yang dihasilkan

Keandalan dan efisiensi sistem pembakaran dapat dicapai apabila bahan bakar dan udara dapat bercampur dengan cepat dan mudah untuk dibakar dalam proses pembakaran. Beberapa cara yang dapat digunakan untuk mencapai keandalan dan efisiensi sistem pembakaran diantaranya adalah dengan mendesain ruang bakar sedemikian rupa sehingga memudahkan terjadinya pencampuran antara bahan bakar dan udara, memanaskan terlebih dahulu udara yang akan dicampurkan dengan bahan bakar (pada proses pembakaran nyala api premix) dan memanaskan terlebih dahulu bahan bakar yang akan digunakan dalam proses pembakaran.

Secara teori, dengan meningkatkan temperatur *un-burn* (T_u) dari bahan bakar maka akan didapatkan, *Rate of reaction* (*RR*) yang lebih tinggi, kecepatan pembakaran (*Burning Vekocity*) yang lebih cepat, energi minimum (E_m) yang lebih rendah sehingga *starting point* menjadi rendah (proses pembakaran mudah terjadi biasanya digunakan pada pembangkit listrik tenaga gas dengan memanaskan LPG terlebih dahulu untuk mempermudah start awal). Sehingga pada tahun 2008 – 2009 di laboratorium *Thermodynamic Research Group Flame*

and Combustion Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia dilakukan penelitian berkelanjutan dengan memberikan perlakuan pemanasan awal bahan bakar LPG pada nyala api difusi untuk mengetahui pengaruhnya terhadap fenomena *lifted flame* dengan memberikan variasi semburan udara.

Pengaruh udara terhadap pembakaran merupakan salah satu faktor penting yang menentukan efisiensi proses. Oleh karena itu, penelitian yang difokuskan pada pengaruh semburan udara dalam proses pembakaran sangat diperlukan. Penelitian dengan judul "Analisis Pengaruh Semburan Udara Terhadap Perubahan Tinggi *Lifted Nyala Api Difusi Dengan Variasi Pemanasan Awal Bahan Bakar LPG Pada Bunsen Burner*" memiliki peran strategis untuk mendapatkan data fundamental bagi peningkatan efisiensi pembakaran. Fenomena yang terjadi dalam proses pembakaran dengan variasi semburan udara diamati menggunakan beberapa parameter, seperti tinggi *lifted flame*, tinggi nyala api difusi dan *burning load* pembakaran. Perlakuan awal pada penggunaan LPG sebagai bahan bakar merupakan parameter yang juga diamati untuk mengetahui pengaruhnya terhadap efisiensi pembakaran.

1.2. TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan mengamati fenomena pengaruh semburan udara terhadap panjang nyala api difusi pada pembakaran bahan bakar LPG baik itu tanpa dan dengan pemanasan awal bahan bakar (70° , 80° , 90° , dan 100°C). Penelitian dilakukan dalam dua tahap, yaitu:

1. Tahap pertama (tanpa pemanasan awal):
 - a. Mengetahui pengaruh semburan udara terhadap jarak *lifted flame*, tinggi dan panjang nyala api difusi serta temperatur ujung *nozzle*.
 - b. Mengetahui pengaruh perubahan panjang nyala api terhadap temperatur ujung *nozzle* dan kecepatan pembakaran (*burning velocity*).
2. Tahap kedua (dengan pemanasan awal):
 - a. Mengetahui pengaruh semburan udara terhadap jarak *lifted flame*, tinggi dan panjang nyala api difusi serta temperatur ujung *nozzle*.
 - b. Mengetahui pengaruh perubahan panjang nyala api difusi terhadap temperatur ujung *nozzle* serta kecepatan pembakaran (*burning velocity*).

1.3. MANFAAT PENELITIAN

Keberhasilan penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat penting bagi peningkatan kajian teknologi efisiensi pembakaran, sehingga:

1. Diketahui pengaruh perubahan panjang nyala api difusi terhadap temperatur ujung *nozzle* dan kecepatan pembakaran (*burning velocity*).
2. Dapat meningkatkan kehandalan dan efisiensi sistem pembakaran.
3. Dapat digunakan sebagai dasar perancangan sistem ruang bakar.

1.4. RUMUSAN MASALAH

Variasi laju semburan udara dan perlakuan awal terhadap bahan bakar LPG merupakan parameter penting untuk mendapatkan efisiensi pembakaran yang maksimal. Beberapa yang diamati dan dikaji dalam penelitian ini adalah pengaruh semburan udara dan perlakuan awal LPG terhadap fenomena pembakaran, antara lain:

1. Besar laju semburan udara yang dapat memberikan efisiensi pembakaran maksimal.
2. Pengaruh variasi laju semburan udara terhadap jarak *lifted flame*, tinggi dan panjang nyala api difusi serta temperatur ujung *nozzle*.
3. Pengaruh pemanasan awal (*pre-heat*) terhadap tinggi nyala api difusi, panjang nyala api difusi serta temperatur ujung *nozzle*.
4. Pengaruh perubahan panjang nyala api difusi terhadap temperatur ujung *nozzle* serta kecepatan pembakaran (*burning velocity*).

1.5. BATASAN MASALAH

Untuk mencapai tujuan yang diharapkan, penelitian ini difokuskan dengan membatasi permasalahan pada beberapa parameter sebagai berikut:

1. Dokumentasi nyala api difusi dilakukan dalam bentuk foto dengan menggunakan kamera digital.
2. Kecepatan laju aliran bahan bakar dan udara diasumsikan konstan untuk setiap pelaksanaan pengambilan gambar nyala api difusi dan pengukuran temperatur ujung *nozzle*.

3. Cover glass digunakan untuk memperkecil gangguan aliran udara luar terhadap nyala api, sehingga pengaruh udara disekitar nyala api difusi dapat diabaikan.
4. Emisi gas buang tidak menjadi objek pembahasan dalam pelaksanaan penelitian ini.
5. Pengaruh gaya gravitasi terhadap parameter nyala api dan fenomena lainnya dapat diabaikan.
6. Kehilangan energi akibat gesekan pada bahan bakar maupun udara diabaikan selama penelitian.

1.6. METODOLOGI PENELITIAN

1. Persiapan, merupakan pelaksanaan awal kegiatan penelitian yang terdiri dari studi literatur dan persiapan pelaksanaan percobaan laboratorium.

- a. Studi Literatur.

Kegiatan ini mencakup proses pengumpulan informasi yang berkaitan dengan materi bahasan yang berasal dari buku-buku literatur, jurnal, dan materi bimbingan dari dosen pembimbing dan diskusi dengan *Thermodynamic Research Group Flame and Combustion* Universitas Indonesia Fakultas Teknik Departemen Teknik Mesin.

- b. Persiapan Percobaan Laboratorium.

Kegiatan ini mencakup proses persiapan alat *burner* gas, merancang proses eksperimen, menguji alat, kalibrasi *rotameter* (*flowmeter* bahan bakar), Bath pemanas, penyediaan kamera video dan *pressure regulator*, dan unit pendukung lainnya.

2. Pelaksanaan Penelitian Utama (Eksperimen).

Eksperimen dilakukan menggunakan unit peralatan percobaan yang dirangkai khusus untuk mendapatkan data laboratorium yang representatif. Pelaksanaan percobaan dilakukan pada laboratorium *Thermodynamic Research Group Flame and Combustion* Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia dengan menggunakan bahan bakar LPG.

Pengaruh semburan udara terhadap nyala api difusi bahan bakar LPG dengan pemanasan dan tanpa pemanasan awal bahan bakar dilakukan pada beberapa

variasi temperatur, yaitu 70° , 80° , 90° dan 100°C . Laju aliran udara ditambahkan secara bertahap (gambar hasil kamera). Data eksperimen yang diperlukan adalah laju aliran bahan bakar, laju aliran udara jarak *lifted flame*, dan tinggi nyala api difusi.

3. Penyusunan Laporan Penelitian.

1.7. SISTEMATIK PENULISAN

Sistematika penulisan sebagai berikut :

1. BAB I PENDAHULUAN

Berisikan : Latar Belakang, Tujuan Penelitian, Manfaat Penelitian, Rumusan Masalah, Batasan Masalah, Sistematika Penelitian, Metode Penelitian, Peralatan yang dibutuhkan dan Sistematika Penulisan.

2. BAB II TEORI DASAR

Berisikan teori-teori dasar yang didapat dari buku-buku referensi, hasil penelitian jurnal-jurnal yang digunakan dalam mengolah dan menganalisis data hasil pengujian.

3. BAB III METODE PENELITIAN

Berisikan skema penelitian, prosedur penelitian, data kalibrasi peralatan dan data penelitian.

4. BAB IV ANALISIS HASIL PENELITIAN

Berisikan analisis penelitian berupa : pengaruh semburan udara terhadap tinggi *lifted flame*, tinggi dan panjang nyala api difusi. Pengaruh perubahan panjang nyala api difusi terhadap temperatur ujung nozel dan kecepatan pembakaran (*burning velocity*).

5. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

6. DAFTAR PUSTAKA

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Proses dan Reaksi Pembakaran

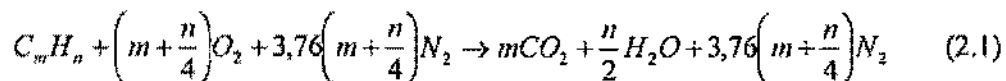
Terdapat berbagai pengertian mengenai pembakaran, namun menurut *Oxford Concise Dictionary*, pembakaran adalah 1. konsumsi oleh api; 2. pembentukan nyala dan panas melalui kombinasi kimia[2]. Menurut *Webster's Dictionary*, pembakaran merupakan 1. laju oksidasi yang sangat cepat yang menghasilkan panas atau panas dan cahaya [handout kuliah]. Secara umum, pembakaran dapat didefinisikan sebagai proses reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidator dengan melibatkan pelepasan energi sebagai panas yang signifikan.

Bahan bakar (*fuel*) merupakan segala substansi yang melepaskan panas ketika dioksidasi dan secara umum mengandung unsur-unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Sementara oksidator adalah segala substansi yang mengandung oksigen (misalnya udara) yang akan bereaksi dengan bahan bakar (*fuel*).

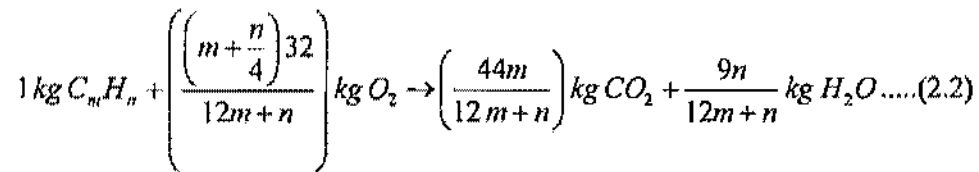
Dalam proses pembakaran fenomena-fenomena yang terjadi antara lain interaksi proses-proses kimia dan fisika, pelepasan panas yang berasal dari energi ikatan-ikatan kimia, proses perpindahan panas, proses perpindahan massa, dan gerakan fluida.

Seperti telah diuraikan sebelumnya, proses pembakaran akan terjadi jika unsur-unsur bahan bakar teroksidasi. Proses ini akan menghasilkan panas sehingga akan disebut sebagai proses oksidasi eksotermis. Jika oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran diperoleh dari udara, di mana udara terdiri dari 21% oksigen dan 78% nitrogen, maka reaksi stoikiometrik pembakaran hidrokarbon murni C_mH_n dapat dihitung dengan metode mol dan metode kesetimbangan massa, sebagai berikut :

Metode mol :



Metode Kesetimbangan massa :



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

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

2.2. Bahan Bakar Gas

Bahan bakar (*fuel*) merupakan materi atau zat yang ditambahkan proses pemanasan atau pembakaran (sampai mencapai temperatur yang dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia dengan oksidator) akan melepaskan energi berupa panas dan cahaya. Bahan bakar yang digunakan saat ini memiliki komposisi kimia utama, seperti karbon, hidrogen serta senyawanya (senyawa hidrokarbon/senyawa organik) yang dapat berfase gas, cair, maupun padat.

Bahan bakar gas (BBG) mempunyai beberapa keuntungan bila dibandingkan dengan bahan bakar yang lain, yaitu bahan bakar padat dan cair. Bahan bakar gas dapat terbakar dengan tanpa adanya asap dan abu karena proses pembakarannya dapat lebih sempurna dengan lebih sedikit menggunakan udara luar dan nyala api relatif dapat lebih mudah dikontrol. Namun, terdapat juga beberapa kelemahan, yaitu sulitnya menyimpan bahan bakar gas dalam jumlah yang besar dibanding dengan bahan bakar yang lain.

Bahan bakar gas dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian, yaitu bahan bakar gas alam dan bahan bakar gas buatan. Gas alam secara umum dapat diperoleh dari hasil sampingan tempat pengeboran minyak dan pertambangan batubara. Namun, terkadang dapat juga dijumpai di sumber gas alam. Gas buatan dapat diperoleh dari kayu, gambut, batubara, minyak, oli dsb, dan juga sebagai hasil sampingan. Komponen utama bahan bakar gas yang dapat digunakan untuk proses pembakaran, yaitu metana, sedangkan untuk karbonmonoksida dan hidrogen jumlahnya relatif lebih sedikit.

2.2.1. Gas Alam (*Natural Gas*)

Gas alam sebagian besar merupakan campuran dari senyawa hidrokarbon dengan sedikit jumlah materi nonhidrokarbon yang berfase gas. Sebagai bahan bakar, gas alam sangat ideal karena umumnya bebas dari kandungan gas tidak terbakar atau residu padat. Pada saat dibakar umumnya menghasilkan nyala berwarna biru dan sangat mudah terbakar jika tercampur udara pada komposisi yang tepat.

Komposisi kimia gas alam sebagian besar terdiri dari metana (CH_4) dan sejumlah yang lebih sedikit etana (C_2H_6), propana (C_3H_8), butana (C_4H_{10}), serta pentana (C_5H_{12}). Kadang-kadang terkandung pula sulfur, namun jumlahnya dapat diabaikan. Karbondioksida dan nitrogen merupakan komponen tak terbakar yang sering terdapat dalam gas alam dalam jumlah sangat kecil. Jumlah komposisi yang terdapat pada gas alam yang diperoleh dari pengeboran minyak, yaitu :

Metana	68 – 96 %
Etana	3 – 30 %

Sedangkan pada pertambangan batubara biasanya berkisar :

Metana	93 – 99 %
Etana	> 3 %
Karbondioksida	> 4 %
Nitrogen, dll	> 6 % [<i>sp sharma</i>]

Gas propana merupakan hidrokarbon alkana berkarbon tiga. Wujud umumnya adalah gas, namun dapat dikompres sampai menjadi bentuk cair untuk kemudahan transportasi. Propana diturunkan dari minyak jenis lain melalui proses

distilasi minyak mentah maupun dari gas alam (*natural gas*). Untuk keperluan komersil gas propana dicampur dengan gas lainnya seperti *propylene*, *butane*, dan *butylene* untuk mendapatkan produk baru seperti pada gas LPG.

2.2.2. Gas Buatan

Bahan bakar gas buatan banyak diproduksi melalui proses gasifikasi atau karbonisasi bahan bakar padat (terutama batubara), dan beberapa proses lainnya. Kadang-kadang gas-gas ini diberi perlakuan tertentu untuk meningkatkan nilai kalornya. Jenis-jenis bahan bakar gas buatan meliputi *Liquified Petroleum Gas (LPG)*, *refinery oil gas*, *producer gas*, *water gas*, *blast furnace gas*, *wood gas*, *peat gas*, *coal gas*, *coke oven gas*, dan *bio gas*.

LPG (*Liquified Petroleum Gas*) yang populer di Indonesia dengan nama Elpiji didapat dari proses pengolahan gas alam atau dari minyak mentah (*Crude Oil*). Dari gas alam selain dihasilkan LNG juga didapat LPG, sedangkan dari pengolahan minyak mentah sebagian besar produk ringan dapat menghasilkan LPG dengan proses fraksionasi, *nafta reforming*, *thermal/catalyc cracking*.

Pada titik didih yang rendah kondensat gas telah dipisahkan dari kandungan etana dan metana, sedangkan pada titik didih yang tinggi gasolin berisi sebagian besar hidrokarbon jenuh (propana), bagian kecil lainnya adalah C_4 jenuh, isobutana dan n-butana, perbandingan produk ini bervariasi tergantung pada sumber kondensatnya.

Elpiji yang diproduksi dan dipasarkan di Indonesia oleh PT. Pertamina terdapat tiga jenis yaitu:

- Bahan bakar gas elpiji untuk kebutuhan rumah tangga, industri dan komersial yaitu elpiji campuran propana dan butana, selanjutnya disebut elpiji campuran.
- Bahan bakar gas elpiji untuk kebutuhan khusus dan komersial yaitu bahan bakar elpiji propana selanjutnya disebut elpiji propana.
- Bahan bakar gas elpiji untuk kebutuhan komersial yaitu bahan bakar elpiji butana selanjutnya disebut elpiji butana.

2.3. Campuran Udara – Bahan Bakar

Dalam suatu proses pembakaran beberapa hal penting yang perlu diperhatikan antara lain bahan bakar, udara (oksigen), kalor, dan reaksi kimia. Selain itu, perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting pula dalam menentukan hasil proses pembakaran itu sendiri yang secara langsung mempengaruhi reaksi pembakaran yang terjadi serta hasil keluaran (produk) proses pembakaran.

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung rasio campuran bahan bakar dan udara antara lain AFR (*Air Fuel Ratio*), FAR (*Fuel Air Ratio*), dan Rasio Ekuivalen (Φ).

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

Metode ini merupakan metode yang paling sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau. Secara simbolis, AFR dihitung sebagai:

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

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

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

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

$$FAR = \frac{m_f}{m_a} = \frac{M_f N_f}{M_a N_a} \quad (2.4)$$

2.3.3 Rasio Ekuivalen (*Equivalent Ratio, Φ*)

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

$$\Phi = \frac{AFR_a}{AFR_s} = \frac{FAR_s}{FAR_a} \quad (2.5)$$

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

2.3.4 Udara Berlebih (*Excess Air – XSA*)

Dalam proses pembakaran sulit untuk mendapatkan pencampuran yang memuaskan antara bahan bakar dengan udara pada proses pembakaran aktual. Udara perlu diberikan dalam jumlah berlebih untuk memastikan terjadinya pembakaran secara sempurna seluruh bahan bakar yang ada.

Udara lebih (*excess air*) didefinisikan sebagai udara yang diberikan untuk pembakaran dalam jumlah yang lebih besar dari jumlah teoritis yang dibutuhkan bahan bakar. Udara lebih dapat dideduksi dengan pengukuran komposisi produk pembakaran dalam keadaan kering (*dry basis*). Jika produk merupakan hasil pembakaran sempurna, maka persentase udara lebih dapat dinyatakan sebagai:

$$\%XSA = \left[\frac{(Z_{O_2})_{prod}}{(Z_{N_2})_{prod} / 3,76 - (Z_{N_2})_{prod}} \right] - \left[\frac{(N_{O_2})_{prod}}{(N_{N_2})_{prod} / 3,76 - (N_{N_2})_{prod}} \right] \quad (2.6)$$

2.4. Beban Pembakaran (*Burning Load*)

Beban pembakaran didefinisikan sebagai perbandingan antara laju aliran gas yang dikalikan nilai kalornya dengan luas penampang tabung pembakar (*barrel*):

$$\text{Burning Load (BL)} = \frac{m_f \times \text{LHV}}{A_{\text{barrel}}} \quad (2.7)$$

Di mana : m_f = laju aliran bahan bakar (m^3/s)
 LHV = lower heating value (J/m^3)
 A_{barrel} = luas penampang barrel (m^2)

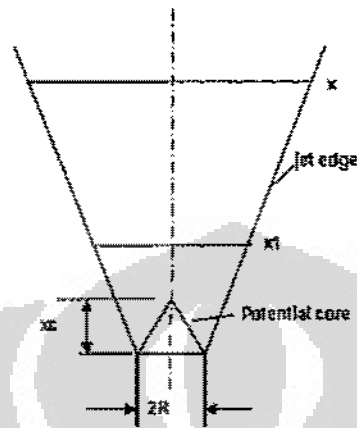
2.5. Fenomena *Lifted flame*

Proses terangkatnya pangkal nyala api difusi dikenal dengan istilah *phenomena lifted flame*. Phenomena ini disebabkan oksigen yang terdapat pada udara tidak bercampur terlebih dahulu, yang mengakibatkan bahan bakar dan udara memerlukan waktu untuk berdifusi hingga terjadi campuran yang siap untuk proses pembakaran, tetapi agak stabil pada jarak tertentu dari tabung pembakar. Sama seperti halnya *flashback*, fenomena *Lifted flame* juga berhubungan dengan kecepatan nyala api laminar lokal dan kecepatan aliran lokal yang sebanding.

Fenomena nyala api terangkat (*Lifted flame*) sangat tergantung pada nyala api lokal dan sifat aliran dekat ujung (mulut) tabung pembakar. Apabila kecepatan aliran cukup rendah, ujung bawah nyala api berada sangat dekat dengan ujung tabung pembakar dan hal ini dikatakan menempel. Jika kecepatan dinaikkan, maka sudut kerucut nyala turun sesuai dengan kondisi $\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{S_L}{V_u} \right)$ dan ujung nyala bergeser sedikit ke bawah.

Lalu kecepatan aliran ditingkatkan lagi hingga tercapai kecepatan kritis, ujung nyala akan meloncat ke posisi jauh dari ujung (mulut) pembakar dan nyala dikatakan terangkat dan jika kecepatan aliran terus dinaikkan, maka nyala secara kasar akan padam dan kondisi ini tidak diinginkan. Semburan bahan bakar yang keluar dari mulut *burner / nozzle* akan menyebar dengan distribusi konsentrasi

massa terhadap udara yang kian menipis dengan bertambahnya jarak terhadap mulut *burner*. Untuk memperoleh distribusi tersebut, dapat digambarkan aliran bahan bakar yang keluar dari mulut *burner* dengan jari-jari R ke udara diam seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 2.1. Sebaran bahan bakar keluar mulut *burner* [12]

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

$$\begin{aligned} v_x(r < R, 0) &= v_e \\ v_x(r > R, 0) &= 0 \end{aligned}$$

Sedangkan fraksi massa bahan bakar terhadap udara dapat dinyatakan sebagai :

$$\begin{aligned} Y_F(r \leq R, 0) &= 1 \\ (Y_F(r > R, 0) &= 0 \end{aligned}$$

Sehingga distribusi kecepatan axial dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{v_x}{v_e} = 0.375(\rho_e v_e R / \mu)(x/R)^{-1} [1 + \xi^2 / 4]^{-2} \quad (2.8)$$

Dimana :

$$\xi = \left(\frac{3\rho_e J_c}{16\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{\mu x} \quad (2.9)$$

Momentum fluida pada mulut *burner* :

$$J_c = \rho_c v_c^2 \pi R^2 \quad (2.10)$$

Jika Reynolds number dinyatakan sebagai :

$$Re_j = \rho_c v_c R / \mu \quad (2.11)$$

Maka kecepatan gas sebanding dengan bilangan Reynold 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, yaitu perbandingan momentum terhadap difusivitas sama dengan satu. Dengan asumsi tersebut maka fraksi massa bahan bakar dapat dinyatakan sebagai :

$$Y_F = \frac{3}{8\pi} \frac{Q_f}{Dx} \left[1 + \frac{\xi^2}{4} \right]^{-2} \quad (2.12)$$

Dimana

$Q_f = v_c \pi R^2$, merupakan laju volumetrik bahan bakar

Maka fraksi bahan bakar dalam campuran dapat dinyatakan sebagai :

$$Y_F = 0.375 Re_j (x/R)^{-1} \left[1 + \frac{\xi^2}{4} \right]^{-2} \quad (2.13)$$

Kemudian didapat jarak *lifted flame* yang terbentuk :

$$x = \frac{0.375 \cdot Re \cdot R}{Y \cdot \left(1 + \frac{\xi^2}{4} \right)^2} \quad (2.14)$$

Fraksi massa bahan bakar sepanjang sumbu dinyatakan sebagai :

$$Y_{F,0} = 0.375 Re_j (x/R)^{-1} \quad (2.15)$$

Persamaan (4) berlaku untuk $x > 0$.

2.6. Karakteristik Nyala

2.6.1 Batas Mampu Nyala (*Flamability Limits*)

Campuran bahan bakar dan oksidator dapat mendukung terjadinya nyala api dalam daerah konsentrasi tertentu. Batas daerah tersebut disebut batas bawah dan batas atas mampu nyala (*flamability*). Sebagai contoh, campuran gas alam dan udara tidak akan menyebabkan nyala api jika proporsi dari gas kurang dari 4% atau lebih dari 15%.

Pada konsentrasi rendah, walaupun mungkin terjadi penyalaan lokal, energi yang disediakan tidak cukup untuk memanaskan lapisan gas didekatnya ke temperatur nyala. Seiring dengan naiknya tekanan parsial dari bahan bakar gas, energi juga ikut naik ke titik yang akan menyalakan bahan bakar gas di dekatnya dan menyebarkan nyala api.

Dengan menaikkan tekanan parsial bahan bakar gas, kapasitas panas dari campuran udara-bahan bakar juga naik dan temperatur nyala api berkurang. Dengan menaikkan konsentrasi bahan bakar melebihi batas atas mampu nyala api yang lebih dingin tidak akan menyalakan gas di dekatnya dan nyala api berhenti menyebar.

Tabel 2.1 Batas Mampu Nyala

	Lower flammability limit (L)			L C _u	Upper flammability limits (U)		U C _u	S _u (m/s)	Minimum ignition energy (mJ)	Minimum quenching distance (mm)
	% Vol	g/m ³	kg/m ³		% Vol	g/m ³				
Hydrogen	4	3.6	475	0.13	75	67	2.3	3.2	0.01	0.5
Carbon Monoxide	12.5	137	1591	0.42	74	932	2.5	0.43		
Methane	5	36	1906	0.33	15	126	1.6	0.37	0.26	2
Ethane	3	41	1952	0.57	12.4	190	2.2	0.44	0.24	1.8
Propane	2.1	42	1951	0.52	9.5	210	2.4	0.42	0.25	1.8
n-Butane	1.8	48	2200	0.58	8.4	240	1.7	0.42	0.26	1.8
n-Pentane	1.4	46	2090	0.55	7.8	270	3.1	0.42	0.22	1.8
n-Hexane	1.2	47	2124	0.56	7.4	310	3.4	0.42	0.23	1.8
n-Heptane	1.05	47	2116	0.56	6.7	320	3.6	0.42	0.24	1.8
n-Octane	0.95	49	2199	0.58						
n-Nonane	0.85	49	2194	0.58						
n-Decane	0.75	48	2145	0.56	5.6	380	4.2	0.4		
Ethene	2.7	35	1654	0.41	3.6	700	5.3	>0.69	0.12	1.2
Propene	2.4	46	2110	0.54	11	210	2.5	0.48	0.28	
Butene-1	1.7	44	1998	0.5	9.7	270	2.9	0.48		
Acetylene	2.5	29	1410					1.7	0.02	
Methanol	6.7	103	2141	0.55	3.6	810	2.9	0.52	0.14	1.5
Ethanol	3.3	70	1948	0.5	19	480	2.9			
n-Propanol	2.2	60	1874	0.49	14	420	3.2	0.38		
Acetone	2.6	70	2033	0.52	13	390	2.6	0.5	1.1	
Methyl ethyl ketone	1.9	62	1974	0.52	10	350	2.7			
Diethyl ketone	1.6	63	2121	0.55						
Benzene	1.3	47	1910	0.48	7.9	300	2.9	0.45	0.22	1.8

Sumber : Drysdale, Dougal, *An Introduction to Fire Dynamics*, John Wiley & Sons, England, 1998.

Untuk bahan bakar yang terdiri atas campuran beberapa jenis gas, batas mampu nyala dapat dirumuskan dari persamaan Le Chatelier's sebagai berikut:

$$L = \frac{a+b+c}{\frac{a}{l_a} + \frac{b}{l_b} + \frac{c}{l_c}} \quad (2.16)$$

Di mana: N a, b, c = persentase komposisi gas dalam campuran
 l_a, l_b, l_c = komposisi dari campuran maksimum tiap gas

2.6.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Karakteristik Nyala

Faktor dan kimia diketahui dapat mempengaruhi karakteristik nyala, variabel-variabel fisik diantaranya adalah temperatur dan tekanan, sedangkan variabel kimia diantaranya adalah rasio campuran, penambahan *inerti* dan struktur hidrokarbon.

Pengaruh komposisi campuran sangat penting bagi kecepatan pembakaran, nyala hanya akan merambat pada konsentrasi campuran tertentu. Konsentrasi bahan bakar minimum dalam campuran yang sudah dapat menyala dinamakan batas nyala terbawah, dan biasanya konsentrasi bahan bakar dan udara dikondisikan pada keadaan standar yaitu campuran stoikiometri. Dengan penambahan konsentrasi bahan bakar pada campuran, maka campuran akan kaya dan oksigen berkurang, kecepatan pembakaran turun dan api akan padam, hal ini juga berkaitan dengan batas nyala yang dinamakan batas nyala atas.

2.7 Nyala Api (*Flame*)

Suatu nyala api adalah penyebaran sendiri secara terus menerus yang dibatasi oleh daerah pembakaran dengan kecepatan *subsonic* (di bawah kecepatan suara), atau dengan kata lain nyala api (*flame*) merupakan gelombang panas yang terjadi akibat reaksi kimia eksotermis yang cepat.

Terdapat dua klasifikasi utama dari nyala api yaitu nyala api *premix* (*premixed flame*) dan nyala api difusi (*diffusion flame*). Nyala api *premix* adalah jenis nyala api di mana bahan bakar dan udara bercampur sebelum terjadinya proses pembakaran. Sedangkan nyala api difusi timbul sewaktu udara berdifusi

atau masuk ke dalam aliran bahan bakar tanpa dicampur terlebih dahulu sehingga oksidator berasal dari udara luar.

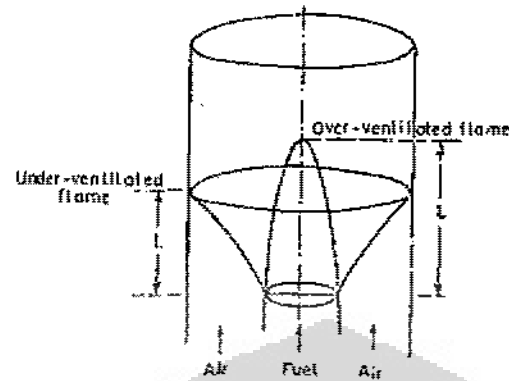
2.7.1 Nyala Api Difusi

Nyala api secara umum terbagi atas dua jenis, yaitu nyala api premix dan nyala api difusi. Nyala api premix merupakan nyala api yang terjadi dengan bahan bakar dan oksidator terlebih dahulu dicampur kemudian melalui *burner* campuran tersebut dinyalakan. Sedangkan nyala api difusi merupakan nyala api yang terjadi dimana bahan bakar dan oksidator bercampur pada saat keluar dari ujung *burner*, sehingga sebelumnya tidak dicampur terlebih dahulu. Contoh penggunaan yang ada saat ini untuk nyala api premix adalah mesin bensin sedangkan untuk nyala api difusi contoh penggunaan yang ada, yaitu pada boiler dan mesin diesel.

Nyala api difusi memiliki karakteristik yang berbeda dengan nyala api premix, yaitu laju pembakaran ditentukan oleh laju dimana bahan bakar dan oksidator dialirkan dalam ukuran yang tepat untuk reaksi. Sedangkan laju pembakaran untuk nyala api premix ditentukan oleh laju pelepasan energi dan laju reaksi oksidasi yang telah tercampur sebelumnya antara bahan bakar dengan oksidator. Reaksi antara bahan bakar dan udara pada nyala api difusi biasanya terjadi pada daerah temperatur maksimum. Sedangkan pada nyala api premix reaksi oksidasi terjadi sebelum daerah temperatur maksimum. Laju konsumsi oksidator per bagian volume pada nyala api difusi seribu kali lebih sedikit dibanding dengan nyala api premix. Oleh karena itu, pada nyala api premix terjadi pembakaran yang lebih sempurna. Didalam nyala api difusi ketika gas bercampur dengan dialirkan ke atas, partikel gas akan mengalir ke sisi bagian luar sedangkan partikel oksidator akan mengalir ke sisi bagian dalam. Hal ini terjadi pada percobaan yang telah kami lakukan.

Burke dan Schumman [2] mempelajari nyala api difusi didalam sebuah tabung dimana aliran bahan bakar dikelilingi oleh aliran udara dengan kedua aliran tersebut memiliki kecepatan yang sama. bentuk api yang terbentuk tergantung dari apakah aliran udara tersebut memiliki lebih banyak oksigen (*over-ventilated*) atau kekurangan oksigen (*under-ventilated*) untuk kebutuhan reaksi

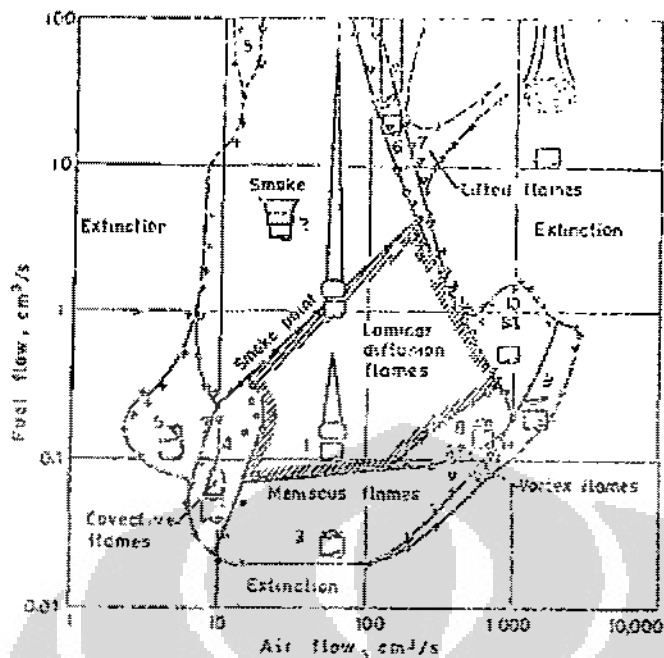
pembakaran yang sempurna dengan bahan bakar. Bentuk dari *flame front* dari kondisi tersebut, yaitu seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.2 *Over-ventilated* dan *Under-ventilated* pada nyala api difusi [11]

Di dalam nyala api *over-ventilated*, batas api menuju ke sumbu axis silinder, sedangkan pada nyala api *under-ventilated* batas api bergerak menuju ke dinding luar silinder. Beberapa bentuk nyala api dapat terjadi diantara dua batas tersebut, yaitu dengan merubah rasio bahan bakar dan udara, biasanya dengan menambah atau mengurangi jumlah aliran bahan bakar atau udara pada flowmeter. Untuk nyala api difusi, batas nyala api didefinisikan sebagai permukaan (*surface*) ketika reaksi pembakaran telah sempurna, yaitu terjadi pada keadaan rasio stoikiometri.[8]

John [3] pertama kali mempelajari mengenai pengaruh perubahan suplai udara dan bahan bakar dan memperoleh berbagai bentuk nyala api dengan menggunakan sebuah *burner*. Kemudian dia membagi daerah aliran udara dan bahan bakar menjadi sepuluh zona dari berbagai bentuk yang timbul.



Gambar 2.3 Tipe-tipe nyala api difusi [13]

Gambar di atas menunjukkan beberapa zona dan bentuk api yang melingkupinya, yaitu :

- | | |
|---------------|--|
| Zona 1 dan 2 | Nyala api difusi laminar |
| Zona 3 | Nyala api meniscus |
| Zona 4 | Nyala api lambent |
| Zona 5 | Nyala api rich tilted |
| Zona 6 dan 7 | Nyala api incipient lifting dan lifted |
| Zona 8 | Nyala api vortex |
| Zona 9 dan 10 | Nyala api weak tilted |

Sebelum membahas nyala api difusi laminar pada zona 1 dan 2, dibahas terlebih dahulu bentuk nyala api yang tidak biasa, yaitu pada zona 3. Nyala api *meniscus* terbentuk pada laju aliran bahan bakar yang rendah. Bentuk nyala api ini dapat mempengaruhi efek dari difusi arah axial bahan bakar atau dapat juga diabaikan. Garis antara zona 1 dan 3 menandakan *yellow glow* dari nyala api difusi laminar menghilang. Dibawah zona 3 api akan padam karena bahan bakar yang dialirkan sangat rendah.

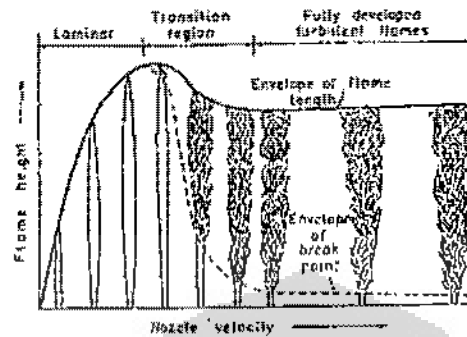
Pada saat laju aliran bahan bakar dan udara dialirkan sangat rendah, gaya konveksi menjadi cukup besar dan nyala api (*lambent*) terbentuk, kemudian posisi dari flame shifts bergerak dari satu sisi ke sisi yang lain. Di zona 4, api menjadi padam ketika salah satu sudut terangkat ketika terjadi osilasi konveksi. Di zona 5, dimana konsentrasi bahan bakar tinggi, *tilted flame* yang kaya bahan bakar terbentuk. Dibawah laju aliran bahan bakar 10 cc/s dan ketika laju aliran udara meningkat pada zona 6, salah satu ujung api akan terangkat. Selanjutnya, apabila terus ditingkatkan maka akan terbentuk *lifted flame* dan pada akhirnya api akan padam.

Ketika laju aliran bahan bakar dan udara yang sangat tinggi, *lifted flames* memiliki bentuk yang nyala api yang turbulen. Pada zona 8, untuk laju aliran bahan bakar yang rendah dan laju aliran udara yang tinggi, bentuk vorteks *torroidal* terletak dekat dengan mulut tabung. Dengan meningkatkan aliran udara, lapisan tengah karbon yang bercahaya menghilang dan karbon akan menumpuk di *burner tip*. Selanjutnya dengan meningkatkan lagi aliran udara akan menekan *flame tip* hingga lubang tengah api akan menghilang. Pada akhirnya secara bertahap akan terbentuk api elips berwarna biru. *Tilted flame* yang lemah akan terbentuk di zona 9 dan 10. Bentuk api ini kadang-kadang berosilasi atau berputar pada *port*.

Bentuk api laminar pada nyala api difusi terbentuk pada zona 1 dan 2 yang banyak dipelajari oleh para peneliti. Secara umum, nyala api *under-ventilated* berada pada zona 2, sedangkan pada zona 1 hanya timbul nyala api *over-ventilated*. Antara zona 1 dan 2 memiliki garis pemisah yang menandakan bahwa pada titik atau garis tersebut mulai timbul asap. Karena seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, pada zona 2 (*under-ventilated*) jumlah udara semakin berkurang dibandingkan bahan bakar sehingga masih terdapat bahan bakar yang belum terbakar yang menghasilkan asap [14].

Dengan ditingkatkannya laju aliran udara, karakter dari nyala api difusi laminar berubah. Selama dalam masa transisi, ujung api menjadi turbulen sedangkan bagian bawah atau dasar api masih dalam fase laminar. Selain itu, peningkatan kecepatan aliran mengakibatkan semakin berkurangnya tinggi dari api laminar. Titik dimana aliran laminar berubah menjadi aliran turbulen

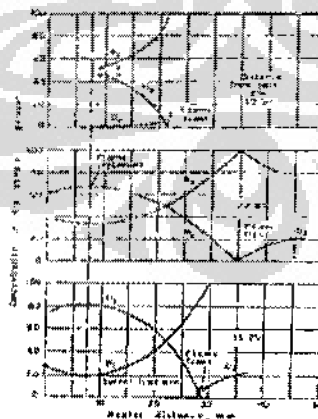
dinamakan *break point*. Ketika *break point* terletak dekat dengan *nozzle* bahan bakar, tinggi api dan tinggi *break point* sudah tidak berubah lagi, yang berubah adalah perubahan timbulnya intensitas suara yang semakin tinggi.



Gambar 2.4 Perubahan bentuk api terhadap kecepatan *nozzle* [15]

Gambar diatas menunjukkan perubahan pada tinggi dan posisi *break point* dengan meningkatkan kecepatan aliran. Pada daerah laminar, tinggi api meningkat mendekati linier dengan peningkatan kecepatan aliran. Namun pada daerah turbulen tinggi api semakin berkurang dari tinggi api pada daerah laminar dan setelah itu, tinggi api tidak berpengaruh lagi terhadap kecepatan aliran. Pada daerah turbulen, *lifted flame* dapat ditentukan sama seperti pada campuran premixed.

Distribusi dari berbagai komponen pada perbedaan ketinggian di nyala api difusi laminar pertama kali ditemukan oleh Hattel dan Hawthorne [4]. Hasil yang mereka dapatkan untuk nyala api berbahan bakar hidrogen ditunjukkan oleh gambar dibawah ini.

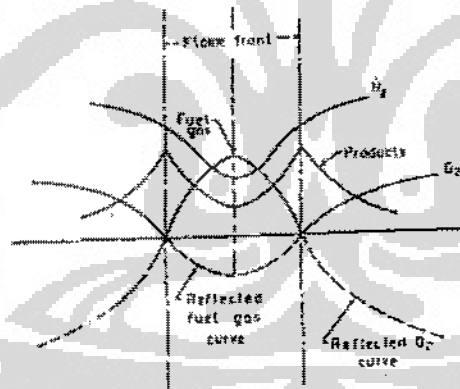


Gambar 2.5 Diagram komposisi nyala api difusi dengan bahan bakar hydrogen[16]

Bahan bakar hidrogen dipilih karena struktur kimianya yang sederhana. Setelah diteliti bahwa konsentrasi hidrogen dan udara sudah habis saat mencapai daerah *flame front*. Konsentrasi bahan bakar habis pada saat mencapai *flame front* dan memiliki jumlah maksimal pada saat berada pada axis *burner*, sedangkan kadar oksigen maksimal berada di aliran udara sekitar. Sehingga dapat diasumsikan bahwa pada daerah *flame front* bahan bakar dan oksigen telah mencapai keadaan stoikiometri dan dikonsumsi seketika itu juga.

Pada percobaan ini, *flame front* diasumsikan sebagai zona reaksi yang tipis. Gambar diatas memberikan jumlah konsentrasi hidrogen, nitrogen, dan oksigen pada ketinggian berbeda di atas *burner port*. Posisi dari *flame front* tetap bergerak karena terdapat perbedaan lebar dari api. Pengukuran konsentrasi oksigen pada sisi bahan bakar ditandakan dengan masuknya udara melalui pipa karena pergerakan api.

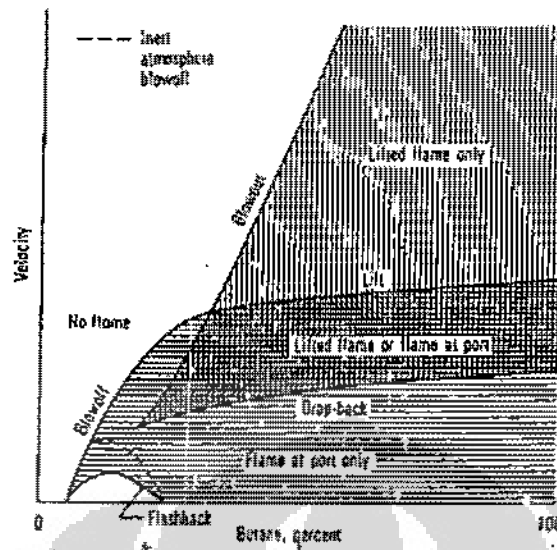
Dari hasil ini, secara umum gambar dari struktur api difusi laminar sesuai gambar di bawah ini. Gambar ini menunjukkan perubahan pada konsentrasi bahan bakar, oksigen, dan produk pembakaran. Garis pada kurva tersebut menunjukkan konsentrasi bahan bakar dan oksigen dengan bernilai negatif.



Gambar 2.6 Diagram profil konsentrasi pada nyala api difusi tipe laminar[17]

2.7.2 Nyala Api Difusi Jet-Turbulen

Nyala api difusi jet-turbulen memperlihatkan perilaku yang kompleks dan memiliki struktur yang secara nyata dipengaruhi oleh geometri dari pipa yang menyalurkan aliran bahan bakar tersebut. Secara umum perilaku nyala api difusi jet-turbulen dapat dilihat dari gambar dibawah ini.



Gambar 2.7 Diagram stabilitas dan *lifted flame* pada nyala api difusi [18]

Sesuai dengan gambar diatas, disebelah kiri merupakan daerah tipe nyala api premix. Garis putus-putus menandakan daerah *blow-off* jika udara sekitar/atmosfir masuk ke aliran bahan bakar. Kehadiran udara sekitar dapat mempengaruhi karakteristik dari nyala api. Di daerah arsiran pertama, suatu saat api akan tertahan hingga melewati daerah campuran kaya bahan bakar dan ketika jumlah konsentrasi bahan bakar lebih banyak daripada jumlah udara yang masuk maka akan tercapai daerah batas *blow-out* yang kaya akan bahan bakar. Pada kondisi tersebut, nyala api difusi telah terbentuk.

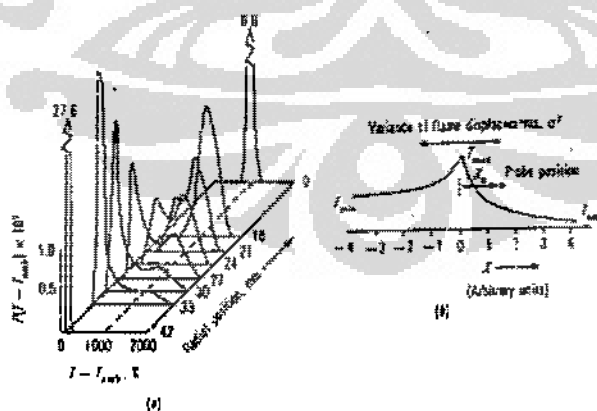
Dapat kita lihat dari gambar diatas, *lifted flame* mulai terbentuk pada daerah arsiran kedua (tengah), namun masih berada dekat dengan ujung *burner*. kemudian pada daerah ketiga (atas) ketika kecepatan aliran semakin ditingkatkan, terjadi *lifted flame* dengan jarak yang semakin menjauhi ujung *burner*. Pada nyala api ini, jet-turbulen kecepatan tinggi bercampur dengan udara lingkungan dan pada satu titik diatas ujung *burner* api tersebut akan tertahan pada ketinggian tertentu dan terbentuk daerah aliran campuran turbulen. Apabila kecepatan aliran semakin dinaikkan maka api akan padam.

Kecepatan aliran jet yang rendah akan membentuk aliran laminar dan nyala api difusi laminar. Untuk setiap kecepatan jet yang sangat rendah, daerah sekitar atas api akan dipengaruhi oleh adanya konveksi secara bebas. Dengan kata

lain, momentum dari jet akan tidak efisien untuk mempengaruhi aliran api, contoh yang sederhana yaitu seperti lilin. Pada kecepatan aliran yang lebih tinggi namun kecepatan aliran masih laminar keseimbangan antara gaya inersia dan gravitasi mempengaruhi bentuk dari api. Dengan kata lain bilangan Froud, yang nilainya semakin besar seiring dengan v^2 , menjadi parameter yang penting untuk menentukan stuktur dan panjang api.

Gambar tersebut menjelaskan untuk setiap aliran bahan bakar yang rendah akan terbentuk api difusi laminar dan panjang api akan semakin meningkat seiring dengan semakin ditingkatkannya laju aliran bahan bakar tersebut. Pada suatu titik dengan jarak tertentu, api difusi akan menjadi turbulen dan dengan kecepatan aliran yang semakin besar, letak titik transisi akan semakin rendah dengan semakin terbentuknya nyala api turbulen yang lebih sempurna. Ketika turbulensi dari api difusi telah sepenuhnya terbentuk, daerah tersebut tidak dipengaruhi lagi oleh bilangan Froud dan bilangan Reynolds dari ujung *burner* hingga ujung api. Hal ini dikarenakan kecepatan aliran sudah mencapai titik maksimal dari terbentuknya api, apabila diteruskan api akan menjadi padam (*blow-off*).

Nyala api difusi turbulen memiliki karakteristik yang menarik lainnya, yaitu memiliki karakteristik yang sama dengan nyala api premix turbulen. Hal ini dikarenakan keduanya dapat digambarkan dengan menggunakan struktur flame sheet. Hal ini telah diteliti oleh Roberts dan Moss[5]. Penelitian mereka menggunakan termokopel untuk mengetahui fluktuasi temperatur pada nyala api difusi turbulen.



Gambar 2.8 Grafik fungsi probabilitas massa jenis pada jarak radial tertentu. (a). Grafik pdf. (b). Grafik profil temperatur pada posisi tertentu.[19]

2.8 Analisis Kecepatan dan Reynolds Number Campuran Udara – Bahan Bakar

Reynolds number campuran udara-LPG digunakan persamaan-persamaan dibawah ini.

Kecepatan campuran udara-bahan bakar u_{mix} . [10] :

$$u_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i u_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i} \quad (2.17)$$

Viskositas campuran udara-bahan bakar, ν_{mix} , oleh C.R. Wilke [11]:

$$\nu_{mix} = \frac{\sum_{j=1}^n \chi_j \nu_j}{\sum_{j=1}^n \chi_j \Phi_j} \quad (2.18)$$

Dimana,

$$\Phi_j = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_j}{M_i} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\nu_j}{\nu_i} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2 \quad (2.19)$$

Sehingga *Reynolds number* (Re_{mix}) campuran udara-LPG diperoleh sebagai berikut :

$$Re_{mix} = \frac{u_{mix} \cdot d_{mix}}{\nu_{mix}} \quad (2.20)$$

2.9 Kecepatan Pembakaran (*Burning Velocity*)

Berdasarkan tipe aliran bahan bakar, kecepatan pembakaran terdiri dari dua klasifikasi, yaitu kecepatan pembakaran laminar dan turbulen.

2.9.1 Kecepatan Pembakaran Laminar

Kecepatan pembakaran laminar atau kecepatan pembakaran normal, yang didefinisikan sebagai konsumsi *volume unburned gas* per unit dibagi area *flame*

front. Gouy [8] memberikan pertama sekali persamaan kecepatan linier, S_L seperti ditunjukkan persamaan dibawah ini.

$$S_L = \frac{Q_m}{A_{FF}} \quad (2.21)$$

Dimana A_{FF} = Luas *flame front*, sesuai persamaan dibawah ini.

$$A_{FF} = \pi r \sqrt{r^2 + L_f^2} \quad (2.22)$$

Dengan menggunakan *Total Area Method*, A_{FF} dapat diperoleh berdasarkan persamaan berikut:

$$A_{FF} = \frac{\pi A_c S}{L_f} \quad (2.23)$$

Teknik lain untuk memperkirakan kecepatan pembakaran laminar diukur berdasarkan perhitungkan tinggi nyala api dan area nyala api dengan asumsi nyala api mempunyai bentuk kerucut dan *nozzle* berbentuk sirkular dengan radius r , dan kecepatan pembakaran laminar diberikan persamaan sebagai berikut [9]:

$$S_L = \frac{2 Q_f}{\pi r \sqrt{L_f + r^2}} \quad (2.24)$$

Faktor *error* persamaan 2.51 sebesar 15-20% dan r adalah radius *nozzle*.

Sehingga persamaan 2.51 menjadi :

$$S_L = \frac{2 Q_f}{\pi r \sqrt{L_f + r^2}} \times 1,2 \quad (2.25)$$

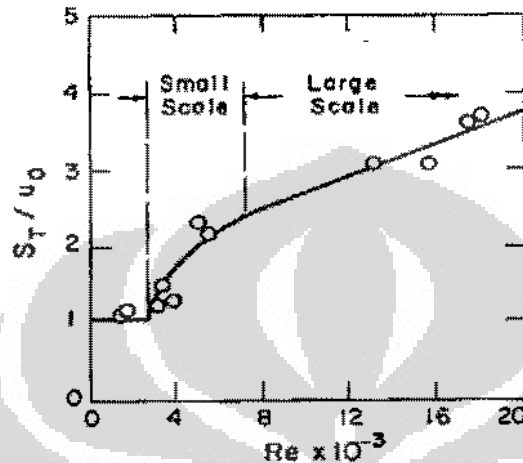
2.9.2 Kecepatan Pembakaran Turbulen

Salah faktor yang mempengaruhi kecepatan pembakaran adalah konsentrasi bahan bakar. *Damkohler* (1940) pertama sekali secara sistematis mempelajari efek *Reynolds number* terhadap kecepatan pembakaran yang berbeda-beda [32]. *Damkohler* menyatakan bahwa kecepatan pembakaran :

1. Independent terhadap *Reynolds number*, bila $Re \leq 2.300$.

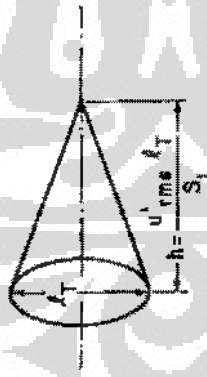
2. Proporsional terhadap akar kwadrant *Reynolds number*, bila $2.300 \leq Re \leq 6.000$.
3. Proporsional terhadap *Reynolds number*, bila $Re \geq 6.000$.

Dari item 2 dan 3 jelaslah bahwa kecepatan pembakaran dipengaruhi oleh *Reynolds number*, seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.



Gambar 2.9. Efek *Reynolds number* terhadap kecepatan pembakaran

Dimana U_0 adalah kecepatan bahan bakar pada *nozzle*, S_T kecepatan pembakaran turbulen. *Schelkin* (1943) mengusulkan bahwa ratio S_T terhadap S_L sama dengan ratio rata-rata luas *cone* terhadap rata-rata dasar *cone*, ditunjukkan gambar 2.14.



Gambar 2.10. *Flame front conical*.

dari bentuk geometri gambar 2.10 diperoleh :

$$A_c = A_n \left(1 + \frac{4h^2}{d_n^2} \right)^{1/2} \quad (2.26)$$

Dimana A_c adalah luas *cone*, A_b luas dasar *cone*, l_T diameter *cone* dan h (\bar{L}_f) adalah tinggi nyala api yang diperoleh dengan persamaan dibawah ini.

$$\bar{L}_f = u'_{rms} t = u'_{rms} \frac{l_T}{S_L} \quad (2.27)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 2.26 kepersamaan 2.27 diperoleh kecepatan pembakaran turbulen sebagai berikut :

$$S_T = S_L \left[1 + \left(\frac{2u'_{rms}}{S_L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.28)$$

Dimana u'_{rms} adalah kecepatan rata-rata campuran udara-LPG.

William, Hottel dan Scurlock mengobsevasi bahwa dengan kecepatan aliran yang rendah ($< 125 \text{ cm/s}$). Kecepatan pembakaran turbulen bervariasi terhadap *ratio* bahan bakar-udara tetapi menjadi independen jika kecepatan aliran ($> 250 \text{ cm/s}$).

Bollinger dan Williams melaporkan kecepatan pembakaran turbulen untuk tiga bahan bakar, yaitu *acetylene, ethylene dan propane* dengan udara sebagai oksidasidator, mereka memperoleh persamaan kecepatan pembakaran turbulen sebagai berikut :

$$S_T = 0,18 S_u d_u^{0,26} Re^{0,24} \quad (2.28)$$

Dari persamaan 2.28 dapat diketahui bahwa kecepatan pembakaran turbulen secara langsung proporsional terhadap kecepatan pembakaran linier.

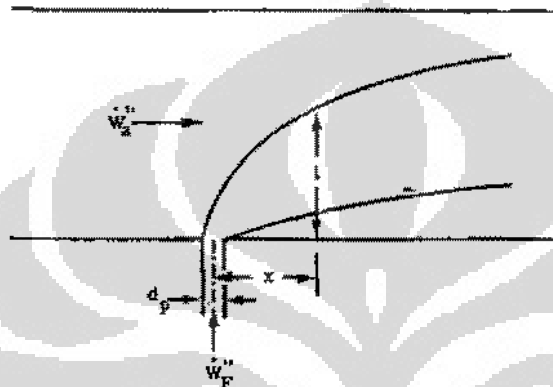
2.10 Pola Aliran Semburan Udara - Bahan Bakar Nyala Api Difusi

Dalam prakteknya semburan udara-bahan bakar pada turbin gas, *ram jet* dan *furnace* industri dibatasi oleh dinding (*confined flame*). Pada umumnya pola aliran semburan udara-bahan bakar dalam *confined flame* terdiri dari dua klasifikasikan, yaitu :

1. Semburan aliran menyilang (*confined transverse jet*), bahan bakar diinjeksikan arah normal (tegak lurus) arah aliran udara.
2. Semburan aliran membujur (*confined longitudinal jet*), bahan bakar diinjeksikan paralel dengan arah aliran udara.

2.10.1. Semburan Aliran Menyilang (*Confined Transverse Jet*)

Hottel, Hawthorne dan Weddel [6] mempelajari pola aliran nyala api difusi semburan aliran menyilang ditunjukkan gambar dibawah ini.



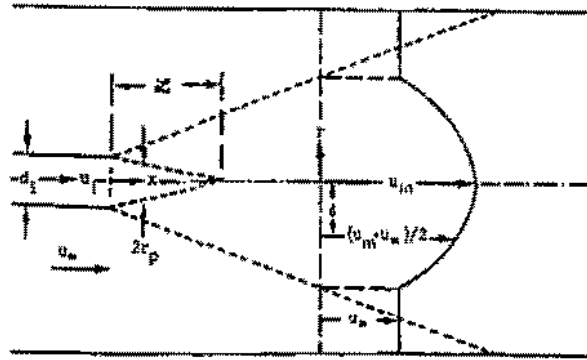
Gambar 2.11. Pola aliran semburan meyilang (*transverse flow jet*).

Jika laju aliran massa bahan bakar $Q_f = W_F'' = \rho_f u_{f_0}$ melalui diameter nozzle (d_p) memasuki aliran udara $Q_a = W_a'' = \rho_a u_{a_0}$ seperti ditunjukkan gambar 2.6, bagian atas ujung semburan l sebagai fungsi x merupakan jarak dari pangkal aliran. Korelasi l/d_p ditunjukkan persamaan dibawah ini.

$$\left(\frac{l}{d_p}\right)^{1.65} = 2,91 \left(\frac{W_F''}{W_a''}\right) \left(\frac{x}{d_p}\right)^{0.5} \quad (2.29)$$

2.10.2. Semburan Aliran Membujur (*Confined Longitudinal Jet*)

Landies dan Shapiro [7] menginvestigasi pola aliran semburan membujur (*longitudinal flow jet*) seperti ditunjukkan gambar 2.7 dibawah ini.



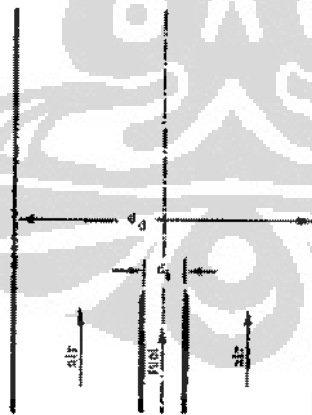
Gambar 2.12. Pola aliran semburan membujur
(*longitudinal flow jet*).

Hasil observasi *Landies dan Shapiro* [7] sebagai berikut :

$$\frac{r_p}{d_i} = \frac{1}{2} \left(1 + 3 \frac{u_o}{u_i} - \frac{1}{4} \frac{x}{d_i} \right); \quad 0 \leq x \leq \varnothing \quad (2.30)$$

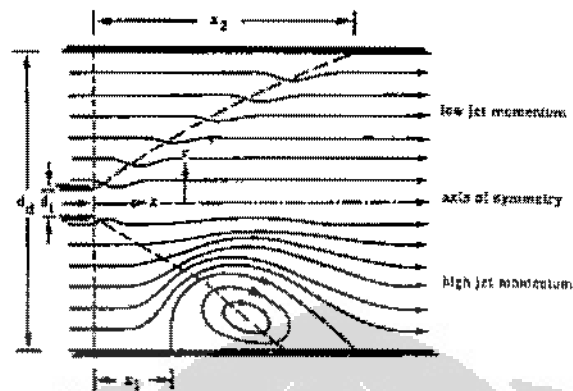
$$\frac{\delta_i}{d_i} = \frac{2}{1.4} \left(\frac{\delta}{d_i} \right); \quad x \geq \varnothing \quad (2.31)$$

Bentuk paling sederhana semburan aliran membujur (*logitudinal flow*) diperoleh melalui injeksi bahan bakar gas melalui pipa (*tube*) diameter kecil yang ditempatkan pada pipa (*tube*) diameter yang lebih besar dan dialiri oleh udara. Aliran bahan bakar dan udara dipisah sebelum memasuki daerah reaksi, seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.



Gambar 2.13. Peralatan untuk menghasilkan nyala api
difusi semburan *logitudinal*.

Pola aliran yang dihasilkan gambar 2.8 diprediksi secara geometri, seperti ditunjukkan gambar 2.9 dibawah ini.



Gambar 2.14. Pola aliran semburan *logitudinal*.

Bila kecepatan aliran bahan bakar relatif rendah terhadap aliran udara terjadi pembelokan (*deflected*), pola arah aliran bahan bakar-udara seperti ditunjukkan bagian atas gambar 2.9 *Thirng* dan *Newby* memberikan pendekatan hubungan antara x_2 (jarak pangkal aliran dari *nozzle* sampai aliran menyentuh dinding *tube* bagian luar dengan diameter d_0 seperti ditunjukkan persamaan berikut:

$$x_2 = 2,25 d_0 \quad (2.32)$$

Bila kecepatan aliran bahan bakar relatif tinggi terjadi tumbukan yang relatif besar sehingga menimbulkan pusaran (*vortex*) dari mulai pangkal aliran (*nozzle*) pada jarak x_1 , seperti ditunjukkan bagian bawah gambar 2.9. *Thirng* dan *Newby* memperoleh korelasi hubungan antara x_1 , ukuran diameter *nozzle*, laju aliran massa bahan bakar dan laju aliran massa udara, sebagai berikut :

$$x_1 = 2,5 d_0 \left(1 + \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \right) \quad (2.33)$$

2.11 Fenomena *Blow-Off*

Blow off merupakan suatu keadaan di mana nyala api padam akibat dari batas kecepatan aliran lebih besar dari laju nyala atau kecepatan pembakaran. Kondisi seperti ini harus dihindari karena selain boros bahan bakar, terjadinya *blow off* secara terus menerus dapat merusak *nozzle* pembakar dan dapat

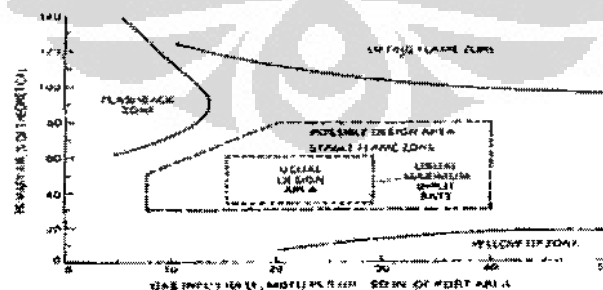
mengganggu proses produksi yang pada akhirnya dapat menimbulkan kerugian. Untuk mengantisipasi hal tersebut maka harus diketahui batas aliran bahan bakar yang aman dapat digunakan sebelum terjadinya *blow-off* dan tidak terletak tepat di ujung *burner*. hal ini bertujuan untuk mengurangi penerimaan panas yang lebih besar dari api terhadap *nozzle* sehingga penggunaannya lebih awet.

2.12 Fenomena *Flashback*

Flashback terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih cepat daripada kecepatan campuran udara-bahan bakar sehingga nyala api masuk balik dan merambat kembali ke dalam tabung pembakar, dapat disebut juga sebagai *back fire* atau *light back*.

Flashback tidak hanya mengganggu, tetapi juga dari sisi keamanan bisa menjadi berbahaya. Fenomena *flashback* berhubungan dengan kecepatan nyala laminar lokal dan kecepatan aliran lokal sebanding. *Flashback* secara umum merupakan kejadian sesaat di mana apabila terjadi, aliran bahan bakar dikurangi atau ditutup. Ketika kecepatan nyala lokal melebihi kecepatan aliran lokal, perambatan nyala manjauh melalui tabung. Saat aliran bahan bakar dihentikan, nyala akan membalik atau *flashback* melalui tabung dan lebih besar dari jarak *quenching*.

Gambar di bawah menunjukkan daerah stabilitas nyala dengan bahan bakar industri yang berisi hidrogen. Bekerja pada daerah kiri *flashback* mengakibatkan terjadinya *flashback*, sementara itu untuk menghindari terjadinya *flashback* daerah kerja dirancang pada sisi kanannya yaitu pada daerah stabilitas nyala.



Gambar 2.15 Diagram stabilitas *flashback*, *lift-off*, dan *yellow tipping* untuk bahan bakar gas industri [20]

BAB III

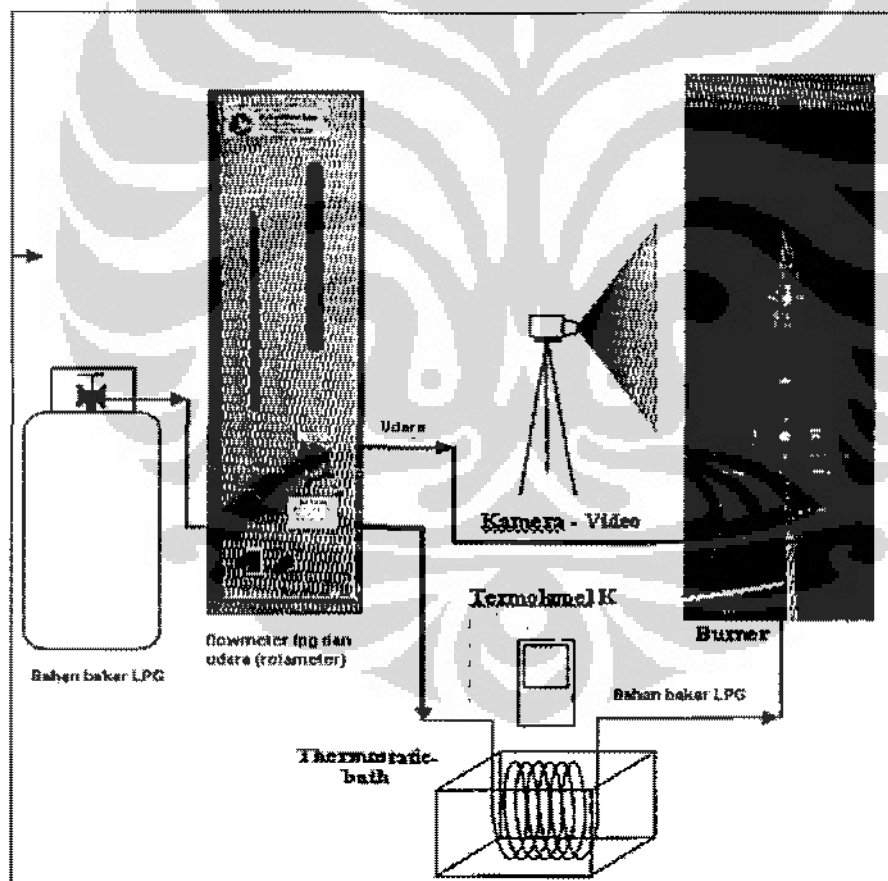
METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental yang dilaksanakan di laboratorium *Thermodynamic Research Group Flame & Combustion* Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Penelitian pengaruh semburan udara terhadap perubahan tinggi lifted nyala api difusi dengan variasi pemanasan awal bahan bakar LPG pada Bunsen burner, seperti dibawah ini :

3.1. Peralatan Penelitian

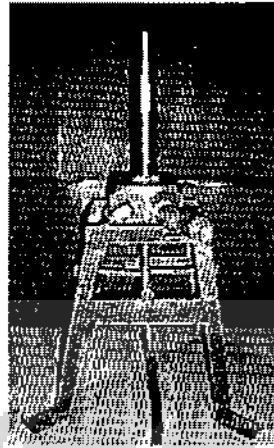
3.1.1. Peralatan utama

1. Bunsen *Burner Flame Propagation and Stability Unit P.A Hilton LTD C551*. Dilengkapi dengan flowmeter penunjuk aliran gas dan udara dalam satuan cm (*centimeter*) dan dapat dibaca langsung untuk pengambilan data dan berkapasitas 0-30 cm.



Gambar 3.1 Gambar skema peralatan penelitian *Bunsen Burner Flame Propagation and Stability Unit P.A Hilton LTD C551* yang telah dimodifikasi.

2. Jet Holder/nosel sebagai tempat pembakaran dengan memiliki diameter dalam diujungnya sebesar 1.8 mm.



Gambar. 3.2. Gambar burner

3. Termokopel tipe K.

Termokopel yang digunakan dengan memiliki rentang suhu dari -200°C hingga 1200°C , terdiri dari material *Chromel (Ni-Cr alloy)* / *Alumel (Ni-Al alloy)*[4]. Termokopel ini dibuat dengan ketebalan 0,2 mm di ujung tempat pengukuran. Kemudian untuk menampilkan hasil pengukuran menggunakan alat multimeter.

4. *Thermostatic bath*

Thermostatic bath merupakan heater yang digunakan memanaskan medium kerja untuk meningkatkan temperatur bahan bakar gas LPG. Percobaan kali ini menggunakan air sebagai medium kerjanya. *Thermostatic bath* ini bekerja dari temperatur -50°C sampai 200°C . Gambar menunjukkan *thermostatic bath*.

5. Barrel dengan diameter dalam sebesar 25 mm disambungkan dengan ruang aliran udara dengan didalamnya terdapat pipa tembaga dengan diameter luar 10 mm dan diameter dalam 5 mm yang ujung atasnya disambung dengan nosel.

6. Gas LPG

Bahan bakar yang digunakan untuk percobaan ini, yaitu gas LPG dengan komposisi 40% butana dan 60% propana.

7. Gelas kaca (*cover glass*)

Percobaan ini menggunakan gelas kaca yang menutupi adanya udara masuk dari luar. Gelas kaca ini diberi ukuran sebagai penanda sebesar 5 cm.

8. Koil tembaga

Merupakan pipa *hollow* yang terbuat dari tembaga (*copper*) sepanjang 4 m dan diameter dalam 2 mm yang dibentuk seperti spring dengan diameter spring sebesar 10 cm. Koil ini merupakan tempat bahan bakar dialirkan dan dipanaskan di dalam *thermostatic bath*.



Gambar 3.3 *Thermostatic bath* dengan koil didalamnya

3.1.2. Peralatan Pendukung

Peralatan pendukung untuk melakukan penelitian ini adalah

1. *Pressure regulator* alat pengatur tekanan gas yang masuk ke dalam flowmeter udara dan dibatasi sebesar 1 sampai 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.: 5 l/h
 - Pabrikan : *Shinagawa Keisokki Seisakusho CO. LTD*
3. Pemantik api gas sistem magnet
4. Termokopel *adjuster*
5. Saluran pembuangan sisa hasil pembakaran
6. Kamera
7. *Hygrometer* untuk mengetahui tekanan, temperatur dan kelembaban relatif ruangan.

3.2. Penyesuaian Skala Rotameter

Rotameter yang terdapat pada unit P.A. hilton memiliki skala baca dalam cm yang dapat dibaca langsung dalam percobaan, tetapi untuk diolah lebih lanjut maka ukuran cm tersebut harus dikonversikan menjadi satuan kapasitas aliran dalam m^3/s .

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

3.2.1. Langkah-langkah persiapan alat

- **Pemasangan**

Letakkan alat pada tempat yang rata dan bebas dari getaran. Kemudian putar baut pengatur level sampai tabung level menunjukkan bahwa alat terletak pada bidang horizontal.

- **Pengaturan *liquid level***

1. Pengisian cairan

Lepaskan tutup *liquid inlet* di kanan atas alat (bagian depan). Masukkan cairan sampai *liquid level* mencapai sekitar 2 mm di atas garis penunjuk *level gauge* atau *setting needle point*.

2. Pengeringan *Blower Pipe*

Lepaskan tutup *blower pipe drain*, dan periksa jika ada cairan yang tersisa. Cairan yang tersisa akan menyebabkan alat tidak bisa bekerja. Jika cairan tersisa di dalam *blower pipe*, maka keringkan *blower pipe* dan kencangkan tutupnya.

3. *Idling*

Kencangkan tutup *liquid inlet*. Atur *inlet rubber tube*, dan diamkan alat sehingga jarum besar membuat 20-30 putaran. Setelah *idling* selesai, biarkan bagian dalam alat berada di bawah tekanan atmosfer dengan mencopot *inlet* dan *outlet rubber tube*. Keluarkan cairan dengan perlahan melalui *level control knob* pada sisi kanan panel alat, sampai *liquid level* sejajar dengan garis penunjuk *level gauge* atau *setting needle point* seperti pada gambar.

- **Pengetesan kebocoran**

Hubungkan dan kencangkan *inlet* dan *outlet rubber tube* ke alat. Tutup kencang bagian luar. Berikan tekanan (pada batas pengukuran manometer) pada alat melalui inlet. Tutup rapat bagian dalam. Periksa kebocoran dengan membaca manometer.

- **Pengukuran**

Hubungkan *inlet* dan *outlet tube* sesuai kebutuhan untuk pengukuran. Biarkan gas diukur mengalir melalui meteran sampai jarum besar membuat kira-kira 20 putaran. Udara yang tertinggal dalam meteran alat dan pipa akan digantikan oleh gas tersebut. Saat gas dan cairan berbeda jauh temperaturnya, diamkan meteran alat sampai mencapai temperatur yang sama. Setelah langkah-langkah tersebut selesai, meteran alat siap untuk pengukuran.

- **Pengoperasian tekanan dan temperatur**

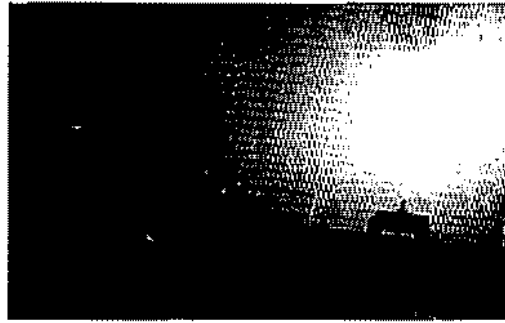
Meteran harus dioperasikan pada tekanan kisaran manometer, meskipun meteran dibuat untuk menahan tekanan sampai $0,15 \text{ kg/cm}^2$ (1500 mm H₂O).

Temperatur operasi sebesar 50°C atau di bawahnya. Ketika gas yang diukur tidak lebih dari 0°C atau gas yang tingkat kelarutan dengan airnya tinggi, gunakan cairan *paraffin*, *electrospark machining oil* atau *trifluorine-contained polymers* dibandingkan dengan air.

3.2.2. Langkah-langkah penyesuaian skala rotameter

- **Penyesuaian Gas LPG**

1. Menyambungkan selang gas LPG pada *gas inlet* pada meteran.
2. Menyambungkan aliran gas yang keluar ke *burner* agar dapat terbakar sehingga gas tidak tersebar.
3. Mengatur laju aliran gas pada posisi rotameter 1 cm sehingga jarum meteran mulai berputar.
4. Menentukan titik acuan sebagai start pada skala meteran.
5. Mencatat waktu yang dibutuhkan jarum untuk berputar dari titik acuan sampai mencapai titik acuan kembali.
6. Mengulangi langkah 2 sampai 4 untuk laju aliran gas dari 1 cm hingga terjadi *blow off*. (1 cm hingga 13 cm).



Gambar 3.4 Gambar Prosedur Kalibrasi Rotameter

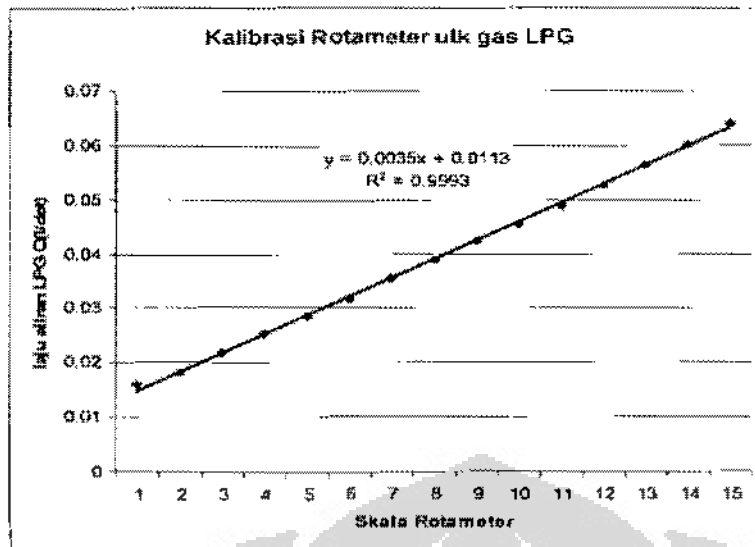
3.2.3. Hasil penyesuaian skala *flowmeter* bahan bakar (*rotameter*)

- Hasil penyesuaian skala *rotameter* dan telah diolah dan disetarakan maka akan didapat hasil seperti tabel dibawah ini:

Tabel 3.1. Penyetaraan pembacaan *rotameter* bahan bakar LPG

Skala Rotameter	Q (L/det)
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

- Grafik penyesuaian skala pengukuran *rotameter* gas LPG

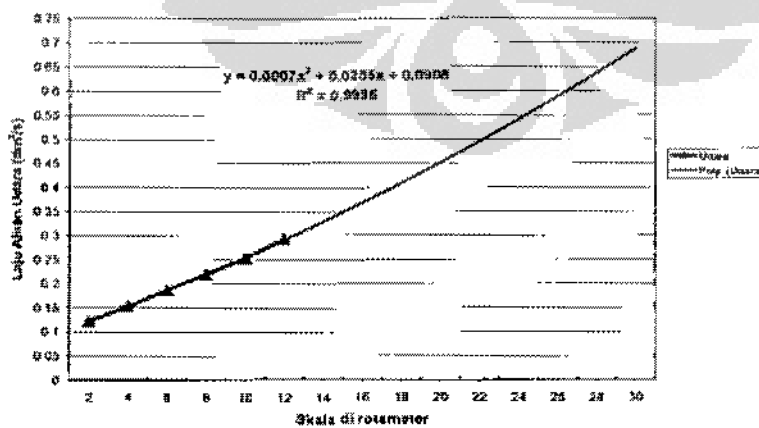
Gambar 3.5 Grafik Penyesuaian Laju Aliran LPG Terhadap *Rotameter*

3.3. Kalibrasi Flowmeter Udara

Tabel 3.2. Penyetaraan pembacaan *rotameter* udara

Skala Rotameter	Q (L/det)
0	0
2	0,12
4	0,15
6	0,185
8	0,217
10	0,25
12	0,29

Grafik Kalibrasi Udara

Gambar 3.6 Grafik Penyesuaian Laju Aliran Udara Terhadap *Flowmeter*

3.4. Kalibrasi Alat Ukur Temperatur

Alat yang digunakan untuk mengukur temperatur, yaitu menggunakan Termokopel jenis K. Termokopel yang digunakan menggunakan display digital yang memudahkan untuk melihat dengan tepat hasil pengukuran. Selain itu, terdapat fitur untuk menahan hasil pengukuran yang telah muncul di layar sehingga penyusun dapat dengan tepat memantau hasil temperatur yang didapat. Oleh karena itu, untuk memastikan Termokopel yang digunakan berfungsi dengan baik maka perlu dilakukan kalibrasi agar diperoleh hasil pengukuran yang benar dan dapat dipercaya. Selain itu *thermostatic bath* juga dilengkapi pengatur temperatur yang dapat memudahkan kita untuk mengetahui berapa besar tempertaur medium kerja, untuk itu *thermostatic bath* juga perlu dikalibrasi dan diseterakan untuk digunakan.

Peralatan pendukung yang digunakan, yaitu :

1. Termometer standar
2. Medium kerja (air)
3. Papan kayu sebagai alas (isolator)

3.4.1. Langkah-langkah kalibrasi

Kalibrasi yang dilakukan mengikuti langkah-langkah sebagai berikut :

1. Air dimasukkan ke dalam *thermostatic bath*, kemudian diukur berapa beasr dari temperatur.
2. Temperatur dinaikkan secara perlahan setiap 5°C lalu dicatat hasil dari termokopel dan temperatur yang terbaca pada *thermostatic bath*.
3. Air tersebut dipanaskan hingga mendidih kemudian temperatur air tersebut diukur dengan menggunakan termometer dan termokopel. Selanjutnya hasilnya dibandingkan.
4. Setelah mendidih dinginkan air dengan mengurangi sedikit demi sedikit temperatur melalui *thermostatic bath*.
5. Catat hingga temperatur air berada pada kondisi awal.

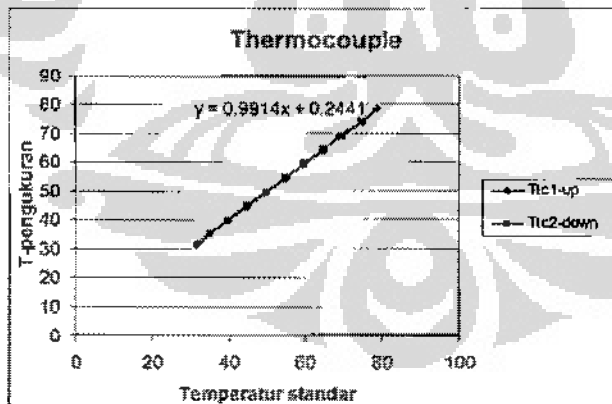
3.4.2. Hasil Kalibrasi

Setelah melakukan proses kalibrasi maka hasil yang didapat bahwa, temperatur yang menggunakan termokopel sama dengan hasil temperatur yang menggunakan termometer standar. Kemudian ketika air tersebut mendidih, temperatur yang dicapai hingga mendekati 100°C. Dari kalibrasi tersebut penyusun menghentikan pemanasan air hingga mencapai temperatur 98°C.

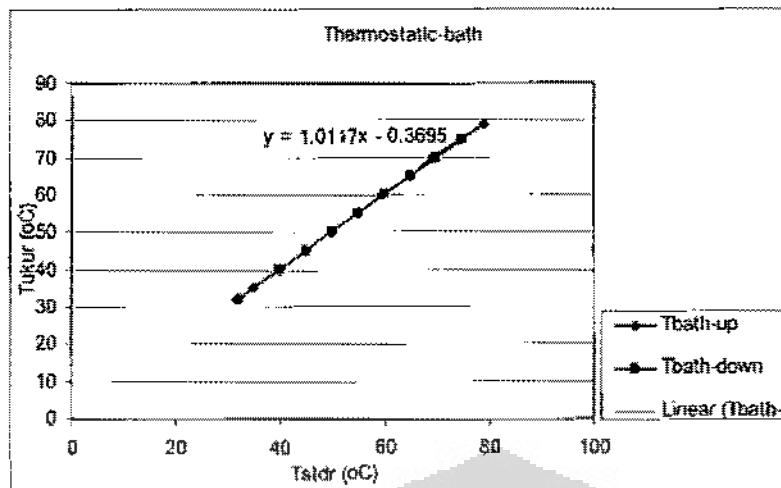
Tabel 3.3 Hasil kalibrasi termokopel dan *thermostatic-bath*

stdr (°C)	Thermocouple		Thermo static bath (°C)
	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	
31.6	31.5	31.5	31.5
32	32	32	32
35	35	34.9	35
39.8	39.8	39.8	40
44.8	44.7	44.6	45
49.8	49.6	49.6	50
54.8	54.4	54.4	54.9
59.6	59.2	59.2	60
64.7	64.2	64.4	65
68.9	69.1	69.2	70
74.6	74	74.1	74.9
78.8	78.4	78.4	79.1
74.8	74.2	74.2	75
69.8	69.3	69.3	70
64.9	64.6	64.5	65
59.8	59.5	59.5	60
54.9	54.6	54.6	55
49.9	49.7	49.7	50

Dari data di atas maka didapat grafik seperti gambar dibawah ini:



Gambar 3. 7 Gambar grafik kalibrasi termokopel



Gambar 3.8 Gambar grafik kalibrasi *thermostatic bath*

3.5. Metode Pengambilan Data

Penelitian ini dilakukan pada dua kondisi yaitu dengan tanpa pemanasan dan dipanaskan, suhu pemanasan akan bervariasi dari 70°C sampai 100°C. Pada kondisi tanpa pemanasan, aliran bahan bakar gas akan dibiarkan mengalir konstan dan diberi injeksi udara dari kompressor. Pada kondisi pemanasan medium kerja yang digunakan akan dipanaskan sampai mencapai suhu 100°C, dimana terdapat koil yang terbuat dari tembaga yang mengalir bahan bakar gas di dalamnya. Gas yang mengalir akan meningkat temperaturnya sebanding dengan tinggi temperatur medium kerja. Dalam penelitian kali ini yang diambil sebagai parameter untuk dicari adalah tinggi *lifted flame* dan panjang nyala api difusi. Sedangkan variabel yang tetap adalah aliran bahan bakar gas LPG.

Untuk penelitian tanpa pemanasan, aliran bahan bakar gas LPG dibiarkan konstan lalu diinjeksikan udara secara bertahap. Lalu diulang dengan aliran bahan bakar berbeda. Aliran bahan bakar gas LPG yang digunakan sebesar 5 cm, 6 cm, 7 cm, 8 cm, 9 cm, 10 cm menurut skala yang terbaca pada rotameter sedangkan untuk semburan udara secara bertahap 0 cm, 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm menurut skala rotameter udara.

Sedangkan penelitian untuk pemanasan, prosedur menyerupai tanpa pemanasan, tetapi dilakukan secara bertahap pada kenaikan temperatur medium kerja sebesar, 70°C, 80°C, 90°C, 100°C. Temperatur dari bahan bakar dicatat saat masuk dan sebelum bahan bakar melalui burner.

3.6. Prosedur Percobaan

3.6.1. Persiapan Awal Peralatan Uji

1. Mempersiapkan peralatan yang akan diperlukan dalam melakukan pengujian seperti Bunsen's *Burner*, tabung gas LPG, termokopel, *thermostatic-bath*, *flowmeter* udara, pemantik api gas, penggaris, *termocouple adjuster*, dan kamera digital.
2. Memanaskan medium kerja minimal selama 4 jam.
3. Mengatur posisi *rotameter* gas pada posisi nol.
4. Memastikan tidak ada kebocoran.
5. Memasang *barrel*, selang bahan bakar, dan selang udara.
6. Meletakkan pengaris, termokopel pada posisi yang tetap.
7. Memasang kamera.

3.6.2. Pengukuran temperatur *tip burner* dan temperatur pemanasan

1. Memasang termokopel, *termograph* dan penggaris
2. Membuka katup gas, kemudian menyalakan dengan menggunakan pemantik.
3. Mencatat skala *rotameter* yang digunakan.
4. Skala *rotameter* dijaga konstan pada jarak 5 cm, 6 cm, 7 cm, 8 cm, 9 cm, 10 cm.
5. Setiap jarak skala *rotameter*, tambahkan udara secara bertahap pada skala *rotameter* 0, 2, 4, 6, 8, 10.
6. Catat temperatur masuk (T_{in}) dan temperatur keluar (T_{out}) pemanasan atau sebelum masuk *burner*.
7. Ambil foto dengan kamera.
8. Ulangi proses yang sama untuk setiap skala *rotameter* dan setiap perbedaan temperatur pemanasan.

3.6.3. Kondisi Lingkungan

Untuk memperoleh hasil penelitian yang dapat diandalkan maka faktor kondisi lingkungan sekitar *burner* juga diperhitungkan. Kondisi lingkungan saat penelitian ini dilakukan dengan temperatur ruangan 29-33,5 °C dan kelembaban 41-62%

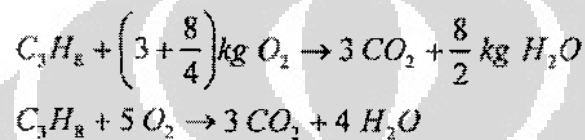
BAB IV

HASIL DAN ANALISA

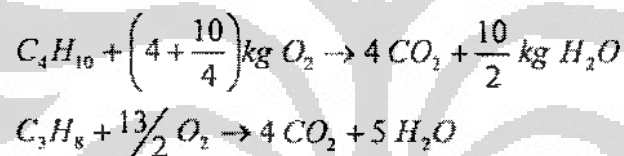
4.1. Pembakaran Stoikiometri

Untuk pembakaran bahan bakar 1 kg LPG dengan komposisi 60 % propana (C_3H_8) dan 40% butane (C_4H_{10}) secara stokiometri diperlukan oksigen, maka perhitungan dibawah berguna untuk mengetahui jumlah oksigen:

pembakaran stoikiometri propana adalah sebagai berikut:



pembakaran stoikiometri butana adalah sebagai berikut:



maka untuk pembakaran 0.6 kg propana (C_3H_8) diperlukan oksigen sebesar:

$$m_{O_2} = \frac{5}{1} \times 0,6$$

$$= 3 kg O_2$$

$$m_a = \frac{100}{21} \times 3$$

$$= 14,286 kg udara$$

maka untuk pembakaran 0.4 kg butana (C_4H_{10}) diperlukan oksigen sebesar:

$$m_{O_2} = \frac{13}{2} \times 0,4$$

$$= 2,6 kg O_2$$

$$m_a = \frac{100}{21} \times 2,6$$

$$= 12,381 kg udara$$

jadi total udara yang dibutuhkan untuk membakar 1 kg gas LPG adalah 26,667 kg. Sehingga $(AFR)_{stokiometri}$ untuk bahan bakar LPG = 26,667.

- Air-Fuel Ratio (AFR)

Salah satu cara untuk menghitung perbandingan aliran udara dan bahan bakar (AFR) bisa dihitung dengan membandingkan volume atau aliran udara dan bahan bakar. Contoh perhitungan AFR seperti dibawah.

$$AFR = \frac{Q_a}{Q_f} = \frac{0,217}{0,0283} = 7,663$$

Data table hasil perbandingan udara dan bahan bakar dapat terlihat pada table dibawah i:

- Beban Pembakaran (*Burning Load*)

Beban pembakaran *burner* terhadap nozzel *burner* tipe *ejected combustor* yang digunakan pada eksperimen diperoleh dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

Dimana, $LHV = 46043,37 \text{ kJ/kg}$

$$\rho_{LPG} = 2,212 \text{ kg/m}^3$$

$$BL = \frac{38,823 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{dik} \times 2,212 \text{ kg/m}^3 \times 46043,37 \text{ kJ/kg}}{\pi \times (9 \times 10^{-4} \text{ m})^2}$$

$$= 1554,65 \text{ MW/m}^2$$

Table 4.1 hasil perbandingan udara- bahan bakar (AFR) dan Burning Load (BL)

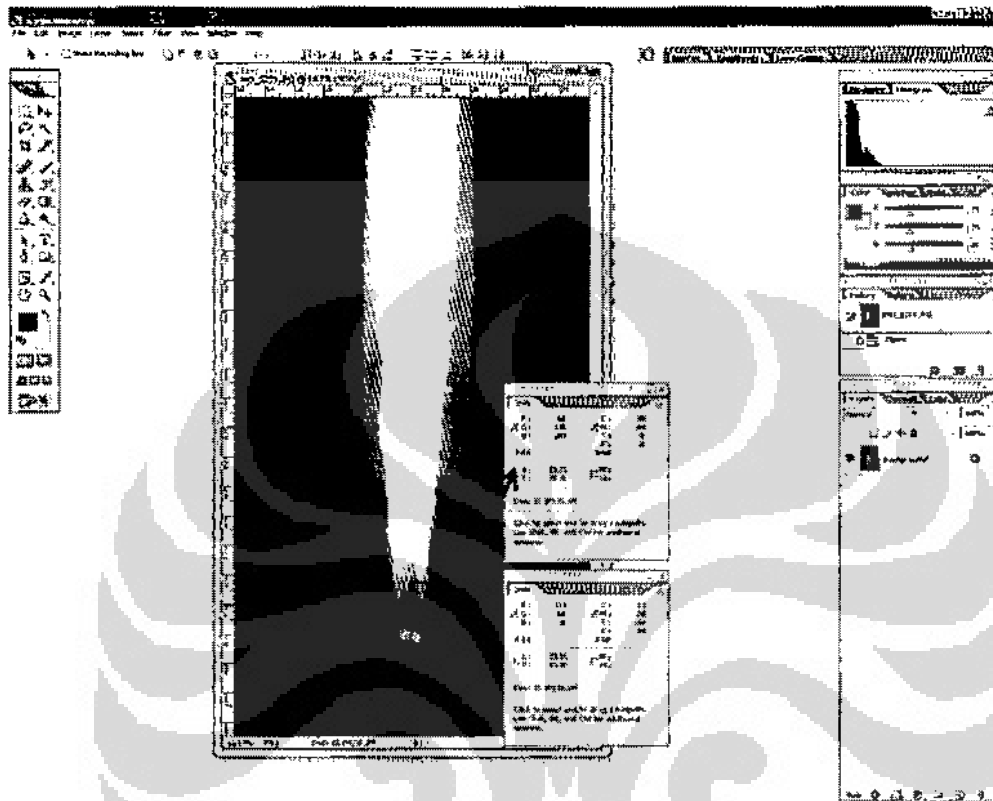
No	Kapasitas aliran gas	Kapasitas aliran udara	AFR	Burning load
	(l/s)	(l/s)		(MW/m2)
1	0.028314994	0	0	1133.845908
		0.12	4.238037229	
		0.15	5.297546537	
		0.185	6.533640728	
		0.217	7.66378399	
		0.25	8.829244228	
2	0.031767409	0	0	1272.094431
		0.12	3.777456337	
		0.15	4.721820422	
		0.185	5.82357852	
		0.217	6.83090021	
		0.25	7.869700703	

3	0.035413714	0	0	1418.107119
		0.12	3.388517769	
		0.15	4.235647211	
		0.185	5.223964894	
		0.217	6.127569633	
		0.25	7.059412019	
4	0.038823563	0	0	1554.651122
		0.12	3.090906445	
		0.15	3.863633056	
		0.185	4.765147436	
		0.217	5.589389155	
		0.25	6.439388427	
5	0.042380819	0	0	1697.097947
		0.12	2.831469557	
		0.15	3.539336946	
		0.185	4.365182234	
		0.217	5.120240782	
		0.25	5.89889491	
6	0.045580978	0	0	1825.24511
		0.12	2.831469557	
		0.15	3.539336946	
		0.185	4.365182234	
		0.217	5.120240782	
		0.25	5.89889491	

4.2. Analisa Dimensi Api

Setelah dilakukan percobaan maka data selanjutnya dimasukkan kedalam tabel pengambilan data. Data yang diperoleh adalah data tinggi *lifted flame*, panjang nyala api difusi dan tinggi nyala api difusi. Kondisi yang dijadikan parameter adalah laju aliran bahan bakar gas LPG (Q_f) dan laju aliran udara (Q_a). percobaan dilakukan dengan bantuan kamera untuk menangkap tinggi api, dan menggunakan *software adobe photoshop* untuk mengetahui parameter baru yang ingin dicari. Penggunaan *adobe photoshop* sebagai alat bantu mencari jarak akan diperoleh gambar seperti gambar dibawah. Dengan metode perbandingan RGB horizontal untuk mengetahui diameter nyala api dan metode RGB vertical untuk mengetahui tinggi Lifted Flame dan panjang nyala api difusi maka dengan adanya hasil foto yang telah *dicapture* oleh kamera dapat diolah dan akan didapat data-

data baru dalam format microsoft excel. Contoh cara penggunaan metode RGB vertical adalah seperti dibawah ini. Hal yang paling penting adalah menentukan titik dengan tepat sehingga data yang didapat tidak mengalami kesalahan.



Gambar 4.1 cara penentuan dimensi api menggunakan adobe photoshop

Pada gambar 4.1 terlihat dua buah titik. Dimana terdapat info letak tib burner (titik1) yang dijadikan menjadi titik awal, lalu jarak antara titik awal sampai titik lifted flame (titik2). Dari jarak keduanya kita dapat membandingkan dengan jarak titik acuan yang berupa garis yang berjarak 5cm [21]. Selanjutnya membandingkan jarak yang ada digambar dengan jarak titik acuan maka akan didapat faktor skala sebagai nilai pembanding. Jika telah didapat nilai pembanding maka jarak dari tib burner ke lifted flame akan didapat. Dari banyak foto yang diambil akan dicari rata-rata dari setiap foto maka akan didapat hasilnya. Setiap variasi pemanasan dan variasi aliran udara akan diambil tujung foto untuk diambil rata ratanya dalam menentukan nilai dari dimesnsi nyala api difusi.

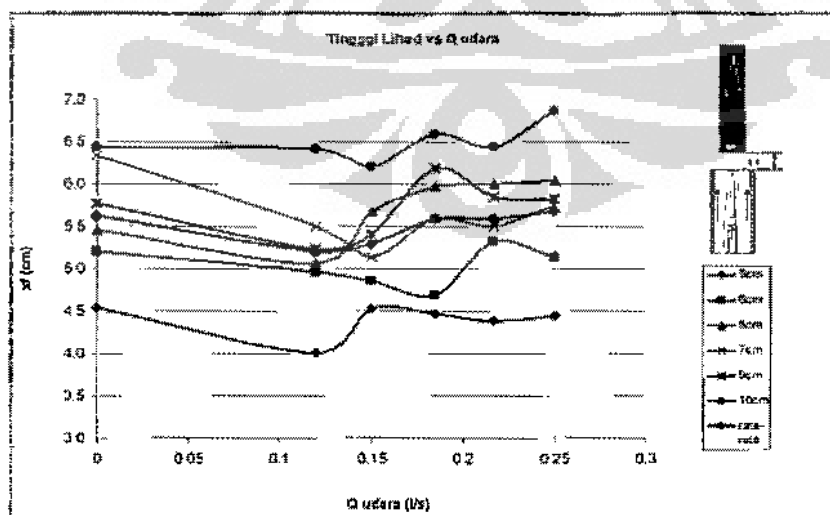
4.2.1 Lifted Flame Tanpa Pemanasan

Setelah foto dimasukkan kedalam table maka akan didapat hasil untuk lifted flame tanpa pemanasan.

No	Q udara	xf	xf	xf	xf	xf	xf	xf
	l/s	5cm	6cm	7cm	8cm	9cm	10cm	rata-rata
1	0.0000	4.5390	5.2083	6.3380	5.4615	5.7813	6.4407	5.6281
2	0.1200	4.0141	4.9662	5.5000	5.0676	5.2308	6.4167	5.1992
3	0.1500	4.5357	4.8667	5.1370	5.6667	5.4074	6.2000	5.3022
4	0.1850	4.4681	4.6939	5.5882	5.9677	6.1811	6.5833	5.5804
5	0.2170	4.3878	5.3214	5.5000	6.0000	5.8462	6.4407	5.5827
6	0.2500	4.4521	5.1408	5.7422	6.0400	5.8203	6.8595	5.6758

Tabel 4. Tinggi *lifted flame* tanpa pemanasan

Setelah diperoleh tabel diatas maka dapat terlihat bahwa nilai dari lifted flame (X_f) naik sebanding dengan nilai laju aliran bahan bakar (Q_f). semakin tinggi nilai laju aliran bahan bakar maka nilai tinggi *lifted flame* akan semakin tinggi. Nilai tinggi *lifted flame* juga berbanding lurus terhadap laju aliran bahan bakar gas LPG (Q_f). terlihat pada table bahwa nilai lifted flame dengan bahan bakar tidak dipanaskan ini berada pada titik tertinggi pada laju aliran bahan bakar pada skala rotameter 10 cm (0,04558 l/s) dan laju aliran udara (Q_a) = 0,2500 l/s. hasil dari tabel diatas dapat juga terlihat pada grafik jarak lifted flame yang terjadi dengan variasi jumlah aliran bahan bakar gas LPG dan jumlah aliran udara.



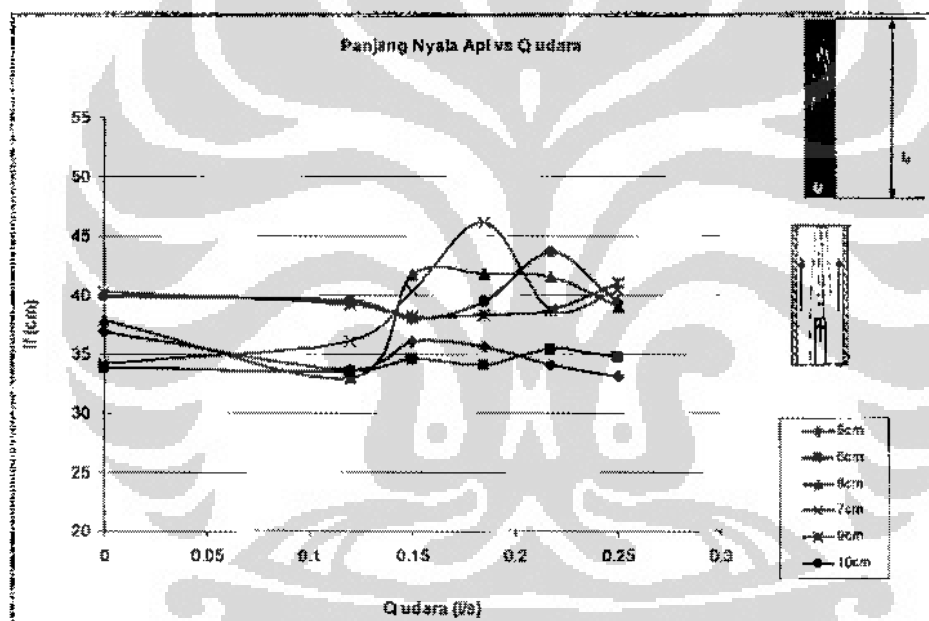
Gambar 4.2 grafik tinggi lifted flame dengan variasi jumlah udara dan bahan bakar

4.2.2 Panjang Nyala Api Tanpa Pemanasan Awal

Untuk memperoleh data panjang nyala api dilakukan proses yang serupa untuk mendapatkan nilai lifted flame seperti diatas.

No	Q udara	lf	lf	lf	lf	lf	lf	lf
	l/s	5cm	6cm	7cm	8cm	9cm	10cm	rata-rata
1	0.0000	36.9504	33.8889	34.2254	37.9231	40.2344	39.9153	49.6610
2	0.1200	33.6972	33.5811	36.1071	33.0405	39.2308	39.5417	44.6250
3	0.1500	36.1071	34.6667	40.3082	41.7500	38.2222	37.9600	42.8400
4	0.1850	35.6383	34.1497	46.1029	41.7742	38.3858	39.4167	46.2500
5	0.2170	34.0816	35.4643	38.7692	41.5000	38.6923	43.6441	50.4237
6	0.2500	33.0822	34.7535	40.3516	39.0400	40.9375	39.3802	44.2562

Tabel 4.2 tabel panjang nyala api

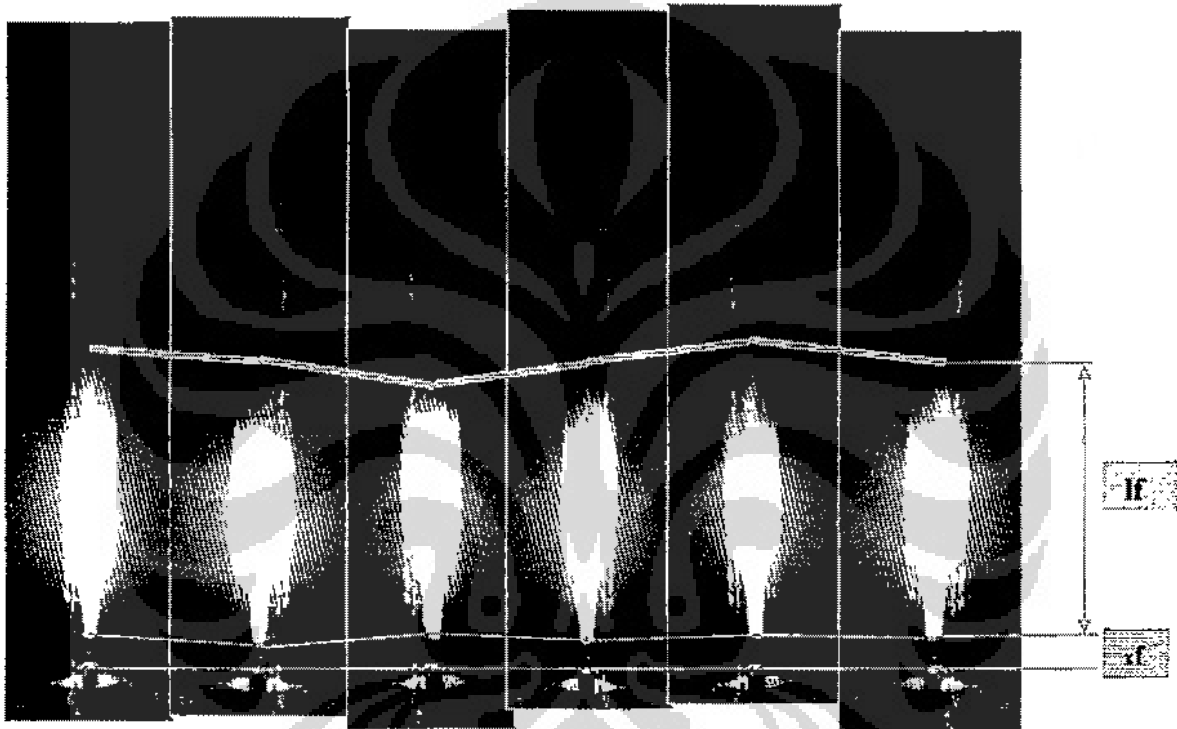


Gambar 4.3 grafik panjang nyala api tanpa pemanasan

Grafik panjang nyala api diatas menunjukkan adanya peningkatan panjang nyala api difusi (L_f) sebanding dengan jumlah aliran bahan bakar (Q_f), tetapi L_f akan berbanding terbalik dengan jumlah aliran udara yang diberikan (Q_a). pada grafik terlihat saat bahan bakar ditingkatkan dari skala 5 cm ($Q_f = 0.02831$ L/s) menjadi skala 10 cm ($Q_f = 0.04558$ L/s) terjadi peningkatan nilai panjang nyala api. Tetapi saat udara mulai dialirkan dan semakin lama semakin banyak aliran udara maka nilai L_f makin lama makin berkurang. Untuk setiap variasi udara yang diberikan aliran bahan bakar dijaga konstan, maka didapat grafik pada gambar 4.3.

4.3. Dimensi Nyala Api Dengan Pemanasan Awal

Pada penelitian dengan pemanasan awal, bahan bakar ditingkatkan temperaturnya dengan cara pemanasan pada medium kerja. Temperatur pemanasan bervariasi dari 70°C sampai maksimal 100°C . bagian ini akan membahas efek perubahan pada dimensi nyala api setelah bahan bakar mengalami peningkatan temperatur.. Hasil dari perubahan dimensi nyala api dan dibandingkan dengan dimensi nyala api sebelum pemanasan dapat dilihat dari tabel dibawah ini.



Gambar 4.4. gambar nyala api tanpa pemanasan awal dengan variasi semburan udara

Tabel 4.3 hasil pengolahan data dimensi nyala api setelah diberi pemanasan

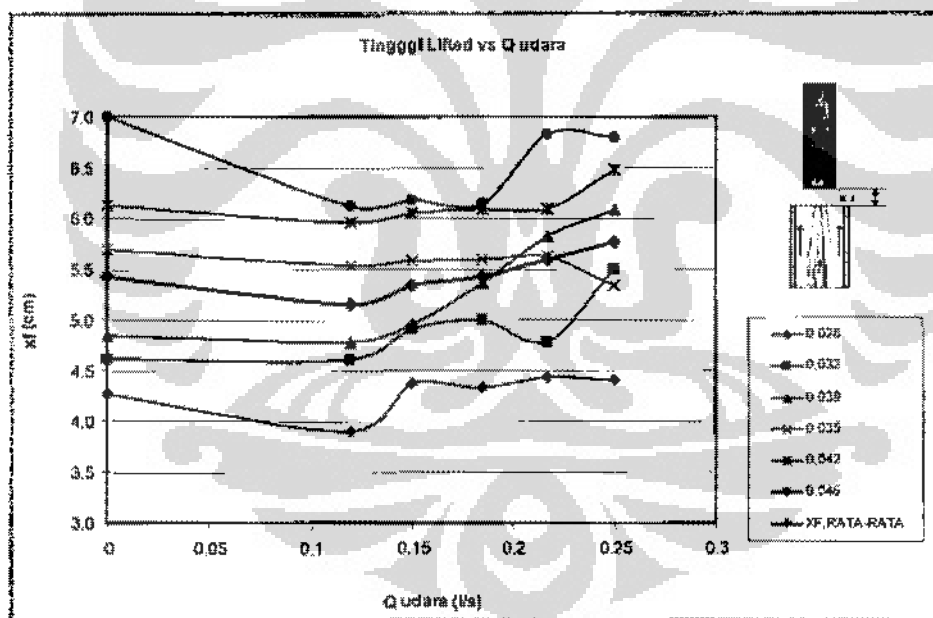
Skala (cm)	Q LPG (l/s)	Q udara (l/s)	AFR	Burning load (MW/m ²)	L _r tanpa	L _r 70	L _r 80	L _r 90	L _r 100	H _r tanpa	H _r 70	H _r 80	H _r 90	H _r 100
5	0.0283	0.0000	0.0000	1133.8459	36.9504	43.5776	36.9853	51.8531	46.8214	41.4894	47.8448	41.4338	55.9790	51.6071
		0.1200	4.2380		33.6972	48.7607	49.7552	48.6735	49.8889	37.7113	52.6496	53.5664	52.7211	54.6667
		0.1500	5.2975		36.1071	40.1250	41.4184	46.3946	47.6357	40.6429	44.5000	45.2482	50.9184	52.1705
		0.1850	6.6336		36.6383	45.6667	40.3103	43.3333	39.8864	40.1064	50.0000	44.3448	47.5000	44.1667
		0.2170	7.6638		34.0816	43.8618	40.7609	41.6218	39.4361	38.4694	48.2927	45.1449	46.3176	44.6617
		0.2500	8.8292		33.0822	45.9231	35.9574	43.4667	40.1136	37.5342	51.3248	40.4965	48.2667	45.0000
6	0.0318	0.0000	0.0000	1272.0944	33.8889	48.8889	46.5141	50.6569	48.8889	39.0972	53.5043	50.8803	54.8540	53.6508
		0.1200	3.7775		33.5811	50.8850	49.0604	57.5725	48.4848	38.5473	55.4867	52.9866	61.7754	53.1439
		0.1500	4.7218		34.6867	49.3534	56.0662	50.9854	50.6667	39.5333	54.2672	60.1471	55.4015	55.9259
		0.1850	5.8236		34.1497	45.5702	47.4444	54.4528	44.2969	38.8435	50.5702	52.3333	58.9416	49.4531
		0.2170	6.8309		35.4643	45.5042	48.4328	53.0921	52.0325	40.7857	50.2941	53.2836	57.8289	57.3984
		0.2500	7.8697		34.7535	51.5315	53.6232	46.5506	45.4800	39.6944	57.0270	58.1522	51.3924	50.4800
7	0.0354	0.0000	0.0000	1416.1071	34.2254	45.0862	52.4615	47.4383	49.8864	40.5634	50.7759	57.1923	52.3765	55.2273
		0.1200	3.3885		36.1071	44.9187	56.4815	42.2115	62.9927	41.8071	50.4472	61.1481	47.1474	68.1387
		0.1500	4.2356		40.3082	47.1429	51.5185	55.6211	50.7031	45.4452	52.7311	56.4074	60.2795	55.9766
		0.1850	5.2240		46.1029	49.7436	56.6791	42.0130	50.3759	51.6912	55.3419	61.6045	46.8831	55.0752
		0.2170	6.1276		38.7692	48.1250	48.8636	50.1592	40.8271	44.2692	53.7500	53.7879	55.6051	46.2405
		0.2500	7.0594		40.3516	49.4068	51.1567	52.4675	48.8806	46.0938	54.7458	56.4552	58.1818	54.3284

Tabel 4.4 lanjutan tabel hasil pengolahan data dengan pemanasan

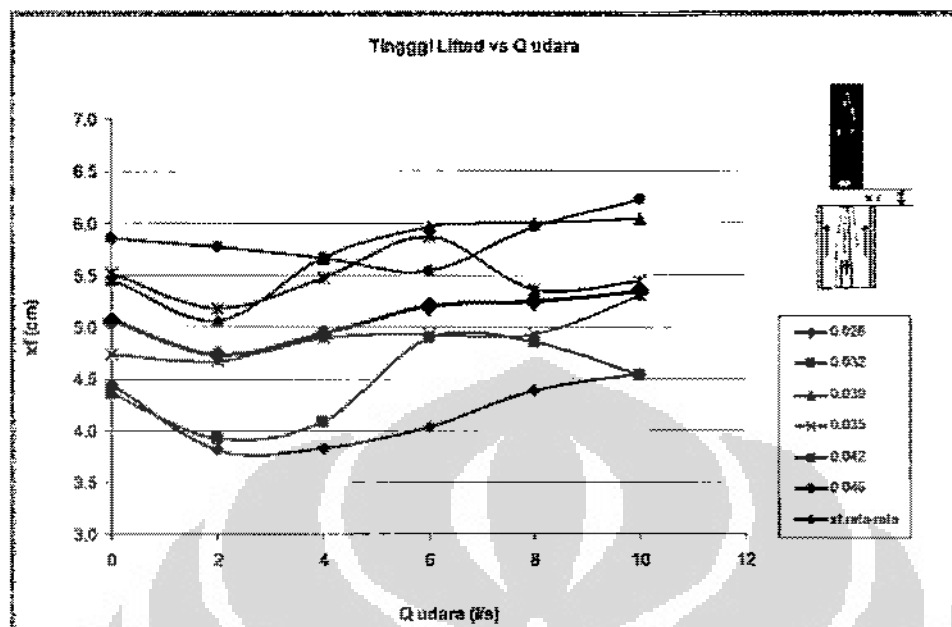
Skala (cm)	Q LPG (l/s)	Q udara (l/s)	AFR	Burning load (MW/m ²)	L _r tanpa	L _r 70	L _r 80	L _r 90	L _r 100	H _r tanpa	H _r 70	H _r 80	H _r 90	H _r 100
8	0.0388	0.0000	0.0000	1554.6511	37.9231	51.7969	37.9231	58.4583	50.4924	43.3846	56.6406	43.3846	63.7917	56.1364
		0.1200	3.0909		33.0405	52.0301	33.0405	57.7200	52.2481	38.1081	56.8045	38.1081	63.0800	57.8295
		0.1500	3.8636		41.7500	53.6328	41.7500	50.8824	46.2308	47.4167	58.5938	47.4167	56.4286	51.9615
		0.1850	4.7651		41.7742	54.2800	41.7742	57.2963	49.6241	47.7419	59.6400	47.7419	62.2222	55.5263
		0.2170	5.5894		41.5000	56.4493	41.5000	51.9403	49.9627	47.5000	62.2826	47.5000	57.7239	55.4478
		0.2500	6.4394		39.0400	53.7687	39.0400	52.3913	53.6567	45.0800	59.8507	45.0800	57.5725	58.8060
9	0.0424	0.0000	0.0000	1697.0979	40.2344	52.5217	53.0000	52.6296	52.6296	46.0156	58.6522	58.5185	58.7778	58.7778
		0.1200	2.8315		39.2308	50.5909	51.0370	48.4701	48.4701	44.4615	56.5455	56.2222	54.1045	54.1045
		0.1500	3.5393		38.2222	50.0439	51.1397	58.8306	54.6970	43.6296	56.0965	56.6176	64.1532	60.9091
		0.1850	4.3652		38.3858	50.7456	49.6014	63.1148	53.1203	44.5669	56.8421	55.4710	68.6475	59.0977
		0.2170	5.1202		38.6923	51.8860	54.3116	55.8537	57.2308	44.5385	57.9825	59.6739	61.4634	63.4615
		0.2500	5.8989		40.9375	53.6574	54.4203	56.5909	53.5496	46.7578	60.1389	59.8551	61.9318	59.4275
10	0.0456	0.0000	0.0000	1825.2451	39.9153	56.3636	52.5984	49.8047	58.4016	46.3559	63.3636	58.4646	55.6250	65.0410
		0.1200	2.8315		39.5417	51.4224	53.1395	56.4063	58.0952	45.9583	57.5431	58.9147	62.5781	64.4444
		0.1500	3.5393		37.9600	50.5462	52.1654	55.1163	54.8819	44.1600	56.7227	57.8346	61.2791	61.5748
		0.1850	4.3652		39.4167	52.4359	54.3411	53.7209	59.3952	46.0000	58.5897	59.8837	59.6124	65.6452
		0.2170	5.1202		43.6441	48.7054	49.1473	53.7023	55.1163	50.0847	55.5357	55.1163	59.3893	61.3178
		0.2500	5.8989		39.3802	51.0965	51.1417	57.2619	59.7656	46.2397	57.8947	57.3622	63.0952	66.1326

4.3.1 Tinggi Lifted Flame

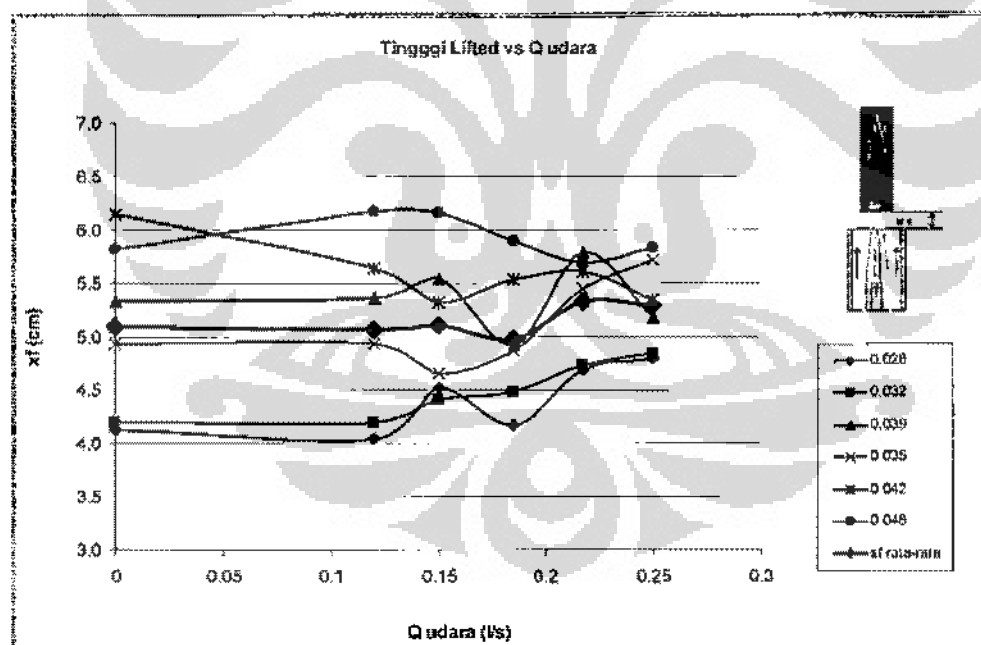
Tinggi lifted Flame jika mengalami penambahan semburan udara dengan variasi pemanasan awal. Kecenderungan pada jarak lifted flame saat diberi aliran udara pertama kali adalah tinggi yang semakin pendek. Itu dikarenakan fenomena *flame approach*, pada saat bahan bakar diberi efek pemanasan fenomena *flame approach* yang terjadi tidak mengakibatkan jarak lifted flame menjadi kecil seperti ketika saat bahan bakar belum dipanaskan. Pemanasan pada bahan bakar menyebabkan berat jenis dari bahan bakar berkurang sehingga memudahkan terjadi fenomena *lifted flame*. Api yang telah diberi efek pemanasan tergolong stabil kenaikan jarak *lifted flame* yang terjadi, pada gambar 4.5 terlihat pada saat diberi semburan udara maka jarak lifted flame akan berkurang dan kemudian naik kembali sebanding dengan nilai laju aliran bahan bakarnya.



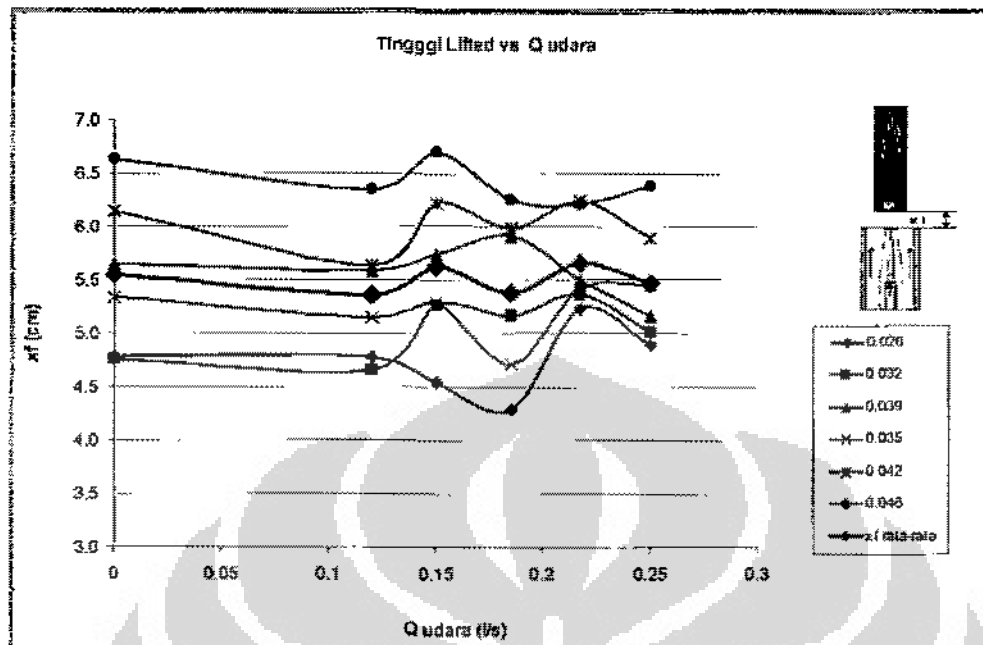
Gambar 4.5 Grafik tinggi *lifted flame* dengan pemanasan awal 70°C



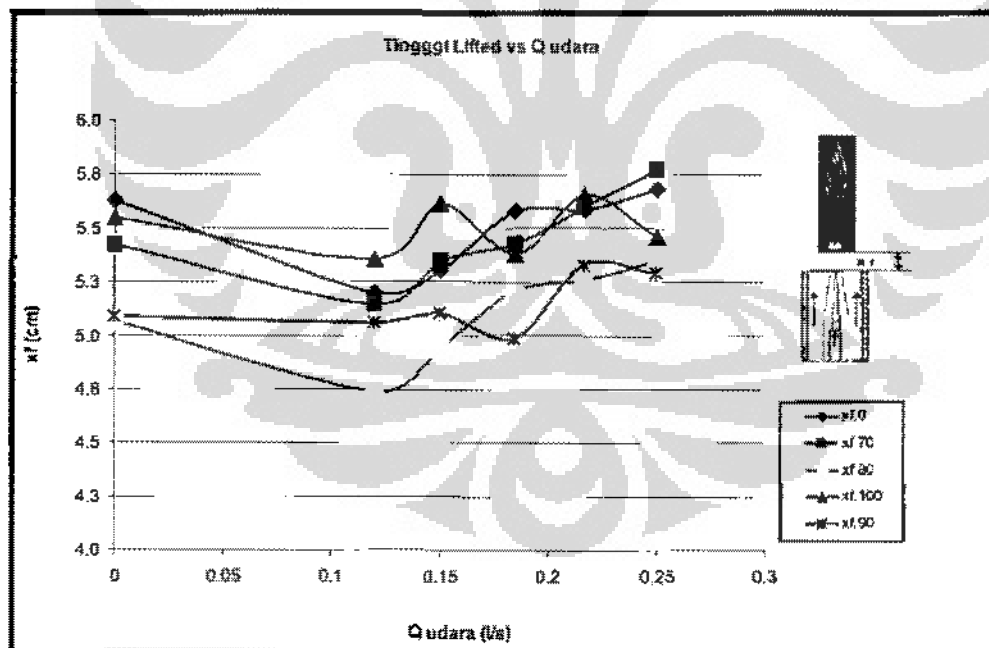
Gambar 4.6 Grafik tinggi *lifted flame* dengan pemanasan awal 80°C



Gambar 4.7 Grafik tinggi *lifted flame* dengan pemanasan awal 90°C



Gambar 4.8 Grafik tinggi *lifted flame* dengan pemanasan awal 100°C



Gambar 4.9 Grafik jarak *lifted flame* pada rata-rata Q_f

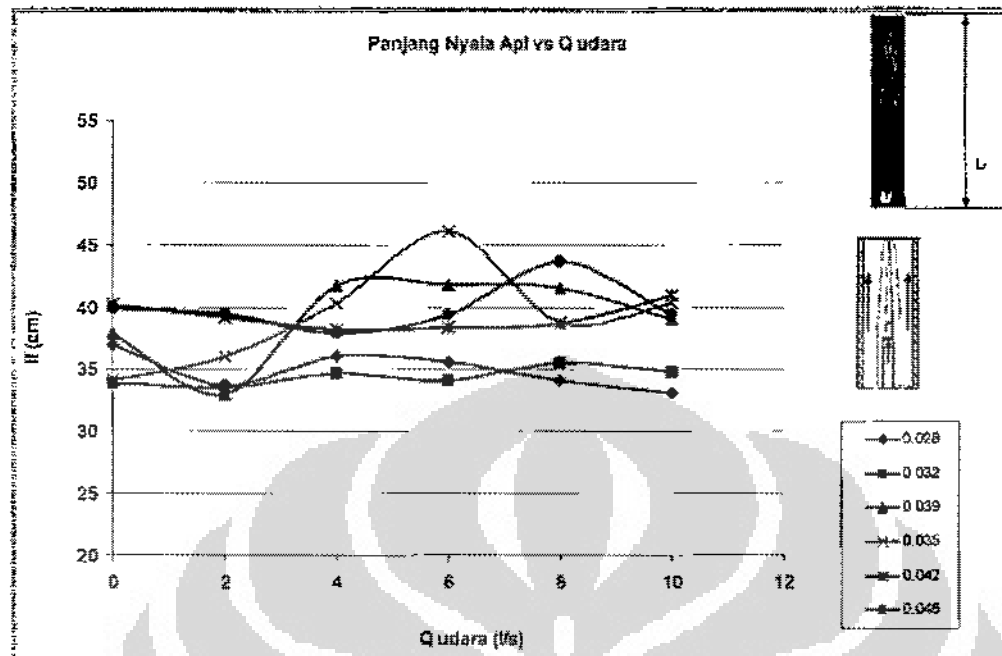
Dari gambar 4.9 bahwa dengan memberikan semburan udara pada berbagai macam Q_f maka saat $Q_a : 0.12 \text{ l/dt}$ tinggi lifted nyala api difusi selalu menurun dan setelah semburan udara ditingkatkan akan naik kembali sampai akhirnya cenderung datar. Untuk tinggi lifted pada variasi pemanasan awal 70°C ke 80°C cenderung menurun selanjutnya pada pemanasan awal 90°C ke 10°C mulai naik kembali.

4.3.2 Panjang nyala api (L_f)

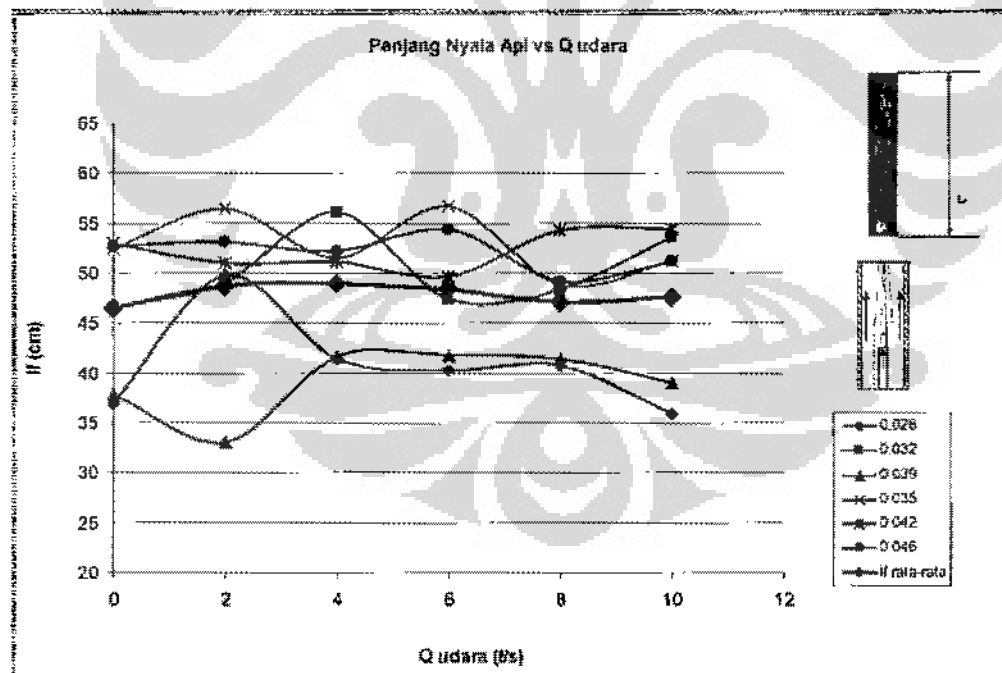
Secara teoritis, panjang nyala api difusi sangat berpengaruh pada kecepatan pembakaran (*Burning Velocity*) dari proses pembakaran dan laju aliran bahan bakar (Q) yang diberikan. Kecepatan pembakaran berbanding lurus dengan temperatur *un-burn* (T_u). Semakin tinggi nilai T_u maka nilai S_L semakin tinggi sehingga panjang nyala api akan semakin kecil jika diberi laju aliran bahan bakar yang besar dan kecepatan pembakaran yang besar (T_u semakin tinggi).

Dari penelitian yang telah dilakukan, diperoleh grafik seperti gambar di bawah ini. Dari grafik-grafik di bawah dapat diketahui bahwa panjang nyala api difusi semakin kecil seiring dengan peningkatan laju aliran udara (Q_a). Sedangkan panjang nyala api sendiri berbanding terbalik dengan kecepatan pembakaran (S_L).

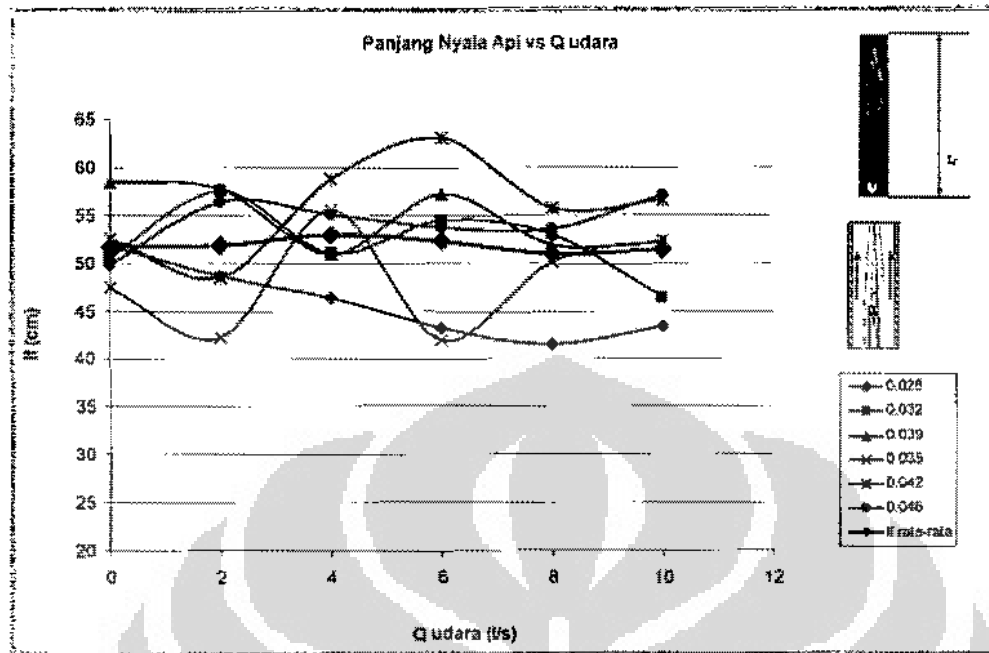
Sebagai contoh pada gambar 4.10 dimana grafik panjang nyala api dari LPG dapat terlihat saat temperature pemanasan semakin tinggi, maka panjang nyala api akan semakin kecil. Hal yang serupa juga dapat terlihat pada gambar 4.11 dan gambar 4.12. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar temperatur *un-burn* maka semakin kecil nyala api difusi yang akan dihasilkan.



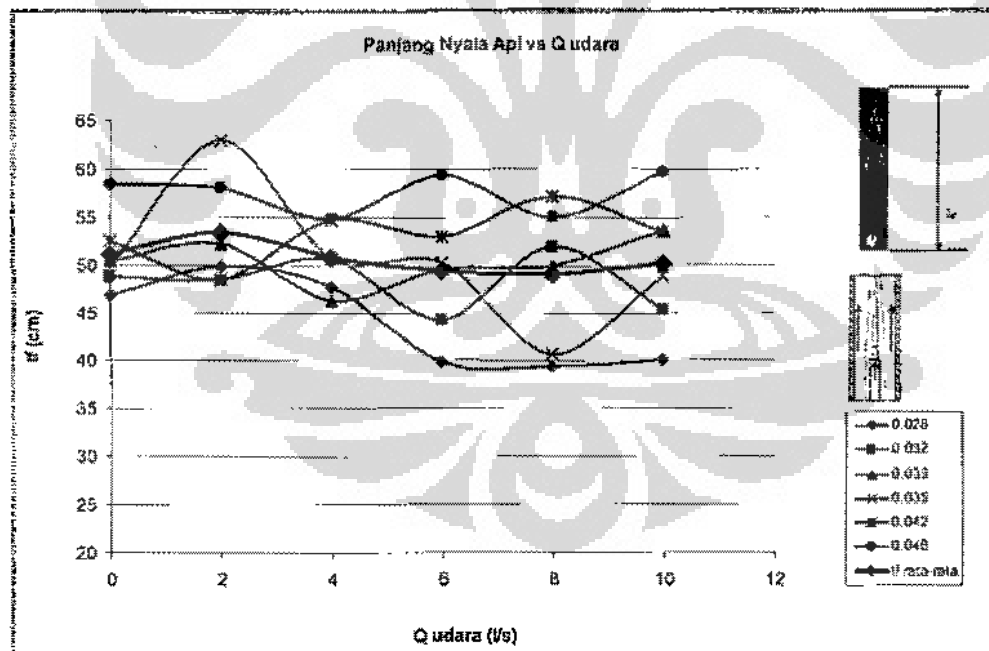
Gambar 4.10 grafik jarak panjang nyala api dengan pemanasan awal 70°C



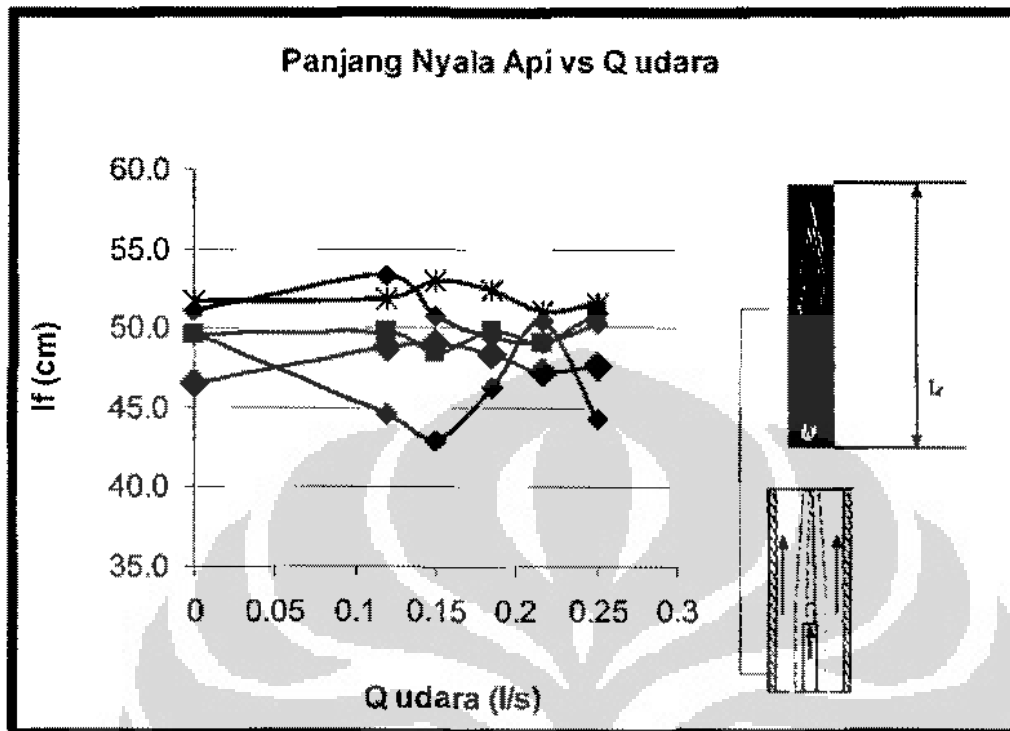
Gambar 4.11 grafik jarak panjang nyala api dengan pemanasan awal 80°C



Gambar 4.12 grafik jarak panjang nyala api dengan pemanasan awal 90°C



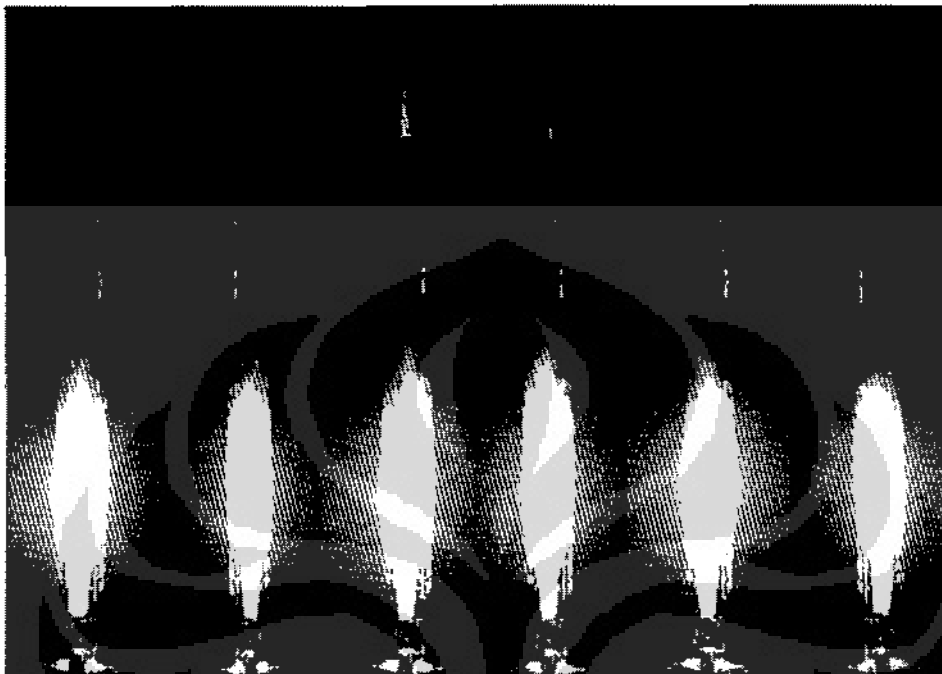
Gambar 4.13 grafik jarak panjang nyala api dengan pemanasan awal 100°C



Gambar 4.14 grafik jarak panjang nyala api pada rata-rata Q_f dengan variasi Pemanasan awal

4.4 Analisa Gambar Hasil Foto

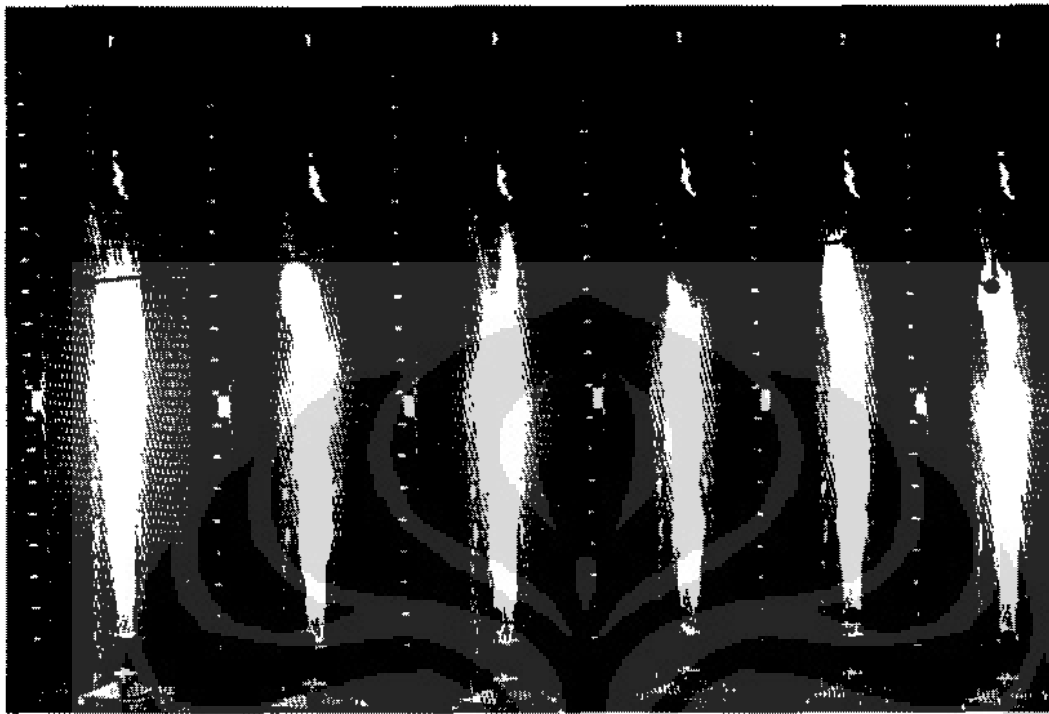
4.4.1 Tanpa Pemanasan awal



Gambar 4.15 Gambar dimensi nyala api tanpa pemanasan dengan Q_f : 0,039 L/s, dengan variasi semburan udara

Gambar diatas merupakan gambar dimensi nyala api pada saat bahan bakar tidak mengalami pemanasan. Pada gambar diatas terlihat saat mulai diberi semburan udara nilai *lifted flame* sedikit lebih turun dan nilai dari panjang api mengalami kenaikan yang signifikan, setelah diberi semburan makin lama tinggi *lifted flame* mengalami kestabilan dan panjang nyala api difusi makin rendah berbanding lurus terhadap jumlah semburan udara. Seperti pada gambar diatas terlihat pada ujung dari api terlihat banyak jelaga (*soot*) yang terjadi. Proses pembakaran seperti ini sangat tidak menguntungkan untuk efisiensi dari ruang bakar. Untuk itu jenis api seperti ini lebih baik tidak digunakan karena akan menyebabkan kerusakan pada ruang bakar dan nilai efisiensi yang sangat kecil.

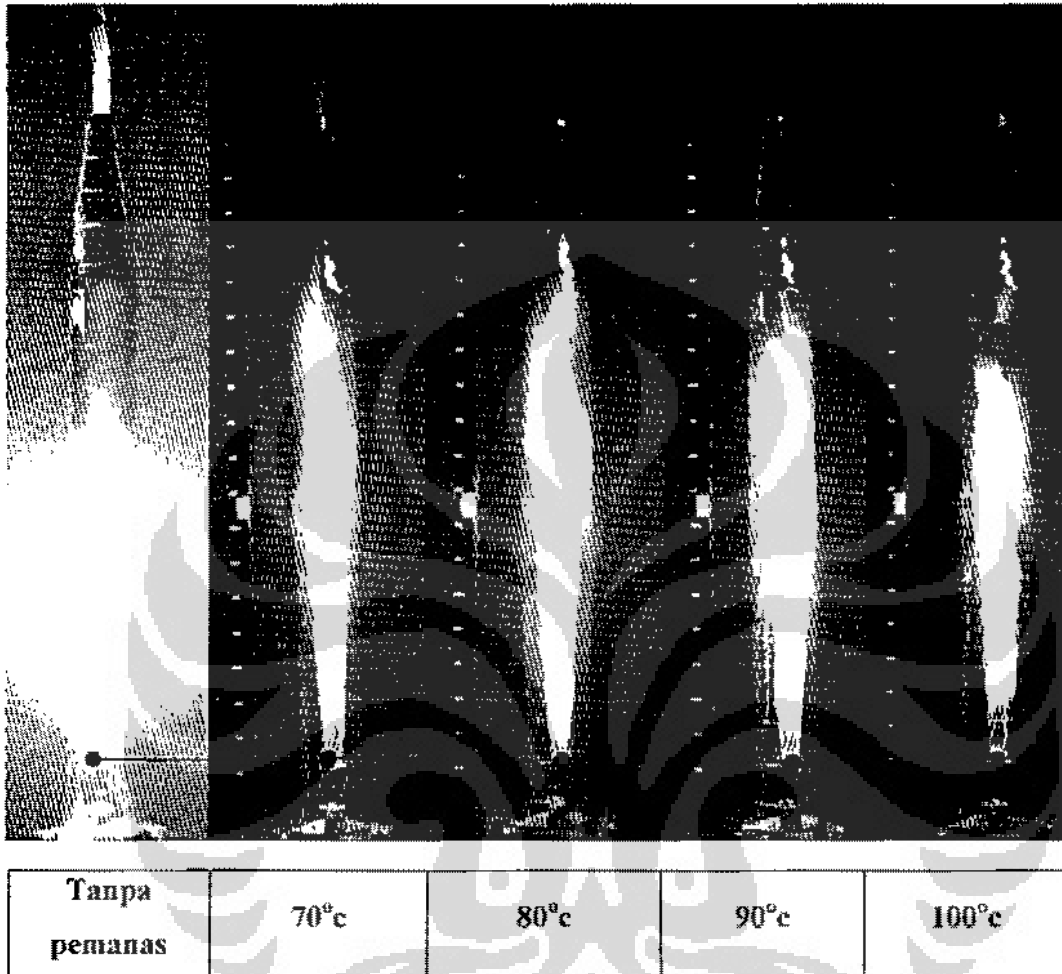
4.4.2 Dengan Pemanasan Awal



Gambar 4.16 Dimensi nyala api dengan pemanasan 100°C pada Q_f : 0.032 L/s dengan variasi semburan udara

Pada gambar diatas tinggi dari lifted flame dan panjang nyala api mempunyai pola kenaikan yang hampir menyerupai dari dimensi nyala api saat tidak mengalami pemanasan. Pada gambar diatas terlihat bahwa tinggi lifted flame dari awal sampai akhir tergolong stabil, tinggi lifted flame berada pada tinggi yang hamper sama dan hanya pengalami penurunan yang sedikit saat pertama kali diberi semburan udara. Sedangkan pada panjang nyala api, terlihat proses pembakaran terlihat lebih bersih dan tidak terdapat jelaga yang dapat mengganggu tingkat efisiensi bahan bakar. Dengan semakin tingginya jarak lifted flame dan menurunnya panjang nyala api maka kecepatan pembakaran dari proses ini lebih cepat dibandingkan dengan proses sebelumnya.

4.4.3 Efek Pemanasan



Gambar 4.17 dimensi api dengan variasi pemanasan pada Q_f : 0.039 L/s dan Q_a : 0.15 L/s

Gambar diatas merupakan dimensi nyala api saat diberi aliran bahan bakar (Q_f) yang konstan dan laju aliran udara (Q_a) yang diberikan sama. Efek pemanasan awal pada bahan bakar gas LPG sebelum dibakar didalam burner terlihat pada gambar diatas. Selain dari api yang terlihat lebih stabil dan lebih pendek. Jelaga yang banyak terjadi saat bahan bakar tidak mengalami pemanasan terlihat semakin lama semakin menghilang. Jelaga merupakan hal yang tidak diinginkan saat terjadi proses pembakaran pada ruang bakar. Semakin pendek nyala api maka semakin besar pula

kecepatan pembakaran yang terjadi. Dengan adanya pemanasan awal tinggi lifted juga lebih tinggi dari api yang bahan bakarnya tidak mengalami pemanasan. Ini diakibatkan berat jenis dari bahan bakar yang telah lebih dahulu dipanaskan akan lebih ringan dibandingkan dengan bahan bakar yang tidak dipanaskan. Ini menyebabkan fenomena lifted flame lebih mudah terjadi dan tinggi dari lifted flame yang menjadi lebih tinggi.

Pada gambar nyala api tanpa pemanasan terlihat bahwa banyak terbentuk *flame let*, dimana api tersebut lepas dari ujung nyala api, sehingga sangat berbahaya bagi proses pembakaran, jadi proses pemanasan dapat memberi nyala api yang lebih stabil, lebih cepat proses pembakarannya dan nilai *lifted flame* yang lebih tinggi.

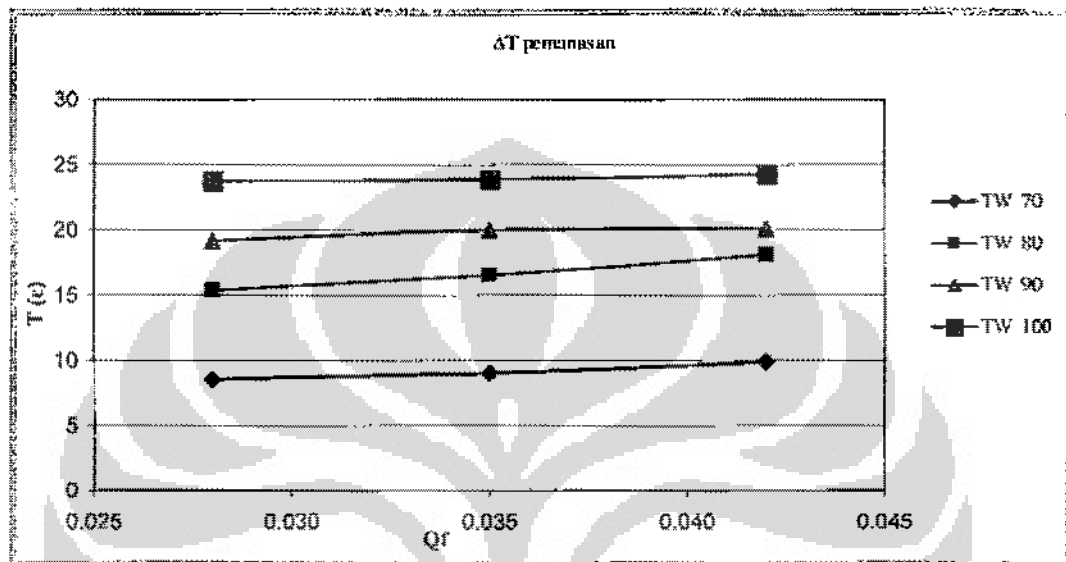
4.5 Analisa Temperatur

4.5.1 Temperatur Bahan Bakar

Pemanasan yang dilakukan adalah pemanasan terhadap medium kerja (air) yang menyebabkan aliran bahan bakar ikut terpanaskan. Pemanasan dilakukan pada temperatur 70°C , 80°C , 90°C , 100°C . Pada saat temperatur pemanasan 70°C , temperatur Q_f mencapai rata-rata $38,4^{\circ}\text{C}$. Semakin tinggi temperatur pemanasan, temperatur dari aliran bahan bakar LPG (Q_f) semakin tinggi, temperatur Q_f berada paling tinggi saat aliran bahan bakar yang dialirkan mencapai $0,046 \text{ L/s}$ dan temperatur pemanasan saat 100°C yaitu 56°C . sedangkan temperatur masuk untuk aliran bahan bakar tergolong konstan, yaitu pada range $29^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$, sehingga perbedaan temperatur berkisar dari 8°C yaitu saat aliran bahan bakar $0,028 \text{ L/s}$ dan suhu pemanasan paling kecil 70°C , dan paling tinggi perbedaan pada aliran bahan bakar $0,046 \text{ L/s}$ dan suhu pemanasan 100°C terlihat dari grafik dibawah, grafik dibawah merupakan grafik perbedaan temperatur saat aliran bahan bakar konstan $0,046 \text{ L/s}$ dan variable bebas adalah aliran udara (Q_a):

Grafik dibawah merupakan grafik kenaikan temperatur saat medium kerja mengalami pemanasan. Terlihat pada grafik saat aliran bahan bakar gas pada titik yang sama maka semakin tinggi temperatur air (T_w) maka semakin besar pula T_{out} yang keluar setelah mengalami pemanasan. Pada grafik dibawah perbedaan temperatur yang diambil adalah temperatur rata-rata saat dialirkan bahan bakar

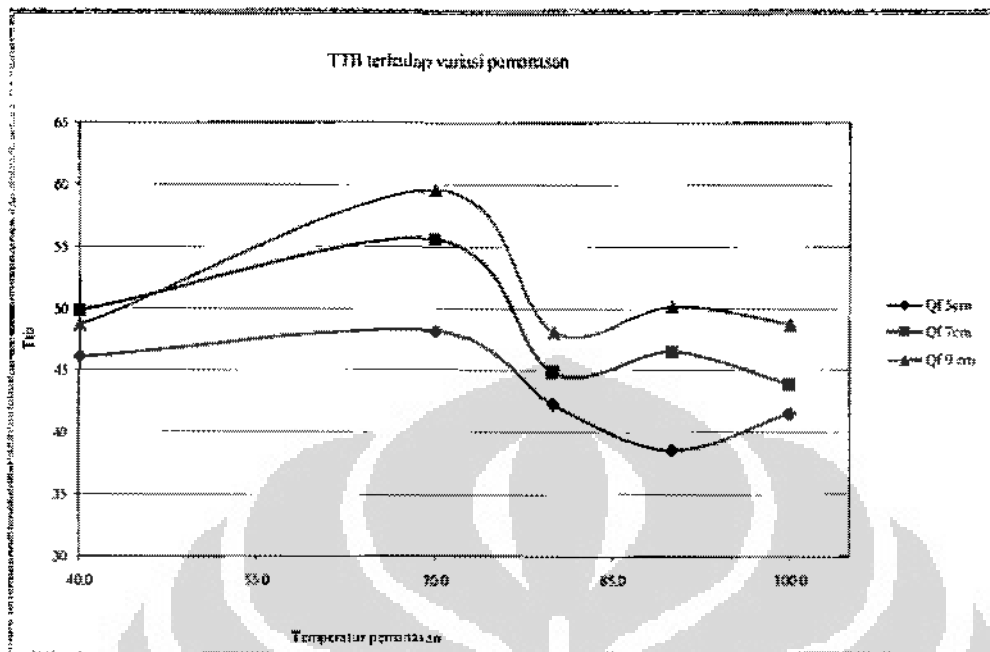
konstan dan dialirkan udara yang bervariasi. Dari grafik terlihat bahwa ΔT pemanasan berbanding lurus dengan temperatur minyak nabati (T_W) saat dipanaskan dengan variasi 70°C , 80°C , 90°C , 100°C .



Gambar 4.18 grafik perbedaan temperatur masuk dan keluar dengan variasi pemanasan.

4.5.2 Temperatur Tip Burner (T_{TB})

Untuk setiap aliran bahan gas yang dianggap konstan, maka aliran udara yang disebarkan ke dalam burner akan dijadikan parameter bebas dalam penelitian kali ini. Temperatur tip burner (T_{TB}) dicatat untuk diketahui Reynolds number pada ujung nosel yang akan dihitung diakhir, jika dilihat pada grafik, maka T_{TB} akan berbanding terbalik dengan variasi pemanasan. Pada grafik terlihat saat mengalami kenaikan terlebih dahulu dan kemudian turun perlahan, jika dibandingkan temperatur saat sebelum dipanaskan dan dipanaskan maksimum pada 100°C maka temperatur saat mengalami pemanasan 100°C akan lebih rendah jika dibandingkan dengan temperatur tanpa pemanasan. Untuk gambaran yang lebih jelas pada titik lainnya dapat dilihat pada gambar 4.19 dibawah ini.



Gambar 4.19 perbandingan variasi pemanasan terhadap temperatur tip burner

4.6 Analisa Perhitungan

4.6.1 Reynolds Number LPG Pada Ujung Nosel

Dengan menggunakan persamaan 2, diperoleh *Reynolds number* LPG pada ujung nozzle, $Re_{f,i}$ sbb :

- Diameter nosel, $d_{no} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

- Laju aliran LPG, $Q_f = 38,823 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{dtk}$

- Kecepatan aliran LPG, $u_{f,i} = \frac{38,823 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{dtk}}{(\pi/4) \times (1,8 \cdot 10^{-3})^2 \text{ m}^2}$
 $= 27,46165 \text{ m/dtk}$

- Viskositas LPG merupakan gabungan dari viskositas propana dan butana pada kondisi lingkungan sesuai Bab III, sbb :

$$\begin{aligned}
 v_{LPG} &= 0,6 v_{prop} + 0,4 v_{bu} \\
 &= 0,6(5,333 \cdot 10^{-6}) + 0,4(3,72 \cdot 10^{-6}) \\
 &= 4,688 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{dtk}
 \end{aligned}$$

- Maka *Reynolds number* LPG pada ujung nosel

$$\begin{aligned}
 Re_{f,j} &= \frac{27,46165 \text{ m}^2 / \text{dtk} \times 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{4,688 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{dtk}} \\
 &= 10544
 \end{aligned}$$

4.7 Kecepatan Pembakaran

Untuk mengetahui kecepatan pembakaran nyala api difusi turbulen (S_T), maka terlebih dahulu diketahui kecepatan pembakaran laminar (S_L). Kecepatan pembakaran nyala api difusi dengan injeksi udara hasil eksperimen ditunjukkan perhitungan dibawah ini.

4.7.1 Kecepatan pembakaran laminar

Dengan menggunakan persamaan 2.21 dan 2.22 diperoleh kecepatan pembakaran laminar, sebagai berikut :

- Diameter nozzel, $d_{in} = 1,8 \text{ mm}$
Maka $r_{in} = 0,09 \text{ cm}$
- Laju aliran LPG, $Q_f = 38.823 \text{ cm}^3 / \text{dtk}$
- Panjang nyala api difusi, $L_f = 47,59 \text{ cm}$
- Maka kecepatan pembakaran laminar nyala api difusi tanpa injeksi udara, S_L
sbb :

$$\begin{aligned}
 S_L &= \frac{2 \times 38.823}{\pi \cdot 0,09 \sqrt{(0,09)^2 + 47,59^2}} \text{ cm/dtk} \\
 &= 57,7 \text{ cm/dtk}
 \end{aligned}$$

4.7.2 Kecepatan pembakaran turbulen

kecepatan pembakaran turbulen, sebagai berikut :

- Diameter nyala api $d_f = l_f = 3,64 \text{ cm}$
- Waktu yang diperlukan (t) elemen bahan bakar mencapai ujung nyala api difusi menggunakan persamaan 2.54 sbb:

$$t = \frac{3,64 \text{ cm}}{5,77 \text{ cm/dtk}} = 0,630849 \text{ dtk}$$

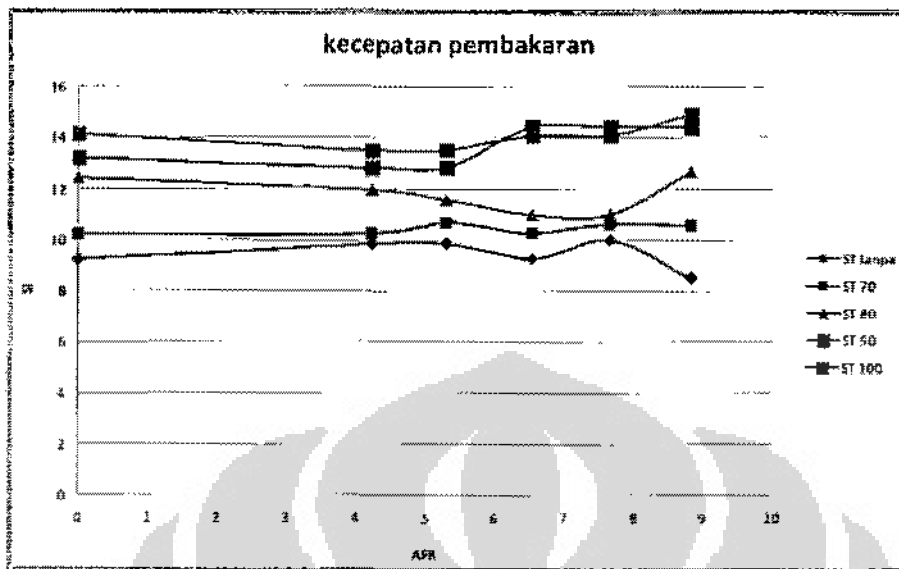
- Sehingga, $u'_{rms} = \frac{47,59}{0,630849} = 75,4379 \text{ cm/dtk}$
- Maka kecepatan pembakaran turbulen, S_T :

$$S_T = 5,77 \left[1 + \left(\frac{2 \times 75,4379}{5,77} \right)^2 \right]^{1/2} \text{ cm/dtk}$$

$$= 15,09863 \text{ m/dtk}$$

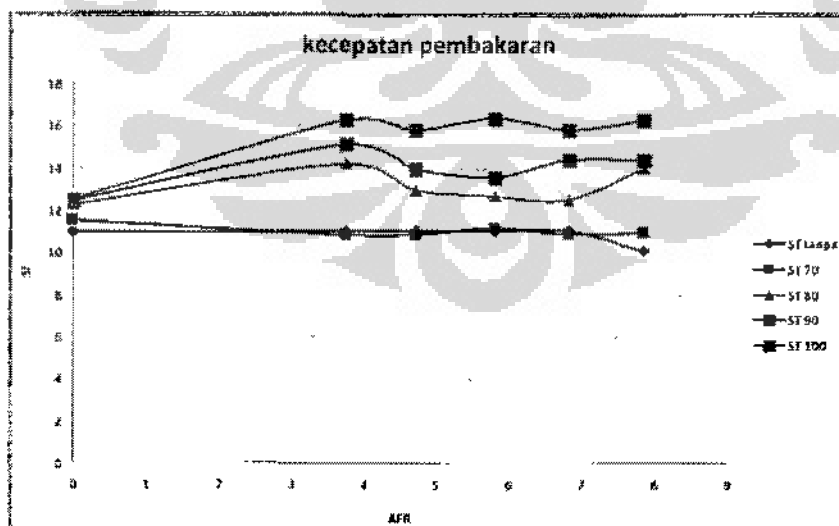
4.7.3 Grafik Kecepatan Pembakaran

Kecepatan pembakaran dari suatu proses pembakaran berhubungan langsung dengan nilai panjang nyala api difusi. Semakin kecil panjang nyala api, semakin tinggi nilai dari kecepatan pembakaran. Dapat dilihat pada gambar 4.20, pada proses pembakaran bahan bakar tanpa pemanasan kecepatan pembakaran laminar lebih cepat karena panjang nyala api tergolong pendek, tetapi banyak terjadi soof dan flame let sehingga mengurangi tingkat efisiensi dari pembakaran.



Gambar 4.20 grafik kecepatan pembakaran laminar terhadap AFR

Pada kecepatan turbulen dapat dilihat pada gambar 4.21 semakin tinggi nilai dari temperatur pemanasan maka makin cepat proses pembakarannya. Kecepatan pembakaran turbulen sangat dipengaruhi oleh kecepatan laminar dan diameter nyala api. Pada nyala api tanpa pemanasan diameter api lebih besar daripada saat proses pemanasan (Diameter api didapat dari proses *RGB horizontal* dengan menggunakan *adobe photoshop*).



Gambar 4.21 grafik kecepatan pembakaran turbulen terhadap AFR

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Temperatur maksimum sebelum masuk ke burner pada pemanasan awal bahan bakar LPG didapat 56°C , dengan suhu minyak nabati sebagai medium kerja yang dipanaskan adalah 100°C pada *thermostatic-bath*.
2. Temperature *tib burner* (T_{TB}) berbanding terbalik dengan suhu pemanasan medium kerja (T_W). T_{TB} maksimum adalah $50,2^{\circ}\text{C}$, dan minimum $38,6^{\circ}\text{C}$.
3. Untuk tinggi lifted flame setiap awal diberi semburan udara, maka tinggi lifted flame akan mengalami penurunan akibat fenomena *flame approach*, dengan adanya efek pemanasan bahan bakar, fenomena tersebut menjadi berubah akibat perubahan berat jenis bahan bakar karena pemanasan awal sehingga pada pemanasan tertentu tinggi lifted flame akan lebih tinggi bila dibandingkan dengan sebelum dilakukan pemanasan awal.
4. Untuk panjang nyala api difusi setiap awal semburan udara panjang nyala api akan naik secara *linear* lalu turun perlahan sebanding dengan laju aliran udara. Kondisi nyala api saat tanpa pemanasan banyak jelaga dan banyak api yang lepas (*flame let*), ketika mendapat pemanasan kondisi api menjadi lebih stabil dan berkurang jelaganya (*soof*)
5. Panjang nyala api difusi berpengaruh terhadap kecepatan pembakaran. Kecepatan pembakaran untuk setiap pemanasan meningkat sesuai dengan pemanasan yang terjadi pada bahan bakar. Kecepatan pembakaran maksimum berada pada aliran udara $0,25\text{ L/s}$ dan aliran bahan bakar $0,0455\text{ L/s}$ yaitu dengan kecepatan pembakaran turbulen (S_7) $19,15\text{ m/s}$
6. Efek pemanasan mempengaruhi nilai dari tinggi nyala api difusi.

5.2. Saran

Perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengetahui fenomena lifted nyala api difusi dengan variasi bahan bakar dan perlakuan lainnya.

DAFTAR ACUAN

- [1] I Made Kartika, et al., *Pengaruh Variasi Aliran Udara Terhadap Tinggi Lifted Flame pada Pembakaran Difusi Propana*, Prosiding Seminar Nasional VI Institute Teknologi Nasional Bandung, 2008, hal 41.
- [2] R. M. Fristrom, A.A. Westenberg, *Flame Structure*, (New York: McGraw-Hill Book Company, 1965), hal. 2-3.
- [3] R. M. Fristrom, A.A. Westenberg, *Flame Structure*, (New York: McGraw-Hill Book Company, 1965), hal. 4-5.
- [4] Sharma, SP., Chander Mohon, "*Fuel and Combustion*, (New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1984), hal. 148-149.
- [5] R. M. Fristrom, A.A. Westenberg, *Flame Structure*, (New York: McGraw-Hill Book Company, 1965), hal. 10-11.
- [6] Kenneth K. Kuo, *Principles of Combustion* (New York: John Wiley & Sons, 1986), hal. 347-348.
- [7] A. Murty Kanury, *Introduction To Combustion Phenomena*, Combustion Science and Technology, Volume 2, (New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1984), hal. 256 -257.
- [8] A. Murty Kanury, *Introduction To Combustion Phenomena*, Combustion Science and Technology, Volume 2, (New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1984), hal. 257-260.
- [9] Sharma, SP., Chander Mohon, "*Fuel and Combustion*, (New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1984), hal.213-215.
- [10] Roger A. Strehlow, *Combustion Fundamentals*, (New York: McGraw-Hill Book Company, 1985), hal. 260.
- [11] James R. Welty et. al., *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, Third Edition, (New York: Jhon Wiley & Sons, Inc, 1984), hal. 477.
- [12] R. Byron Bird, et. al., *Transport Phenomena*, (New York: Jhon Wiley & Sons, Inc, 1960), hal. 477.
- [13] SP Sharma, Chander Mohan, *Fuels and Combustion* (Bombay: Tata McGraw-Hill,1984), hal. 301
- [14] SP Sharma, Chander Mohan, *Fuels and Combustion* (Bombay: Tata McGraw-Hill,1984), hal. 302

- [15] SP Sharma, Chander Mohan, *Fuels and Combustion* (Bombay: Tata McGraw-Hill,1984), hal. 301
- [15] SP Sharma, Chander Mohan, *Fuels and Combustion* (Bombay: Tata McGraw-Hill,1984), hal. 303
- [16] SP Sharma, Chander Mohan, *Fuels and Combustion* (Bombay: Tata McGraw-Hill,1984), hal. 304
- [17] SP Sharma, Chander Mohan, *Fuels and Combustion* (Bombay: Tata McGraw-Hill,1984), hal. 305
- [18] Roger A. Strehlow, *Combustion Fundamentals* (Urbana: Tata McGraw-Hill,1985), hal. 356
- [19] Roger A. Strehlow, *Combustion Fundamentals* (Urbana: Tata McGraw-Hill,1985), hal. 360
- [20] Stephen R. Turns, *An Introduction to Combustion Concepts and Applications* (Pennsylvania,1996), hal. 246
- [21] Ombun Sihombing, *Analisis Pengaruh Sudut Pengarah Injeksi Udara terhadap Panjang Nyala Api Difusi Bahan Bakar Propana Pada Burner gas Tipe " Ejected Combustor*, tesis, hal 51-52

DAFTAR PUSTAKA

- Dysdale, Dougal, *An Introduction to Fire Dynamics 2nd Ed.*, (John Wiley and Sons, 2003)
- Eduardo Fernandez-Tarrazo, Marcos Vera, Amable Linan, "Liftoff and blowoff of diffusion flame between parallel streams of fuel and air ", *Combustion and Flame* 144 (2006), 261 – 276.
- Kazantsev, E.I. *Industrial Furnaces* (Moscow: Mir Publishers,1977)
- Kuo, Kenneth K. *Principle of Combustion* (Canada: John Willey and Sons, 1986).
- Lee, B. J. Chung, S. H, "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet", *Combustion and Flame* 109 (1997), 163 – 172.
- L.K.Su O.S.Sun, M.G.Mungal, "Experimental investigation of stabilization mechanisms in turbulent, lifted jet diffusion flames", *Combustion and Flame* 144 (2006), 494 – 512.
- Sharma, SP. Mohan, Chander, *Fuels and Combustion* (Bombay: Tata McGraw-Hill,1984)
- Strehlow, Roger A., *Combustion Fundamentals* (Urbana: Tata McGraw-Hill,1985)
- Turns, Stephen R. *An Introduction to Combustion Concepts and Applications* (Pennsylvania,1996)

Lampiran 1 Viskositas gas dan uap

Viscosity ($\times 10^{-6}$) of Gases and Vapors
(in gms/cm²/sec)

T °C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0			171	94		139	166		83	85	91	102						
10			180		72	140	170		84	87	92	103		170	81		76	
20			183		76	148	173		87	91	101	109		178	84		80	
30			186		79	153	175		90	94	104	113		184	88		84	
40			190		82	157	177		92	98	108	117		188	90		87	
50		68	194		85	168	180		94	101	110	120		192	94		90	
75		82	210		91	180	188	98	100	108	120	129	127	203	100	63	96	
100	105	93	218		97	190	196	108	105	114	126	133	125	211	108	68	102	126
150		110	242		108	211	218	124	113	127	140	148	136	229	120	77	114	144
200		125	255		120	232	240	138	122	141	154	160	152	245	134	85	125	164
250		136	275		132	250	266	153	130	155	167	170	170	253	151	92	137	183
300		147	295		145	268	294	166	139	171	180	181	188	280	170	100		202
350		158	313		158	286		180	148			193	211	295				221
400		166	332		174	304		194	156			205		311				241
500			360			333			171			226		340				
600			390			361			185			256		369				
700			420			389			198			285		381				
800			442			415			211					419				
900			470			440			224					440				
1,000			500			470			235					460				

Legend: 1. Acetic Acid Vapor, 2. Acetone Vapor, 3. Air, 4. Acetylene, 5. Benzene Vapor, 6. Carbon Dioxide, 7. Carbon Monoxide, 8. Ethyl Alcohol Vapor, 9. Hydrogen, 10. Ethane, 11. Ethylene, 12. Methane, 13. Methyl Alcohol Vapor, 14. Nitrogen, 15. Propylene, 16. n-Octane Vapor, 17. Propane, 18. Water Vapor.

Units: 1 gm/cm²/sec = 1 poise = 1 dyne sec/cm² = 10² centipoise = 10⁶ micropoise.

Lampiran 2 Karakteristik bahan bakar

Name of matter, chemical formula	Molecular mass M , kg/mol	Density ρ , kg/m ³	Gas constant R , J/(kg·°C)	Heat of combustion			
				Q_h^{vol}	Q_l^{vol}	Q_h^m	Q_l^m
				kJ/m ³		kJ/kg	
Carbon on combustion to CO (C)	12.01	—	—	—	—	9295	9295
Carbon on combustion to CO ₂ (C)	12.01	—	—	—	—	32908	32908
Carbon monoxide (CO)	28.01	1.25	297	12644	12644	10132	10132
Hydrogen (H ₂)	2.016	0.09	412	12770	10760	141974	119617
Methane (CH ₄)	16.04	0.717	518	39853	35797	56103	49404
Ethane (C ₂ H ₆)	30.07	1.34	276	70422	64351	51958	47436
Propane (C ₃ H ₈)	44.09	1.96	187	101823	93573	50409	46348
Butane (C ₄ H ₁₀)	58.12	2.59	143	134019	123552	49572	45720
Pentene (C ₅ H ₁₀)	70.13	3.13	—	150723	140928	48575	45025
Pentane (C ₅ H ₁₂)	72.14	3.22	115	148213	137143	48358	44661
Benzol (C ₆ H ₆)	78.11	3.48	—	146287	140383	42035	40340
Ethylene (C ₂ H ₄)	28.05	1.25	296	64016	14320	50786	47562
Propylene (C ₃ H ₆)	42.08	1.88	198	94370	88216	49279	46055
Butylene (C ₄ H ₈)	56.10	2.50	148	114509	107015	48692	45469
Acetylene (C ₂ H ₂)	26.03	1.16	320	58992	56940	50367	48651
Hydrogen sulfide (H ₂ S)	34.07	1.52	242	25707	23697	16705	15407
Sulfur (S)	32.06	—	—	—	—	9261	9261

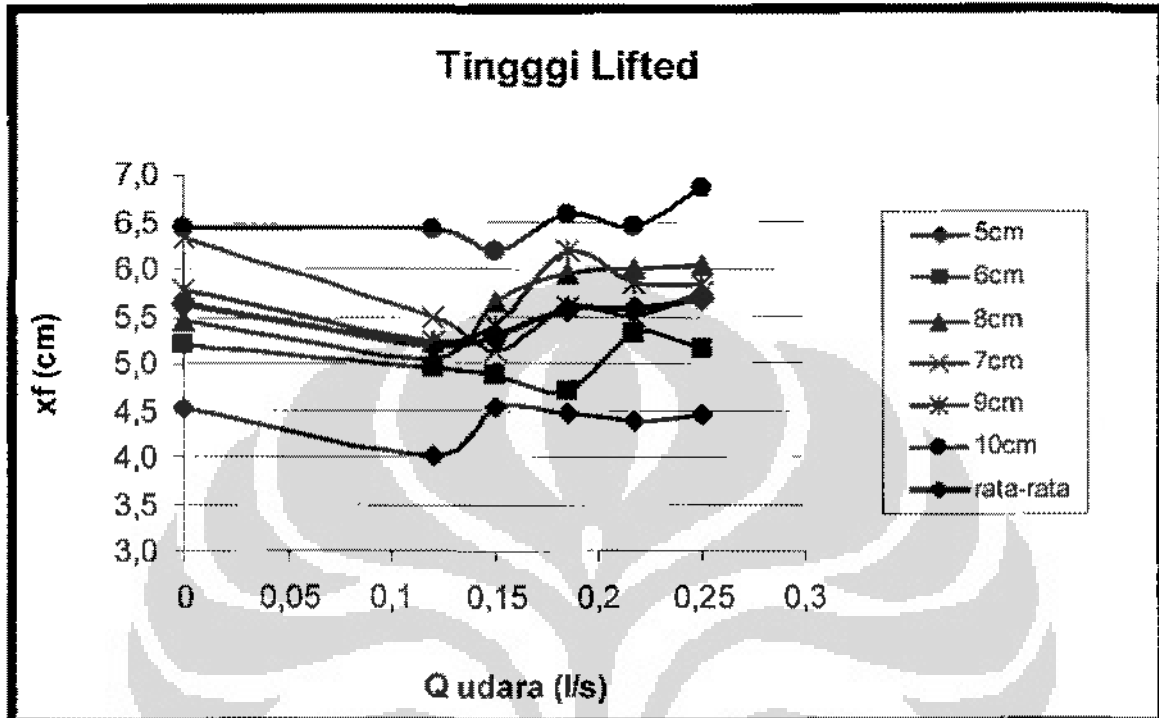
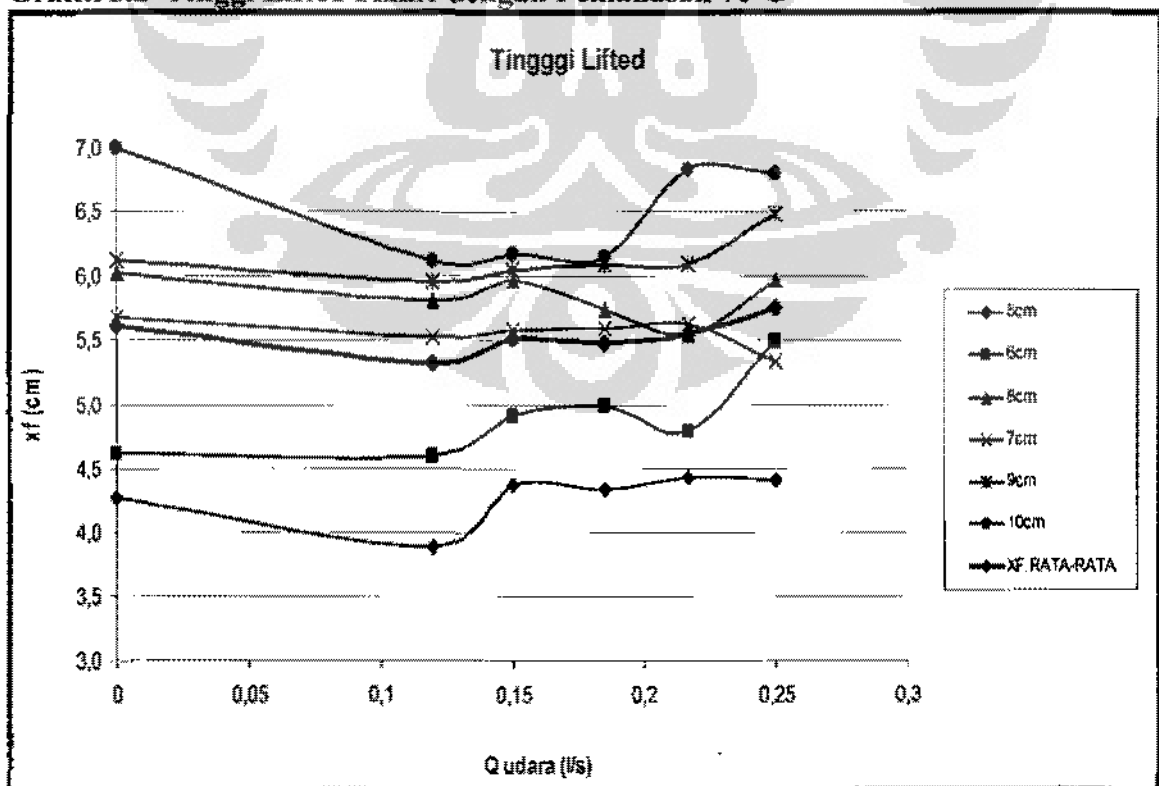
Universitas Indonesia

Lampiran 3 Propertis Udara dan Propane (C₃H₈)

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^8, \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	$\eta \cdot 10^4, \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	Pr	$\nu \cdot 10^6, \text{m}^2/\text{s}$	$c_p, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	$\frac{c_p}{c_v} = k$	$a \cdot 10^3, \text{m}^2/\text{h}$	$\rho, \text{kg}/\text{m}^3$
<i>Air</i>								
0	24.4	17.2	0.707	13.3	1.004	1.400	6.76	1.293
100	32.1	21.9	0.688	23.0	1.009	1.397	12.1	0.946
200	39.3	26.0	0.680	34.8	1.026	1.390	18.4	0.747
300	46.1	29.7	0.674	48.2	1.047	1.378	25.7	0.616
400	52.1	33.0	0.678	63.0	1.068	1.366	33.5	0.524
500	57.4	36.2	0.687	79.3	1.093	1.357	41.5	0.456
600	62.3	39.1	0.699	96.2	1.114	1.345	49.9	0.404
700	67.1	41.8	0.706	115	1.135	1.337	58.7	0.363
800	71.8	44.3	0.713	135	1.156	1.330	68.2	0.328
900	76.3	46.7	0.717	155	1.172	1.325	77.8	0.301
1000	80.7	49.0	0.719	178	1.185	1.320	88.8	0.276
<i>Propane (C₃H₈)</i>								
0	15.2	7.50	0.762	3.81	1.5495	1.138	1.80	1.967
100	26.3	10.00	0.768	6.94	2.0168	1.102	3.26	1.44
200	40.1	12.45	0.763	10.9	2.4581	1.083	5.17	1.14
300	56.2	14.81	0.748	15.8	2.8345	1.070	7.61	0.939
400	74.8	17.16	0.727	21.6	3.1610	0.062	10.7	0.799
500	95.6	19.42	0.700	28.2	3.4487	1.057	14.4	0.694
600	118.6	21.77	0.678	35.6	3.6974	1.053	18.8	0.616

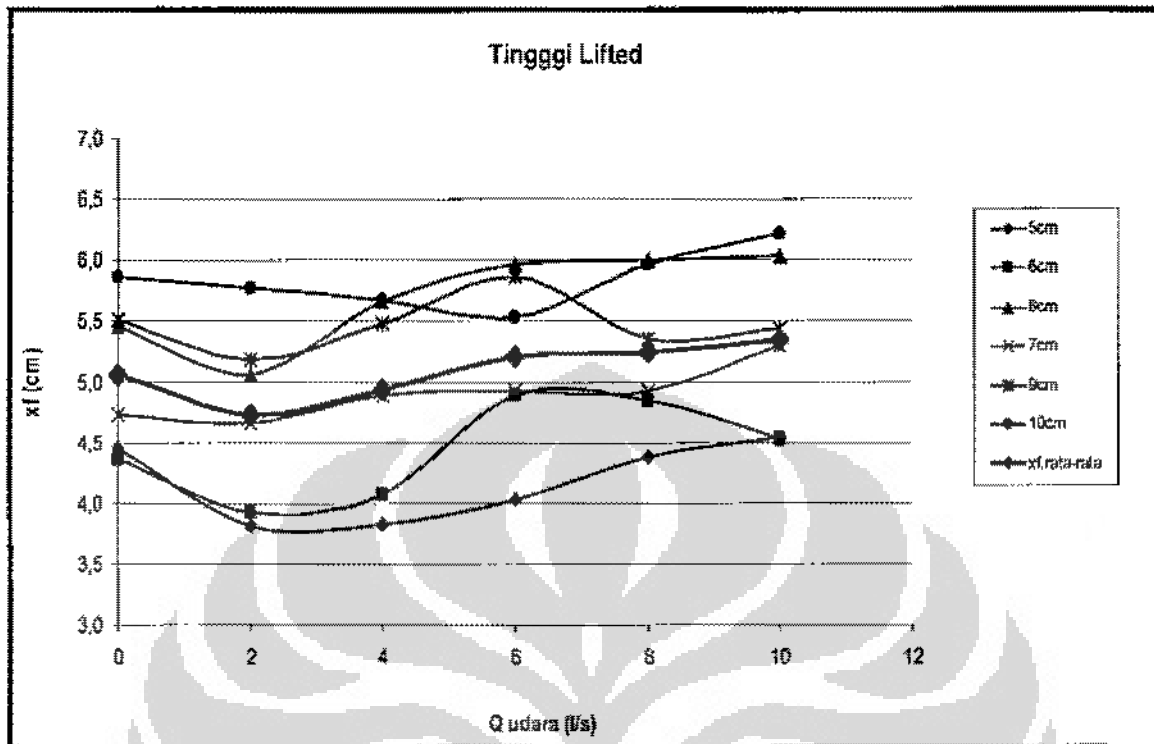
Lampiran 4.

Grafik 5.1 Tinggi Lifted Flame Tanpa Pemanasan

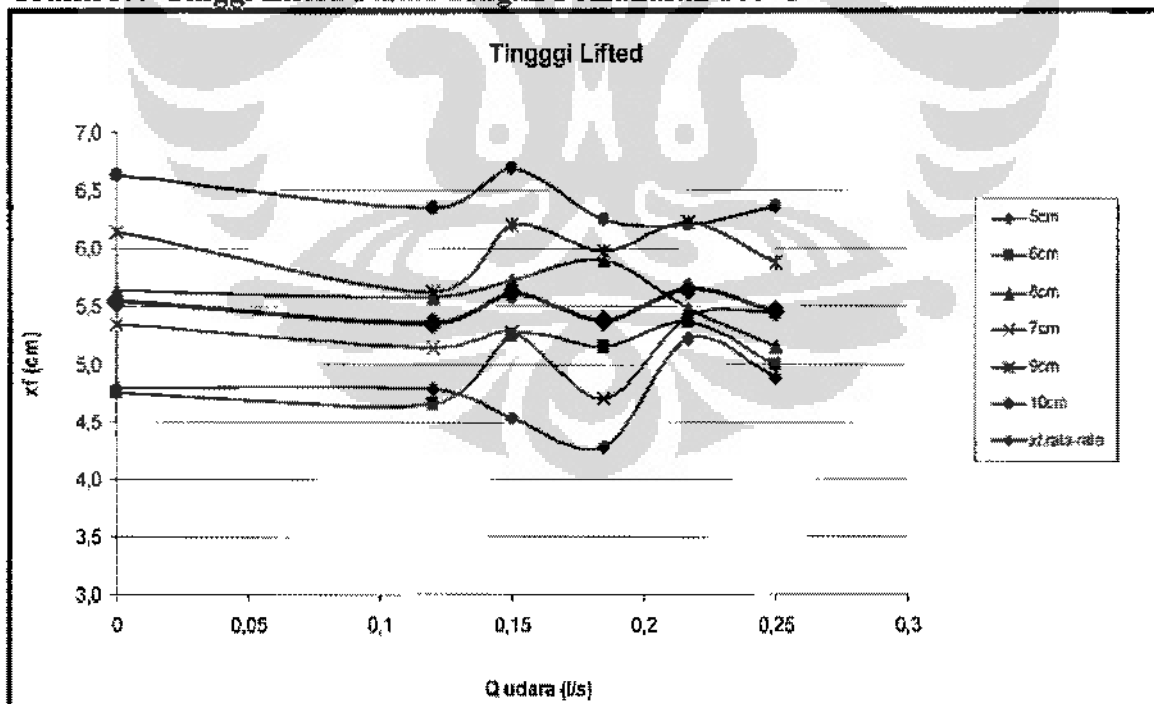
Grafik 5.2 Tinggi Lifted Flame dengan Pemanasan 70^oC

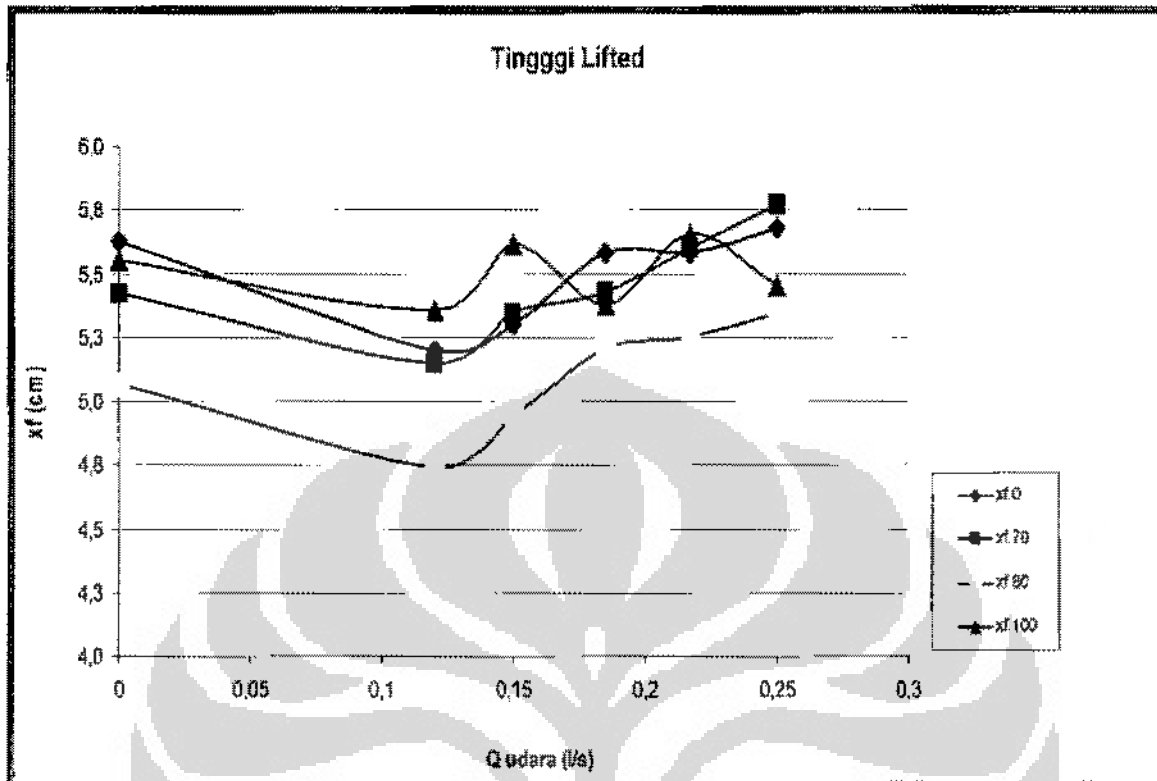
Universitas Indonesia

Grafik 5.3 Tinggi Lifted Flame dengan Pemanasan 80°C

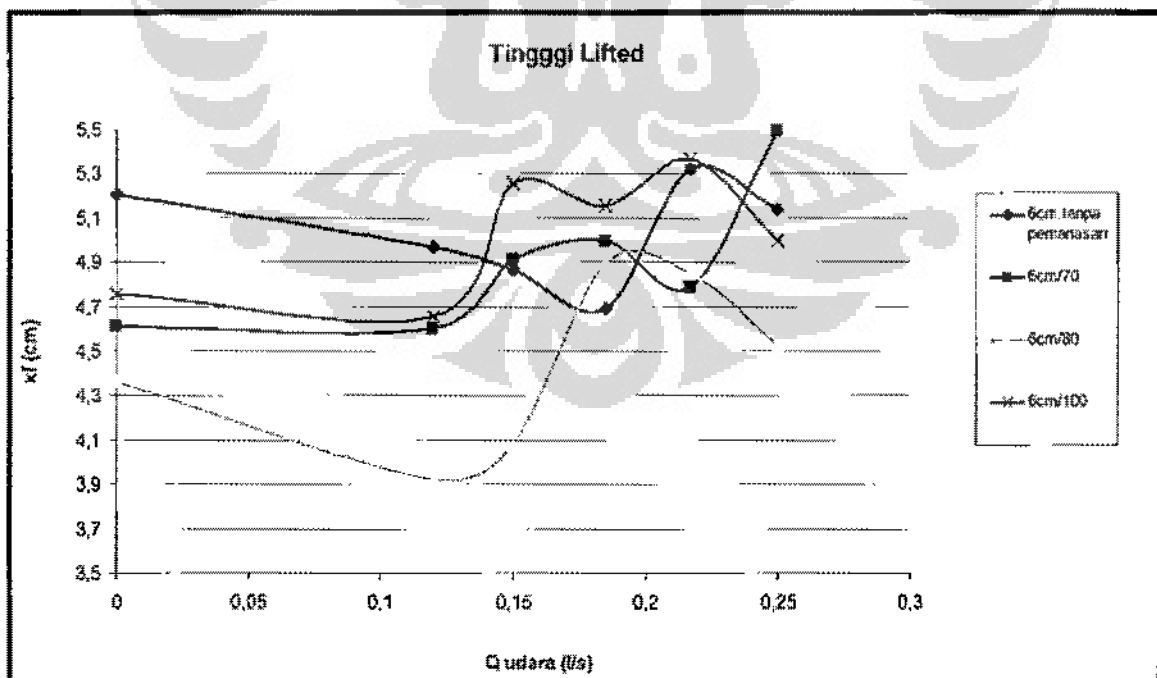


Grafik 5.4 Tinggi Lifted Flame dengan Pemanasan 100°C

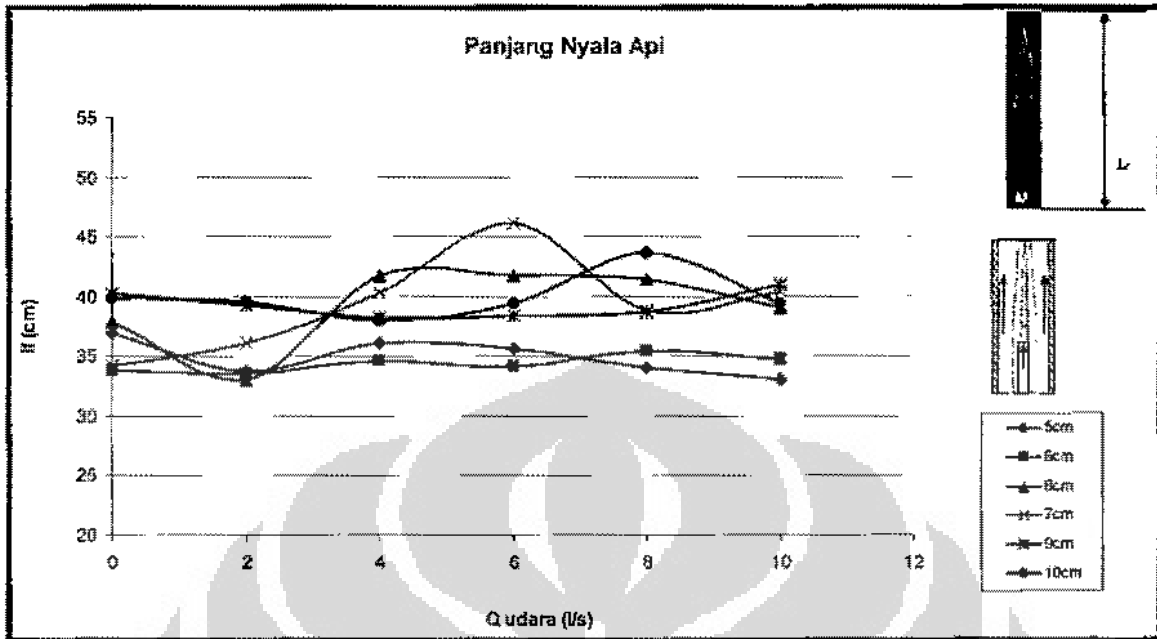


Grafik 5.5 Tinggi Lifted flame (x_f rata-rata)

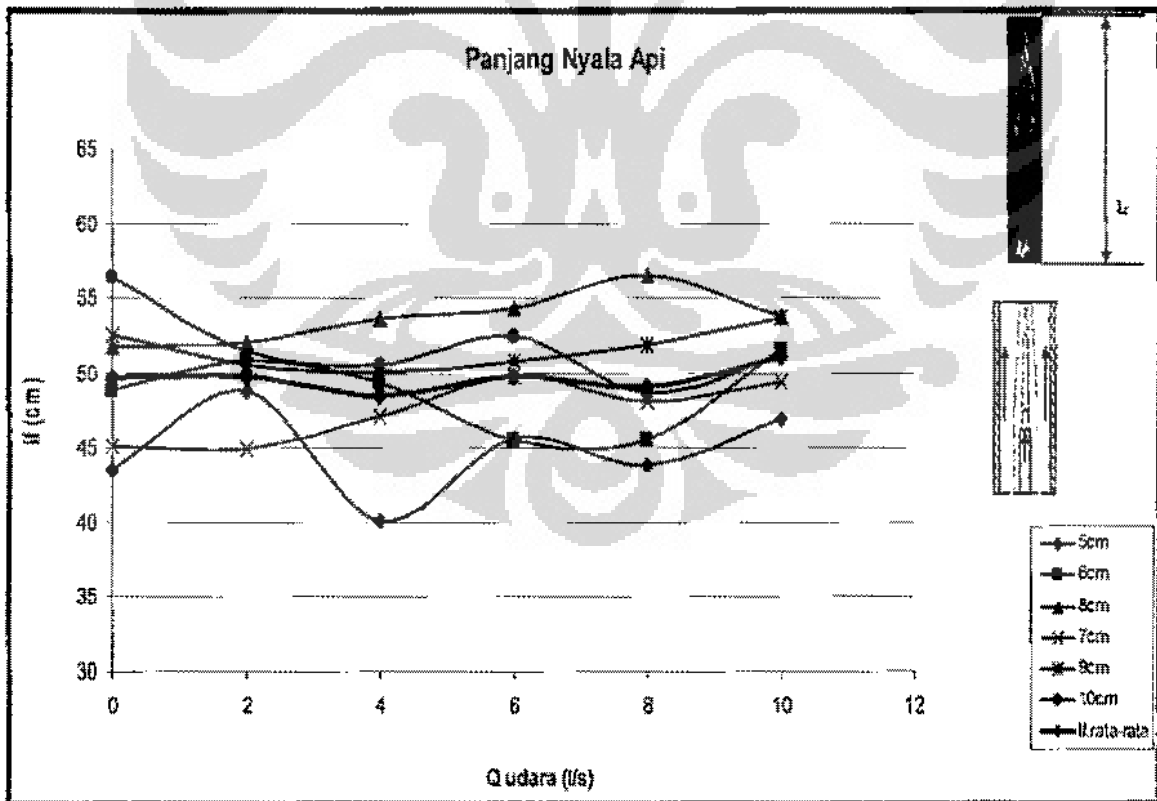
Grafik 5.6 Tinggi Lifted flame pada skala LPG 6 cm



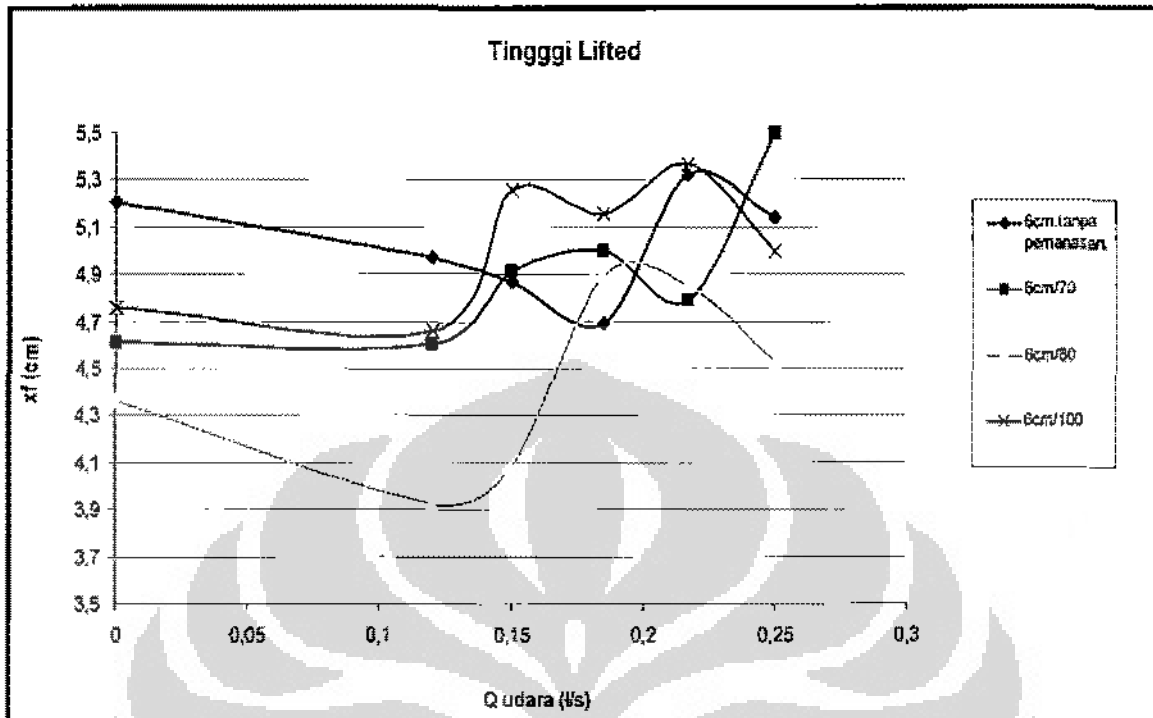
Grafik 5.7 Panjang Nyala Api Tanpa Pemanasan Awal



Grafik 5.8 Panjang Nyala Api Tanpa Pemanasan Awal 70°C



Grafik 5.9 Panjang Nyala Api Tanpa Pemanasan Awal 80°C



Grafik 5.10 Panjang Nyala Api Tanpa Pemanasan Awal 100°C

