



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KARAKTERISTIK STABILITAS
NYALA API DIFUSI PADA FENOMENA *LIFTED FLAME*
DENGAN VARIASI PEMANASAN AWAL BAHAN BAKAR
LPG MEMPERGUNAKAN *BUNSEN BURNER***

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik

DIMITRI RULIANTO

07 06 25 69 40

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI PASCASARJANA BIDANG ILMU TEKNIK
KEKHUSUSAN KONVERSI ENERGI
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KARAKTERISTIK STABILITAS
NYALA API DIFUSI PADA FENOMENA *LIFTED FLAME*
DENGAN VARIASI PEMANASAN AWAL BAHAN BAKAR
LPG MEMPERGUNAKAN *BUNSEN BURNER***

TESIS

DIMITRI RULIANTO


07 06 25 69 40

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



HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS

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

Nama : Dimitri Rulianto
NPM : 0706256940
Tanda tangan : 
Tanggal : 15 Juli 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


Dimitri Rulianto

NPM. 07 06 25 69 40

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

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

Nama : Dimitri Rulianto
NPM : 0706256940
Program Studi : Pascasarjana Bidang Ilmu Teknik
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 Karakteristik Stabilitas Nyala Api Difusi Pada Fenomena
Lifted Flame Dengan Variasi Pemanasan Awal Bahan Bakar LPG
Mempergunakan *Bunsen Burner*

beserta 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 memublikasikan 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 : 15 Juli 2009

Yang menyatakan



(Dimitri Rulianto)

Universitas Indonesia

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Dimitri Rulianto
NPM : 0706256940
Program Studi : Pascasarjana Bidang Ilmu Teknik
Judul Tesis : Analisis Karakteristik Stabilitas Nyala Api Difusi Pada Fenomena *Lifted Flame* Dengan Variasi Pemanasan Awal Bahan Bakar LPG Menggunakan *Bunsen Burner*

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Pascasarjana Bidang Ilmu Teknik, 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 : Dr. Ir. Yulianto S. Nugroho, M.Sc

Penguji : Dr. Ir. Adi Suryo Satyo, M.Sc

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Juli 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamu 'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas berkat, rahmat dan bimbingan-Nya sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis juga tidak lupa ingin mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak, antara lain :

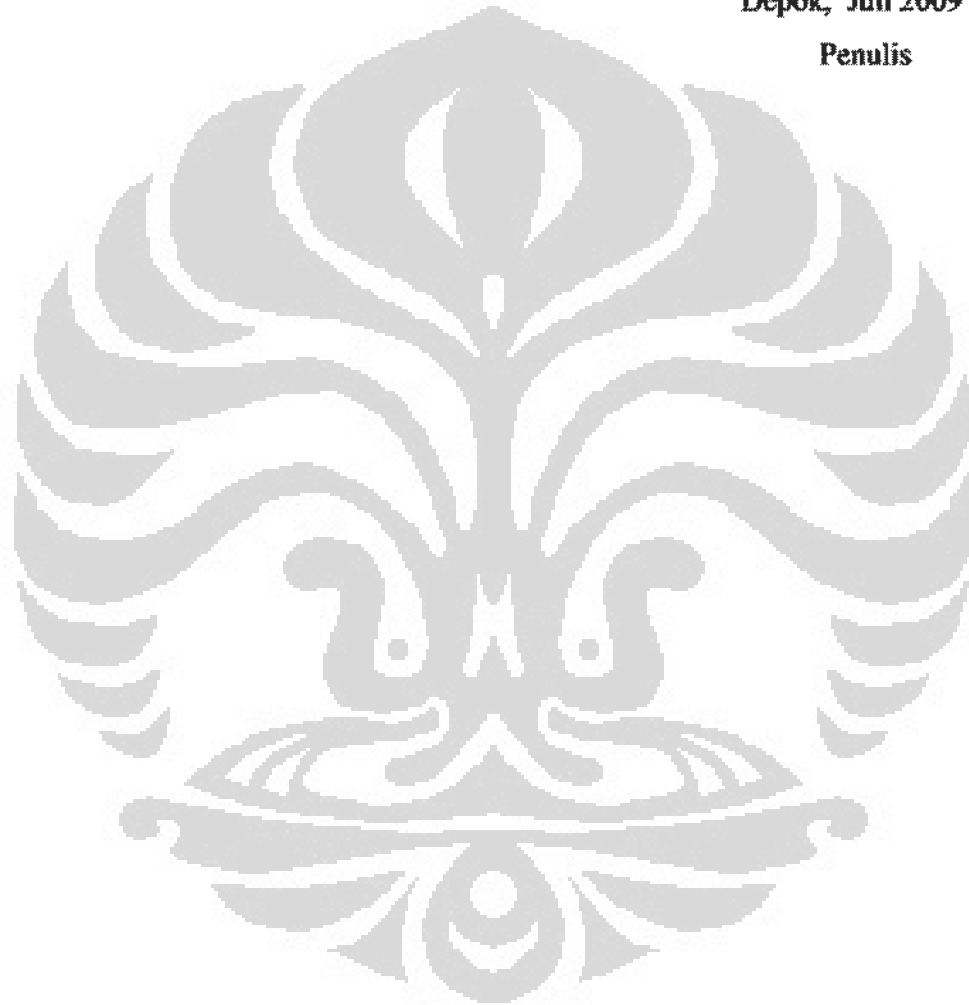
1. Bapak Prof. DR. Ir. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing. selaku pembimbing skripsi yang telah banyak meluangkan waktu dan tenaga dalam membimbing penulis dalam menyelesaikan skripsi ini, beserta istri beliau yang telah banyak memberikan dukungannya agar penulis tetap semangat untuk menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Harinaldi selaku Ketua Departemen Teknik Mesin UI dan dosen-dosen Departemen Teknik Mesin yang telah memberikan saran dan masukannya.
3. Ayahanda, Ibunda dan Isteri tercinta yang telah memberikan kasih sayang, doa, dan dukungan yang tidak terhingga baik moril dan materiil kepada penulis.
4. Seluruh karyawan DTM FTUI, yang telah meluangkan waktu untuk membantu saat pengambilan data.
5. Ibu Catur, Bapak Cahyo, Tondi dan Yonathan rekan *Research Sub Group Diffusion Flame and Combustion* selaku mahasiswa/i S3, S2 dan S1 yang sedang melakukan penelitian pembakaran gas secara difusi;
6. Rekan-rekan *Research Group Flame and Combustion*;
7. Rekan-rekan S2 Teknik Mesin 2007 yang telah membantu dan memberikan semangat kepada penulis.
8. Rekan-rekan di kantor PPPTMGB"LEMIGAS" dan P3EBT yang telah banyak membantu penulis.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan akhir ini masih banyak kekurangan, baik dalam cara penulisan maupun pengumpulan dan pengolahan data. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dari para pembaca agar menjadi masukan untuk penulisan-penulisan selanjutnya. Semoga tesis ini bermanfaat bagi para pembaca.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Depok, Juli 2009

Penulis



ABSTRAK

Nama : Dimitri Rulianto
Program Studi: Pascasarjana Bidang Ilmu Teknik
Judul : Analisis Karakteristik Stabilitas Nyala Api Difusi Pada Fenomena *Lifted Flame* Dengan Variasi Pemanasan Awal Bahan Bakar LPG Menggunakan *Bunsen Burner*

Telah dilakukan penelitian terhadap karakteristik stabilitas nyala api difusi, apabila bahan bakar gas LPG dipanaskan terlebih dahulu sebelum dibakar didalam burner. Secara teori dengan meningkatkan temperatur *un-burn* suatu bahan bakar, maka dapat menyebabkan laju reaksi menjadi lebih cepat, kecepatan pembakaran menjadi lebih cepat, energi minimum menjadi lebih rendah dan *starting point* menjadi lebih rendah. Pada penelitian ini akan dilakukan pendekatan dengan mencari stabilitas nyala api difusi melalui panjang nyala api dan jarak *lifted flame* yang terjadi akibat proses pemanasan bahan bakar gas LPG. Hasil yang dapat diperoleh adalah temperature bahan bakar gas LPG yang dapat dicapai setelah dipanaskan adalah 37,5 °C, 38,8 °C, 39,8 °C, 43,1 °C dan 46,6 °C. *Lifted flame* terjadi lebih awal dan panjang nyala api berkurang dengan meningkatnya temperature bahan bakar gas LPG. Stabilitas nyala api difusi terjadi saat bahan bakar gas LPG dipanaskan pada temperatur 80 °C dan 90 °C.

Kata kunci: *Lifted Flame*, panjang nyala api difusi, kecepatan pembakaran, pemanasan, temperatur *un-burn*

ABSTRACT

Name : Dimitri Rulianto
Study Program: Master of Engineering
Title : Analysis of Diffusion Flame Stability Characteristics
on Lifted Flame Phenomenon with the Preheated
LPG Variation Temperature Using Bunsen Burner

This research is about the characteristic of the diffusion flame stability when LPG gases are being preheated before it burns in the burner. Theoretically by rising unburned temperature of a certain fuel can cause higher rate of reaction, higher burning velocity, lower minimum energy and lower starting point. This research will be approached on burning velocity by length of flame and length of lifted flame which occur because of heating LPG fuel gas. The result show that LPG fuel gases burning temperature after heating could be reached 37,5 °C; 38,8 °C; 39,8 °C; 43,1 °C; 46,6 °C. Lifted flame will occur earlier and length of flame will decrease equal to increasingly LPG fuel gas temperature. The diffusion flame stability will occur when the LPG fuel gases are being preheated at temperature 80 °C and 90 °C.

Keywords: Lifted flame, length of diffusion flame, burning velocity, preheat, unburned temperature

DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	ii
PERNYATAAN PUBLIKASI	iii
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	iv
PENGESAHAN	v
UCAPAN TERIMA KASIH	vi
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Manfaat Penelitian	4
1.4 Rumusan Masalah	5
1.5 Batasan Masalah	5
1.6 Metodologi Penelitian	6
1.7 Sistematik Penulisan	8
BAB II LANDASAN TEORI	9
2.1 Proses Pembakaran	9
2.2 Reaksi dan Proses Pembakaran	11
2.3 Beban Pembakaran (<i>Burning Load</i>)	14
2.4 Panjang Nyala Api Difusi	14
2.5 <i>Lifted Flame</i>	15

	Halaman
2.6 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Karakteristik Nyala	17
2.6.1 Penyalaan (Ignition) dan Kemampunyalaan (Flamability)	18
2.7 Nyala Api (<i>Flame</i>)	20
2.7.1 Nyala Api Difusi	20
2.7.2 Nyala Api Difusi Jet-Turbulen	26
2.8 Analisis Kecepatan dan <i>Reynolds Number</i>	
Campuran Udara- Bahan Bakar	28
2.9 <i>Profile</i> Temperatur	29
2.10 Kecepatan Pembakaran (<i>Burning Velocity</i>)	32
2.10.1 Kecepatan Pembakaran Laminar	32
2.10.2 Kecepatan Pembakaran Turbulen	33
2.11 <i>Blow-off</i>	35
2.12 Fenomena <i>Flashback</i>	36
BAB III METODE PENELITIAN	37
3.1 Peralatan Penelitian yang Digunakan	37
3.1.1 Peralatan Utama	37
3.1.2 Peralatan Pendukung	39
3.2 Skema dan Proses Penelitian	40
3.2.1 Penelitian Tanpa Pemanasan	40
3.2.2 Penelitian Dengan Pemanasan	42
3.3 Penyetaraan Skala <i>Flowmeter</i>	44
3.3.1 Langkah-langkah Penyetaraan Skala <i>Flowmeter</i>	44
3.3.2 Hasil Penyetaraan Skala <i>Flowmeter</i> Bahan Bakar (<i>Rotameter</i>)	45
3.4 Penyetaraan Alat Ukur Temperatur	47
3.4.1 Langkah-langkah Penyetaraan Alat Ukur Temperatur	47
3.4.2 Hasil Penyetaraan	48
3.5 Kondisi Lingkungan	51

	Halaman
BAB IV HASIL DAN ANALISA	52
4.1 Stoikiometri Pembakaran	52
4.2 Viskositas gas LPG Campuran	53
4.3 Reynold Number Gas LPG pada Ujung Nozel	54
4.4 Beban Pembakaran (<i>Burning Load</i>)	55
4.5 Analisa Tinggi Lifted Flame, Panjang Nyala Api Dan Tinggi Nyala Api	57
4.5.1 Tinggi Lifted Flame	61
4.5.2 Panjang Nyala Api	62
4.5.3 Tinggi Nyala Api	63
4.6 Analisa Gambar Hasil Capture Kamera Video Digital	64
4.6.1 Tanpa pemanasan	64
4.6.2 Dengan pemanasan	65
4.7 Temperatur Non Dimensional (T^*)	66
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	73
5.1 KESIMPULAN	73
5.2 SARAN	74
DAFTAR ACUAN	75
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN	78

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 <i>Flowchart</i> metodologi penelitian	6
Gambar 2.1 Ilustrasi jarak yang dibutuhkan antar molekul agar terjadi tumbukan	12
Gambar 2.2 Nyala api difusi	15
Gambar 2.3 Sebaran bahan bakar keluar mulut burner	16
Gambar 2.4 Ignition range (a) dalam T_C-X_A dan (b) dalam P_C-X_A	19
Gambar 2.5 Flammability limit dalam persen bahan bakar	20
Gambar 2.6 <i>Over-ventilated</i> dan <i>Under-Ventilated</i> pada nyala api difusi	21
Gambar 2.7 Tipe-tipe nyala api difusi	22
Gambar 2.8 Perubahan bentuk api terhadap kecepatan <i>Nozzle</i>	24
Gambar 2.9 Diagram komposisi nyala api difusi dengan bahan bakar	25
Gambar 2.10 Diagram profil konsentrasi pada nyala api difusi tipe laminar	26
Gambar 2.11 Diagram stabilitas dan <i>lifted flame</i> pada nyala api difusi	26
Gambar 2.12 Grafik fungsi probabilitas massa jenis pada jarak radial tertentu. (a). Grafik pdf. (b). Grafik profil temperatur pada posisi tertentu.	28
Gambar 2.13 <i>Profile</i> temperature dan konsentrasi aliran bahan bakar	29
Gambar 2.14 Prediksi ketebalan <i>preheat zone</i> berdasarkan <i>profile</i> temperatur	31
Gambar 2.15 <i>Profile</i> temperature <i>propane</i> -udara	32
Gambar 2.16. Efek <i>Reynolds number</i> terhadap kecepatan pembakaran	34
Gambar 2.17 <i>Flame front conical</i>	34
Gambar 2.18 Diagram stabilitas <i>flashback</i> , <i>lift-off</i> , dan <i>yellow tipping</i> untuk bahan bakar gas industri	36
Gambar 3.1 Gambar penampang nosel	38
Gambar 3.2 Peralatan dan bahan utama yang digunakan	39

	Halaman
Gambar 3.3 Skema penelitian tanpa pemanasan	40
Gambar 3.4 Skema penelitian dengan pemanasan	42
Gambar 3.5 Prosedur penyetaraan <i>Flowmeter</i>	45
Gambar 3.6 Grafik Penyetaraan Laju Aliran Udara Terhadap <i>Rotameter</i>	46
Gambar 3.7 Grafik penyetaraan <i>thermocouple 1</i>	49
Gambar 3.8 Grafik penyetaraan <i>thermocouple 2</i>	49
Gambar 3.9 Grafik penyetaraan <i>thermocouple 3</i>	50
Gambar 3.10 Grafik penyetaraan <i>thermal bath</i>	50
Gambar 4.1 Metode untuk menentukan tinggi <i>lifted flame</i> , panjang nyala api dan tinggi nyala api menggunakan software adobe photoshop 7.0	57
Gambar 4.2 Grafik penambahan <i>burning load</i> terhadap jarak <i>lifted flame</i>	61
Gambar 4.3 Grafik penambahan <i>burning load</i> terhadap panjang nyala api	63
Gambar 4.4 Grafik penambahan <i>burning load</i> terhadap tinggi nyala api	64
Gambar 4.5 Dimensi nyala api bahan bakar gas LPG $T_{out}=33,4\text{ }^{\circ}\text{C}$	64
Gambar 4.6 Dimensi nyala api bahan bakar gas LPG $T_{out}=38,9\text{ }^{\circ}\text{C}$	65
Gambar 4.7 Dimensi nyala api bahan bakar gas LPG $T_{out}=46,6\text{ }^{\circ}\text{C}$	66
Gambar 4.8 Grafik penambahan <i>burning load (BL)</i> pada bahan bakar LPG dengan pemanasan $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ terhadap temperatur non dimensional (T^*)	69
Gambar 4.9 Grafik penambahan <i>burning load (BL)</i> terhadap temperatur non dimensional (T^*) pada LPG tanpa pemanasan dan dengan pemanasan $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Gambar 4.10 Grafik kondisi <i>burning load (BL)</i> pada saat terjadi <i>blow-off</i> terhadap <i>temperature non dimensional (T*)</i>	67

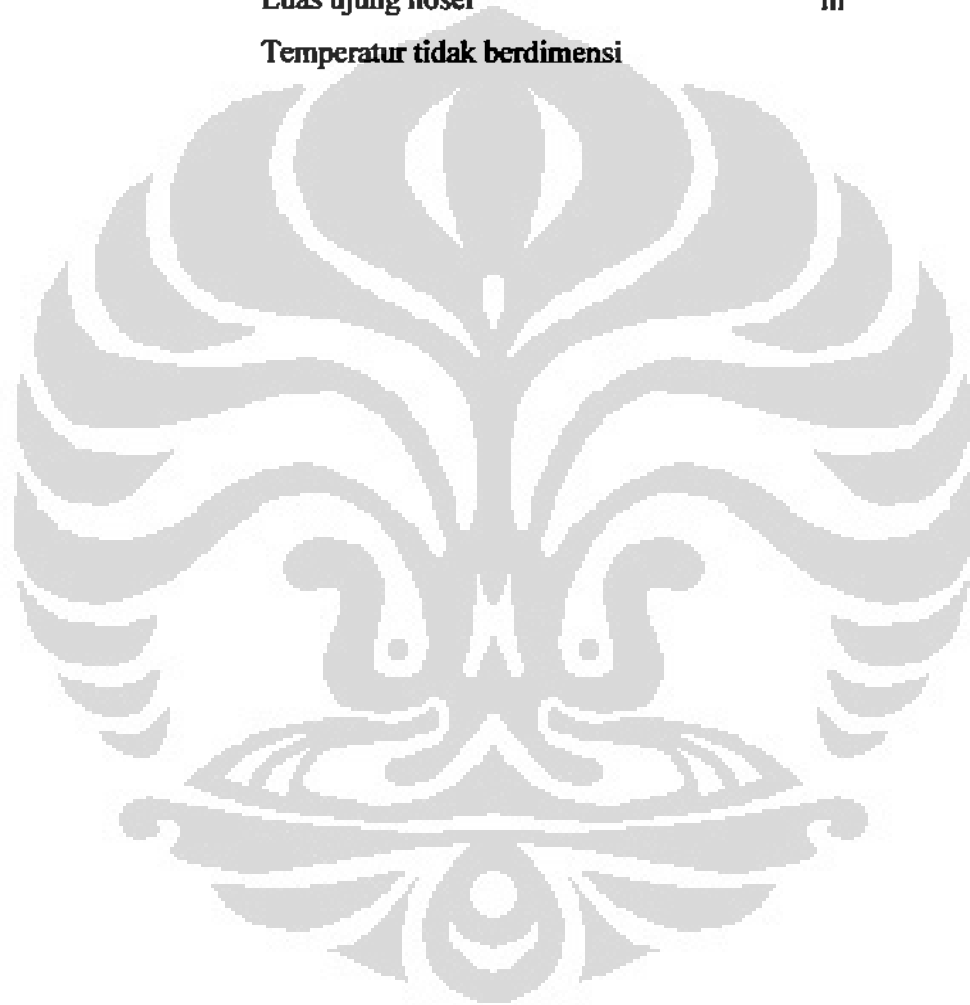
DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Batas mampu nyala	21
Tabel 3.1 Data percobaan ketinggian <i>lifted flame</i> dan panjang nyala api difusi tanpa pemanasan	41
Tabel 3.2. Data percobaan dengan pemanasan	43
Tabel 3.3 Penyetaraan pembacaan <i>rotameter</i> bahan bakar LPG	46
Tabel 3.4 Hasil penyetaraan <i>thermocouple</i> dan <i>thermal-bath</i>	48
Tabel 3.5 Kondisi lingkungan saat penelitian dilakukan	51
Table 4.1 Viskositas propane dan butane	54
Tabel 4.2 Data untuk perhitungan viskositas gas LPG campuran	54
Tabel 4.3 Reynold number ujung nozel dan burning load gas LPG pada berbagai laju aliran	56
Tabel 4.4 Data hasil pengolahan pada <i>software adobe photoshop 7.0</i>	59
Tabel 4.5 Lanjutan data hasil pengolahan pada <i>software adobe photoshop 7.0</i>	60
Tabel 4.6 Temperatur T* pada bahan bakar gas LPG pada pemanasan 100 °C	68

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 <i>Tip 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
HHV	Higher Heating Value	MJ/kg

Simbol	Keterangan	Dimensi
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
T^*	Temperatur tidak berdimensi	



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Manusia dalam memenuhi kebutuhan hidupnya melakukan kegiatan yang melibatkan proses pembakaran. Seperti memasak, pergi ke tempat kerja, merokok dan sebagainya. Proses pembakaran adalah proses reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidator dengan melibatkan pelepasan energi sebagai panas yang signifikan. Didalam industri, energi yang dihasilkan tersebut, biasanya digunakan untuk proses produksi selanjutnya. Ruang bakar tempat terjadi proses pembakaran didalam industri merupakan tempat terjadinya kendala. Selain itu kualitas bahan bakar yang digunakan juga kendala yang sering dihadapi oleh industri, sehingga dapat mengganggu proses produksi yang menyebabkan penggunaan bahan bakar yang boros dan meningkatkan biaya perawatan peralatan produksi..

Sistem pembakaran yang umum digunakan di industry dan rumah tangga adalah sistem pembakaran difusi. Meskipun proses pembakaran nyala api difusi lebih banyak diterapkan di industri-industri, namun penelitian nyala api difusi lebih sedikit mendapat perhatian untuk diteliti dibandingkan nyala api *premix* dan sampai saat ini masih banyak fenomena yang belum terungkap atau dipahami secara baik. Padahal dengan melakukan penelitian dapat diketahui efisiensi dan kualitas nyala pembakaran bahan bakar gas pada suatu peralatan pembakaran seperti burner, faktor-faktor yang mempengaruhi pembakaran dan juga tingkat keselamatan pemakaian bahan bakar gas pada peralatan tersebut.

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. Hal ini mengakibatkan bahan bakar dan udara perlu waktu untuk berdifusi hingga terjadi campuran yang siap untuk proses pembakaran.

Penelitian awal mengenai Lifted Flame dalam pembakaran difusi diteliti 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.

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.

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. [1]

Tahun 2006 Mark A. Mikofski et al 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 diatas zona reaksi.[2]

Studi numerik dan analitik tentang respons osilasi dari nyala difusi diteliti oleh Manav Tyagi dkk (2007) .[3]

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 nozel. Pada penelitian tersebut menggunakan propane dengan kemurnian 95 % sebagai bahan bakar dan kamera video untuk meng-capture fenomena yang terjadi. Hasil dari penelitian tersebut, yaitu pada nyala api difusi kondisi *liftoff* 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

Universitas Indonesia

65,4 mm, panjang nyala api difusi menjadi 410,3 mm, kecepatan pembakaran menjadi 290,64 mm/dtk dan temperatur ujung nozel dari 52,4°C menjadi 54,6°C

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 Velocity*) yang lebih cepat, energi minimum (E_m) yang lebih rendah sehingga *starting point* menjadi rendah (proses pembakaran mudah terjadi).

Tahun 2008, I Made K Dhiputra dan Yonathan di laboratorium *Thermodynamic Research Group Flame and Combustion* Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia telah melakukan penelitian pengaruh variasi bahan bakar gas LPG campuran terhadap karakteristik nyala api difusi pada burner gas tipe "Ejected Combustor". Penelitian ini menggunakan air sebagai medium kerja untuk memanaskan bahan bakar gas LPG campuran. Pembakaran dilakukan pada temperatur gas LPG Campuran tanpa pemanasan dan dengan pemanasan temperatur medium 50°C, 60°C, 70°C, dan 80°C. Karakteristik nyala api yang diteliti antara lain: tinggi *lifted flame*, panjang nyala api, tinggi nyala api, ketebalan preheat zone. Dari penelitian tersebut diperoleh hasil bahwa tinggi *lifted flame* sebanding dengan temperatur pemanasan, semakin tinggi temperatur *un-burn* gas, maka semakin pendek panjang nyala api dan tinggi nyala api yang terjadi, ketebalan preheat zone akan

Universitas Indonesia

semakin kecil dengan temperatur *un-burn* yang semakin tinggi. Pada penelitian tersebut, aliran bahan bakar gas LPG dialirkan secara bertahap sehingga tidak dapat diketahui posisi secara pasti mulai terjadinya fenomena *lifted flame* pada proses pembakaran. Hal ini perlu diketahui, karena posisi awal terjadinya fenomena *lifted flame* merupakan salah satu indikator yang dapat digunakan untuk membuktikan teori seperti disebut diatas .

Sehingga pada tahun 2009 ini dilakukan penelitian lanjutan yaitu Analisis Karakteristik Stabilitas Nyala Api Difusi Pada Fenomena *Lifted Flame* Dengan Variasi Pemanasan Awal Bahan Bakar LPG Mempergunakan *Bunsen Burner*. Penelitian tersebut bertujuan menganalisis karakteristik stabilitas nyala api difusi pada fenomena *lifted flame* bila bahan bakar yang digunakan dipanaskan lebih dahulu dan bagaimana pengaruh laju aliran bahan bakar yang dinaikkan secara terus menerus terhadap kondisi *lifted flame* , panjang nyala api, tinggi nyala api difusi dan *blow-off*. Pada penelitian ini bahan bakar yang digunakan adalah LPG dan kamera video digital untuk meng-*capture* fenomena yang terjadi

Gambar hasil *capture* menggunakan kamera video, diolah menggunakan *software adobe premiere, ulead videostudio 11 dan adobe photoshop*.

1.2. TUJUAN PENELITIAN

Pada penelitian ini, memiliki tujuan untuk mengetahui pengaruh variasi pemanasan bahan bakar LPG terhadap karakteristik stabilitas nyala api difusi pada fenomena *lifted flame* yang meliputi kondisi *lifted flame* , panjang nyala api, tinggi nyala api difusi dan *blow-off*.

1.3. MANFAAT PENELITIAN

Dengan melakukan penelitian ini diharapkan dapat:

1. Diketahui pengaruh perubahan panjang nyala api terhadap burning load pembakaran
2. Dapat meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem pembakaran
3. Sebagai dasar perancangan sistem ruang bakar

Universitas Indonesia

1.4. RUMUSAN MASALAH

Pada penelitian terdahulu penambahan laju aliran bahan bakar LPG ditambahkan secara bertahap sehingga ada jeda antara penambahan laju aliran bahan bakar pada step pertama dengan step kedua dan seterusnya. Padahal pada aplikasinya di rumah tangga maupun industri, peningkatan laju aliran bahan bakar dilakukan secara continue. Hal ini menyebabkan ada sebagian fenomena pada nyala api difusi yang terjadi tidak teramati dan data pengaruh penambahan laju aliran bahan bakar terhadap panjang nyala api difusi menjadi kurang lengkap. Selain itu adakalanya kualitas bahan bakar gas yang keluar dari ujung burner, tidak mudah terbakar pada saat dinyalakan. Oleh karena itu, pada penelitian ini, bahan bakar dipanaskan terlebih dahulu di dalam media pemanas dengan variasi pemanasan sebesar 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C dan 100 °C dan penambahan laju aliran bahan bakar LPG ditambahkan secara terus menerus dari mulai penyalaan sampai terjadi blow-off sehingga diharapkan dapat dianalisis karakteristik stabilitas nyala api difusi pada fenomena lifted flame dan data (laju aliran bahan bakar, panjang nyala api difusi, tinggi lifted flame, tinggi nyala api dan burning load) yang diperoleh dapat lebih lengkap dibandingkan dengan penelitian terdahulu.

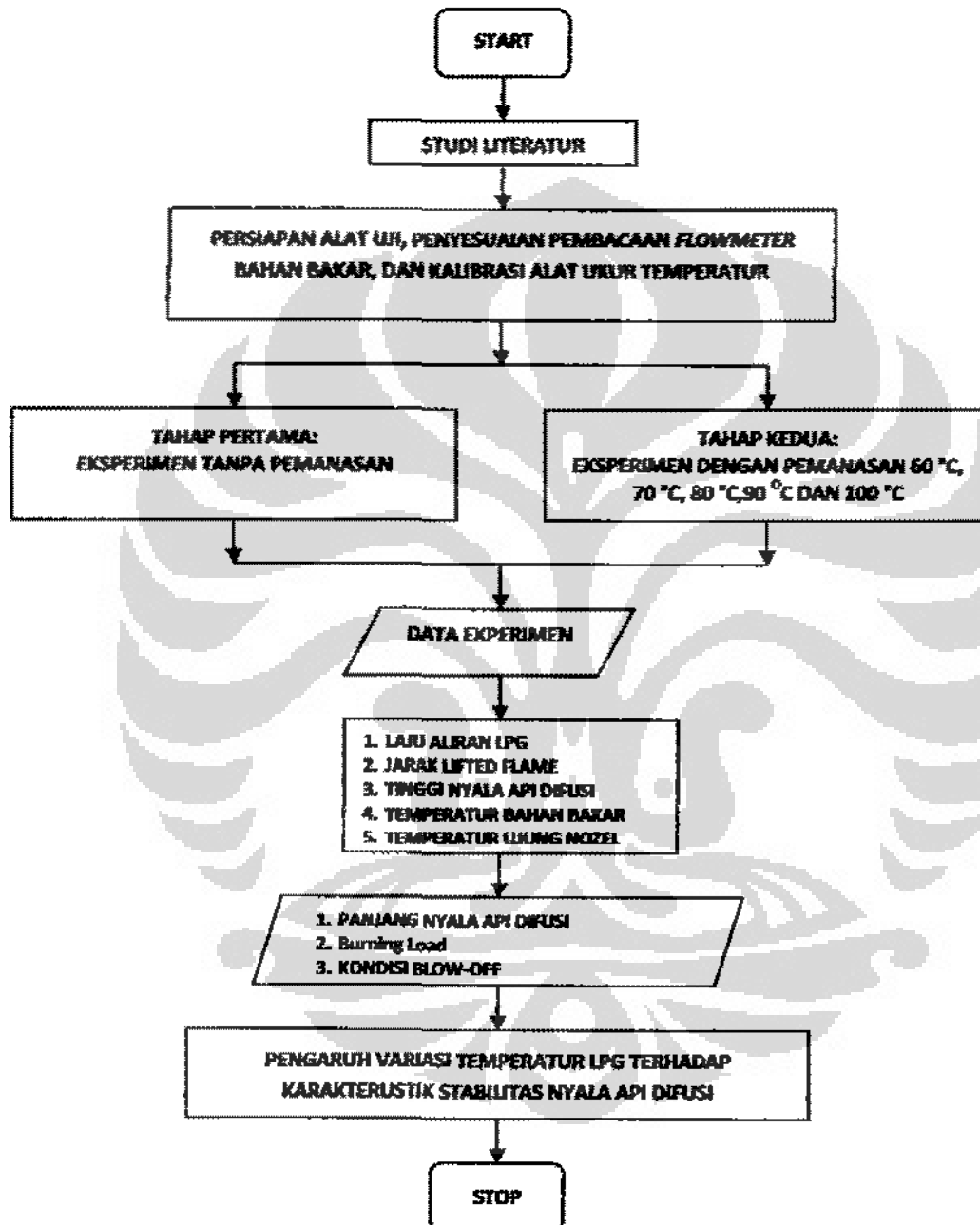
1.5. BATASAN MASALAH

Batasan masalah pada penelitian adalah sebagai berikut :

1. Alat ukur laju aliran bahan bakar menggunakan flowmeter Flame Propagation and Stability Unit P.A Hilton LTD.
2. Nyala api difusi di-capture menggunakan kamera video 25 fps
3. Bahan bakar yang digunakan adalah gas LPG yang dijual dipasaran
4. Komponen yang diamati fenomena lifted flame dan blow-off meliputi tinggi nyala api, tinggi lifted flame, panjang nyala api dan temperature pemanasan
5. Tidak membahas emisi gas buang

1.6. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang dilakukan adalah :



Gambar 1.1 *Flowchart* metodologi penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian (gambar 1.1), yaitu :

1. Pertama sekali dilakukan studi literatur.
2. Kemudian dilakukan penyetaraan pembacaan alat ukur *flowmeter* bahan bakar (*rotameter*) menggunakan *wet gas meter* dan penyetaraan pembacaan *termocouple* menggunakan termometer standart
3. Selanjutnya dilakukan eksperimen tanpa pemanasan dan eksperimen dengan pemanasan. Kedua eksperimen tersebut memiliki perbedaan pada seting peralatan yang digunakan
4. Sebelum dilaksanakan setiap eksperimen, semua peralatan telah terpasang, dilakukan pengecekan kembali untuk memastikan tidak terjadi kebocoran bahan bakar
5. Dari masing-masing eksperimen, data-data yang dibutuhkan dicatat dan setiap perubahan laju aliran bahan bakar yang ditunjukkan oleh *flowmeter* (*rotameter*) serta nyala api di-*capture* dengan kamera video digital secara bersamaan.
6. Setelah itu, data-data hasil penelitian diolah sehingga diperoleh: jarak *lifted flame*, panjang nyala api, tinggi nyala api, temperatur gas LPG sebelum pembakaran, temperatur ujung nozel.
7. Selanjutnya data – data yang diperoleh, dianalisa guna mendapatkan:
 - a) Pengaruh laju aliran bahan bakar gas LPG campuran dan diameter nozel terhadap karakteristik nyala api.
 - b) Pengaruh *Reynold number* bahan bakar gas LPG Campuran terhadap jarak *lifted flame*, panjang dan tinggi nyala api difusi serta temperatur ujung nozel pada berbagai variasi temperatur gas LPG.
 - c) Pengaruh perubahan karakteristik nyala api terhadap kecepatan pembakaran dan kondisi blow-off
8. Kesimpulan yang didapat adalah mengenai pengaruh variasi temperatur bahan bakar gas LPG terhadap karakteristik nyala-api-difusi-nya

1.7. SISTEMATIK PENULISAN

Sistematika penulisan sebagai berikut :

1. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisikan pembahasan yang meliputi: 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

Bab ini berisikan pembahasan yang meliputi: 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

Bab ini berisikan pembahasan yang meliputi: skema penelitian, prosedur penelitian, data kalibrasi peralatan dan data penelitian.

4. BAB IV ANALISIS HASIL PENELITIAN

Bab ini berisikan pembahasan yang meliputi: analisis data – data yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan

5. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan kesimpulan dari penelitian serta saran-saran yang bertujuan untuk kemajuan penelitian di masa mendatang.

BAB II LANDASAN TEORI

2.1. Proses Pembakaran

Proses pembakaran dapat terjadi jika terdapat tiga komponen utama yang bereaksi dan atau terjadi kesetimbangan yaitu bahan bakar (baik bahan bakar padat, cair maupun gas), oksidan (oksigen) dan sumber penyalaan (panas, percikan api dan lainnya).

Menurut *Oxford Concise Dictionary*, pembakaran adalah konsumsi oleh api; pembentukan nyala dan panas melalui kombinasi kimia. Menurut *Webster's Dictionary*, pembakaran merupakan laju oksidasi yang sangat cepat yang menghasilkan panas atau panas dan cahaya. Secara umum, pembakaran dapat didefinisikan sebagai proses reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidator dengan pelepasan sejumlah energi sebagai panas yang signifikan.

Dalam suatu pembakaran terbentuk kobaran api (*flare*). Jika pembakaran terjadi dengan sangat cepat dalam kisaran kecepatan *supersonic*, kobaran api ini disebut *detonation wave*. Dan jika kecepatan pembakaran berada dalam jangkauan *subsonic*, maka terjadi gelombang *deflagration* (*deflagration wave*). Nyala api termasuk ke dalam bentuk *deflagration wave* dimana nyala api yang terbentuk dipicu oleh kalor yang dilepaskan dari reaksi kimia dan merambat dalam suatu ruang rambat.

Ruang rambatan nyala api adalah suatu hasil dari penggabungan antara reaksi kimia, proses transportasi difusi massa, dan konduksi panas. Reaksi kimia suatu pembakaran berlangsung sempurna jika bahan bakar dan oksidator berada dalam konsentrasi tertentu yang dikenal dengan istilah stoikiometri

Dari tiga jenis bahan bakar yang biasa digunakan pada proses pembakaran bahan bakar gas mempunyai beberapa keuntungan, yaitu 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

1. Gas alam

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 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

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 BBG buatan meliputi *Liquified Petroleum Gas* (LPG) dan *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*) merupakan senyawa hidrokarbon dengan komposisi utama propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}). LPG diproduksi dari kilang minyak dan atau dari kilang gas yaitu 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 fraksinasi, *nafta reforming*, *thermal/catalytic cracking*. LPG dipasarkan di seluruh dunia dengan beberapa nama antara lain LPG, GPL (*gas petroleum liquefied*), *autogas*, butana komersial, propana komersial,

Universitas Indonesia

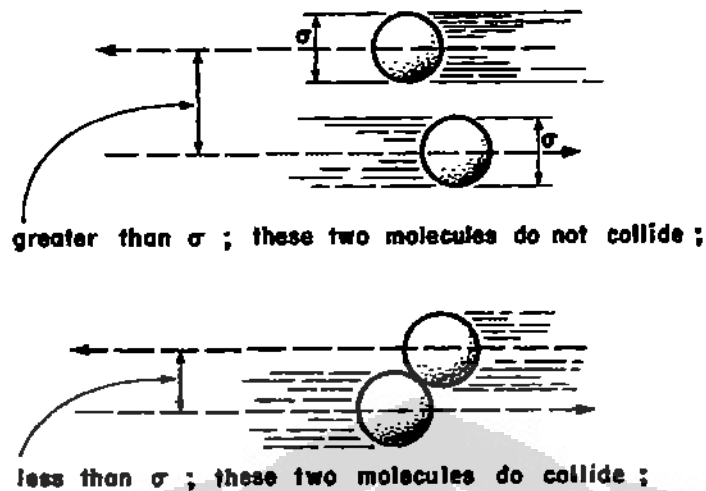
LPG campuran dan lain-lain. Di Indonesia, LPG yang diproduksi dan dipasarkan oleh PERTAMINA menggunakan nama dagang **Elpiji**, untuk jenis LPG campuran yang dijual ke rumah tangga dan industri, memiliki komposisi sekitar 60% propana dan 40% butana. Adapun spesifikasi dari Elpiji campuran yang digunakan di Indonesia diatur berdasarkan Surat Keputusan Direktur Jendral Minyak dan Gas Bumi Nomor: 25/36/DDJM/1990, tanggal 14 Mei 1990

2.2 Reaksi dan Proses Pembakaran

Dalam suatu proses pembakaran terjadi reaksi kimia dan transfer molekular. Studi mengenai reaksi kimia berkenaan dengan keadaan awal sistem (komposisi reaktan, temperatur, dan tekanan), keadaan akhir sistem, perubahan sifat-sifat termodinamik, laju reaksi, dan interaksi antar molekul. Sedangkan transfer molekular berkenaan dengan perpindahan momentum, perpindahan panas (*heat transfer*), dan perpindahan massa (*species diffusion*). Dalam proses pembakaran, reaksi kimia dan transfer molekular saling terkait satu sama lain.

Teori Tumbukan Antar Molekul

Tumbukan molekular dipengaruhi oleh ukuran dari molekul tersebut. Dua buah molekul identik akan bertumbukan ketika jarak pusat kedua molekul tersebut berada dalam jarak diameter molekular yang bersangkutan (σ). Dan sebaliknya jika jarak kedua pusat tersebut lebih besar dari σ , kedua molekul tersebut tidak akan bertumbukan. Semakin besar nilai σ , semakin besar kemungkinan bahwa kedua molekul tersebut akan bertumbukan. Ilustrasi ini ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Ilustrasi Jarak yang Dibutuhkan Antar Molekul Agar Terjadi Tumbukan

Sumber: Kuo, 1986, hal. 113.

Frekuensi tumbukan total ditentukan sebagai berikut.

$$Z = \sigma_{AB}^2 \left(\frac{8\pi kT}{\mu} \right)^{1/2} C_A C_B \quad (2.1)$$

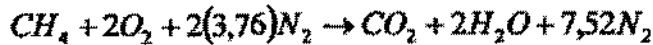
Laju Reaksi

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

Laju reaksi didefinisikan sebagai laju pengurangan konsentrasi zat pereaksi atau laju konsumsi zat pereaksi. Laju reaksi dapat juga didefinisikan sebagai laju pertambahan konsentrasi zat produk. Sehingga satuan dari laju reaksi adalah mol per satuan volume per satuan waktu.

Suatu proses pembakaran biasanya diartikan sebagai proses oksigen *exothermic*. Oksigen didalam udara bereaksi dengan karbon dan hidrogen yang terdapat dalam bahan bakar untuk membentuk karbon monoksida, karbon dioksida

dan uap air. Sebagai contoh pembakaran methana dengan udara stokiometri, dengan reaksi sebagai berikut[4]:

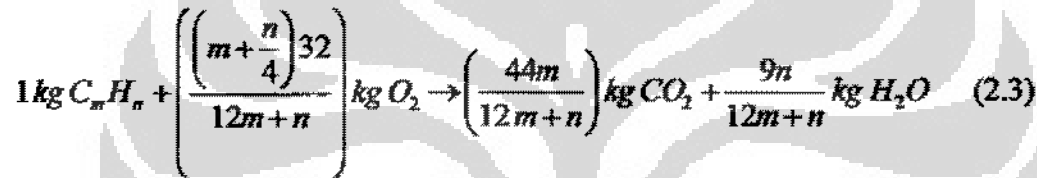


Untuk mengetahui kebutuhan oksigen pembakaran stokiometri karbon dan hidrogen murni C_mH_n , dapat dihitung dengan metode mol dan metode kesetimbangan massa, sebagai berikut :

Metode mol :



Metode Kesetimbangan massa :



Hubungan antara bahan bakar dan udara biasanya diberikan dalam istilah *ratio* udara-bahan bakar (AFR) atau bahan bakar-udara (FAR). *Ratio* udara-bahan bakar mengacu pada suplai massa udara per unit massa bahan bakar, sedangkan *ratio* bahan bakar-udara mengacu pada suplai massa bahan bakar per unit massa udara atau :

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

Dan

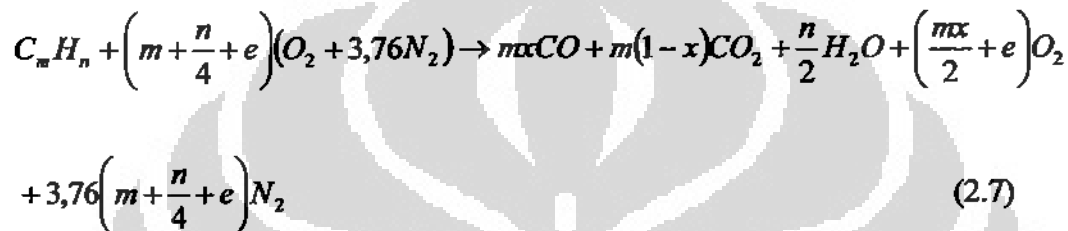
$$FAR = \frac{m_f}{m_a} = \frac{M_f N_f}{M_a N_a} \quad (2.5)$$

Selain itu ada metode Rasio ekivalen (Φ) didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual atau juga sebagai perbandingan antara rasio bahan bakar-udara (FAR) aktual dengan rasio bahan bakar-udara (FAR) stoikiometrik.

$$\Phi = \frac{AFR_s}{AFR_a} = \frac{FAR_a}{FAR_s} \quad (2.6)$$

- $\Phi > 1$ 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)

Dalam proses pembakaran aktual, kita harus mempunyai e mole *excess air* per mole $C_m H_n$, maka kebutuhan udara :



2.3. Beban Pembakaran (*Burning Load*)

Beban pembakaran didefinisikan sebagai perbandingan antara laju aliran gas yang dikalikan nilai kalornya dengan luas penampang tabung pembakar (*barrel*) [5]:

$$Burning\ Load(BL) = \frac{V_g \times LHV}{A_{barrel}} \quad (2.8)$$

Di mana :

- V_g = laju aliran gas (m^3/s)
- LHV = lower heating value (J/m^3)
- A_{barrel} = luas penampang barrel (m^2)

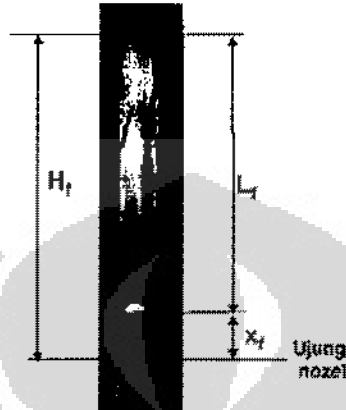
2.4. Panjang Nyala Api Difusi

Panjang nyala api difusi merupakan selisih dari tinggi nyala api difusi dengan jarak *lifted flame*, seperti ditunjukkan persamaan dibawah ini.

$$\bar{L}_f = \bar{H}_f - x_f \quad (2.9)$$

Panjang nyala api difusi merupakan daerah reaksi (*reaction zone*) antara bahan bakar dan udara, dipengaruhi oleh : *burning load*, *lifted flame*, tinggi nyala api

difusi dan pola aliran bahan bakar-udara. Panjang nyala api difusi mempengaruhi profile temperatur *preheat zone* dan *reaction zone* dan kecepatan pembakaran (*burning velocity*)



Gambar 2.2 Nyala api difusi

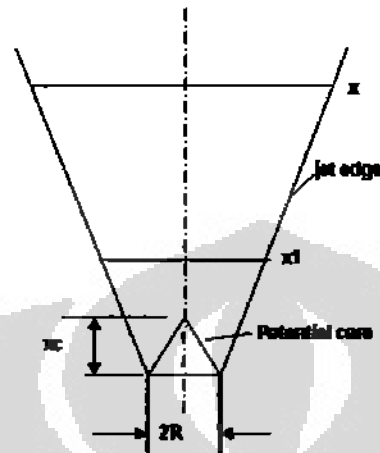
2.5. *Lifted Flame*

Proses terangkatnya pangkal nyala api difusi dikenal dengan istilah fenomena *lifted flame*. Fenomena 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[6]

(*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 $\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{S_L}{V_*}\right)$ dan ujung nyala bergeser sedikit ke bawah.

Laju 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/nozel 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 2.3.



Gambar 2.3 Sebaran bahan bakar keluar mulut burner

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 :

$$v_x(r < R, 0) = v_e \quad (2.10)$$

$$v_x(r > R, 0) = 0 \quad (2.11)$$

Sedangkan fraksi massa bahan bakar terhadap udara dapat dinyatakan sebagai :

$$Y_F(r \leq R, 0) = 1 \quad (2.12)$$

$$Y_F(r > R, 0) = 0 \quad (2.13)$$

Sehingga distribusi kecepatan axial dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{v_x}{v_e} = 0.375(\rho_e v_e R / \mu)(x / R)^{-1} [1 + \xi^2 / 4]^{-2} \quad (2.14)$$

Dimana :

$$\xi = \left(\frac{3\rho_e J_e}{16\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{\mu} \frac{r}{x} \quad (2.15)$$

Momentum fluida pada mulut burner :

$$J_e = \rho_e v_e^2 \pi R^2 \quad (2.16)$$

Jika Reynolds number dinyatakan sebagai :

$$Re_j = \rho_e v_e R / \mu \quad (2.17)$$

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 :

$$Y_F = \frac{3}{8\pi} \frac{Q_F}{Dx} \left[1 + \frac{\xi^2}{4} \right]^{-2} \quad (2.18)$$

Dimana

$$Q_f = v_e \pi R^2, \text{ merupakan laju volumetrik bahan bakar}$$

Maka Fraksi bahan bakar dalam campuran dapat dinyatakan sebagai :

$$Y_F = 0.375 Re_j (x/R)^{-1} \left[1 + \xi^2 / 4 \right]^{-2} \quad (2.19)$$

Kemudian didapat jarak lifted flame yang terbentuk :

$$x = \frac{0,375 \cdot Re \cdot R}{Y \cdot \left(1 + \frac{\xi^2}{4} \right)^2} \quad (2.20)$$

Fraksi massa bahan bakar sepanjang sumbu dinyatakan sebagai :

$$Y_{F,0} = 0.375 Re_j (x/R)^{-1} \quad (2.21)$$

Persamaan ini berlaku untuk $x > 0$.

2.6. 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 *inert* dan struktur hidrokarbon.

2.6.1 Penyalaan (Ignition) dan Kemampunyaalaan (*Flamability*)

Penyalaan (*ignition*) adalah suatu perubahan dari keadaan nonreaktif ke keadaan reaktif yang disebabkan oleh rangsangan awal hingga terjadi pembakaran. Dalam proses pembakaran di mana terjadi dengan cepat, pertama kali terjadi pemanasan campuran (mampu bakar). Laju kalor (*heat*) yang terbangkitkan dari pemanasan tersebut lebih besar dari laju kalor yang hilang (*heat loss*) sehingga kelebihan kalor ini menyebabkan kenaikan temperatur campuran yang mengakibatkan laju reaksi yang lebih besar. Kenaikan temperatur terjadi secara berkesinambungan hingga kenaikan energi kalor yang tinggi tercapai. Pada keadaan ini penyalaan (*ignition*) terjadi.

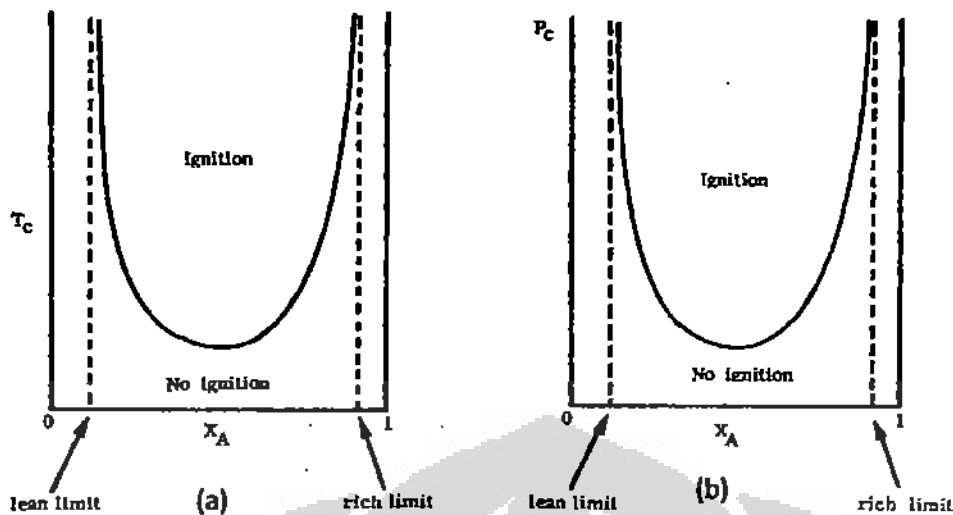
Waktu yang diperlukan dari pemanasan awal hingga terjadi *ignition* dirumuskan oleh persamaan berikut:

$$t_i = \frac{\rho C T_0}{(m-1) \Delta H k_n C_{AO}^n T_0^m} \quad (2.22)$$

dan *ignition range* dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\ln\left(\frac{P_c}{T_c^2}\right) = \ln\left(\frac{hSR^3}{\Delta H V k_2 X_A^2 E}\right)^{1/2} + \frac{E}{2RT_c} \quad (2.23)$$

Ignition range ditunjukkan pada gambar berikut.

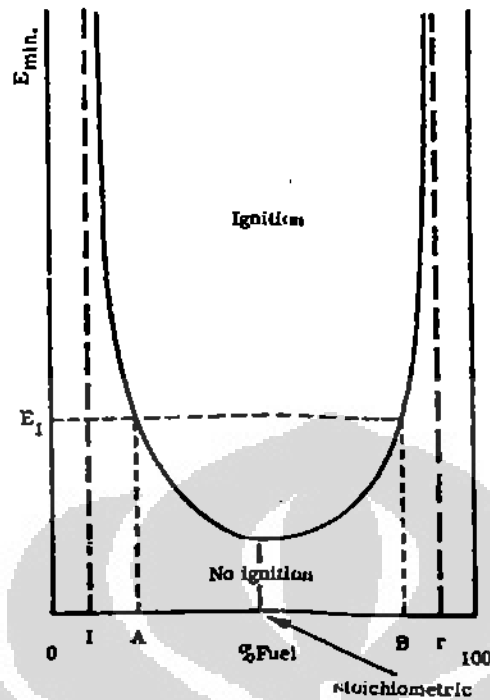


Gambar 2.4. Ignition Range (a) dalam T_c - x_A dan (b) dalam P_c - x_A

Sumber: Kanury, 1975, hal. 103.

Nyala api terjadi pada konsentrasi tertentu dari bahan bakar dan oksidator. Batas kemampunyaalaan (*flammability limit*) ini dinyatakan dalam persen konsentrasi bahan bakar dalam oksidator. Batas-batas daerah ini terdiri atas batas bawah dan batas atas yang ditunjukkan pada gambar 2.4.

Pada konsentrasi rendah, walaupun memungkinkan terjadinya penyalaan lokal, energi yang disediakan tidak cukup untuk memanaskan lapisan gas didekatnya ke temperatur nyala. Seiring denagn naiknya tekanan parsial dari bahan bakar gas, energi juga ikut naik ke titik yang akan menyalakan bahan bakar gas di dekatnya dan menyebarkan api. Dengan naiknya tekanan parsial bahan bakar gas, kapasitas panas dari campuran udara-bahan bakar juga naik dan temperatur nyala api berkurang. Diagram *flammability limit* dalam persen bahan bakar ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Flammability Limit dalam Persen Bahan Bakar.

Sumber: Kanury, 1975, hal. 127.

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.

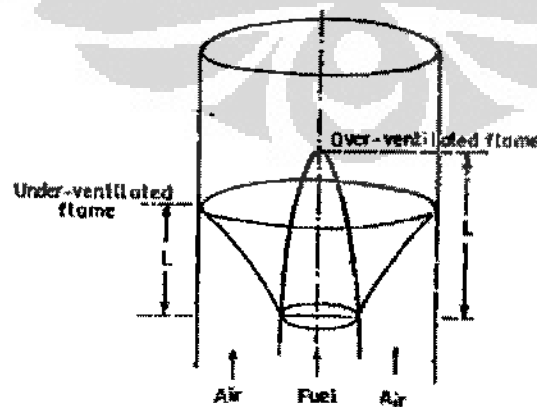
2.7.1. Nyala Api Difusi

Nyala api 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 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.

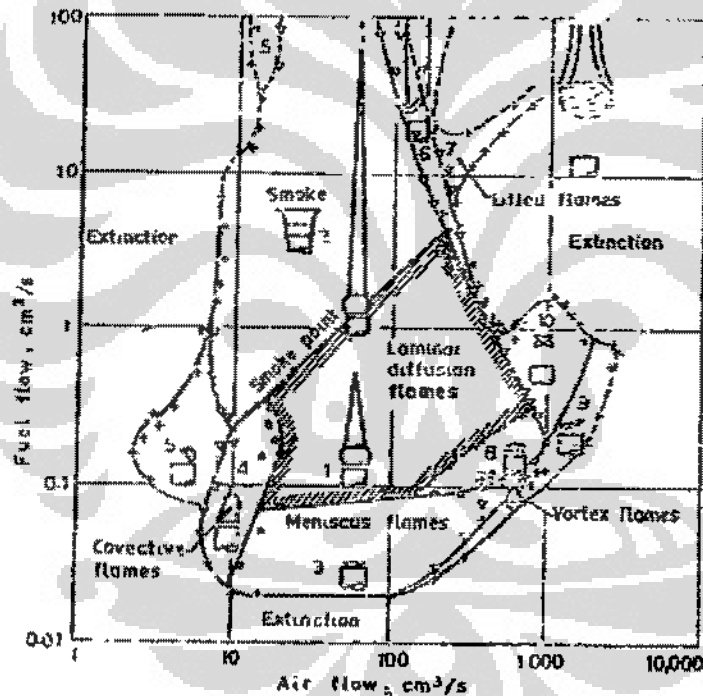
Burke dan Schumman (1928) mempelajari nyala api difusi didalam sebuah tabung dimana aliran bahan bakar dikelilingi oleh aliran udara dengan kedua aliran tersebut memiliki kecepatan yang sama. bentuk api yang terbentuk tergantung dari apakah aliran udara tersebut memiliki lebih banyak oksigen (*over-ventilated*) 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 2.6. *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.[7,8,9]

John [10] 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 2.7. 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.

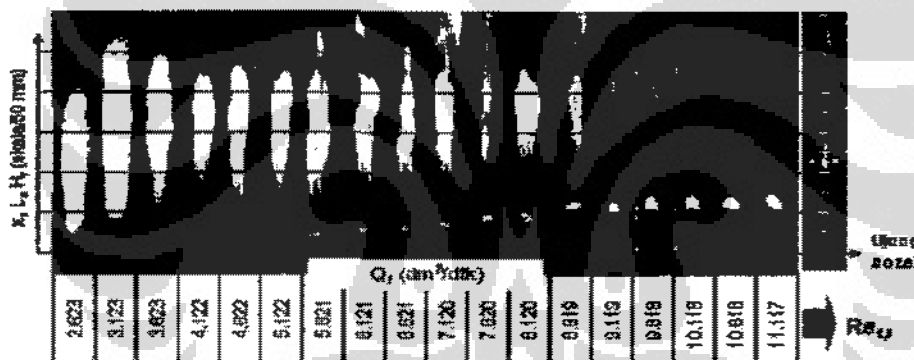
Pada saat laju aliran bahan bakar dan udara dialirkan sangat rendah, gaya konveksi menjadi cukup besar dan nyala api (*lambent*) terbentuk, kemudian posisi dari flame shifts bergerak dari satu sisi ke sisi yang lain. Di zona 4, api menjadi padam ketika salah satu sudut terangkat ketika terjadi osilasi 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 [11].

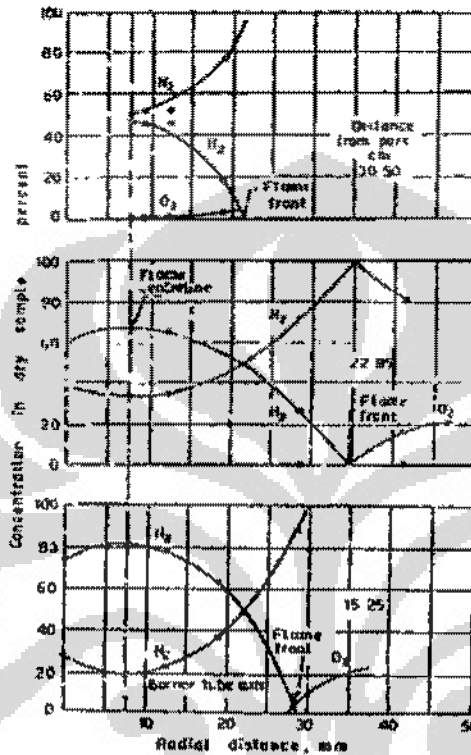
Dengan ditingkatkannya laju aliran udara, karakter dari nyala api difusi laminar berubah. Selama dalam masa transisi, ujung api menjadi turbulen sedangkan bagian bawah atau dasar api masih dalam fase laminar. Selain itu, peningkatan kecepatan aliran mengakibatkan semakin berkurangnya tinggi dari api 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 2.8. Perubahan bentuk api terhadap kecepatan *nozzle*

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*. Hasil yang mereka dapatkan untuk nyala api berbahan bakar hidrogen ditunjukkan oleh gambar dibawah ini.



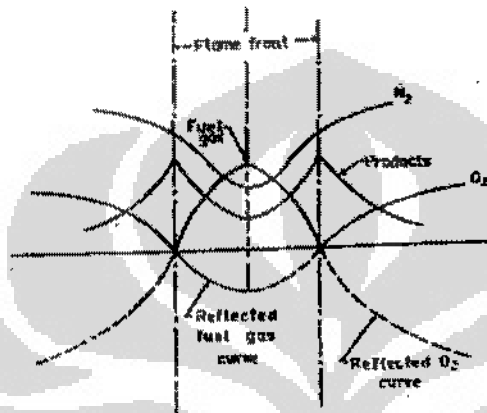
Gambar 2.9. Diagram komposisi nyala api difusi dengan bahan bakar hydrogen[12]

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.

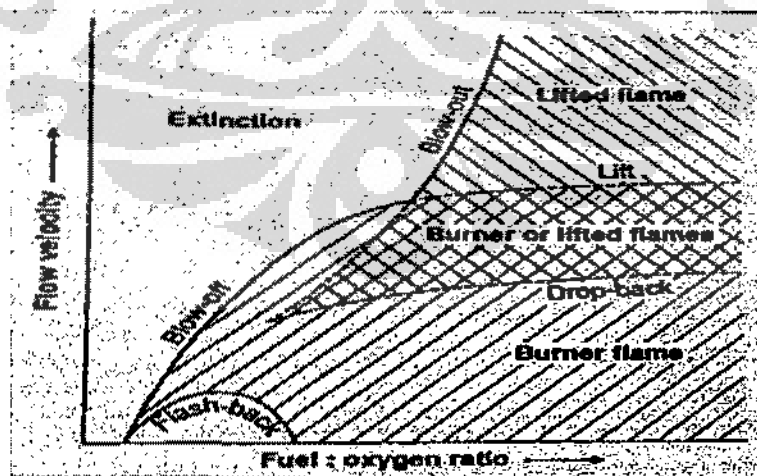
Dari hasil ini, secara umum gambar dari struktur api difusi laminar sesuai gambar di bawah ini. Gambar ini menunjukkan perubahan pada konsentrasi bahan bakar, oksigen, dan produk pembakaran. Garis pada kurva tersebut menunjukkan konsentrasi bahan bakar dan oksigen dengan bernilai negatif.



Gambar 2.10. Diagram profil konsentrasi pada nyala api difusi tipe laminar[13]

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 2.11. Diagram stabilitas dan *lifted flame* pada nyala api difusi [14]

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.

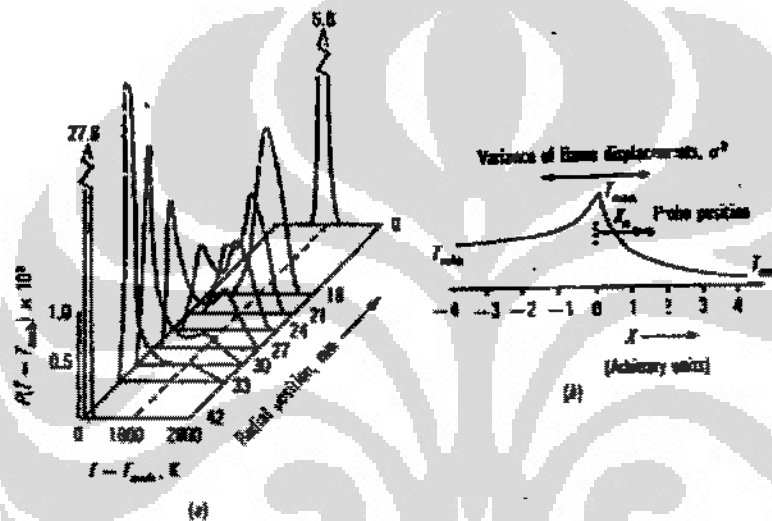
Dapat kita lihat dari gambar diatas, *lifted flame* mulai terbentuk pada daerah arsiran kedua (tengah), namun masih berada dekat dengan ujung *burner*. kemudian pada daerah ketiga (atas) ketika kecepatan aliran semakin ditingkatkan, terjadi *lifted flame* dengan jarak yang semakin menjauhi ujung *burner*. 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*. Penelitian mereka menggunakan termokopel untuk mengetahui fluktuasi temperatur pada nyala api difusi turbulen.



Gambar 2.12. Grafik fungsi probabilitas massa jenis pada jarak radial tertentu. (a). Grafik pdf. (b). Grafik profil temperatur pada posisi tertentu.[15]

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} . [16] :

$$u_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i u_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i} \quad (2.24)$$

Viskositas campuran udara-bahan bakar, ν_{mix} . oleh C.R. Wilke [17]:

Universitas Indonesia

$$v_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n \chi_i v_i}{\sum_{j=1}^n \chi_j \Phi_{ij}} \quad (2.25)$$

Dimana,

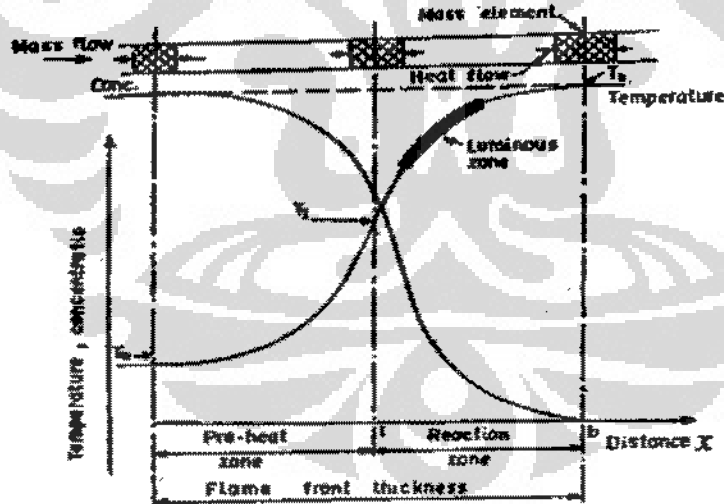
$$\Phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{v_i}{v_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2 \quad (2.26)$$

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

$$Re_{mix} = \frac{u_{mix} \cdot d_{mix}}{\nu_{mix}} \quad (2.27)$$

2.9. Profile Temperatur

B. Lewis dan G. Van Elbe (1951) [18] melakukan observasi *profile* temperatur dan aliran konsentrasi bahan bakar pembakaran nyala api difusi seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.



Gambar 2.13 *Profile* temperatur dan konsentrasi aliran bahan bakar.

Gambar 2.13. menunjukkan aliran bahan bakar melalui nozel menuju arah sumbu x positif dan menghasilkan nyala api difusi. Ditinjau suatu *mass element* bergerak dari sisi *unburned* ke sisi *burned*. T_u adalah batasan temperatur sebelum

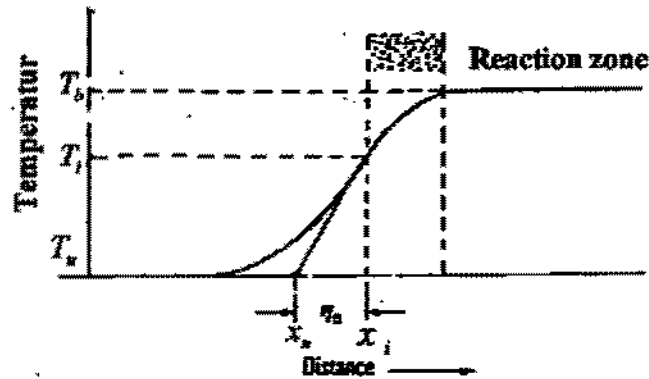
terjadinya reaksi kimia, tidak ada perpindahan panas yang disebabkan *mass element* terdahulu pada sisi *downstream*. Secara alamiah *profile* temperature selama perpindahan *mass element* sampai batasan I , naik dengan pergerakan cembung ke arah sumbu x dan kenaikan temperatur *mass element*, disebabkan konduksi dari panas *mass element* terdahulu pada *downstream*. Panas yang diberikan *mass element* pada *downstream* lebih besar dari kerugian energi akibat pendinginan *mass element* pada *upstream*. Pada daerah ini mulai terjadi reaksi kimia, sehingga kenaikan panas terjadi secara perlahan-lahan.

Oleh karena kenaikan temperatur, laju reaksi kimia juga naik. Pada temperatur T_1 , *mass element* ini menaikkan reaksi kimia pada dirinya sendiri dan kenaikan temperatur terus berlangsung oleh karena pelepasan panas dari reaksi kimia. *Profile* temperatur setelah batasan I , secara alamiah berubah dan perubahan menjadi cekung menuju sumbu x .

Luminous zone (bayangan persegi panjang) pada *profile* temperatur menunjukkan ketebalan *reaction zone*. *Reaction zone* terjadi antara temperatur awal T_u dan temperatur akhir T_b (gambar 2.11). T_u menunjukkan batasan dimana temperatur campuran mulai naik dan T_b menunjukkan batasan dimana temperatur pembakaran dicapai. T_i adalah temperatur *ignation*. Daerah antara T_u dan T_i disebut *preheat zone*, daerah antara T_i dan T_b disebut *reaction zone*.

Kenaikkan temperatur pada *preheat zone* hanya disebabkan konduksi atau panas yang diterima oleh daerah ini lebih besar dari yang diterima disekitarnya. Pada *preheat zone* tidak ada panas yang dihasilkan oleh reaksi dan konduktivitas *thermal* dan panas spesifik adalah konstan. Oleh karena itu ketebalan *preheat zone* dapat dihitung secara teori.

Berdasarkan *profile* temperatur (gambar 2.12), ketebalan *preheat zone* (η_0) dapat diprediksi menggunakan persamaan dibawah ini [19].



Gambar 2.14. Prediksi ketebalan *preheat zone* berdasarkan *profile* temperatur.

$$\eta_o = \frac{T_i - T_u}{(dT/dx)_i} \quad (2.28)$$

dan

$$\eta_o = x_i - x_u \quad (2.29)$$

Dimana;

η_o : Ketebalan *preheat zone*

(dT/dx) : *Gradient* temperatur terhadap jarak sumbu axis

x_i : Jarak T_i ke ujung nozel

x_u : Jarak T_u maksimum ke ujung nozel.

I Made Kartika dan Tri Nugroho (2008) [20] melakukan observasi terhadap *preheat zone* bahan bakar propana, diperoleh distribusi temperatur yang terjadi sepanjang daerah *preheat zone* sesuai persamaan berikut:

$$T_{pz} = -0,2051 x^3 + 45,75 x^2 - 3334,3 x + 79767 \quad (2.30)$$

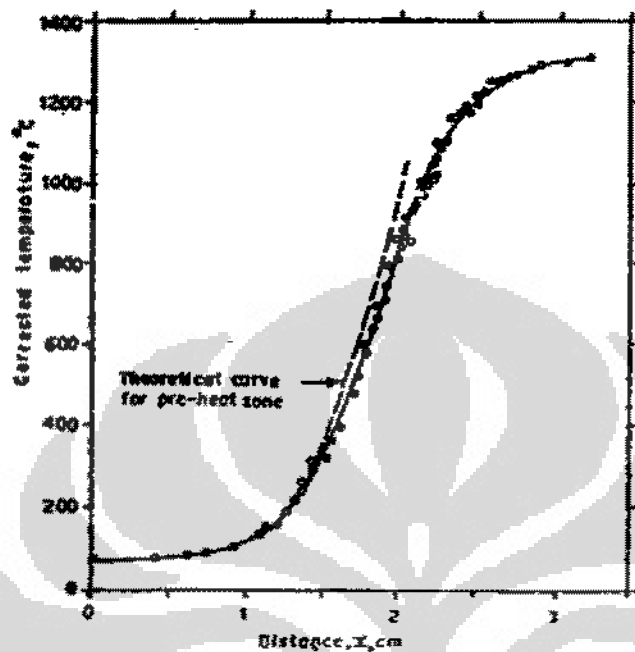
Dimana : T_{pz} = Temperatur *preheat zone*

Dan diperoleh ketebalan *preheat zone* pada temperatur nyala $T_f = 466^\circ\text{C}$ sebesar 6,13 mm.

Oleh karena density dan konduktivitas bahan bakar gas dan udara tidak terlalu besar maka ketebalan *preheat zone* sangat tergantung pada *burning velocity* dan tekanan, dan secara teori temperatur *preheat zone* naik secara eksponential.

Dizon-Lewis dan Wilson [21] menyatakan bahwa campuran methana-udara dapat bereaksi pada temperatur 1450 K s/d 2100 K, dan temperatur penyalaan 1100 K s/d 1300 K. R. Friedman, E. Burke dan J. Chem (1954) memperoleh

temperatur penyalaan untuk campuran *acetylene*-udara, *ethelene*-udara dan *propane*-udara diperoleh secara eksperimen sebesar 400°C s/d 800°C. Gambar 2.15 menunjukkan *profile* temperatur nyala api difusi *propane*-udara.



Gambar 2.15. *Profile* temperatur *propane*-udara.

2.10 Kecepatan Pembakaran (*Burning Velocity*)

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

2.10.1 Kecepatan Pembakaran Laminar

Kecepatan pembakaran laminar atau kecepatan pembakaran normal, yang didefinisikan sebagai konsumsi *volume unburned gas* per unit dibagi area *flame front*. Gouy [22] memberikan pertama sekali persamaan kecepatan linier, S_L seperti ditunjukkan persamaan dibawah ini.

$$S_L = \frac{Q_m}{A_{FF}} \quad (2.31)$$

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

$$A_{FF} = r_i \sqrt{r_i^2 + L_f^2} \quad (2.32)$$

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

$$A_{FF} = \frac{\pi A_z S}{L_f} \quad (2.33)$$

Teknik lain untuk memperkirakan kecepatan pembakaran laminar diukur berdasarkan perhitungan 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 [23]:

$$S_L = \frac{2 Q_f}{\pi r \sqrt{L_f + r^2}} \quad (2.34)$$

Faktor *error* persamaan 1.29 sebesar 15-20% dan r adalah radius *nozzle*.

Sehingga persamaan 1.29 menjadi :

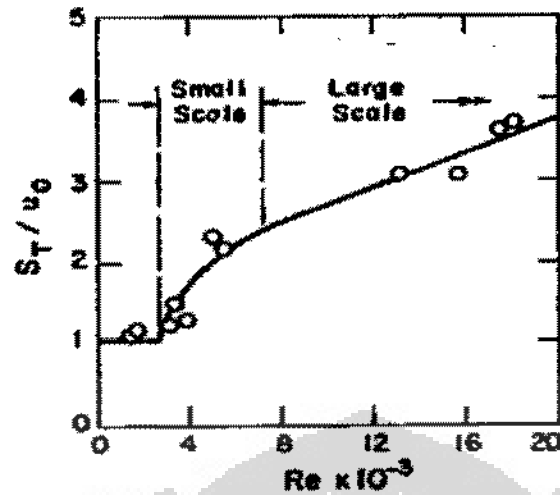
$$S_L = \frac{2 Q_f}{\pi r \sqrt{L_f + r^2}} \times 1.2 \quad (2.35)$$

2.10.2 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 [24]. *Damkohler* menyatakan bahwa kecepatan pembakaran :

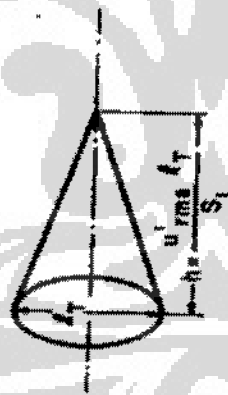
1. Independent terhadap *Reynolds number*, bila $Re \leq 2.300$.
2. Proporsional terhadap akar kwadrant *Reynolds number*, bila $2.300 \leq Re \leq 6.000$.
3. Proporsional terhadap *Reynolds number*, bila $Re \geq 6.000$.

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



Gambar 2.16 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* [25], ditunjukkan gambar 2.17.



Gambar 2.17. *Flame front conical*.

dari bentuk geometri gambar 2.17. diperoleh :

$$A_C = A_B \left(1 + \frac{4h^2}{l_T^2} \right)^{1/2} \quad (2.36)$$

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.

Universitas Indonesia

$$\bar{L}_f = u'_{rms} t = u'_{rms} \frac{l_T}{S_L} \quad (2.37)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 2.35 ke persamaan 2.32 diperoleh kecepatan pembakaran turbulen sebagai berikut :

$$S_T = S_L \left[1 + \left(\frac{2u'_{rms}}{S_L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.38)$$

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 :

$$S_T = 0,18 S_u d_d^{0,26} Re^{0,24} \quad (2.39)$$

Dari persamaan 2.37 dapat diketahui bahwa kecepatan pembakaran turbulen secara langsung proporsional terhadap kecepatan pembakaran linier [26].

2.11. *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 nosel 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

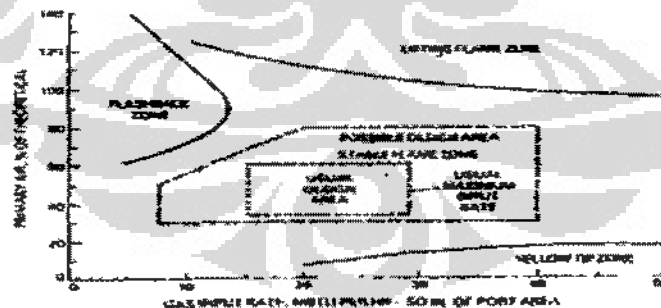
ujung burner. hal ini bertujuan untuk mengurangi penerimaan panas yang lebih besar dari api terhadap nosel sehingga penggunaannya lebih awet.

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 yang terjadi ketika aliran bahan bakar dikurangi atau ditutup. Ketika kecepatan nyala lokal melebihi kecepatan aliran lokal, perambatan nyala menjauh melalui tabung. Saat aliran bahan bakar dihentikan, nyala akan membalik atau *flashback* 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 2.18. Diagram stabilitas *flashback*, *lift-off*, dan *yellow tipping* untuk bahan bakar gas industri [27]

BAB III

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental yang dilaksanakan di laboratorium *Thermodynamic Research Group Flame & Combustion* Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia. Penelitian pengaruh variasi temperatur bahan bakar LPG Campuran terhadap karakteristik nyala-api-difusinya dilakukan dengan meneliti nyala api yang dihasilkan dari pembakaran gas LPG Campuran pada *burner* gas tipe *ejected combustor* dimana temperatur gas LPG tersebut bervariasi. Penelitian ini dilakukan dengan tahap sebagai berikut:

a) Tanpa pemanasan

Eksperimen dilakukan dengan membakar gas LPG (pada *burner*) segera setelah keluar dari tabung sehingga temperaturnya sama dengan temperatur ruangan.

b) Dengan pemanasan

Eksperimen dilakukan dengan menaikkan temperatur gas LPG keluaran tabung sebelum dilakukan pembakaran pada *burner*. Temperatur medium pemanasan yang digunakan adalah 60°C, 70°C, 80°C, 90 °C dan 100°C.

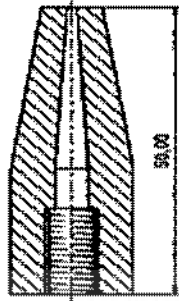
3.1. Peralatan Penelitian Yang Digunakan

3.1.1 Peralatan Utama

Peralatan utama dalam penelitian ini terdiri dari :

1. Bunsen burner yang memiliki 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 seperti gambar (3.2.a)
2. *Flame Propagation & Stability Unit P.A Hilton LTD C551*. Dilengkapi dengan flowmeter penunjuk aliran gas dalam satuan cm (*centimeter*) dan dapat dibaca langsung untuk pengambilan data dan berkapasitas 0-30 cm.

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



Gambar. 3.1. Gambar penampang nosel

4. 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 seperti gambar (3.2.c).

5. *Thermal bath*

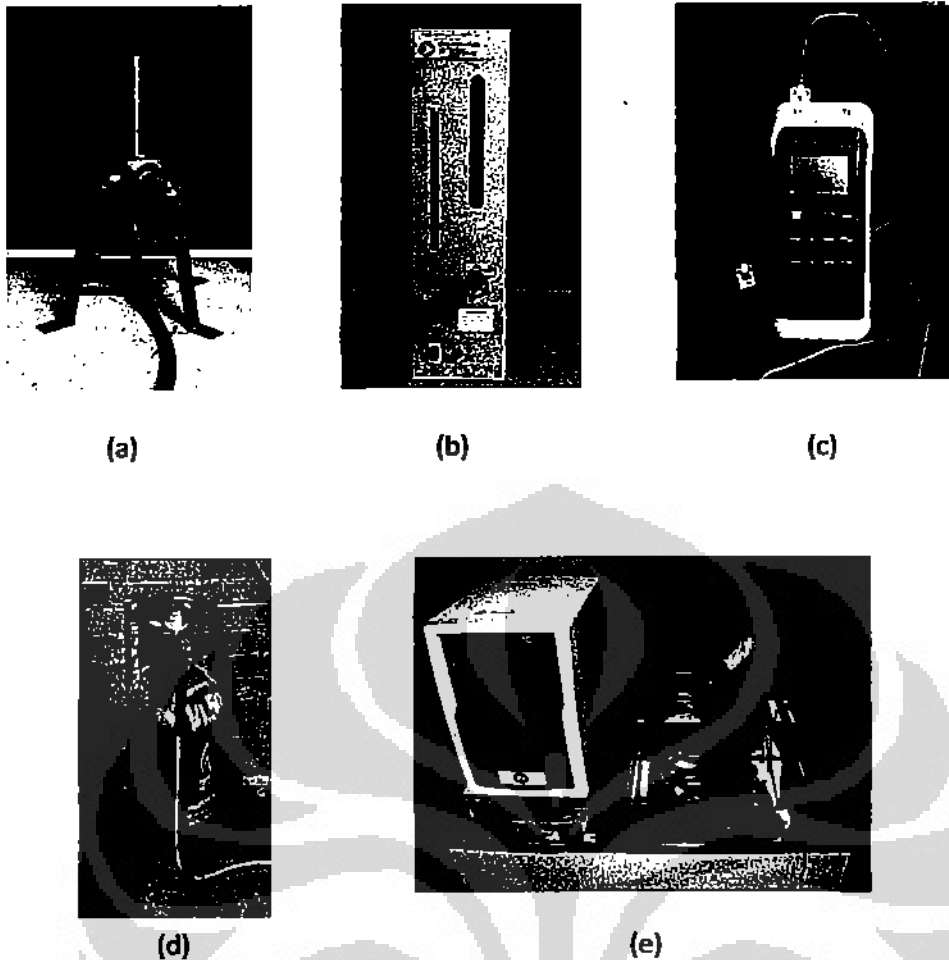
Thermal bath merupakan *heater* yang digunakan untuk memanaskan medium kerja untuk meningkatkan temperatur bahan bakar gas LPG. Percobaan kali ini menggunakan minyak nabati sebagai medium kerjanya. *Thermal bath* ini berkerja dari temperatur 0°C sampai 100°C . Gambar (3.2.e) menunjukkan *thermal bath*.

6. Gas LPG

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

7. 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 *thermal bath* Seperti gambar (3.2.e)



Gambar 3.2. Peralatan dan Bahan Utama yang Digunakan: (a) Burner Gas Tipe *Ejected Combustor*, (b) *Flowmeter* Bahan Bakar, (c) *Thermocouple* Tipe K dengan *Termometer Digital*, (d) Bahan Bakar LPG Campuran, (e) *Thermal Bath* dan *Coil Tembaga*.

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*, buatan *Shinagawa Keisokki Seisakusho CO.LTD* digunakan untuk kalibrasi rotameter dan *flowmeter* udara
3. Pemantik api gas sistem magnet
4. Termokopel *adjuster*
5. Saluran pembuangan sisa hasil pembakaran
6. *Video kamera digital* untuk pengambilan gambar fenomena nyala api.

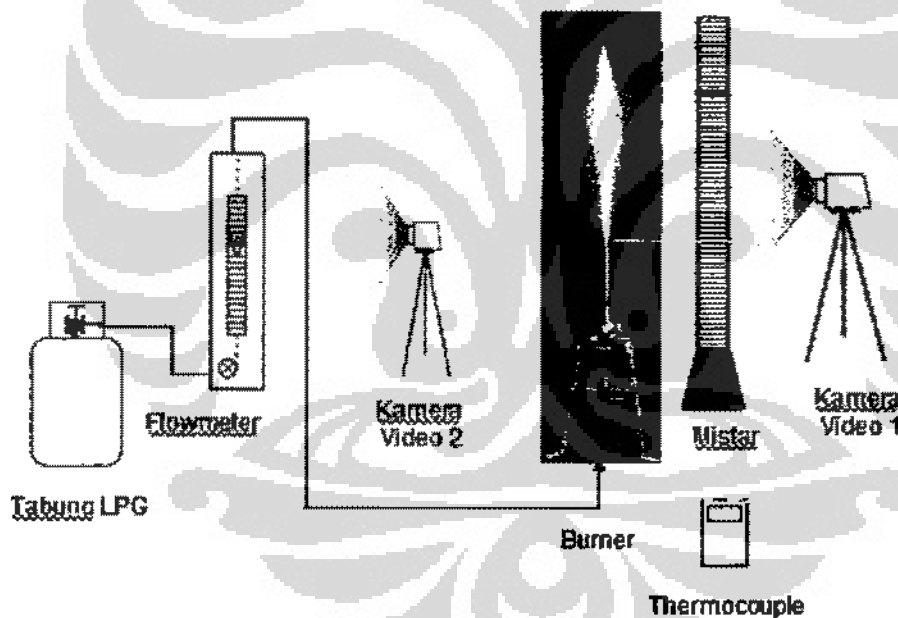
7. *Hygrometer* untuk mengetahui tekanan, temperatur dan kelembaban relatif ruangan.

3.2 Skema dan Proses Penelitian

Skema penelitian pengaruh variasi temperatur bahan bakar LPG campuran terhadap karakteristik nyala-api-difusi di bagi menjadi 2 tahap, yaitu :

3.2.1 Penelitian Tanpa Pemanasan

Pada penelitian tanpa pemanasan yang dilakukan adalah mempersiapkan peralatan yang akan diperlukan dalam melakukan pengujian seperti *Bunsen Burner*, tabung gas LPG, termokopel, *flowmeter* bahan bakar, pemantik api gas, penggaris, *termocouple adjuster*, dan video kamera digital. Kemudian peralatan tersebut di *setting* sesuai dengan skema penelitian yang diperlihatkan pada gambar (3.3) dibawah ini



Gambar 3.3. Skema Penelitian Tanpa Pemanasan

Lakukan pengecekan ulang terhadap semua peralatan yang digunakan terutama pada selang gas dan sambungan selang gas LPG sebelum pengujian dilakukan. Bahan bakar LPG dari tabung dialirkan melalui *flowmeter* bahan bakar (*rotameter*) kemudian diteruskan ke *burner* lalu ke nozel. Melalui nozel, bahan bakar akan terinjeksi ke lingkungan luar dan selanjutnya dinyalakan menggunakan pemantik api.

Laju aliran LPG diperbesar secara terus - menerus hingga dicapai kondisi *blow-off* (nyala api padam akibat kecepatan rata-rata bahan bakar/oksidator lebih besar dari kecepatan pembakaran). Pada setiap sesi penelitian dilakukan pengukuran temperatur aliran LPG yang mengalir didalam selang gas menuju burner, pengukuran temperatur *burner tip*, dan pergerakan laju aliran gas LPG pada rotameter dan nyala api di-*capture* dengan menggunakan kamera-video digital secara bersamaan.

Kemudian hasil *capture* ke dua kamera video digital tersebut diolah dan digabungkan menggunakan *software Ulead Videostudio 11*. Sedang untuk mengetahui Jarak *lifted flame*, panjang nyala api, dan tinggi nyala api hasil *capture* tersebut diolah menggunakan *software Adobe Premier CS3*, dan *Adobe Photoshop 7.0*

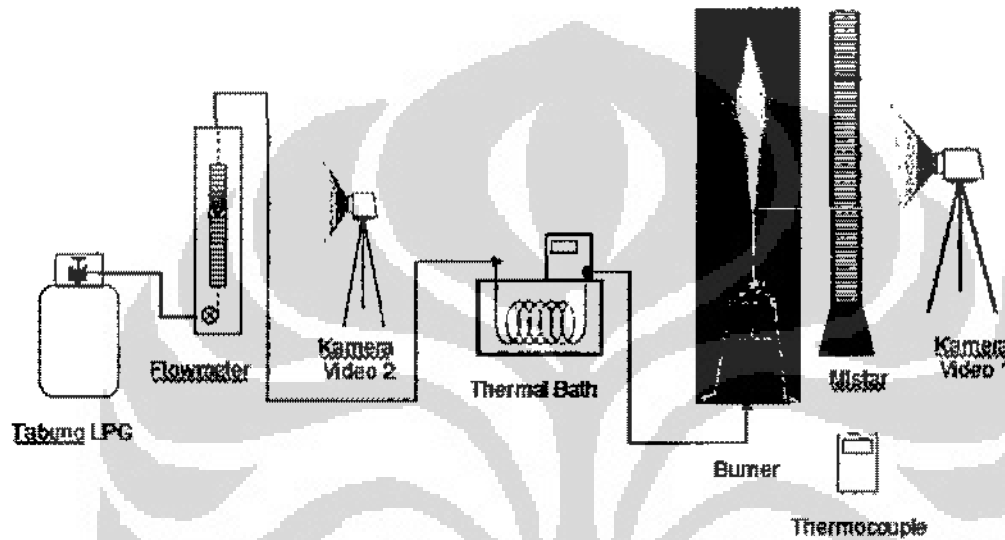
Pengukuran temperatur aliran LPG dan burner tip menggunakan Thermocouple tipe K.

Tabel 3.1 Tabel data percobaan ketinggian *lifted flame* dan panjang nyala api difusi tanpa pemanasan

Rotameter	T_{in}	X_f (mm)	L_f (mm)	Temperatur tip burner (T_{ϕ})

3.2.2 Penelitian Dengan Pemanasan

Pada penelitian dengan pemanasan yang dilakukan adalah mempersiapkan peralatan yang akan diperlukan dalam melakukan pengujian seperti *Bunsen Burner*, tabung gas LPG, termokopel, *flowmeter* bahan bakar, thermal bath, coil tembaga, pemantik api gas, penggaris, *termocouple adjuster*, dan video kamera digital. Kemudian peralatan tersebut di *setting* sesuai dengan skema penelitian yang diperlihatkan pada gambar (3.4) dibawah ini



Gambar 3.4. Skema Penelitian Dengan Pemanasan

Lakukan pengecekan ulang terhadap semua peralatan yang digunakan terutama pada selang gas dan sambungan selang gas LPG sebelum pengujian dilakukan. Bahan bakar LPG dari tabung dialirkan melalui *flowmeter* bahan bakar (*rotameter*) kemudian diteruskan mengalir ke dalam *coil* tembaga yang terlebih dahulu dipanaskan dengan cara direndam di dalam *Thermal Bath* yang berisi minyak nabati selama $\pm 3 - 4$ jam. Gas LPG keluaran *coil* tembaga diteruskan ke *burner* lalu ke nozel dan selanjutnya terinjeksi ke lingkungan luar kemudian dinyalakan menggunakan pemantik api.

Seperti pada tahap pertama, laju aliran gas LPG diperbesar secara terus-menerus hingga dicapai kondisi *blow-off* dan pada setiap sesi penelitian dilakukan pengukuran temperatur aliran LPG yang mengalir didalam selang menuju burner, pengukuran temperatur *burner tip*, dan pergerakan laju aliran gas LPG pada

rotameter dan nyala api di-capture dengan menggunakan kamera-video digital secara bersamaan.

Kemudian hasil capture ke dua kamera video digital tersebut diolah dan digabungkan menggunakan *software Ulead Videostudio 11*. Sedang untuk mengetahui Jarak *lifted flame*, panjang nyala api, dan tinggi nyala api hasil *capture* tersebut diolah menggunakan *software Adobe Premier CS3*, dan *Adobe Photoshop 7.0*. Proses penelitian ini dilakukan sebanyak lima kali pada temperatur pemanasan *Thermal Bath* yang berbeda yakni pada temperatur: 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C dan 100 °C.

Pengukuran temperatur aliran LPG, burner tip dan base flame menggunakan Thermocouple tipe K.

Tabel 3.2 Tabel data percobaan dengan pemanasan

Rotameter	T_{in}	T_{out}	X_r (mm)	L_r (mm)	Temperatur tip burner (T_b)

3.3 Penyetaraan Skala *Flowmeter*

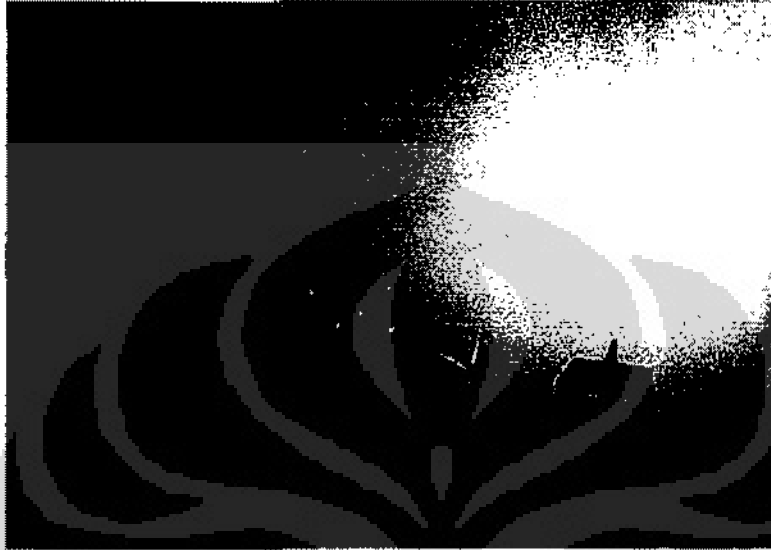
Flowmeter yang terdapat pada unit P.A. hilton memiliki skala baca dalam cm yang dapat dibaca langsung dalam percobaan, tetapi untuk diolah lebih lanjut maka ukuran cm tersebut harus dikonversikan menjadi satuan kapasitas aliran dalam dm^3/s .

Alat yang digunakan untuk penyesuaian skala *flowmeter* atau *rotameter* ini yaitu *Wet Gas Meter*. Alat ini memiliki tipe : WE-1.5 A , Laju aliran, Max: 1.5 m^3/h ; Min: 5 l/h, 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.

3.3.1 Langkah-langkah penyetaraan skala *flowmeter*

1. Letakan *Wet Gas Meter* di bidang yang datar, kemudian *set-up* posisi wet gas meter sehingga diperoleh posisi yang setimbang.
2. *Wet Gas Meter* diisi air hingga ketinggian cairan mencapai sekitar 2 mm di atas *setting needle point*.
3. Sambungkan selang gas dari tabung gas LPG ke gas inlet yang terdapat pada Rotameter, selang gas LPG dari gas outlet Rotameter ke gas inlet pada wet gas meter, selang gas dari outlet wet gas meter ke burner agar dapat dibakar sehingga gas tidak tersebar.
4. Ikat dengan klem setiap sambungan selang gas pada point 3, untuk menghindari kemungkinan kebocoran gas pada saat dilakukan proses penyetaraan rotameter dilakukan
5. Cek kembali kondisi selang dan setiap sambungan selang, sebelum membuka aliran gas LPG.
6. Buka aliran gas LPG dan diatur laju aliran gas pada posisi rotameter 1 cm sehingga jarum meteran yang terdapat di wet gas meter mulai berputar. Jangan lupa, bakar gas yang keluar dari ujung burner dengan menggunakan pemantik api.
7. Menentukan titik acuan sebagai start pada skala meteran di wet gas meter.

8. Mencatat waktu yang dibutuhkan jarum untuk berputar dari titik acuan sampai mencapai titik acuan kembali.
9. Mengulangi langkah 6 sampai 9 untuk laju aliran gas dari 1 cm hingga terjadi *blow off*.



Gambar 3.5 Gambar Prosedur Penyetaraan *Flowmeter*

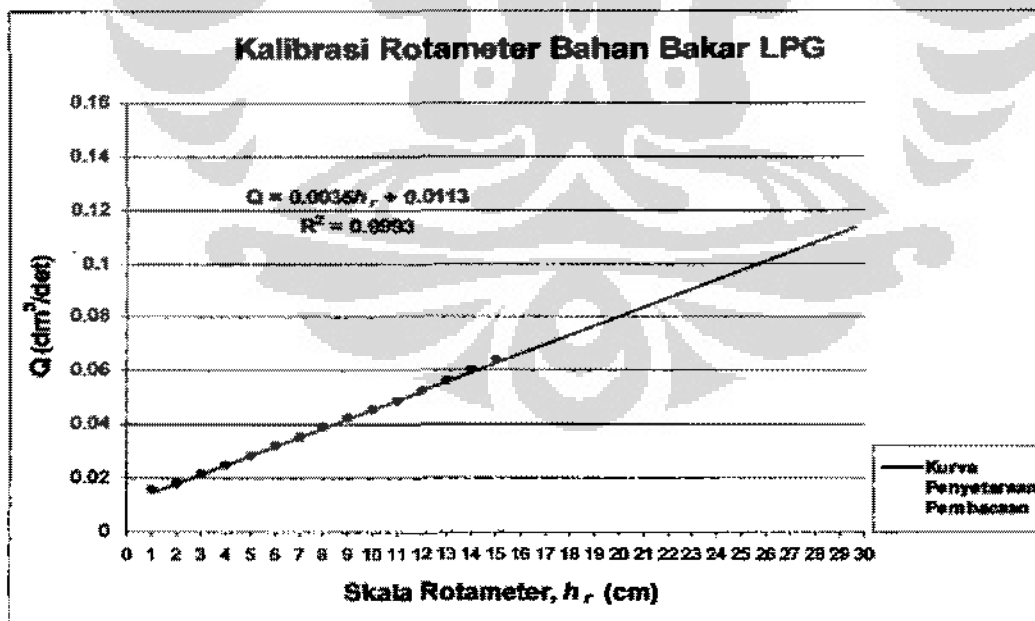
3.3.2 Hasil penyetaraan skala *flowmeter* bahan bakar (*rotameter*)

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

Tabel 3.3. Penyetaraan pembacaan *rotameter* bahan bakar LPG

Skala Rotameter	Q (dm ³ /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

Dari tabel 3.3 dapat dibuat kurva dan persamaan penyetaraan pembacaan *flowmeter* untuk bahan bakar LPG sebagai berikut.

Gambar 3.6 Grafik Penyetaraan Laju Aliran LPG Terhadap *Rotameter*

Dari grafik tersebut, persamaan penyetaraan massa aliran gas LPG Campuran adalah sebagai berikut:

$$Q_f = 0,0035h_f + 0,0113 \quad (3.1)$$

3.4. Penyetaraan 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 penyetaraan agar diperoleh hasil pengukuran yang benar dan dapat dipercaya. Selain itu *thermal bath* juga dilengkapi pengatur temperatur yang dapat memudahkan kita untuk mengetahui berapa besar temperatur medium kerja, untuk itu *thermal bath* juga perlu disetarakan sebelum digunakan.

Peralatan pendukung yang digunakan, yaitu :

1. Termometer standar
2. Medium kerja (H₂O)
3. Papan kayu sebagai alas (isolator)

3.4.1 Langkah-langkah Penyetaraan Alat Ukur Temperatur

Penyetaraan yang dilakukan mengikuti langkah-langkah sebagai berikut :

1. Air dimasukkan ke dalam *thermal bath*, kemudian diukur berapa temperaturnya dengan termometer standart dan *termocouple*.
2. Temperatur air dinaikkan secara perlahan, kemudian setiap kenaikan temperatur air sebesar 5°C dicatat hasil yang terbaca pada termometer standart, termokopel dan temperatur pada *thermal bath*.
3. Air tersebut terus dipanaskan hingga mendidih kemudian temperatur air tersebut diukur dengan menggunakan termometer standart dan termokopel. Selanjutnya hasilnya dibandingkan.

3.4.2 Hasil Penyetaraan

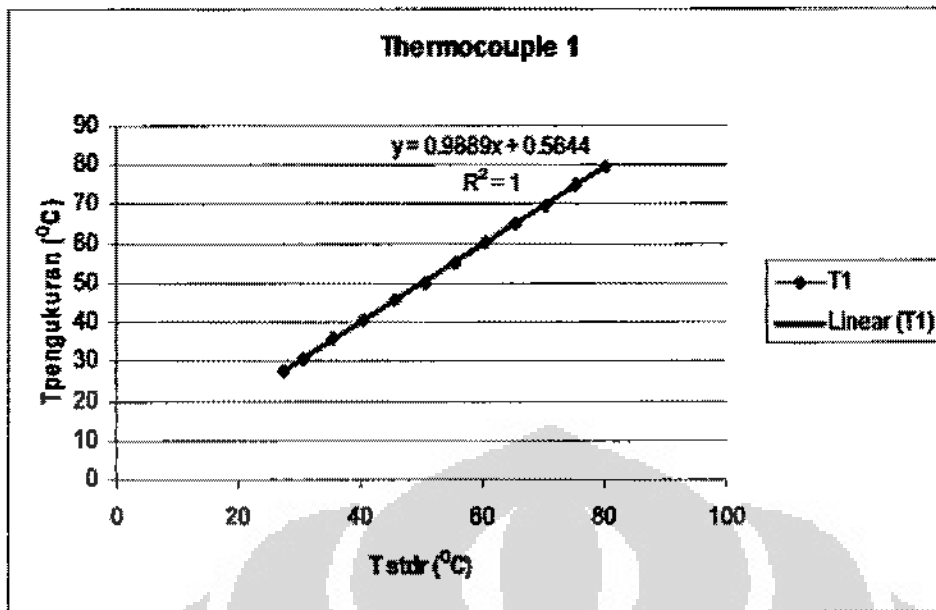
Setelah melakukan proses penyetaraan maka hasil yang didapat bahwa, temperatur yang menggunakan *termocouple* memiliki sedikit perbedaan hasil temperatur yang menggunakan termometer standar. Kemudian ketika air tersebut mendidih, temperatur yang dicapai hingga mendekati 100°C. Dari penyetaraan tersebut penyusun menghentikan pemanasan air hingga mencapai temperatur 98°C.

Hasil penyetaraan pengukuran *thermocouple* dan *thermal bath* ini dapat dilihat seperti tabel dibawah ini :

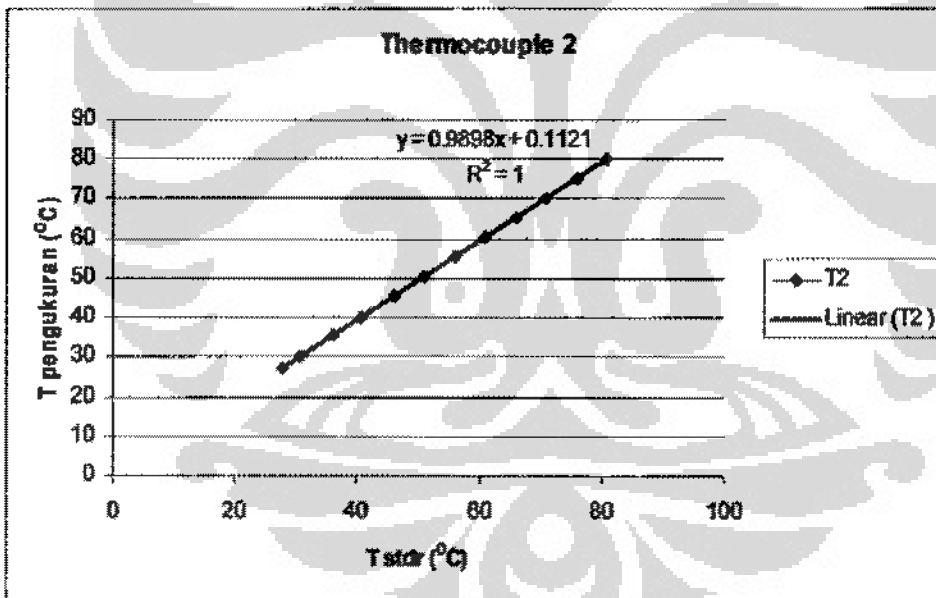
Tabel 3.4 Hasil penyetaraan *thermocouple* dan *thermal-bath*

T stdr (°C)	Thermocouple			Thermal Bath (°C)
	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	
27.3	27.5	27.5	28.5	27.5
30.3	30.7	30.6	30.7	30.5
35.5	35.7	35.8	37.5	35.7
40.3	40.4	40.5	44	40
45.5	45.6	45.8	50.5	45
50.3	50.1	50.6	56.9	50
55.3	55.2	55.8	63.5	54.9
60.3	60.1	60.7	69.8	60
65.1	65	65.7	76.2	65
70	69.8	70.7	82.6	70
75	74.8	75.7	89.2	74.9
80	78.4	80.6	95.5	79.1

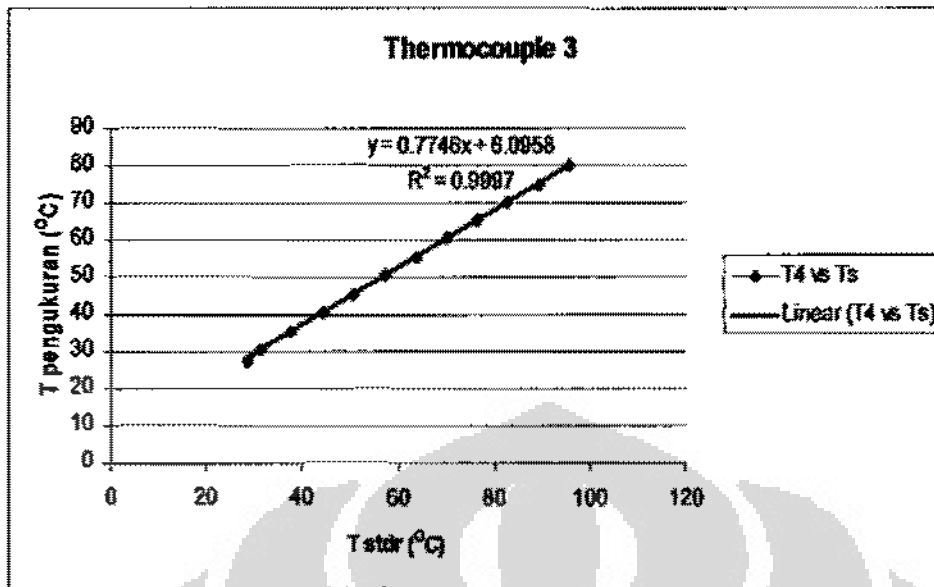
Dari data di atas maka didapat grafik seperti gambar dibawah ini:



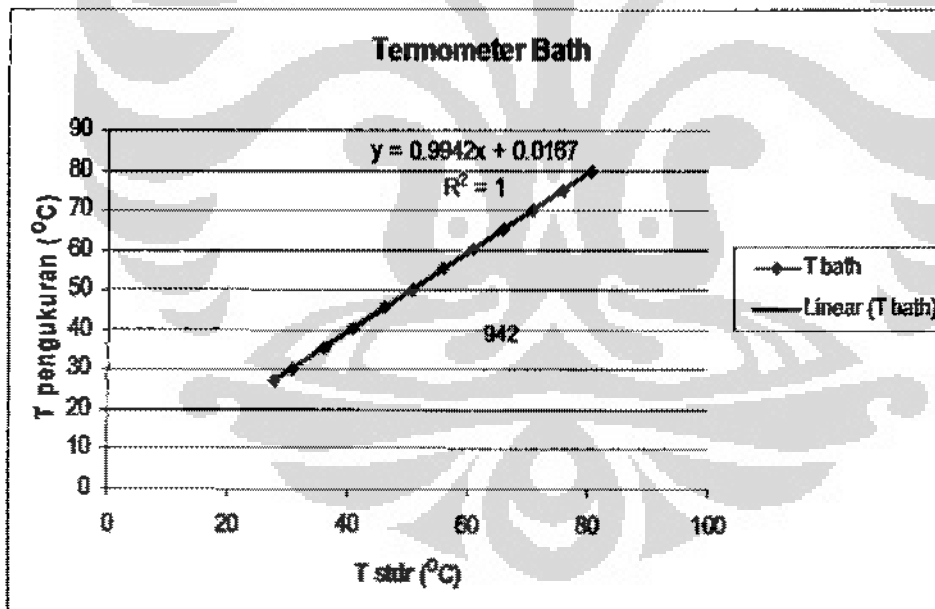
Gambar 3.7 Grafik Penyetaraan *Thermocouple 1*



Gambar 3.8 Grafik Penyetaraan *Thermocouple 2*



Gambar 3.9 Grafik Penyetaraan *Thermocouple 3*



Gambar 3.10 Grafik Penyetaraan *Thermal Bath*

3.5 Kondisi Lingkungan

Untuk memperoleh hasil penelitian yang dapat diandalkan maka faktor kondisi lingkungan sekitar *burner* juga diperhitungkan. Kondisi lingkungan saat penelitian dilakukan ditunjukkan tabel dibawah ini.

Tabel 3.5 Kondisi lingkungan saat penelitian dilakukan.

Parameter	Minimum	Maksimum
Temperatur (°C)	30	33
Kelembaban (%)	43	62



BAB 4

ANALISA HASIL PENELITIAN

4.1 Stoikiometri Pembakaran

Pembakaran semburan bahan bakar gas terjadi secara difusi dimana pembakaran terjadi pada daerah stoikiometri percampuran bahan bakar dan oksigen. Sehingga secara stoikiometri, pembakaran 1 mol bahan bakar LPG Campuran (komposisi 60 % C_3H_8 dan 40 % C_4H_{10} berdasarkan volume) memerlukan oksigen berdasarkan perhitungan berikut:

untuk pembakaran C_3H_8 :



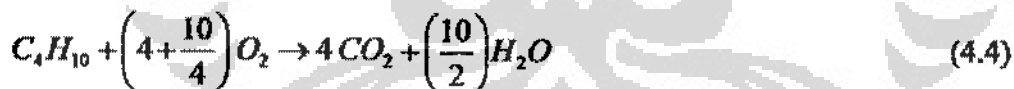
atau



sehingga pembakaran 0,6 mol propana diperlukan oksigen sebesar

$$\begin{aligned} n_{O_2, \text{prop}} &= \frac{5}{1} \times 0,6 \\ &= 3 \text{ mol} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Untuk pembakaran C_4H_{10} :



atau



sehingga pembakaran 0,4 mol butana diperlukan oksigen sebesar

$$\begin{aligned} n_{O_2, \text{but}} &= \frac{13/2}{1} \times 0,4 \\ &= 2,6 \text{ mol} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Total mol oksigen yang diperlukan sebesar

$$\begin{aligned} n_{O_2, \text{but}} + n_{O_2, \text{prop}} &= (3 + 2,6) \text{ mol} \\ &= 5,6 \text{ mol} \end{aligned} \quad (4.7)$$

sehingga massa oksigen yang diperlukan sebesar

$$m_{O_2} = 5,6 \text{ mol} \times \frac{32 \text{ gr}}{1 \text{ mol}} = 179,2 \text{ gr} \quad (4.8)$$

Jadi secara stoikiometri, pada pembakaran 1 mol bahan bakar LPG Campuran diperlukan oksigen sebesar 179,2 gram atau udara sebesar:

$$\begin{aligned} m_{udara} &= \frac{100}{23} \times 179,2 \text{ gr} \\ &= 779,1 \text{ gr udara} \end{aligned} \quad (4.9)$$

sehingga $AFR_{stoikiometri}$ untuk bahan bakar LPG Campuran adalah

$$\begin{aligned} AFR_{stoikiometri} &= \frac{\text{Massa udara}}{\text{Massa bahan bakar}} = \frac{779,1 \text{ gr}}{49,71 \text{ gr}} \\ &= 15,67 \end{aligned} \quad (4.10)$$

4.2 Viskositas gas LPG Campuran

Karena gas LPG Campuran terdiri dari senyawa propana dan butana, maka viskositas gas LPG Campuran dapat ditentukan menurut teori Chapman-Enskog (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2003), yakni

$$\nu_{mix} = \sum_{\alpha}^N \frac{x_{\alpha} \nu_{\alpha}}{\sum_{\beta}^N x_{\beta} \Phi_{\alpha\beta}} \quad (4.11)$$

dimana

$$\Phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\nu_{\alpha}}{\nu_{\beta}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{\beta}}{M_{\alpha}} \right)^{1/4} \right]^2 \quad (4.12)$$

Viskositas dari masing-masing gas penyusun gas LPG Campuran (dari substansi murninya [*pure substance*]) ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 4.1. Viskositas Propana dan Butana (*Pure Substance*)

Senyawa	Fraksi Massa (x_α)	Viskositas (m^2/s)
C_3H_8	0,532	$5,333 \times 10^{-6}$
C_4H_{10}	0,468	$3,72 \times 10^{-6}$

Sumber: Kazantsev, 1977.

Dari tabel 4.1 dapat dilakukan perhitungan terhadap $x_\beta \Phi_{\alpha\beta}$ yang ditabelkan dalam tabel berikut.

Tabel 4.2. Data untuk Perhitungan Viskositas Gas LPG Campuran

α	β	$\frac{v_\alpha}{v_\beta}$	$\frac{M_\alpha}{M_\beta}$	$\Phi_{\alpha\beta}$	$\sum_{\beta=1}^2 x_\beta \Phi_{\alpha\beta}$
1	1	1,000	1,000	1,000	1,105
	2	1,137	0,759	1,225	
2	1	0,880	1,318	0,816	0,902
	2	1,000	1,000	1,000	

Sehingga viskositas gas LPG Campuran adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 v_{mix} &= \frac{0,532 \times 5,333 \times 10^{-6}}{1,105} + \frac{0,468 \times 3,72 \times 10^{-6}}{0,902} \\
 &= 4,498 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}
 \end{aligned}
 \tag{4.13}$$

4.3 Reynold Number Gas LPG pada Ujung Nozel

Reynold number dari gas LPG pada saat keluar dari mulut/ujung nozel dapat diperhitungkan sebagai berikut (pada perhitungan ini dicontohkan pada salah satu laju aliran gas LPG)

- Diameter nozel, $d_i = 1,8 \times 10^{-3}$ m
- Laju aliran gas LPG, $Q_f = 46,3 \times 10^{-6}$ m³/s
- Kecepatan aliran gas LPG

$$u_1 = \frac{Q_f}{A_1} = \frac{46,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \frac{(1,8 \times 10^{-3})^2}{4} \text{ m}^2} = 18,19 \text{ m/s} \quad (4.14)$$

- Viskositas gas LPG = $4,498 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Maka Reynold *number* gas LPG pada ujung nozel

$$Re_1 = \frac{18,19 \text{ m/s} \times 1,8 \times 10^{-3} \text{ m}}{4,498 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 7.278 \quad (4.15)$$

Reynold *number* untuk nilai laju aliran gas yang lainnya didapat dengan perhitungan yang sama dan ditabelkan pada tabel 4.3.

4.4 Beban Pembakaran (*Burning Load*)

Beban pembakaran yang terjadi adalah sebagai berikut:

- LHV = 46.043,37 kJ/kg
- Massa jenis LPG, $\rho = 2,212 \text{ kg/m}^3$
- Laju aliran gas LPG, $Q_f = 46,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
- Jari-jari nozel pada *port* = $9 \times 10^{-4} \text{ m}$

Maka *burning load*, BL, sebesar

$$BL = \frac{46,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \times 2,212 \text{ kg/m}^3 \times 46.043,37 \text{ kJ/kg}}{\pi \times (9 \times 10^{-4})^2 \text{ m}^2} \quad (4.16)$$

$$= 1.854,04 \text{ MW/m}^2$$

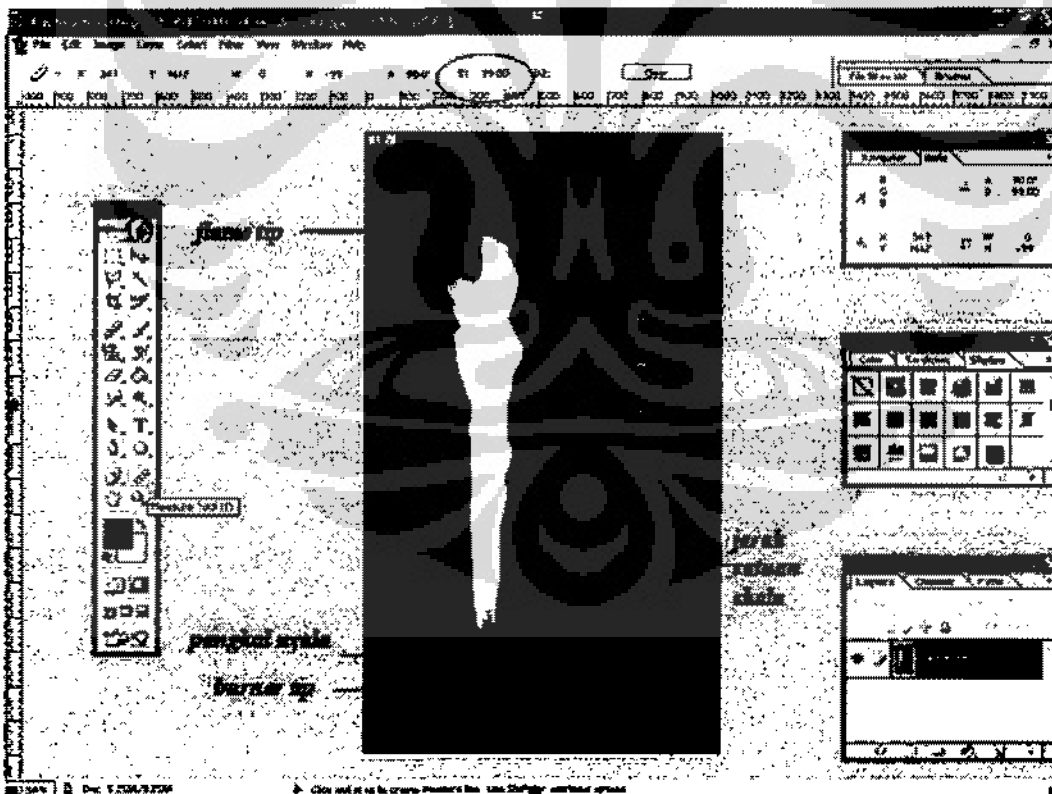
Nilai *burning load* pada nilai laju aliran gas yang lain ditunjukkan pada tabel 4.3.

Tabel 4.3. Reynold Number Ujung Nozel dan *Burning Load* Gas LPG pada Berbagai Laju Aliran

Skala Rotameter	Q_f (dm ³ /s)	u_1 (m/s)	Re_1	BL
0,5	0,1305	5,126263	2051,417	522,5743
1	0,0148	5,813692	2326,511	592,6513
1,5	0,01655	6,501122	2601,605	662,7284
2	0,0183	7,188552	2876,699	732,8054
2,5	0,02005	7,875982	3151,794	802,8824
3	0,0218	8,563412	3426,888	872,9594
3,5	0,02355	9,250842	3701,982	943,0364
4	0,0253	9,938272	3977,076	1013,113
4,5	0,02705	10,62570	4252,17	1083,19
5	0,0288	11,31313	4527,265	1153,267
5,5	0,03055	12,00056	4802,359	1223,344
6	0,0323	12,68799	5077,453	1293,422
6,5	0,03405	13,37542	5352,547	1363,499
7	0,0358	14,06285	5627,641	1433,576
7,5	0,03755	14,75028	5902,736	1503,653
8	0,0393	15,43771	6177,83	1573,73
8,5	0,04105	16,12514	6452,924	1643,807
9	0,0428	16,81257	6728,018	1713,884
9,5	0,04455	17,5	7003,112	1783,961
10	0,0463	18,18743	7278,207	1854,038
10,5	0,04805	18,87486	7553,301	1924,115
11	0,0498	19,56229	7828,395	1994,192
11,5	0,0533	20,24972	8103,489	2064,269
12	0,0533	20,93714	8378,583	2134,346
12,5	0,05505	21,62458	8653,678	2204,423
13	0,0568	22,31201	8928,772	2274,5
13,5	0,05855	22,99944	9203,866	2344,577
14	0,0603	23,68687	9478,96	2414,654
14,5	0,06205	24,37429	9754,054	2484,731
15	0,0638	25,06173	10029,15	2554,808

4.5 Analisis Tinggi *Lifted Flame*, Panjang Nyala Api, dan Tinggi Nyala Api

Analisis ini adalah mengenai pengukuran tinggi *lifted flame*, panjang nyala api, dan tinggi nyala api difusi dari setiap eksperimen, baik tanpa maupun dengan pemanasan. Hasil tersebut diperoleh dengan mengolah hasil capture kamera video digital menggunakan *software Adobe Premier CS3* dan *Adobe Photoshop 7.0*. Pada penelitian ini, *software Adobe Premier CS3* digunakan untuk memisahkan atau memecah hasil capture kamera video menjadi *slide per slide photo*. Selanjutnya slide – slide photo tersebut, diolah kembali dengan alat bantu menggunakan *software Adobe Photoshop 7.0* untuk mendapatkan tinggi *lifted flame*, panjang nyala api dan tinggi nyala api. Dari hasil pengolahan photo dengan menggunakan *software Adobe Photoshop 7.0*, ketiga besaran ini diukur dalam satuan *pixel* yang selanjutnya dikonversikan ke dalam satuan *milimeter*. Adapun tahapan untuk memperoleh tinggi *lifted flame*, Tinggi nyala api dan panjang nyala api adalah seperti ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 4.1. Metode untuk Menentukan Tinggi *Lifted Flame*, Panjang Nyala Api, dan Tinggi Nyala Api Menggunakan *Software Adobe Photoshop 7.0*.

- a) Mengukur jarak dari *burner tip* hingga ke pangkal nyala api. Besaran yang diperoleh merupakan tinggi *lifted flame* dalam *pixel* (D1 pada *toolbar* informasi)
- b) Mengukur jarak dari *burner tip* hingga ke *flame tip*. Besaran yang diperoleh merupakan tinggi nyala api dalam *pixel*.
- c) Mengukur satu satuan jarak skala pada mistar. Jarak yang diperoleh adalah dalam *pixel*.
- d) Mengubah satuan *pixel* ke dalam satuan milimeter dengan persamaan:

$$\text{jarak (mm)} = \frac{\text{jarak (pixel)}}{\text{jarak satuan skala (pixel)}} \times \text{jarak satuan skala (mm)} \quad (4.13)$$

- e) Panjang nyala api diperoleh dengan mengurangi tinggi nyala api dengan tinggi *lifted flame* atau

$$L_f = H_f - x_f \quad (4.14)$$

Data yang diperoleh dari pengolahan ini ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

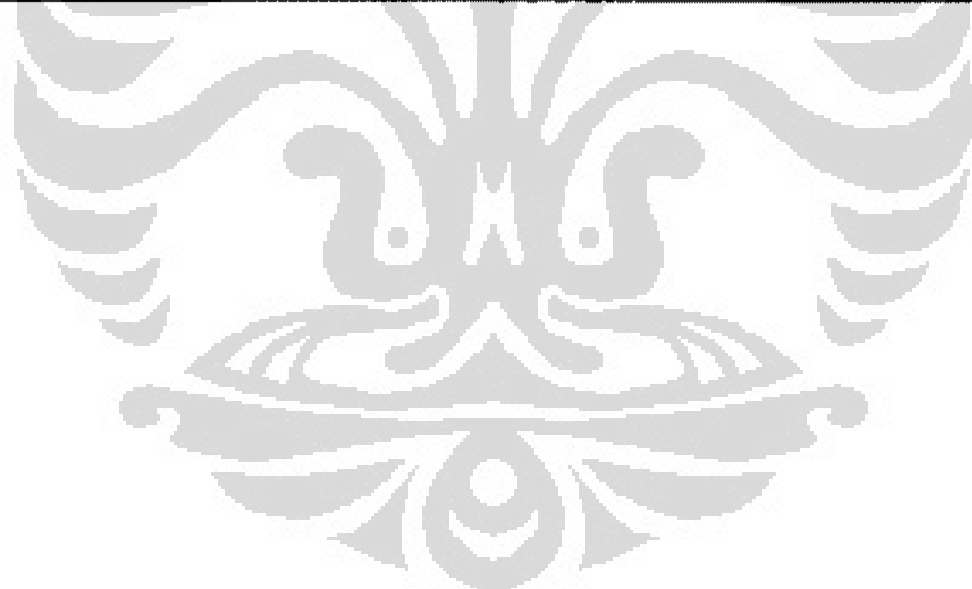


Tabel. 4.4 Data Hasil Pengolahan pada *Software Adobe Photoshop 7.0* (dengan $T_{out} = \text{Konstan}$)

Qf (dm ³ /s)	BL (MW/m ²)	Tout = 33,4 °C			Tout=37,8 °C			Tout=38,7 °C			Tout=39,8 °C			Tout=43,1 °C			Tout=46,6 °C		
		xf	Hf	Lf	xf	Hf	Lf	xf	Hf	Lf	xf	Hf	Lf	xf	Hf	Lf	xf	Hf	Lf
0.01305	522.6743	0	48.05	48.05	0	42.99	42.99	0	41.84	41.84	0	43.97	43.97	0	43.39	43.39	0	43.1	43.1
0.0148	582.8513	0	49.66	49.66	0	48.34	48.34	0	46.55	46.55	0	43.45	43.45	0	44.44	44.44	0	45.63	45.63
0.01655	662.7284	0	48.74	48.74	0	49.41	49.41	0	50.06	50.06	0	47.76	47.76	0	47.05	47.05	0	48.73	48.73
0.0183	732.8054	0	49.88	49.88	0	57.36	57.36	0	51.55	51.55	0	51.47	51.47	0	53.58	53.58	0	51.21	51.21
0.02005	802.8824	0	45.63	45.63	0	52.72	52.72	0	58.28	58.28	0	48.68	48.68	0	54.07	54.07	0	40.46	40.46
0.0218	872.9594	3.276	46.21	42.93	0.952	45.77	44.82	0	46.61	46.61	3.362	41.47	38.1	2.87	41.57	38.7	3.534	45	41.47
0.02355	943.0364	3.534	38.88	35.34	3.334	47.74	44.4	3.391	42.93	39.54	3.19	40.09	36.9	3.457	40.8	37.34	4.052	38.88	34.83
0.0253	1013.113	3.793	44.31	40.52	3.334	44.58	41.25	3.391	44.48	41.09	3.362	43.71	40.34	3.519	40.74	37.22	4.052	42.84	38.79
0.02705	1083.19	3.966	46.55	42.59	3.675	45.24	41.56	3.448	48.53	45.09	3.879	43.88	40	3.704	46.36	42.65	4.483	40.34	35.86
0.0288	1153.267	4.224	42.41	38.19	3.821	43.75	39.93	3.793	47.47	43.68	4.397	42.84	38.45	3.828	39.14	35.31	4.583	45.08	40.5
0.03055	1223.344	4.569	48.62	44.05	4.107	46.37	42.26	3.65	38.13	34.48	3.966	36.81	32.84	3.889	40.06	36.17	4.598	46.32	41.72
0.0323	1293.422	4.655	50.26	45.6	3.929	51.79	47.86	4.195	49.7	45.5	4.483	43.71	39.22	4.198	41.73	37.53	4.655	42.41	37.76
0.03405	1363.499	4.167	43.5	39.33	4.523	46.49	41.96	4.138	41.21	37.07	4.483	35.6	31.12	4.32	46.85	42.53	4.54	44.77	40.23
0.0358	1433.576	5	43.19	38.19	4.595	49.37	44.78	5	56.88	51.88	4.741	37.93	33.19	4.383	44.01	39.63	5.116	47.53	42.41
0.03755	1503.653	5.179	47.95	42.77	5.179	44.82	39.64	5.172	50.26	45.09	4.828	46.38	41.55	4.939	38.39	33.46	5.402	43.45	38.05
0.0393	1573.73	5.172	46.55	41.38	4.94	34.71	29.77	5.603	43.1	37.5	5	41.55	36.55	5.061	40.43	35.37	5.574	41.72	36.15
0.04105	1643.807	5.517	53.1	47.59	5.296	50.3	45	5.714	50.54	44.82	5.776	43.88	38.1	5.061	46.05	40.99	6.207	38.62	32.41
0.0428	1713.884	6.607	44.55	37.95	5.536	42.32	36.79	5.69	45	39.31	5.69	44.31	38.62	5.68	45.8	40.12	6.15	50.86	44.71
0.04455	1783.961	6.379	46.38	40	5.517	41.72	36.21	5.69	46.38	40.69	6.034	47.18	41.15	5.865	53.76	47.9	6.207	41.32	35.12

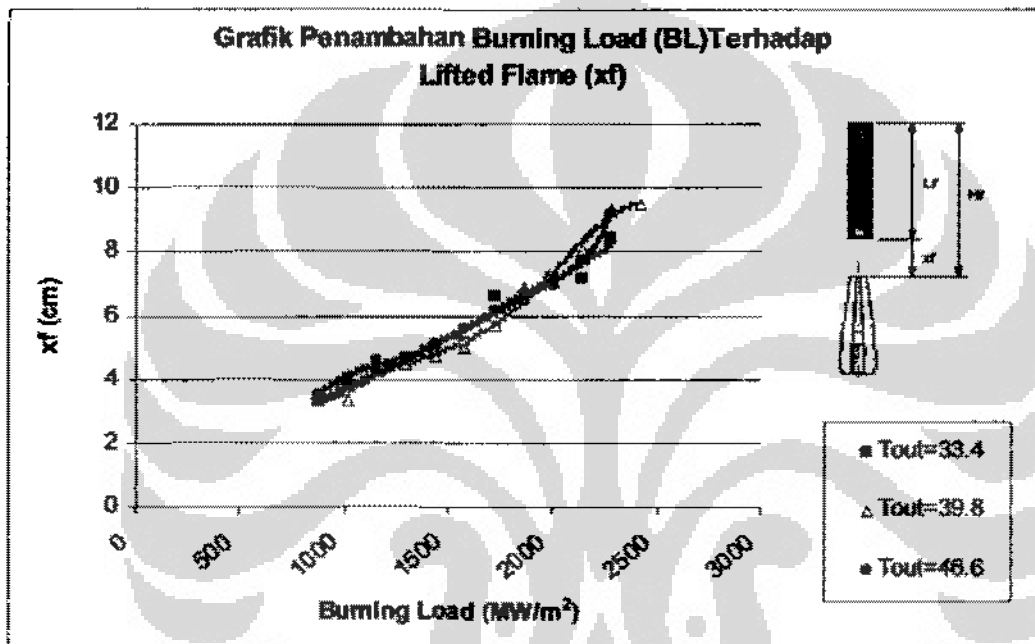
Tabel. 4.5 Lanjutan Data Hasil Pengolahan pada *Software Adobe Photoshop 7.0* (dengan $T_{out} = \text{Konstan}$)

Qf (dm ³ /s)	BL (MW/m ²)	Tout = 33,4 °C			Tout=37,8 °C			Tout=38,7 °C			Tout=39,8 °C			Tout=43,1 °C			Tout=48,8 °C		
		xf	Hf	Lf	xf	Hf	Lf	xf	Hf	Lf	xf	Hf	Lf	xf	Hf	Lf	xf	Hf	Lf
0.0463	1854.038	6.466	42.41	35.95	5.595	48.16	42.56	6.034	42.5	36.47	6.897	41.55	34.66	5.802	48.39	42.59	6.724	51.09	44.37
0.04805	1924.115	6.724	44.22	37.5	6.071	48.99	42.92	6.034	42.07	35.03	6.638	50.95	44.31	6.172	49.44	43.27	6.781	45.52	38.74
0.0498	1994.192	7.241	42.93	35.69	5.174	43.15	37.97	6.429	51.43	45	7.069	49.05	41.98	6.759	39.63	32.87	6.953	47.93	40.98
0.05155	2064.269	7.5	54.82	47.32	6.786	45.66	38.87	6.379	43.88	37.5	7.328	45.43	38.1	6.728	45.99	39.26	7.643	36.21	28.56
0.0533	2134.348	7.155	45.43	38.28	7.352	46.22	38.87	6.638	46.12	39.48	8.103	41.21	33.1	7.839	54.81	46.98	7.759	52.24	44.48
0.05505	2204.423	7.759	46.72	38.97	7.321	45.42	38.09	7.768	41.96	34.2	8.448	47.84	39.4	7.902	49.69	41.79	8.391	45.34	36.95
0.0568	2274.5	8.393	54.38	45.98	8.036	44.41	36.37	9.464	49.02	39.55	9.31	39.83	30.52	8.519	44.57	36.05	9.195	44.88	35.69
0.05855	2344.677							8.393	49.64	41.25	9.483	46.9	37.41	8.704	52.78	44.07			
0.0603	2414.654										9.483	42.76	33.28	9.506	50.56	41.05			
0.06205	2484.731										9.828	46.9	37.07	10.12	45.93	35.8			



4.5.1 Tinggi *Lifted Flame*

Untuk memudahkan dalam menganalisa maka tidak semua data yang tercantum pada table 4.4 diambil. Data yang diambil yaitu data pada $T_{out} = 33,4$ °C (tanpa pemanasan), $T_{out} = 39,8$ °C dan $T_{out} = 46,6$ °C. Kemudian dari data tersebut dapat dibuat grafik Burning Load, BL, terhadap tinggi *lifted flame*, x_f , pada masing-masing eksperimen (tanpa dan dengan pemanasan) seperti ditunjukkan pada gambar 4.2. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa pada



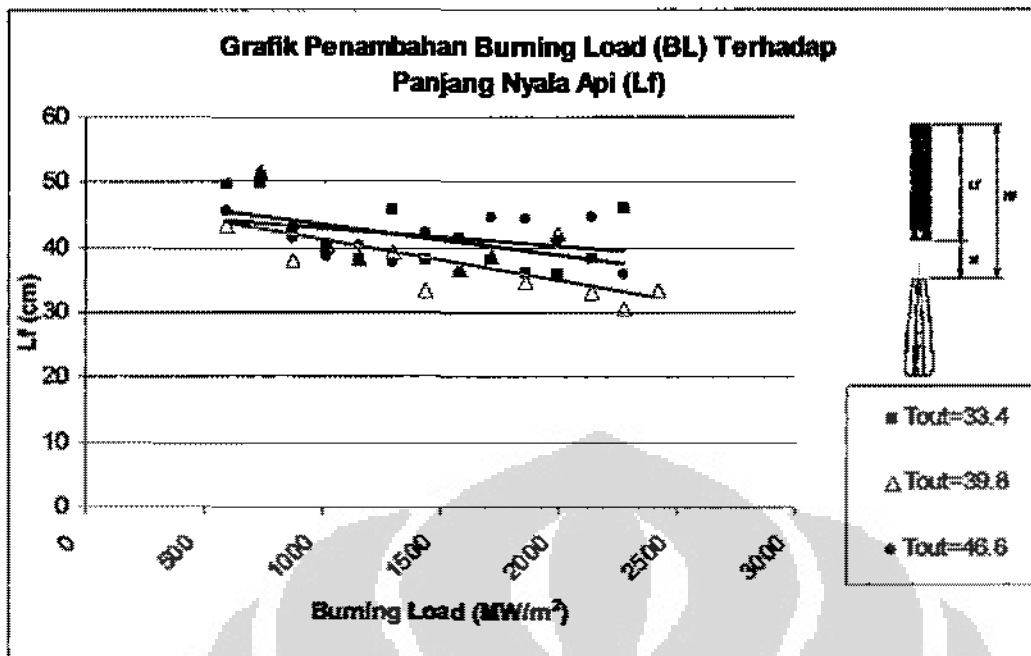
Gambar 4.2. Grafik Penambahan Burning Load Terhadap Jarak *Lifted Flame*

masing-masing eksperimen, seiring dengan membesarnya burning load (BL) dengan cara membesarkan laju aliran gas LPG (Q_f), pangkal nyala api semakin menjauh dari *burner tip* yang berarti tinggi *lifted flame* semakin bertambah besar atau nilai *lifted flame* berbanding lurus terhadap penambahan burning load. Dari Tabel 4.4. pada laju aliran LPG yang sama yaitu sebesar $0,0218 \text{ dm}^3/\text{s}$ dengan nilai $BL = 872,9594 \text{ MW}/\text{m}^2$, LPG dengan $T_{out} = 39,8$ °C dan $T_{out} = 46,6$ °C memiliki nilai yang lebih besar dibanding nilai LPG dengan $T_{out} = 33,4$ °C. Hal ini menunjukkan adanya indikasi bahwa pada LPG dengan $T_{out} = 39,8$ °C dan $T_{out} = 46,6$ °C telah terjadi *lifted flame* pada saat laju aliran LPG mencapai angka $0,02005 - 0,0218 \text{ dm}^3/\text{s}$ ($BL = 802,8824 - 872,9594 \text{ MW}/\text{m}^2$) dan nilai *lifted flame*

yang terjadi lebih kecil dibanding nilai *lifted flame* pada saat laju aliran mencapai angka $0,0218 \text{ dm}^3/\text{s}$. Dari gambar 4.2. pada laju aliran $0,0253 \text{ dm}^3/\text{s} < Q_f < 0,0393 \text{ dm}^3/\text{s}$ dimana $1013,113 \text{ MW}/\text{m}^2 < BL < 1573,73 \text{ MW}/\text{m}^2$, untuk LPG dengan $T_{out} = 39,8 \text{ }^\circ\text{C}$ dan LPG dengan $T_{out} = 46,6 \text{ }^\circ\text{C}$, tinggi *lifted flame* relatif konstan sedangkan untuk LPG dengan $T_{out} = 33,4 \text{ }^\circ\text{C}$ mengalami kenaikan relatif linier. Selanjutnya untuk LPG dengan $T_{out} = 39,8 \text{ }^\circ\text{C}$ dan LPG dengan $T_{out} = 46,6 \text{ }^\circ\text{C}$, dari laju aliran $Q_f = 0,0393 \text{ dm}^3/\text{s}$ ($BL = 1573,73 \text{ MW}/\text{m}^2$) sampai terjadi kondisi *blow-off*, tinggi *lifted flame* mengalami kenaikan yang relatif linier.

4.5.2 Panjang Nyala Api

Dari tabel 4.4 dapat dibuat grafik panjang nyala api (L_f) sebagai fungsi dari laju aliran bahan bakar (Q_f) atau penambahan *burning load* (BL) seperti ditunjukkan pada gambar 4.3. Dari tabel 4.4 tersebut terlihat bahwa pada masing-masing eksperimen, panjang nyala api terhadap laju aliran gas menunjukkan pola yang sama yaitu, pada saat aliran laminar (untuk penambahan *burning load* $522,574 - 802,882 \text{ MW}/\text{m}^2$), nilainya naik seiring dengan naiknya nilai penambahan *burning load* dari bahan bakar. Dan panjang nyala api mulai berkurang saat aliran bahan bakar mulai turbulen. Kemudian, pada saat laju aliran $Q_f = 0,02355 - 0,0323 \text{ dm}^3/\text{s}$ ($BL = 943,04 - 1293,42 \text{ MW}/\text{m}^2$), panjang nyala api bertambah lagi dan mulai laju aliran $0,0358 \text{ dm}^3/\text{s}$ atau $1433,58 \text{ MW}/\text{m}^2$ panjang nyala api berfluktuasi hingga terjadi *blow-off*.

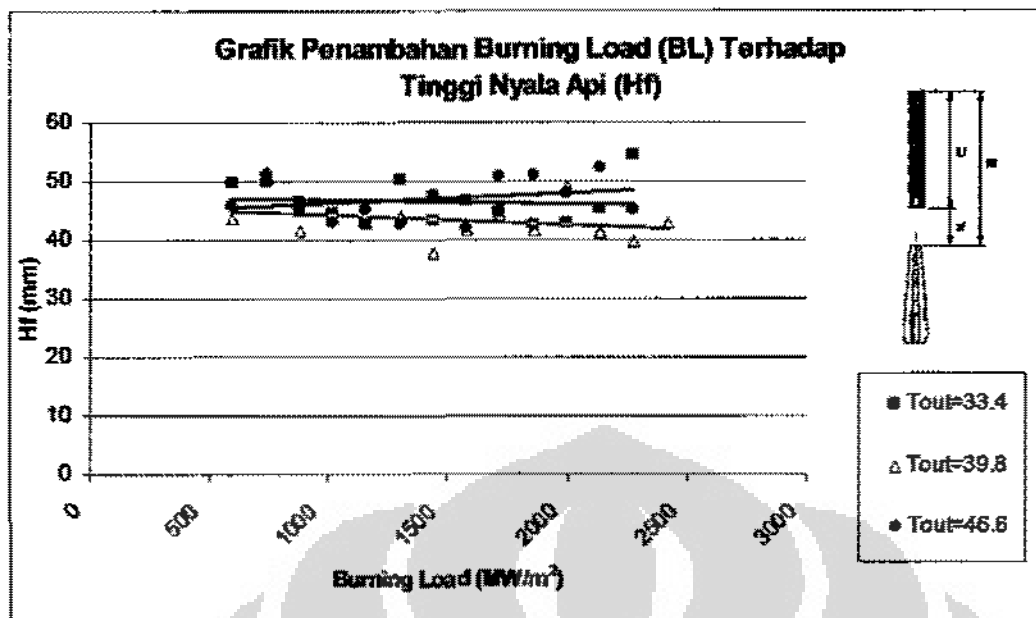


Gambar 4.3. Grafik Penambahan Burning Load Terhadap Panjang Nyala Api

Panjang api LPG dengan $T_{out} = 46,6$ °C lebih panjang dibandingkan dengan panjang api LPG dengan $T_{out} = 39,8$ °C pada laju aliran yang sama. Walaupun demikian pada laju aliran yang sama, panjang api LPG $T_{out} = 39,8$ °C dan $T_{out} = 46,6$ °C nilainya masih dibawah panjang api LPG dengan $T_{out} = 33,4$ °C. Dan ini sesuai dengan teori, bahwa panjang nyala api difusi sangat berpengaruh pada kecepatan pembakaran (*Burning Velocity*) dari proses pembakaran dan laju aliran bahan bakar (Q_f) 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)

4.5.3 Tinggi Nyala Api

Tinggi nyala api yang terjadi merupakan hasil dari pertambahan antara tinggi *lifted flame* dan panjang nyala api. Grafik tinggi nyala api ditunjukkan pada gambar 4.4.

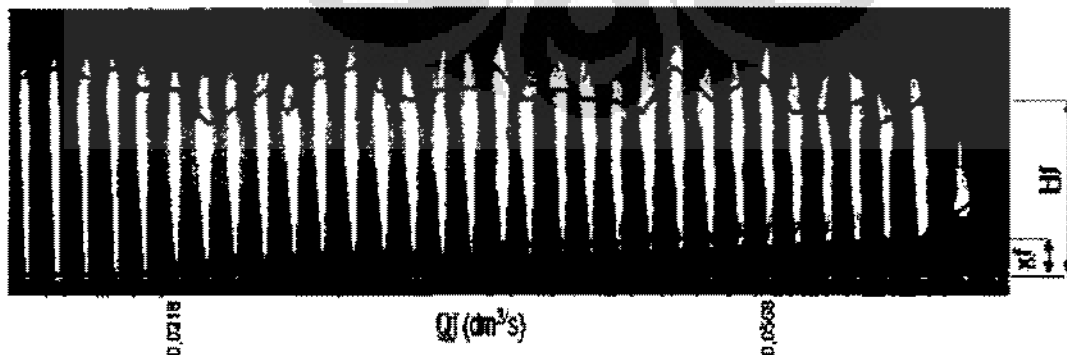


Gambar 4.4. Grafik Penambahan *Burning Load* Terhadap Tinggi Nyala Api

Dari grafik terlihat bahwa pada nilai *burning load* kurang 872,9594 MW/m², tinggi nyala api mengalami pola yang sama seperti halnya panjang nyala api. Dan pada nilai *burning load* lebih dari 1153,27 MW/m², tinggi nyala api antara LPG dengan $T_{out} = 33,4$ °C, $T_{out} = 39,8$ °C dan $T_{out} = 44,6$ °C mengalami pola yang berbeda, dikarenakan pada keadaan tersebut *lifted flame* sudah terjadi yang mengakibatkan tinggi nyala api menjadi berfluktuasi dan tidak sama tinggi pada laju aliran atau nilai *burning load* yang sama.

4.6 Analisa Gambar Hasil *Capture* Kamera Video Digital

4.6.1 Tanpa Pemanasan



Gambar 4.5 Dimensi nyala api bahan bakar gas LPG $T_{out}=33,4$ °C (tanpa pemanasan)

Gambar diatas merupakan gambar dimensi nyala api pada saat bahan bakar gas LPG tidak mengalami pemanasan ($T_{out}=33,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) dari awal nyala api sampai padamnya nyala api. *Lifted flame* mulai terjadi pada saat laju bahan bakar gas LPG (Q_f) $0,0218\text{ dm}^3/\text{s}$ dan *blow-off* terjadi pada saat $Q_f = 0,0568\text{ dm}^3/\text{s}$. Salah satu cara untuk menentukan kondisi *blow-off* dapat ditandai dengan semakin cerahnya warna biru pada *lifted flame* dan jika diamati akan terlihat adanya kenaikan *lifted flame* diikuti penurunan tinggi nyala api yang signifikan hingga padam nyala api, apabila bahan bakar gas LPG terus menerus dialirkan lebih dari $0,0568\text{ dm}^3/\text{s}$. 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

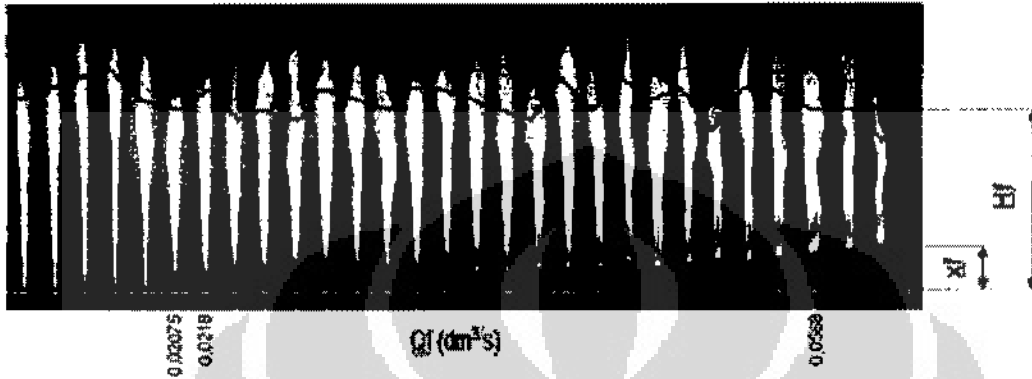
4.6.2 Dengan Pemanasan



Gambar 4.6 Dimensi nyala api bahan bakar gas LPG $T_{out} = 38,9\text{ }^{\circ}\text{C}$

Gambar diatas merupakan gambar dimensi nyala api pada saat bahan bakar gas LPG mengalami pemanasan ($T_{out}=38,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) dari awal nyala api sampai padamnya nyala api. Terlihat pada gambar diatas kondisi *lifted flame* mulai terjadi lebih awal dan *blow-off* terjadi lebih lambat dibandingkan dengan *lifted flame* dan *blow-off* nyala api bahan bakar gas LPG tanpa pemanasan, yaitu *lifted flame* terjadi pada saat laju bahan bakar gas LPG (Q_f) $0,0204\text{ dm}^3/\text{s}$ dan *blow-off* terjadi pada

saat $Q_f = 0,06205 \text{ dm}^3/\text{s}$. Ini diakibatkan berat jenis dari bahan bakar yang telah lebih dahulu dipanaskan akan lebih ringan dibandingkan dengan bahan bakar yang tidak dipanaskan. Sehingga menyebabkan fenomena *lifted flame* lebih mudah terjadi.



Gambar 4.7 Dimensi nyala api bahan bakar gas LPG $T_{out} = 46,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Gambar diatas merupakan gambar dimensi nyala api pada saat bahan bakar gas LPG mengalami pemanasan ($T_{out} = 46,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$) dari awal nyala api sampai padamnya nyala api. Terlihat pada gambar diatas kondisi *lifted flame* mulai terjadi lebih awal dibandingkan *lifted flame* nyala api bahan bakar gas LPG tanpa pemanasan, yaitu pada $Q_f = 0,02075 \text{ dm}^3/\text{s}$. Tetapi kondisi *blow-off* pada gambar 4.7 sama dengan kondisi *blow-off* nyala api bahan bakar gas LPG tanpa pemanasan $Q_f = 0,0568 \text{ dm}^3/\text{s}$. Penyebab kelainan (anomali) ini dijelaskan pada point 4.6.

4.7 Temperature Non Dimensional (T^*)

Pada penelitian ini dicoba mencari *temperature non dimensional* (T^*) dari penelitian yang telah dilakukan yaitu T^* adalah perbandingan antara temperatur gas LPG saat sebelum masuk ke dalam nosel bunsen burner (T_{out} atau T aktual) dengan temperatur campuran *boiling point* gas LPG. Dibawah ini adalah contoh perhitungan T^* untuk bahan bakar gas LPG dengan pemanasan $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dan parameter temperatur *thermal bath* dibuat konstan sedangkan laju aliran gas LPG ditambah secara terus menerus dari awal proses pembakaran sampai terjadi *blow-*

off . LPG yang digunakan pada penelitian adalah terdiri dari campuran 60% Propana + 40% Butana.

Berdasarkan tabel B.1 [Lampiran 5] diperoleh :

Tboiling point Propana pada 1 atm = - 47,4 °C = 230,9 K

Tboiling point Butana pada 1 atm = - 63 °C = 210 K

Tcampuran penguapan = (60% x 230,9) + (40% x 210)
= 218,54 K

Temperatur keluar gas LPG (Tout) dengan temperatur *thermal bath* 100 °C saat *burning load* 522,74 MW/m² adalah 39,9 °C (312,9 K), jadi :

$$T^* = \frac{T_{aktual}}{T_{camp.penguapan}} \quad (4.17)$$

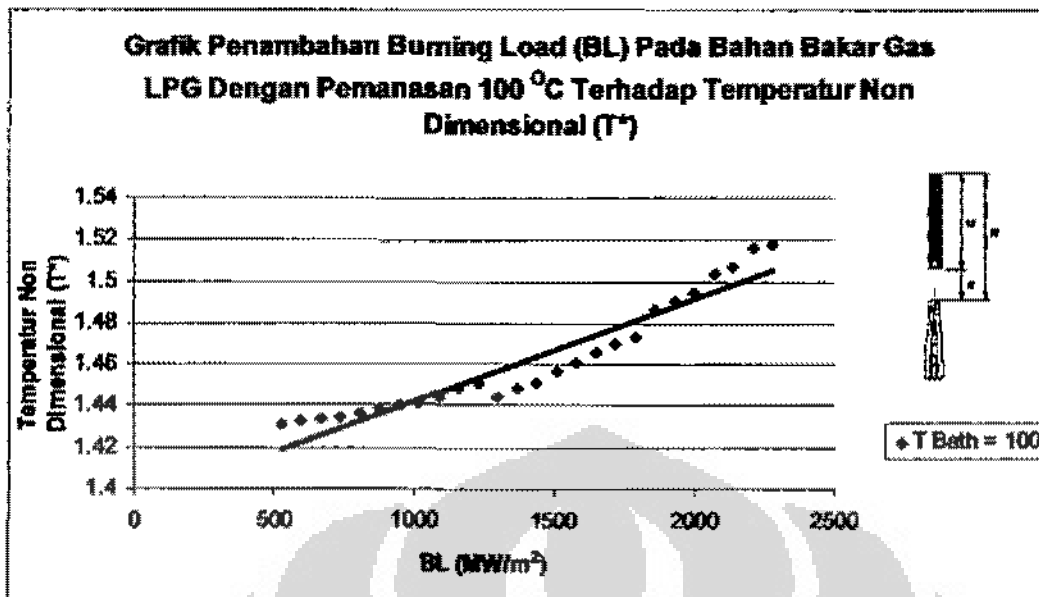
$$T^* = \frac{312,9}{218,54} = 1.43$$

Hasil perhitungan T* dari kondisi awal nyala api sampai terjadi kondisi *blow-off* diperlihatkan pada tabel dibawah ini:

Tabel 4.6. Temperatur T^* pada bahan bakar gas LPG pada pemanasan $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Qf (dm³/s)	BL (MW/m²)	Tout (OC)	T*
0.01305	522.5743275	39.8789	1.431678
0.0148	592.6513445	40.08114	1.4326034
0.01655	662.7283616	40.28338	1.4335288
0.0183	732.8053787	40.48562	1.4344542
0.02005	802.8823958	40.8901	1.436305
0.0218	872.9594129	41.3957	1.4386186
0.02355	943.03643	41.80018	1.4404694
0.0253	1013.113447	41.9013	1.4409321
0.02705	1083.190464	42.60914	1.444171
0.0288	1153.267481	43.51922	1.4483354
0.03055	1223.344498	44.12594	1.4511117
0.0323	1293.421515	42.60914	1.444171
0.03405	1363.498533	43.51922	1.4483354
0.0358	1433.57555	44.12594	1.4511117
0.03755	1503.652567	45.33938	1.4566641
0.0393	1573.729584	46.24946	1.4608285
0.04105	1643.806601	47.36178	1.4659183
0.0428	1713.883618	48.17074	1.4696199
0.04455	1783.960635	48.9797	1.4733216
0.0463	1854.037652	51.81108	1.4862774
0.04805	1924.114669	52.72114	1.4904417
0.0498	1994.191686	53.63122	1.4946061
0.05155	2064.268703	55.65362	1.5038603
0.0533	2134.345721	56.36146	1.5070992
0.05505	2204.422738	58.28274	1.5158906
0.0568	2274.499755	58.68722	1.5177415

Selanjutnya dari tabel 4.6 dapat dibuat grafik sebagai berikut :

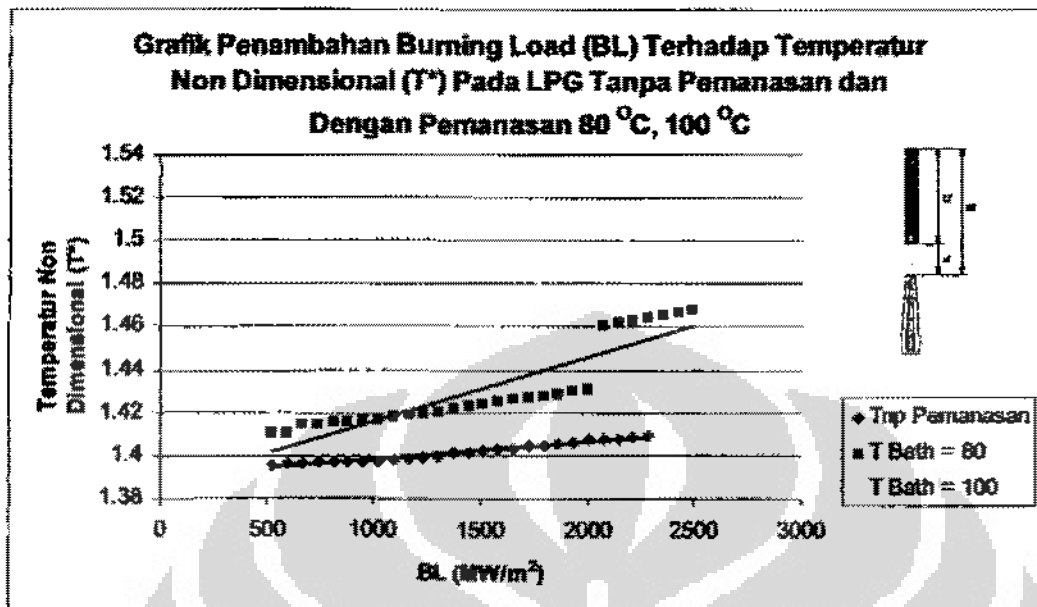


Gambar 4.8 Grafik penambahan *burning load* (BL) pada bahan bakar gas LPG dengan pemanasan 100 °C terhadap temperatur non dimensional (T*)

Dari gambar diatas, terlihat dengan semakin bertambahnya *burning load* maka temperatur non dimensional (T*) dari bahan bakar gas LPG meningkat juga secara linear. Hal ini menunjukkan proses peningkatan temperatur bahan bakar gas LPG dipengaruhi oleh angka *Reynold*, angka *Prandtl* dan angka *Nusselt* yang terjadi didalam pipa bahan bakar pada setiap penambahan *burning load* bahan bakar gas LPG dengan pemanasan. (J.P Holman, *Perpindahan Kalor*, Hal: 228 – 254)

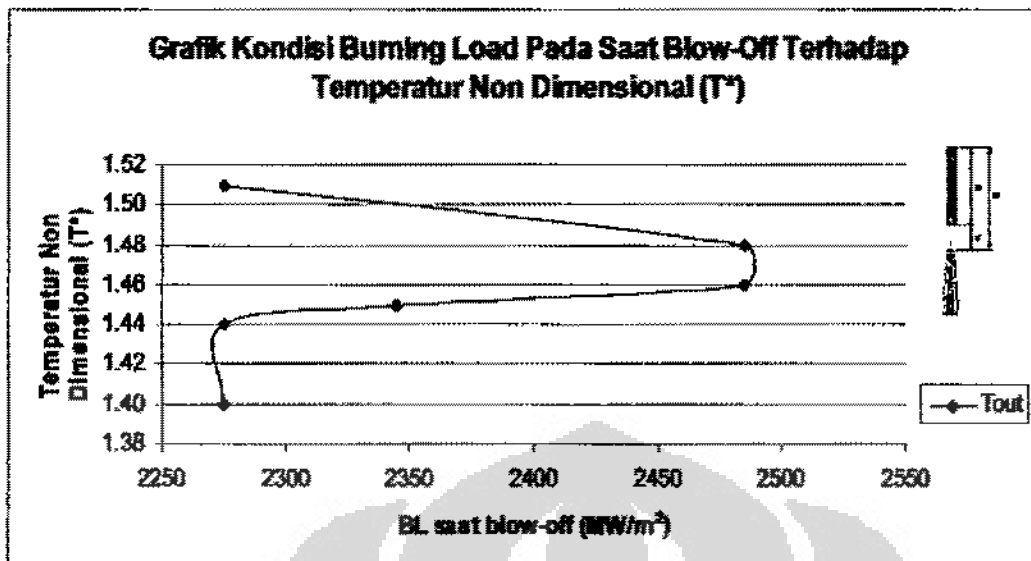
Apabila setiap tahapan penelitian dari tahapan tanpa pemanasan dan dengan pemanasan gas LPG 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C dan 100 °C dibuat tabel hasil perhitungan temperatur non dimensionalnya (T*) seperti diatas, kemudian untuk memudahkan dalam menganalisa dibuat grafik temperatur non dimensional (T*) terhadap penambahan *burning load* (BL) pada kondisi bahan bakar gas LPG tanpa pemanasan dan dengan pemanasan 80 °C, 100 °C seperti ditunjukkan gambar 4.9 dibawah ini. Dari gambar tersebut akan semakin jelas terlihat pengaruh dari angka *Reynold*, angka *Prandtl* dan angka *Nusselt* dalam proses peningkatan temperatur bahan bakar gas LPG yang mengalir didalam pipa bahan bakar pada setiap penambahan *burning load* bahan bakar gas LPG yang ditandai dengan adanya kesamaan tren grafik pada setiap tahapan penelitian, yaitu

temperatur non dimensional (T^*) akan meningkat dengan bertambahnya *burning load* bahan bakar gas LPG.



Gambar 4.9 Grafik penambahan burning load (BL) terhadap temperatur Non Dimensional (T^*) pada LPG tanpa pemanasan dan dengan pemanasan 80 °C, 100 °C

Dari tabel hasil perhitungan temperatur non dimensionalnya (T^*) setiap tahapan penelitian dari tahapan tanpa pemanasan dan dengan pemanasan gas LPG 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C dan 100 °C yang dibuat seperti contoh tabel 4.6, selanjutnya setiap tahapan penelitian tersebut diambil *temperatur non dimensional* dan *burning load* pada saat terjadi kondisi *blow-off*, maka kita akan mendapatkan grafik hubungan *temperature non dimensional* (T^*) dengan *burning load* (BL) saat terjadi *blow-off* seperti dibawah ini:



Gambar 4.10 Grafik kondisi *burning load* (BL) pada saat terjadi *blow-off* terhadap temperatur non dimensional (T^*)

Dari gambar 4.10 dapat dilihat bahwa pada bahan bakar gas LPG dengan temperature (T^*) = 1,402 (LPG tanpa pemanasan) dan T^* = 1,44 (LPG dengan pemanasan 60 °C), peristiwa *blow-off* terjadi di *burning load* (BL = 2274,5 MW/m^2). Dengan semakin dipanaskannya bahan bakar gas LPG, peristiwa *blow-off* semakin lambat terjadi yaitu mulai T^* = 1,45 (LPG dengan pemanasan 70 °C dan BL=2344,57 MW/m^2) hingga pada bahan bakar gas LPG dengan T^* = 1,46 (LPG dengan pemanasan 80 °C dan BL = 2484,74 MW/m^2). Selanjutnya pada bahan bakar gas LPG dengan T^* = 1,48 (LPG dengan pemanasan 90 °C) peristiwa *blow-off* terjadi saat *burning load* yang sama dengan bahan baker gas LPG dengan T^* = 1,46 (BL = 2484,74 MW/m^2). Tetapi pada bahan bakar gas LPG dengan T^* = 1,51 (LPG dengan pemanasan 100 °C) peristiwa *blow-off* terjadi saat *burning load* yang sama dengan bahan bakar gas LPG T^* = 1,402, yaitu BL = 2274,5 MW/m^2 .

Hal ini karena viskositas bahan bakar gas LPG dengan pemanasan 100 °C berubah meningkat seiring dengan peningkatan temperature gas LPG (J.P Holman, Perpindahan Kalor, hal 251 - 255) yang mengakibatkan sifat kohesi bahan bakar gas LPG terhadap dinding pipa meningkat dan menyebabkan bahan bakar gas LPG yang telah dipanaskan memiliki angka Reynold yang semakin besar bila dibandingkan dengan bahan bakar LPG dengan pemanasan 60 °C, 70 °C, 80 °C dan 90 °C. Sehingga waktu untuk bereaksi dengan udara luar sebelum

proses pembakaran menjadi lebih pendek, Kemampuan dari bahan bakar gas LPG dengan pemanasan $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ untuk mempertahankan nyala api di atas *burning load* $2274,5\text{ MW/m}^2$ pada penelitian ini menjadi berkurang .

Stabilitas nyala api dapat didefinisikan sebagai suatu kondisi campuran bahan bakar dan udara, yang dapat menjaga nyala api sampai dengan padamnya nyala api. Pada penelitian ini stabilitas nyala api ditandai dengan meningkatkan temperature bahan bakar gas LPG maka *lifted flame* lebih cepat terjadi dan kondisi *blow-off* lebih lambat terjadi dibandingkan bahan bakar gas LPG tanpa pemanasan sehingga penulis mengambil kesimpulan, kestabilan nyala api difusi pada penelitian ini diperoleh saat bahan bakar LPG dengan pemanasan $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $90\text{ }^{\circ}\text{C}$.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

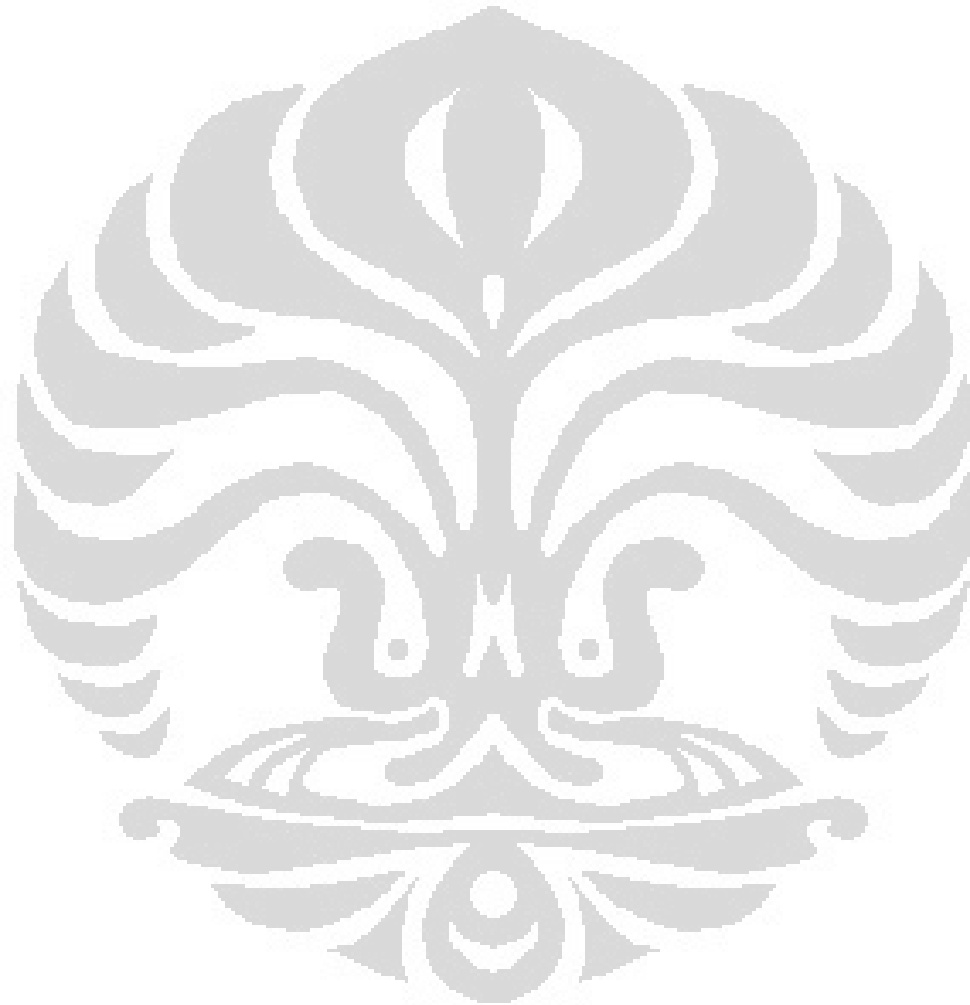
5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

1. Temperatur gas LPG (Tout) yang didapat setelah dipanaskan adalah 37,5°C, 38,7 °C, 39,8 °C, 43,1 °C, 46,6 °C, dengan suhu minyak nabati sebagai medium kerja yang dipanaskan adalah 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C dan 100 °C.
2. Jarak *lifted flame* akan mengalami penurunan dengan meningkatkan temperatur bahan bakar LPG yaitu pada temperature gas LPG Tout = 37,5 °C, dan Tout = 38,7 °C. Tetapi seiring ditingkatnya temperature LPG Tout = 39,8 °C dan Tout = 43,1 °C, jarak *lifted flame* meningkat kembali. Bahkan pada saat temperature LPG Tout = 46,6 °C, jarak *lifted flamenya* mendekati jarak *lifted flame* bahan bakar LPG tanpa pemanasan. Fenomena ini akan lebih terlihat pada gambar 4.3
3. Dengan meningkatkan temperature bahan bakar LPG, maka fenomena terjadinya *lifted flame* timbul lebih cepat yaitu terjadi pada Tout = 39,8 – 46,6 °C.
4. Dengan meningkatnya temperatur bahan bakar LPG, fenomena *blow-off* timbul lebih lama yaitu pada temperatur bahan bakar Tout = 39,8 °C dan 43,1 °C. Tetapi pada temperatur bahan bakar Tout = 46,6 °C fenomena *blow-off* kembali timbul pada nilai *burning load* yang sama dengan nilai *burning load* bahan bakar LPG Tout = 33,4 °C. (BL = 2274,5 MW/m²)
5. Stabilitas nyala api diperoleh saat bahan bakar LPG dengan pemanasan 80 °C dan 90 °C.
6. Secara visual, kondisi nyala api saat bahan bakar LPG tanpa pemanasan banyak timbul asap dan jelaga. Tetapi ketika bahan bakar LPG mendapat pemanasan, kondisi api menjadi lebih stabil dan berkurang jelaganya (*soot*).

5.2. Saran

1. Menggunakan thermal bath dan medium kerja lain yang mempunyai titik didih (*Boiling Point*) lebih tinggi untuk dapat mencapai suhu pemanasan yang lebih tinggi.
2. Menggunakan bahan isolator panas lain yang lebih baik untuk menyelubungi selang - selang yang digunakan dalam penelitian.



DAFTAR ACUAN

- [1] Eduardo Fernandez-Tarrazo, et al, *Liftoff and blowoff diffusion flame between parallel streams of fuel and air*, Combustion and Flame 144, (2006), hal 261 -- 276
- [2] Mark A.Mikofsi, et al, *Flame height measurement of laminar inverse diffusion flames*, Combustion and Flame 146, (2006)
- [3] Manav Tyagi, et al, *Oscillatory response of laminar inverse diffusion flames analytical and numerical study*, Combustion and Flame 149 (2007)
- [4] Sharma, SP., Chander Mohon, "*Fuel and Combustion*, (New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1984), hal. 148-149.
- [5] I Made Kartika Dhiputra, Djukarna, *Analisis Perubahan Sudut Semburan dan Rasio Udara-Bahan bakar (AFR) Terhadap Panjang Api Burner Tipe Jet Mising Combustor*, Thesis, Program Pasca Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2003, hal. 29.
- [6] 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 42.
- [7] Kenneth K. Kuo, *Principles of Combustion* (New York: John Wiley & Sons, 1986), hal. 347-348.
- [8] Sharma, SP., Chander Mohon, "*Fuel and Combustion*, (New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1984) hal. 300-303.
- [9] Irvin Glassman, *Combustion*, (New York: Academic Press Inc., 1977. hal. 158-159.
- [11] SP Sharma, Chander Mohan, *Fuels and Combustion* (Bombay: Tata McGraw-Hill,1984), hal. 301
- [12] SP Sharma, Chander Mohan, *Fuels and Combustion*, (Bombay: Tata McGraw-Hill,1984)
- [13] SP Sharma, Chander Mohan, *Fuels and Combustion*, Bombay: Tata McGraw-Hill,1984.
- [14] J.F. Griffiths, J.A.Barnard, *Flame and Combustion*, Third edition, 1995, hal. 41

- [15] Roger A. Strehlow, *Combustion Fundamentals Urbana*: Tata McGraw-Hill, 1985
- [16] James R. Welty et. al., *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, Third Edition, (New York: Jhon Wiley & Sons, Inc, 1984), hal. 477.
- [17] R. Byron Bird, et. al., *Transport Phenomena*, (New York: Jhon Wiley & Sons, Inc, 1960), hal. 477
- [18] Sharma, SP., Chander Mohon, "*Fuel and Combustion*, (New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1984), hal.182-183
- [19] Roger A. Strehlow, *Combustion Fundamentals*, (New York: McGraw-Hill Book Company, 1985), hal. 263
- [20] I Made Kartika Dhiputra, Tri Nugroho, *Penelitian Perubahan Ketebalan Preheat Zone Nyala Api Difusi pada kondisi Lifted Flame Tetap Akibat Variasi Laju Aliran Bahan Bakar Gas Propana*, Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2007/2008, hal. 30.
- [21] Sharma, SP., Chander Mohon, "*Fuel and Combustion*, (New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1984), hal.183-184
- [22] Sharma, SP., Chander Mohon, "*Fuel and Combustion*, (New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1984), hal.213-215
- [23] Roger A. Strehlow, *Combustion Fundamentals*, (New York: McGraw-Hill Book Company, 1985), hal. 260
- [24] Kenneth K. Kuo, *Principles of Combustion* (New York: John Wiley & Sons, 1986), hal. 406-408.
- [25] Kenneth K. Kuo, *Principles of Combustion*, (New York: John Wiley & Sons, 1986), hal. 408-409.
- [26] Sharma, SP., Chander Mohon, "*Fuel and Combustion*, (New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1984), hal.255-256.
- [27] Stephen R. Turns, *An Introduction to Combustion Concepts and Applications* (Pensylvania, 1996), hal. 246

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.
- Holman, J.P, *Heat Transfer, Sixth Edition* (McGraw-Hill, Ltd, 1986)
- 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 = 10³ centipoise = 10⁶ micropoise.

Lampiran2 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_I^{vol}	Q_H^m	Q_I^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

Lampiran 3 Propertis Udara dan LPG (Propane (C₃H₈) dan Butana (C₄H₁₀))

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^4, \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	$\eta \cdot 10^4, \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	Pr	$\nu \cdot 10^6, \text{m}^2/\text{s}$	$c_p, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	$\frac{c_p}{c_v} = k$	$\alpha \cdot 10^4, \text{m}^2/\text{h}$	$\rho, \text{kg}/\text{m}^3$
<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

Lampiran 4

	$\lambda \cdot 10^3$ W/m \cdot °C	$\eta \cdot 10^3$ N \cdot s/m 2	P_r	$\nu \cdot 10^4$ m 2 /s	c_p kJ/(kg \cdot °C)	$\frac{c_p}{c_v} = k$	$\mu \cdot 10^2$ m 2 /h	ρ kg/m 3
Butane (C₄H₁₀)								
	13.3	6.84	0.821	2.63	1.5918	1.097	1.16	2.593
	23.5	9.26	0.798	4.87	2.0273	1.075	2.20	1.90
	36.5	11.67	0.784	7.78	2.4556	1.061	3.57	1.50
	51.9	14.02	0.761	11.3	2.8149	1.052	5.37	1.24
	69.8	16.38	0.734	15.6	3.1292	1.046	7.64	1.05
	90.2	18.73	0.706	20.5	3.4043	1.043	10.4	0.916
	113.0	21.08	0.679	26.1	3.6442	1.040	13.7	0.812
Ethane (C₂H₆)								
Propane (C₃H₈)								
0	15.2	7.50	0.762	3.81	1.5495	1.138	1.80	1.90
100	26.3	10.00	0.768	6.94	2.0168	1.102	3.26	1.40
200	40.1	12.45	0.763	10.9	2.4581	1.083	5.17	1.10
300	56.2	14.81	0.748	15.8	2.8345	1.070	7.61	0.90
400	74.8	17.16	0.727	21.6	3.1610	1.062	10.7	0.75
500	95.6	19.42	0.700	28.2	3.4487	1.057	14.4	0.65
600	118.6	21.77	0.678	35.6	3.6974	1.053	18.8	0.60

Lampiran 5

TABLE B.1
Selected properties of hydrocarbon fuels: enthalpy of formation,^a Gibbs function of formation,^a entropy,^a and higher and lower heating values all at 298.15 K and 1 atm; boiling points^b and latent heat of vaporization^c at 1 atm; constant-pressure adiabatic flame temperature at 1 atm;^d liquid density^e

Formula	Fuel	Mol. wt. (kg/kmol)	h_f° (kJ/kmol)	g_f° (kJ/kmol)	S° (kJ/kmol-K)	HHV ^f (kJ/kg)	LHV ^f (kJ/kg)	Boiling pt. (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	T_{ad}^1 (K)	ρ_{liq}^e (kg/m ³)
CH ₄	Methane	16.043	-74,831	-50,794	186.188	55,528	50,016	-164	509	2226	300
C ₂ H ₂	Acetylene	26.038	226,748	209,200	200.819	49,923	48,225	-84	—	2539	—
C ₂ H ₄	Ethene	28.054	52,283	68,124	219.827	50,313	47,161	-103.7	—	2369	—
C ₂ H ₆	Ethane	30.069	-84,667	-32,886	229.492	51,901	47,489	-88.6	488	2259	370
C ₃ H ₈	Propane	44.096	-103,847	-23,489	269.910	50,368	46,357	-42.1	424	2267	500
C ₄ H ₈	1-Butene	56.107	1,172	72,036	307.440	48,471	45,319	-63	391	2322	595
C ₄ H ₁₀	n-Butane	58.123	-124,733	-15,707	310.034	49,546	45,742	-0.5	386	2270	579
C ₅ H ₁₀	1-Pentene	70.134	-20,920	78,605	347.607	48,152	45,000	30	358	2314	641
C ₅ H ₁₂	n-Pentane	72.150	-146,440	-8,201	349.402	49,032	45,355	36.1	358	2272	626
C ₆ H ₆	Benzene	78.113	82,927	129,658	269.199	42,277	40,579	80.1	393	2342	879
C ₆ H ₁₂	1-Hexane	84.161	-41,673	87,027	385.974	47,953	44,803	63.4	335	2308	673
C ₆ H ₁₄	n-Hexane	86.177	-167,193	209	386.811	48,696	45,105	69	335	2273	659
C ₇ H ₁₄	1-Heptene	98.188	-62,132	95,563	424.383	47,817	44,665	93.6	—	2303	—
C ₇ H ₁₆	n-Heptane	100.203	-187,820	8,745	423.262	48,456	44,926	98.4	316	2274	684
C ₈ H ₁₆	1-Octane	112.214	-82,927	104,140	462.792	47,712	44,560	121.3	—	2302	—
C ₈ H ₁₈	n-Octane	114.230	-208,447	17,322	463.671	48,275	44,791	125.7	300	2275	703
C ₉ H ₁₈	1-Nonane	126.241	-103,512	112,717	501.243	47,631	44,478	—	—	2300	—
C ₉ H ₂₀	n-Nonane	128.257	-229,032	25,857	502.080	48,134	44,686	150.8	293	2276	718
C ₁₀ H ₂₀	1-Decane	140.268	-124,139	121,394	539.652	47,565	44,413	170.6	—	2298	—
C ₁₀ H ₂₂	n-Decane	142.284	-249,639	34,434	540.531	48,020	44,602	174.1	277	2277	730
C ₁₁ H ₂₂	1-Undecane	154.295	-144,766	129,830	578.061	47,512	44,360	—	—	2296	—
C ₁₁ H ₂₄	n-Undecane	156.311	-270,286	43,012	578.940	47,926	44,532	195.9	265	2277	740

ANSI-HF-2005

Lampiran 6 Tabel Hasil Perhitungan Temperatur Non Dimensional (T*)

Qf (dm ³ /s)	BL (MW/m ²)	Tanpa Pemanasan		T Bath = 60 °C		T Bath = 70 °C		T Bath = 80 °C		T Bath = 90 °C		T Bath = 100 °C	
		Tout (°C)	T*	Tout (°C)	T*	Tout (°C)	T*	Tout (°C)	T*	Tout (°C)	T*	Tout (°C)	T*
0.01305	522.5743	32.09266	1.3960495	33.91282	1.40438	34.51954	1.4072	35.22738	1.4104	37.14866	1.4192	39.8789	1.43168
0.0148	592.6513	32.2949	1.3969749	34.01394	1.40484	34.3173	1.4062	35.22738	1.4104	37.14866	1.4192	40.08114	1.4326
0.01655	662.7284	32.2949	1.3969749	34.01394	1.40484	34.41842	1.4067	36.03634	1.4141	37.24978	1.4196	40.28338	1.43353
0.0183	732.8054	32.39602	1.3974376	34.11506	1.4053	34.51954	1.4072	36.03634	1.4141	37.3509	1.4201	40.48562	1.43445
0.02005	802.8824	32.39602	1.3974376	34.3173	1.40623	34.62066	1.4076	36.3397	1.4155	37.65426	1.4215	40.8901	1.43631
0.0218	872.9594	32.39602	1.3974376	34.92402	1.40901	34.11506	1.4053	36.44082	1.4159	37.95762	1.4229	41.3957	1.43862
0.02355	943.0364	32.49714	1.3979003	35.22738	1.41039	34.72178	1.4081	36.54194	1.4164	38.3621	1.4247	41.80018	1.44047
0.0253	1013.113	32.49714	1.3979003	35.53074	1.41178	35.42962	1.4113	36.64306	1.4169	38.8677	1.4271	41.9013	1.44093
0.02705	1083.19	32.59826	1.398363	35.73298	1.41271	35.8341	1.4132	36.94642	1.4183	39.47442	1.4298	42.60914	1.44417
0.0288	1153.267	32.69938	1.3988258	36.03634	1.4141	36.13746	1.4146	37.14866	1.4192	39.67666	1.4308	43.51922	1.44834
0.03055	1223.344	32.8005	1.3992885	36.13746	1.41456	36.74418	1.4173	37.24978	1.4196	40.18226	1.4331	44.12594	1.45111
0.0323	1293.422	33.00274	1.4002139	36.23858	1.41502	37.3509	1.4201	37.45202	1.4206	40.68786	1.4354	42.60914	1.44417
0.03405	1363.499	33.20498	1.4011393	36.64306	1.41687	37.75538	1.422	37.75538	1.422	41.69906	1.44	43.51922	1.44834
0.0358	1433.576	33.3061	1.401602	36.94642	1.41826	38.46322	1.4252	37.95762	1.4229	41.80018	1.4405	44.12594	1.45111
0.03755	1503.653	33.40722	1.4020647	37.3509	1.42011	39.17106	1.4284	38.15986	1.4238	42.50802	1.4437	45.33938	1.45666
0.0393	1573.73	33.60946	1.4029901	37.8565	1.42242	39.47442	1.4298	38.46322	1.4252	43.01362	1.446	46.24946	1.46083
0.04105	1643.807	33.71058	1.4034528	38.26098	1.42427	40.08114	1.4326	38.66546	1.4261	43.62034	1.4488	47.36178	1.46592
0.0428	1713.884	33.91282	1.4043782	39.06994	1.42798	40.48562	1.4345	38.8677	1.4271	44.22706	1.4516	48.17074	1.46962
0.04455	1783.961	34.01394	1.4048409	39.47442	1.42983	41.29458	1.4382	39.06994	1.428	45.13714	1.4557	48.9797	1.47332

Lampiran 7 Tabel Hasil Perhitungan Temperatur Non Dimensional (T^*) (lanjutan)

Qf (dm ³ /s)	BL (MW/m ²)	Tanpa Pemanasan		T Bath = 60 °C		T Bath = 70 °C		T Bath = 80 °C		T Bath = 90 °C		T Bath = 100 °C	
		Tout (°C)	T*	Tout (°C)	T*	Tout (°C)	T*	Tout (°C)	T*	Tout (°C)	T*	Tout (°C)	T*
0.0463	1854.038	34.11506	1.4053037	40.08114	1.4326	41.49682	1.4391	39.27218	1.4289	45.64274	1.4581	51.81106	1.48628
0.04805	1924.115	34.3173	1.4062291	40.3845	1.43399	42.00242	1.4414	39.57554	1.4303	46.55282	1.4622	52.72114	1.49044
0.0498	1984.192	34.62066	1.4076172	40.68786	1.43538	42.50802	1.4437	39.77778	1.4312	46.9573	1.4641	53.63122	1.49461
0.05155	2064.269	34.62066	1.4076172	41.19346	1.43769	43.01362	1.446	46.14834	1.4604	47.56402	1.4668	55.65362	1.50386
0.0533	2134.346	34.72178	1.4080799	41.69906	1.44001	43.51922	1.4483	46.4517	1.4618	48.4741	1.471	56.36146	1.5071
0.05505	2204.423	34.8229	1.4085426	41.9013	1.44093	43.9237	1.4502	46.75506	1.4631	48.9797	1.4733	58.28274	1.51589
0.0568	2274.5	35.02514	1.409468	42.20466	1.44232	44.22706	1.4516	46.9573	1.4641	49.4853	1.4756	58.68722	1.51774
0.05855	2344.577					44.73266	1.4539	47.26066	1.4655	50.39538	1.4798		
0.0603	2414.654							47.4629	1.4664	50.59762	1.4807		
0.06205	2484.731							47.66514	1.4673	51.0021	1.4826		