



UNIVERSITAS INDONESIA

**KAJIAN EXPERIMENTAL FENOMENA *REATTACHMENT*
FLAME SEBAGAI DASAR PENCEGAHAN *FLASHBACK*
FLAME PADA BUNSEN BURNER DENGAN BAHAN BAKAR
LPG**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Master Teknik

Irvan Raymon Rondonuwu

1006788504

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

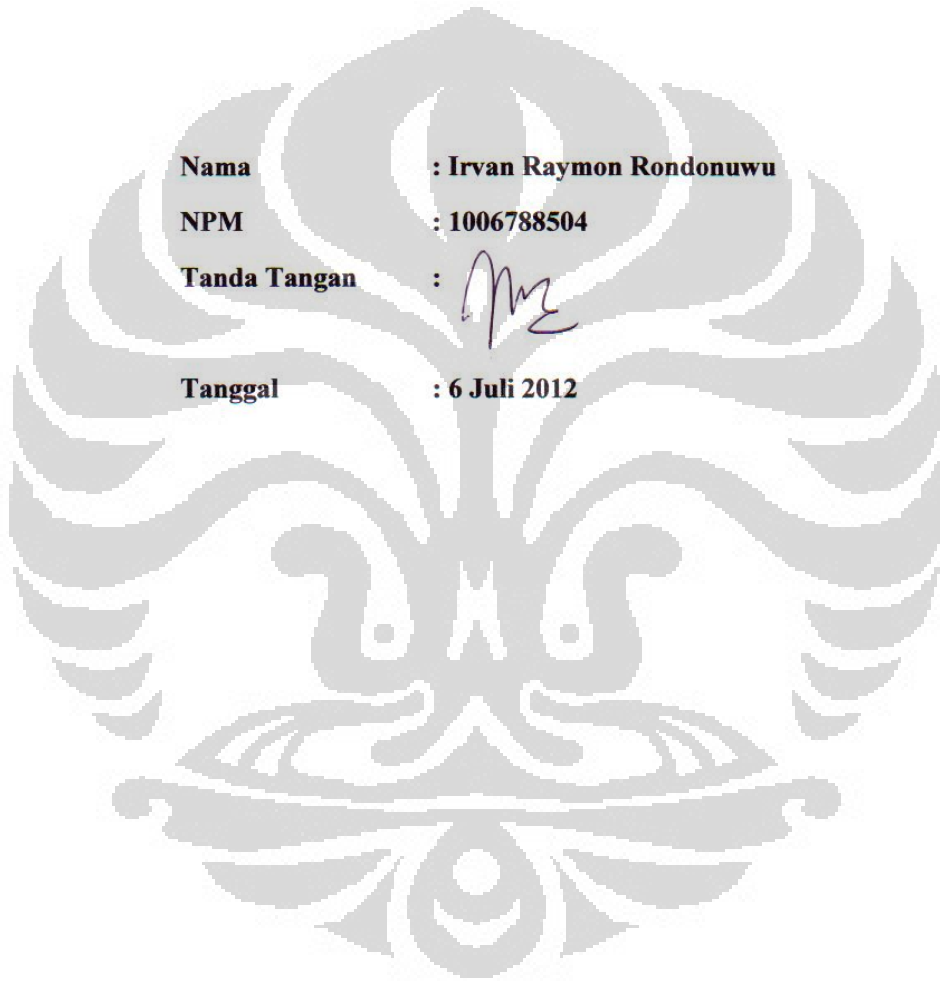
Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Irvan Raymon Rondonuwu

NPM : 1006788504

Tanda Tangan : 

Tanggal : 6 Juli 2012



HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh

Nama : Irvan Raymon Rondonuwu
NPM : 1006788504
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tesis :

Kajian Eksperimental Fenomena *Reattachment Flame* Sebagai Dasar Pencegahan *Flashback Flame* Pada Bunsen Burner Dengan Bahan Bakar LPG

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. I Made Kartika Dhiputra Dipl. –Ing.

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

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

Penguji : Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M. Eng.

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Juli 2012

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi syarat kelulusan berdasarkan kurikulum master Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia. Dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada

- (1) Prof. Dr. Ir. I Made Kartika Dhiputra, dipl.-ing. yang telah menyediakan waktu, tenaga, pikiran dan selalu sabar mengarahkan, membimbing dan memberikan ilmu dan pengalaman baru dalam penyusunan tesis ini maupun dalam proses pembelajaran di pasca sarjana;
- (2) Prof. Dr. Ir. Yulianto S. Nugroho, MSc dan Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M. Eng yang telah menguji dan memberikan masukan dalam penyusunan tesis ini;
- (3) Papa dan mama, mami dan papi, my dearest sister Sendy and family yang selalu mendukung saya secara moral, spiritual dan finansial;
- (4) Pa Yop dan Ta Sel, Rino dan Ola yang memberikan tempat tinggal dan support untuk saya selama kuliah;
- (5) Istri tercinta Rillya dan little Angels, Mirai, Ryan dan Chanan yang selalu menjadi semangat dan motivasi saya,
- (6) Bro and sist di lab flame and combustion, bro Setya yang selalu berjuang bersama, juga Dea, Gunawan dan Immanuel;
- (7) Bro and sist sesama pasca sarjana, bro Sabar, bro Arnas, bro Hendar dan, bro Maswan dan semua teman seangkatan;
- (8) Semua Pihak yang tidak dapat disebut satu persatu.

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

Depok, 6 Juli 2012

Penulis

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

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

Nama : Irvan Raymon Rondonuwu
NPM : 1006788504
Program Studi : Teknik Mesin Konversi Energi
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

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

**KAJIAN EXPERIMENTAL FENOMENA *REATTACHMENT FLAME*
SEBAGAI DASAR PENCEGAHAN *FLASHBACK FLAME* PADA BUNSEN
BURNER DENGAN BAHAN BAKAR LPG**


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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 6 Juli 2012

Yang menyatakan



(Irvan Raymon Rondonuwu)

ABSTRAK

Nama : Irvan Raymon Rondonuwu
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Kajian Experimental Fenomena *Reattachment Flame* Sebagai Dasar Pencegahan *Flashback Flame* pada Bunsen Burner Dengan Bahan Bakar LPG

Flashback flame terjadi ketika nyala api masuk ke dalam burner. Hal ini tidak hanya mengganggu tetapi juga berbahaya bagi sistem. Proses dan kondisi terjadinya *flashback* diteliti secara eksperimen menggunakan bunsen burner dengan tabung pirex transparan. Fenomena ini didokumentasikan dengan video dan dianalisa dengan menggunakan pengolahan citra. Dengan diketahuinya kondisi *flashback* maka fenomena ini dapat dihindari dan lebih daripada itu juga harus dapat dicegah. Cara pencegahan dilakukan dengan pendekatan pencegahan *reattachment flame* atau pangkal nyala yang kembali ke ujung burner setelah terangkat.

Batang *stainless steel* dengan berbagai ukuran dan kawat jaring diletakkan pada jarak tertentu dari ujung burner. *Reattachment* dapat dicegah dan dengan menggunakan kawat jaring mesh #16 yang diletakkan sampai dengan 40mm dari ujung burner dan *flashback* dapat dicegah dengan menggunakan kawat jaring mesh #8 yang diletakkan tepat di ujung burner.

Kata kunci : *flashback flame*, *reattachment flame*, kawat jaring

ABSTRACT

Name : Irvan Raymon Rondonuwu
Major : Teknik Mesin
Title : Experimental Study of Reattachment Flame as Flashback Flame
Prevention Analysis at Bunsen Burner With LPG

Flashback flame occurs when flame enters and propagate through the burner. It is not only a nuisance, but is a safety hazard as well. The process and condition of flashback are experimentally investigated using bunsen burner with pirex tube documented with video and analyzed by using digital imaging.

Stainless steel rod with diameter variation and wire mesh are used as bluff body to occupy lift-up and reattachment. Reattachment can be prevented by using wire mesh #16 in every position above burner and flashback can be prevented by wire mesh #8 that attached to burner tip.

Keywords : *reattachment flame, flashback flame*, wire mesh

DAFTAR ISI

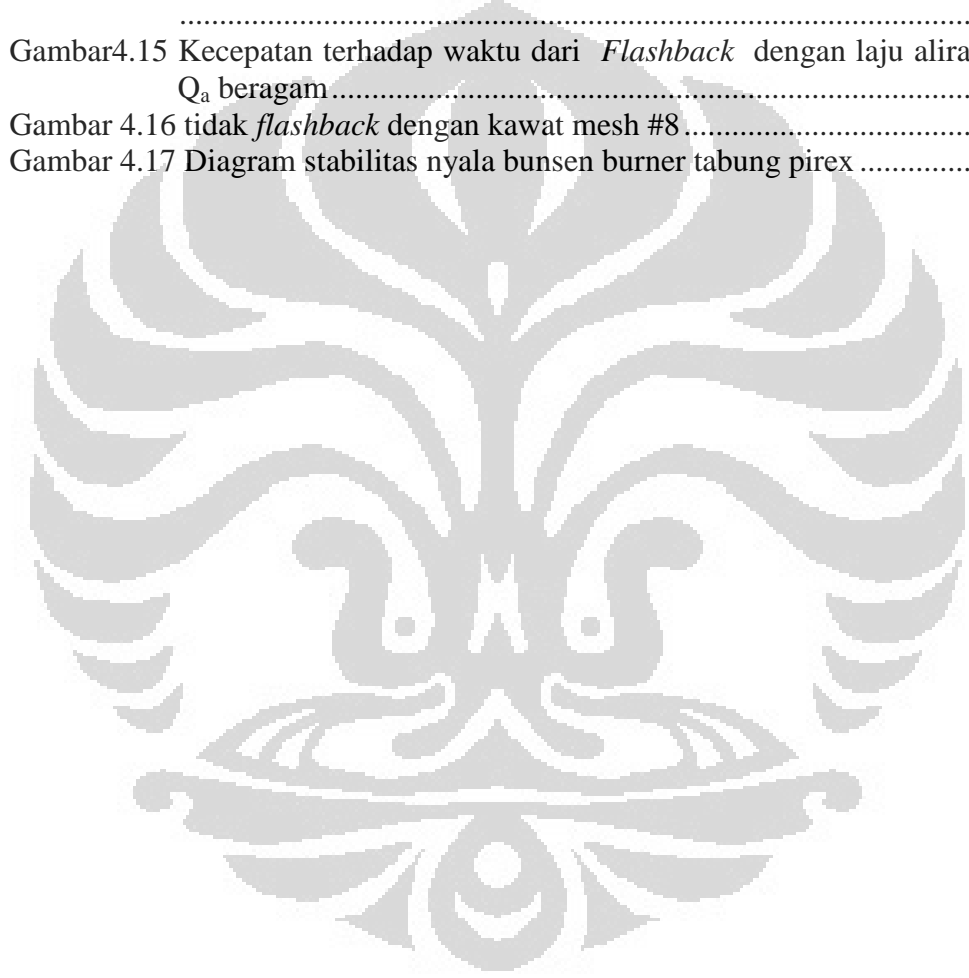
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	v
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
1 BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH.....	2
1.3 TUJUAN PENELITIAN	2
1.4 BATASAN MASALAH	2
1.5 METODOLOGI PENELITIAN	3
1.6 SISTEMATIKA PENELITIAN	3
2 BAB 2 DASAR TEORI.....	5
2.1 Bahan Bakar Gas	5
2.2 Teori Dasar Pembakaran	8
2.2.1 Reaksi Pembakaran.....	8
2.2.2 Klasifikasi Nyala.....	9
2.2.3 <i>Air Fuel Ratio</i> (AFR)	9
2.2.4 Beban Pembakaran (<i>Burning Load</i>).....	10
2.2.5 Stabilitas Nyala	10
2.2.6 <i>Premixed Flame</i> dan <i>Diffusion Flame</i>	12
2.3 Fenomana Nyala Api.....	16
2.3.1 <i>Flashback</i>	16
2.3.2 <i>Lifted flame</i>	18
2.3.3 <i>Blow off</i>	18
2.3.4 <i>Lift-up flame</i>	18
2.3.5 <i>Reattachment Flame</i>	19
3 BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	21

3.1	Sistematika Penelitian	21
3.2	Perancangan dan Setup Alat	22
3.3	Perangkat Eksperimen yang digunakan	22
3.3.1	Bahan Bakar	22
3.3.2	Alat Ukur Aliran Gas dan Udara.....	24
3.3.3	Bunsen burner	27
3.3.4	Benda Penghalang.....	27
3.3.5	Alat Dokumentasi.....	28
3.3.6	Kamera	28
3.3.7	Peralatan Pendukung.....	29
3.4	Pengambilan Data.....	30
3.4.1	Pengambilan data <i>Flashback</i>	30
3.4.2	Pengambilan data <i>lift-up</i> dan <i>Reattachment</i>	31
3.5	Pengolahan Data.....	32
3.5.1	Pengolahan data <i>laju aliran</i>	32
3.5.2	Pengolahan citra	32
4	BAB 4 Hasil dan Analisa	35
4.1	<i>Lift-up Flame</i> dan <i>Reattachment Flame</i>	35
4.1.1	<i>Blow off</i>	35
4.1.2	Perbandingan <i>lift-up</i> , <i>Reattachment</i> dan <i>blow off</i>	35
4.1.3	<i>Reattachment</i> pada variasi batang dan jarak batang terhadap burner 36	
4.1.4	<i>Reattachment</i> pada kawat jaring	37
4.2	<i>Flashback</i>	40
4.2.1	Batasan laju aliran udara	40
4.2.2	Pengambilan dan pengaturan gambar nyala <i>flashback</i>	40
4.2.3	Bentuk nyala <i>flashback</i>	41
4.2.4	Jarak dan Kecepatan Nyala <i>Flashback</i>	43
4.2.5	Diagram stabilitas Nyala	46
4.2.6	Analisis undimensional <i>flashback</i>	47
5	BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	51
5.1	Kesimpulan.....	52
5.2	Saran	52
	DAFTAR REFERENSI	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar2.1 Sifat-sifat propana, butana dan LPG	7
Gambar2.2 Diagram stabilitas nyala, <i>flashback</i> , <i>lift-off</i> dan <i>yellow tipping</i> untuk bahan bakar gas alam (Turns, An introduction to combustions)	12
Gambar2.3 (a) skema bunsen burner (b) kecepatan nyala api laminar. (Turns, an introduction to combustion).....	13
Gambar2.4 pola aliran pada bunsen burner dengan api berbentuk kerucut (Irving – Combustion).....	14
Gambar2.5 nyala api pada bunsen burner	15
Gambar2.6 Proses kimia dan fisika nyala api pada lilin	15
Gambar2.7 Nyala api difusi dan premix	16
Gambar2.8 Vektor kecepatan dari kecepatan aliran dan kecepatan lokal api, (a) <i>flashback</i> (b) <i>lift-off</i> (Turns, An introduction to combustions)	17
Gambar2.9 <i>lift-up</i> flame dan <i>reattachment</i> flame dengan menggunakan batang ...	19
Gambar2.10 Tipe nyala api dan daerah operasional nyala pada bunsen burner ...	20
Gambar3.1. Diagram Alur Penelitian.....	21
Gambar3.2 eksperimen setup	22
Gambar3.3 (a) Tabung LPG 3 kg, (b) Regulator, (c) <i>Needle Valve</i>	23
Gambar3.4 Rotameter	24
Gambar3.5 Proses penyetaraan pengukuran aliran gas	25
Gambar3.6 Hubungan antara laju aliran gas LPG terukur Q_f (l/s) terhadap tinggi pelampung rotameter h_r	26
Gambar3.7 bunsen burner	27
Gambar3.8 (a) batang, (b) kawat jaring	28
Gambar3.9 Kamera Canon EOS 1D mark IV (dpreview.com)	28
Gambar3.10 Lensa. (a) EF 50 f2.5 makro, (b) EF 70-200 f2.8, IS USM (dpreview.com)	29
Gambar3.11 <i>Distortion chart</i> . (a) EF50 f2.5 makro (b) EF 70-200 f2.8 IS USM pada 135 mm (www.photozone.de)	29
Gambar3.12 Peralatan pendukung	30
Gambar3.13 Diagram alur pengambilan data gambar Flame Flashback	31
Gambar3.14 Skema pengambilan data flame lift-up dan flame reattachment	31
Gambar3.15 Skema pengaturan batang dan kawat jaring.....	32
Gambar3.16 Pengolahan citra dengan Canon Zoom Browser EX.....	33
Gambar3.17 Pengolahan citra dengan Photoshop.....	34
Gambar3.18 Pengolahan citra dengan ImageJ – Kalibrasi	34
Gambar3.19 Pengolahan citra dengan ImageJ - Pengukuran	34
Gambar4.1 Burning load dan AFR dari blow off	35
Gambar4.2 Perbandingan BL-AFR antara <i>Blow-off</i> , <i>Lift-up</i> dan <i>Reattachment</i> .	36
Gambar4.3 <i>Reattachment</i> dengan menggunakan batang $\phi = 2.0$ mm.....	36
Gambar4.4 <i>Reattachment</i> pada jarak batang $X = 30$ mm	37

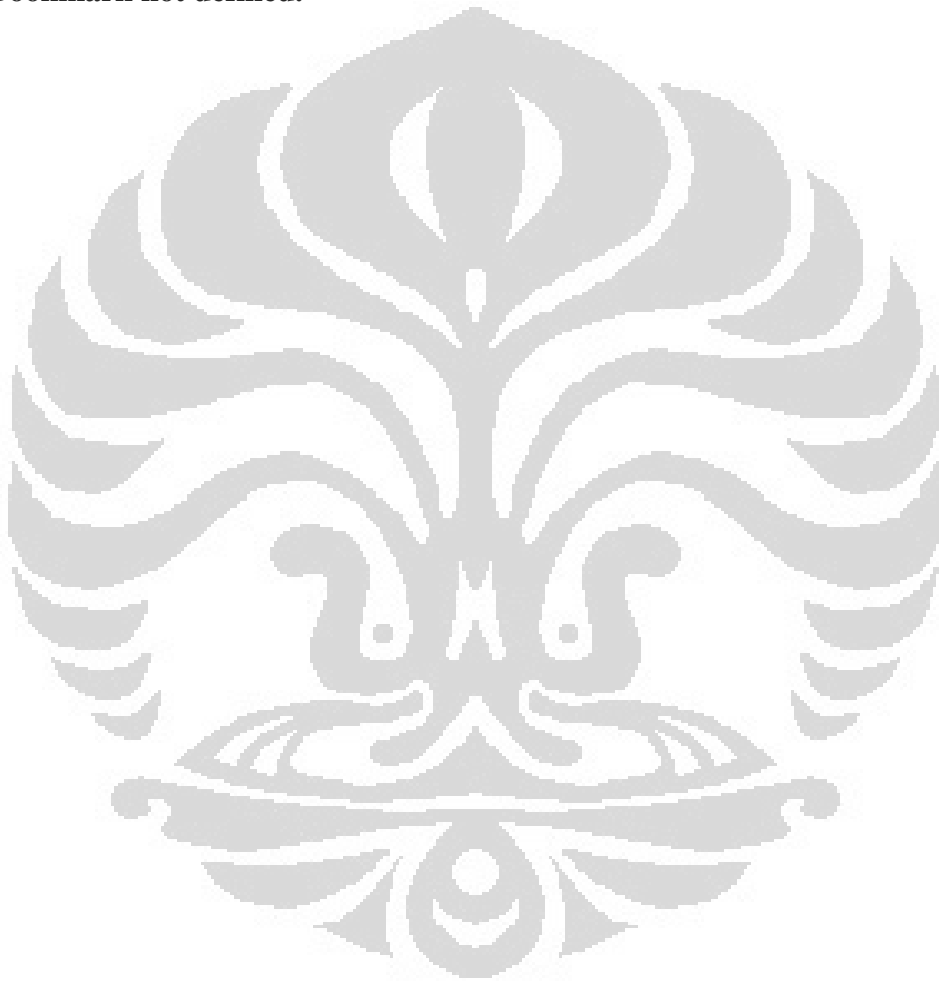
Gambar4.5	<i>Reattachment</i> , batang ϕ 1.5mm, posisi silang	37
Gambar4.6	<i>Reattachment</i> dengan menggunakan kawat jaring mesh #8.....	38
Gambar4.7	<i>Reattachment</i> pada batang 1.5 mm, 1.5mm posisi silang, mesh #8..	39
Gambar4.8	tidak <i>reattachment</i>	39
Gambar4.9	<i>Flashback</i> pada air laju aliran 0.04 l/s.....	41
Gambar4.10	proses awal <i>flashback</i> sebelum masuk kedalam tabung burner	41
Gambar 4.11	nyala laminar flashback (kurdyumov et.al.).....	42
Gambar4.12	bentuk nyala <i>flashback</i> dalam tabung dengan air 0.22 l/s.....	43
Gambar4.13	kecepatan <i>flashback</i> dengan laju aliran udara 0.04 l/s	44
Gambar4.14	Jarak <i>flashback</i> terhadap waktu dengan laju aliran udara Q_a beragam	44
Gambar4.15	Kecepatan terhadap waktu dari <i>Flashback</i> dengan laju aliran udara Q_a beragam.....	45
Gambar 4.16	tidak <i>flashback</i> dengan kawat mesh #8.....	46
Gambar 4.17	Diagram stabilitas nyala bunsen burner tabung pirex	47



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data penyetaraan rotameter untuk gas LPG	26
Tabel 4.1 Kalibrasi Rotameter	40
Tabel 4.2 Variasi depth penetration terhadap penambahan laju aliran udara	48
Tabel 4.3 Data Perhitungan analisa non-dimensional.....	50
Tabel 4.4 Tabulasi data perhitungan undimensional dari minitab	Error!

Bookmark not defined.



DAFTAR NOTASI

A_b	Luas Penampang Burner	m^2
AFR	Air Fuel Ratio	-
AFR_L	AFR lift-up	-
AFR_R	AFR Reattachment	-
BL	Burning Load	W/m^2
CV	Nilai Kalor	MJ/kg
Fr	Bilangan Froude	-
LHV	Low Heating Value	J/kg
m_a	massa udara	kg
m_f	massa bahan bakar	kg
M_a	Massa Molar Udara	kg/mol
M_f	Massa Molar bahan bakar	kg/mol
m, n	koefisien, koefisien	-
N_a	Jumlah Mol udara	mol
N_f	Jumlah Mol bahan bakar	mol
Q_a	Kapasitas aliran bahan udara	m^3/s
Q_f	Kapasitas aliran bahan bakar	m^3/s
Re	Bilangan Reynolds	-
S_u	Kecepatan rambat gas	m/s
S_L	Kecepatan pembakaran laminer	m/s
U	Kecepatan	m/s
X	Jarak benda penghalang dari burner	mm
X_{ff}	Depth Penetration Flashback	mm
Simbol Yunani (Greek Symbol)		
α	difusivitas thermal	m^2/s
ρ	massa jenis	kg/m^3
ϕ	Diameter batang	mm

DAFTAR LAMPIRAN

Data *Blow Off*

Data *lift-up* dan *reattachment*

- Batang *single*
- Pada batang silang
- Pada mesh #8

Foto Kompilasi *Flashback*

Data *Depth Penetration* dan Kecepatan *Flashback*

Foto *Flame*

- *Lift-up* pada batang silang
- *Lift-up* pada kawat jaring



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Program konversi energi dari minyak bumi ke gas oleh pemerintah sedang terealisasi. Untuk keperluan dan kebutuhan rumah khususnya untuk keperluan memasak telah telah dikonversi dari penggunaan minyak tanah ke penggunaan LPG. Tabung LPG yang beredar di pasaran untuk kepentingan masyarakat pada umum adalah tabung 12 kg dan tabung 3 kg. LPG tabung 3 kg adalah subsidi dari pemerintah untuk masyarakat sehingga harga per kilo dari gas LPG tabung 3 kg lebih murah, sehingga kedepannya LPG 3 kg ini akan lebih populer. Akan tetapi banyak kasus kebakaran akibat LPG khususnya tabung 3 kg ini. Akibat hal ini banyak masyarakat menjadi khawatir akan penggunaan LPG tabung 3 kg. Oleh karena itu faktor keamanan akan sistem pembakaran dengan tabung ini harus sangat diperhatikan.

Kegiatan penelitian ini adalah untuk mengetahui salah satu faktor penyebab ledakan pada tabung LPG. Salah satu fenomena dalam pembakaran adalah *flashback flame* yaitu nyala api yang balik masuk ke dalam celah seperti pipa atau tabung yang arah nyalanya terbalik dengan arah bahan bakar. Pada kondisi yang bagaimana dan seberapa berbahaya fenomena pembakaran ini pada sistem selang pembakaran menggunakan tabung LPG khususnya tabung 3 kg.

Pada penelitian ini digunakan bunsen burner yang telah dimodifikasi menggunakan tabung pirex transparan sehingga fenomena *flashback* dapat diteliti juga secara visual dan dapat diketahui kondisi bahan bakar dan udara pada saat fenomena ini terjadi.

Setelah diketahui kondisi *flashback* maka langkah selanjutnya adalah mengetahui bagaimana cara untuk mencegah supaya hal ini tidak terjadi. Salah satu cara adalah dengan menggunakan kawat jaring dengan ukuran mesh yang kecil untuk menghambat kecepatan api balik. Untuk mengetahui mekanisme ini

maka diteliti juga fenomena *reattachment flame* atau fenomena nyala api yang balik dari benda penghalang ke mulut burner. Diharapkan dengan diketahuinya mekanisme *reattachment* ini maka diketahui juga bagaimana *flashback* dapat dicegah.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Pada sistem eksperimen dengan menggunakan bahan bakar LPG tabung 3 kg dengan bunsen burner dengan tabung pirex transparan diselidiki bagaimana kondisi udara dan bahan bakar pada saat *flashback* ini terjadi dan cara pencegahan dengan menggunakan kawat jaring pada ujung burner.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Penulisan tesis ini bertujuan untuk mengetahui apakah *flashback* dapat dicegah dengan kawat jaring dengan cara mengetahui mekanismenya yaitu dengan cara mengkaji secara experimental fenomena *reattachment*.

1.4 BATASAN MASALAH

Pada eksperimen ini perhitungan parameter yang diketahui berdasarkan alat ukur yang ada yaitu kapasitas aliran bahan bakar dan kapasitas aliran udara. Selain itu juga dari alat dokumentasi dalam bentuk foto dan video didapatkan parameter jarak, waktu dan kecepatan.

Hal yang dibahas dalam tesis ini adalah *burning load* dan rasio udara bahan bakar, dengan asumsi dan batasan sebagai berikut :

1. Bahan bakar yang digunakan adalah LPG 3 kg dengan kandungan propana 50% dan butana 50% perbandingan volume.
2. Kapasitas aliran gas LPG dan kapasitas udara dibatasi pada kapasitas aliran yang masih dapat terbaca pada rotameter

3. Burner yang digunakan adalah bunsen burner dengan diameter tabung burner pirex 15 mm dengan tebal 2.5mm
4. Diasumsikan bahwa campuran antara bahan bakar dan udara merupakan campuran homogen sesudah *mixing chamber*.
5. Tegangan permukaan di anggap sama pada semua sisi dalam tabung
6. Parameter temperatur diabaikan.

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Studi literatur
2. Kajian ekperimental fenomena *flashback* dengan dokumentasi video yang kemudian diolah secara digital dengan cara pengolahan citra.
3. Kajian experiental fenomena *lift-up flame* dan *reattachment flame* dengan menggunakan benda penghalang di atas burner berupa batang dan kawat jaring.
4. Meletakkan kawat jaring di atas ujung burner dan diuji apakah fenomena *flashback flame* tidak terjadi
5. Analisa dan Kesimpulan Hasil Pengujian

1.6 SISTEMATIKA PENELITIAN

Agar tesis ini memiliki struktur yang baik dan tujuan penulisan dapat tercapai dengan baik, maka penulisan ini akan mengikuti sistem penulisan sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bagian ini berisi tentang latar belakang yang melandasi penulisan tesis, perumusan masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II DASAR TEORI

Bab ini menjelaskan teori–teori yang mendasari penelitian ini. Dasar teori meliputi: dasar teori dalam pembakaran yang

membahas beberapa fenomena pembakaran, persamaan yang digunakan pada sistem pembakaran. Dasar teori yang ada dikutip dari beberapa buku dan referensi lain yang mendukung dalam penulisan ini.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang metode eksperimen, spesifikasi alat pengujian yang digunakan, metode persiapan dan metode pengambilan data yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bab ini berisi tentang hasil yang diperoleh dari proses pengujian, serta analisa data berdasarkan eksperimental.

BAB V KESIMPULAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil percobaan, beberapa saran yang diberikan untuk perbaikan pada perhitungan dan percobaan yang akan datang dan potensi pengembangan dari penelitian ini

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Bahan Bakar Gas

Bahan Bakar Gas dapat diklasifikasikan atas gas alam (*natural gas*) maupun gas buatan (*manufactured gas*). Biasanya gas alam dijumpai pada deposit minyak dan batubara. Gas alam sebagian besar merupakan campuran dari senyawa hidrokarbon dengan sedikit jumlah materi nonhidrokarbon yang berfase gas. Sebagai bahan bakar, gas alam sangat ideal karena umumnya bebas dari residu padat. Pada saat dibakar umumnya menghasilkan nyala berwarna biru dan sangat mudah terbakar jika tercampur udara pada komposisi yang tepat. Komposisi gas alam sebagian besar terdiri dari metana (CH_4) dan sejumlah sedikit etana (C_2H_6), propana (C_3H_8), butana C_4H_{10} serta Pentana (C_5H_{12}).

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

Liquified Petroleum Gas (LPG), merupakan gas hasil produksi dari kilang BBM dan Kilang Gas, yang komponen utamanya adalah gas propana dan butana kurang lebih 97% dan sisanya adalah gas pentana yang dicairkan. LPG lebih berat dari udara dengan berat jenis sekitar 2.01 (dibandingkan dengan udara), tekanan uap LPG cair dalam tabung sekitar $5.0 - 6.2 \text{ Kg/cm}^2$. LPG pada dasarnya tidak berwarna dan tidak berbau, namun LPG komersial biasanya ditambah dengan zat yang disebut etil merkaptan untuk memberikan bau yang khas dengan tujuan untuk keselamatan, supaya apabila ada kebocoran gas mudah diketahui dengan cepat. LPG berwujud uap pada suhu dan tekanan kamar tetapi dapat dicairkan dengan mengompresinya dengan tekanan tertentu. Bila LPG dicairkan, volume

menjadi turun. LPG komersial terdiri dari campuran propana dan butana dengan perbandingan sekitar 60:40 (rasio perkiraan massa).

Sifat-sifat LPG dapat dilihat dari sifat-sifat komponen utama penyusunnya yaitu propana dan butana. Berikut ini adalah deskripsi dari sifat fisik dari LPG.

1. Densitas

Densitas LPG didefinisikan sebagai massa per satuan volume (kg / l) pada suhu tertentu. LPG Cair memiliki densitas sekitar $0,54 \text{ kg} / \text{l}$ pada $15 \text{ }^\circ\text{C}$ atau sekitar setengah berat air. Uap LPG memiliki densitas sekitar 1,9 kali dari udara.

2. Nilai kalor (CV)

Jumlah panas yang dibebaskan oleh pembakaran suatu zat dikenal sebagai nilai kalor atau CV. Hal ini biasanya dinyatakan dalam megajoule per kg (MJ / kg). CV untuk LPG adalah $49,6 \text{ MJ} / \text{kg}$

3. Tingkat Ekspansi Termal

Tingkat ekspansi termal LPG cair adalah sekitar 10 kali dari air. Ketika katup dari LPG dibuka, tekanan dalam silinder berkurang dan cairan mulai menguap (mendidih) pada tekanan rendah. Penguapan ini menyebabkan terjadi pendinginan dan temperatur gas akan menurun. Jika laju penguapan gas terlalu tinggi, temperatur gas akan menurun hingga di bawah $0 \text{ }^\circ\text{C}$ dan es akan mulai terbentuk pada dinding luar yang lebih rendah dari silinder.

4. Tekanan uap

Satu liter LPG cair akan cepat dan benar-benar menguap saat terkena tekanan atmosfer (100 kPa) untuk membentuk sekitar 275 liter uap pada $15 \text{ }^\circ\text{C}$. dalam silinder tertutup yang berisi beberapa LPG cair, jumlah yang relatif kecil akan menguap dalam volume terbatas silinder, untuk menghasilkan tekanan silinder sekitar 250 kPa pada $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Tekanan silinder tertutup ini adalah sama dengan tekanan uap, dan tekanan itu meningkat secara dramatis sampai 500 kPa pada suhu $20 \text{ }^\circ\text{C}$ dan 1550 kPa pada $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Sebuah kebocoran cairan jauh lebih

serius daripada kebocoran gas karena terbentuk volume tinggi gas. Inilah sebabnya mengapa tabung harus selalu disimpan, diangkut dan digunakan dalam posisi tegak. Kebocoran gas dalam udara akan membentuk campuran mudah terbakar sekitar 10000 liter dari satu liter LPG cair. Sifat-sifat dari propana, butana dan LPG (campuran 60% propana dan 40 % butana) dapat di lihat pada gambar berikut ini:

Property	Propane	Butane	Handgas
Molecular weight	44,09	58,12	49,7 (av.)
Carbon content (wt%)	81,72	82,66	82,15
Hydrogen content (wt%)	18,28	17,34	17,85
Carbon: hydrogen ratio by weight	4,47	4,77	4,60
Density of liquid at 15°C (kg/l)	0,510	0,575	0,536
Boiling point of liquid at atm. pres. (°C)	-42,1	-0,5	-42,1 -0,5
Density of gas at 15°C & atm. pres. (kg/m ³)	1,86	2,46	2,10
Volume ratio of gas:liquid at STP*	274:1	233:1	258:1
Volume of gas from 1 kg liquid at STP (l)	537	405	484
Mass ratio of gas:air at 15°C & atm. pres.	1,52:1	2,01:1	1,716:1
Latent heat of vaporisation at 15°C (kJ/kg)	20,43	21,27	20,77
Vapour pressure at 20°C (kPa abs.)	710	110	500
Sp. heat of vapour at atm. pres. (cal/g.°C)	0,388	0,397	0,392
Net calorific value at 25°C (MJ/kg)	46,0	45,6	45,8
Gross calorific value at 25°C (MJ/kg)	49,8	49,4	49,6
Wobbe number (kcal/Nm ³)	19 000	21 600	
Limits of flammability in air (vol% gas)	2,2 – 10	1,8 – 9	1,8 – 10
Limits of flammability in oxygen (vol% gas)	2 – 50	2 – 50	2 – 50
Max. flame temperature in air (°C)	1 930	1 900	1 900
Max. flame temperature in oxygen (°C)	2 740	2 700	2 700
Max. flame speed in 25 mm tube (cm/sec)	82	82	82
Air reqd for combustion at STP* (m ³ /kg LPG)	12,10	11,93	12,03
Air:gas vol. ratio for combustion at STP	22,5	29,5	24,9
O ₂ vol. for combustion at STP* (m ³ /kg fuel)	2,56	2,51	2,54

Gambar2.1 Sifat-sifat propana, butana dan LPG

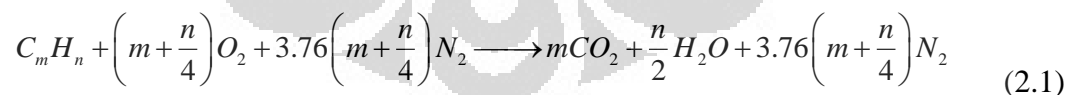
2.2 Teori Dasar Pembakaran

2.2.1 Reaksi Pembakaran

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

Fenomena-fenomena yang terjadi pada pembakaran antara lain interaksi proses-proses kimia dan fisika, pelepasan panas yang berasal dari energi ikatan-ikatan kimia, proses perpindahan panas, proses perpindahan massa, dan gerakan fluida. Sehingga kajian pembakaran membutuhkan saling keterkaitan antara ilmu dasar dan turunannya yakni Termodinamika, Mekanika Fluida, Perpindahan Kalor dan Massa, Material, Statistika dan Probabilitas [1],[2],[3],[4].

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



Persamaan ini telah disederhanakan karena cukup sulit untuk memastikan proses pembakaran yang sempurna dengan rasio ekivalen yang tepat dari udara. Jika terjadi pembakaran tidak sempurna, maka hasil persamaan di atas CO_2 dan H_2O tidak akan terjadi, akan tetapi terbentuk hasil oksidasi parsial berupa CO,

CO₂, dan H₂O. Juga sering terbentuk hidrokarbon tak jenuh, formaldehida dan kadang-kadang terdapat juga karbon.

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

2.2.2 Klasifikasi Nyala

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

Dalam suatu pembakaran premix perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting dalam menentukan hasil proses pembakaran. Rasio campuran bahan bakar dan udara dapat dinyatakan parameter AFR (*Air Fuel Ratio*)

2.2.3 Air Fuel Ratio (AFR)

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

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

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

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

2.2.4 Beban Pembakaran (*Burning Load*)

Beban Pembakaran didefinisikan sebagai perbandingan antara laju aliran gas yang dikalikan nilai kalor bahan bakar dengan luas penampang tabung pembakar (*barrel*)

$$BL = \frac{Q_f \times \rho_f \times LHV}{A_b} \quad (2.3)$$

Dimana :

- Q_f = Kapasitas aliran gas (m³/s)
- ρ_f = Densitas bahan bakar (kg/m³)
- LHV = Low Heating Value bahan bakar (MJ/kg)
- A_b = Luas penampang barrel (m²)

2.2.5 Stabilitas Nyala

Telah diketahui bahwa nyala api dapat dihasilkan dari pembakaran campuran bahan bakar gas dan udara dengan kandungan tertentu atau bisa di sebut *inflammability limits* atau batas mampu nyala.[5].

Pergerakan penjalaran nyala api dan bentuk dari kestabilan nyala api selalu dipengaruhi oleh kesetimbangan antara laju aliran massa dinamik gas yang melibatkan perhitungan kekekalan massa, kekekalan momentum dan kekekalan energy. Sebagaimana dapat diperhitungkan dengan bilangan-bilangan tidak

berdimensi seperti : Bilangan *Froude* $Fr = \frac{u^{-2}}{gd_o}$, Bilangan *Reynolds*

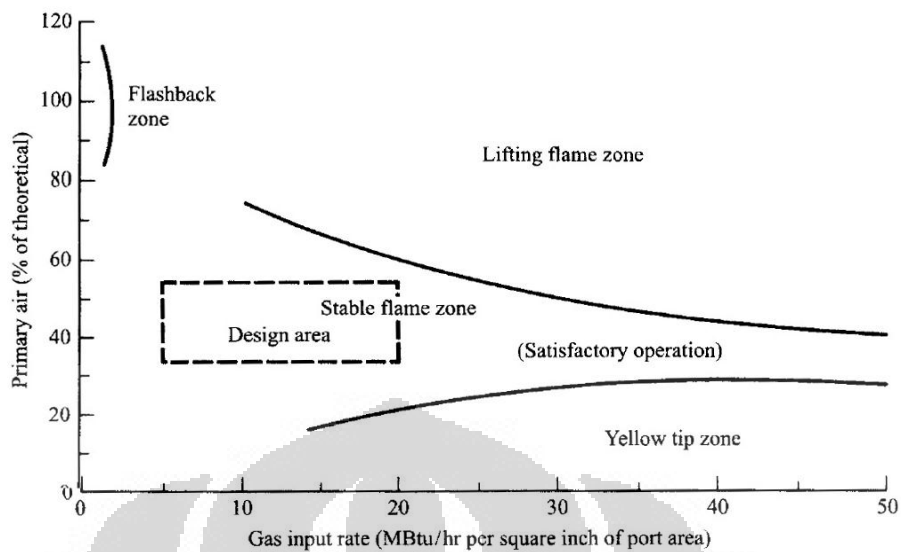
$$Re = \frac{\bar{d}\bar{u}}{\nu} = \frac{d\rho\bar{u}}{\mu} \quad \text{dan} \quad \text{Bilangan} \quad \text{Lewis} \quad Le = \frac{\alpha}{\phi}$$

yang dapat diamati sebagai gejala adanya gaya apung (buoyancy serta variasi ketidakstabilan khususnya pada daerah laminar dapat di analisis dengan bilangan Karlovits dan Damkhoeler.

Ada beberapa ketidakstabilan pada pembakaran pada Bunsen burner, yaitu :

- Ketidakstabilan system, meliputi interaksi aliran pada komposisi reaksi system yang berbeda
- Ketidakstabilan akustik, meliputi interaksi gelombang suara dengan proses pembakaran
- Ketidakstabilan Taylor, meliputi efek gaya apung atau percepatan fluida dengan perubahan densitas
- Ketidakstabilan Landau, Ketidakstabilan hidrodinamika dari bentuk pembakaran yang diasosiasikan tidak meliputi akustik ataupun buoyancy tetapi hanya meliputi penurunan kerapatan yang dihasilkan oleh pembakaran aliran tak mampu padat (incompressible)
- ketidakstabilan difusivitas termal, meliputi hubungan reaksi difusi dan kalor dengan nyala primer

Kestabilan nyala api dapat dinyatakan dari berbagai macam parameter antara lain batas mampu nyala, gradient kecepatan nyala, kerugian kalor dan daerah stabilitas nyala. Daerah stabilitas nyala adalah luasan pada Grafik Fuidge yang dibatasi oleh daerah *flash back*, *yellow tip* dan *blow off* seperti pada Gambar 2.2. Daerah operasi sebelah kiri bawah mengakibatkan terjadinya *flashback*, sementara itu untuk menghindari terjadinya *flashback* daerah kerja dirancang pada sisi kanannya yaitu pada daerah stabilitas nyala.



Gambar 2.2 Diagram stabilitas nyala, flashback, lift-off dan yellow tipping untuk bahan bakar gas alam (Turns, An introduction to combustions)

2.2.6 Premixed Flame dan Diffusion Flame

2.2.6.1 Premixed Flame

Nyala api premix dapat di stabilkan di antara batasan dari aliran gas. Pada saat nilai aliran gas mencapai nilai batas maksimum, maka nyala api dapat berpindah tidak menempel pada burner atau *lift-off* dan apabila gas di alirkan melewati nilai batas maksimum maka nyala api bisa juga padam atau *blow off*. sebaliknya bila aliran gas mencapai batas nilai minimum maka akan terjadi *flashback*. [6].

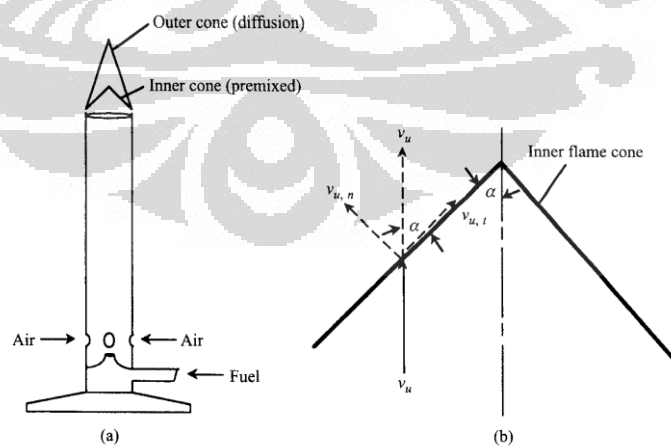
Premixed Flame atau nyala api premix adalah nyala api dengan bahan bakar dan udara yang tercampur sempurna terlebih dahulu kemudian terjadi reaksi pembakaran yang dapat juga didefinisikan sebagai keadaan kesetimbangan dari temperatur nyala adiabatik dan kecepatan nyala. [1]. Nyala api ini dipakai pada banyak area seperti pada kompor di rumah tangga, untuk komersil, industri dan penelitian seperti pada bunsen burner. Nyala api premix dapat dikategorikan menjadi *laminar premix flame* dan *turbulent premix flame*. Nyala api laminar, premixed dengan bahan bakar alam misalnya digunakan pada industri pembuatan gelas. Untuk aliran laminar dan premix, keduanya memiliki proses fisik yang aktif

dan kebanyakan teori untuk nyala turbulen dianalisa melalui struktur nyala laminar terlebih dahulu.

Nyala api pada bunsen burner adalah salah satu contoh dari nyala api laminar premix. Seperti pada gambar 2.3(a) adalah gambar ilustrasi skema dari bunsen burner dan api yang di produksi. Aliran dari bahan bakar dimasukkan ke dalam burner dan aliran udara dapat di masukkan dari beberapa port yang kemudian bahan bakar dan udara di campur setelah itu keluar dari burner. Pada nyala bagian yang kaya bahan bakar terdapat nyala api premix yang dikelilingi dengan nyala api difusi pada bagian luar. Nyala api difusi tahap berikutnya adalah nyala hasil pembakaran ketika karbon monooksida dan hidrogen dihasilkan dari bagian dalam yang kaya bahan bakar bereaksi dengan udara sekitar. Bentuk dari api ditentukan dari efek kombinasi dari profil kecepatan dan pelepasan panas ke dinding pipa. Agar nyala api tetap stabil, kecepatan nyala harus sesuai dengan kecepatan normal dari gas yang tidak terbakar pada inisial lokasi seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.3(b), dimana

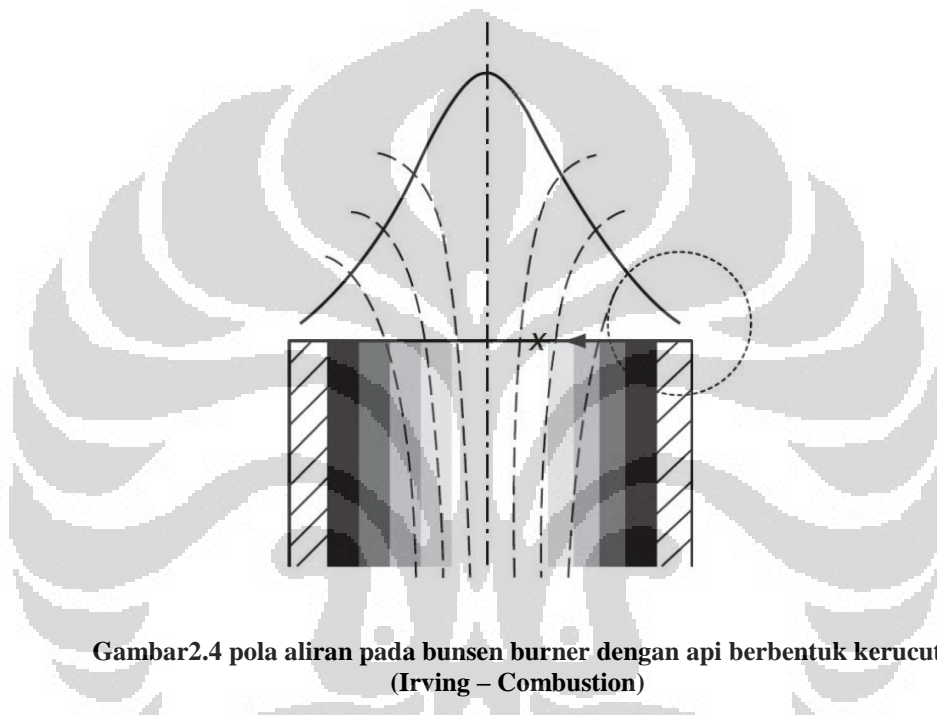
$$S_L = v_U \sin \alpha \quad (2.4)$$

Dengan S_L adalah kecepatan nyala laminar. Prinsip ini menyebabkan karakter nyala api yang berbentuk kerucut.[2].

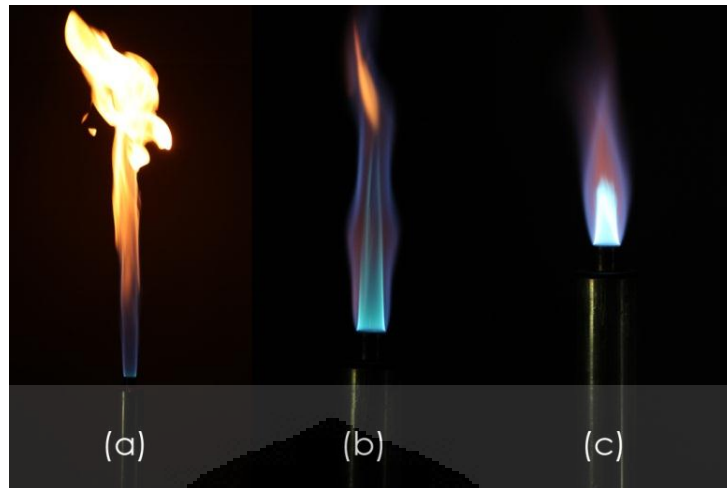


Gambar2.3 (a) skema bunsen burner (b) kecepatan nyala api laminar. (Turns, an introduction to combustion)

Pada bunsen burner dengan campuran bahan bakar dan udara yang diasumsikan sebagai campuran homogen, pola aliran campuran bahan bakar dan udara diilustrasikan pada gambar 2.4. Ketika kecepatan aliran bertambah maka makin besar juga kecepatan bahan bakar, dan makin cepat aliran maka nyala api akan menjadi bentuk kerucut. Makin cepat kecepatan aliran maka makin kecil sudut kerucut dari nyala api. Dengan makin kecilnya sudut maka komponen kecepatan dari aliran maka makin ekuivalen dengan kecepatan nyala api.



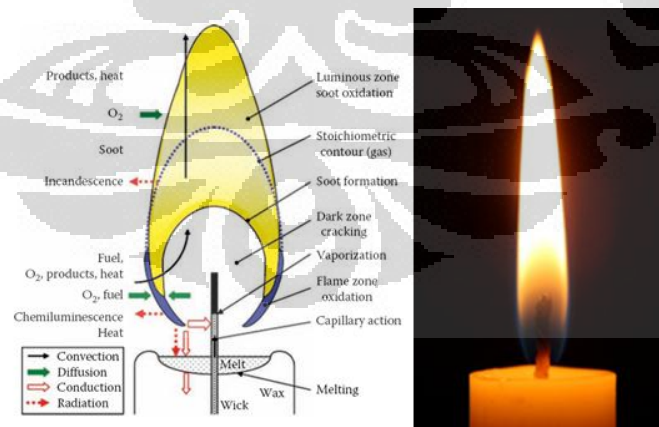
Gambar nyala api diperlihatkan pada gambar 2.5 yang berupa foto nyala api pada bunsen burner dimana pada gambar 2.5(a) merupakan nyala api dengan campuran kaya bahan bakar, gambar 2.5(b) adalah nyala api dengan rasio udara dan bahan bakar yang sesuai dengan stoikiometri campuran dan pada gambar 2.5(c) adalah nyala api dengan campuran miskin bahan bakar.



Gambar2.5 nyala api pada bunsen burner

2.2.6.2 *Diffusion Flame*

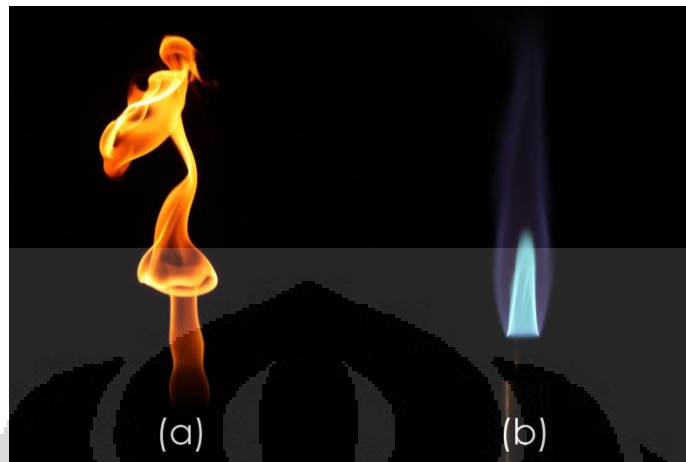
Diffusion flame atau nyala api difusi sering didefinisikan sebagai kebalikan dari nyala premix, dimana pada nyala api difusi ini bahan bakar dan udara bereaksi pada saat proses pembakaran tanpa di campur terlebih dahulu. Contoh yang paling gampang adalah nyala api pada lilin seperti diperlihatkan pada gambar 2.5 yang merupakan struktur nyala, proses fisika, proses kimia dan gambar foto dari nyala lilin.



Gambar2.6 Proses kimia dan fisika nyala api pada lilin

Perbedaan visual yang paling nyata antara nyala api difusi dan nyala api premix seperti pada gambar 2.6, dimana pada gambar 2.6(a) adalah nyala api

difusi dengan komposisi warna kuning kemerahan dan pada gambar 2.6(b) adalah nyala api premix dengan komposisi warna hijau kebiruan. [9],[10],[11],[12].



Gambar2.7 Nyala api difusi dan premix

2.3 Fenomana Nyala Api

Salah satu kriteria yang sangat penting dalam mendesain burner gas adalah menghindari terjadinya *flashback* atau *lift-off*. Kedua kriteria nyala ini merupakan nyala yang tidak stabil. Selain itu juga dapat terjadi *blow off* atau nyala api padam yang terjadi apabila kecepatan bahan bakar jauh lebih besar dari kecepatan nyala atau adanya gangguan fisik dari luar. Selain itu juga apabila ada benda penghalang di atas burner maka fenomena *lift-up* yaitu nyala api yang terangkat dapat terjadi dan *reattachment* yang merupakan proses kebalikan dari lift up yaitu pangkal nyala api dari benda penghalang kembali ke ujung burner.

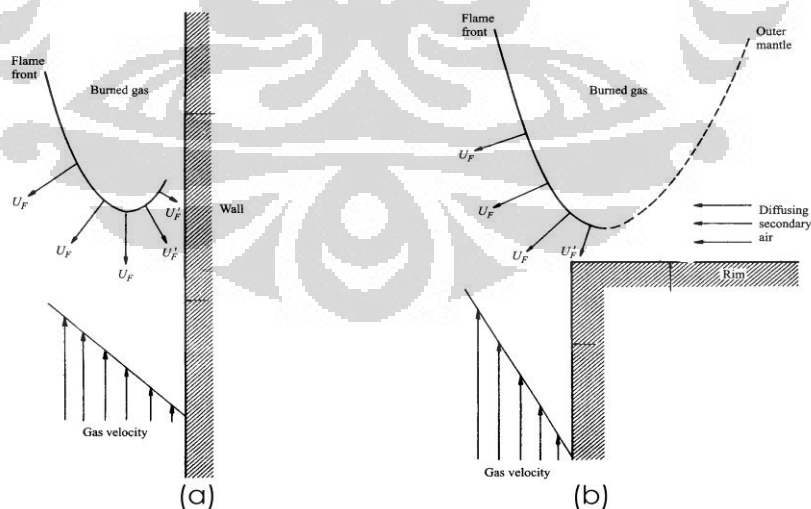
2.3.1 *Flashback*

Flashback adalah arah nyala api terbalik dengan arah aliran atau nyala api masuk ke dalam dan terpropagasi didalam burner. *Flashback* tidak hanya mengganggu tapi juga sangat berbahaya dalam sistem pembakaran atau burner yang ada. Dalam aplikasi pembakaran dengan bahan bakar gas, propagasi nyala dalam tabung dapat merambat ke dalam port yang dapat menyebabkan ledakan. *Flashback* pada umumnya adalah peristiwa transisi yang terjadi pada saat aliran bahan bakar dikurangi atau ditutup. Ketika kecepatan lokal dari nyala api melebihi kecepatan aliran lokal, nyala api mengalir berlawanan arah aliran bahan bakar dan

udara masuk ke dalam pipa atau port. Ketika aliran bahan bakar ditutup nyala api akan *flashback* kedalam pipa yang luasannya lebih besar dari jarak *quenching* atau pencekikan. Oleh karena itu untuk parameter untuk mengontrol *flashback* mirip dengan parameter untuk mengontrol *quenching*, misalnya tipe bahan bakar, rasio kesetaraan, kecepatan aliran dan bentuk geometri dari burner. Kondisi kecepatan aliran diilustrasikan secara skematik pada gambar 2.8(a)

Ada dua mekanisme yang bisa menyebabkan *flashback* yaitu :

1. Propagasi api pada lapisan batas merambat ke dinding pipa dimana kecepatan turun sampai nol. Pada aplikasi dalam engineering, *Reynold number* besar dan lapisan batas yang tipis. Bagaimanapun juga *flashback* dapat terjadi di bagian dimana kecepatan aliran lokal identik dengan kecepatan nyala laminar.
2. Ketidak stabilan pada burner. Jika ketidakstabilan mencapai pada amplitud tertentu, aliran balik dalam tabung dapat terbalik, yang menyebabkan nyala api mengalir terbalik dari aliran gas yang sebenarnya,[13].



Gambar2.8 Vektor kecepatan dari kecepatan aliran dan kecepatan lokal api,
(a)*flashback* (b) *lift-off*
(Turns, An introduction to combustions)

2.3.2 *Lifted flame*

Lifted flame atau *lift-off* atau nyala terangkat adalah nyala dimana api tidak menempel pada burner atau port tetapi stabil pada jarak tertentu dari burner. *lifted flame* yang merupakan nyala terangkat yang biasanya disebabkan karena adanya aliran jet dari gas baik secara laminar ataupun turbulen, [16][17][18]. Pada praktiknya *lifted flame* tidak diinginkan pada kondisi burner yang sebenarnya karena pada *lifted flame* menyebabkan adanya celah untuk bahan bakar menyebar menjadi gas yang tidak terbakar atau pembakaran yang tidak sempurna. Selain itu juga penyalaan sangat susah didapatkan pada kondisi di atas batas nyala terangkat. Pengontrolan dari posisi nyala terangkat sangat sulit didapatkan sehingga menghasilkan karakteristik pelepasan panas yang tidak baik. Selain itu juga nyala terangkat juga menghasilkan suara yang bising. Kondisi kecepatan aliran nyala terangkat di ilustrasikan secara skematik pada gambar 2.8(b).

2.3.3 *Blow off*

Blow off atau proses padamnya api terjadi akibat adanya beberapa faktor seperti kecepatan aliran yang tidak seimbang antara aliran campuran bahan bakar dan udara dibandingkan dengan kecepatan nyala, stoikiometri yang melewati batas nyala dimana biasanya pada saat gas miskin bahan bakar, dan atau adanya faktor gangguan dari luar. Dalam eksperimen yang dilakukan faktor kecepatan aliran dan faktor stoikiometri adalah faktor yang dominan penyebab terjadinya *blow off*. Salah satu cara pencegahan agar tidak terjadinya *blow off* adalah dengan menambahkan *bluff body* atau benda penghalang pada daerah aliran gas,[19],[20].

2.3.4 *Lift-up flame*

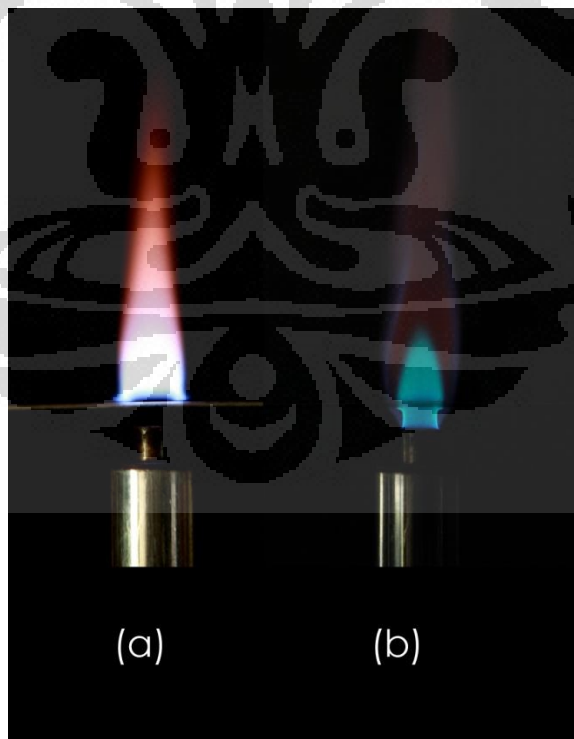
Lift-up flame adalah nyala terangkat dimana nyala api tidak menempel pada burner akan tetapi berada di atas benda penghalang yang berada pada jarak tertentu dari mulut burner. Dengan meletakkan benda penghalang di atas burner misalnya ring atau cincin [21],[22]. atau batang, api dapat menempel pada batang dan ini terjadi pada rasio campuran bahan bakar pada saat *blow off*, sehingga bisa dikatakan *lift-up flame* merupakan nyala api yang stabil walaupun tidak berada di atas mulut burner. *Lift-up* juga terjadi pada kondisi campuran miskin bahan bakar sehingga bahan bakar terbakar sempurna dan mempunyai dampak meminimalisasi

penggunaan bahan bakar. Pembakaran pada saat lift-up mengeluarkan suara yang bising. *Lift-up* dengan menggunakan batang di visualisasikan pada gambar 2.9(a)

2.3.5 *Reattachment Flame*

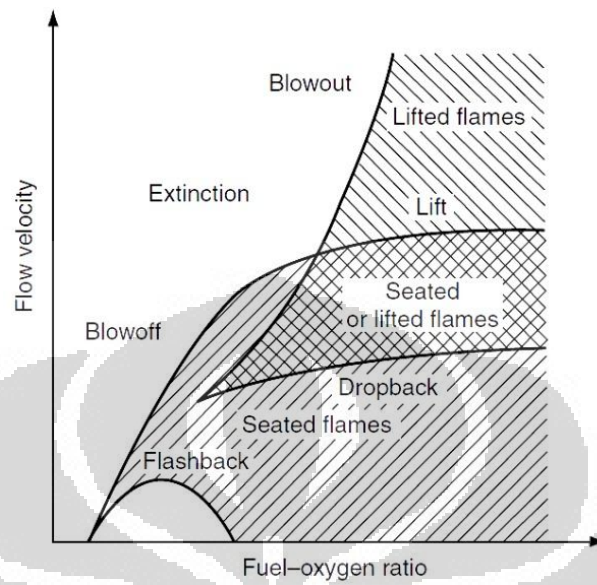
Reattachment flame atau nyala kembali pada burner adalah proses nyala api dari benda penghalang kembali ke burner. Proses ini merupakan kebalikan dari *lift-up* atau *lifted*. Apabila *lift-up* terjadi pada kondisi bahan bakar yang miskin, maka pada agar proses reattachment dapat terjadi setelah *lift-up* maka kondisi bahan bakar harus diperkaya dengan cara bahan bakar ditambah atau udara dikurangi. Selain itu juga kecepatan aliran menentukan proses ini. Fenomena *reattachment* ini dapat terjadi pada saat kondisi bahan bakar diatur kembali setelah proses *lifted* maupun *lift-up*, [23].

Dalam penelitian ini diadakan penelitian akan kondisi *burning load* yang merupakan faktor dari bahan bakar dan AFR yang memungkinkan terjadinya *lift-up* dan *reattachment*. Gambar 2.9(b) adalah gambar dimana terjadi proses *reattachment* setelah udara dikurangi.



Gambar2.9 *lift-up* flame dan *reattachment* flame dengan menggunakan batang

Untuk daerah dan tipe nyala api pada bunsen burner diilustrasikan pada gambar 2.10

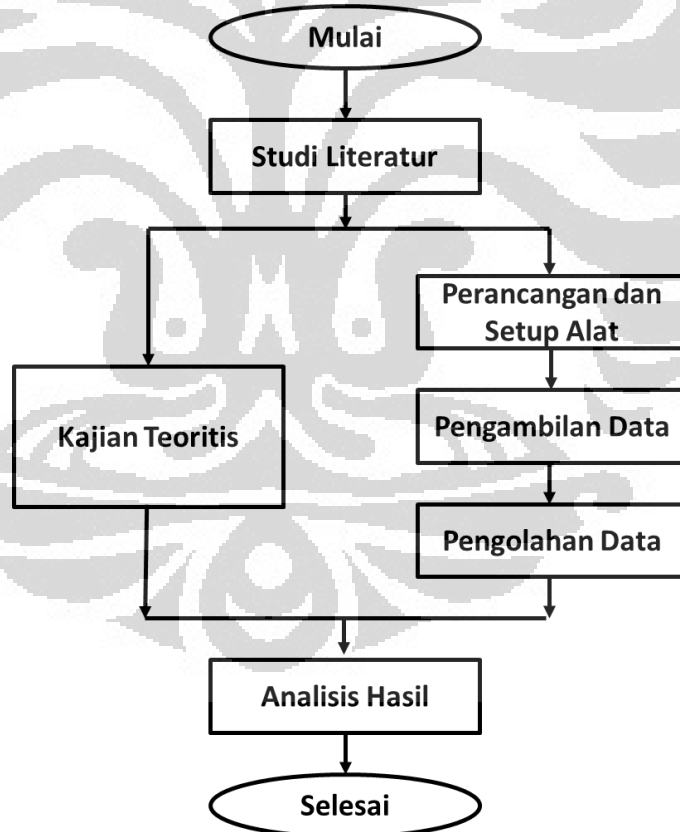


Gambar2.10 Tipe nyala api dan daerah operasional nyala pada bunsen burner

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Sistematika Penelitian

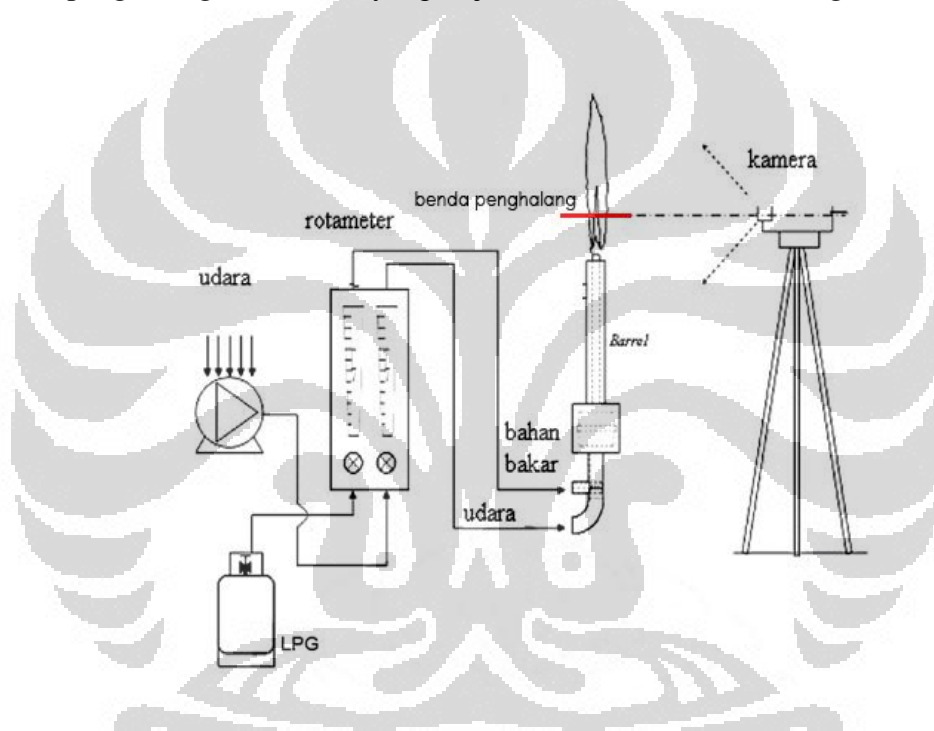
Dalam penelitian ini dilakukan beberapa tahapan untuk menyelesaikan penelitian ini. Tahap pertama adalah tahap studi literatur dari beberapa referensi seperti *handbook*, jurnal, browsing internet, seminar dan lain lain. Tahap berikutnya adalah perancangan dan setup alat eksperimen dari tabung bahan bakar sampai ke burner pirex transparan, kalibrasi alat ukur dan juga setup alat fotografi untuk dokumentasi fenomena pembakaran. Setelah itu dilakukan pengambilan data dan dokumentasi yang dapat dianalisa. Berikut merupakan diagram alur penelitian.



Gambar3.1. Diagram Alur Penelitian

3.2 Perancangan dan Setup Alat

Gambar 3.2 menunjukkan eksperimen setup untuk fenomena *flashback*, *lift-up* dan *reattachment* dengan menggunakan benda penghalang. Bahan bakar yang bersumber dari tabung LPG 3 kg dengan menggunakan regulator di alirkan melalui selang yang diberikan *needle valve* ke Rotameter yang berfungsi untuk mengukur aliran bahan bakar dan udara yang dilengkapi dengan kompresor udara. Dari rotameter bahan bakar dan udara yang di control dialirkan ke burner. Di samping burner diset tiang penahan benda penghalang. Fenomena yang terjadi di dokumentasikan dengan kamera.



Gambar3.2 eksperimen setup

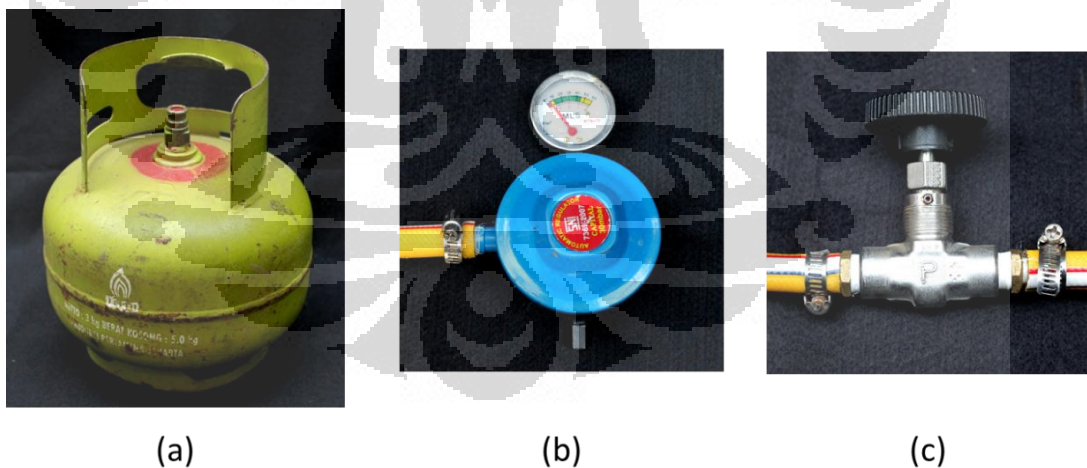
3.3 Perangkat Eksperimen yang digunakan

3.3.1 Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan adalah LPG yang dikemas pada tabung yang dapat memuat 3 kg bahan bakar (gambar 3.3, (a)), yang berdasarkan spesifikasi LPG yang dikeluarkan Direktorat Jendral Minyak dan Gas Bumi no. 26525.K/10.DJM.T/2009, dengan komposisi produk LPG minimal mengandung

campuran propana (C_3) dan butana(C_4) sebesar 97% dan maximum 2% merupakan campuran pentan (C_5) dan hidrokarbon yang lebih berat. Batasan komposisi propana dan butana dalam spesifikasi tersebut dibatasi dengan parameter maksimum tekanan uap yang ditentukan (145 psi). Komposisi LPG 3 kg mengandung 50% propana dan 50% butana telah sesuai dengan ketentuan baik dari aspek komposisi maupun tekanan uap yang telah diperhitungkan sesuai kalori/daya bakar yang diperlukan untuk kebutuhan rumah tangga.

Komposisi tersebut telah digunakan sejak awal program konversi dan tidak mengalami perubahan dengan mempertimbangkan ketersediaan bahan baku yang mengingat propana banyak dihasilkan oleh gas yang berasal dari lapangan minyak dan gas, sedangkan butana dihasilkan dari kilang pengolahan minyak. Dari sisi keselamatan, komposisi tersebut merupakan komposisi maksimum. Komposisi campuran dijaga pada level tekanan 120 psi atau 8 bar atau 8 kali tekanan udara luar. Tekanan ini sepertiga dari tekanan kerja yang dirancang untuk katup LPG (yang ada pada bagian atas tabung LPG) sebesar 24 bar seperti pada gambar 3.3,(b). Selain itu komposisi tersebut juga telah mempertimbangkan keamanan dan kemampuan aksesoris sesuai standar SNI,[7].



Gambar3.3 (a) Tabung LPG 3 kg, (b) Regulator, (c) Needle Valve

Untuk dapat mengontrol pasokan bahan bakar lebih presisi, di antara selang dari bahan bakar menuju rotameter di pasang *needle valve*, gambar 3.3, (c).

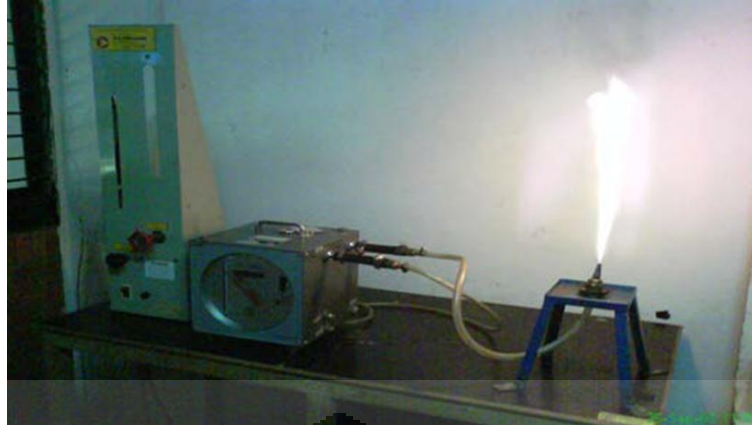
3.3.2 Alat Ukur Aliran Gas dan Udara

Penentuan laju aliran gas menuju burner menggunakan alat ukur rotameter : *Flame Propagation & Stability Unit, P.A. Hilton LTD. C551* seperti yang terlihat pada gambar di bawah. Alat ukur rotameter ini dilengkapi dengan kompresor udara serta pengatur aliran udara dan pengukur aliran gas. Besarnya aliran gas maupun udara ditunjukkan dengan ketinggian pelampung pada tabung kaca penunjuk aliran serta sangat dipengaruhi oleh jenis gas yang digunakan.



Gambar3.4 Rotameter

Untuk menentukan hubungan antara tinggi pelampung dan debit aliran gas perlu dilakukan penyetaraan alat ukur atau kalibrasi. Penyetaraan dilakukan dengan membandingkan tinggi pelampung yang ditunjuk rotameter dengan laju aliran gas yang terukur melalui *Wet Gas Meter Model WE-1.5A* produksi *Shinagawa keisokki Seisakusho CO. LTD.* Gambar 3-5 memperlihatkan proses penyetaraan alat ukur rotameter.



Gambar3.5 Proses penyetaraan pengukuran aliran gas

Adapun proses penyetaraan adalah sebagai berikut :

1. Selang gas dari tabung gas bahan bakar dimasukkan pada saluran masuk gas rotameter.
2. Gas keluar rotameter dialirkan ke saluran masuk *Wet Gas Meter*.
3. Bahan bakar gas yang keluar dari *Wet Gas Meter* dialirkan ke saluran *burner* untuk dilakukan pembakaran gas.
4. Atur laju aliran gas melalui putaran pengatur laju aliran gas sedemikian hingga pelampung rotameter pada penunjuk aliran gas berada pada posisi 1 cm.
5. Ukur volume gas yang melewati *Wet Gas Meter* dalam selang waktu tertentu sehingga diperoleh debit aliran gas rata-rata yang dialirkan.
6. Lakukan hal yang sama untuk posisi pelampung 2, 3, 4, dan seterusnya untuk langkah penyetaraan 4 dan 5. Dari data tersebut diperoleh tabel data yang dapat diolah untuk mendapatkan persamaan penunjukan tinggi pelampung terhadap laju aliran gas.

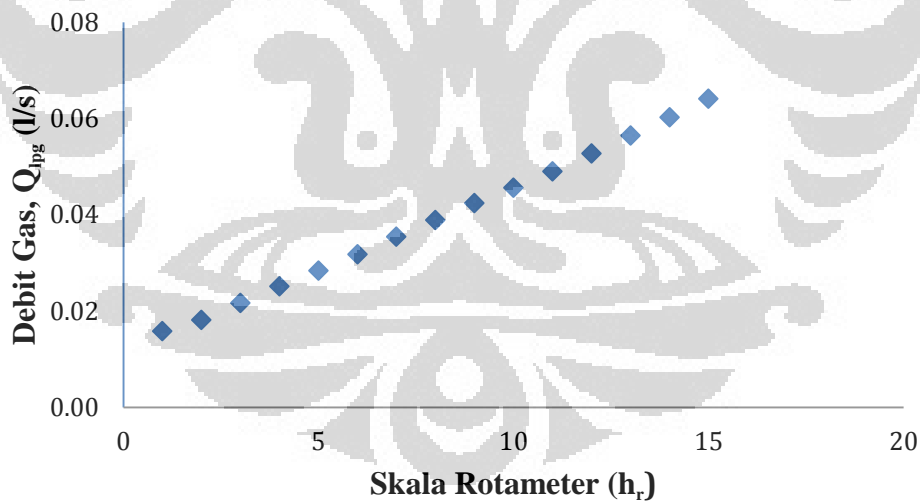
Tabel 3.1 menunjukkan data hasil penyetaraan alat ukur aliran gas rotameter untuk pengukuran gas LPG. Gambar 3.6 menunjukkan hubungan tinggi pelampung rotameter terhadap debit aliran gas LPG yang terukur. Dari data tersebut diperoleh hubungan antara tinggi pelampung penunjuk aliran gas.

Skala rotameter, h_r dalam cm, terhadap laju aliran gas LPG, Q_f dalam l/s, merupakan persamaan linier untuk tinggi pelampung, seperti diperlihatkan pada persamaan 3.1

$$Q_f = 0.0037h_f + 0.0087 \quad (3.1)$$

Tabel3.1 Data penyetaraan rotameter untuk gas LPG

Skala Rotameter h_r (cm)	Debit gas Q_f (l/s) $\Delta Q = 0.0002$ l/s
1	0.01575
2	0.01808
3	0.02164
4	0.02508
5	0.02832
6	0.03177
7	0.03541
8	0.03882
9	0.04238
10	0.04558
11	0.04893
12	0.05269
13	0.05644
14	0.06017
15	0.06402



Gambar3.6 Hubungan antara laju aliran gas LPG terukur Q_f (l/s) terhadap tinggi pelampung rotameter h_r

Untuk mengukur aliran udara yang akan dialirkan ke dalam Bunsen Burner digunakan *orifice flow meter* yang dilengkapi dengan pengukur beda tekanan pipa U. Saluran udara yang menuju orifice dihubungkan dengan saluran

masuk pipa U yang telah berisi air. Sedangkan saluran udara yang keluar dari orifice dihubungkan dengan saluran keluar pipa U. Hasil penyetaraan dinyatakan pada persamaan (3.2)

$$Q_A = 0.0214x + 0.0449 \quad (3.2)$$

3.3.3 Bunsen burner

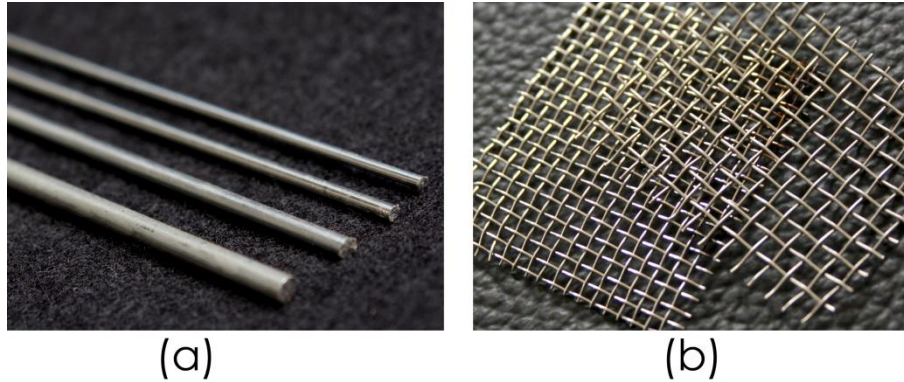
Burner yang dipakai adalah bunsen burner dengan tabung burner yang terbuat dari pirex transparan dengan panjang 50cm, diameter dalam 15 mm dan tebal 2.5 mm, mempunyai *mixing chamber* atau ruang pencampur gas, seperti pada gambar 3.7.



Gambar3.7 bunsen burner

3.3.4 Benda Penghalang

Untuk mendapatkan fenomena *lift-up* dan *flashback* diperlukan benda penghalang yang di pasang beberapa cm di atas ujung burner. Benda penghalang ini berupa batang *stainless steel* dengan ukuran 1.5, 2, 2.4 dan 3.1 mm. Selain itu juga digunakan kawat jaring dengan ketebalan kawat 1 mm dengan ukuran mesh #8 dan #16.



Gambar3.8 (a) batang, (b) kawat jaring

3.3.5 Alat Dokumentasi

3.3.6 Kamera

Kamera yang digunakan adalah Canon EOS 1D mark IV dengan resolusi 16.1 mega pixel, dengan fasilitas video 1920x1080, 30 fps atau 1280x720,60 fps. Pada penelitian ini di pakai video frame 1280 x 720, 50 fps.



Gambar3.9 Kamera Canon EOS 1D mark IV
(dpreview.com)

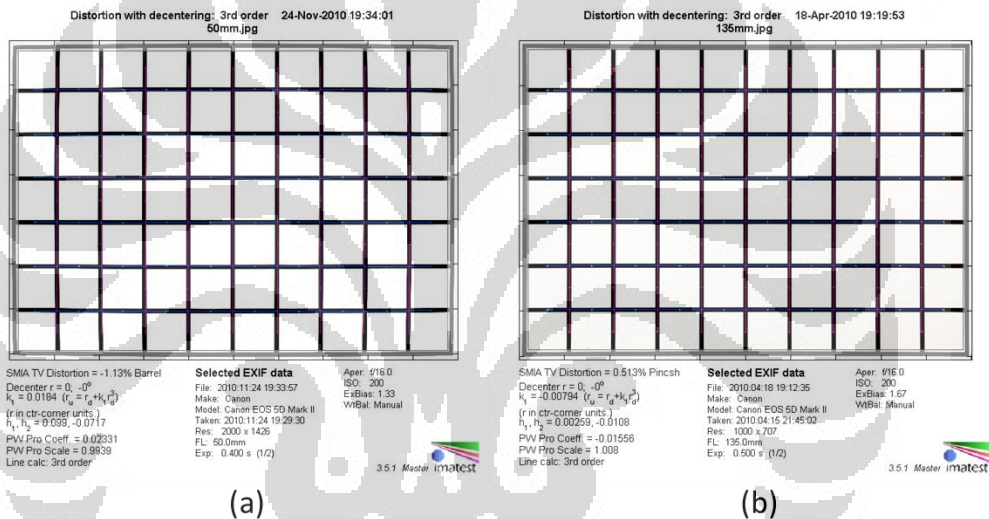
3.3.6.1 Lensa

Lensa yang digunakan adalah Canon EF 50mm, f2.5 makro dan Canon EF 70-200mm, f2.8 IS USM. Lensa EF 50mm mempunyai jarak fokus yang dekat sehingga dapat dilakukan pemotretan dengan hasil pembesaran yang besar atau untuk pemotretan detail tertentu. Lensa 70-200 mm ini termasuk kategori lensa tele atau lensa panjang sehingga dengan lensa ini dapat dilakukan pemotretan dengan jarak agak jauh dari burner sehingga dapat terhindar kamera dari terkena

panas. Selain itu juga kedua lensa ini mempunyai efek distorsi yang minim sehingga cocok untuk pengukuran dengan metode pengolahan citra.



Gambar3.10 Lensa. (a) EF 50 f2.5 makro, (b) EF 70-200 f2.8, IS USM (dpreview.com)



Gambar3.11 Distortion chart. (a) EF50 f2.5 makro (b) EF 70-200 f2.8 IS USM pada 135 mm (www.photozone.de)

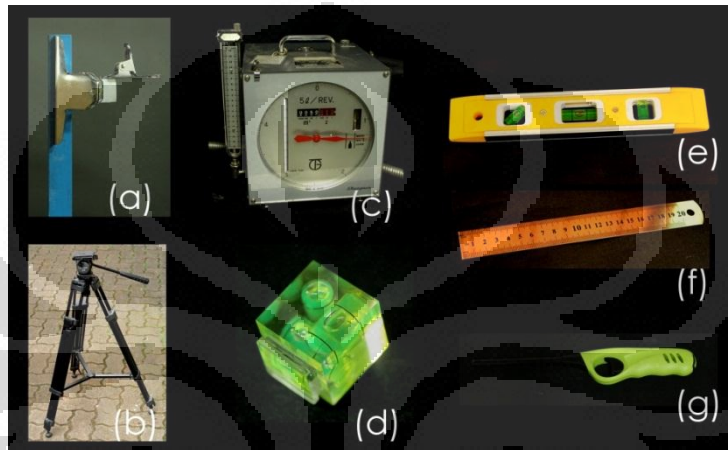
3.3.7 Peralatan Pendukung

Peralatan lain pendukung penelitian ini antara lain :

1. Tiang penahan benda penghalang yang berfungsi sebagai tatakan benda penghalang yang di taruh di atas ujung burner (a).
2. *Wet Gas Meter* (b), digunakan untuk kalibrasi rotameter dan *flowmeter* udara, dengan spesifikasi :
 - Model : WE-1.5A
 - Laju aliran, Max. : 1.5 m³/h Min.: 0.005 m³/h

– Pabrikan : Shinagawa Keisokki Seisakusho CO. LTD

3. Pematik api gas sistem magnet(g)
4. Tripod kamera *Libec TH650* yang dilengkapi dengan waterpass berfungsi untuk menahan kamera agar posisi stabil (b)
5. *Waterpass* sebagai indikator tegak lurus dari burner (e)
6. *Waterpass* kamera sebagai indikator tegak lurus kamera (d))
7. Penggaris besi untuk mengukur jarak batang dengan burner (f)

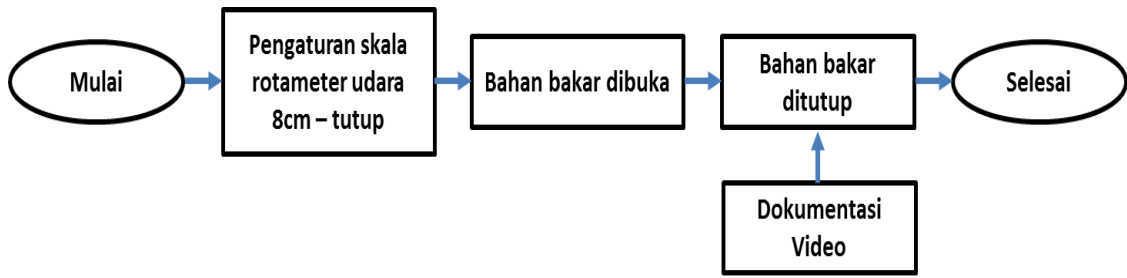


Gambar3.12 Peralatan pendukung

3.4 Pengambilan Data

3.4.1 Pengambilan data *Flashback*

Proses pengambilan data flame *flashback* seperti pada diagram alur , gambar 3.13. Udara di atur pada laju aliran yang diinginkan, kemudian dialirkan sedikit LPG kemudian dinyalakan. Setelah itu bahan bakar dikurangi dan ditutup alirannya sampai terjadi *flashback*. Pada peristiwa *flashback* didokumentasikan dengan kamera dalam format video. Hal ini di ulang dengan laju aliran udara yang berbeda sampai dengan laju aliran udara di tutup dengan tingkatan satu sentimeter skala rotameter. Laju aliran udara di tampilkan pada tabel 4.1.

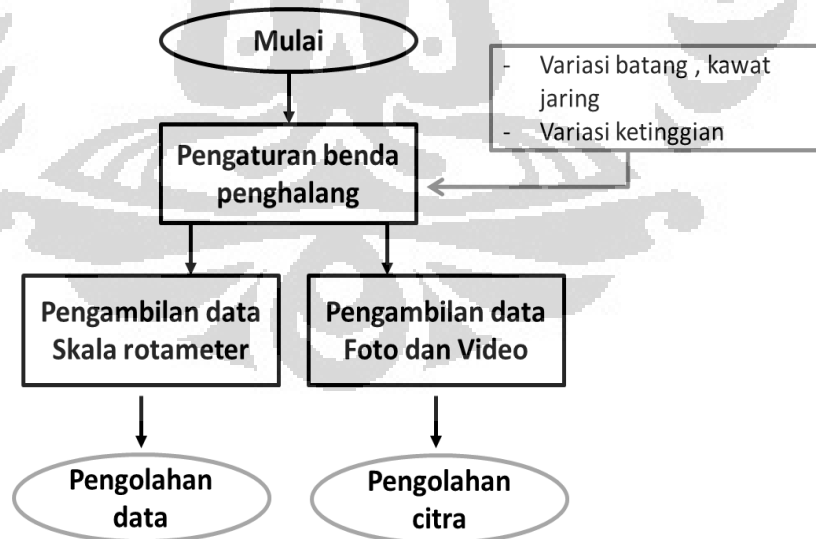


Gambar3.13 Diagram alur pengambilan data gambar Flame Flashback

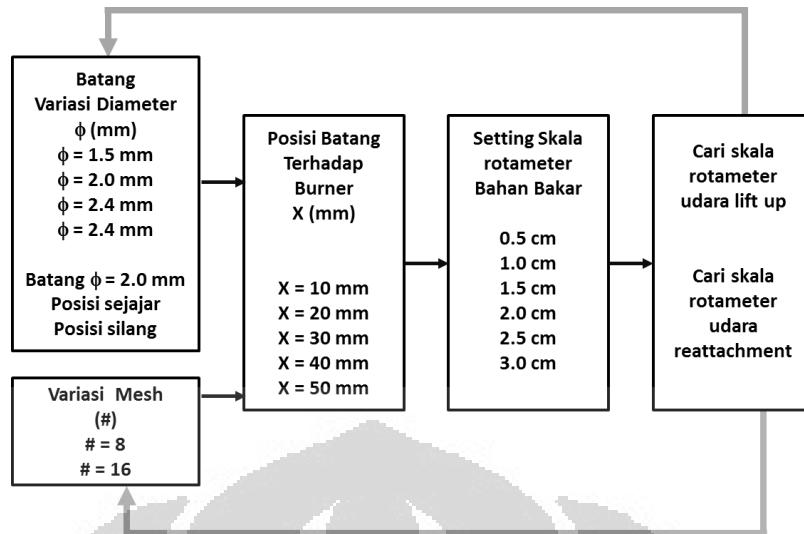
3.4.2 Pengambilan data *lift-up* dan *Reattachment*

Proses pengambilan data seperti pada diagram alur pada gambar 3.14 dan detail skema pengaturan benda penghalang seperti pada gambar 3.15.

Benda penghalang berupa batang yang diletakkan satu persatu atau 2 batang yang berukuran sama yang diletakkan saling silang atau kawat jaring di atur posisinya 10, 20, 30 dan 40mm di atas burner. Kemudian dialirkan udara dan aliran bahan bakar diatur dengan skala rotameter 5mm sampai 30mm dengan tingkatan 5mm, dengan hasil penyetaraan menjadi laju aliran yang ditampilkan pada tabel 3.1. Kemudian aliran udara di atur sampai mendapatkan kondisi *liftup*, kemudian aliran udara diturunkan sampai mencapai kondisi *reattachment*.



Gambar3.14 Skema pengambilan data flame lift-up dan flame reattachment



Gambar3.15 Skema pengaturan batang dan kawat jaring

3.5 Pengolahan Data

3.5.1 Pengolahan data laju aliran

Data laju aliran yang ada di amati dan dicatat dalam bentuk skala di rotameter. Data skala udara dirubah menjadi laju aliran dalam satuan l/s dengan persamaan 3.2 .Data skala bahan bakar di rubah menjadi laju aliran dalam satuan debit l/s dengan persamaan 3.1 dan kemudian di olah ke data *burning load* BL dengan persamaan 2.3, dari data tersebut di plot grafik BL-AFR.

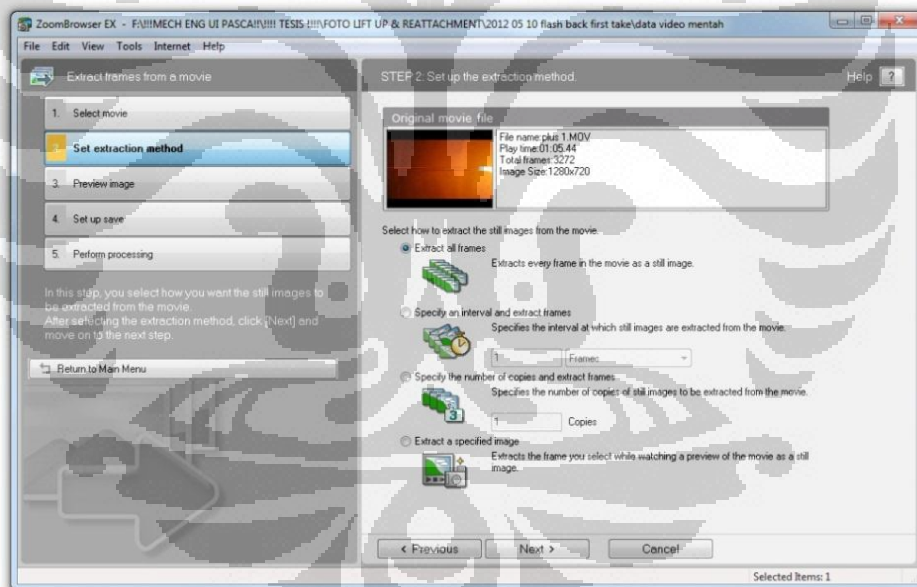
3.5.2 Pengolahan citra

Untuk mendapatkan data fenomena *flashback* pada bunsen burner, fenomena yang ada di dokumentasikan dalam bentuk video dengan frame rate 50 fps, atau dengan paruh waktu 0.02 detik per satu gambar. Pada eksperimen ini dipakai pengaturan kamera yang konstan dengan nilai ISO 6400, kecepatan rana 1/60s dan diafragma f.5.6. Data video yang didapatkan harus diubah menjadi data foto agar dapat diolah dan diukur. Perangkat lunak yang di pakai untuk pengolahan citra ini adalah :

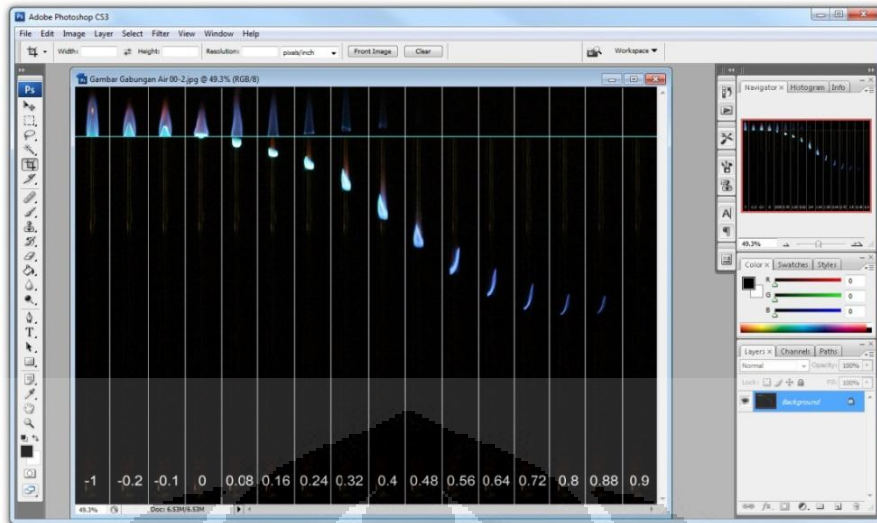
1. Canon Zoom Browser EX, yang digunakan untuk ekstrasi video yang berekstensi .MOV menjadi file foto berekstensi .JPEG. Perangkat

lunak ini merupakan perangkat lunak yang disertakan pada kamera yang di pakai.

2. Adobe Photoshop, yang digunakan untuk pengolahan lanjutan. Foto hasil ekstraksi dari Zoom Browser EX di pilih dengan renggang waktu yang konstan kemudian diurutkan dan ditandai agar mempermudah proses berikutnya.
3. ImageJ, yang digunakan untuk perhitungan jarak berdasarkan jumlah pixel. Gambar yang telah diolah dengan photoshop di kalibrasi berdasarkan pixel/satuan panjang dalam pengambilan data ini menggunakan satuan pixel/mm. setelah di kalibrasi kemudian di pilih bagian bagian yang akan di ukur untuk mendapatkan panjang berdasarkan banyaknya pixel. Data kemudian di simpan dan dapat di pindahkan ke pengolahan tabulasi.



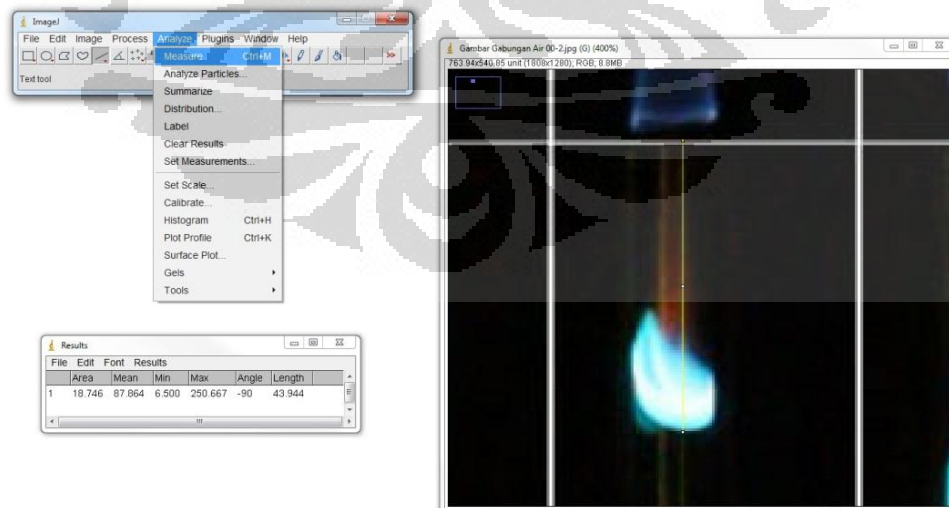
Gambar3.16 Pengolahan citra dengan Canon Zoom Browser EX



Gambar3.17 Pengolahan citra dengan Photoshop



Gambar3.18 Pengolahan citra dengan ImageJ – Kalibrasi



Gambar3.19 Pengolahan citra dengan ImageJ - Pengukuran

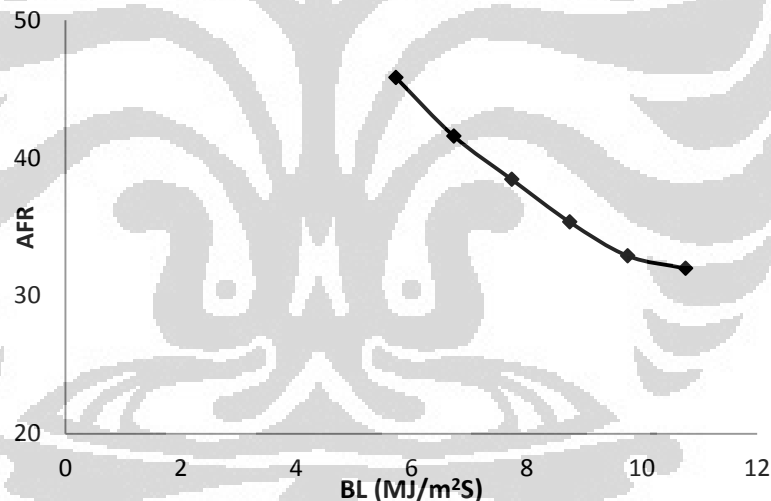
BAB 4

Hasil dan Analisa

4.1 *Lift-up Flame dan Reattachment Flame*

4.1.1 *Blow off*

Sebagai salah satu pengukuran karakteristik dari burner adalah *blow off*, di mana pada eksperimen ini di dapatkan karakteristik *blow off* seperti pada gambar 4.1. Terlihat, makin bertambahnya laju aliran bahan bakar yang dikonversi menjadi *burning load*, maka kondisi AFR dari *blow off* burner ini makin berkurang. Makin bertambahnya *laju aliran* maka kecepatan campuran homogen bahan bakar udara juga makin bertambah, sehingga menjadi salah satu faktor dari karakteristik *blow off*.

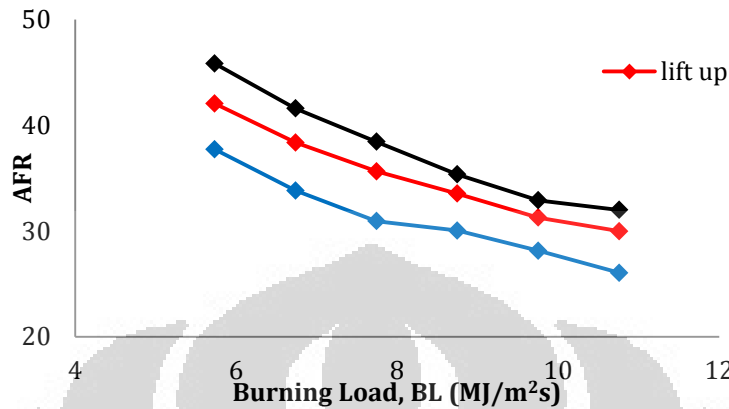


Gambar 4.1 Burning load dan AFR dari blow off

4.1.2 Perbandingan *lift-up*, *Reattachment* dan *blow off*

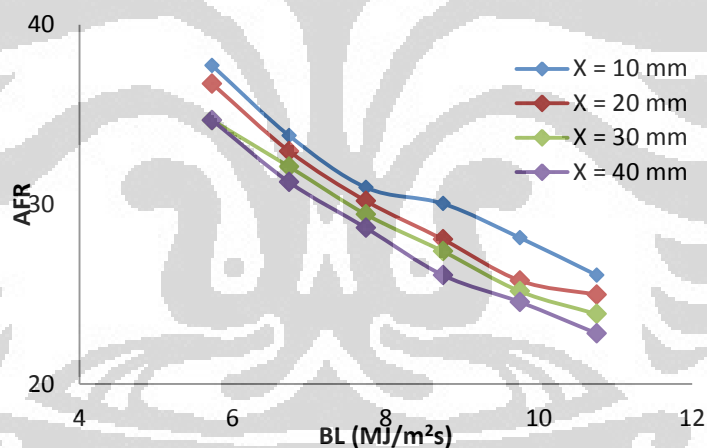
Pada eksperimen ini, dengan meletakkan benda penghalang berupa batang didapatkan *lift-up* dan *reattachment*. Untuk mendapatkan *reattachment* maka mula-mula nyala api di *lift-up* terlebih dahulu. Gambar 4.2 adalah grafik dari BL- AFR dari dengan menggunakan batang *stainless steel* dengan diameter $\phi = 2$ mm yang diletakkan dengan jarak $X = 20$ mm di atas burner. Apabila dikomparasi dengan spesifikasi *blow off* didapatkan bahwa, pada burning load yang sama, AFR

dari *blow off* lebih tinggi dari AFR *lift up* lebih tinggi dari AFR *reattachment* dan AFR dari *lift-up* lebih tinggi dari AFR *reattachment*.



Gambar 4.2 Perbandingan BL-AFR antara *Blow-off*, *Lift-up* dan *Reattachment*

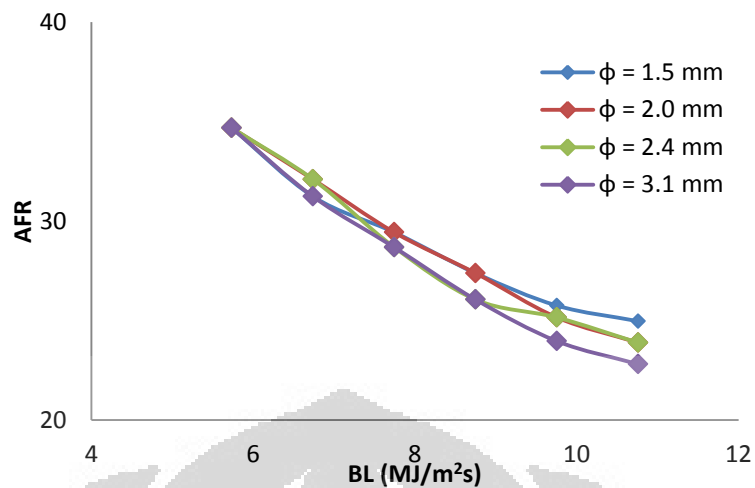
4.1.3 *Reattachment* pada variasi batang dan jarak batang terhadap burner



Gambar 4.3 *Reattachment* dengan menggunakan batang $\phi = 2.0$ mm

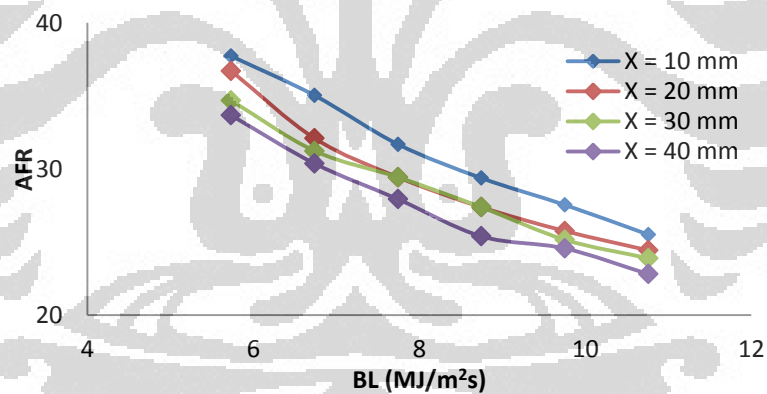
Pada gambar 4.3, terlihat kecenderungan pada *burning load* yang sama, makin tinggi jarak batang dari burner maka makin kecil nilai AFR dari *reattachment*.

Pada Gambar 4.4, terlihat kecenderungan pada *burning load* yang sama dengan jarak batang terhadap burner dengan diameter batang yang berbeda, pada *burning load* yang kecil, AFR cenderung sama, tetapi pada *burning load* yang lebih besar, diameter batang yang lebih besar menurunkan AFR.



Gambar4.4 Reattachment pada jarak batang X = 30mm

Pada gambar 4.5 di bawah ditampilkan *reattachment* dengan menggunakan 2 batang diameter $\phi=1.5\text{mm}$ dengan posisi silang. Terlihat kecenderungan pada *burning load* yang sama, makin jauh jarak batang maka makin kecil nilai AFR.



Gambar4.5 Reattachment, batang ϕ 1.5mm, posisi silang

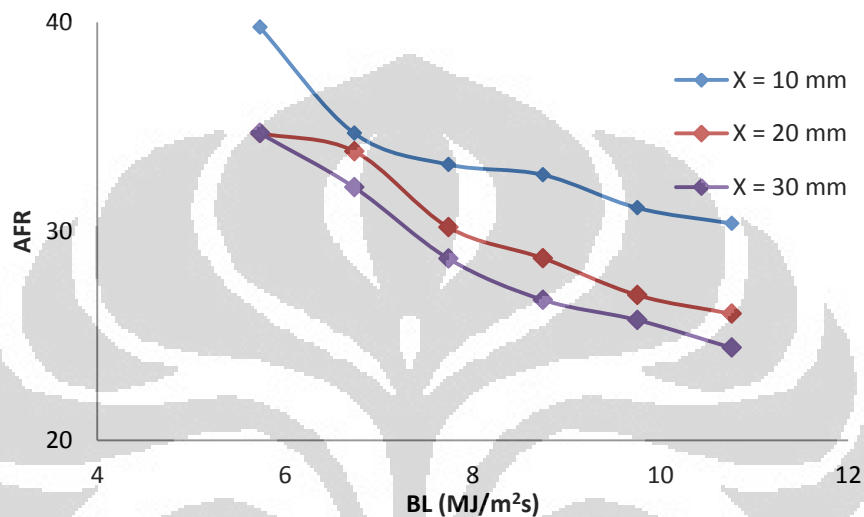
4.1.4 Reattachment pada kawat jaring

Digunakan 2 jenis kawat jaring tebal 1 mm dengan ukuran *mesh* #8 dan *mesh* #16.

Pada kawat jaring ukuran *mesh* #16, pada jarak 10 mm sampai 40 mm, nyala api bisa lift up tetapi tidak terjadi *reattachment*. Sedangkan pada penggunaan kawat jaring ukuran *mesh* #8 dengan variasi jarak yang sama, nyala

api bisa *lift-up* dan *reattachment*. Hasil *reattachment* dengan menggunakan kawat jaring mesh #8 di yang diletakkan pada jarak $X = 10$ mm, 20 mm dan 30mm dari burner ditampilkan pada gambar berikut.

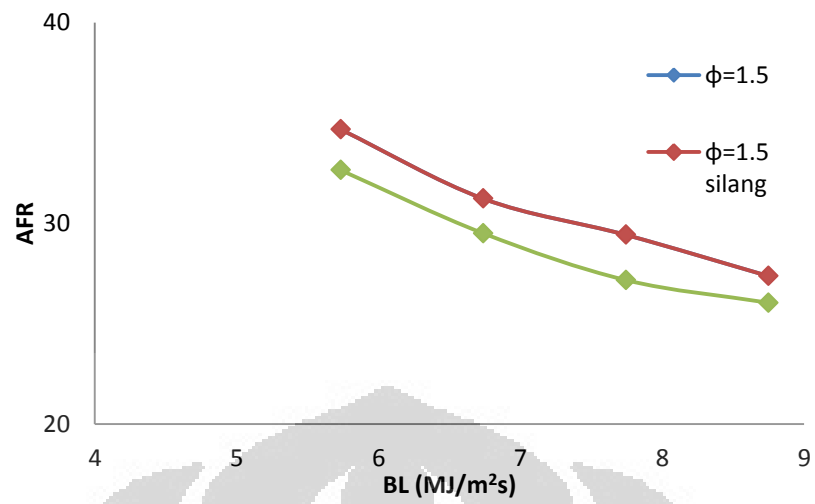
Pada burning load yang sama terlihat kecenderungan, dengan jarang yang makin jauh maka AFR makin turun.



Gambar4.6 Reattachment dengan menggunakan kawat jaring mesh #8

Pembandingan *reattachment* pada batang, batang dengan posisi silang dan batang dengan mesh #8, seperti pada gambar 4.7 dimana AFR batang dengan diameter 1.5 mm dan batang dengan diameter 1.5 mm yang ditaruh pada posisi silang, mempunyai AFR yang sama pada *burning load* yang sama, sedangkan pada *mesh* #8 mempunyai AFR yang lebih rendah dari kedua di atas.

Pada gambar 4.8 diperlihatkan dimana kawat jaring mesh #16 di letakkan sekitar 20 mm dari atas burner. Pada jarak kawat jaring 10-40mm dan pada semua kondisi burning load dan AFR, bisa terjadi *lift-up* akan tetapi tidak terjadi *reattachment*. Bisa disimpulkan bahwa kawat jaring dapat digunakan atau efektif untuk mengatasi *reattachment*



Gambar4.7 *Reattachment* pada batang 1.5 mm, 1.5mm posisi silang, mesh #8



Gambar4.8 tidak *reattachment*

4.2 *Flashback*

4.2.1 Batasan laju aliran udara

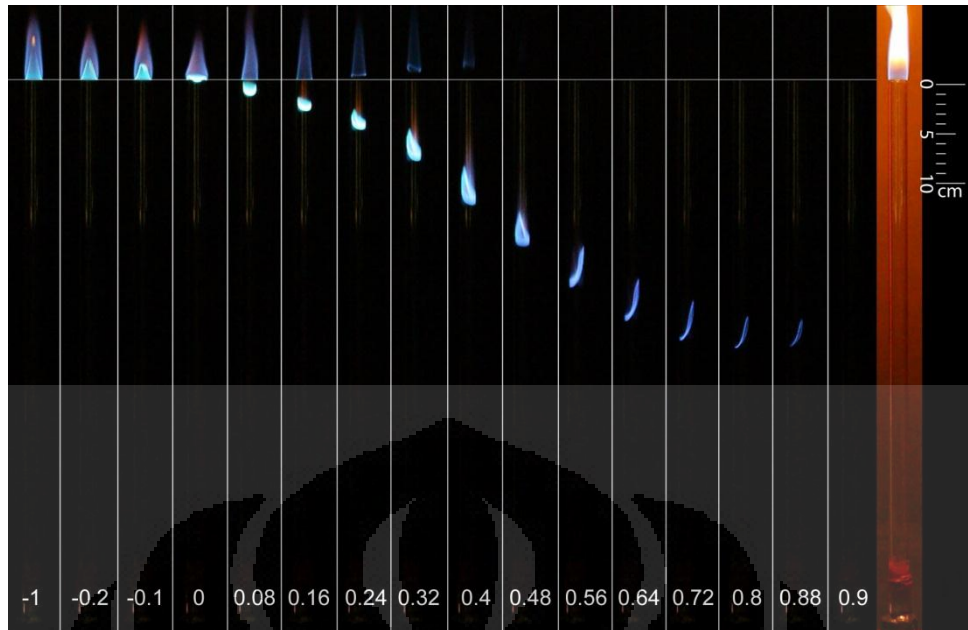
Pada penelitian ini pengambilan data *flashback* adalah berdasarkan aliran bahan bakar dan aliran udara. Aliran bahan bakar diatur terlebih dahulu pada skala 8 cm sampai dengan ditutup sepenuhnya dengan tingkatan skala 1cm, atau dari 0.22 l/s sampai dengan 0 l/s. Setelah itu dikeluarkan bahan bakar dan dinyalakan. Kemudian bahan bakar di tutup sampai terjadi *flashback*. Pada saat *flashback* di dokumentasikan dengan video. Hasil kalibrasi aliran udara dari skala rotameter dengan satuan cm di kalibrasi dengan rumus 3.2 menjadi air laju aliran dengan satuan l/s di tampilkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Kalibrasi Rotameter

skala rotameter (cm)	Laju Aliran Udara (l/s)
0	0.045
1	0.066
2	0.088
3	0.109
4	0.131
5	0.152
6	0.173
7	0.195
8	0.216

4.2.2 Pengambilan dan pengaturan gambar nyala *flashback*

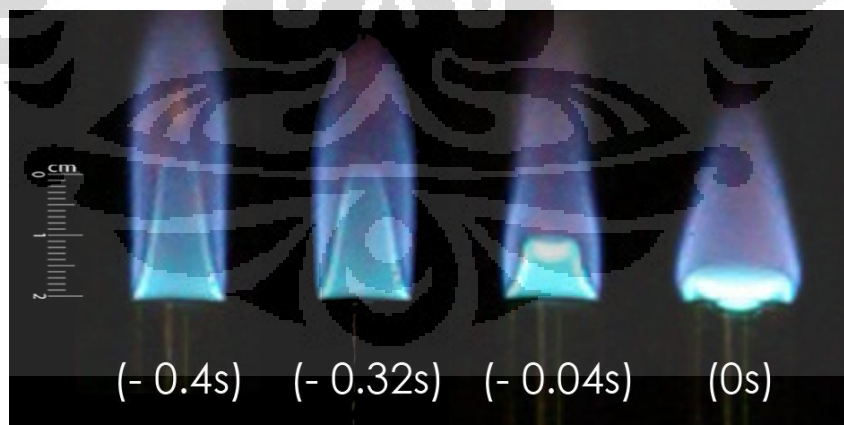
Gambar 4.9 adalah gambar *flashback* dengan laju aliran udara 0.045 l/s. Gambar ini adalah gambar hasil ekstrasi dari video menjadi foto yang kemudian diurutkan dengan tingkatan 0.08 detik ditambah beberapa flame saat proses awal dan satu frame terakhir pada saat padam.



Gambar4.9 *Flashback* pada air laju aliran 0.04 l/s

4.2.3 Bentuk nyala *flashback*

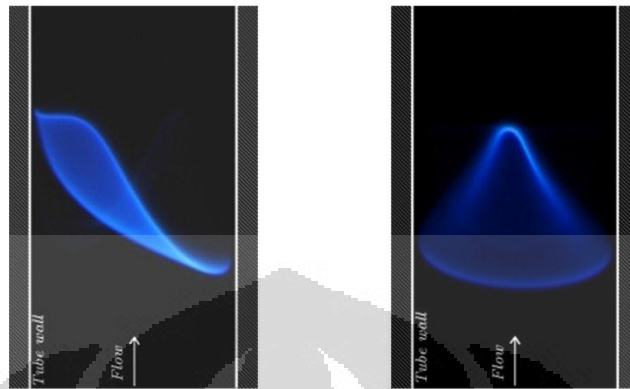
Secara visual, proses terjadinya *flashback* dimulai pada saat ujung nyala di atas burner yang berupa yellow tip atau ujung kuning hilang kemudian mengecil dan ujung dari nyala masuk ke dalam tabung burner. Jarak *flashback* dihitung dari ujung burner atau dijadikan jarak nol.



Gambar4.10 proses awal *flashback* sebelum masuk kedalam tabung burner

Pada eksperimen yang dilakukan oleh Kurdyumov et.al, menggunakan burner dengan tabung pirex dengan dimensi panjang 1.49m, diameter dalam 21.4

mm dan tebal 1.3 mm, dengan bahan bakar propan. Didapati nyala flashback seperti pada gambar di bawah.

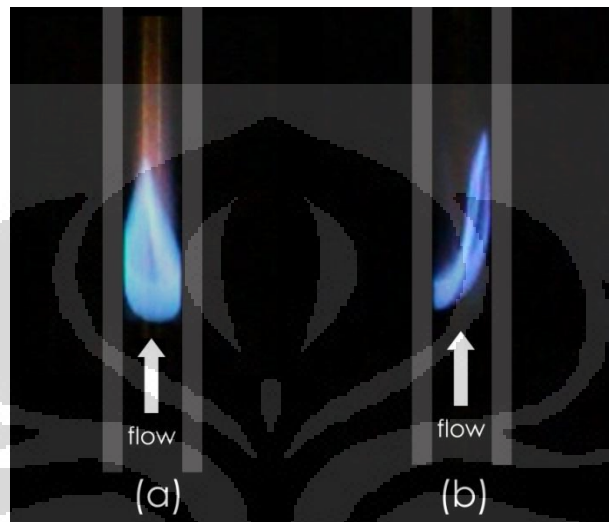


Gambar 4.11 nyala laminar flashback
(kurdyumov et.al.)

Gambar 4.10 adalah gambar proses awal terjadinya *flashback* sebelum nyala masuk ke dalam tabung burner dengan air laju aliran 0.04 l/s. Pada -0.4 s terlihat masih terlihat yellow tip, yang merupakan sekuen hilangnya yellow tip dan benar benar hilang pada -0.32 s. pada -0.04 s terlihat ujung nyala mengarah balik ke dalam tabung. Pada 0 s dijadikan titik no karena pada gambar ini terlihat dimana ujung nyala berada pada ujung burner atau terjadi *flat flamedan* mengarah ke dalam burner.

Pada Gambar 4.12 diperlihatkan gambar *flashback* yang terjadi di dalam tabung dengan air 0.04 l/s. kedua gambar ini di ambil dengan nilai eksposur yang sama. Gambar 4.12(a) adalah *flashback* yang terjadi pada 0.38 s, dimana terlihat masih ada nyala berwarna kuning kemerahan yang merupakan indikasi masih ada nyala difusi. Gambar 4.12(b) adalah *flashback* yang terjadi pada 0.58 s, dengan di mana sudah tidak terlihat lagi nyala berwarna merah, yang menandakan bahwa nyala flashback ini merupakan nyala premix penuh. Apabila dibandingkan warna nyala biru antara (a) dan (b), pada gambar (a) di bagian nyala berwarna biru terlihat bahwa warna adalah biru muda dan ada bagian yang berwarna biru keputihan, sedangkan pada gambar (b) terlihat warna kebanyakan adalah warna biru yang lebih pekat. Apabila di tinjau secara *luminence*, menandakan bahwa

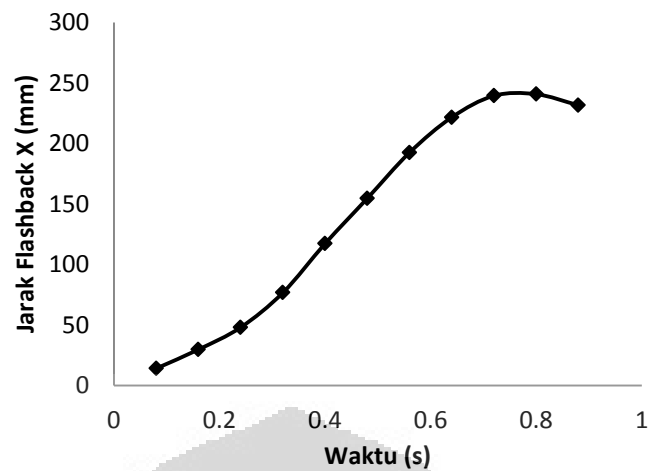
pada bahan bakar pada (a) merupakan campuran premix yang kurus bahan bakar, sedangkan pada (b) merupakan campuran premix batasan nyala minimum kurus bahan bakar. dari beberapa variasi penambahan didapatkan, makin jauh jarak *flashback*, warna nyala adalah makin biru yang menandakan makin kurus bahan bakar.



Gambar4.12 bentuk nyala *flashback* dalam tabung dengan air 0.22 l/s

4.2.4 Jarak dan Kecepatan Nyala *Flashback*

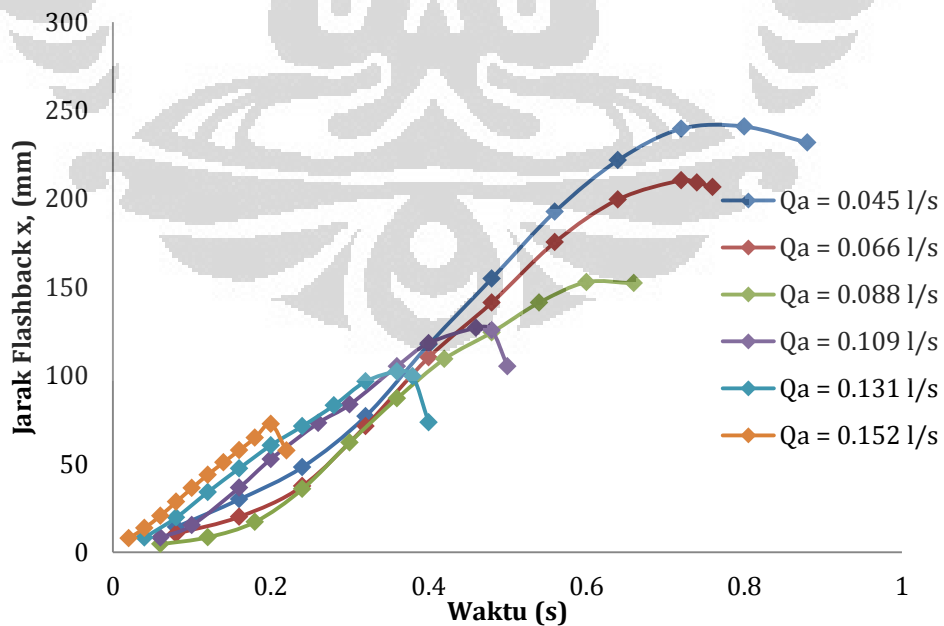
Kecepatan nyala didapatkan dengan cara pengolahan citra. Pada Gambar 4.9, gambar frame dengan rentang 0.8 s telah di urutkan ditambah dengan gambar *flashback* terakhir yang tertangkap. Dengan pengukuran berdasarkan satuan pixel yang telah dikalibrasi menjadi satuan panjang dalam hal ini milimeter menjadi perbandingan pixel/mm. Karena semua video diambil dengan jarak kamera dengan objek yang sama, jarak fokus lensa yang sama dan pembesaran yang sama maka dapat menggunakan besaran kalibrasi yang sama. Pada semua gambar terkalibrasi dengan satuan 2.3 pixel/mm. Dari hasil pengukuran pengolahan citra, dengan air laju aliran 0.04 l/s didapatkan hasil grafik pada gambar 4.13.



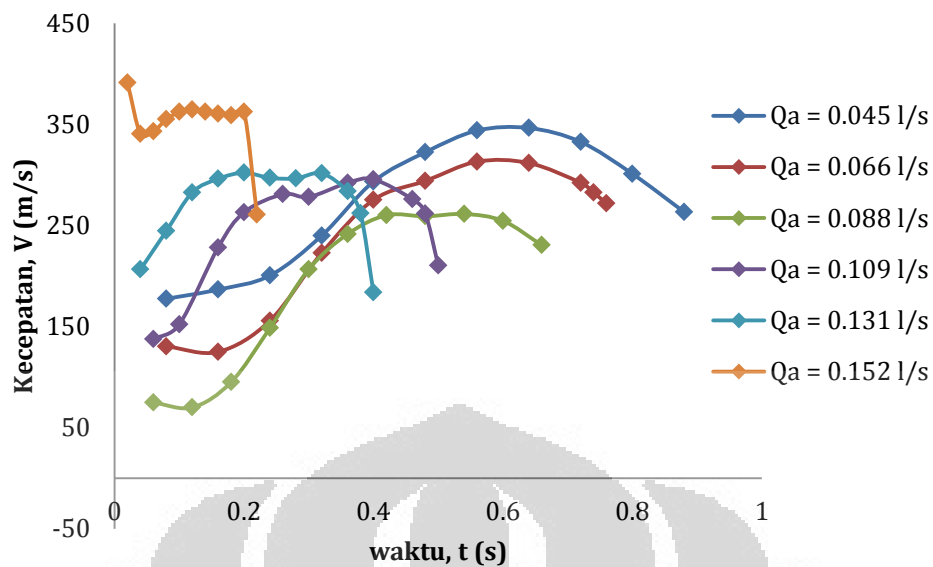
Gambar 4.13 kecepatan *flashback* dengan laju aliran udara 0.04 l/s

Kecepatan *flashback* dari awal mulai meningkat sampai pertengahan jarak *flashback*, kemudian mulai melambat, dan pada terakhir nyala *flashback* berbalik naik lagi kemudian padam.

Pada gambar 4.14 adalah grafik jarak terhadap waktu dengan penambahan laju aliran udara $Q_a = 0.04, 0.07, 0.09, 0.11, 0.13$ dan 0.15 l/s, dan pada gambar 4.15 adalah grafik kecepatan terhadap waktu dari beberapa variasi laju aliran udara.



Gambar 4.14 Jarak *flashback* terhadap waktu dengan laju aliran udara Q_a beragam

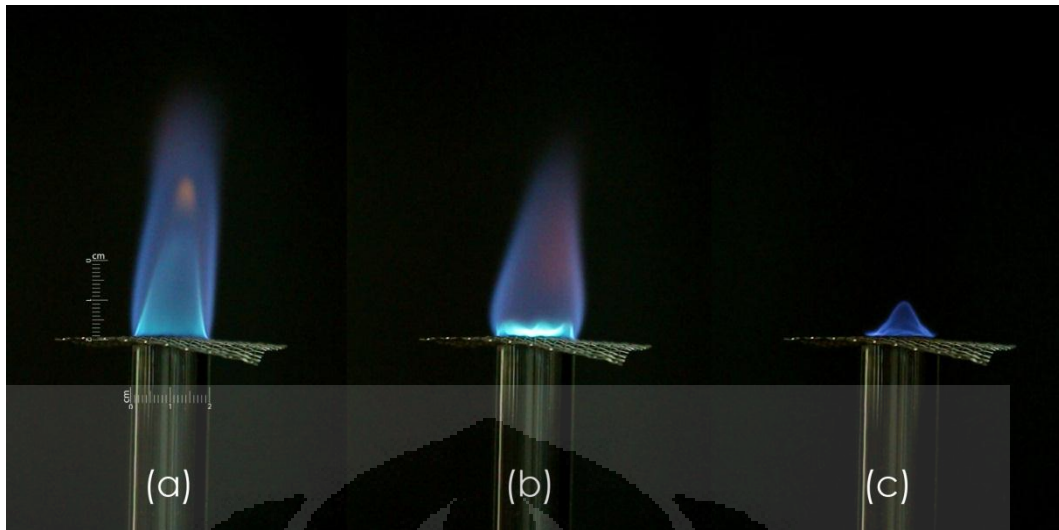


Gambar 4.15 Kecepatan terhadap waktu dari *Flashback* dengan laju aliran udara Q_a beragam

dari hasil perhitungan kecepatan *flashback* ini dapat disimpulkan :

- Makin banyak laju aliran udara yang ditambahkan, jarak *flashback* makin pendek
- Makin banyak laju aliran udara yang ditambahkan, waktu *flashback* makin singkat
- Pada $Q_a = 0.173$ dan 1.95 l/s *flashback* tidak konstan
- Pada $Q_a = 0.216$ tidak terjadi *flashback* atau hanya *blow off*
- Pada $Q_a = 0$ atau tidak ada udara yang ditambahkan, tidak terjadi *flashback*

Dengan menggunakan kawat jaring, mesh #8 yang diletakkan tepat pada ujung burner atau menutupi ujung burner, *flashback* tidak terjadi. Hal ini dibuktikan dengan hasil dokumentasi foto yang diekstrak dari video, seperti pada gambar 4.16. Pada (a) adalah proses awal hilangnya ujung kuning dari nyala yang merupakan proses awal yang sama pada *flashback*, (b) merupakan proses turunnya ujung nyala berbalik arah aliran, (c) adalah nyala membesar lagi sebelum padam tanpa masuk ke dalam burner.



Gambar 4.16 tidak flashback dengan kawat mesh #8

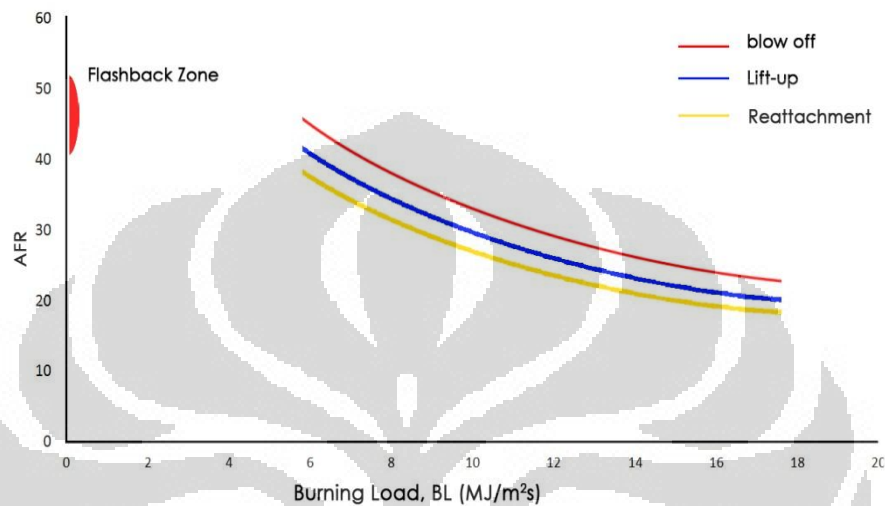
Dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan kawat jaring yang diletakkan tepat pada ujung burner dalam hal ini mulai dari ukuran mesh #8, *flashback* dapat dicegah.

4.2.5 Diagram stabilitas Nyala

Stabilitas nyala dari gas alam dipresentasikan pada diagram fuinge atau diagram stabilitas nyala seperti pada gambar 2.2.

Pada penelitian ini juga, *flashback* terjadi pada aliran udara yang kecil dan juga pada aliran bahan bakar yang kecil yang mendekati batas *lean premix* kemampuan nyala dari LPG, akan tetapi tidak terjadi pada saat udara tidak dialirkan atau tentu saja saat bahan bakar dialirkan sehingga pada diagram stabilitas nyala, *flashback zone* berada sebelah kiri. Batas *lean premix* dari LPG adalah 2% volume campuran gas maka batas maksimum AFR dari *flashback* adalah 50. Diteliti juga *blow off*, *lift-up* dan *reattachment* yang berada di antara sekitar *satisfactory operation* dan daerah *lifting flame* yang dinyatakan dalam AFR dan *Burning Load* dengan satuan $\text{MJ/m}^2\text{s}$. Terlihat bahwa *flashback* terjadi sebelum mencapai kondisi *blow off* sehingga kondisi *flashback* berada di bawah *blow off* dan *reattachment* terjadi saat aliran udara diturunkan setelah terjadi *lift-up* sehingga kondisi AFR dari *Reattachment* berada dibawah kondisi AFR dari

lift-up. Kondisi nyala dari *lift-up* adalah nyala lean premix juga, sehingga bila diasumsikan sampai pada batas minimum lean premix, maka AFR maksimum dari *lift-up* adalah sekitar 50 demikian juga dengan kondisi AFR dari *reattachment*. Stabilitas nyala pada burner yang digunakan pada eksperimen ini ditampilkan pada gambar di bawah.



Gambar 4.17 Diagram stabilitas nyala bunsen burner tabung pirex

4.2.6 Analisis undimensional flashback

Pada eksperimen ini pengambilan data video yang diekstrak dari nyala flashback pada setiap penambahan laju aliran udara dilakukan sebanyak 3 kali, dari hasil pengukuran dari jarak terjauh dari *depth penetration* dan perbandingan *depth penetration* terhadap diameter burner 15 mm ditampilkan pada tabel 4.2.

Persamaan untuk panjang nyala api premix bunsen burner telah dibuat oleh Rokke[24], yaitu :

$$\frac{L_f}{d_b} = 33Y_f^{2/5} Fr^{1/5} \quad (4.1)$$

Dimana :

- L_f = Panjang nyala api premix (mm)
- Y_f = fraksi massa bahan bakar
- Fr = Bilangan Froud
- Db = Diameter Barel

Tabel 4.2 Variasi depth penetration terhadap penambahan laju aliran udara

Qa l/s	X _{ff} mm	X _{ff} /d -
0.045	240.87	16.06
	237.68	15.85
	244.35	16.29
0.066	210.44	14.03
	218.70	14.58
	223.91	14.93
0.088	152.75	10.18
	153.04	10.20
	158.84	10.59
0.109	126.96	8.46
	126.96	8.46
	126.96	8.46
0.131	102.17	6.81
	97.68	6.51
	101.74	6.78
0.152	72.46	4.83
	91.59	6.11
	86.96	5.80
0.173	50.22	3.35
	55.65	3.71

Pada penelitian yang dilakukan oleh Martin H.[25], panjang nyala api pada pembakaran premix ternyata juga dipengaruhi oleh bilangan Lewis yang merupakan rasio momentum aliran terhadap *bouyancy* atau gaya apung. Oleh karena itu, dengan memasukkan faktor bilangan Lewis sebagai variabel untuk menghitung panjang nyala api maka persamaan Rokke dikoreksi menjadi :

$$\frac{L_f}{d_b} = 33Y_f^{2/5} Fr^{1/5} Le^{-0.1} \quad (4.2)$$

Dari formulasi ini terlihat adanya hubungan antara panjang nyala api terhadap fraksi bahan bakar dalam campuran, bilangan Froud, bilangan Lewis. Pada *flashback* yang ditinjau adalah *depth penetration*, sehingga panjang nyala diganti menjadi *depth penetration*, yang secara umum merupakan fungsi dari variabel-variabel yang dapat ditulis :

$$\frac{X_{ff}}{d_b} = f(Y_f, Fr, Le) \quad (4.3)$$

Atau bentuk persamaan umumnya :

$$\frac{X_{ff}}{d_b} = A \cdot Y_f^B \cdot Fr^C \cdot Le^D \quad (4.4)$$

Dimana

$\frac{X_{ff}}{d_b}$ = rasio depth penetration flashback terhadap diameter burner

Yf = Fraksi massa LPG dalam campuran

Fr = Bilangan Froud

Le = Bilangan Lewis

Hasil pengolahan data untuk perhitungan analisa undimensional dari rasio *depth penetration flashback* terhadap diameter burner ditampilkan pada tabel 4.4. Dari data tersebut ditampilkan lagi data seperti pada tabel 4.3 untuk yang akan dianalisa formulasi undimensional dengan menggunakan software minitab.

Tabel 4.3 Tabulasi data perhitungan undimensional dari minitab

	C1	C2	C3	C4
	Xff/d	Y	Fr	Le
1	16.0580	0.0354473	0.44829	11.3646
2	15.8453	0.0354473	0.44829	11.3646
3	16.2900	0.0354473	0.44829	11.3646
4	14.0293	0.0354473	0.96432	7.7486
5	14.5800	0.0354473	0.96432	7.7486
6	14.9273	0.0354473	0.96432	7.7486
7	10.1833	0.0354473	1.71435	5.8115
8	10.2027	0.0354473	1.71435	5.8115
9	10.5893	0.0354473	1.71435	5.8115
10	8.4640	0.0354473	2.63019	4.6918
11	8.4640	0.0354473	2.63019	4.6918
12	8.4640	0.0354473	2.63019	4.6918
13	6.8113	0.0354473	3.79907	3.9039
14	6.5120	0.0354473	3.79907	3.9039
15	6.7827	0.0354473	3.79907	3.9039
16	4.8307	0.0354473	5.11472	3.3645
17	6.1060	0.0354473	5.11472	3.3645
18	5.7973	0.0354473	5.11472	3.3645
19	3.3480	0.0354473	6.62563	2.9561
20	3.7100	0.0354473	6.62563	2.9561
21				

Tabel 4.4 Data Perhitungan analisa non-dimensional

Depth penetration flashback Xff	Lf/d	laju aliran udara		laju aliran massa udara		kecepatan aliran udara		laju aliran LPG		kecepatan aliran LPG		laju aliran campuran		kecepatan aliran campuran		Bilangan Reynolds Re	Bilangan Froude Fr	Bilangan Lewis Le
		Qa	m ³ /s	kg/s	10 ⁻³ kg/s	Va	m/s	Qf	10 ⁻³ m ³ /s	Vf	m/s	Va	m/s	Vc	m/s			
10 ³	10 ³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³			
240.87	16.06	0.045	0.054	0.054	0.054	0.2542	0.00095	0.00198	0.00198	0.00534	0.056	0.257	2172.86	0.45	11.36			
237.68	15.85	0.045	0.054	0.054	0.054	0.2542	0.00095	0.00198	0.00198	0.00534	0.056	0.257	2172.86	0.45	11.36			
244.35	16.29	0.045	0.054	0.054	0.054	0.2542	0.00095	0.00198	0.00198	0.00534	0.056	0.257	2172.86	0.45	11.36			
210.44	14.03	0.066	0.0792	0.0792	0.0792	0.3729	0.00139	0.00291	0.00291	0.00783	0.082	0.377	3186.87	0.96	7.75			
218.70	14.58	0.066	0.0792	0.0792	0.0792	0.3729	0.00139	0.00291	0.00291	0.00783	0.082	0.377	3186.87	0.96	7.75			
223.91	14.93	0.066	0.0792	0.0792	0.0792	0.3729	0.00139	0.00291	0.00291	0.00783	0.082	0.377	3186.87	0.96	7.75			
152.75	10.18	0.088	0.1056	0.1056	0.1056	0.4972	0.00185	0.00388	0.00388	0.01044	0.109	0.502	4249.16	1.71	5.81			
153.04	10.20	0.088	0.1056	0.1056	0.1056	0.4972	0.00185	0.00388	0.00388	0.01044	0.109	0.502	4249.16	1.71	5.81			
158.84	10.59	0.088	0.1056	0.1056	0.1056	0.4972	0.00185	0.00388	0.00388	0.01044	0.109	0.502	4249.16	1.71	5.81			
126.96	8.46	0.109	0.1308	0.1308	0.1308	0.6158	0.00229	0.00481	0.00481	0.01293	0.136	0.622	5263.16	2.63	4.69			
126.96	8.46	0.109	0.1308	0.1308	0.1308	0.6158	0.00229	0.00481	0.00481	0.01293	0.136	0.622	5263.16	2.63	4.69			
126.96	8.46	0.109	0.1308	0.1308	0.1308	0.6158	0.00229	0.00481	0.00481	0.01293	0.136	0.622	5263.16	2.63	4.69			
102.17	6.81	0.131	0.1572	0.1572	0.1572	0.7401	0.00275	0.00578	0.00578	0.01554	0.163	0.748	6325.45	3.80	3.90			
97.68	6.51	0.131	0.1572	0.1572	0.1572	0.7401	0.00275	0.00578	0.00578	0.01554	0.163	0.748	6325.45	3.80	3.90			
101.74	6.78	0.131	0.1572	0.1572	0.1572	0.7401	0.00275	0.00578	0.00578	0.01554	0.163	0.748	6325.45	3.80	3.90			
72.46	4.83	0.152	0.1824	0.1824	0.1824	0.8588	0.00319	0.00670	0.00670	0.01803	0.189	0.868	7339.45	5.11	3.36			
91.59	6.11	0.152	0.1824	0.1824	0.1824	0.8588	0.00319	0.00670	0.00670	0.01803	0.189	0.868	7339.45	5.11	3.36			
86.96	5.80	0.152	0.1824	0.1824	0.1824	0.8588	0.00319	0.00670	0.00670	0.01803	0.189	0.868	7339.45	5.11	3.36			
50.22	3.35	0.173	0.2076	0.2076	0.2076	0.9774	0.00363	0.00763	0.00763	0.02053	0.215	0.987	8353.46	6.63	2.96			
55.65	3.71	0.173	0.2076	0.2076	0.2076	0.9774	0.00363	0.00763	0.00763	0.02053	0.215	0.987	8353.46	6.63	2.96			

Regression Analysis: Lf/d_b versus Y, Fr, Le

* Y is (essentially) constant
* Y has been removed from the equation.

The regression equation is
 $X_{ff}/d = 7.89 - 1.04 Fr + 0.806 Le$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	7.889	1.165	6.77	0.000
Fr	-1.0423	0.1695	-6.15	0.000
Le	0.8055	0.1216	6.63	0.000

S = 0.774737 R-Sq = 97.1% R-Sq(adj) = 96.8%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	342.06	171.03	284.95	0.000
Residual Error	17	10.20	0.60		
Total	19	352.26			

Source	DF	Seq SS
Fr	1	315.70
Le	1	26.36

Unusual Observations

Obs	Fr	X _{ff} /d	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
6	0.96	14.927	13.126	0.244	1.802	2.45R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Dari hasil regresi minitab didapatkan persamaan regresi adalah :

* Y is (essentially) constant
* Y has been removed from the equation.

Atau fraksi mol dari bahan bakar adalah konstan sehingga Y dapat dihilangkan dari persamaan,

The regression equation is
 $X_{ff}/d = 7.89 - 1.04 Fr + 0.806 Le$

Dari hasil regresi didapatkan persamaan regresi seperti diatas, sehingga persamaan 4.4 dapat dilengkapi dan didapatkan formulasi :

$$\frac{X_{ff}}{d_b} = 7.89 Fr^{-1.04} Le^{0.806}$$

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan data hasil eksperimental didapatkan

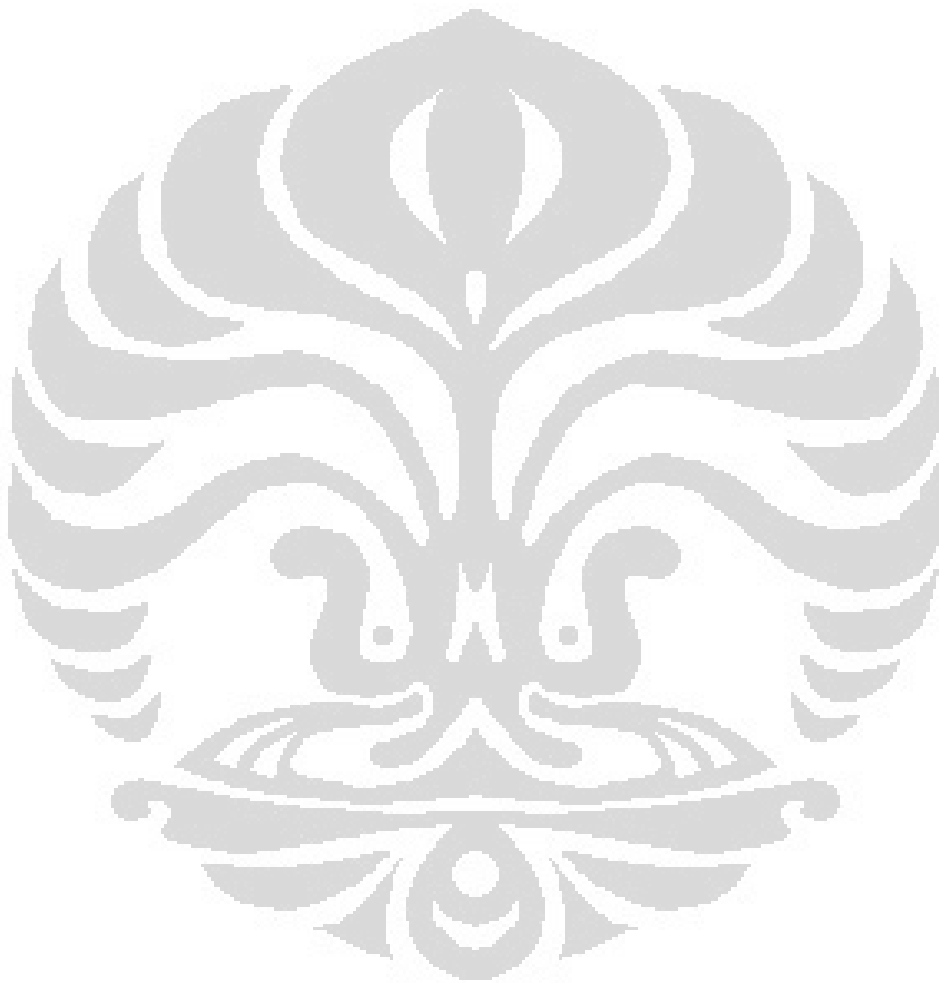
1. *Flashback* dapat terjadi apabila ada penambahan udara pada aliran gas, makin sedikit udara yang ditambahkan maka rambatan *flashback* makin panjang, tetapi apabila tidak ada penambahan udara maka tidak terjadi *flashback*.
2. Makin sedikit aliran udara yang ditambahkan maka *depth penetration* dari *flashback* akan semakin jauh
3. Apabila tidak ada penambahan aliran udara pada aliran gas maka *flashback* tidak terjadi, atau pada selang yang hanya mengalirkan bahan bakar saja, tidak ada kemungkinan terjadinya *flashback*. *Flashback* bukan faktor penyebab kebakaran atau ledakan tabung melalui selang
4. Apabila pada kondisi yang memungkinkan *flashback* terjadi, hal ini dapat dicegah dengan menggunakan kawat jaring dengan cara menggunakan ukuran mesh yang kecil, atau meletakkan kawat jaring menutupi burner
5. Apabila kawat jaring dapat mencegah terjadinya *reattachment*, maka kawat jaring tersebut bisa digunakan sebagai pencegahan *flashback*.
6. Pada tabung burner diameter 15mm dan tebal 2.5mm, dengan menggunakan kawat jaring ukuran mesh#16 sudah tidak terjadi *reattachment*, dan dengan menggunakan kawat jaring mulai ukuran mesh #8, *flashback* dapat di cegah.

5.2 Saran

Secara keseluruhan data yang didapatkan untuk perhitungan selanjutnya masih kurang karena belum adanya variasi ukuran tabung dan pengukuran aliran bahan bakar oleh karena itu :

- Tabung burner harus diperpanjang agar bisa mendapatkan *co-flow* atau aliran searah antara bahan bakar dan udara yang laminar.

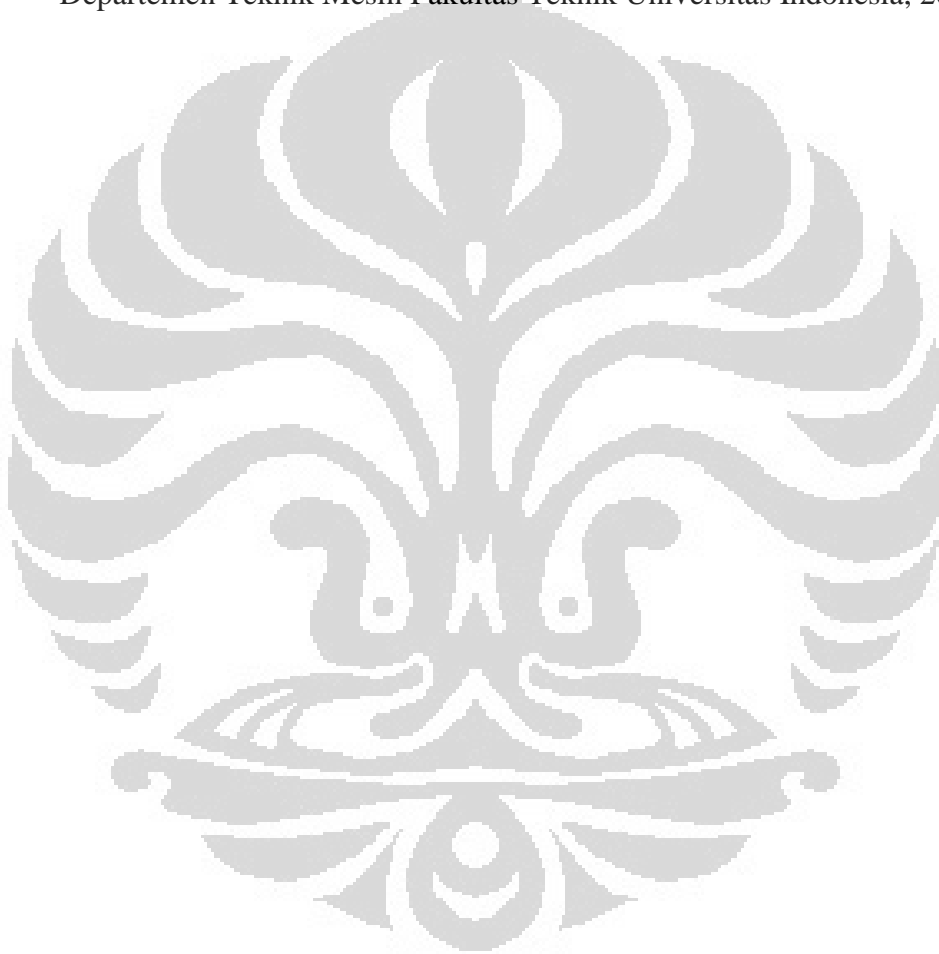
- Variasi diameter dan tebal tabung agar bisa didapatkan hasil eksperimen hubungan antara luas keluaran tabung dengan ukuran mesh untuk pencegahan *flashback*.
- Penggunaan rotameter untuk mengukur aliran yang sangat kecil agar bisa didapatkan pengukuran aliran bahan bakar.



DAFTAR REFERENSI

- [1] F.E Mahalawy, Fundamentals and technology of combustion, Elsevier,2002
- [2] S.R. Turns, An introduction to combustion – concepts and applications, McGraw Hill,2000
- [3] M.A. Liberman, Introduction to physics and chemistry of combustion-Explosion,flame,detonation, Springer,2008
- [4] Cengel. Yunus A, Boles. Michael, Thermodynamics and Engineering Approach, Third Edition, Mcgraw-hill, International Edition,1998
- [5] Spalding D.B., A Theory of inflammability limits and flame-quenching, 1956
- [6] Mishra D.P. , Experimental studies of flame stability limits of CNG-Air Premixed flame, Energy and conversion & management, 2006
- [7] Pertamina – komposisi LPG 3 kg sesuai spesifikasi dan standar keselamatan
- [8] Garcia, Campana, Baeyens, Chemiluminescence in Analytical Chemistry, Marcel Dekker Inc.2001
- [9] Huang H.W., Zhang Y., Flame colour characterization in the visible and infrared spectrum using a digital camera and image processing, Fuel, 2010
- [10] Huang H.W., Zhang Y., Digital colour image processing based measurement of premixed CH₄+air and C₂H₄+air flame chemiluminescence, Fuel, 2010
- [11] Huang H.W., Zhang Y.,Dynamic application of digital image and colour processing in characterizing flame radiation features, measurement science and technology, 2010
- [12] Zhao H, et all, Research of temperature distributin of combustion flames based on high dynamic range imaging, Optic & laser technology, 2007
- [13] Kurdyumov V. et all, Experimental and numerical study of premixed flame flashback, proceeding of the combustion institute, 2006
- [14] Kim K.N, Won S.H, Chung S.H., Characteristics of laminar lifted flame in coflow jets with initial temperature variation, proceeding of the combustion institute, 2006
- [15] Su L.K., Sun O.S., Mungal M.G., Experimental investigation of stabilization mechanisms ini turbulent, lifted jet diffusion flames, combustion and flame, 2005
- [16] Lawn C.J., Lifted flames on fuel jets in co-flowing air,progress in energy and combustion science,2009
- [17] Caturwati N. K., Lifted flame phenomenon on propane diffusion combustion, desertasi, 2010
- [18] Chen R.H, Li Z. Phuoc T.X., Propagation and stability characteristics of laminar lifted diffusion flame base, combustion and flame, 2012
- [19] Shanbhogue S.J., Husain S., Lieuwen T. Lean blow off of bluff body stabilized flames: scaling and dynamics, progress in energy and combustion science, 2008
- [20] Chaudhuri S. et all, Blowoff dynamics of bluff body stabilized turbulent premixed flames, combustion and flame, 2009

- [21] Dhiputra et all, Ring temperature effect on propane flame lift-up, quality in research UI, 2007
- [22] Mahandari, C.P., Flame lift-up phenomenon on premixed combustion of propane, desertasi, 2010
- [23] Lee J., Chung S.H., Characteristics of reattachment and blowout of laminar lifted flames ini partially premixed propane jets, The combustion institute, 2001
- [24] R.B.Bird, E.N.Lightfoot, W.E.Stewart, '*Transport Phenomena*', Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. New York, 2002.
- [25] Martin Haryanto, Karakteristik stabilitas dan tinggi nyala antara propana (petrozon) dan LPG pada bunsen burner ϕ 8, 10, dan 14 mm, Skripsi Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2002.



Data Blow off

Fuel Ratio skala	Fuel Flow Rate Qf	Burning Load BL	Air Flow Ratio lift up skala	Air Flow Rate Qaliftup	AFR Blow off
rotameter	l/s	MJ/m2s	rotameter	l/s	
0.5	0.011	5.733	20.5	0.484	45.84
1.0	0.012	6.738	22.0	0.516	41.59
1.5	0.014	7.743	23.5	0.548	38.44
2.0	0.016	8.749	24.5	0.569	35.35
2.5	0.018	9.754	25.5	0.591	32.90
3.0	0.020	10.759	27.5	0.633	31.99
3.5	0.022	11.764	29.0	0.666	30.74
4.0	0.024	12.770	30.0	0.687	29.23

Liftup dan Reattachment pada batang

Batang ϕ (mm)	Burning Load BL MJ/m ² s	AFR lift up pada jarak batang X (mm)				AFR Reattachment pada jarak batang X (mm)			
		10	20	30	40	10	20	30	40
1.5	5.73	41.03	42.05	43.06	42.05	38.74	35.70	34.68	34.68
	6.74	39.23	39.23	39.23	38.36	34.69	32.96	31.23	30.37
	7.74	35.64	35.64	34.88	35.64	31.68	30.93	29.43	27.93
	8.75	33.53	33.53	32.87	33.53	30.70	28.04	27.38	26.05
	9.75	32.46	31.27	31.87	31.27	28.13	25.75	25.75	24.56
	10.76	30.51	31.05	29.97	29.43	26.59	24.96	24.96	22.80
2.0	5.73	42.05	42.05	41.03	41.03	37.73	36.71	34.68	34.68
	6.74	38.36	38.36	38.36	37.50	33.82	32.96	32.10	31.23
	7.74	35.64	34.88	35.64	35.64	30.93	30.18	29.43	28.68
	8.75	33.53	33.53	32.87	32.87	30.04	28.04	27.38	26.05
	9.75	31.27	31.27	31.27	31.27	28.13	25.75	25.15	24.56
	10.76	29.97	29.97	30.51	29.97	26.05	24.96	23.88	22.80
2.4	5.73	42.05	41.03	40.02	41.03	37.73	37.73	34.68	34.68
	6.74	38.36	38.36	37.50	38.36	33.82	32.96	32.10	31.23
	7.74	35.64	36.39	34.88	35.64	31.68	30.18	28.68	28.68
	8.75	33.53	34.20	32.87	33.53	29.37	28.71	26.05	26.71
	9.75	31.87	31.87	31.27	31.27	27.54	26.35	25.15	25.15
	10.76	29.97	29.97	29.43	29.97	25.51	24.42	23.88	23.34
3.1	5.73	42.05	43.06	42.05	41.03	37.73	35.70	34.68	33.67
	6.74	38.36	39.23	38.36	38.36	33.82	32.10	31.23	31.23
	7.74	36.39	37.14	35.64	35.64	30.93	28.68	28.68	28.23
	8.75	33.53	34.20	33.53	33.53	28.71	26.71	26.05	26.05
	9.75	31.87	31.27	31.27	31.87	26.94	25.15	23.96	23.96
	10.76	29.97	29.97	29.97	29.97	25.51	23.88	22.80	22.80

Liftup dan Reattachment, batang $\phi=1.5$ silang

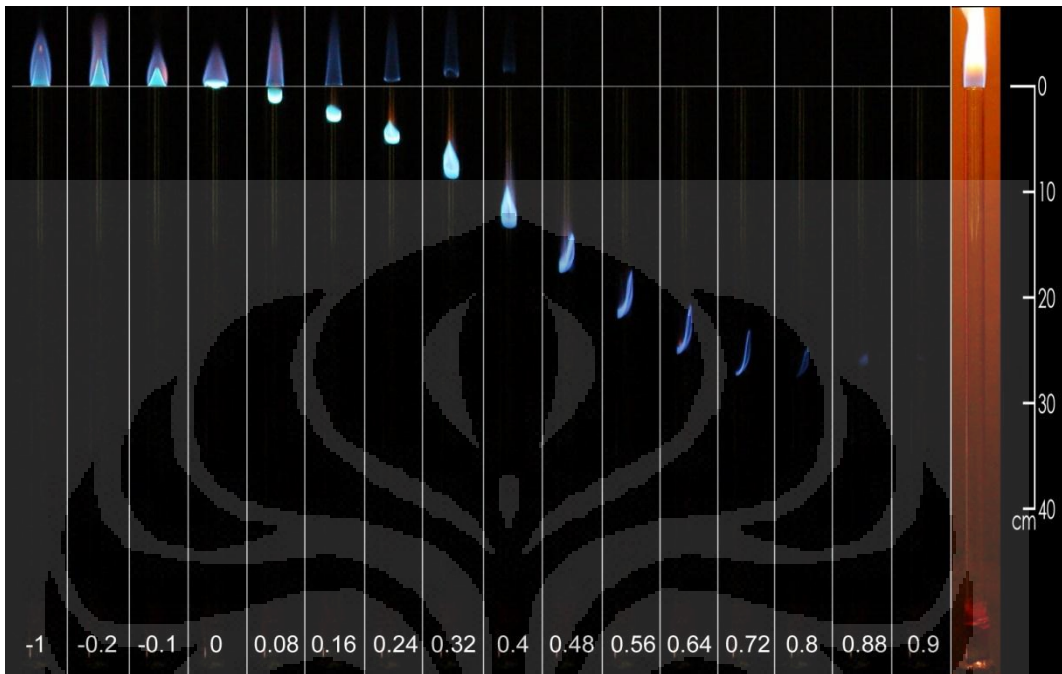
jarak X mm	Fuel Flow Rate Qf l/s	Burning Load BL MJ/m ² s	Air Flow Rate Qaliftup l/s	AFR lift up	Air Flow Rate Qaliftup l/s	AFR reattachment
10	0.011	5.733	0.432	40.99	0.398	37.73
	0.012	6.738	0.465	37.47	0.434	35.03
	0.014	7.743	0.497	34.86	0.452	31.68
	0.016	8.749	0.529	32.84	0.473	29.37
	0.018	9.754	0.561	31.25	0.494	27.54
	0.020	10.759	0.582	29.41	0.505	25.51
20	0.011	5.733	0.432	40.99	0.387	36.71
	0.012	6.738	0.465	37.47	0.398	32.10
	0.014	7.743	0.486	34.10	0.419	29.43
	0.016	8.749	0.518	32.18	0.441	27.38
	0.018	9.754	0.561	31.25	0.462	25.75
	0.020	10.759	0.593	29.95	0.484	24.42
30	0.011	5.733	0.432	40.99	0.366	34.68
	0.012	6.738	0.465	37.47	0.387	31.23
	0.014	7.743	0.497	34.86	0.419	29.43
	0.016	8.749	0.529	32.84	0.441	27.38
	0.018	9.754	0.561	31.25	0.452	25.15
	0.020	10.759	0.582	29.41	0.473	23.88
40	0.011	5.733	0.422	39.98	0.355	33.67
	0.012	6.738	0.454	36.60	0.377	30.37
	0.014	7.743	0.486	34.10	0.398	27.93
	0.016	8.749	0.518	32.18	0.409	25.39
	0.018	9.754	0.539	30.06	0.441	24.56
	0.020	10.759	0.572	28.87	0.452	22.80

Liftup dan Reattachment, kawat jaring mesh#8

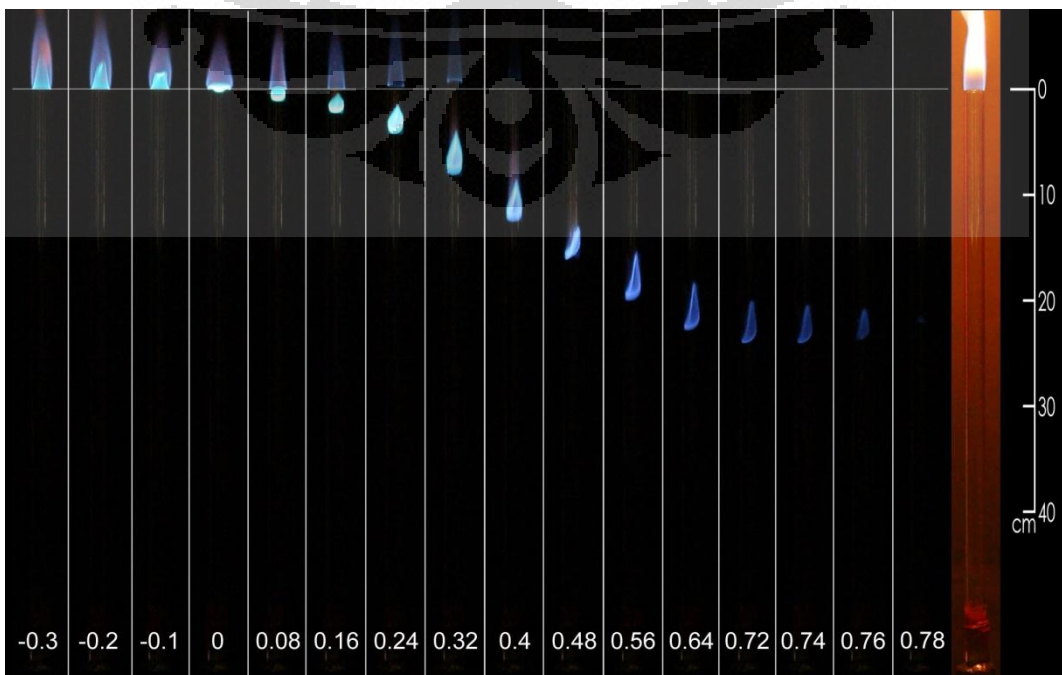
jarak X mm	Fuel Flow Rate Qf l/s	Burning Load BL MJ/m ² s	Air Flow Rate Qaliftup l/s	AFR lift up	Air Flow Rate Qaliftup l/s	AFR reattachment
10	0.011	5.733	0.484	45.8	0.419	39.75
	0.012	6.738	0.516	41.6	0.430	34.69
	0.014	7.743	0.559	39.2	0.473	33.19
	0.016	8.749	0.591	36.7	0.526	32.70
	0.018	9.754	0.616	34.3	0.559	31.11
	0.020	10.759	0.666	33.6	0.601	30.37
20	0.011	5.733	0.484	45.8	0.366	34.68
	0.012	6.738	0.516	41.6	0.419	33.82
	0.014	7.743	0.559	39.2	0.430	30.18
	0.016	8.749	0.580	36.0	0.462	28.71
	0.018	9.754	0.612	34.1	0.484	26.94
	0.020	10.759	0.644	32.5	0.516	26.05
30	0.011	5.733	0.484	45.8	0.345	32.65
	0.012	6.738	0.505	40.7	0.366	29.51
	0.014	7.743	0.548	38.4	0.387	27.18
	0.016	8.749	0.580	36.0	0.419	26.05
	0.018	9.754	0.601	33.5	0.452	25.15
	0.020	10.759	0.644	32.5	0.473	23.88
40	0.011	5.733	0.473	44.8	0.366	34.68
	0.012	6.738	0.494	39.9	0.398	32.10
	0.014	7.743	0.526	36.9	0.409	28.68
	0.016	8.749	0.580	36.0	0.430	26.71
	0.018	9.754	0.601	33.5	0.462	25.75
	0.020	10.759	0.633	32.0	0.484	24.42

Foto Compilasi Flashback

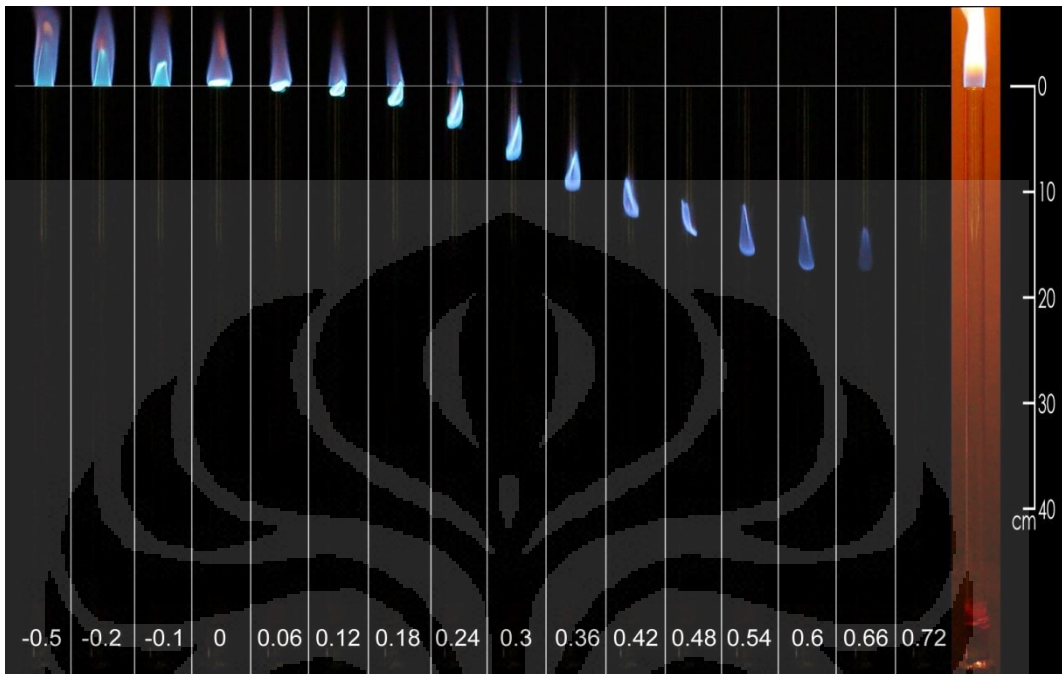
Flashback, $Q_a=0.045$ l/s



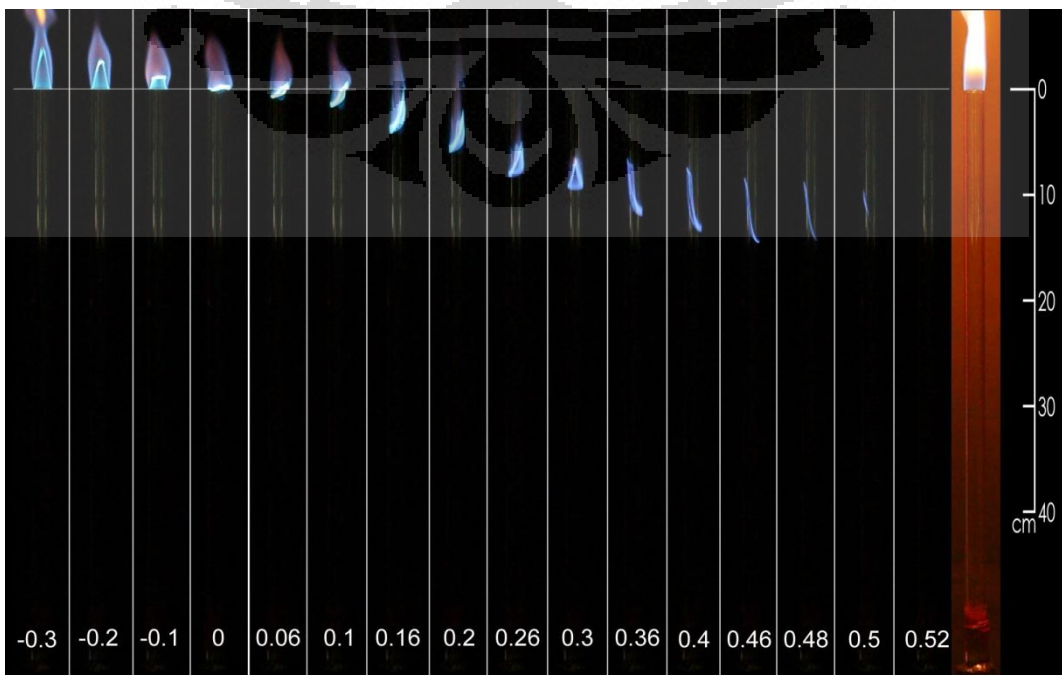
Flashback, $Q_a=0.066$ l/s



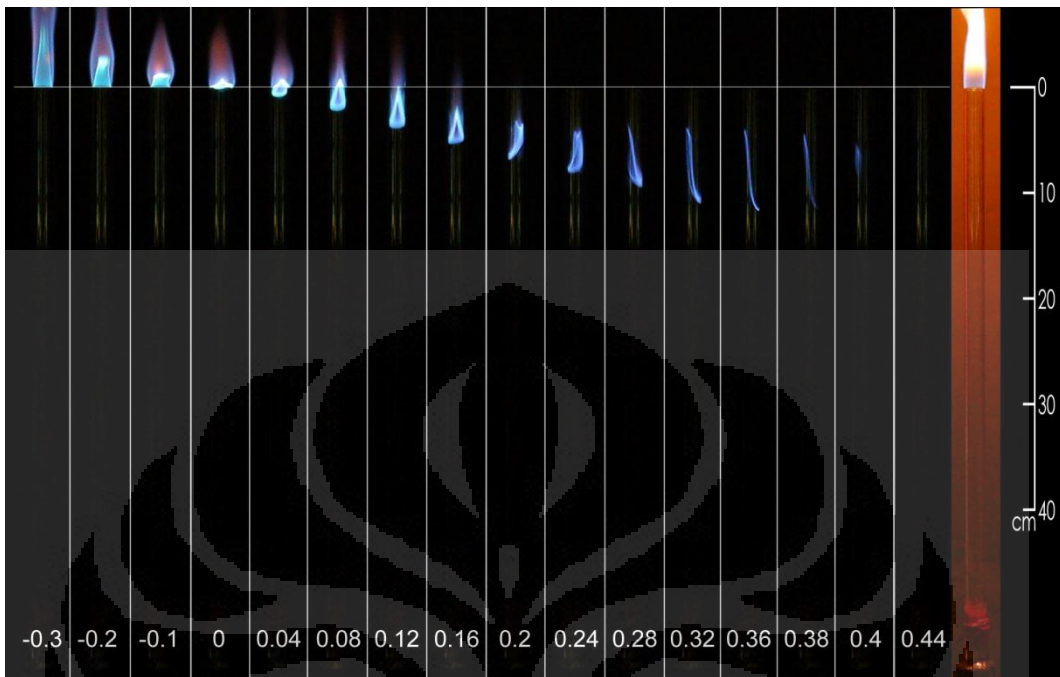
Flashback, $Q_a=0.088$ l/s



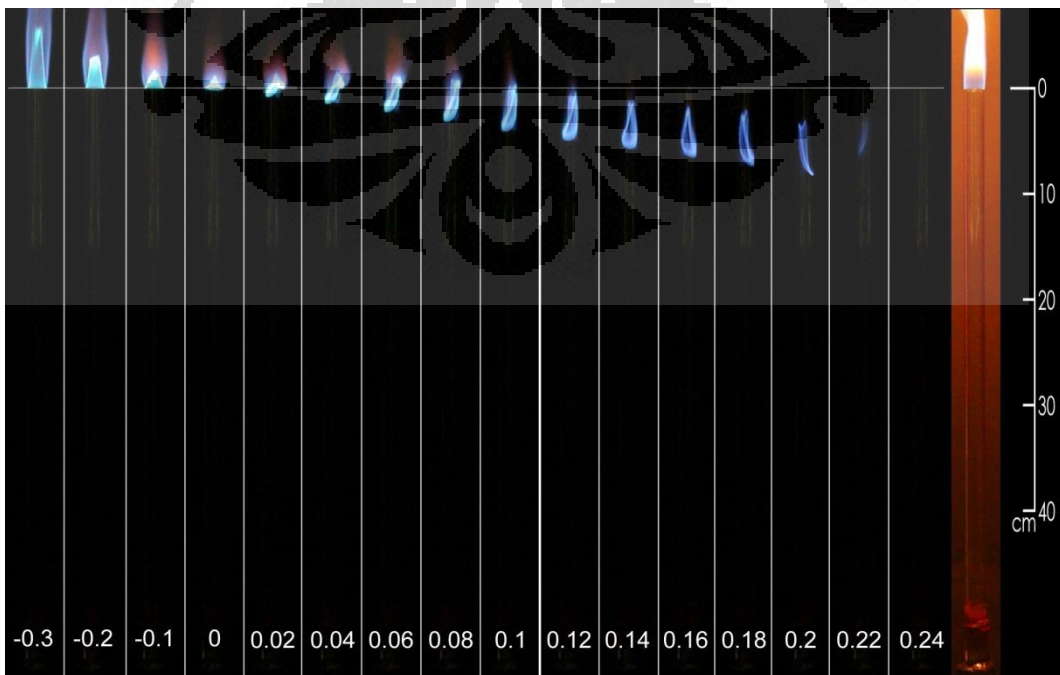
Flashback, $Q_a=0.109$ l/s



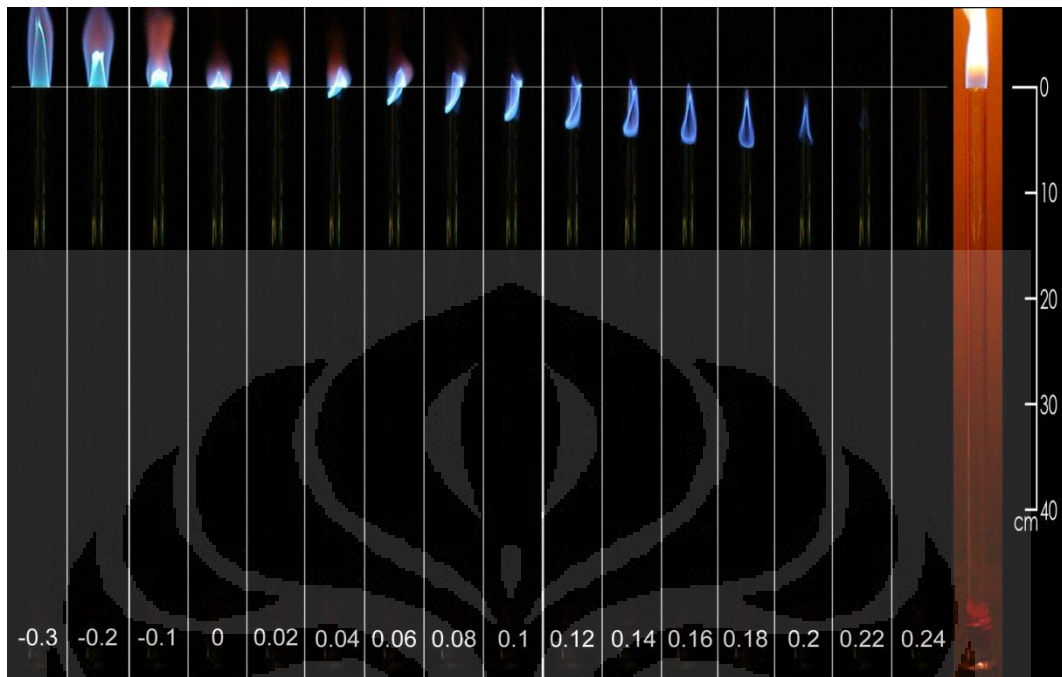
Flashback, $Q_a=0.131$ l/s



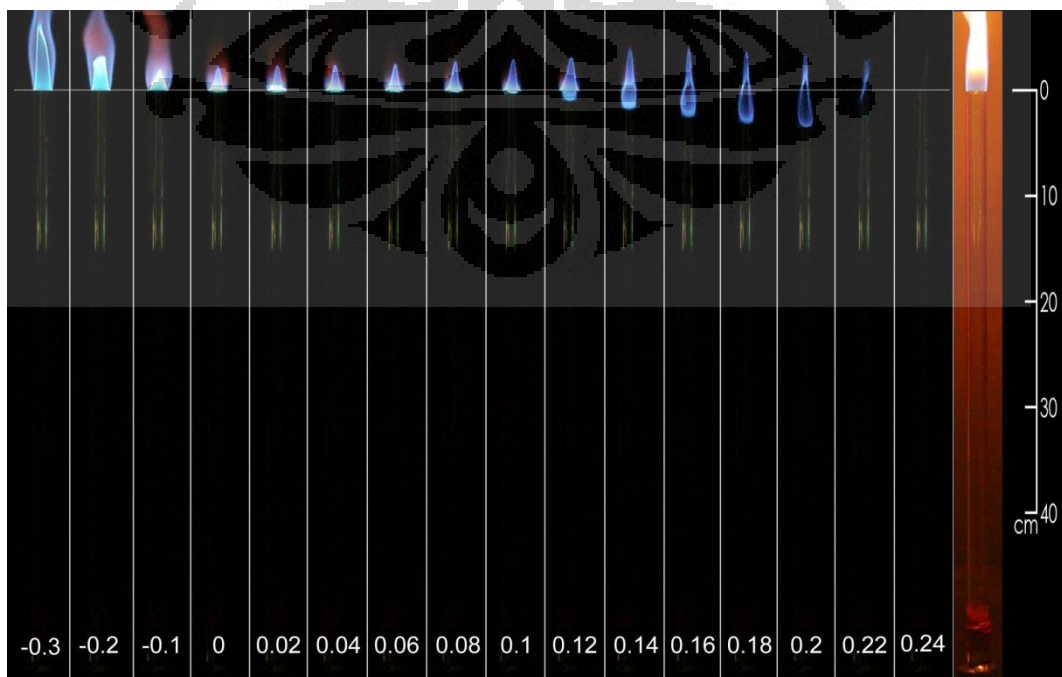
Flashback, $Q_a=0.152$ l/s



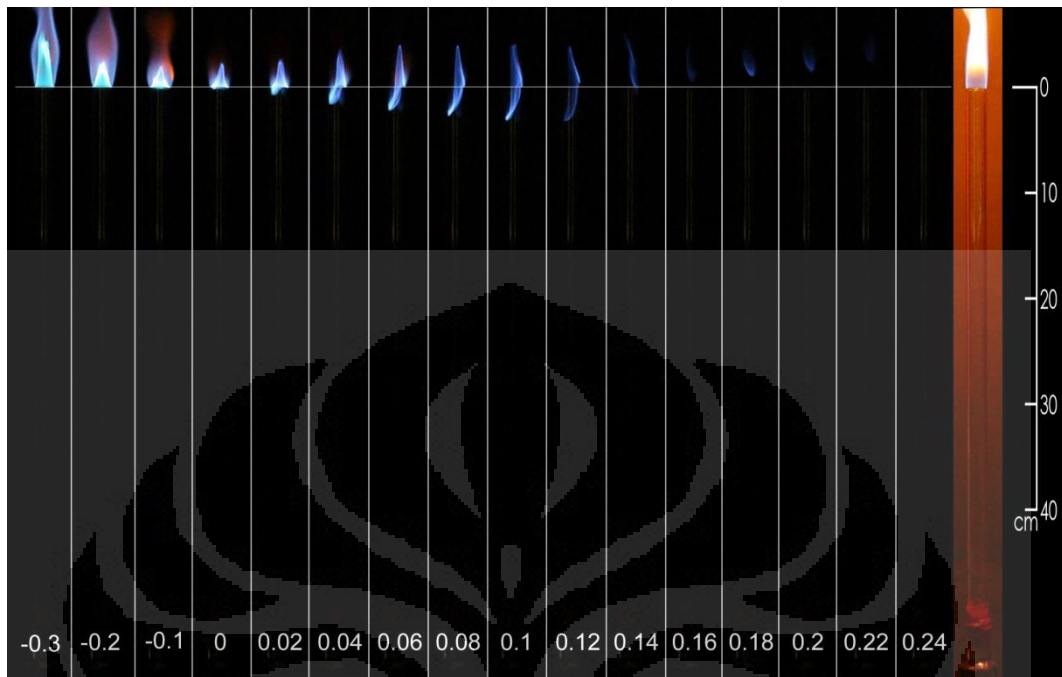
Flashback, $Q_a=0.173$ l/s



Flashback, $Q_a=0.195$ l/s



Flashback, $Q_a=0.216$ l/s



Data Depth Penetration dan Kecepatan Flashback**Qa = 0.045 l/s**

1			2			3		
waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan
t	Lf	Vf	t	Lf	Vf	t	Lf	Vf
s	mm	mm/s	s	mm	mm/s	s	mm	mm/s
0.08	14.20	177.50	0.08	15.65	195.65	0.08	10.87	135.88
0.16	29.86	186.59	0.16	28.70	179.35	0.16	23.91	149.46
0.24	48.12	200.48	0.24	44.78	186.60	0.24	38.70	161.23
0.32	76.81	240.03	0.32	72.17	225.54	0.32	61.30	191.58
0.40	117.39	293.48	0.4	110.87	277.18	0.4	98.70	246.74
0.48	154.78	322.46	0.48	147.83	307.97	0.48	139.57	290.76
0.56	192.61	343.94	0.56	184.35	329.19	0.56	172.17	307.45
0.64	221.74	346.47	0.64	213.91	334.24	0.64	205.65	321.33
0.72	239.57	332.73	0.72	231.88	322.06	0.72	230.00	319.44
0.80	240.87	301.09	0.8	237.68	297.10	0.8	244.35	305.44
0.88	231.74	263.34	0.88	235.94	268.12	0.88	242.61	275.69

Qa = 0.066l/s

1			2			3		
waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan
t	Lf	Vf	t	Lf	Vf	t	Lf	Vf
s	mm	mm/s	s	mm	mm/s	s	mm	mm/s
0.08	10.44	130.44	0.08	11.88	148.55	0.08	10.44	130.44
0.16	20.00	125.00	0.16	21.16	132.24	0.16	20.87	130.44
0.24	37.39	155.80	0.24	34.20	142.52	0.24	35.65	148.55
0.32	71.30	222.83	0.32	62.32	194.75	0.32	66.52	207.88
0.4	110.15	275.36	0.4	101.74	254.35	0.4	106.09	265.22
0.48	141.16	294.08	0.48	134.20	279.59	0.48	143.04	298.01
0.56	175.36	313.15	0.56	170.73	304.87	0.56	179.13	319.88
0.64	199.57	311.82	0.64	199.13	311.14	0.64	207.39	324.05
0.72	210.44	292.27	0.72	215.65	299.52	0.68	222.17	326.73
0.74	209.13	282.61	0.76	218.70	287.76	0.72	223.91	310.99
0.76	206.52	271.74	0.8	216.96	271.20	0.76	213.91	281.46

. Qa = 0.088 l/s

1			2			3		
waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan
t	Lf	Vf	t	Lf	Vf	t	Lf	Vf
s	mm	mm/s	s	mm	mm/s	s	mm	mm/s
0.06	4.49	74.88	0.06	6.52	108.70	0.06	6.96	115.95
0.12	8.41	70.05	0.12	10.87	90.58	0.12	12.75	106.28
0.18	17.10	95.01	0.18	22.17	123.19	0.18	27.25	151.37
0.24	35.65	148.55	0.24	43.48	181.16	0.24	52.75	219.81
0.3	62.03	206.76	0.3	70.44	234.78	0.3	80.58	268.60
0.36	86.96	241.55	0.36	96.52	268.12	0.36	102.61	285.03
0.42	109.28	260.18	0.42	117.68	280.19	0.42	122.90	292.62
0.48	124.35	259.06	0.48	135.94	283.21	0.48	144.93	301.93
0.54	141.16	261.41	0.54	153.04	283.41	0.54	158.84	294.15
0.6	152.75	254.59	0.6	161.74	269.57	0.6	165.80	276.33
0.66	152.17	230.57	0.66	149.57	226.61	0.64	152.46	238.23

Qa = 0.109l/s

1			2			3		
waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan
t	Lf	Vf	t	Lf	Vf	t	Lf	Vf
s	mm	mm/s	s	mm	mm/s	s	mm	mm/s
0.06	8.26	137.68	0.06	8.26	137.68	0.06	8.26	137.68
0.1	15.22	152.17	0.1	15.22	152.17	0.1	15.22	152.17
0.16	36.52	228.26	0.16	36.52	228.26	0.16	36.52	228.26
0.2	52.61	263.05	0.2	52.61	263.05	0.2	52.61	263.05
0.26	73.04	280.93	0.26	73.04	280.93	0.26	73.04	280.93
0.3	83.48	278.26	0.3	83.48	278.26	0.3	83.48	278.26
0.36	105.22	292.27	0.36	105.22	292.27	0.36	105.22	292.27
0.4	118.26	295.65	0.4	118.26	295.65	0.4	118.26	295.65
0.46	126.96	275.99	0.46	126.96	275.99	0.46	126.96	275.99
0.48	125.65	261.78	0.48	125.65	261.78	0.48	125.65	261.78
0.5	105.22	210.43	0.5	105.22	210.43	0.5	105.22	210.43

Qa = 0.131 l/s

1			2			3		
waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan
t	Lf	Vf	t	Lf	Vf	t	Lf	Vf
s	mm	mm/s	s	mm	mm/s	s	mm	mm/s
0.04	8.26	206.53	0.04	9.28	231.88	0.04	7.246	181.15
0.08	19.57	244.56	0.08	20.87	260.88	0.08	17.681	221.01
0.12	33.91	282.61	0.12	36.23	301.93	0.12	31.594	263.28
0.16	47.39	296.19	0.16	51.59	322.46	0.16	46.087	288.04
0.2	60.44	302.18	0.2	68.41	342.03	0.2	61.449	307.25
0.24	71.30	297.10	0.24	84.06	350.24	0.24	78.261	326.09
0.28	83.04	296.58	0.28	95.07	339.54	0.28	94.203	336.44
0.32	96.52	301.63	0.3	99.57	331.90	0.3	97.83	326.10
0.36	102.17	283.82	0.32	97.68	305.25	0.32	101.74	317.94
0.38	99.56	262.00	0.34	92.17	271.09	0.34	100.43	295.38
0.4	73.48	183.70	0.36	76.81	213.36	0.36	76.09	211.36

Qa = 0.152 l/s

1			2			3		
waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan
t	Lf	Vf	t	Lf	Vf	t	Lf	Vf
s	mm	mm/s	s	mm	mm/s	s	mm	mm/s
0.02	7.83	391.30	0.04	7.54	188.40	0.04	8.12	202.90
0.04	13.62	340.58	0.06	12.75	212.57	0.06	13.33	222.22
0.06	20.58	343.00	0.1	26.67	266.67	0.1	26.09	260.87
0.08	28.41	355.08	0.14	40.58	289.86	0.14	41.16	293.99
0.1	36.23	362.32	0.16	46.96	293.48	0.16	49.28	307.97
0.12	43.77	364.73	0.2	62.61	313.05	0.2	62.61	313.05
0.14	50.73	362.32	0.24	79.42	330.92	0.24	75.94	316.43
0.16	57.68	360.51	0.26	85.80	329.99	0.26	81.74	314.38
0.18	64.64	359.10	0.28	89.86	320.91	0.28	85.80	306.42
0.2	72.46	362.32	0.3	91.59	305.31	0.3	86.96	289.86
0.22	57.39	260.87	0.32	82.90	259.06	0.32	75.36	235.51

Qa = 0.173 l/s

1			2			3		
waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan	waktu	depth penetration flashback	Kecepatan
t	Lf	Vf	t	Lf	Vf	t	Lf	Vf
s	mm	mm/s	s	mm	mm/s	s	mm	mm/s
0.02	3.48	173.90	0.02	8.70	434.80	0.02	6.09	304.35
0.04	9.35	233.75	0.04	14.49	362.33	0.04	11.30	282.60
0.06	15.22	253.65	0.06	20.29	338.17	0.06	19.57	326.08
0.08	21.96	274.46	0.08	26.09	326.09	0.08	27.39	342.39
0.1	28.26	282.61	0.1	33.04	330.43	0.1	36.09	360.87
0.12	35.22	293.48	0.12	39.42	328.50	0.12	44.78	373.19
0.14	41.96	299.69	0.14	45.80	327.12	0.14	52.61	375.78
0.16	47.61	297.56	0.16	49.28	307.97	0.16	58.70	366.85
0.18	50.22	278.98	0.18	53.33	296.29	0.18	64.35	357.49
0.2	48.26	241.31	0.2	55.65	278.26	0.2	69.13	345.65
0.22	35.65	162.05	0.22	56.81	258.24	0.22	70.87	322.14

Foto Flame

Lift Up pada batang silang



Canon 500D
WB 5500K, ISO 800
F5.6, 1/50s

Lift up pada kawat jaring



Canon 1D mark IV
WB 550 K, ISO 800
F5.6, 1/250s