



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR BAHAN BAKAR
GAS LPG CAMPURAN TERHADAP KARAKTERISTIK
NYALA API DIFUSI PADA BURNER GAS TIPE
“EJECTED COMBUSTOR”**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

**YONATHAN
04 04 02 072X**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
DESEMBER 2008**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Yonathan
NPM : 04 04 02 072X
Tanda Tangan :
Tanggal : 9 Desember 2008

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Yonathan
NPM : 04 04 02 072X
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Pengaruh Variasi Temperatur Bahan Bakar Gas LPG
Campuran terhadap Karakteristik Nyala Api Difusi
pada Burner Gas Tipe "Ejected Combustor"

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. I Made Kartika D., Dipl.-Ing ()
Penguji : Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto, M.Eng ()
Penguji : Dr. Ir. Yulianto S. Nugroho, M.Sc ()
Penguji : Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 9 Desember 2008

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena dengan Kemurahan, Bimbingan, dan Penyertaan-Nya penelitian Skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Penelitian ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik bidang ilmu Teknik Mesin.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing, selaku pembimbing penelitian, yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi, dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik;
2. Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer, M.Eng, selaku pembimbing akademis;
3. Ayahanda, Ibunda, Yenny Susiana, Yakub serta Saudara-saudaraku lainnya yang terkasih yang telah memberikan kasih sayang, motivasi, dan dukungan moril dan materiil;
4. Ni Ketut Caturwati (mahasiswi S3), Dimitri dan Cahyo (mahasiswa S2), serta Tondy Liandro Siagian (mahasiswa S1), selaku rekan *Research Sub Group Diffusion Flame and Combustion* yang telah membantu pelaksanaan penelitian skripsi ini;
5. Amri Parlindungan Sitinjak, Irvan Apriyani Yazdi, dan Taufik selaku rekan *Research Group Flame and Combustion*;
6. Teman-teman seperjuangan angkatan 2004 yang telah memberikan dukungan dalam penelitian maupun penulisan tugas akhir ini;

Semoga penelitian ini dapat dipergunakan sebagaimana mestinya untuk kemajuan pengetahuan tentang ilmu dan teknik pembakaran.

Depok, 9 Desember 2008

Penulis

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

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

Nama : Yonathan
NPM : 04 04 02 072X
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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:

**Pengaruh Variasi Bahan Bakar Gas LPG Campuran terhadap Karakteristik
Nyala Api Difusi pada Burner Gas Tipe "Ejected Combustor"**

Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Penggunaan data dan informasi yang tercantum dalam skripsi ini untuk maksud publikasi ilmiah dan populer hanya dapat dilakukan oleh peneliti utama atau atas ijin tertulis dari peneliti utama sebagai penanggung jawab dalam penelitian "Lifted Flame" pada "Flame and Combustion Research Group".

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 9 Desember 2008
Yang menyatakan

()

ABSTRAK

Nama : Yonathan
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Pengaruh Variasi Bahan Bakar Gas LPG Campuran terhadap Karakteristik Nyala Api Difusi pada Burner Gas Tipe "Ejected Combustor"

Proses pembakaran dengan menggunakan sistem difusi banyak diterapkan dalam kegiatan industri seperti ruang bakar *boiler* pada sistem pembangkit listrik, ruang bakar peleburan baja, maupun ruang bakar pada pabrik-pabrik kimia lainnya. Pembakaran dimana temperatur bahan bakar gas yang rendah menyebabkan pengonsumsi bahan bakar yang lebih besar atau kurang efisien. Dengan meningkatkan temperatur *un-burn* (T_u) dari bahan bakar maka akan didapatkan laju reaksi yang lebih tinggi, kecepatan pembakaran yang lebih cepat dan energi minimum (E_m) yang lebih rendah.

Pada penelitian tugas akhir ini, akan diteliti pengaruh variasi temperatur bahan bakar sebelum pembakaran terhadap karakteristik nyala api difusinya dimana bahan bakar yang digunakan adalah gas LPG Campuran. Pemanasan yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan medium air. Dan 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*, dan lain-lain.

Dari analisa penelitian, diperoleh tinggi *lifted flame* yang lebih besar pada temperatur *un-burn* yang lebih tinggi, sedangkan panjang nyala-api-nya memendek dengan temperatur *un-burn* yang lebih tinggi. Sementara, ketebalan *preheat zone* menipis seiring dengan meningkatnya temperatur *un-burn* tersebut.

Kata kunci: efisien, difusi, *un-burn*, pemanasan, laju reaksi, kecepatan pembakaran, karakteristik nyala api, *lifted flame*, panjang nyala api, tinggi nyala api, *preheat zone*.

ABSTRACT

Name : Yonathan
Study Program : Mechanical Engineering
Title : Influence of Temperature Variation of LPG Mix Gas Fuel to Diffusion Flame Characteristics with "Ejected Combustor" Type

Combustion process with diffusion system had been used in many industrial process, for example: boiler in power plant, melted steel, and other chemistry. Combustion with low fuel temperature causes high consumption of fuel or can be said the combustion is not efficient. With increase the un-burn temperature of fuel causes increase the rate of reaction, high burning velocity, and low minimum energy (E_m).

In this research, the influence of temperature variation of gaseous fuel to its flame characteristics will be researched where the gaseous fuel used is LPG Mix. The preheating media used in this research is water. And combustion is done at LPG Mix fuel temperature in without preheating and with preheating temperature: 50°C, 60°C, 70°C, and 80°C. The characteristics that being watched is distance of lifted flame, length of flame (flame length), height of flame (flame height), preheat zone thickness, and others.

From research analysis, the distance of lifted flame is increase with increase the un-burn temperature, yet the length of flame is reduce with this high un-burn temperature. While, preheat zone thickness is diminish along with increase this un-burn temperature.

Key words: efficient, diffusion, un-burn, preheating, rate of reaction, burning velocity, flame characteristics, lifted flame, flame length, flame height, preheat zone.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR SIMBOL	xiv
DAFTAR ISTILAH	xvii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Metodologi Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	7
2. DASAR TEORI	9
2.1 Ruang Lingkup Pembakaran	9
2.2 Reaksi dan Proses Pembakaran	10
2.2.1 Teori Tumbukan Antar Molekul	10
2.2.2 Energi Aktivasi	11
2.2.3 Kalor Reaksi Pembakaran	12
2.2.4 Laju Reaksi	12
2.2.5 Stoikiometri Pembakaran	13
2.3 Penyalaan (<i>Ignition</i>) dan Kemampunyalaan (<i>Flammability</i>)	14
2.4 Nyala Api (<i>Flame</i>)	16
2.4.1 Klasifikasi Nyala Api	16
2.4.2 Nyala Api Difusi (<i>Diffusion Flame</i>)	16
2.4.3 Nyala Api Difusi Semburan Bahan Bakar Gas (<i>Gaseous Fuel Jet</i>)	17
2.4.3.1 Bentuk Nyala Api Semburan Bahan Bakar Gas	20
2.4.3.2 Profil Komposisi pada Nyala Api Semburan Bahan Bakar Gas	22
2.4.3.3 Profil Temperatur pada Nyala Api Semburan Bahan Bakar Gas	24
2.5 <i>Liquid Petroleum Gas</i> (LPG)	25
2.5.1 Karakteristik LPG Campuran (LPG Mix)	25
2.5.2 Proses Pembentukan LPG	27
3. METODE PENELITIAN	29
3.1 Peralatan dan Bahan Utama	30
3.2 Skema dan Proses Penelitian	32

3.2.1 Penelitian Tanpa Pemanasan	32
3.2.2 Penelitian Dengan Pemanasan.....	33
3.3 Penyetaraan Pembacaan Alat Ukur <i>Flowmeter</i> Bahan Bakar (Rotameter).....	34
3.4 Kalibrasi Alat Ukur Temperatur.....	36
4. ANALISA HASIL PENELITIAN.....	40
4.1 Stoikiometri Pembakaran	40
4.2 Viskositas gas LPG Campuran.....	41
4.3 Reynold Number Gas LPG pada Ujung Nozel	42
4.4 Beban Pembakaran (<i>Burning Load</i>).....	43
4.5 Kecepatan Pembakaran	44
4.5.1 Kecepatan Pembakaran Laminar.....	44
4.5.2 Kecepatan Pembakaran Turbulen.....	44
4.6 Analisis Tinggi <i>Lifted Flame</i> , Panjang Nyala Api, dan Tinggi Nyala Api.....	47
4.6.1 Tinggi <i>Lifted Flame</i>	50
4.6.1.1 Efek Pemanasan Pada Tinggi <i>Lifted Flame</i>	51
4.6.2 Panjang Nyala Api.....	52
4.6.2.1 Efek Pemanasan pada Panjang Nyala Api.....	54
4.6.3 Tinggi Nyala Api.....	56
4.6.3.1 Efek Pemanasan pada Tinggi Nyala Api.....	57
4.7 Temperatur Burner Tip.....	58
4.8 Ketebalan Preheat Zone.....	59
5. KESIMPULAN DAN SARAN	65
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	<i>Flowchart</i> Metodologi Penelitian.....	6
Gambar 2.1	Ilustrasi Jarak yang Dibutuhkan Antar Molekul Agar Terjadi Tumbukan.....	10
Gambar 2.2	Variasi Energi Potensial dalam Suatu Reaksi; (a) Reaksi Eksotermik, dan (b) Reaksi Endotermik.....	11
Gambar 2.3	<i>Ignition Range</i> (a) dalam T_c-X_A dan (b) dalam P_c-X_A	15
Gambar 2.4	<i>Flammability Limit</i> dalam Persen Bahan Bakar.....	16
Gambar 2.5	<i>Overventilated</i> dan <i>Underventilated</i> Nyala Api Difusi.....	18
Gambar 2.6	Profil Kecepatan atau Kosentrasi Bahan Bakar Keluar <i>Port</i>	18
Gambar 2.7	Kesamaan Profil Kecepatan atau Konsentrasi Bahan Bakar.....	19
Gambar 2.8	Kontur Iso-kecepatan atau Iso-konsentrasi Bahan Bakar.....	20
Gambar 2.9	Lokasi Percampuran Stoikiometri pada Distribusi Fraksi Massa.....	20
Gambar 2.10	Kontur Nyala Api Difusi Laminar.....	21
Gambar 2.11	Profil dalam Sebuah Nyala Api Laminar Difusi Semburan Bahan Bakar Gas.....	23
Gambar 2.12	Diagram Alir Proses Produksi LPG.....	28
Gambar 3.1	Peralatan dan Bahan Utama yang Digunakan.....	31
Gambar 3.2	Skema Penelitian.....	32
Gambar 3.3	<i>Wet Gas Meter</i>	34
Gambar 3.4	Grafik Penyetaraan Pembacaan <i>Rotameter</i> untuk LPG.....	36
Gambar 3.5	Grafik Penyetaraan Pembacaan <i>Thermostatic Bath</i>	38
Gambar 3.6	Grafik Penyetaraan Pembacaan <i>Thermocouple I</i>	38
Gambar 3.7	Grafik Penyetaraan Pembacaan <i>Thermocouple II</i>	39

Gambar 4.1	Metode untuk Menentukan Tinggi <i>Lifted Flame</i> , Panjang Nyala Api, dan Tinggi Nyala Api Menggunakan <i>Software Adobe Photoshop 7.0</i>	48
Gambar 4.2	Grafik Laju Aliran Q_f Terhadap Jarak <i>Lifted Flame</i>	50
Gambar 4.3	Foto Hasil Peng- <i>capture</i> -an pada Pemanasan 60°C	51
Gambar 4.4	Grafik <i>Lifted Flame</i> terhadap T_{out} pada <i>Flowrate</i> yang Sama....	52
Gambar 4.5	Grafik Panjang Nyala Api Terhadap Laju Aliran Gas.....	53
Gambar 4.6	Foto Hasil Peng- <i>capture</i> -an Menggunakan Kamera-vidio.....	54
Gambar 4.7	Grafik Panjang Nyala Api terhadap T_{out} pada <i>Flowrate</i> yang Sama.....	55
Gambar 4.8	Foto Nyala Api pada Laju Aliran Gas LPG yang Sama dengan Temperatur <i>un-burn</i> yang berbeda.....	56
Gambar 4.9	Grafik Tinggi Nyala Api terhadap Laju Aliran.....	56
Gambar 4.10	Grafik Tinggi Nyala Api terhadap T_{out} pada <i>Flowrate</i> yang Sama.....	57
Gambar 4.11	Grafik Temperatur <i>Burner Tip</i> terhadap T_{out} pada <i>Flowrate</i> yang Sama.....	58
Gambar 4.12	Grafik Distribusi Temperatur pada Tanpa Pemanasan.....	59
Gambar 4.13	Grafik Distribusi Temperatur pada Pemanasan 50°C	61
Gambar 4.14	Grafik Distribusi Temperatur pada Pemanasan 60°C	62
Gambar 4.15	Grafik Distribusi Temperatur pada Pemanasan 70°C	63
Gambar 4.16	Grafik Distribusi Temperatur pada Pemanasan 80°C	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Spesifikasi LPG Campuran.....	25
Tabel 3.1	Penyetaraan Pembacaan <i>Rotameter</i> Bahan Bakar LPG.....	35
Tabel 3.2	Data Kalibrasi Alat Ukur Temperatur.....	37
Tabel 4.1	Viskositas Propana dan Butana (<i>Pure Substance</i>).....	41
Tabel 4.2	Data untuk Perhitungan Viskositas Gas LPG Campuran.....	42
Tabel 4.3	Reynold <i>Number</i> Ujung Nozel dan <i>Burning Load</i> Gas LPG pada Berbagai Laju Aliran.....	43
Tabel 4.4	Data Kecepatan Pembakaran Laminar dan Turbulen pada Setiap Eksperimen.....	45
Tabel 4.5	Data Hasil Pengolahan pada <i>Software Adobe Photoshop 7.0</i> (dengan T_{out}).....	49
Tabel 4.6	Distribusi Temperatur: Jarak dari Burner <i>Tip</i> (Tanpa Pemanasan).....	60
Tabel 4.7	Tebal <i>Preheat Zone</i>	60
Tabel 4.8	Distribusi Temperatur: Jarak dari Burner <i>Tip</i> (Pemanasan 50°C).....	61
Tabel 4.9	Distribusi Temperatur: Jarak dari Burner <i>Tip</i> (Pemanasan 60°C).....	62
Tabel 4.10	Distribusi Temperatur: Jarak dari Burner <i>Tip</i> (Pemanasan 70°C).....	63
Tabel 4.11	Distribusi Temperatur: Jarak dari Burner <i>Tip</i> (Pemanasan 80°C).....	64

DAFTAR LAMPIRAN

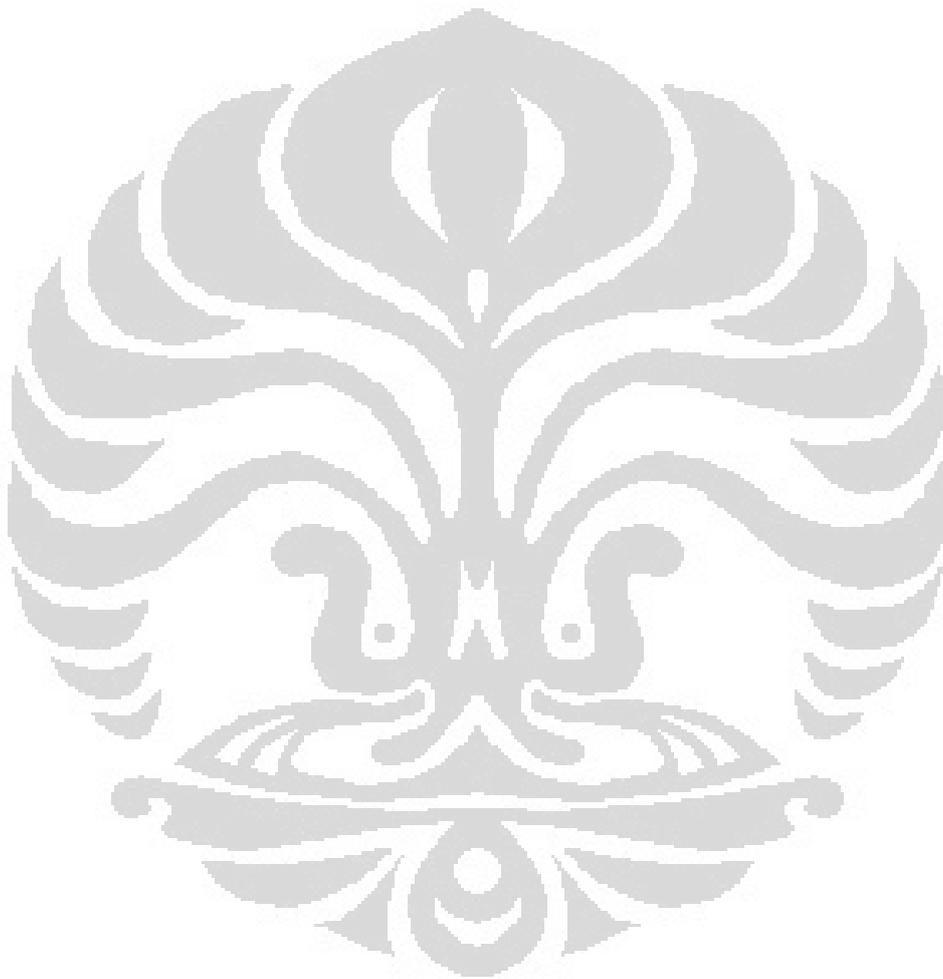
Lampiran 1	Gambar Teknik <i>Burner Ejected Combustor Type</i>	68
Lampiran 2	Gambar Teknik <i>Burner Ejected Combustor Type</i> : Bagian <i>Base</i>	69
Lampiran 3	Gambar Teknik Nozel.....	70
Lampiran 4	Gambar <i>Burner Ejected Combustor Type</i>	71
Lampiran 5	Panduan Penggunaan <i>Wet Gas Meter</i>	72
Lampiran 6	Petunjuk Penggunaan <i>Infrared Thermometer</i>	75
Lampiran 7	Viskositas Gas dan Uap.....	79
Lampiran 8	Karakteristik Bahan Bakar.....	80
Lampiran 9	<i>Properties</i> Propana (C_3H_8) dan Butana (C_4H_{10}).....	81
Lampiran 10	<i>Properties</i> Propana (C_3H_8) dan Butana (C_4H_{10}) [2].....	82

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Dimensi
A	Faktor tumbukan molekular	-
AFR	Rasio bahan bakar udara	-
AFR _{stoikiometri}	Rasio bahan bakar udara pada stoikiometri	-
B _L	Beban pembakaran	MW/m ²
C	Konsentrasi	mol/cm ³
C _p	Kapasitas panas spesifik propana pada tekanan konstan	J/kg°C
C _u	Kapasitas panas udara pada tekanan konstan	J/kg°C
C _{Mi}	Konsentrasi spesies M ke i	mol/cm ³
d ₁	Diameter nosel 1	m
d ₂	Diameter nosel 2	m
E _a	Energi aktivasi	J
f	Konsentrasi bahan bakar gas keluar port	mol/cm ³
f _{st}	Konsentrasi bahan bakar pada stoikiometri	mol/cm ³
FAR	Rasio udara bahan bakar	-
H _f	Tinggi nyala api	m
k _f	Konstanta laju reaksi	-
L _f	Panjang nyala api	m
m _p	Massa propana	kg
m _u	Massa udara	kg
N	Jumlah mol	-
P _c	Tekanan kritis	Pa
<u>P</u>	<i>Steric factor</i>	-
Q _f	Laju aliran gas	m ³ /s
r _{flame}	Jari-jari <i>flame</i>	m
Re _u	Reynold number ujung nozel	-
R	Radius Kurvatur api	m
RR	Laju reaksi	mol/cm ³ .s
R _u	Tetapan gas universal	-

S_L	Kecepatan pembakaran laminar	m/s
S_T	Kecepatan pembakaran turbulen	m/s
S_u	Kecepatan pembakaran	m/s
t_{ig}	Temperatur <i>ignition</i>	°C
T	Temperatur tertentu	K
T_u	Temperatur <i>un-burn</i> gas	°C
T_0	Temperatur <i>initial</i>	K
T_c	Temperatur kritis	K
T_f	Temperatur <i>flame</i>	K
T_∞	Temperatur <i>ambient</i>	K
u	Kecepatan bahan bakar gas keluar port	m/s
v	Kecepatan aliran gas	m/s
v_i'	Koefisien reaktan ke i	-
v_i''	Koefisien produk ke i	-
x_f	Tinggi <i>lifted flame</i>	m
x_{ig}	Jarak T_{ig}	m
Y_F	Fraksi massa bahan bakar gas	-
Y_o	Fraksi massa oksigen	-
Y_p	Fraksi massa gas propana	-
Y_u	Fraksi massa udara	-
Z	Frekuensi tumbukan molekular total	1/sekon
ρ_p	Massa jenis propana	kg/m ³
ρ_u	Massa jenis udara	kg/m ³
α	<i>Thermal diffusivity</i>	m ² /s
η_0	Ketebalan <i>preheat zone</i>	m
σ	Jari-jari molekular	nm
σ_{AB}	Jari-jari tumbukan spesies A dan B	nm
δ	Sudut antara kecepatan pembakaran dengan kecepatan aliran gas	°
μ	Pengurangan massa	-

η_0	Ketebalan <i>preheat zone</i>	m
κ	Konstanta Boltzman	-
ξ	Suatu bilangan tak berdimensi	-
ΔH_r	Perubahan entalpi reaksi	kJ
ΔH_f°	Perubahan entalpi pembentukan standar	kJ



DAFTAR ISTILAH

Istilah	Keterangan
<i>Activated complex</i>	Suatu formasi molekul transisi
<i>Blow-off</i>	Nyala api padam akibat kecepatan rata-rata bahan bakar/oksidator lebih besar dari kecepatan pembakaran
<i>Burner tip</i>	Ujung dari <i>burner</i> gas
<i>Burning load</i>	Beban pembakaran
<i>Deflagration wave</i>	Gelombang nyala dalam kisaran kecepatan <i>subsonic</i> dan perambatannya disebabkan kalor yang dilepaskan dalam suatu reaksi
<i>Detonation wave</i>	Gelombang nyala dalam kisaran kecepatan <i>supersonic</i>
<i>Diffusion flame</i>	Nyala api dimana bahan bakar dan oksidator terpisah ketika pembakaran berlangsung
<i>Diffusionally controlled</i>	Reaksi kimia yang dikontrol oleh laju difusi zat-zat pereaksi
<i>Flare</i>	Kobaran api
<i>Flammability limit</i>	Batas kemampunyaan suatu campuran bahan bakar dan oksidator
<i>Flame front</i>	Daerah atau permukaan dari suatu nyala api
<i>Flowrate</i>	Laju aliran bahan bakar gas
<i>Ignition</i>	Suatu keadaan penyalaan dimana nyala api terbentuk
<i>Ignition range</i>	Daerah penyalaan yang masih dapat memungkinkan terjadinya penyalaan
<i>Impermeable</i>	Suatu lapisan yang tidak dapat ditembus oleh suatu zat
<i>Laminar</i>	Laju aliran fluida dimana lajur alirannya teratur
<i>Lifted flame</i>	Kondisi dimana pangkal nyala api mengalami pergeseran dari mulut <i>burner</i>
<i>Overventilated</i>	Nyala api yang terbentuk akibat semburan udara <i>coflow</i> yang besar dari yang dibutuhkan pada pembakaran sempurna

<i>Port</i>	Bagian dari <i>burner</i> dimana aliran bahan bakar berada pada kondisi hulu
<i>Preheat zone</i>	Daerah pemanasan awal sebelum bahan bakar bereaksi dalam daerah reaksi
<i>Premix flame</i>	Nyala api yang terbentuk akibat bahan bakar dan oksidator bercampur terlebih dahulu sebelum proses pembakaran
<i>Reaction zone</i>	Daerah reaksi dimana reaksi kimia pembakaran berlangsung
<i>Subsonic</i>	Suatu kecepatan yang berada dalam daerah di bawah ambang pendengaran manusia
<i>Supersonic</i>	Suatu kecepatan yang berada dalam daerah di atas ambang pendengaran manusia
<i>Turbulen</i>	Laju aliran fluida dimana lajur alirannya mengalami ketidakteraturan yang dipengaruhi gaya eddy
<i>Unburned</i>	Kondisi bahan bakar gas yang belum terbakar
<i>Underventilated</i>	Nyala api yang terbentuk akibat semburan udara <i>coflow</i> yang rendah dari yang dibutuhkan pada pembakaran sempurna

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber energi primer terbesar bagi banyak industri adalah energi yang berasal dari bahan bakar fosil baik berupa minyak, gas, maupun padatan seperti batubara. Proses perolehan energi dari bahan bakar fosil ini dilakukan dengan mereaksikan bahan bakar tersebut dengan oksigen yang dikenal dengan proses pembakaran. Energi hasil dari pembakaran ini dikonversikan menjadi energi mekanik, misalnya, sebagai energi penggerak turbin pada industri PLTU dan PLTG, atau energi termal sebagai pemanasan logam pada industri metalurgi, dan lain sebagainya. Walaupun proses pembakaran dapat terjadi secara spontan (tanpa menggunakan teknik tertentu), ketersediaan bahan bakar yang terbatas dan jumlah kebutuhan akan energi ini yang terus meningkat menuntut penggunaan bahan bakar yang lebih hemat.

Krisis bahan bakar dunia dewasa ini, menuntut usaha akan peningkatan dan efisiensi sistem pembakaran. Usaha-usaha tersebut didukung oleh Pemerintah, yang tertulis dalam Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5/Tahun 2006/Bab I/Pasal 1 ayat 7, yaitu tentang konservasi energi demi penggunaan energi yang efisien dan rasional tanpa mengurangi energi yang memang seharusnya diperlukan. Penerapan konservasi energi adalah suatu upaya yang dilakukan untuk mengatasi permasalahan keterbatasan dan meningkatnya harga bahan bakar fosil.

Pada umumnya, dalam proses pembakaran yang terjadi dalam banyak industri, nyala api yang dimanfaatkan dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu sebagai berikut.

1. Nyala api premix (*premixed flame*), dimana bahan bakar dan udara dicampur terlebih dahulu pada suatu tempat sebelum dibakar.
2. Nyala api non-premix/difusi (*diffusion flame*), dimana bahan bakar dan udara tidak dicampur terlebih dahulu sebelum dibakar.

Sistem pembakaran difusi adalah sistem pembakaran yang banyak digunakan di industri-industri berdasarkan keamanan dan keandalan sistem pembakaran. Namun, penelitian sistem pembakaran nyala api difusi masih kurang mendapat perhatian dibandingkan dengan penelitian sistem pembakaran premix. Pada nyala api difusi, reaksi oksidasi terjadi pada temperatur maksimum nyala api. Sedangkan pada nyala api premix reaksi oksidasi terjadi sebelum temperatur maksimum nyala api tercapai. Laju aliran konsumsi oksigen per unit volume nyala api difusi seribu kali lebih kecil dari pada nyala api premix, oleh karena itu proses pembakaran nyala api premix lebih sempurna dibandingkan nyala api difusi.

Pada pembakaran difusi terjadi fenomena *lifted flame* yaitu terangkatnya pangkal nyala api dari mulut nozel. Fenomena *lifted flame* ini sangat mempengaruhi keandalan dan efisiensi sistem peralatan pembakaran terutama pada bagian *burner tip*. Jika jarak *lifted flame* terlalu dekat atau menempel pada *burner tip*, maka nozel akan mengalami kerusakan akibat beban temperatur tinggi dari nyala api sehingga menyebabkan keandalan sistem pembakaran menurun. Sedangkan, jika jarak *lifted flame* terlalu jauh dari *burner tip*, maka panjang nyala api berkurang sehingga sejumlah bahan bakar tidak sempat terbakar akibat *space* nyala api difusi berkurang. Sehingga perhatian yang cermat harus lebih ditekankan untuk mendapatkan jarak *lifted flame* yang efisien.

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 dan energi minimum (E_m) yang lebih rendah. Untuk itu penelitian yang akan dilakukan akan mencoba memanaskan bahan bakar gas LPG sebelum bahan bakar tersebut dibakar di dalam *burner*. Pemanasan akan dilakukan pada medium kerja. Medium kerja yang digunakan adalah air, dengan pemanasan pada medium kerja maka temperatur aliran gas yang dialirkan di dalam koil yang direndam di dalam medium kerja akan menjadi lebih tinggi. Setiap kenaikan suhu pemanasan dan setiap perubahan aliran udara akan diamati dan di-*capture* dengan menggunakan kamera.

Pembakaran dimana temperatur bahan bakar gas berada pada keadaan standarnya (temperatur ruangan), menyebabkan pembakaran yang lebih banyak mengkonsumsi bahan bakar ketimbang pada pembakaran dimana bahan bakar

mengalami proses pemanasan terlebih dahulu. Pada pembakaran ini, temperatur bahan bakar yang lebih tinggi menyebabkan kerapatan bahan bakar gas tersebut berkurang dan kecepatan aliran semurannya meningkat sehingga akan diperoleh pengkonsumsian bahan bakar gas yang lebih rendah dan penambahan pada ketinggian *lifted flame* yang terjadi.

Pada nyala api dari pembakaran pada *burner tipe ejected combustor*, bentuk dan ukuran nyala api, komposisi senyawa yang berkaitan, dan profil temperatur pada nyala api adalah faktor penting dalam menentukan daerah laju pemanasan, efisiensi peralatan pembakaran, dan menghindari resiko kebakaran. Dalam banyak aplikasi teknologi pembakaran seperti dalam tungku pembakaran boiler dan metalurgi, ruang pemanas bertemperatur tinggi, dan alat bertenaga penggerak modern, pembakaran semburan bahan bakar (*gaseous fuel jet*) terjadi dengan diameter nozel injeksi yang kecil pada kecepatan yang tinggi.

1.2 Perumusan Masalah

Untuk mencapai suatu kondisi pembakaran yang efisien, salah satu caranya adalah dengan meningkatkan laju reaksi (*rate of reaction*) dari proses pembakaran itu sendiri sehingga kecepatan pembakaran yang terjadi lebih tinggi. Peningkatan laju reaksi ini dapat diperoleh dengan meningkatkan temperatur dari bahan bakar gas yang digunakan sebelum proses pembakaran terjadi. Pada penelitian tugas akhir ini, dilakukan eksperimen terhadap hal tersebut di atas untuk memperoleh hubungan yang terjadi antara temperatur *un-burn* bahan bakar gas dan karakteristik nyala api yang dihasilkan pada pembakaran semburan bahan bakar gas (*gaseous fuel jet*) dimana bahan bakar yang digunakan pada eksperimen ini adalah gas LPG Campuran yang diproduksi oleh PT Pertamina (Persero) yang banyak digunakan pada industri-industri kecil, menengah, maupun industri besar.

1.3 Tujuan Penelitian

Kajian yang dilakukan adalah pengaruh temperatur bahan bakar gas LPG Campuran terhadap nyala-api-difusinya. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

- Mengetahui pengaruh temperatur bahan bakar gas LPG Campuran terhadap dimensi nyala api yang meliputi tinggi *lifted flame*, panjang nyala api, dan tinggi nyala api difusi
- Mengetahui pengaruh temperatur bahan bakar gas LPG Campuran terhadap temperatur *burner tip*.
- Mengetahui pengaruh laju aliran bahan bakar gas LPG campuran dan diameter nozel terhadap karakteristik nyala api.
- Mengetahui 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.
- Mengetahui pengaruh perubahan karakteristik nyala api terhadap kecepatan pembakaran.
- Mengetahui distribusi temperatur *preheat zone* dan ketebalan *preheat zone*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian sebagai berikut.

- Peng-*capture*-an nyala api dilakukan dengan menggunakan kamera digital
- Pada saat penelitian berlangsung, laju aliran bahan bakar gas sedikit lebih sering berfluktuasi dengan penyimpangan yang sangat kecil sehingga pada saat peng-*capture*-an, laju aliran dianggap konstan.
- Pada nyala api, panas yang hilang (*heat loss*) karena radiasi diabaikan.
- Pengaruh gaya grafitasi diabaikan.
- Pengaruh temperatur terhadap sifat-sifat (*properties*) komposisi (seperti *density*, tekanan, viskositas, dll.) diabaikan.

1.5 Metodologi Penelitian

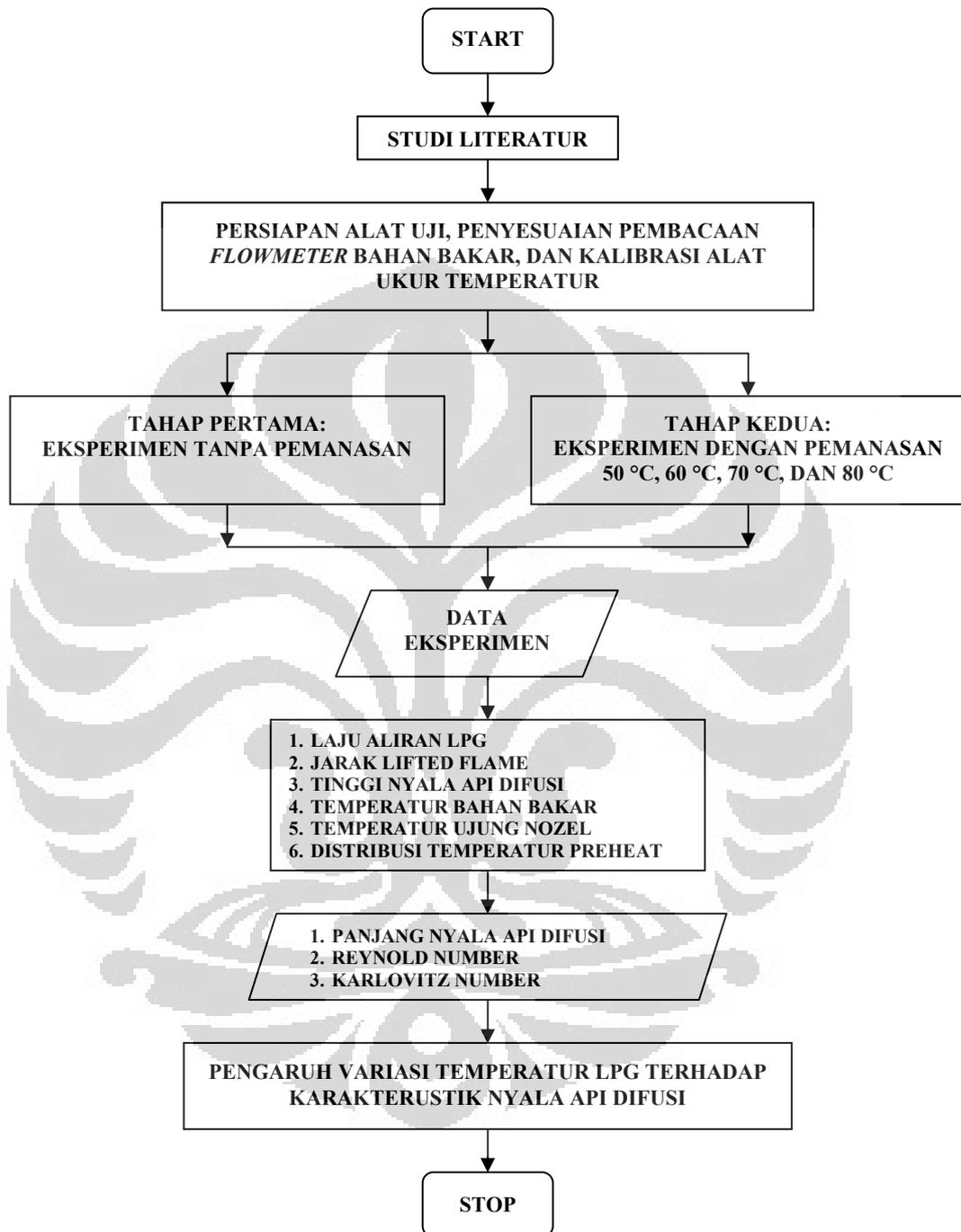
Sistematik penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

- Tahap Studi Literatur
Merupakan proses pengumpulan pengetahuan dan informasi yang berkaitan dengan materi bahasan yang berasal dari buku-buku literatur,

jurnal, dan materi bimbingan dari dosen pembimbing dan diskusi dengan *Thermodynamic Research Group Flame and Combustion* Universitas Indonesia Fakultas Teknik Departemen Teknik Mesin.

- Tahap Pra-eksperimen
Merupakan proses pembuatan alat *coil* tembaga, merancang proses eksperimen, menguji alat, kalibrasi rotameter (*flowmeter* bahan bakar) dan alat ukur temperatur, mendapatkan alat bantu lainnya, dan sebagainya.
- Tahap Eksperimen
Melakukan penelitian yang dilakukan pada laboratorium *Thermodynamic Research group Flame and Combustion* Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia dengan menggunakan bahan bakar gas LPG Campuran dengan membuat rangkaian alat uji pada yang dibahas dalam bab 3.
- Tahap Analisa Data Hasil Penelitian
Merupakan proses analisa dari data-data yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan.

Metodologi penelitian ditunjukkan pada *flowchart* di bawah ini:



Gambar 1.1. *Flowchart* Metodologi Penelitian

Penjelasan *flowchart* di atas adalah sebagai berikut.

- Pertama sekali dilakukan studi literatur yang menunjang penelitian.

- Kemudian dilakukan persiapan sebelum pengambilan data penelitian. Persiapan ini antara lain: mendapatkan peralatan yang dibutuhkan, kalibrasi *flowmeter* bahan bakar (*rotameter*) dan alat ukur temperatur.
- Selanjutnya dilakukan eksperimen, yaitu eksperimen tanpa pemanasan gas LPG keluaran tabung selanjutnya eksperimen dengan pemanasan gas LPG keluaran tabung dimana kedua rangkaian peralatan eksperimen ini berbeda.
- Dari masing-masing eksperimen, data-data yang dibutuhkan dicatat serta nyala api di-*capture* dengan kamera digital.
- 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, distribusi temperatur *preheat zone*.
- Selanjutnya data hasil olahan 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.
 - d) distribusi temperatur *preheat zone* dan ketebalan *preheat zone*.
- Kesimpulan yang didapat adalah mengenai pengaruh variasi temperatur bahan bakar gas LPG terhadap karakteristik nyala-api-difusi-nya.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan Skripsi ini adalah sebagai berikut.

a) Bab 1 Pendahuluan

Bab ini merupakan pendahuluan dari karya tulis ini yang membahas: latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah pada penelitian, metodologi penelitian, serta sistematika dari penulisan Skripsi ini.

b) Bab 2 Dasar Teori

Bab ini berisi teori penunjang yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini.

c) Bab 3 Metode Penelitian

Bab ini membahas mengenai jalannya penelitian yang dilakukan di laboratorium *Thermodynamic Research Group Flame and Combustion* Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Pembahasan ini mengenai antara lain: peralatan dan bahan yang dibutuhkan pada penelitian ini, persiapan awal penelitian, mekanisme penelitian, dan proses pengambilan data dari penelitian.

d) Bab 4 Analisa Hasil Penelitian

Bab ini membahas analisa dari hasil penelitian ini yang juga meliputi data-data hasil penelitian.

e) Bab 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini merupakan penutup dari karya tulis ini yang berisi kesimpulan dari penelitian ini serta saran-saran yang bertujuan untuk kemajuan jalannya penelitian di masa mendatang.

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Ruang Lingkup Pembakaran

Menurut *Oxford Concise Dictionary*, pembakaran (*combustion*) adalah konsumsi oleh api yakni pembentukan nyala dan panas (*heat*) melalui kombinasi kimia; menurut *Merriam Webster's Dictionary*, pembakaran merupakan laju oksidasi yang sangat cepat yang menghasilkan panas atau panas dan cahaya; menurut *Sci-Tech Encyclopedia*, pembakaran adalah pengonsumsiannya suatu substansi baik dalam bentuk gas (*gaseous*), cairan (*liquid*), ataupun padatan (*solid*); menurut *Columbia Encyclopedia*, pembakaran adalah semua hal (tidak harus melibatkan oksigen) yang berhubungan dengan reaksi kimia yang cepat dari dua atau lebih substansi yang dicirikan dengan pelepasan panas (*heat*) dan cahaya. Secara umum, pembakaran dapat didefinisikan sebagai proses reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidator yang meliputi proses oksidasi dan reduksi dengan pelepasan sejumlah energi sebagai panas (*heat*) yang signifikan.

Dalam definisi yang luas tersebut, pembakaran meliputi reaksi kimia yang bersifat eksotermik yang berlangsung dengan cepat. 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.

Nyala api menggambarkan reaksi pembakaran yang merambat melalui suatu ruang pada kecepatan *subsonic* dan disertai dengan pancaran cahaya. Ruang rambatan nyala api adalah suatu hasil dari penggabungan antara reaksi kimia, proses transportasi difusi massa, dan konduksi panas. Nyala api adalah hasil dari interaksi yang kompleks dari proses kimia dan fisika yang secara deskriptif kuantitatif berada dalam disiplin ilmu yang cukup luas, antara lain ilmu kimia, termodinamika, dinamika fluida, dan fisika molekular.

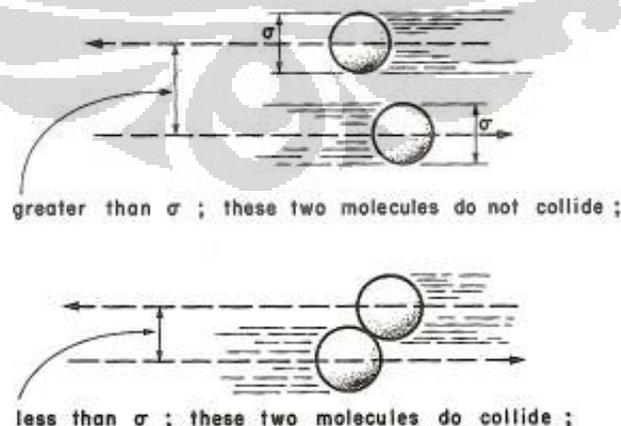
2.2 Reaksi dan Proses Pembakaran

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.

Reaksi kimia pembakaran terjadi akibat pertumbukan antar molekul pereaksi dimana hal ini dipicu oleh suatu energi termal. Frekuensi tumbukan dari molekul-molekul ini menentukan waktu berlangsungnya reaksi (laju reaksi) tersebut.

2.2.1 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.

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

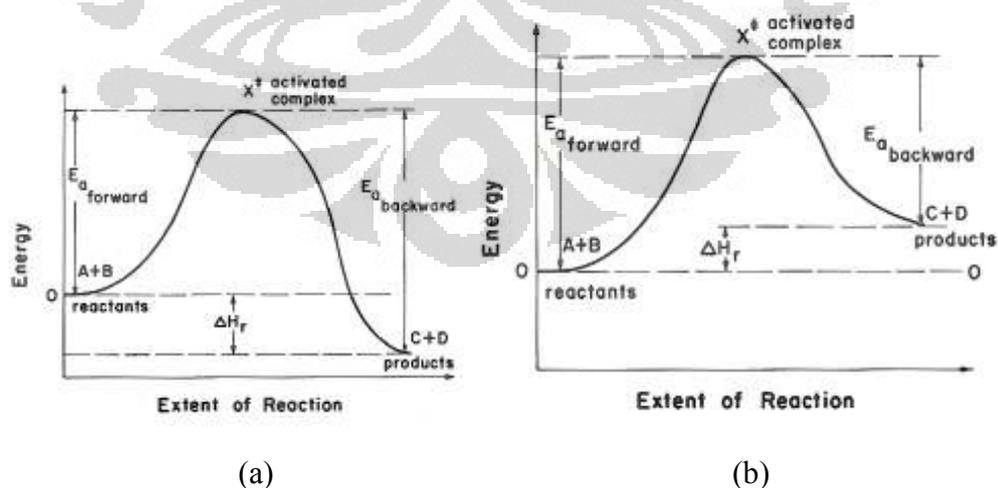
dimana κ adalah konstanta Boltzmann, σ_{AB} adalah jari-jari tumbukan spesies A dan B, C adalah konsentrasi, μ adalah pengurangan massa dari molekul A dan B yang dirumuskan dengan

$$\mu = \frac{m_A m_B}{(m_A + m_B)} \quad (2.2)$$

dimana m_A dan m_B adalah massa molekular.

2.2.2 Energi Aktivasi

Pada saat tumbukan berlangsung, terbentuk suatu formasi molekul transisi atau *activated complex* (X^\ddagger) dimana kondisi ini berada pada titik energi tertinggi dalam suatu reaksi. *Activated complex* yang terbentuk ini sangat reaktif sehingga molekul ini akan terpisah dan membentuk molekul-molekul produk. Sejumlah energi diperlukan untuk mencapai kondisi ini dan disebut dengan energi aktivasi (E_a). Jadi suatu molekul akan bereaksi jika memiliki energi yang lebih besar dari energi-aktivasi-nya atau energi aktivasi adalah energi yang dibutuhkan agar terjadi reaksi. Hal ini ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.2. Variasi Energi Potensial dalam Suatu Reaksi; (a) Reaksi Eksotermik, dan (b) Reaksi Endotermik.

Sumber: Kuo, 1986, hal. 119.

2.2.3 Kalor Reaksi Pembakaran

Pada proses pembakaran, sejumlah kalor dilepaskan yang besarnya merupakan perubahan entalpi reaksi (ΔH_r). Pelepasan kalor ini disebabkan kedudukan energi akhir reaksi (produk) lebih rendah dari kedudukan energi awalnya (sebelum terjadi tumbukan molekular). Selisih kedudukan energi awal dan akhir ini adalah perubahan entalpi reaksi tersebut (gambar 2.2.[a]). Kalor reaksi pada keadaan standar ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

$$\Delta H_r^\circ = \sum_{i=1}^N v_i'' \Delta H_{f, M_i}^\circ - \sum_{i=1}^N v_i' \Delta H_{f, M_i}^\circ \quad (2.3)$$

Dan kalor reaksi pada temperatur tertentu ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

$$\Delta H_{r,T} = \left[\sum_{i=1}^N v_i'' \Delta H_{f, M_i}^\circ - \sum_{i=1}^N v_i' \Delta H_{f, M_i}^\circ \right] + \sum_{i=1}^N v_i'' \int_{T_0}^T C_{p, M_i} dT - \sum_{i=1}^N v_i' \int_{T_0}^T C_{p, M_i} dT \quad (2.4)$$

2.2.4 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 penambahan konsentrasi zat produk. Sehingga satuan dari laju reaksi adalah mol per satuan volume per satuan waktu. Laju reaksi ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

$$RR = k_f \prod_{i=1}^N (C_{M_i})^{v_i'} \quad (2.5)$$

dimana M_i adalah senyawa kimia yang bersangkutan, v_i' adalah koefisien stoikiometri reaktan, dan k_f adalah suatu konstanta yang nilainya dapat ditentukan oleh persamaan Arrhenius, yaitu

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T}\right) \quad (2.6)$$

dengan A merupakan faktor frekuensi tumbukan molekular yang nilainya ditentukan sebagai berikut.

$$A = \sigma_{AB}^2 \left(\frac{8\pi kT}{\mu}\right)^{1/2} P \quad (2.7)$$

dimana P adalah steris faktor yang nilainya, antara 0 – 1, tergantung pada orientasi tumbukan dari molekul yang bersangkutan. Laju pengurangan konsentrasi reaktan ditentukan sebagai berikut.

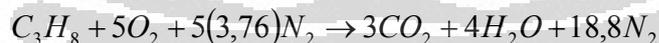
$$\frac{dC_{M_i}}{dt} = (v_i'' - v_i') RR = (v_i'' - v_i') k_f \prod_{i=1}^N (C_{M_i})^{v_i'} \quad (2.8)$$

dimana v_i'' adalah koefisien stoikiometri produk. Orde dari reaksi tersebut di tentukan oleh nilai v_i' dan orde totalnya ditentukan sebagai berikut.

$$m = \sum_{i=1}^N v_i' \quad (2.9)$$

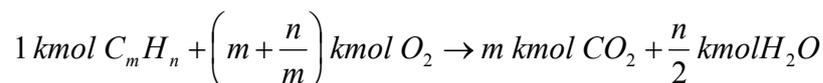
2.2.5 Stoikiometri Pembakaran

Pada proses pembakaran, bahan bakar bereaksi dengan oksigen dalam udara membentuk karbon dioksida (CO_2) dan uap air (H_2O). Sebagai contoh pembakaran propana dengan udara, reaksi stoikiometrinya adalah sebagai berikut:

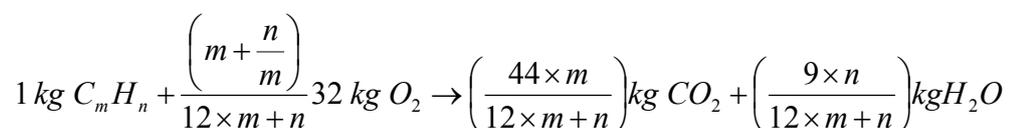


Kebutuhan oksigen pada reaksi pembakaran stoikiometri karbon dan hidrogen murni, C_nH_n , dapat ditentukan dengan metode mol atau metode kesetimbangan massa, yakni sebagai berikut:

untuk metode mol:



untuk metode kesetimbangan massa:



Hubungan antara bahan bakar dan udara dinyatakan dalam istilah ratio udara-bahan bakar (AFR) atau bahan bakar-udara (FAR). Ratio udara-bahan bakar merupakan suplai massa udara per unit massa bahan bakar, sedangkan ratio bahan bakar-udara merupakan suplai massa bahan bakar per unit massa udara atau:

$$AFR = \frac{\text{massa udara}}{\text{massa bahan bakar}} \quad (2.10)$$

dan

$$FAR = \frac{\text{massa bahan bakar}}{\text{massa udara}} \quad (2.11)$$

2.3 Penyalaan (*Ignition*) dan Kemampunyalaan (*Flammability*)

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.

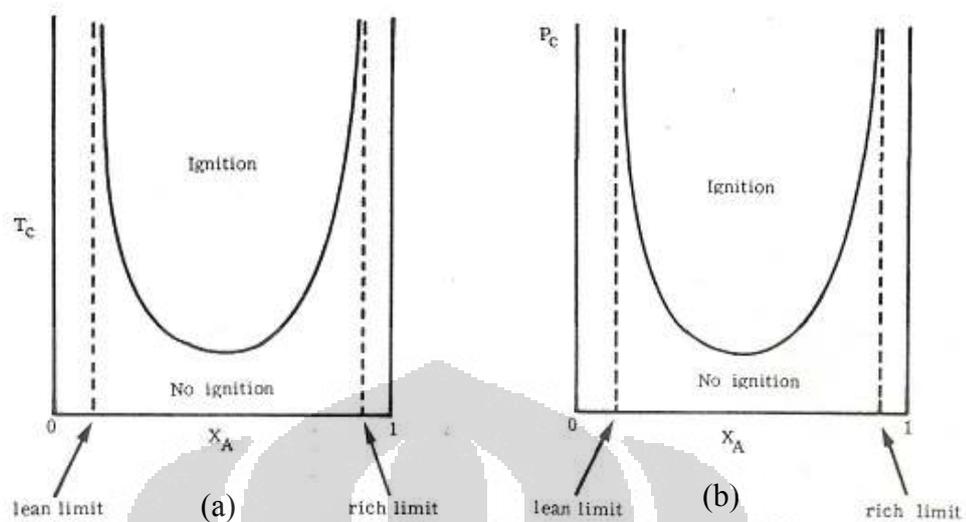
Waktu yang diperlukan dari pemanasan awal hingga terjadi *ignition* dirumuskan oleh persamaan berikut:

$$t_i \equiv \frac{\rho C T_0}{(m-1) \Delta H k_n C_{AO}^n T_0^m} \quad (2.12)$$

dan daerah penyalaan (*ignition range*) dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\ln\left(\frac{P_c}{T_c^2}\right) = \ln\left(\frac{hSR^3}{\Delta HV k_2 X_A^2 E}\right)^{1/2} + \frac{E}{2RT_c} \quad (2.13)$$

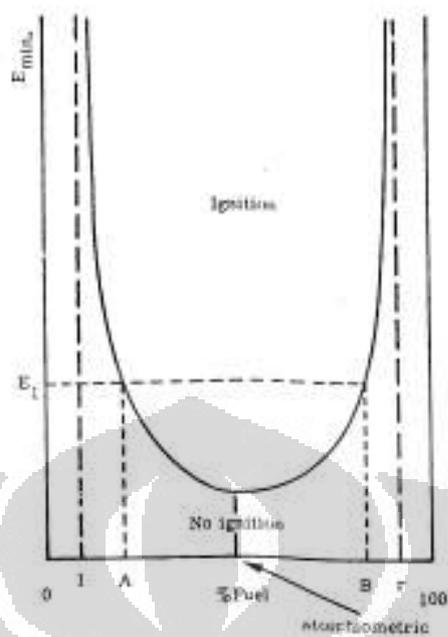
Daerah penyalaan (*ignition range*) ditunjukkan pada gambar 2.3. Pada temperatur atau tekanan kritis yang tinggi, *ignition* lebih mudah terjadi. Hal ini disebabkan pada temperatur atau tekanan yang tinggi molekul-molekul reaktan memiliki energi yang lebih besar yang mengakibatkan frekuensi tumbukan antar molekul lebih besar.



Gambar 2.3. *Ignition Range* (a) dalam T_c - X_A dan (b) dalam P_c - X_A .

Sumber: Kanury, 1975, hal. 103.

Kemampunyalaan (*flammability*) suatu campuran bahan bakar dan oksidator merupakan daerah penyalaaan (*ignition range*) yang dinyatakan dalam persen konsentrasi bahan bakar dalam oksidator. Dalam ruang lingkup pembakaran, kemampunyalaan biasanya dinyatakan dalam suatu batas-batas tertentu: batas atas suatu kemampunyalaan adalah batas konsentrasi tertinggi bahan bakar dalam oksidator yang memungkinkan terjadinya penyalaaan; batas bawah suatu kemampunyalaan adalah batas konsentrasi terendah bahan bakar dalam oksidator yang memungkinkan untuk terjadinya penyalaaan. Batas-batas kemampunyalaan ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. *Flammability Limit* dalam Persen Bahan Bakar.

Sumber: Kanury, 1975, hal. 127.

2.4 Nyala Api (*Flame*)

2.4.1 Klasifikasi Nyala Api

Secara umum, nyala api dibedakan menjadi dua jenis yaitu nyala api premix (*premixed flame*) dan nyala api non-premix (*diffusion flame*). Nyala api premix adalah nyala api yang terbentuk karena bahan bakar dan oksidator tercampur dengan baik sebelum terjadi reaksi pembakaran. Sedangkan nyala api non-premix adalah nyala api yang terbentuk akibat difusi bahan bakar dan oksidator yang berlangsung seketika itu juga.

Berdasarkan laju aliran bahan bakar gas (campuran bahan bakar dan oksidator pada nyala premix), nyala api dibedakan menjadi dua jenis yaitu nyala api laminar untuk laju aliran bahan bakar yang laminar dan nyala api turbulen untuk laju aliran yang turbulen.

2.4.2 Nyala Api Difusi (*Diffusion Flame*)

Nyala api difusi adalah nyala api yang terbentuk karena bahan bakar dan oksidator tidak bercampur terlebih dahulu sebelum reaksi pembakaran berlangsung. Hal ini mengakibatkan reaksi pembakaran lebih cepat dari difusi

antara bahan bakar dan oksidator sehingga pembakaran dikontrol oleh laju difusi kedua reaktan ini. Nyala api difusi terdiri dari daerah reaksi kimia yang tipis yang memisahkan lajur (*stream*) bahan bakar dan lajur oksidator. Kedua reaktan ini berdifusi satu sama lain akibat gradien konsentrasi yang sangat dipengaruhi oleh aliran bahan bakar dan pencampurannya.

Contoh nyala api difusi antara lain: nyala api pada lilin, kebakaran hutan, pembakaran bahan bakar dalam bentuk droplet pada mesin diesel dan turbojet, pembakaran bahan bakar gas pada kompor gas, dan lain-lain.

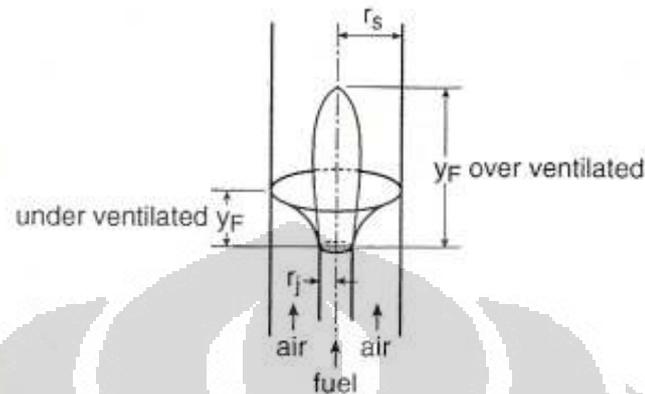
2.4.3 Nyala Api Difusi Semburan Bahan Bakar Gas (*Gaseous Fuel Jet*)

Pada pembakaran semburan bahan bakar gas (*gaseous fuel jet*), bahan bakar dalam semburan dan oksigen dalam udara saling tertransfer secara difusi. Pada daerah dimana pencampuran bahan bakar dan udara berada dalam stoikiometri, pembakaran terjadi dengan cepat (kecepatan berada dalam daerah *subsonic*). Laju reaksi pembakaran ini lebih cepat dibandingkan dengan laju difusi antara bahan bakar dan udara atau dapat dikatakan bahwa reaksi pembakaran terkontrol secara difusi (*diffusionally controlled*). Hal ini menghasilkan *deflagration* dalam bentuk suatu nyala api (difusi).

Pada nyala api difusi (*diffusion flame*) ini, daerah reaksi (*reaction zone*) bersifat seperti suatu lapisan *impermeable* terhadap bahan bakar maupun oksigen. Sehingga oksigen tidak berada pada salah satu sisi nyala api (daerah sumber bahan bakar) dan sebaliknya bahan bakar tidak berada pada sisi nyala api yang lain (daerah sumber oksigen). Pada nyala api difusi yang ideal daerah reaksi sangat tipis dan dapat diasumsikan sebagai sebuah permukaan dengan ketebalan nol (Kanury, 1975).

Burke dan Schumman (Glassman, 1977) pertama kali mengobservasi nyala api difusi bahan bakar gas dalam sebuah tabung silinder *coaxial* yang dialirkan bahan bakar dan dikelilingi oleh aliran udara dengan kecepatan yang sama. Burke dan Schumman menyatakan bahwa nyala api *overventilated* akan terbentuk jika udara suplai melebihi dari udara yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna. Di sisi lain, jika suplai udara tidak mencukupi untuk kebutuhan pembakaran sempurna, dihasilkan nyala api *underventilated*. Bentuk

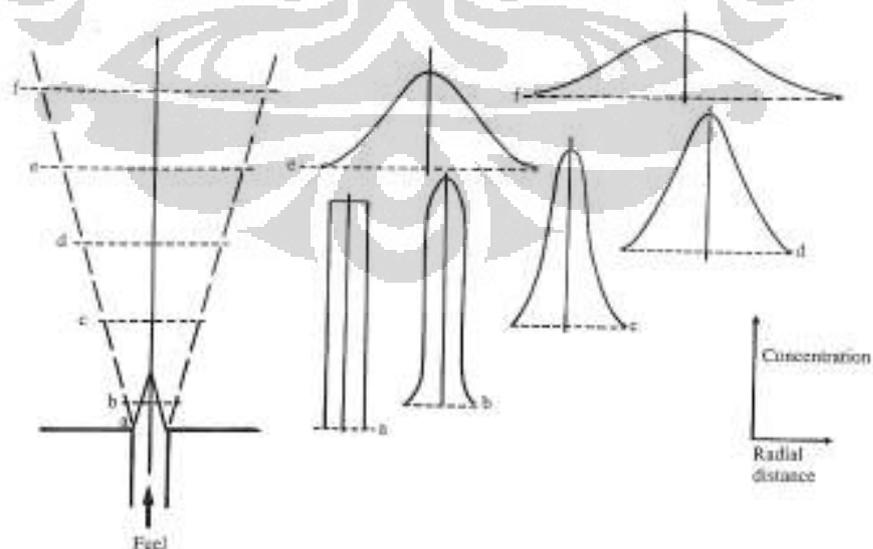
nyala api difusi yang dihasilkan dari oksigen lebih dan oksigen kurang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.5. *Overventilated* dan *Underventilated* Nyala Api Difusi.

Sumber: Glassman, 1977, hal. 234

Pada semburan bahan bakar gas keluar dari *port* berpenampang silinder, kecepatan dan konsentrasi bahan bakar berkurang, dari nilai maksimumnya pada *port*, dengan semakin jauh jaraknya dari *port* membentuk profil seperti pada gambar 2.6. Pada masing-masing profil menurut jaraknya dari port, kecepatan dan konsentrasi bahan bakar mencapai nilai tertinggi pada bagian *centerline* dan



Gambar 2.6. Profil Kecepatan atau Kosentrasi Bahan Bakar Keluar *Port*.

Sumber: Glassman, 1977, hal. 237

semakin berkurang hingga mencapai nol pada daerah pencampurannya dengan udara. Besar nilai kecepatan dan konsentrasi ini dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$u = \frac{3 I_u}{4 x} \left(1 + \frac{\xi^2}{4} \right)^{-2} \quad (2.14)$$

dan

$$f = \frac{3 I_f}{4 x} \left(1 + \frac{\xi^2}{4} \right)^{-2} \quad (2.15)$$

dimana

$$I_u = \frac{1}{\nu} \left(\frac{1}{2} u_0^2 r_0^2 \right) \quad (2.16)$$

dan

$$I_f = \frac{1}{\nu} \left(\frac{1}{2} u_0 r_0^2 \right) \quad (2.17)$$

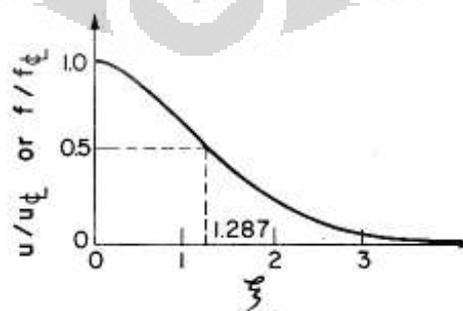
serta

$$\xi = \frac{\sqrt{3}}{8} \left(\frac{r}{d_0} \right) \left[\frac{\text{Re}_{d_0} d_0}{x} \right] \quad (2.18)$$

sehingga distribusi nilainya dalam satu profil adalah

$$\frac{u}{u_{cl}} = \frac{f}{f_{cl}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4} \xi^2 \right)^2} \quad (2.19)$$

Grafik yang diperoleh membentuk profil seperti pada gambar 2.7.



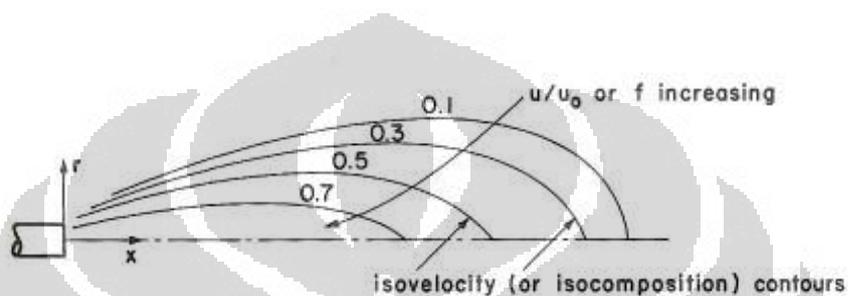
Gambar 2.7. Kesamaan Profil Kecepatan atau Konsentrasi Bahan Bakar.

Sumber: Kuo, 1986, hal. 363.

Dalam bentuk fraksinya dari kondisi awal saat keluar *port* persamaannya adalah

$$\frac{u}{u_{cl}} = \frac{f}{f_{cl}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4}\xi^2\right)^2} \quad (2.20)$$

sehingga terbentuk kontur iso-kecepatan atau iso-konsentrasi seperti pada gambar 2.8.

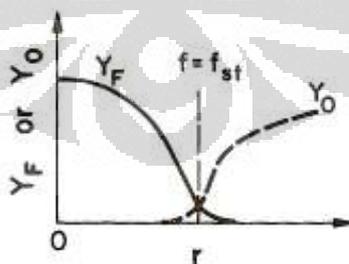


Gambar 2.8. Kontur Iso-kecepatan atau Iso-konsentrasi Bahan Bakar.

Sumber: Kuo, 1986, hal. 365.

2.4.3.1 Bentuk Nyala Api Semburan Bahan Bakar Gas

Pada setiap daerah dimana percampuran bahan bakar dan udara berada dalam keadaan stoikiometri, pembakaran terjadi. Pada prakteknya, lokasi campuran stoikiometri ini sangat sempit (Kuo, 1986) seperti ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9. Lokasi Percampuran Stoikiometri pada Distribusi Fraksi Massa.

Sumber: Kuo, 1986, hal. 369.

Daerah stoikiometri (f_{st}) ini dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$f = f_{st} = \frac{\left(\frac{F}{O}\right)_{st} Y_{O,A}}{1 + \left(\frac{F}{O}\right)_{st} Y_{O,A}} \quad (2.21)$$

Jari-jari nyala api pada suatu besaran jarak tertentu dari *port* (x), dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\frac{r_{flame}}{x} = \frac{16}{\sqrt{3} Re_{d_0}} \sqrt{\sqrt{\frac{3}{16} \frac{Re_{d_0} r_0}{x f_{st}}}} - 1 \quad (2.22)$$

Dan tinggi nyala api dapat ditentukan secara teoritis sebagai berikut:

$$L_f = \frac{u_i d_i^2}{48 v_f Y_{O_\infty}} \quad (2.23)$$

Kontur nyala api ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10. Kontur Nyala Api Difusi Laminar.

Sumber: Kuo, 1986, hal. 369.

Untuk nyala api turbulen, tinggi nyala api (secara teoritis) ditentukan sebagai berikut:

$$L_f = \frac{d_i}{24 C_f Y_{O_\infty}} \quad (2.24)$$

Berdasarkan pengamatan Hawthorne (1949), dengan melibatkan perbedaan *density*, persamaan tinggi nyala api turbulen adalah

$$\frac{L_f}{d_i} = 5,3 \left[\frac{T_f}{(1+f)T_i} \left(\frac{M_p}{M_F} + \frac{M_p}{fM_O} \right) \right]^{1/2} \quad (2.25)$$

Persamaan ini sasih untuk jangkauan yang luas dari berbagai jenis bahan bakar (Kanury, 1975, hal. 249).

2.4.3.2 Profil Komposisi pada Nyala Api Semburan Bahan Bakar Gas

Pada perpotongan melintang dalam suatu nyala api, komposisi bahan bakar, oksigen, dan produk hasil pembakaran dapat diperhitungkan berdasarkan persamaan berikut:

$$\frac{b}{b_i} = \mathfrak{R}(x, r) \quad (2.26)$$

dimana

$$\mathfrak{R}(x, r) = \left[1 + \frac{48}{\text{Re}_i} \frac{x}{d_i} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{r}{d_i} \left[1 + \frac{48}{\text{Re}_i} \frac{x}{d_i} \right]^{-1} \right) \quad (2.27)$$

Pada sisi bagian dalam nyala api ($0 \leq r \leq r_{st}$), tidak terdapat oksigen ($Y_o = 0$) sehingga persamaan 2.26 menjadi

$$\frac{Y_F + fY_{O\infty}}{1 + fY_{O\infty}} = \mathfrak{R}(x, r) \quad (2.28)$$

maka

$$Y_F = (1 + fY_{O\infty})\mathfrak{R}(x, r) - fY_{O\infty}; \quad 0 \leq |r| \leq r_c \quad (2.29)$$

Persamaan 2.29 menggambarkan profil konsentrasi bahan bakar sepanjang penampang melintang (δ hingga $-\delta$) dari nyala api.

Pada sisi bagian luar dari nyala api ($r_{st} \leq r \leq \delta$), tidak terdapat bahan bakar ($Y_F = 0$) sehingga persamaan 2.26 menjadi

$$\frac{Y_o + Y_{O\infty}}{-(1 + fY_{O\infty})/f} = \mathfrak{R}(x, r) \quad (2.30)$$

maka

$$Y_o = Y_{O\infty} - \left(\frac{1 + fY_{O\infty}}{f} \right) \mathfrak{R}(x, r); \quad r_c \leq |r| \leq \delta \quad (2.31)$$

Persamaan 2.31 menunjukkan profil konsentrasi oksigen sepanjang penampang melintang (δ hingga $-\delta$) dari nyala api. Sedangkan untuk konsentrasi produk hasil pembakaran, persamaan 2.26 pada sisi bagian luar nyala api menjadi

$$\frac{Y_F + \frac{fY_P - f(1 - Y_{O\infty})}{1 + f}}{(1 + fY_{O\infty})} = \mathfrak{R}(x, r) \quad (2.32)$$

maka

$$Y_p = \left(\frac{1 + fY_{O_\infty}}{f} \right) \mathfrak{R}(x, r) + (1 - Y_{O_\infty}); \quad r_c \leq |r| \leq \delta \quad (2.33)$$

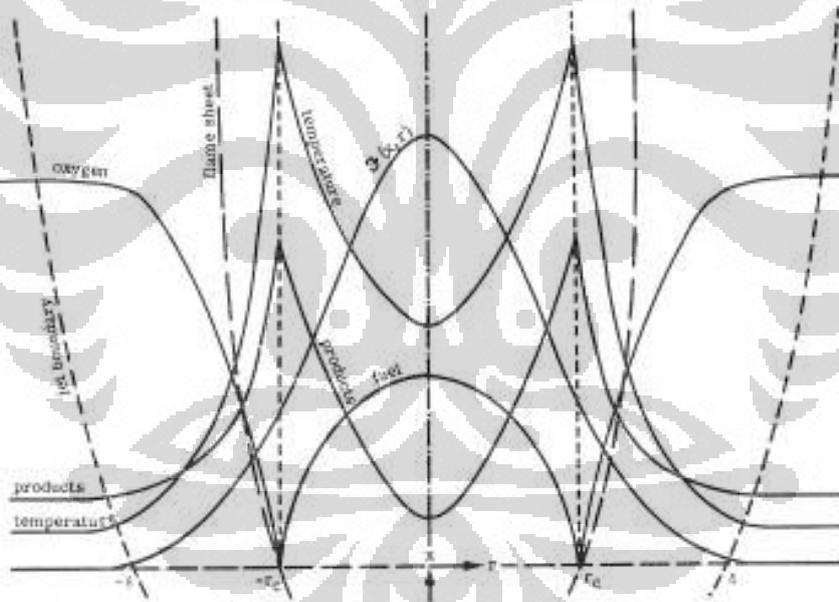
dan pada sisi bagian dalam nyala api, persamaan 2.26 menjadi

$$\frac{Y_o + \frac{Y_p}{1+f} - \frac{(1 + fY_{O_\infty})}{1+f}}{-\frac{(1 + fY_{O_\infty})}{1+f}} = \mathfrak{R}(x, r) \quad (2.34)$$

maka

$$Y_p = (1 + fY_{O_\infty})(1 - \mathfrak{R}(x, r)); \quad r_c \leq |r| \leq \delta \quad (2.35)$$

Persamaan 2.33 dan 2.35 menggambarkan profil konsentrasi produk sepanjang penampang melintang (δ hingga $-\delta$) dari nyala api. Profil komposisi ini ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11. Profil dalam Sebuah Nyala Api Laminar Difusi Semburan Bahan Bakar Gas

Sumber: Kanury, 1975, hal. 246.

2.4.3.3 Profil Temperatur pada Nyala Api Semburan Bahan Bakar Gas

Pada sisi bagian dalam nyala api, persamaan 2.26 menjadi

$$\frac{\frac{C(T - T_\infty)}{f\Delta H} + Y_O - Y_{O_\infty}}{\frac{C(T_i - T_\infty)}{f\Delta H} - Y_{O_\infty}} = \mathfrak{R}(x, r) \quad (2.36)$$

maka

$$(T - T_\infty) = \left[(T_i - T_\infty) - \frac{Y_{O_\infty} f \Delta H}{C} \right] \mathfrak{R}(x, r) + \frac{Y_{O_\infty} f \Delta H}{C}; \quad 0 \leq |r| \leq r_C \quad (2.37)$$

Pada bagian luar, persamaan 2.26 menjadi

$$\frac{\frac{C(T - T_\infty)}{\Delta H} + Y_F}{\frac{C(T_i - T_\infty)}{\Delta H} + 1} = \mathfrak{R}(x, r) \quad (2.38)$$

maka

$$(T - T_\infty) = \left[(T_i - T_\infty) + \frac{\Delta H}{C} \right] \mathfrak{R}(x, r); \quad r_C \leq |r| \leq \delta \quad (2.39)$$

Sehingga pada nyala api (daerah reaksi/*reaction zone*), temperatur ini merupakan temperatur nyala api (ditunjukkan pada gambar 2.11) yang dinyatakan pada persamaan berikut:

$$(T_C - T_\infty) = \left[(T_i - T_\infty) + \frac{\Delta H}{C} \right] \frac{fY_{O_\infty}}{1 + fY_{O_\infty}} \quad (2.40)$$

2.5 Liquid Petroleum Gas (LPG)

Liquid Petroleum Gas (LPG) merupakan bahan bakar gas yang terdiri dari beberapa senyawa hidrokarbon yaitu propana (C_3H_8), butana (C_4H_{10}), propilena, isobutana, dan butilena serta kandungan gas lain dalam jumlah kecil yaitu etana (C_2H_6), pentana (C_5H_{12}), dan beberapa senyawa sulfur. Bahan bakar LPG berasal dari hasil samping pengilangan/distilasi minyak mentah (*refining crude oil/petroleum distillation*) atau dapat juga dihasilkan dari kondensasi gas alam.

Bahan bakar LPG dalam negeri diproduksi oleh PT Pertamina (Persero) dengan nama dagang ELPIJI yang dibagi menjadi tiga jenis yaitu: LPG Campuran (LPG Mix), LPG Propana, dan LPG Butana. LPG Campuran—digunakan pada penelitian tugas akhir ini—utamanya merupakan campuran antara propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}).

2.5.1 Karakteristik LPG Campuran (LPG Mix)

Komposisi kimia LPG Campuran terbagi atas komponen utama dan komponen ikutan (*trace*). Komponen utama LPG adalah hidrokarbon: propana (C_3H_8), butana (C_4H_{10}), propilena, isobutana (C_4H_{10}), dan butilena yang memberi karakteristik fisika dari LPG. Senyawa propana dan butana berada dalam konsentrasi yang besar—sesuai dengan namanya—dengan komposisi 70 – 80 % dan 20 – 30 % dari volumenya. Komponen senyawa ikutannya (berada dalam konsentrasi kecil) adalah etana (C_2H_6) dan pentana (C_5H_{12}) serta persenyawaan sulfur: metil/etil merkaptan (RHS), hidrogen sulfida (H_2S), dan karbonil sulfida (COS). Spesifikasi LPG Campuran ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.1. Spesifikasi LPG Campuran

Sifat-sifat	Batasan		Test Method	
	Minimum	Maksimum	ASTM	Lain
Specific Gravity at 60/60 F	to be reported	to be reported	D - 1657	-
Vapour pressure 100 F, psig	-	120.00	D - 1267	-
Weathering test at 36 F, % vol	95.00	-	D - 1837	-
Copper corrosion 1 hrs, 100 F	-	ASTM No. 1	D - 1838	-

Tabel 2.1. (Lanjutan)

Total sulphur, grains/100 cuft	-	15.00	D - 2784	-
Water content	no free water	no free water	-	visual
Komposisi			D - 2163	
C2 % vol	-	0.20	-	-
C3 dan C4 % vol	97.50		-	-
C5+ (C5 and heavier) % vol	-		-	-
Ethyl or Buthyl mercaptan Added, ml/100 AG	50.00		-	-

Sumber: SK Dirjen Migas No. 25/36/DDJM/1990

Secara umum, bahan bakar LPG Campuran memiliki ciri-ciri: tidak berwarna, tidak berbau (untuk memudahkan dalam mendeteksi kebocoran ditambahkan *mercaptant* agar berbau), tidak terasa, mudah terbakar (*flammable*), tidak menyebabkan korosi pada besi dan tabung kemasannya, tidak beracun tetapi pada konsentrasi tertentu dapat menyebabkan sesak napas (*asphyxiation*) dan rasa pusing (*anesthetics*). Berat jenisnya lebih besar dari berat jenis udara karena berat jenis propana 1½ kali berat jenis udara dan berat jenis butana 2 kali berat jenis udara sehingga gas LPG akan mengalir ke bawah jika terjadi kebocoran.

Dalam keadaan ruangan (1 atm, ± 30 °C), LPG Campuran berada dalam fasa gas dan berada dalam fasa cair pada tekanan 2,72 – 9,53 atm dan temperatur ± 30 °C. Di dalam tabungnya, LPG berada dalam fasa cair sebesar 80 – 85 % sisanya berada dalam fasa gas untuk memungkinkan ekspansi panas (*thermal expansion*) yang memadai dari keadaan cairnya. Sifat-sifat fisika lainnya dari LPG Campuran adalah sebagai berikut.

- tekanan uap : 5,0 – 6,2 kg/cm²
- berat jenis : 2,01
- daya pemanasan 11.255 kkal/kg
- nilai kalor atas ± 21.000 BTU/lb atau ± 48.836,27 kJ/kg
- nilai kalor bawah ± 19.795,11 BTU/lb atau ± 46.043,37 kJ/kg
- viskositas* : propana = 5,7 10⁻⁶ m²/s, butana = 3,06 10⁻⁶ m²/s

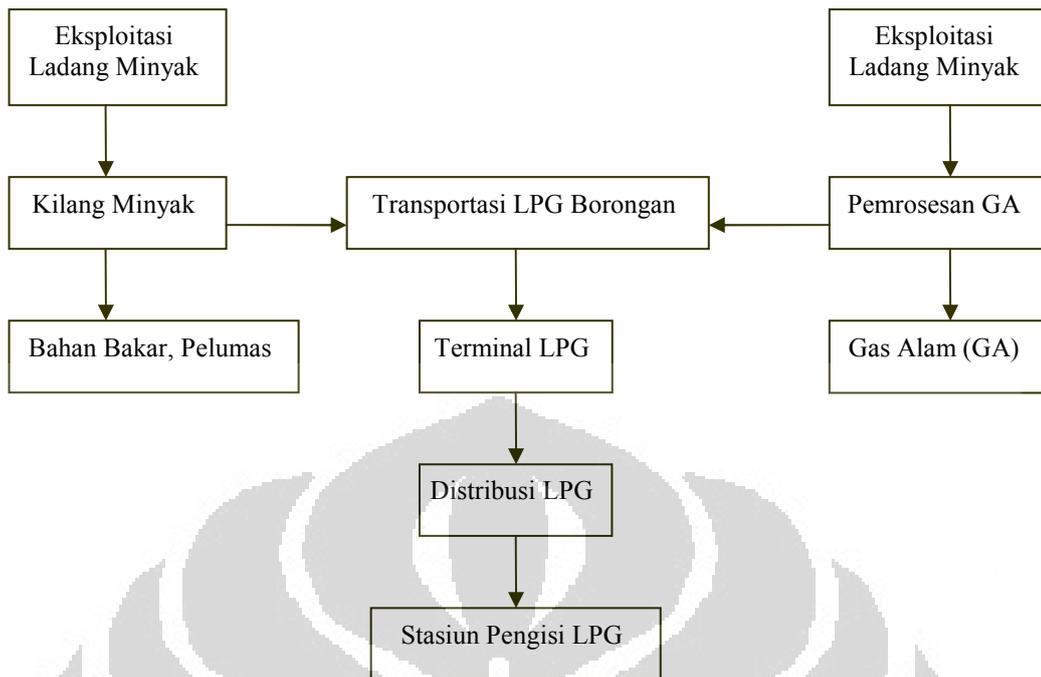
* Viskositas LPG Campuran merupakan kolaborasi antara viskositas propana dan butana dan diperhitungkan menggunakan suatu persamaan pada bab 4.

- batas *flammability* : 1,78 – 8,93 % (laboratorium PPPTMGB "Lemigas")
- rasio antara volume gas bila berekspansi ke keadaan ruangan dengan gas dalam keadaan cairnya adalah 250 : 1

2.5.2 Proses Pembentukan LPG

Gas mentah yang dialirkan dari ladang gas harus diproses sebelum disalurkan melalui jalur pipa atau dicairkan. Gas mentah mengandung uap dan cairan, baik hidrokarbon maupun air, yang harus dipisahkan. Pada kilang pemrosesan gas alam, gas-gas non-hidrokarbon seperti uap air, hidrogen sulfid (H_2S) dan CO_2 dibersihkan dari aliran utama gas pada tahapan pengkondensasian gas. Air dibersihkan dari gas pada dehidrator melalui reaksi kimia dengan pelarut atau melalui adsorpsi fisik. Aliran gas kemudian masuk ke tahapan pemrosesan dimana fraksi hidrokarbon berat dilepaskan dari gas. Pelepasan fraksi hidrokarbon berat dapat dicapai melalui refrigrasi (kondensasi, adsorpsi oleh solven hidrokarbon, adsorpsi melalui zat sorben, kompresi, atau melalui kombinasi proses-proses tersebut di atas). Konfigurasi proses yang dipergunakan atau dipilih adalah berdasarkan komposisi gas alam yang akan diproses. Akhirnya, hidrokarbon yang telah dibersihkan tersebut kemudian dipisahkan menjadi gas etana, LPG, dan pentana plus.

Sumber lain dari LPG ialah dari pengilangan minyak. Fraksi-fraksi pembentuk LPG ditangkap pada bagian atas unit distilasi bertekanan atmosfer dan dari berbagai unit pemrosesan seperti unit perengkah (*crackers*) dan *hydrotreaters*. Diagram skematik produksi dan penyaluran LPG diperlihatkan pada gambar 2.12 pada halaman 28.



Gambar 2.12. Diagram Alir Proses Produksi LPG

BAB 3 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 metode 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 50°C, 60°C, 70°C, dan 80°C.

Pada eksperimen ini, hal yang akan diteliti antara lain :

- a) Besar laju aliran volume gas LPG terhadap jarak *lifted flame*, panjang nyala api, dan tinggi nyala api difusi.
- b) Pengaruh *Reynold number* terhadap jarak *lifted flame*, panjang nyala api, dan tinggi nyala api difusi.
- c) Beban pembakaran (*burning load*) pada berbagai laju aliran bahan bakar.
- d) Kecepatan pembakaran pada berbagai laju aliran bahan bakar.
- e) Distribusi temperatur *preheat zone* dan ketebalan *preheat zone*.
- f) Pengaruh perubahan panjang nyala api difusi terhadap kecepatan pembakaran (*burning velocity*).

3.1 Peralatan dan Bahan Utama

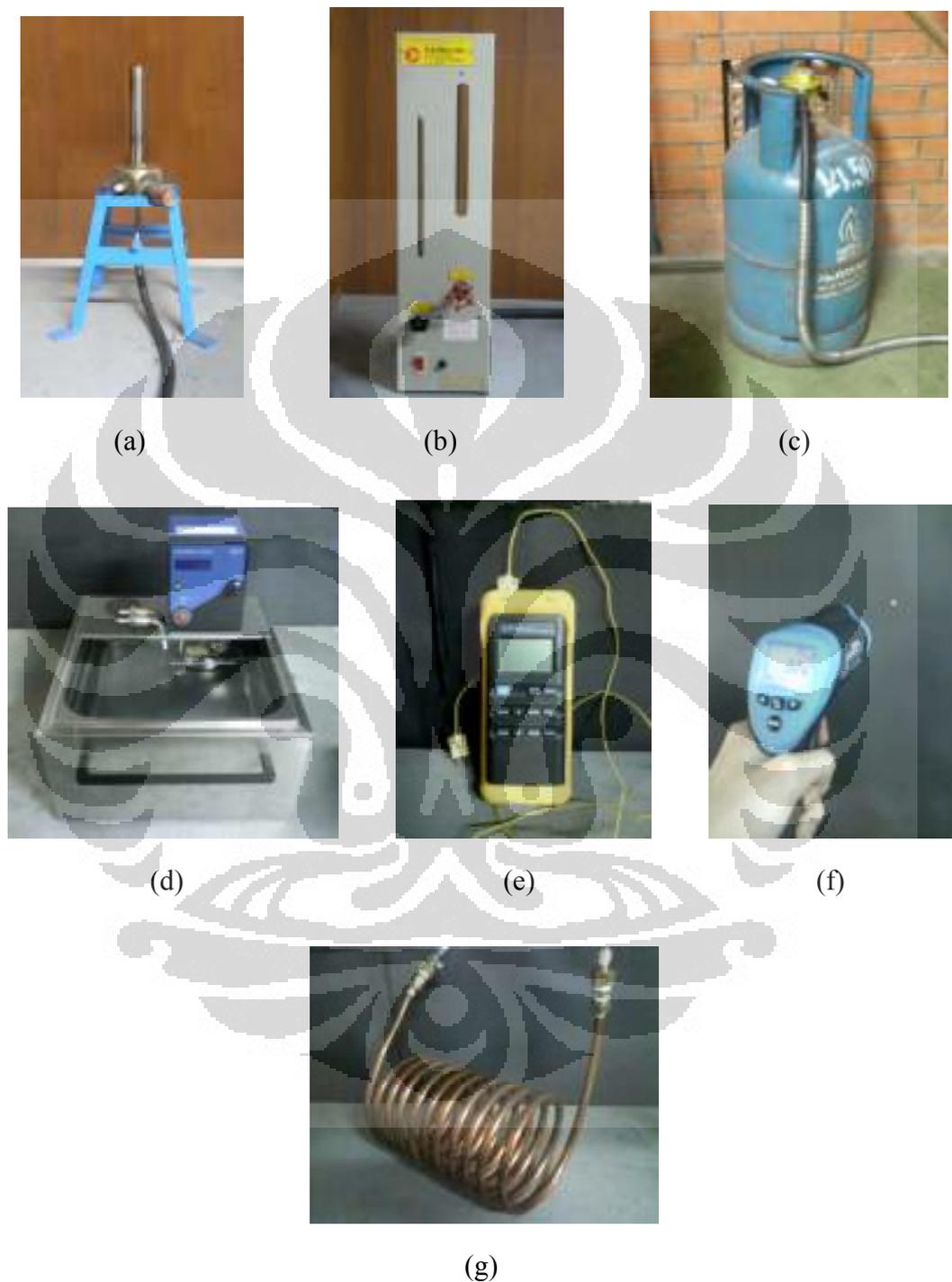
Peralatan dan bahan utama yang digunakan adalah:

- a) Burner gas tipe *ejected combustor*, diameter nozel: 1,8 mm
- b) *Flowmeter* bahan bakar (*Flame Propagation & Stability*, Pabrikan: *Unit P.A. Hilton LTD*)
- c) Bahan bakar LPG Campuran (Produksi: PT Pertamina [Persero], nama dagang: ELPIJI, berat bersih 12 kg)
- d) *Coil* tembaga, $\varnothing_{\text{luar}} = 8 \text{ mm}$, $\varnothing_{\text{dalam}} = 5,5 \text{ mm}$, panjang = 4 m
- e) *Thermostatic Bath*
- f) *Thermocouple* tipe K, dengan termometer digital
- g) *Infrared Thermometer (Thermograph)*, model BG 47/48
- h) *Hygrometer*
- i) Mistar 100 cm
- j) Kamera-video

Di samping peralatan dan bahan utama, digunakan juga peralatan lain yang merupakan peralatan yang mendukung kegiatan penelitian ini yaitu meliputi peralatan untuk kalibrasi dan peralatan pelengkap lainnya. Peralatan ini antara lain:

- a) *Wet Gas Meter*, untuk kalibrasi laju aliran bahan bakar gas
- b) Termometer (gelas) standar, untuk kalibrasi alat ukur temperatur
- c) Cerobong asap
- d) Selang penghubung aliran bahan bakar
- e) Regulator bahan bakar gas
- f) Pemantik api
- g) *Fire extinguisher*

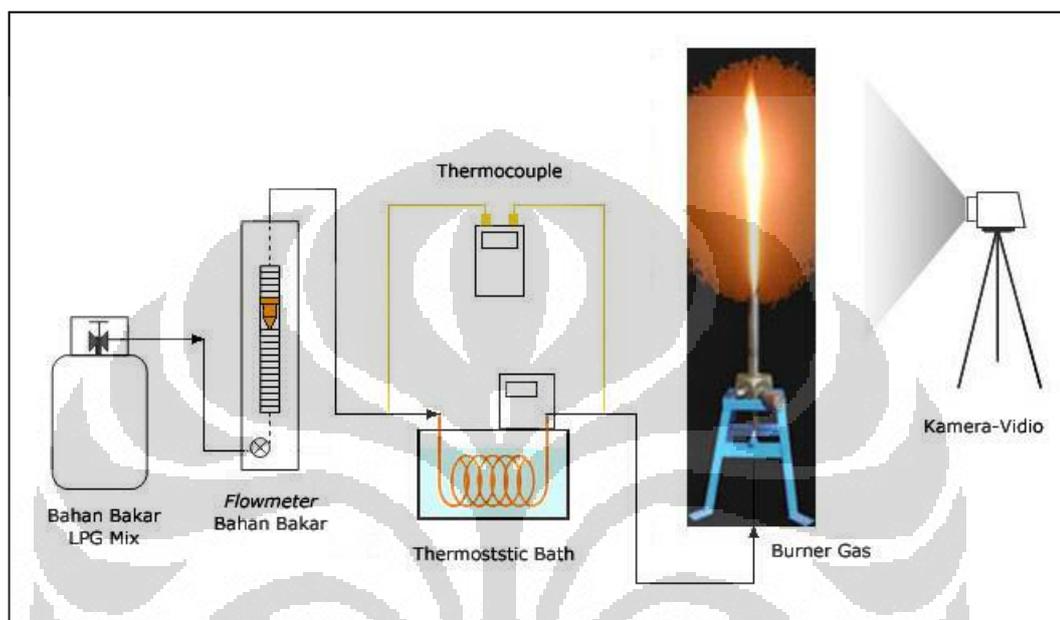
Gambar peralatan dan bahan utama untuk penelitian ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.1. Peralatan dan Bahan Utama yang Digunakan: (a) Burner Gas Tipe *Ejected Combustor*, (b) *Flowmeter* Bahan Bakar, (c) Bahan Bakar LPG Campuran, (d) *Thermostatic Bath*, (e) *Thermocouple* Tipe K dengan *Termometer Digital*, (f) *Infrared Thermometer*, dan (g) *Coil Tembaga*.

3.2 Skema dan Proses Penelitian

Skema penelitian pengaruh variasi temperatur bahan bakar LPG campuran terhadap karakteristik nyala-api-difusinya ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.2. Skema Penelitian

Burner yang digunakan pada penelitian ini adalah *burner* gas tipe *ejected combustor* (lihat lampiran), dimana bahan bakar di alirkan melewati nozel dengan diameter 1,8 mm dan sudut sembur 5° . Dan selang penghubung yang digunakan terbuat dari *rubber* dengan diameter 5/16 in. Panjang selang penghubung dari bagian *outlet* pada *coil* ke *burner* sebesar 70 cm.

Sebelum disemburkan melalui nozel, bahan bakar LPG dari tabung dialirkan melalui *rotameter* (pengukur kapasitas aliran gas LPG) kemudian diteruskan ke rangkaian pemanasan (terdiri dari Thermostatic Bath dan *coil* tembaga). Khusus untuk eksperimen tanpa pemanasan, rangkaian pemanasan tidak diperlukan.

3.2.1 Penelitian Tanpa Pemanasan

Bahan bakar LPG dari tabung dialirkan secara bertahap 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 bertahap hingga dicapai kondisi *blow-off* (nyala api padam akibat kecepatan rata-rata bahan bakar/oksidator lebih besar dari kecepatan pembakaran) dan pada setiap tahapnya dilakukan pengukuran distribusi temperatur di sepanjang jarak *lifted flame* dan pengukuran temperatur *burner tip* serta nyala api di-*capture* dengan menggunakan kamera-vidio digital. Jarak *lifted flame*, panjang nyala api, dan tinggi nyala api diambil dari jarak rata-ratanya masing-masing yang diperoleh dari hasil *capture* dengan menggunakan *software Adobe Photoshop 7.0*.

Pengukuran distribusi temperatur dari *burner tip* hingga mendekati pangkal nyala api dilakukan dengan menggunakan Themocouple tipe K dan temperatur *burner tip* menggunakan Infrared Thermocouple (Thermograph) pada jarak 35 cm dari *burner tip*. Pengukuran distribusi temperatur tersebut dilakukan pada setiap kenaikan 5 mm dari *burner tip* hingga mendekati *flame front* dan proses ini dilakukan pada setiap selisih skala rotameter sebesar 2 cm dan dimulai dari skala 2 cm hingga terjadi *blow-off*.

3.2.2 Penelitian Dengan Pemanasan

Bahan bakar LPG dari tabung dialirkan secara bertahap melalui *flowmeter* bahan bakar (*rotameter*) kemudian diteruskan mengalir di dalam *coil* tembaga yang dipanaskan dengan menggunakan *Thermostatic Bath* (medium: air [H₂O]). 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 bertahap hingga dicapai kondisi *blow-off* dan pada setiap tahapnya dilakukan pengukuran temperatur gas LPG masuk dan keluar *coil*, distribusi temperatur di sepanjang jarak *lifted flame*, dan temperatur *burner tip* serta nyala api di-*capture* dengan menggunakan kamera-vidio digital. Jarak *lifted flame*, panjang nyala api, dan tinggi nyala api diambil dari jarak rata-ratanya masing-masing yang diperoleh dari hasil *capture* dengan menggunakan *software Adobe Photoshop 7.0*. Proses penelitian ini dilakukan sebanyak empat kali pada temperatur pemanasan *Thermostatic Bath* yang berbeda yakni pada temperatur: 50 °C, 60 °C, 70 °C, dan 80 °C.

Pengukuran temperatur gas LPG masuk dan keluar rangkaian pemanas, pengukuran distribusi temperatur di sepanjang jarak *lifted flame* (dari *burner tip* hingga mendekati pangkal nyala api) dengan menggunakan Thermocouple tipe K dan pengukuran temperatur *burner tip* dengan menggunakan Infrared Thermocouple (Thermograph) pada jarak 35 cm dari *burner tip*. Pengukuran distribusi temperatur di sepanjang jarak *lifted flame* dilakukan pada setiap kenaikan 5 mm dari *burner tip* hingga mendekati *flame front* dan proses ini dilakukan pada setiap selisih skala rotameter sebesar 2 cm dan dimulai dari skala 2 cm hingga terjadi *blow-off*.

3.3 Penyetaraan Pembacaan Alat Ukur *Flowmeter* Bahan Bakar (Rotameter)

Sebelum pelaksanaan penelitian, dilakukan penyetaraan terhadap pembacaan alat ukur aliran volume bahan bakar untuk memperoleh hasil pengukuran yang sesuai standar satuan yang digunakan yaitu SI. Hal ini dilakukan dengan menyetarakan pembacaan skala pada *rotameter* yang adalah dalam satuan *centimeter* ke dalam satuan liter per detik (dm^3/s).

Penyetaraan dilakukan dengan menggunakan alat *Wet Gas Meter*, dengan spesifikasi:

- Model: WE-1.5 A
- Laju aliran, Max: 1.5 m^3/h ; Min: 5 l/h
- Temperatur maksimum: 60 °C
- Tekanan maksimum: 1000 mmH₂O
- Pabrikan: *Shinagawa Keisokki Seisakusho CO.LTD*



Gambar 3.3. *Wet Gas Meter*

Prosedur penyetaraan pembacaan *flowmeter* bahan bakar adalah sebagai berikut.

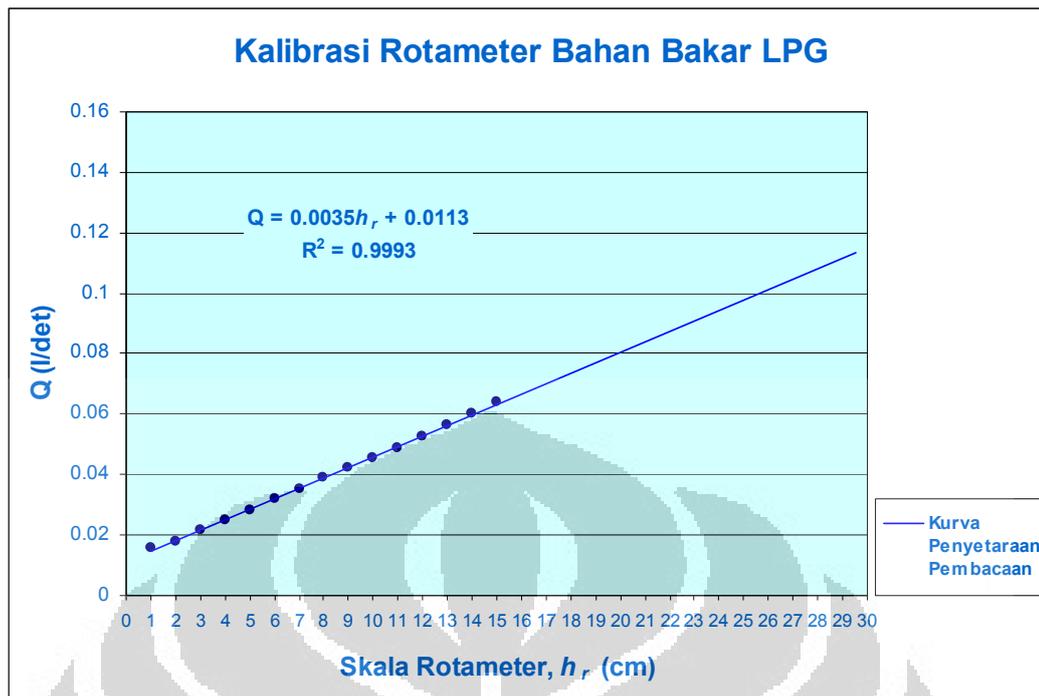
- a) Posisi *Wet Gas Meter* di-*set-up* sedemikian untuk memperoleh posisi yang setimbang.
- b) *Wet Gas Meter* diisi air hingga ketinggian cairan mencapai sekitar 2 mm di atas *setting needle point*.
- c) Bahan bakar LPG dari tabung dialirkan ke *flowmeter* (rotameter).
- d) Bahan bakar LPG dari rotameter diteruskan ke *Wet Gas Meter*.
- e) Bahan bakar LPG keluaran *Wet Gas Meter* dibakar pada bunsen burner.
- f) Akibat tekanan gas dari bahan bakar, jarum *Wet Gas Meter* berputar yang menunjukkan indikasi laju aliran volume bahan bakar LPG dalam dm^3/detik .
- g) Waktu yang dibutuhkan untuk setiap 1 liter perputaran jarum *Wet Gas Meter* dicatat.

Data kalibrasi *flowmeter* ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 3.1. Penyetaraan Pembacaan *Rotameter* Bahan Bakar LPG

Skala Rotameter h_r (cm)	Laju Aliran Volume LPG Q_r (dm^3/s)
1	0.0157
2	0.0181
3	0.0216
4	0.0251
5	0.0283
6	0.0318
7	0.0354
8	0.0388
9	0.0424
10	0.0456
11	0.0489
12	0.0527
13	0.0564
14	0.0602
15	0.0640

Dari tabel 3.1 dapat dibuat kurva dan persamaan penyetaraan pembacaan *flowmeter* untuk bahan bakar LPG sebagai berikut.



Gambar 3.4. Grafik Penyetaraan Pembacaan *Rotameter* untuk LPG

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

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

3.4 Kalibrasi Alat Ukur Temperatur

Sebelum pelaksanaan pengukuran terhadap berbagai temperatur, dilakukan kalibrasi terhadap alat ukur temperatur yang digunakan. Alat ukur temperatur yang digunakan yaitu:

- a) Thermostatic Bath
- b) Thermocouple tipe K, jumlah: 3 buah dengan *thermometer digital*
- c) Infrared Thermometer (Thermograph)

Kalibrasi dilakukan dengan menyetarakan pembacaan ketiga alat ukur tersebut terhadap pembacaan pada termometer gelas standar. Prosedur kalibrasi alat ukur temperatur adalah sebagai berikut.

- a) Air (H_2O) dipanaskan menggunakan Thermostatic Bath.
- b) Air hasil pemanasan Thermostatic Bath diukur dengan Thermocouple tipe K, Infrared Thermometer (Thermograph), dan termometer gelas standar secara bersamaan.

- c) Pemanasan dilakukan secara bertahap dan hasil yang diperoleh dari masing-masing pembacaan alat ukur pada setiap tahap dicatat.
- d) Air pada tahap pemanasan teratas didinginkan secara bertahap dan hasil yang diperoleh dari masing-masing pembacaan alat ukur pada setiap tahap dicatat.

Data kalibrasi alat ukur temperatur ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 3.2. Data Kalibrasi Alat Ukur Temperatur

Alat Ukur	Thermometer Gelas Standar (°C)	Thermocouple Tipe K		Thermostatic Bath (°C)
		T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	
Temperatur Naik Bertahap	31.6	31.5	31.5	31.5
	32	32	32	32
	35	35	34.9	35
	39.8	39.8	39.8	40
	44.8	44.7	44.6	45
	49.8	49.6	49.6	50
	54.8	54.4	54.4	54.9
	59.6	59.2	59.2	60
	64.7	64.2	64.4	65
	68.9	69.1	69.2	70
Temperatur Turun Bertahap	74.6	74	74.1	74.9
	78.8	78.4	78.4	79.1
	74.8	74.2	74.2	75
	69.8	69.3	69.3	70
	64.9	64.6	64.5	65
	59.8	59.5	59.5	60
	54.9	54.6	54.6	55
	49.9	49.7	49.7	50
44.9	44.8	44.7	45	
39.9	39.8	39.8	40	

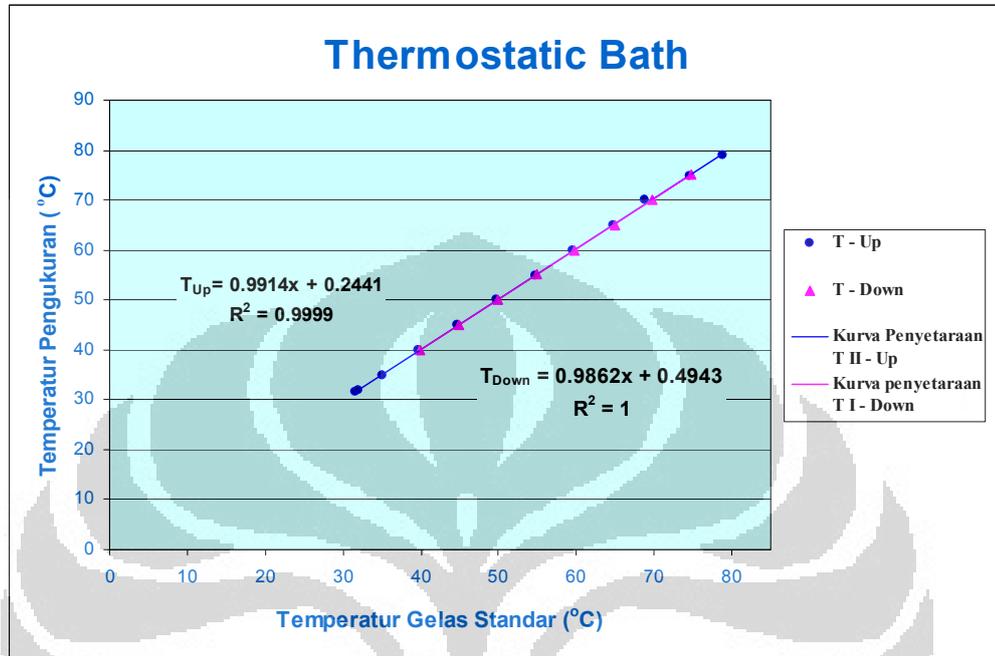
Dari tabel 3.2 dapat dibuat kurva seperti ditunjukkan pada gambar 3.5. Pada gambar 3.5, terlihat bahwa kurva penyetaraan masing-masing alat ukur tampak berhimpit yang menunjukkan penyimpangan yang kecil dari alat ukur temperatur yang digunakan terhadap temperatur gelas standar. Persamaan penyetaraan yang didapat adalah

Persamaan penyetaraan saat temperatur naik:

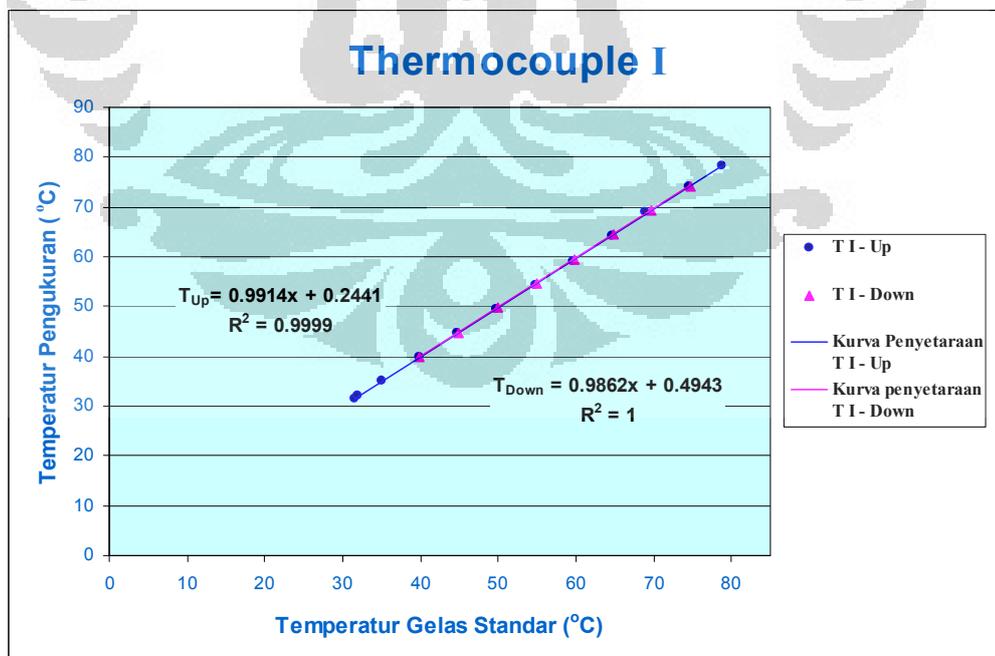
$$T_{up} = 0,9914T_s + 0,2441 \quad (3.2)$$

Persamaan penyetaraan saat temperatur turun:

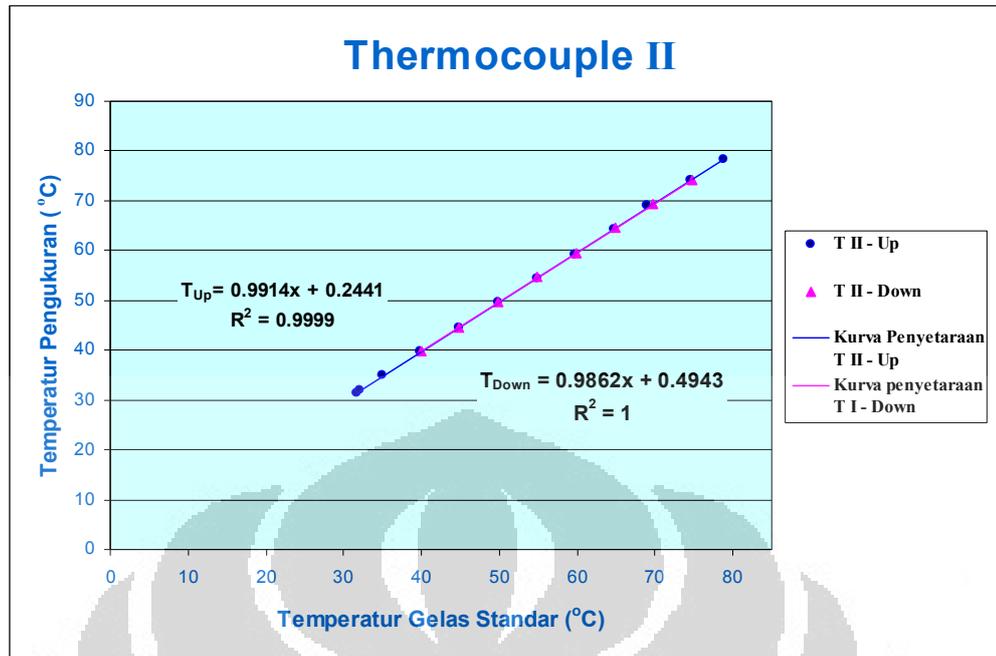
$$T_{down} = 0,9862T_s + 0,4943 \quad (3.3)$$



Gambar 3.5. Grafik Penyetaraan Pembacaan Thermostatic Bath



Gambar 3.6. Grafik Penyetaraan Pembacaan Thermocouple I



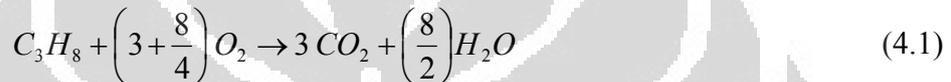
Gambar 3.7. Grafik Penyetaraan Pembacaan Thermocouple II

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 :



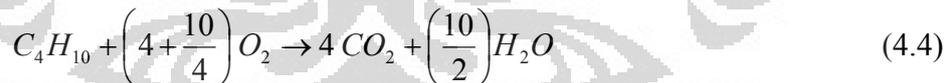
atau



sehingga pembakaran 0,6 mol propana diperlukan oksigen sebesar

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

Untuk pembakaran C_4H_{10} :



atau



sehingga pembakaran 0,4 mol butana diperlukan oksigen sebesar

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

Total mol oksigen yang diperlukan sebesar

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

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

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

dimana

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

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.

$$v_{mix} = \frac{0,532 \times 5,333 \times 10^{-6}}{1,105} + \frac{0,468 \times 3,72 \times 10^{-6}}{0,902} \quad (4.13)$$

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

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, $d_i = 1,8 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Laju aliran gas LPG, $Q_f = 53,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
- Kecepatan aliran gas LPG

$$u_i = \frac{Q_f}{A_i} = \frac{53,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \frac{(1,8 \times 10^{-3})^2}{4} \text{ m}^2} = 20,96 \text{ m}/\text{s} \quad (4.14)$$

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

Maka Reynold *number* gas LPG pada ujung nozel

$$Re_i = \frac{20,96 \text{ m}/\text{s} \times 1,8 \times 10^{-3} \text{ m}}{4,498 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 8.388 \quad (4.15)$$

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, $Q_f = 53,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
- Jari-jari nozel pada *port* = $9 \times 10^{-4} \text{ m}$

Maka *burning load*, BL, sebesar

$$BL = \frac{53,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \times 2,212 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 46.043,37 \text{ kJ}/\text{kg}}{\pi \times (9 \times 10^{-4})^2 \text{ m}^2} \quad (4.16)$$

$$= 2.134,34 \text{ MW}/\text{m}^2$$

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_i (m/s)	Re_i	BL
1	0,0148	5,813692	2255,312	592,65
2	0,0183	7,188552	2788,662	732,80
3	0,0218	8,563412	3322,013	872,96
4	0,0253	9,938272	3855,364	1013,11
5	0,0288	11,31313	4388,715	1153,27
6	0,0323	12,68799	4922,065	1293,42
7	0,0358	14,06285	5455,416	1433,58
8	0,0393	15,43771	5988,767	1573,73
9	0,0428	16,81257	6522,118	1713,88
10	0,0463	18,18743	7295,468	1854,04
11	0,0498	19,56229	7848,819	1994,19
12	0,0533	20,93715	8397,47	2134,35
13	0,0568	22,31201	8948,821	2274,5

4.5 Kecepatan Pembakaran

Kecepatan pembakaran adalah laju konsumsi volume *unburned* gas per satuan waktu per satuan luas *flame front*. Nilai kecepatan pembakaran diperhitungkan sebagai berikut.

4.5.1 Kecepatan Pembakaran Laminar

Pada perhitungan ini dicontohkan perhitungan pada saat pemanasan 80°C dan laju aliran gas seperti berikut.

- Jari-jari nozel, $r_i = 9 \times 10^{-2} \text{ cm}$
- Laju aliran gas LPG = 42,8 cm³/s
- Panjang nyala api, $L_f = 44,36 \text{ cm}$

Maka kecepatan pembakaran laminar sebagai berikut:

$$S_L = \frac{2 \times 42,8 \text{ cm}^3/\text{s}}{\pi \times 9 \times 10^{-2} \text{ cm} \sqrt{(9 \times 10^{-2} \text{ cm})^2 + (44,36 \text{ cm})^2}} \quad (4.17)$$

$$= 7,39 \text{ cm}/\text{s}$$

4.5.2 Kecepatan Pembakaran Turbulen

Berdasarkan perhitungan S_L tersebut di atas maka kecepatan pembakaran turbulen untuk kondisi yang sama dapat diperhitungkan sebagai berikut.

- Diameter nyala api, $d_f = l_t = 2,52 \text{ cm}$
- Waktu yang diperlukan elemen bahan bakar mencapai ujung nyala api:

$$t = \frac{d_f}{S_L} = \frac{2,52 \text{ cm}}{7,39 \text{ cm}/\text{s}} = 0,34 \text{ s} \quad (4.18)$$

- Kecepatan rata-rata percampuran bahan bakar dan oksidator:

$$u'_{rms} = \frac{L_f}{t} = \frac{44,36 \text{ cm}}{0,34 \text{ s}} = 130,47 \text{ cm}/\text{s} \quad (4.19)$$

Maka kecepatan pembakaran turbulen sebagai berikut:

$$S_T = 7,39 \text{ cm}/\text{s} \left[1 + \left(\frac{2 \times 130,47 \text{ cm}/\text{s}}{7,39 \text{ cm}/\text{s}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.20)$$

$$= 261,04 \text{ cm}/\text{s}$$

Tabel 4.4. Data Kecepatan Pembakaran Laminar dan Turbulen pada Setiap Eksperimen

Skala Rot.	Q_f	B_L	Tanpa Pemanasan			Pemanasan 50°C			Pemanasan 60°C					
			L_f	d_f	S_L	S_T	L_f	D_f	S_L	S_T	L_f	D_f	S_L	S_T
1	0.0148	592.65134	42.15	1.84	2.485011	113.8768	47.20	1.78	2.219168	117.7082	46.77	1.77	2.23942	118.3734
2	0.0183	732.80538	48.93	2.12	2.646833	122.2095	43.75	2.35	2.960267	110.2624	52.85	2.37	2.450339	109.32
3	0.0218	872.95941	37.67	2.32	4.096098	133.0645	39.40	2.37	3.916083	130.2544	40.87	2.43	3.775323	127.0369
4	0.0253	1013.1134	43.70	2.51	4.097387	142.7295	41.43	2.53	4.322302	141.6088	40.34	2.46	4.439045	145.6381
5	0.0288	1153.2675	43.11	2.55	4.727944	159.93	41.48	2.56	4.913491	159.3115	41.97	2.53	4.856339	161.197
6	0.0323	1293.4215	44.42	2.58	5.146142	177.2775	44.51	2.6	5.135386	175.9147	43.95	2.6	5.201165	175.9166
7	0.0358	1433.5755	43.42	2.6	5.835137	194.9809	43.45	2.64	5.830845	192.0292	42.83	2.62	5.915518	193.4963
8	0.0393	1573.7296	45.67	2.63	6.089958	211.5946	44.58	2.73	6.238933	203.8549	43.64	2.75	6.373383	202.3779
9	0.0428	1713.8836	44.26	2.72	6.843735	222.8269	43.75	2.78	6.923466	218.0248	44.97	2.79	6.735013	217.2382
10	0.0463	1854.0377	46.25	2.76	7.084792	237.5489	44.33	2.82	7.391645	232.5087	44.36	2.76	7.38695	237.5581
11	0.0498	1994.1917	45.67	2.88	7.717136	244.8728	44.23	3	7.968384	235.0962	44.49	2.85	7.921816	247.4543
12	0.0533	2134.3457	45.58	3.02	8.275814	249.9461	45.08	3.04	8.367604	248.3066	44.45	2.89	8.486193	261.184
13	0.0568	2274.4998	44.75	3.12	8.982829	257.837	44.33	3.1	9.067936	259.5014	44.20	3	9.095538	268.142

Keterangan:

- Q_f dalam dm^3/s
- B_L dalam MW/m^2
- L_f dan d_f dalam cm
- S_L dan S_T dalam cm/s

Tabel 4.4. (Lanjutan)

Skala Rot.	Q_f	B_L	Pemanasan 70°C			Pemanasan 80°C				
			Lf	Df	SL	ST	Lf	Df	SL	ST
1	0.0148	592.65134	47.34	1.87	2.212333	112.045	43.19	1.89	2.425137	110.8643
2	0.0183	732.80538	54.21	2.38	2.389074	108.8596	37.69	2.38	3.436234	108.8876
3	0.0218	872.95941	42.45	2.45	3.634433	125.9966	39.26	2.44	3.929742	126.5214
4	0.0253	1013.1134	41.78	2.48	4.28511	144.4601	41.47	2.47	4.317619	145.0454
5	0.0288	1153.2675	44.17	2.51	4.614052	162.4732	42.70	2.52	4.773341	161.8336
6	0.0323	1293.4215	43.56	2.53	5.247742	180.781	43.33	2.42	5.275598	188.9924
7	0.0358	1433.5755	43.71	2.54	5.796423	199.5815	44.48	2.43	5.69608	208.6059
8	0.0393	1573.7296	44.94	2.58	6.189294	215.6947	44.99	2.65	6.182077	210.0017
9	0.0428	1713.8836	44.67	2.62	6.780591	231.322	45.20	2.73	6.701363	222.0071
10	0.0463	1854.0377	45.31	2.77	7.231818	236.6965	45.51	2.81	7.199992	233.3293
11	0.0498	1994.1917	44.72	2.84	7.880365	248.3234	45.67	2.8	7.717136	251.8623
12	0.0533	2134.3457	45.32	2.88	8.323292	262.0847	45.11	2.84	8.36204	265.7736
13	0.0568	2274.4998	45.67	2.93	8.801874	274.5313	46.6	2.89	8.622514	278.3216

Keterangan:

- Q_f dalam dm^3/s
- B_L dalam MW/m^2
- L_f dan d_f dalam cm
- S_L dan S_T dalam cm/s

4.6 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, yang diperoleh dengan menggunakan *software Adobe Photoshop 7.0* dari hasil *capture*-nya menggunakan kamera. Pada *software Adobe Photoshop 7.0*, dari hasil *peng-capture-an*, ketiga besaran ini diukur dalam satuan *pixel* yang kemudian dikonversi ke dalam satuan *milimeter* dengan cara :

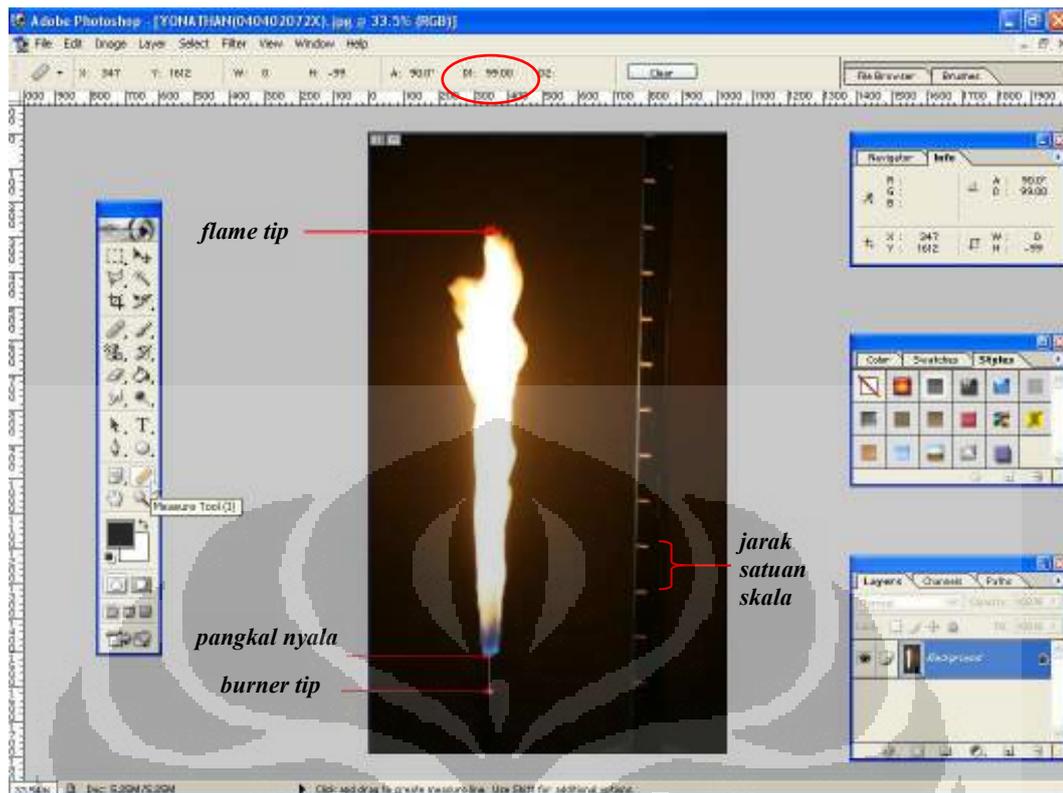
- Mengukur (*icon Measure Tool* pada *Palet Tool*) jarak dari *burner tip* hingga ke pangkal nyala api. Besaran yang diperoleh merupakan tinggi *lifted flame* dalam *pixel* (D1 pada *toolbar* informasi)
- Mengukur jarak dari *burner tip* hingga ke *flame tip*. Besaran yang diperoleh merupakan tinggi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

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

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

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

Metode pengukuran ketiga besaran ini diperlihatkan pada gambar 4.1, halaman 48.



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

Data yang diperoleh dari pengolahan ini ditunjukkan pada tabel 4.5 pada halaman 49.

Tabel 4.5. Data Hasil Pengolahan pada Software Adobe Photoshop 7.0 (dengan T_{out}).

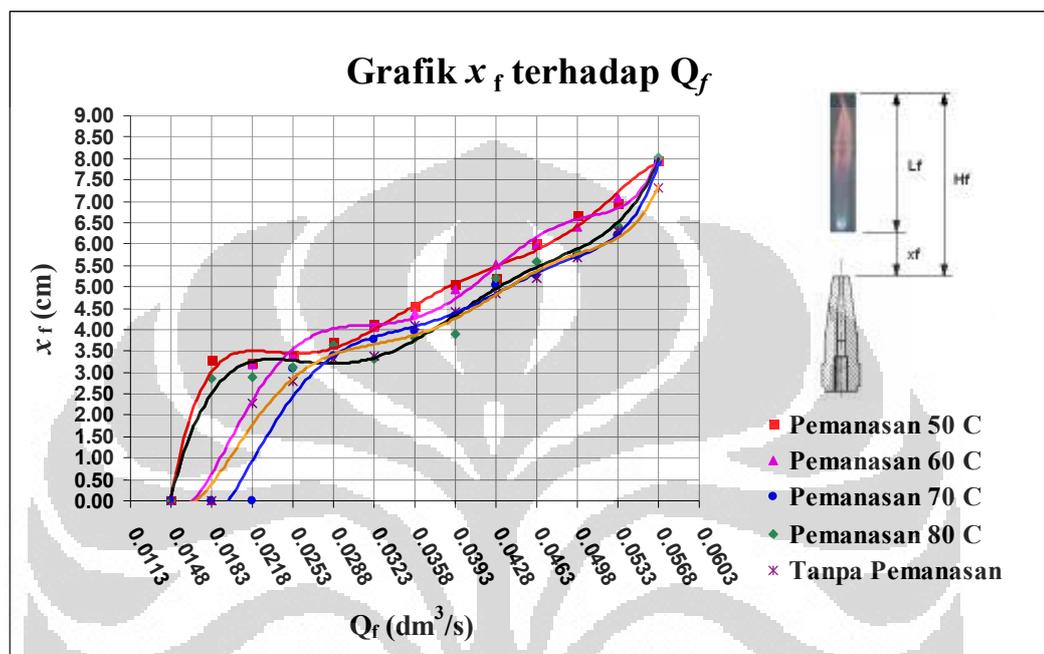
Q_f (dm^3/s)	Tanpa Pemanasan			Pemanasan 50 °C			Pemanasan 60 °C			Pemanasan 70 °C			Pemanasan 80 °C						
	x_f	L_f	H_f	T_{out}	x_f	L_f	H_f	T_{out}	x_f	L_f	H_f	T_{out}	x_f	L_f	H_f				
0.0148	0	42.15	42.15	37.0	0.00	47.20	47.20	37.7	0.00	46.77	46.77	40.4	0.00	47.34	47.34	51.3	0.00	43.19	43.19
0.0183	0	48.93	48.93	38.3	3.27	41.54	44.82	40.5	0.00	52.85	52.85	45.0	0.00	49.02	49.02	52.3	2.86	37.69	40.55
0.0218	2.27	37.67	39.93	39.3	3.22	39.40	42.62	43.0	3.19	40.87	44.06	46.7	0.00	54.21	54.21	55.7	2.88	39.26	42.14
0.0253	2.81	43.70	46.51	40.2	3.40	41.43	44.83	44.4	3.41	40.34	43.74	47.9	3.10	41.78	44.89	59.2	3.12	41.47	44.59
0.0288	3.30	42.21	45.51	40.9	3.69	41.48	45.17	44.9	3.65	41.97	45.62	49.7	3.37	44.17	47.54	63.4	3.63	42.70	46.33
0.0323	3.36	45.15	48.51	41.5	4.11	44.51	48.63	46.0	4.06	43.95	48.01	50.6	3.75	42.12	45.87	64.5	3.32	43.33	46.65
0.0358	4.09	41.65	45.74	42.1	4.56	43.45	48.01	46.6	4.38	41.15	45.53	51.7	3.98	42.19	46.17	65.4	3.79	44.48	48.26
0.0393	4.42	45.67	50.09	42.4	5.06	47.15	52.21	47.3	4.93	43.64	48.57	52.6	4.31	44.94	49.25	66.4	3.91	44.99	48.90
0.0428	4.83	44.26	49.09	42.9	5.21	45.83	51.04	47.9	5.52	44.97	50.49	53.7	5.03	44.67	49.70	66.7	5.20	45.20	50.40
0.0463	5.21	49.03	54.24	43.3	6.02	48.09	54.11	48.5	5.98	44.36	50.34	54.4	5.26	45.31	50.57	67.2	5.58	45.51	52.13
0.0498	5.68	47.89	53.57	43.6	6.66	47.81	54.47	49.0	6.40	47.53	53.93	55.2	5.71	44.72	50.43	67.9	5.82	45.67	52.46
0.0533	6.32	47.34	53.65	43.9	6.95	45.93	52.88	49.4	7.09	44.45	51.54	55.8	6.21	44.67	50.88	68.5	6.45	45.11	52.62
0.0568	7.32	43.17	50.49	44.3	7.97	42.88	50.86	50.0	7.96	44.20	52.16	56.3	7.90	44.30	52.19	68.8	8.01	46.6	53.1

Keterangan:

- T_{out} dalam °C
- x_f , L_f , dan H_f dalam cm

4.6.1 Tinggi *Lifted Flame*

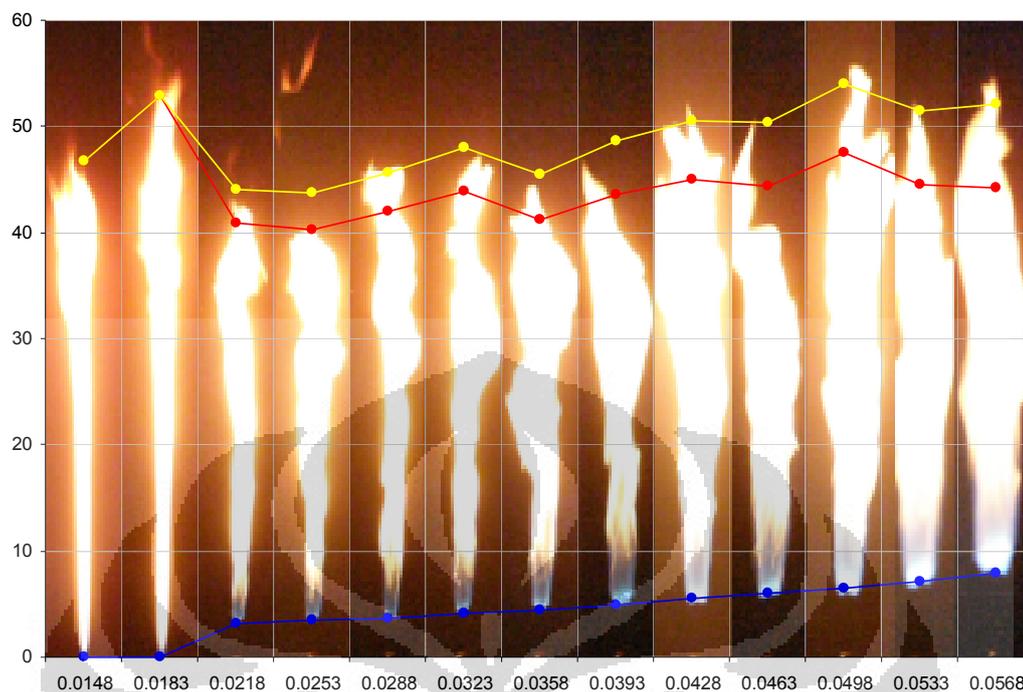
Dari data pada table 4.5, dapat dibuat grafik laju aliran, Q_f , terhadap tinggi *lifted flame*, x_f , pada masing-masing eksperimen (tanpa dan dengan pemanasan) seperti ditunjukkan pada gambar 4.2. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa pada



Gambar 4.2. Grafik Laju Aliran Q_f Terhadap Jarak *Lifted Flame*

masing-masing eksperimen, seiring dengan membesarnya laju aliran gas LPG, pangkal nyala api semakin menjauh dari *burner tip* yang berarti tinggi *lifted flame* semakin bertambah besar atau nilai *lifted flame* berbanding lurus terhadap laju aliran bahan bakar. Pada $0,0218 \text{ dm}^3/\text{s} < Q_f < 0,0323 \text{ dm}^3/\text{s}$, tinggi *lifted flame* relatif konstan dan pada $Q_f < 0,0323 \text{ dm}^3/\text{s}$, tinggi *lifted flame* mengalami kenaikan yang relatif linier.

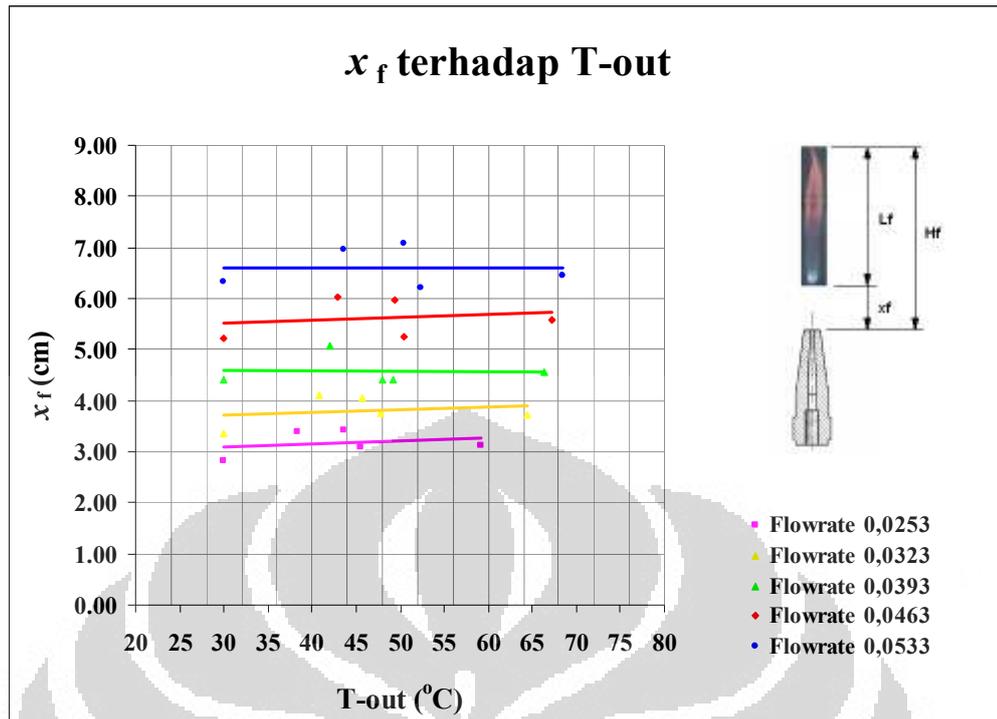
Hasil peng-*capture*-an nyala api, pada medium pemanasan 60°C , yang dihasilkan ditunjukkan pada gambar 4.3. Sumbu vertikal menunjukkan panjang dalam cm dan sumbu horizontal menunjukkan laju aliran bahan bakar dalam dm^3/s . Hasil foto nyala api ini diperoleh dari rata-rata dari keseluruhan hasil *capture* dengan kamera-vidio yang pengolahannya menggunakan *software Adobe Photoshop 7.0*. Pada gambar dapat dilihat bahwa tinggi *lifted flame* semakin besar dengan semakin besarnya nilai laju aliran bahan bakar.



Gambar 4.3. Foto Hasil Peng-capture-an pada Pemanasan 60°C

4.6.1.1 Efek Pemanasan Pada Tinggi *Lifted Flame*

Pengaruh pemanasan gas LPG dapat dilihat pada gambar 4.4. Gambar 4.4 menunjukkan efek pemanasan yang terjadi dalam laju aliran gas LPG yang sama. Dari grafik tersebut terlihat bahwa dengan temperatur gas LPG yang lebih tinggi, *lifted flame* yang terbentuk cenderung lebih tinggi atau tinggi *lifted flame* sebanding dengan temperatur pemanasan. Hal ini disebabkan pada pemanasan



Gambar 4.4. Grafik *Lifted Flame* terhadap T_{out} pada *Flowrate* yang Sama

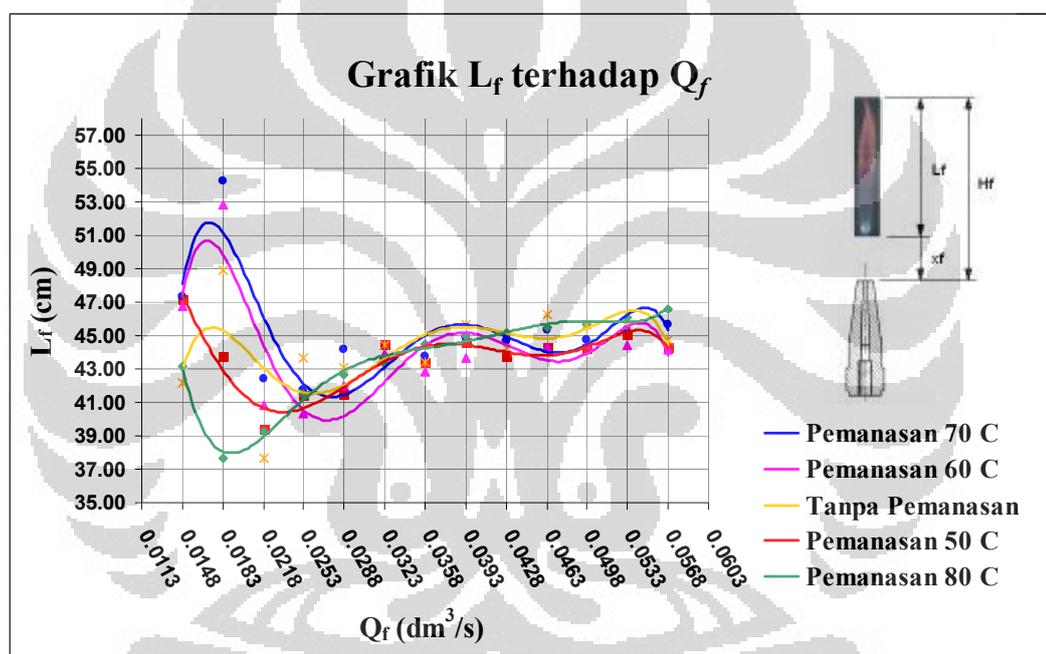
temperatur gas LPG, berat jenis gas LPG berkurang yang menyebabkan kecepatan semburan menjadi lebih besar sehingga memudahkan untuk terjadinya *lifted flame*. Pada penelitian ini, tinggi *lifted flame* terbesar yang diperoleh tercatat pada temperatur *un-burn* 68,8°C pada *flowrate* 0,0568 dm³/s, sedangkan tinggi *lifted flame* terendah diperoleh pada eksperimen tanpa pemanasan atau temperatur *un-burn* 29°C pada *flowrate* 0,0218 dm³/s.

4.6.2 Panjang Nyala Api

Secara teoritis, 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).

Dari tabel 4.5 dapat dibuat grafik panjang nyala api (L_f) sebagai fungsi dari laju aliran bahan bakar (Q_f) seperti ditunjukkan pada gambar 4.5. Dari grafik tersebut terlihat bahwa pada masing-masing eksperimen, panjang nyala api

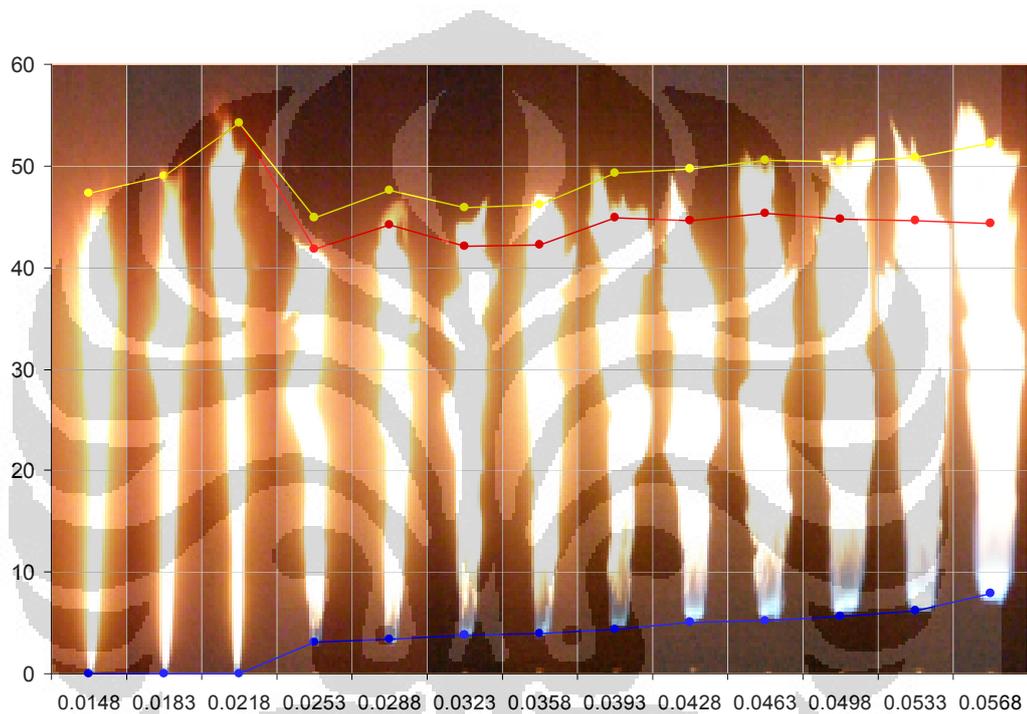
terhadap laju aliran gas menunjukkan pola yang sama yaitu, pada saat aliran laminar (untuk laju aliran 0,0148–0,0183 dm^3/s), nilainya naik seiring dengan naiknya nilai laju aliran bahan bakar. Dan panjang nyala api mulai berkurang saat aliran bahan bakar mulai turbulen. Kemudian, pada saat laju aliran 0,0218–0,0288 dm^3/s , panjang nyala api bertambah lagi dan mulai laju aliran 0,0323 dm^3/s panjang nyala api berfluktuasi hingga terjadi *blow-off*. Tetapi, pada temperatur pemanasan 50°C dan 80°C, pada panjang nyala api sudah mengalami penurunan yang dikarenakan laju aliran bahan bakar sudah mencapai nilai kritisnya dan *lifted flame* sudah terjadi.



Gambar 4.5. Grafik Panjang Nyala Api Terhadap Laju Aliran Gas

Panjang nyala api hasil penelitian ini sesuai dengan percobaan yang dilakukan H. C. Hottel dan W. R. Hawthorne bahwa panjang nyala api difusi semburan bahan bakar gas akan naik seiring dengan semakin besarnya laju aliran bahan bakar dalam aliran laminar. Dan mulai menurun ketika nyala api mencapai kondisi transisi dan terus menurun hingga seluruh nyala api menjadi turbulen. Pada kondisi ini penambahan laju aliran bahan bakar lagi, tidak akan menambah panjang nyala api tetapi akan menyebabkan terjadinya fenomena *lifted flame*.

Hasil peng-*capture*-an nyala api, pada medium pemanasan 70°C , yang dihasilkan ditunjukkan pada gambar 4.6. Sumbu vertikal menunjukkan panjang dalam cm dan sumbu horizontal menunjukkan laju aliran bahan bakar dalam dm^3/s . Hasil foto nyala api ini diperoleh dari rata-rata dari keseluruhan hasil *capture* dengan kamera-vidio yang pengolehannya menggunakan *software Adobe Photoshop 7.0*. Dari gambar dapat dilihat bahwa panjang nyala api tampak seperti yang telah dibahas sebelumnya.

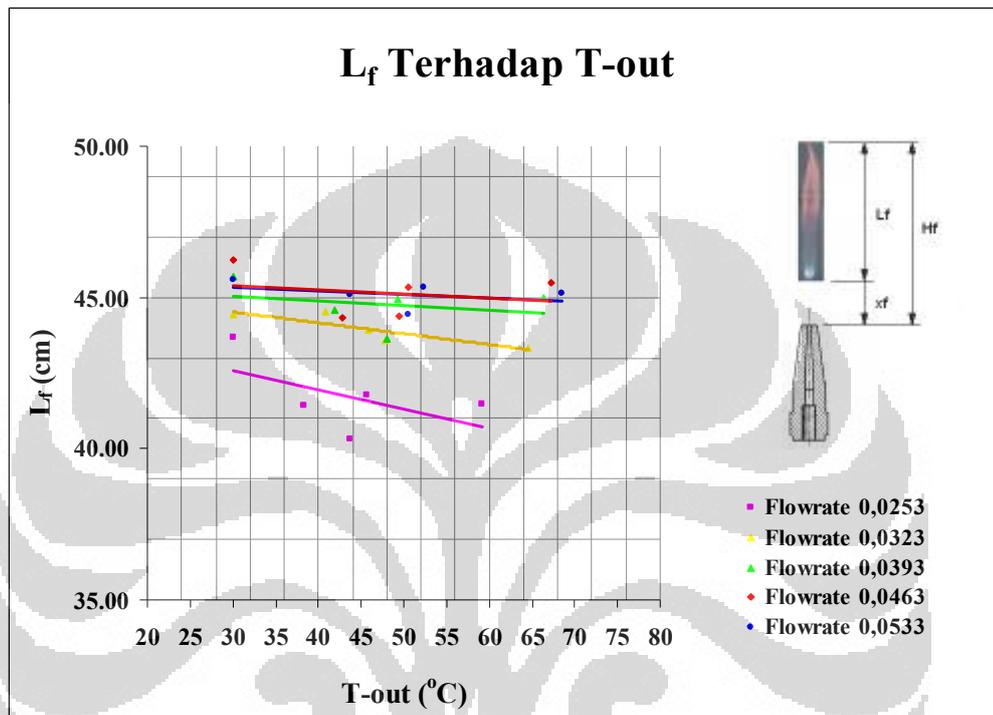


Gambar 4.6. Foto Hasil Peng-*capture*-an Menggunakan Kamera-vidio

4.6.2.1 Efek Pemanasan pada Panjang Nyala Api

Gambar 4.7 menunjukkan pengaruh temperatur gas LPG terhadap panjang nyala api yang dihasilkan. Grafik ini menunjukkan perubahan panjang nyala api, pada laju aliran gas yang sama, dengan terhadap temperatur gas LPG yang berbeda. Secara teoritis, panjang nyala api difusi dipengaruhi oleh kecepatan pembakaran (*burning velocity*) dan laju aliran bahan bakar yang diberikan. Kecepatan pembakaran berbanding lurus dengan temperatur *un-burn* (T_u). Semakin tinggi nilai T_u maka nilai S_L akan semakin tinggi sehingga panjang nyala api menjadi semakin lebih pendek.

Dari grafik terlihat bahwa panjang nyala api cenderung berkurang dengan semakin tingginya temperatur gas LPG yang akan dibakar. Sehingga dari grafik ini, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur *un-burn* gas yang terjadi maka semakin pendek atau kecil panjang nyala api yang terjadi.



Gambar 4.7. Grafik Panjang Nyala Api terhadap T_{out} pada *Flowrate* yang Sama

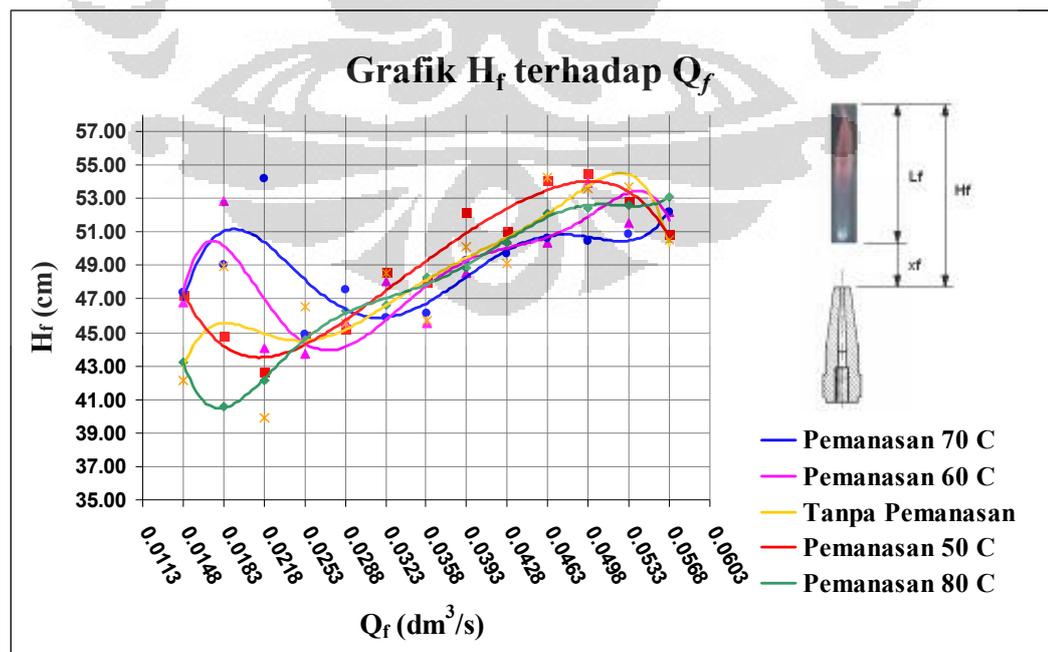
Panjang nyala api juga dapat dilihat pada gambar foto yang ditunjukkan pada gambar 4.6. Foto ini diambil dari nilai panjang nyala api rata-rata yang dihasilkan dimana bahan bakar dalam laju aliran yang sama dalam temperatur keluaran gas LPG yang berbeda. Dari gambar foto ini terlihat bahwa panjang nyala api menjadi lebih pendek dengan semakin tingginya temperatur *un-burn* gas yang terjadi. Dan dapat dilihat pula bahwa tebal nyala api pun menjadi lebih tinggi dengan semakin tingginya temperatur *un-burn* gas yang terjadi.



Gambar 4.8. Foto Nyala Api pada Laju Aliran Gas LPG yang Sama dengan Temperatur *un-burn* yang berbeda

4.6.3 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 4.9.

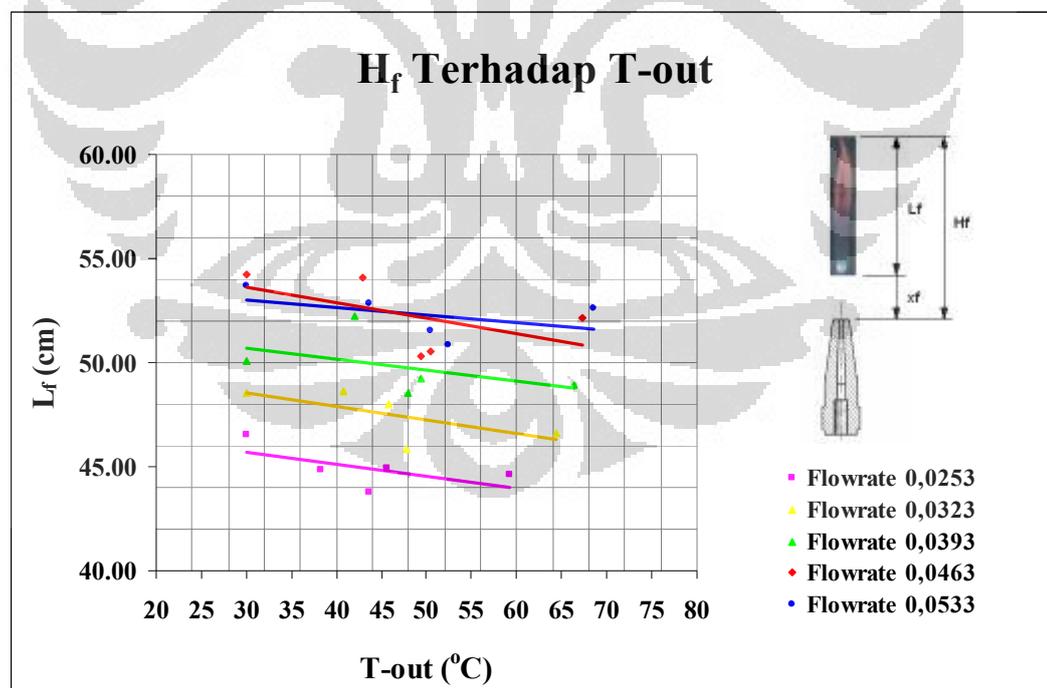


Gambar 4.9. Grafik Tinggi Nyala Api terhadap Laju Aliran

Dari grafik terlihat bahwa pada nilai laju aliran kurang $0,0288 \text{ dm}^3/\text{s}$, tinggi nyala api mengalami pola yang sama seperti halnya panjang nyala api. Dan pada nilai laju aliran lebih dari $0,0288 \text{ dm}^3/\text{s}$, tinggi nyala api terus mengalami kenaikan yang dikarenakan pada keadaan tersebut *lifted flame* sudah terjadi yang mengakibatkan tinggi nyala api menjadi lebih besar.

4.6.3.1 Efek Pemanasan pada Tinggi Nyala Api

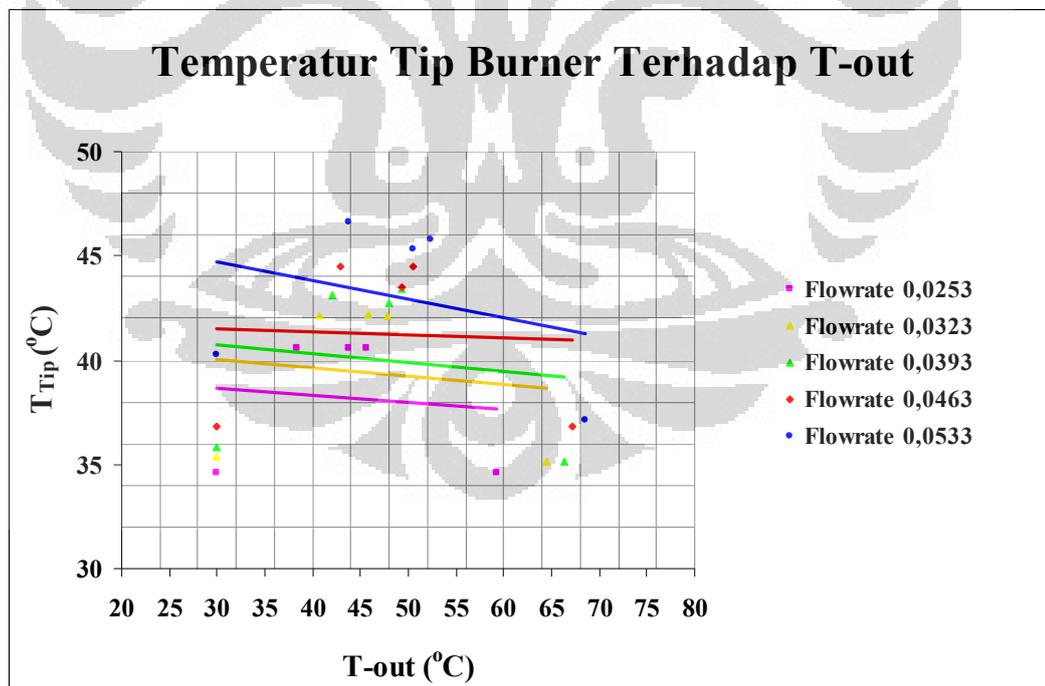
Pengaruh pemanasan terhadap tinggi nyala api ditunjukkan pada gambar 4.10. dari grafik yang dihasilkan dapat disimpulkan bahwa tinggi nyala api menjadi semakin berkurang dengan semakin tingginya temperatur *un-burn* yang terjadi. Dari hal ini juga dapat diketahui bahwa pertambahan tinggi *lifted flame* akibat pengaruh temperatur *un-burn* lebih rendah dibandingkan dengan pertambahan (pertambahan negatif) panjang nyala api yang terbentuk akibat pengaruh temperatur *un-burn*.



Gambar 4.10. Grafik Tinggi Nyala Api terhadap T_{out} pada *Flowrate* yang Sama.

4.7 Temperatur Burner Tip

Temperatur *burner tip* terhadap temperatur *un-burn* ditunjukkan pada gambar 4.11. Grafik ini diperoleh dari temperatur *burner tip* yang terjadi pada laju aliran gas yang sama. Pada gambar dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur keluaran gas dari *burner tip* maka temperatur *burner tip* cenderung berkurang. Hal ini dikarenakan pada temperatur keluaran gas yang tinggi (*un-burn* yang tinggi) *lifted flame* yang terjadi lebih tinggi seperti yang telah dibahas sebelumnya (sub sub-sub-bab 4.6.1.1) yang menyebabkan pangkal nyala api berada lebih tinggi dari *burner tip* sehingga temperatur *burner tip* menjadi lebih rendah. Tetapi, pada temperatur *un-burn* yang sama pada *flowrate* yang berbeda, temperatur *burner tip* yang lebih tinggi terjadi pada *flowrate* yang semakin tinggi. Hal ini disebabkan pada *flowrate* yang semakin tinggi nyala api yang terbentuk semakin turbulen, dimana bentuk diameter nyala api lebih besar dan panas yang dihasilkan darinya juga bertambah besar sehingga *burner tip* juga menjadi lebih panas.

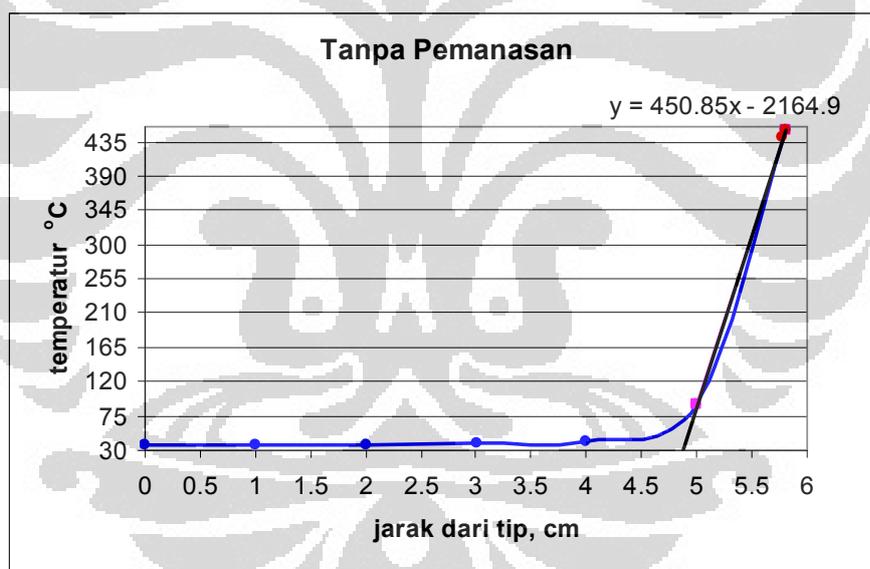


Gambar 4.11. Grafik Temperatur *Burner Tip* terhadap T_{out} pada *Flowrate* yang Sama

Dari keseluruhan penelitian, pada saat terjadi *lifted flame*, temperatur *burner tip* tertinggi tercatat sebesar $\pm 87,8^{\circ}\text{C}$ pada temperatur *un-burn* $68,8^{\circ}\text{C}$ pada *flowrate* $0,0568 \text{ dm}^3/\text{s}$, sedangkan temperatur *burner tip* terendah tercatat sebesar $\pm 39,2^{\circ}\text{C}$ pada temperatur *un-burn* $35,8^{\circ}\text{C}$ pada *flowrate* $0,0183 \text{ dm}^3/\text{s}$.

4.8 Ketebalan Preheat Zone

Ketebalan *preheat zone* ditentukan dari grafik distribusi temperatur yang diukur ketika gas LPG keluar dari ujung *burner tip* hingga berada pada jarak yang mendekati pangkal nyala api. Dalam pengukuran ketebalan *preheat zone* ini diperlukan temperatur *ignition* dari gas LPG yang didapat dari literatur. Sehingga grafik ini dihasilkan seperti pada gambar-gambar berikut. Pada perhitungan ini digunakan laju aliran bahan bakar $0,0533 \text{ dm}^3/\text{s}$ atau pada skala rotameter 12 cm.



Gambar 4.12. Grafik Distribusi Temperatur pada Tanpa Pemanasan

Nilai temperatur yang terjadi ini ditebelkan pada tabel 4.6.

Tabel 4.6. Distribusi Temperatur: Jarak dari Burner *Tip* (Tanpa Pemanasan)

Jarak dari Burner Tip (cm)	T _{distribusi}
0	37,775
0,5	37,27
1	37,1
1,5	38,33
2	41,27
2,5	89,32

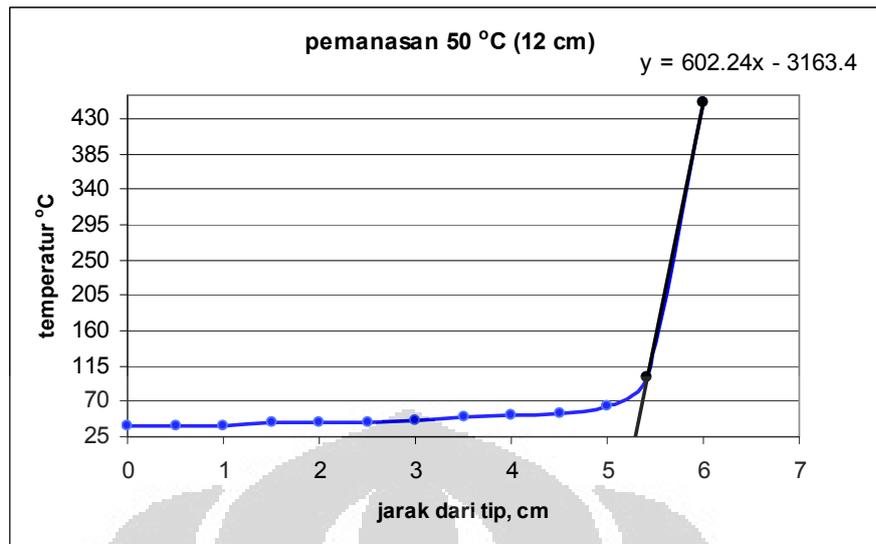
Dari grafik distribusi temperatur tersebut ditarik sebuah garis pendekatan yang menyinggung grafik yang dihasilkan. Dari persamaan garis yang dihasilkan dihitung nilai x-nya pada perpotongannya dengan sumbu x yaitu perhitungan pada saat nilai $y = 0$. Dari kedua nilai x yang dihasilkan, selisihnya dicari yang merupakan nilai dari ketebalan *preheat zone*. Dari perhitungan didapat nilai *preheat zone* untuk tanpa pemanasan dan laju aliran $0,0533 \text{ dm}^3/\text{s}$ sebesar 1 cm.

Dengan cara yang sama, pada pemanasan 50°C , 60°C , 70°C , dan 80°C dan pada laju aliran $0,0533 \text{ dm}^3/\text{s}$ diperoleh tebal *preheat zone* sebagai berikut.

Tabel 4.7. Tebal *Preheat Zone*

Pemanasan	Tebal <i>Preheat Zone</i> , η_0 , (cm)
Tanpa pemanasan	1
Pemanasan 50°C	0,75
Pemanasan 60°C	0,65
Pemanasan 70°C	0,61
Pemanasan 80°C	0,59

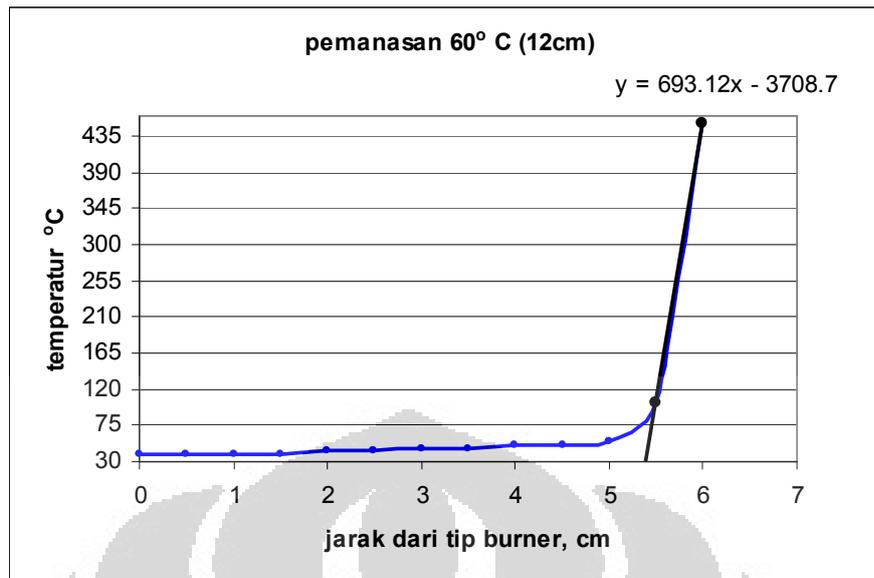
Dari tabel tersebut diatas dapat disimpulkan bahwa ketebalan *preheat zone* akan semakin kecil dengan temperatur *un-burn* yang semakin tinggi. Gambar grafik yang diperoleh ditunjukkan pada gambar-gambar berikut dengan tabelnya.



Gambar 4.13. Grafik Distribusi Temperatur pada Pemanasan 50°C

Tabel 4.8. Distribusi Temperatur: Jarak dari *Burner Tip* (Pemanasan 50 °C)

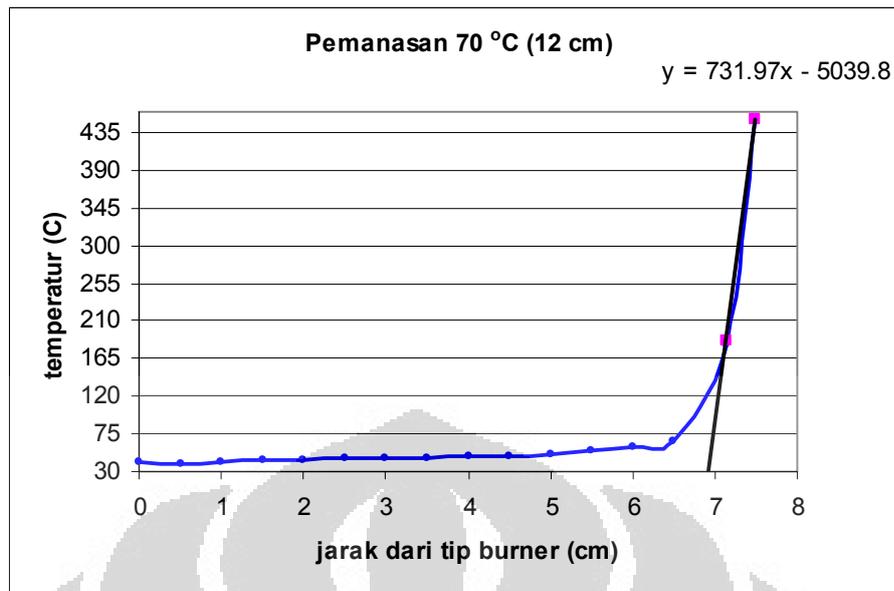
T_{OUT}	Jarak dari Burner Tip (cm)	$T_{distribusi}$
43,7	0	37,7
	0,5	38,59
	1	39,49
	1,5	42,6
	2	43,52
	2,5	43,88
	3	45,1
	3,5	49,69
	4	51,33
	4,5	54,05
	5	64,19
	5,5	100,7



Gambar 4.14. Grafik Distribusi Temperatur pada Pemanasan 60°C

Tabel 4.9. Distribusi Temperatur: Jarak dari *Burner Tip* (Pemanasan 60 °C)

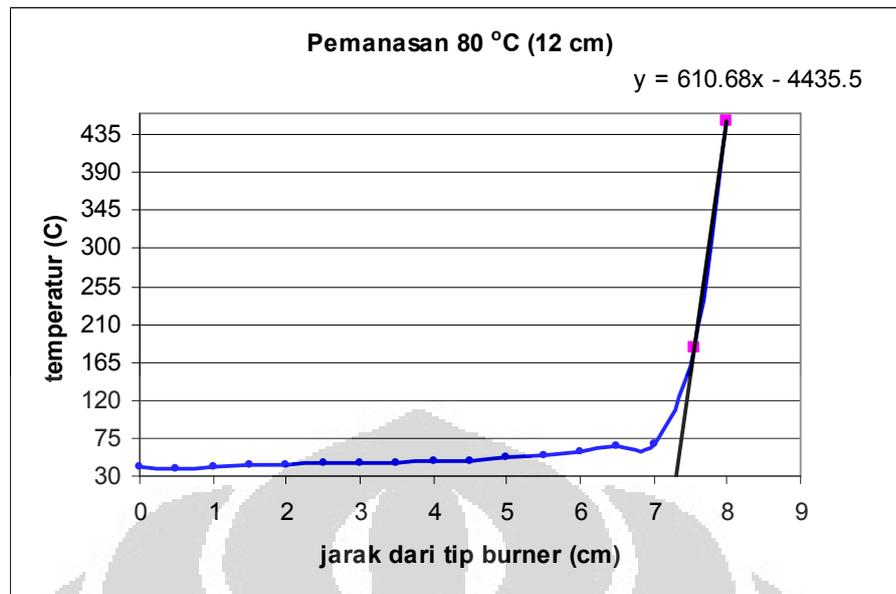
T_{OUT}	Jarak dari Burner Tip (cm)	$T_{distribusi}$
50,4	0	38,85
	0,5	38,25
	1	39,78
	1,5	39,57
	2	42,64
	2,5	44,61
	3	45,91
	3,5	47,06
	4	49,97
	4,5	51,26
	5	55,59
	5,5	103,44



Gambar 4.15. Grafik Distribusi Temperatur pada Pemanasan 70°C

Tabel 4.10. Distribusi Temperatur: Jarak dari *Burner Tip* (Pemanasan 70 °C)

T_{OUT}	Jarak dari Burner Tip (cm)	$T_{distribusi}$
52,4	0	40,57
	0,5	39,57
	1	41,59
	1,5	43,91
	2	44,47
	2,5	45,48
	3	45,94
	3,5	46,34
	4	46,99
	4,5	47,01
	5	51,03
	5,5	54
	6	58,8
	6,5	65,2
	7	186,49



Gambar 4.16. Grafik Distribusi Temperatur pada Pemanasan 80°C

Tabel 4.11. Distribusi Temperatur: Jarak dari *Burner Tip* (Pemanasan 80 °C)

T_{OUT}	Jarak dari Burner Tip	T_{PREHEATED}
52.4	0	40.57
	0,5	39.57
	1	41.59
	1,5	43.91
	2	44.47
	2,5	45.48
	3	45.94
	3,5	46.35
	4	47.01
	4,5	48.02
	5	52.3
	5,5	55.3
	6	58.2
	6,5	65.2
	7	68.2
	7,5	181.3

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

- a) Pada penelitian dengan pemanasan, temperatur maksimum gas LPG Campuran keluar dari nozel sebesar $68,8^{\circ}\text{C}$ pada nilai laju aliran gas LPG, Q_f , $0,0568 \text{ dm}^3/\text{s}$ pada temperatur pemanasan mediuin sebesar 80°C . Sedangkan temperatur terrendahnya sebesar $37,0^{\circ}\text{C}$ pada nilai laju aliran gas LPG $0,0148 \text{ dm}^3/\text{s}$ pada temperatur pemanasan sebesar 50°C .
- b) Pada masing-masing penelitian, baik tanpa maupun dengan pemanasan, tinggi *lifted flame* yang semakin bertambah dengan semakin besarnya nilai laju aliran gas LPG, Q_f , keluaran nozel. Pada $Q_f < 0,0323 \text{ dm}^3/\text{s}$, tinggi *lifted flame* mengalami kenaikan yang relatif linier.
- c) Tinggi *lifted flame* yang semakin bertambah dengan temperatur *un-burn* gas yang semakin tinggi. Tinggi *lifted flame* terbesar yang diperoleh tercatat pada temperatur *un-burn* $68,8^{\circ}\text{C}$ pada *flowrate*, Q_f , $0,0568 \text{ dm}^3/\text{s}$, sedangkan tinggi *lifted flame* terendah diperoleh pada eksperimen tanpa pemanasan atau temperatur *un-burn* 29°C pada *flowrate* $0,0218 \text{ dm}^3/\text{s}$.
- d) Pada masing-masing penelitian, baik tanpa maupun dengan pemanasan, panjang nyala api mengalami pola yang sama. Panjang nyala api relatif konstan mulai pada nilai laju aliran gas, Q_f , sebesar $0,0323 \text{ dm}^3/\text{s}$ hingga terjadi *blow-off*. Panjang nyala api mengalami pengurangan seiring dengan bertambahnya temperatur *un-burn* gas LPG.
- e) Panjang nyala api difusi berpengaruh terhadap kecepatan pembakaran. Kecepatan pembakaran untuk setiap pemanasan meningkat sesuai dengan pemanasan yang terjadi pada bahan bakar. Kecepatan pembakaran maksimum berada pada aliran udara $0,236 \text{ L/s}$ dan aliran bahan bakar $0,0388 \text{ L/s}$ yaitu dengan kecepatan pembakaran turbulen (S_T) $2,387 \text{ m/s}$.
- f) Pada masing-masing penelitian, baik tanpa maupun dengan pemanasan, temperatur *burner tip* cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya nilai laju aliran gas LPG.

- g) Temperatur *burner tip* mengalami penurunan dengan temperatur un-burn gas LPG yang semakin tinggi. Temperatur *burner tip* tertinggi tercatat sebesar $\pm 87,8^{\circ}\text{C}$ pada temperatur *un-burn* $68,8^{\circ}\text{C}$ pada *flowrate* $0,0568 \text{ dm}^3/\text{s}$, sedangkan temperatur *burner tip* terendah tercatat sebesar $\pm 39,2^{\circ}\text{C}$ pada temperatur *un-burn* $35,8^{\circ}\text{C}$ pada *flowrate* $0,0183 \text{ dm}^3/\text{s}$.
- h) Ketebalan *preheat zone* semakin berkurang dengan nilai temperatur *un-burn* gas LPG yang semakin tinggi. Pada nilai temperatur *un-burn* gas LPG tertinggi yaitu $68,8^{\circ}\text{C}$, tebal *preheat zone* adalah sebesar $0,58743 \text{ cm}$

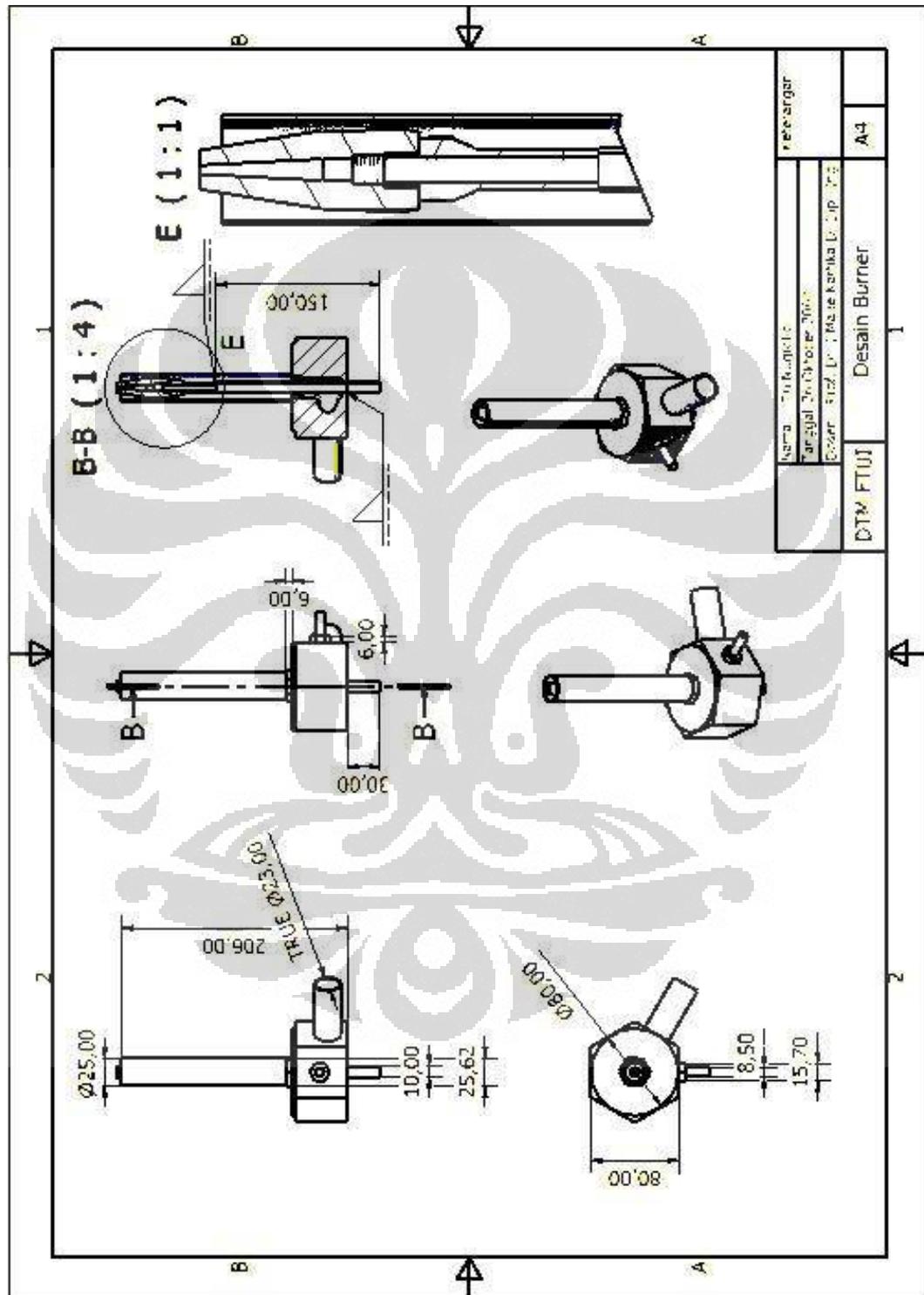
5.2 Saran

Adapun saran yang diharapkan penulis untuk mendukung kegiatan penelitian di Laboratorium *Thermodynamic Research Group Flame & Combustion* Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia demi di waktu yang akan datang antara lain sebagai berikut.

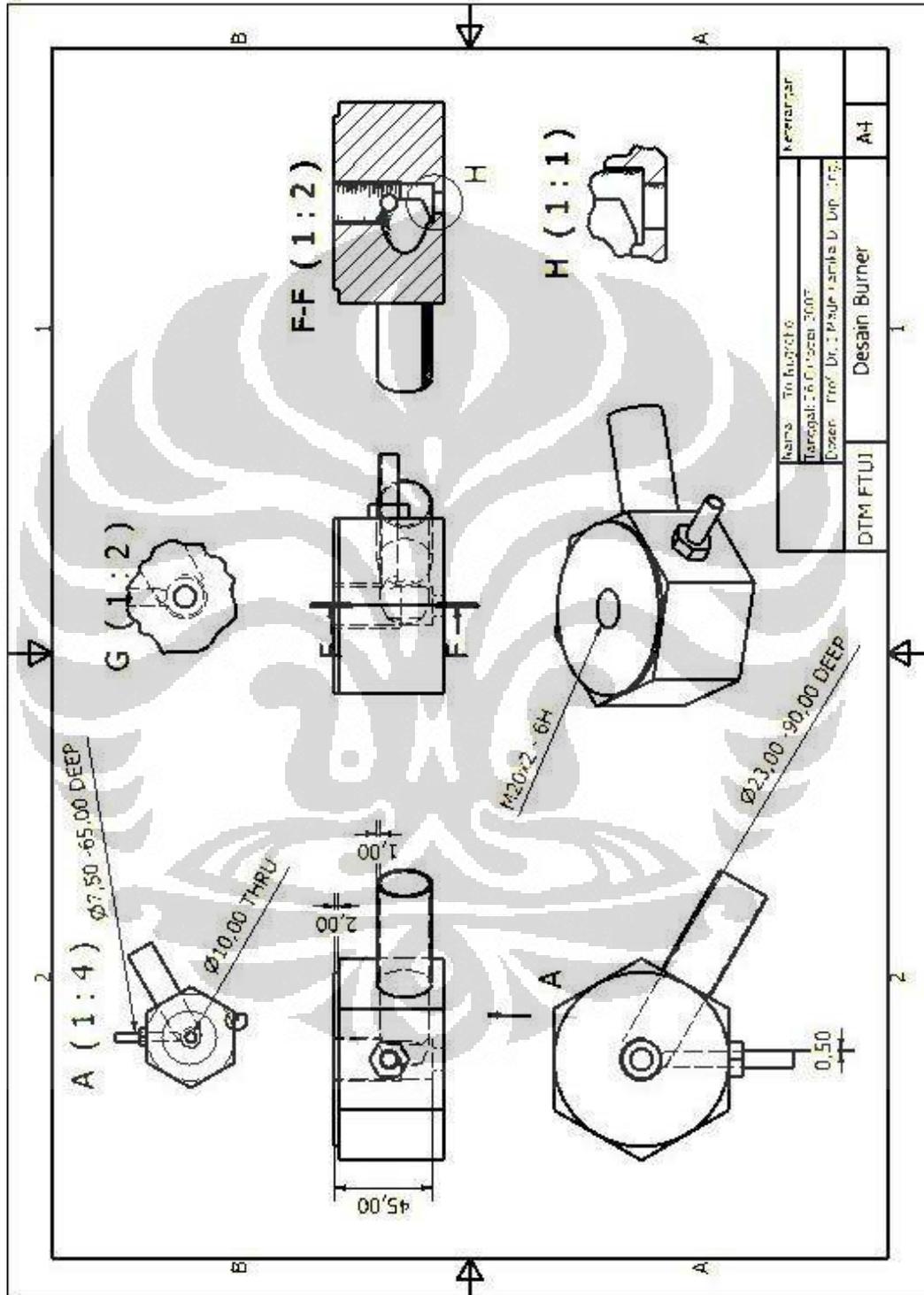
- a) Keadaan lingkungan laboratorium harus lebih diperbaiki agar nyala api tidak terpengaruh oleh gerakan udara sekitar.
- b) Penggunaan mediun pemanasan lain untuk memperoleh temperatur gas keluaran nozel yang lebih tinggi sehingga pengaruh pemanasan dapat diteliti dengan lebih lagi.
- c) Penelitian sebaiknya dapat dilakukan pada siang hari dengan membuat situasi keadaan ruangan laboratorium seperti pada malam hari.
- d) Penelitian tugas akhir adalah suatu hal yang menarik di lingkungan kampus karena dapat melatih mahasiswa dalam menganalisa suatu keadaan dan memacu keingintahuan yang lebih lagi. Oleh sebab itu, penulis menyarankan agar kegiatan seperti ini lebih banyak lagi diterapkan pada mahasiswa disamping kegiatan lain yang sudah ada seperti tugas merancang dan kerja praktek.

DAFTAR PUSTAKA

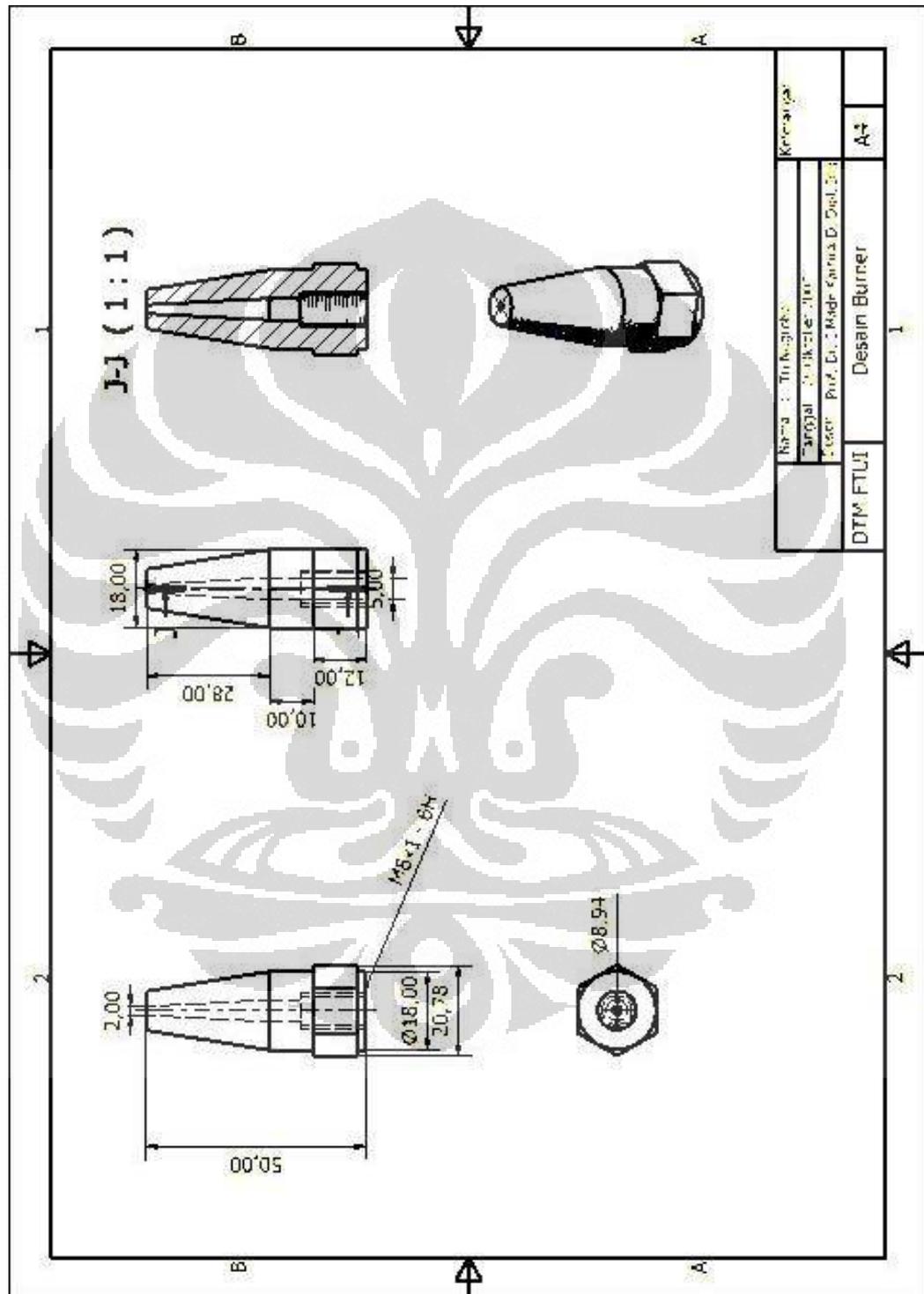
- Bird, R.B., Stewart, W.E., & Lightfoot, E.N. (2003). *Transport phenomena* (2nd ed). Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd.
- Cengel, Yunus A., & Michael A. Boles. *Thermodynamic: An engineering approach* (4th ed). New York: McGraw-Hill, 1998.
- Chen, M., Herrmann, M., & Peters, N. (2000). Flamelet Modeling of Lifted Turbulent Methane/Air and Propane/Air Jet Diffusion Flames. *Combustion Institute RWTH-Aachen Germany* 28.
- Direktorat Jenderal Perhubungan Darat. (2007). *Kajian dampak penggunaan LPG sebagai bahan bakar alternatif terhadap mesin kendaraan bermotor dan lingkungan*. Jakarta: Departemen Perhubungan.
- Drysdale, D. (1998). *An introduction to fire dynamics* (2nd ed). Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Glassman, I. (1977). *Combustion* (3rd ed). New York: Academic Press.
- Glassman, I. (Ed.). (1975). *Combustion science and technology* (Vol. 2). New York: Gordon and Breach Science Publishers.
- Incropera, F.P., & Dewitt, D.P. (2002). *Fundamentals of heat and mass transfer* (4th ed). Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd.
- Kanury, A.M. (1975). *Introduction to combustion phenomena*. New York: Gordon and Breach Science Publishers.
- Kazantsev, E.I. (1977). *Industrial furnance: Design and calculation reference book* (I.V. Savin, Penerjemah). Moscow: MIR Publisher
- Kuo, K.K. (1986). *Principles of combustion*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Sharman, S.P., & Mohon, C. (1984). *Fuel and combustion*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Strehlow, R.A. (1985). *Combustion fundamentals*. New York: McGraw-Hill Book Company.

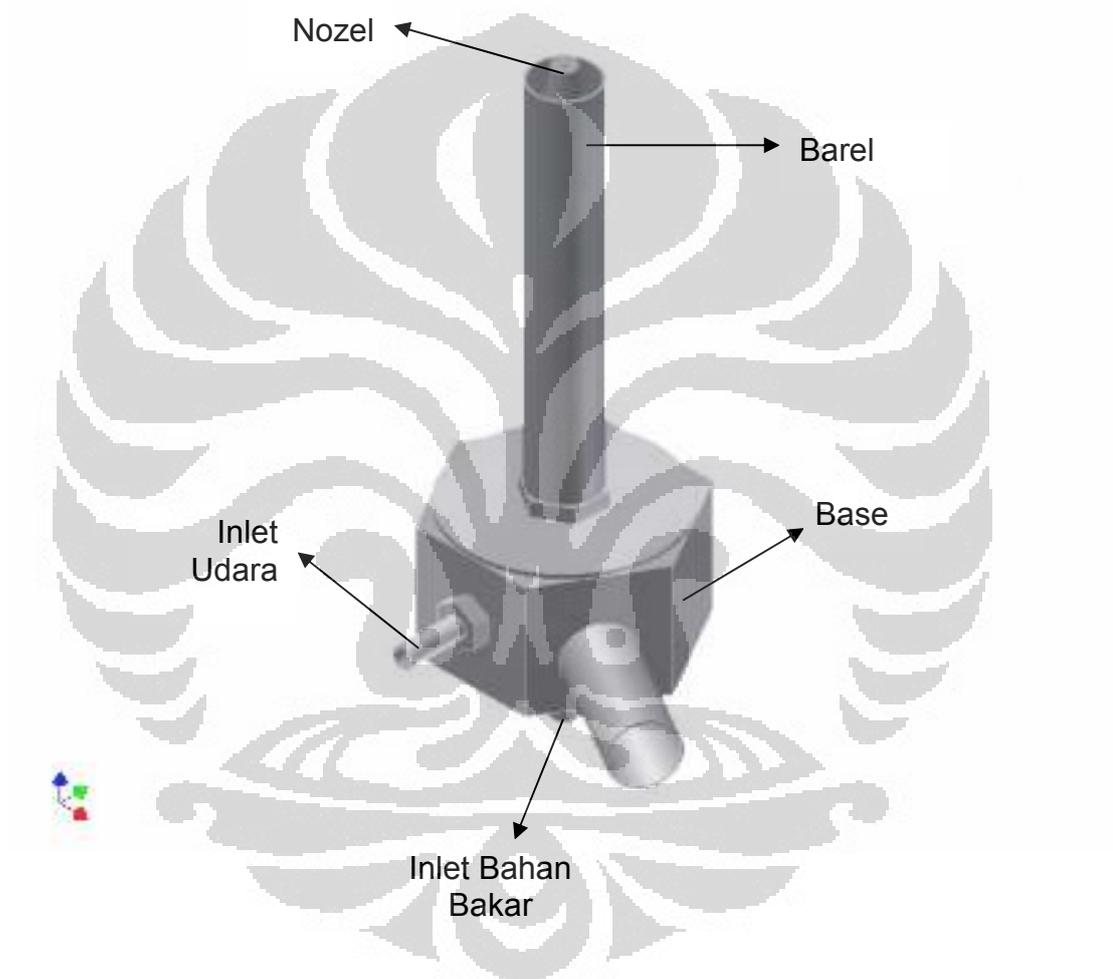
Lampiran 1: Gambar Teknik *Burner Ejected Combustor Type*

Lampiran 2: Gambar Teknik *Burner Ejected Combustor Type*: Bagian Base



Lampiran 3: Gambar Teknik Nozel

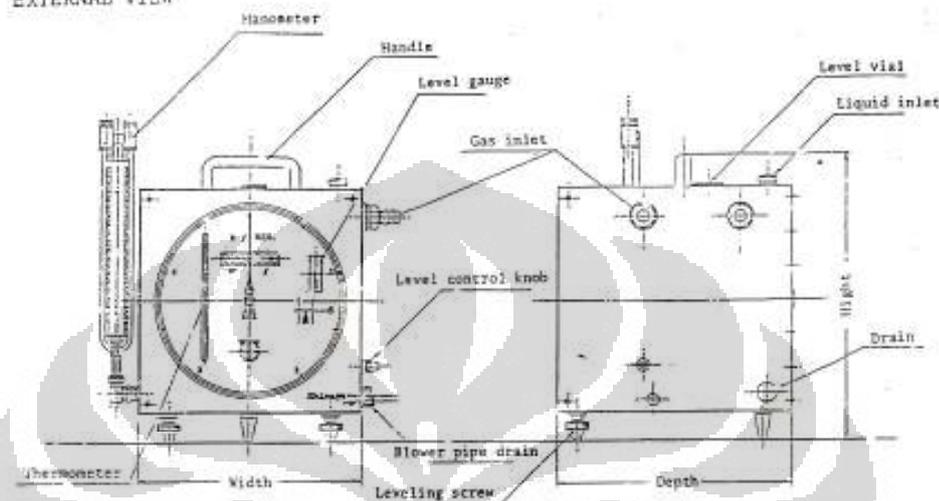


Lampiran 4: Gambar *Burner Ejected Combustor Type*

Lampiran 5: Panduan Penggunaan *Wet Gas Meter*

TYPE-WE WET GAS METER

EXTERNAL VIEW



SPECIFICATIONS

TYPE	MEASURING RANGE. ℓ/h	CAPACITY OF LIQUID. (ℓ)	MIN. SCALE. ℓ	MAX. INVERTING RATING QUANTITY. (ℓ)	DIMENSION. (mm)			RUBBER TUBE CONNECTION. (mm)	NET WEIGHT. Kg
					H	W	D		
WE-2.5	3 ~ 1,500 ℓ/h	5 ℓ	0.02 ℓ	9.999m ³	313	244	253	13 φ 60	9.5kg
WE-5	10 ~ 3,000 ℓ/h	5 ℓ	0.01 ℓ	9.999m ³	387	324	293	19 φ 60	24 kg
WE-10	20 ~ 6,000 ℓ/h	10 ℓ	0.02 ℓ	9.999m ³	463	395	366	25 φ (1)	34 kg

Maximum temperature: 60°C Maximum pressure: 1,000 mmH₂O

The Type-WE Wet Gas Meter has been developed to fill the need for an easy-to-operate, corrosion-proof, precision instrument for measuring flow rate of gas. Improvements in performance of the instrument results from modern techniques which have been developed over the many years we have served the instrument industry.

The Type-WE Wet Gas Meter offers the following advantages and covers a wide range of applications including laboratory application.

ADVANTAGES

1. Select material ensures safer operation and long-term service.
2. High performance: Allows accurate measurement of the smallest quantity of gas. Pressure loss minimized. Wide measurement range.
3. Easier to operate and control liquid level.
4. Easy-to-read level gauge permits accurate level control.
5. Esthetically deserved. Light, compact and portable.

This manual has been prepared to enable you to enjoy optimum performance from your Type-WE Wet Gas Meter. Incorrect handling reduces the efficiency of the meter and increase component wear; therefore, the instructions set forth in this manual should be followed when operating the meter.

(Lanjutan)

INSTALLATION

Place the meter on a flat rest that is free of vibration. Turn the leveling screws as required until the level vial indicates that the meter is mounted on a horizontal plane.

LIQUID LEVEL ADJUSTMENT**1. Liquid Filling**

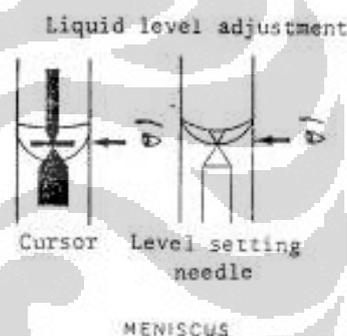
Remove the liquid inlet plug on the top right (rear) of the meter. Pour in the liquid such that the liquid level reaches about 2 mm above the level gauge cursor line or level setting needle point.

2. Draining Blower Pipe

Remove the blower pipe drain plug, and check to see if there is any liquid. Liquid remaining in the blower pipe makes the meter inoperable. If liquid remains in the blower pipe, therefore, drain the blower pipe and tighten the plug.

3. Idling

Tighten the liquid inlet plug. Set the inlet rubber tube, and idle the meter so that the larger pointer makes 20 to 30 revolutions. After the idling is completed, allow the inside of meter to become under atmospheric pressure by disconnecting both the inlet and outlet rubber tubes. Gradually remove the liquid via the level control knob on the right side panel of meter, until the liquid level aligns with the level gauge cursor line or level setting needle point as shown in the figure (right).

**LEAKAGE PROOF TEST**

Connect and secure both the inlet and outlet rubber tubes to the meter. Seal the outlet side. Apply a pressure (within the measurement range of manometer) to the meter via the inlet. Seal the inlet side. Check for leaks by reading the manometer.

MEASUREMENT

Connect both the inlet and outlet tubes as required to make measurement. Let gas to be metered flow through the meter until the larger pointer makes approximately 20 revolutions. Air that has remained in the meter and the tubes is then replaced by gas. When gas and liquid greatly differ in temperature, idle the meter until they obtain the same temperature. After the above steps are performed, the meter is available for measurement.

(Lanjutan)

OPERATING PRESSURE AND TEMPERATURE

The meter should be operated at a pressure of within the range of manometer, although the meter is constructed to withstand a pressure up to 0.15 kg/cm² (1500 mm H₂O)

The operating temperature is 50°C or below. When gas of not higher than 0°C or highly water-soluble gas is metered, use liquid paraffin, electrosark machining oil or trifluorine-contained polymers (Daifloil, Daikin Kogyo Co., Ltd., is such a product.) instead of water

When the manometer is not used, remove it from the meter and stop up the opening with the attached blind cover.

GAS TO BE METERED

The casing of the meter (standard type) is galvanized iron sheet coated with epoxy paint. The drum and the machined parts are made of brass (B5BM2) and constructed by brazing. The packings are made of synthetic rubber (nitrile rubber). In consideration of the materials mentioned above, the gases that affect the materials cannot be metered.

The meter is used for the measurement of town gas, natural gas, naphtha gas, saturated hydrocarbon gases, carbon dioxide, nitrogen gas, hydrogen gas, air, helium or other inert gases. Active gases such as ammonia gas and acetylene gas, on the other hand, require a special meter made to order.

DRAINAGE

To drain the meter, remove the drain plug, and tilt the meter backward such that the remaining liquid in the drum is discharged. Verify that the meter is completely drained.

PRECAUTIONS

1. Make liquid level adjustment prior to every measurement.
2. Before checking liquid level, set the larger pointer to zero position and allow the inside of meter to become under atmospheric pressure.
3. Exercise care when metering dry gas for many hours, because it will cause the liquid to evaporate, which results in lowering the liquid level.
4. The parts inside the meter may become encrusted with deposits from the liquid used. Therefore drain the meter at least once a month to ensure proper drum rotation.
5. Exercise care when starting measurement by supplying gas so that pressure applied to the meter is gradually increased.
6. Drain the meter before transportation. Use caution not to damage the meter during transportation.
7. When the meter is not used for a long time, it should be drained, then wrapped in paper and placed in a cardboard box, and kept free from moisture.
8. When the meter requires servicing, contact your local dealer because it will require complicated adjustment. Do not ask unauthorized service engineers to make repairs, as it may affect the performance or durability of the meter.

Lampiran 6: Petunjuk Penggunaan *Infrared Thermometer***Distance & Spot Size**

As the distance (D) from the object increases, the spot size (S) of the area measured by the unit becomes larger. The relationship between distance and spot size for each unit is listed below. The focal point for each unit is 914mm (36"). The spot sizes indicate 90% encircled energy.

Fig:1 BG47

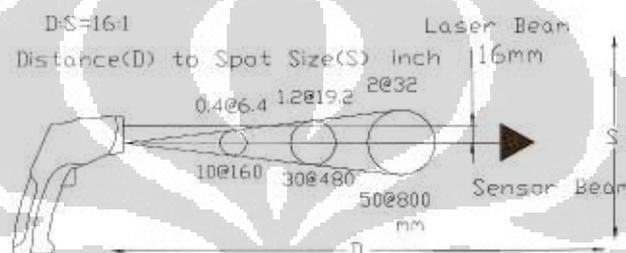
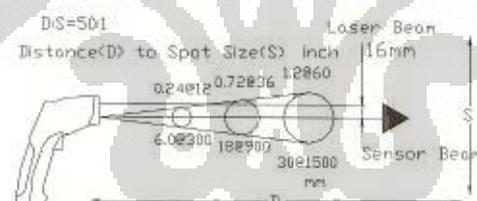


Fig:2 BG48

**SPECIFICATIONS**

Model	Temperature range	D: S
BG 47	-50 to 750 °C (-58 to 1382°F)	16:1

Display resolution 0.1 °C(0.1°F)

Accuracy for targets:

Assumes ambient operating temperature of 23 to 25 °C (73 to 77°F)

-50°C to -20°C (-58 to -4°F): ±5 °C(±9°F)

-20°C to 200°C(-4°F to 392°F): ± 1.5% of reading ± 2°C (±3.6°F);

201°C to 538°C (393°F to 1000.4°F): ± 2.0% of reading ±2°C(±3.6°F);

539°C to 750°C (1000.4°F to 1382°F): ± 3.5% of reading ±5°C(±9°F);

(Lanjutan)

BG 48	-50 to 1000 °C (-58 to 1832°F)
D: S	50:1
Display resolution	0.1 °C(0.1°F)
Accuracy	for targets:
Assumes ambient operating temperature of 23 to 25 °C (73 to 77°F)	
-50°C to -20°C (-58 to -4°F):	±5 °C(±9°F)
-20 to 200°C(-4 to 392°F):	± 1.5% of reading ± 2°C (±3.6°F);
200 to 538°C (392 to 1000°F):	± 2.0% of reading ±2°C (±3.6°F);
538 to 1000°C(1000 to 1832°F):	± 3.5% of reading ± 5 °C(±9°F)
Response time	less than 1 second
Spectral response	8~14µm
Emissivity	Digitally adjustable from 0.10 to 1.0
Over range indication	LCD will show "-OL", "0L"
Polarity	Automatic (no indication for positive polarity); Minus (-) sign for negative polarity
Diode laser	output <1mW,Wavelength 630~670nm, Class 2(II) laser product
Operating temp.	0 to 50°C (32 to 122°F)
Storage temp.	-20 to 60°C (-4 to 140°F)
Relative humidity	10%~90%RH operating, <80%RH storage
Power supply	9V battery, NEDA 1604A or IEC 6LR61, or equivalent
Weight	290g (10.2 oz.)
Size	100 x 56 x 230mm (3.9 x 2.2 x 9.0")
Safety	" CE " Comply with EMC

Note:

- **Accuracy:** Given at 18 to 28 °C (64 to 82 °F), less than 80 % RH.
- **Field of View:** Make sure that the target is larger than the unit's spot size. The smaller the target, the closer you should be to it. When accuracy is critical, make sure the target is at least twice as large as the spot size.

(Lanjutan)

NOTES:

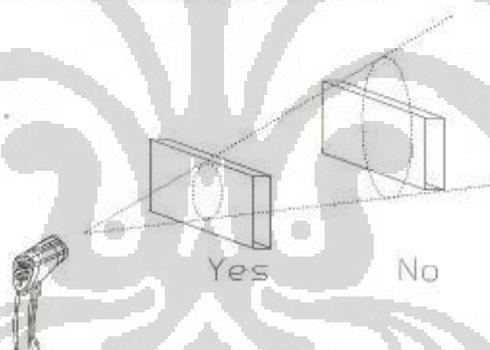
- **How it Works**

Infrared thermometers measure the surface temperature of an object. The unit's optics sense emitted, reflected, and transmitted energy, which is collected and focused onto a detector. The unit's electronics translate the information into a temperature reading, which is display on the unit. In units with a laser, the laser is used for aiming purposes only.

- **Field of View**

Make sure that the target is larger than the unit's spot size. The smaller the target, the closer you should be to it. When accuracy is critical, make sure the target is at

least twice as large as the spot size.



- **Distance & Spot Size**

As the distance (D) from the object increases, the spot size (S) of the area measured by the unit becomes larger. See: Fig: 1.

- **Locating a hot Spot**

To find a hot spot aim the thermometer outside the area of interest, then scan across with an up and down motion until you locate hot spot.

- **Reminders**

- ① Not recommended for use in measuring shiny or polished metal surfaces (stainless steel, aluminum, etc.). See **Emissivity**

(Lanjutan)

- ② The unit cannot measure through transparent surfaces such as glass. It will measure the surface temperature of the glass instead.
- ③ Steam, dust, smoke, etc., Can prevent accurate measurement by obstructing the unit's optics.

- **Emissivity**

Emissivity is a term used to describe the energy-emitting characteristics of materials.

Most (90% of typical applications) organic materials and painted or oxidized surfaces have an emissivity of 0.95 (pre-set in the unit). Inaccurate readings will result from measuring shiny or polished metal surfaces. To compensate, cover the surface to be measured with masking tape or flat black paint. Allow time for the tape to reach the same temperature as the material underneath it. Measure the temperature of the tape or painted surface.

Emissivity Values

Substance	Thermal emissivity	Substance	Thermal emissivity
Asphalt	0.90 to 0.98	Cloth (black)	0.98
Concrete	0.94	Human skin	0.98
Cement	0.96	Lather	0.75 to 0.80
Sand	0.90	Charcoal (powder)	0.96
Earth	0.92 to 0.96	Lacquer	0.80 to 0.95
Water	0.92 to 0.96	Lacquer (matt)	0.97
Ice	0.96 to 0.98	Rubber (black)	0.94
Snow	0.83	Plastic	0.85 to 0.95
Glass	0.90 to 0.95	Timber	0.90
Ceramic	0.90 to 0.94	Paper	0.70 to 0.94
Marble	0.94	Chromium oxides	0.81
Plaster	0.80 to 0.90	Copper oxides	0.78
Mortar	0.89 to 0.91	Iron oxides	0.78 to 0.82
Brick	0.93 to 0.96	Textiles	0.90

Lampiran 7: Viskositas Gas dan Uap

T °C		Viscosity ($\times 10^{-6}$) of Gases and Vapors (in gms/cm ² /sec)																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0						139	166	83	85	91	102								
10					72	140	170	84	87	92	103			170	81				76
20					76	148	173	87	91	101	109			178	84				80
30					79	153	175	90	94	104	113			184	88				84
40					82	157	177	92	98	108	117			188	90				87
50		68			85	168	180	94	101	110	120			192	94				90
75		82	210		91	180	188	98	100	108	120			127	203	100	63	96	
100	105	93	218		97	190	196	108	105	114	126			125	211	108	68	102	126
150		110	242		108	211	218	124	113	127	140			136	229	120	77	114	144
200		125	255		120	232	240	138	122	141	154			152	245	134	85	125	164
250		136	275		132	250	266	153	130	155	167			170	253	151	92	137	183
300		147	295		145	268	294	166	139	171	180			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	311			241	
500			360		333	333		171			226			340					
600			390		361	361		185			256			369					
700			420		389	389		198			285			381					
800			442		415	415		211						419					
900			470		440	440		224						440					
1,000			500		470	470		235						460					

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

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

Lampiran 8: Karakteristik Bahan Bakar

Name of matter, chemical formula	Molecular mass M , kg/mol	Density ρ , kg/m ³	Gas constant R , J/(kg·°C)	Heat of combustion			
				Q_h^{vol}	Q_l^{vol}	Q_h^m	Q_l^m
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 9: *Properties* Propana (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	$\nu \cdot 10^4, \text{m}^2/\text{s}$	$c_p, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	$\frac{c_p}{c_f} = k$	$\alpha \cdot 10^4, \text{m}^2/\text{h}$	$\rho, \text{kg}/\text{m}^3$
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 10: *Properties* Propana (C₃H₈) dan Butana (C₄H₁₀) [2]

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^4, \text{W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$	$\eta \cdot 10^4, \text{N}\cdot\text{s/m}^2$	Pr	$\nu \cdot 10^4, \text{m}^2/\text{s}$	$c_p, \text{kJ/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$	$\frac{c_p}{c_r} = k$	$a \cdot 10^2, \text{m}^2/\text{h}$	$\rho, \text{kg/m}^3$
Butane (C₄H₁₀)								
0	13.3	6.84	0.821	2.63	1.5918	1.097	1.16	2.593
100	23.5	9.26	0.798	4.87	2.0273	1.075	2.20	1.90
200	36.5	11.67	0.784	7.78	2.4556	1.061	3.57	1.50
300	51.9	14.02	0.761	11.3	2.8149	1.052	5.37	1.24
400	69.8	16.38	0.734	15.6	3.1292	1.046	7.64	1.05
500	90.2	18.73	0.706	20.5	3.4043	1.043	10.4	0.916
600	113.0	21.08	0.679	26.1	3.6442	1.040	13.7	0.812
Propane (C₃H₈)								
0	15.2	7.50	0.762	0.762	3.81	1.5495	1.138	1.80
100	26.3	10.00	0.768	0.768	6.94	2.0168	1.102	3.26
200	40.1	12.45	0.763	0.763	10.9	2.4581	1.083	5.17
300	56.2	14.81	0.748	0.748	15.8	2.8345	1.070	7.61
400	74.8	17.16	0.727	0.727	21.6	3.1610	0.062	10.7
500	95.6	19.42	0.700	0.700	28.2	3.4487	1.057	14.4
600	118.6	21.77	0.678	0.678	35.6	3.6974	1.053	18.8