

UNIVERSITAS INDONESIA

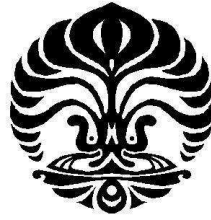
**KAJIAN EKSPERIMENTAL *FLASHBACK FLAME* PADA
BUNSEN BURNER DENGAN BAHAN BAKAR LPG**

SKRIPSI

Immanuel

0806330200

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**KAJIAN EKSPERIMENTAL *FLASHBACK FLAME* PADA
BUNSEN BURNER DENGAN BAHAN BAKAR LPG**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

IMANUEL

0806330200

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JULI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul

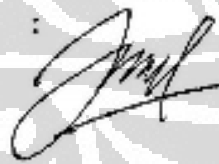
KAJIAN EKSPERIMENTAL *FLASHBACK FLAME* PADA BUNSEN BURNER DENGAN BAHAN BAKAR LPG

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

Nama : Imanuel

NPM : 0806330200

Tanda Tangan :



Tanggal : 16 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Imanuel
NPM : 0806330200
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : **Kajian Eksperimental *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 Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

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

Penguji : Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho, M.Sc, PhD

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

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

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 16 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan yang Maha Esa, karena dari berkat dan kehendak-Nyalah saya bisa menyelesaikan penulisan skripsi ini. Penulisan skripsi yang berjudul “Kajian Eksperimental *Flashback Flame* pada Bunsen Burner dengan Bahan Bakar LPG” ini bertujuan untuk memenuhi persyaratan guna mencapai gelar Sarjana Teknik dari Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Saya menyadari bahwa proses penyelesaian skripsi ini tentunya tidak bisa terlepas dari bimbingan, saran-saran, serta dukungan, baik dukungan ilmu maupun moral, dari berbagai pihak. Oleh karena itu saya ingin mengucapkan ucapan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr. Ir. I Made Kartika D., Dipl.-Ing. , selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikirannya untuk membantu saya dalam penyelesaian skripsi ini.
2. Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho, MSc, PhD, dan Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng selaku dosen penguji skripsi ini atas masukan dan saran yang telah diberikan untuk melengkapi skripsi ini.
3. Rekan-rekan seperjuangan di laboratorium *Flame and Combustion Research Group* yang sudah mengajar dan menolong saya dari proses persiapan penelitian hingga skripsi ini selesai : Irvan R. Rondonuwu, Setya Wijayanta, Karyadi Gunawan, dan Dea Adreanni.
4. Bpk. Yasin, selaku teknisi di laboratorium Teknologi Manufaktur yang sudah membantu membuat peralatan serta meminjamkan alat-alat ukurnya.
5. Kedua orangtua saya, Rachmat Halim dan Ratna Kumala, yang telah membesarkan saya dan juga selalu memberi dukungan moral dan semangat setiap saat.
6. Kakak saya, Eylin, yang juga selalu memberikan saya kata-kata penyemangat dan mengingatkan saya untuk selalu berserah kepada Tuhan.
7. Teman-teman dari laboratorium Manufaktur lantai 2, tempat dimana saya sering menumpang untuk menyusun ketikan skripsi ini, juga atas saran-saran serta penghiburannya.

8. Teman-teman satu angkatan 2008 lainnya yang tidak bisa disebutkan satu-per-satu, atas dukungannya, baik secara langsung maupun tidak langsung.

Akhir kata, saya berharap agar skripsi ini dapat menjadi penambah wawasan bagi semua pihak yang membacanya, serta membantu menjelaskan secara ilmiah mengenai isu-isu terkait, terutama kepada pihak-pihak yang akan melanjutkan penelitian serupa. Saya menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna dengan segala macam kelemahan-kelemahannya. Oleh karena itu, saya sangat mengharapkan kritik dan saran yang dapat membangun dan memperbaiki skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 16 Juli 2012

Immanuel

HALAMAN PERNYATAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Imanuel
NPM : 0806330200
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**“KAJIAN EKSPERIMENTAL *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, mengalih media/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 : 16 Juli 2012

Yang menyatakan,



Immanuel

ABSTRAK

Nama : Imanuel
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Kajian Eksperimental *Flashback Flame* pada Bunsen Burner dengan Bahan Bakar LPG

Pengertian *Flashback* yakni adalah fenomena api yang terjadi ketika nyala api merambat masuk ke dalam *burner* atau saluran pencampur bahan bakar. Dalam aplikasinya, fenomena ini sering terjadi pada saat aliran bahan bakar dari kompor gas ditutup. Hal itu dapat diketahui dari adanya suara letupan yang terdengar. Suara letupan tersebut berasal dari api yang menyambar balik setelah turun masuk ke dalam *burner*-nya. Titik permasalahannya yakni resiko bahaya ledakan yang dapat terjadi bila api yang mengalir masuk ini menyambar sumber penyimpanan bahan bakar sehingga fenomena ini perlu diketahui lebih rinci

Dalam penelitian ini, akan dilihat bagaimana perbedaan besar kecepatan api turun ke bawah pada saat fenomena *Flashback* terjadi yang diakibatkan dari perubahan variasi dari rasio aliran udara pembakarannya. Parameter yang dicari dalam kajian eksperimen ini adalah kecepatan api masuk ke dalam tabung pencampur (*barrel*) sedangkan variabel yang diubah yakni aliran debit (*flowrate*) udara sebagai indikator pengamatan bilamana terjadi perubahan fenomena nyala api *Flashback* tersebut. Variasi udara yang diambil yakni sebanyak 9 variasi pembacaan skala rotameter. Mulai dari 0 cm, 1 cm, 2 cm, dan seterusnya hingga 8 cm. Pengamatan juga dilakukan pada fenomena api yang terjadi pada kondisi aliran tertutup total / kondisi tanpa udara pembakaran. Semua pengamatan fenomena ini juga direkam di dalam kamera digital untuk mendapatkan foto nyala api jelasnya.

Hasil yang didapat berupa rekaman gambar-gambar nyala api akan diolah dengan bantuan program pengolahan gambar *AdobePhotoshop CS3* dan untuk pengukuran gambar yaitu dengan *ImageJ*. Jarak maksimal *Flashback* yang terjadi berbeda-beda pada setiap variasi udara tertentu, juga dengan kecepatan yang juga berubah-ubah setiap waktunya.

Kata kunci : Nyala api *Flashback*, Debit Aliran Udara, LPG

ABSTRACT

Name : Imanuel
Major : Mechanical Engineering
Title : Experimental Study of *Flashback Flame* in Bunsen Burner using LPG as fuel

Flashback is one of the fire phenomena which occur when the flame flows back into the burner tube or fuel mixing channel. Often, fire *Flashback* occurs when the flow of fuel from the gas stove is closed. The sign can be heard from the popping voice come from inside of the fuel line. This 'pop' sound is the sound occurs when fire from the inside is trying to blow back again into the outside after falling into the burner tube. Pointing the risk of explosion hazard problem that can occur when the fire was continuously flowing into the fuel source, for example, onto the gas tank, we need to investigate the flame characteristics of this phenomenon in more detail

In this study, we will see how big the difference in the flame speed traveling down into the tube at the time when a *Flashback* phenomenon occurs as a result of changes in the variation of the combustion air flow rate. The parameter which is looked for in this experimental study is the flame speed traveling into the mixing tube (barrel) while the changed variable is the air flow rate as an indicator for the observation of flame *Flashback*. This observation uses nine variations of airflow in the flow meter scale reading. Starting from the 0 cm 1 cm, 2 cm, and so on up to 8 cm scale. In addition, the flame phenomenon when the air flow is totally shut-off or in condition without combustion air is also observed. All of these observations are recorded with the aid of digital high-resolution camera to gain better result of flame images.

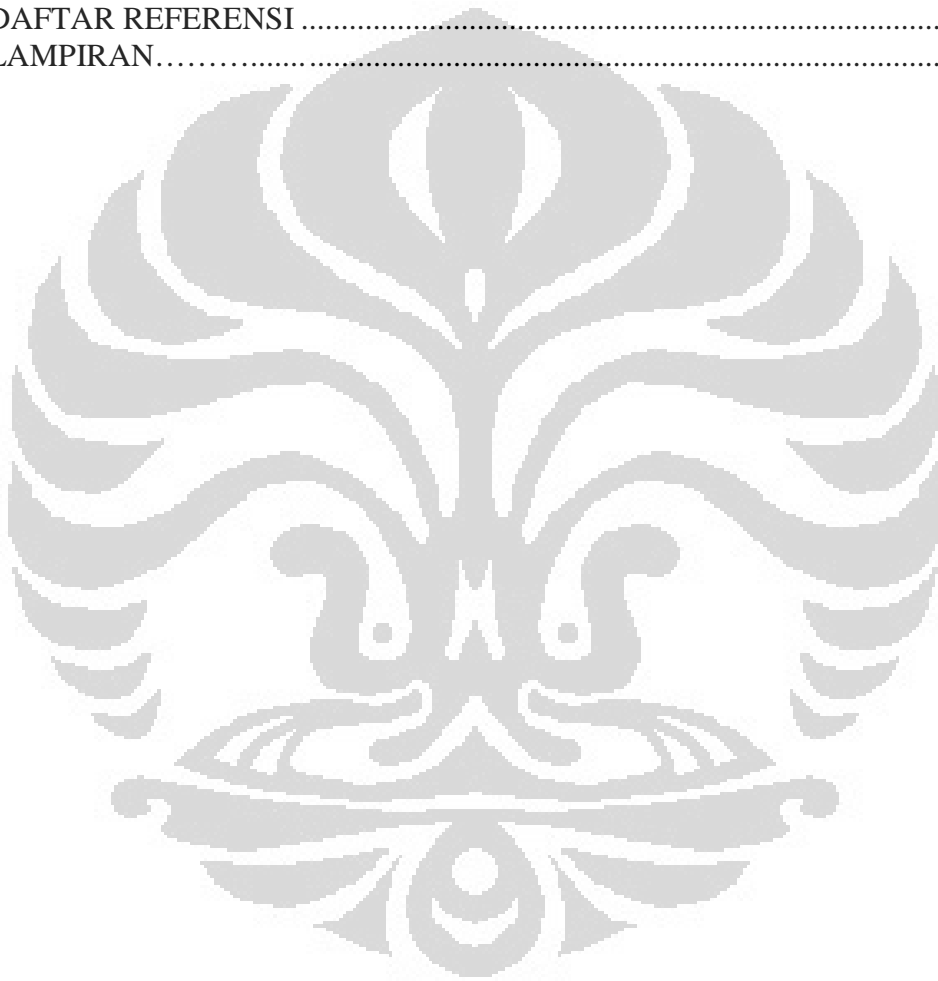
The flame images recorded from the camera will be processed with the aid of an image processing program *Adobe Photoshop CS3* and for the measurement of the image by using *ImageJ* software. Maximum *Flashback* distance occurs differently in each particular variation of the air, also at a pace that is also changing all the time.

Keywords : *Flashback Flame*, Air Flow-rate, LPG

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG	2
1.2 PERUMUSAN MASALAH	2
1.3 TUJUAN PENELITIAN.....	2
1.4 BATASAN MASALAH.....	3
1.5 METODOLOGI PENELITIAN.....	3
1.6 SISTEMATIKA PENELITIAN.....	4
2. DASAR TEORI	5
2.1 BAHAN BAKAR GAS	5
2.2 TEORI NYALA API	7
2.2.1 Api Premix laminar	9
2.2.3 Kecepatan Nyala Api Laminar	10
2.3 PEMBAKAR BUNSEN (<i>BUNSEN BURNER</i>)	11
2.4 STOIKIOMETRI PEMBAKARAN	13
2.3.1 Fraksi Volumetrik dan Fraksi Gravimetrik	13
2.3.2 Campuran Stoikiometrik	15
2.3.3 Campuran Non-stoikiometrik.....	16
2.3.4 Beban Pembakaran (<i>Burning Load</i>)	17
2.3.5 Batas Mampu Nyala (<i>Flammability Limit</i>).....	17
2.5 FENOMENA <i>FLASHBACK</i>	19
3. METODE PENELITIAN	21
3.1 PERANGKAT PENELITIAN	21
3.1.1 Tabung Gas LPG	21
3.1.2 Pembakar Bunsen	22
3.1.3 Flowmeter Aliran Gas dan Udara.....	23
3.1.4 Kamera Perekam Digital	24
3.1.5 Peralatan Pendukung Lainnya	25
3.2 PROSES KALIBRASI <i>SOFTWARE</i> PENGUKUR.....	25
3.3 METODE PENGAMBILAN DATA.....	27
3.3.1 Skema Peralatan Penelitian	28
3.3.2 Langkah-langkah Persiapan.....	28
3.3.3 Prosedur Pengambilan Data	28
3.3.4 Prosedur Pengolahan Gambar	29
4. PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS	30
4.1 HASIL DAN ANALISIS PENGAMATAN NYALA API	30
4.2 HASIL DATA PENGARUH DEBIT UDARA TERHADAP PERUBAHAN JARAK DAN KECEPATAN <i>FLASHBACK</i>	33

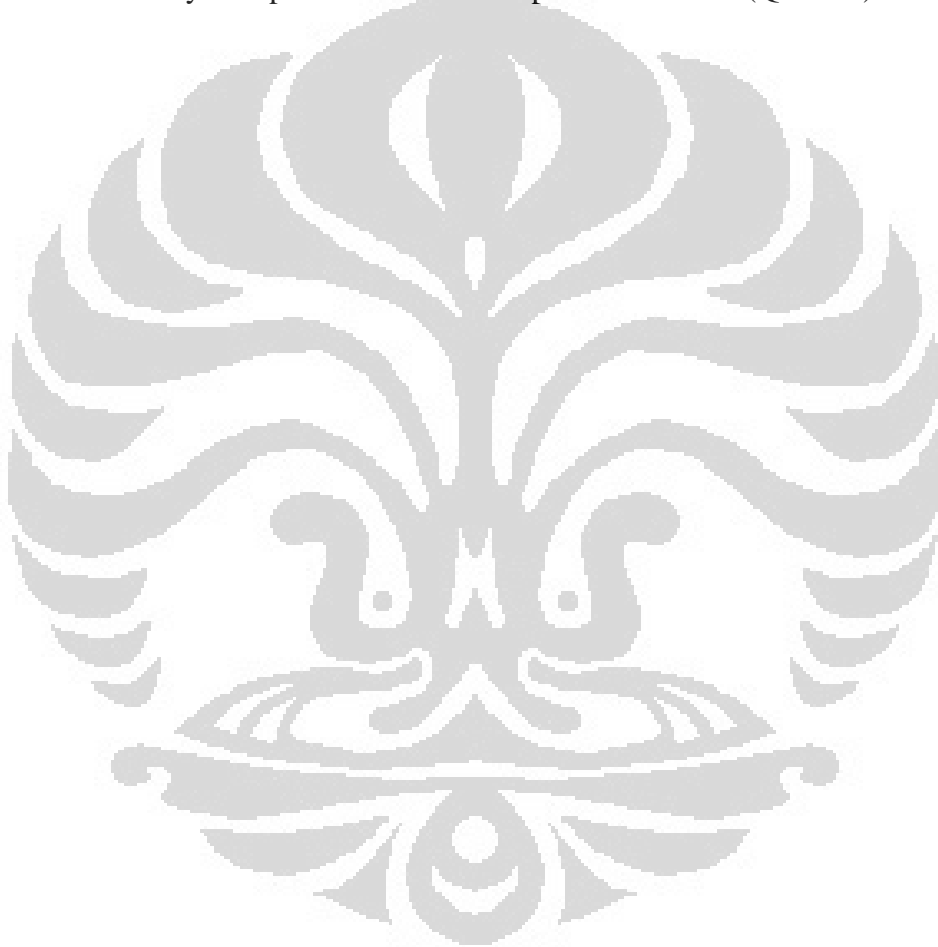
4.2.1 Grafik dan Analisis Perubahan Jarak terhadap Waktu.....	35
4.2.2 Grafik dan Analisis Perubahan Kecepatan Terhadap terhadap Jarak Tempuh.....	39
4.3 DATA DAN ANALISIS HUBUNGAN ANTARA ALIRAN UDARA DAN <i>BURNING LOAD</i> TERHADAP <i>DEPTH OF PENETRATION</i> DAN KECEPATAN <i>FLASHBACK</i> MAKSIMUM.....	43
4.3.1 Grafik-Grafik Perbandingan Jarak Penetrasi Maksimal.....	45
4.3.2 Grafik-Grafik Perbandingan Perubahan Kecepatan_	46
5. KESIMPULAN DAN SARAN	50
5.1 KESIMPULAN.....	50
5.2 SARAN.....	50
DAFTAR REFERENSI	51
LAMPIRAN.....	52



DAFTAR GAMBAR

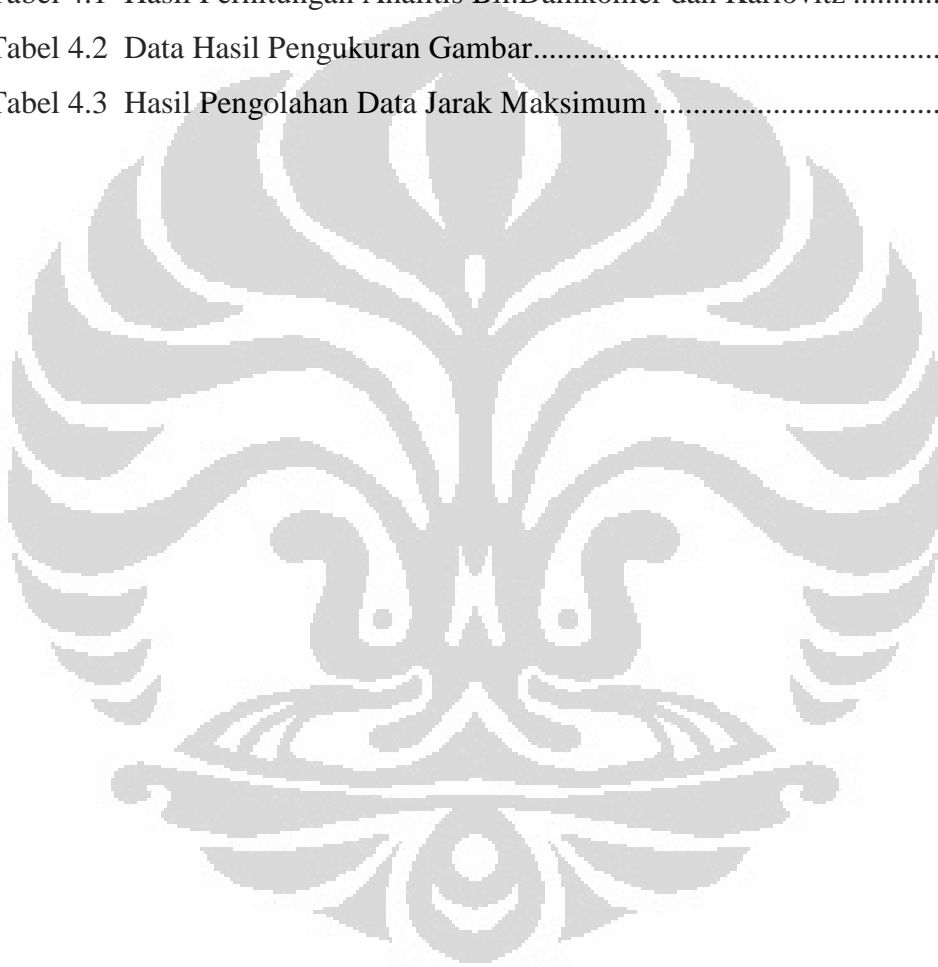
Gambar 2.1 Perbedaan Tampilan Warna Nyala Api Difusi dengan Api Premixed	8
Gambar 2.2 Zona-zona Dalam Pembakaran	9
Gambar 2.3 Struktur Lapisan Nyala Api Premixed	10
Gambar 2.4 Vektor Kecepatan Nyala Api	11
Gambar 2.5 Contoh Struktur Bunsen Burner	12
Gambar 2.6 Diagram Fuidge untuk Bahan Bakar Hidrogen.....	19
Gambar 3.1 Tabung gas LPG 3 kg Pertamina.....	21
Gambar 3.2 Mixer Bahan Bakar-Udara Pembakar Bunsen	22
Gambar 3.3 Tabung Burner Kaca Pyrex dan Dimensinya	22
Gambar 3.4 Flowmeter <i>Flame Propagation and Stability Unit</i> <i>P.A.Hilton C551</i>	23
Gambar 3.5 Cara Penetapan Skala Pengukuran Gambar	26
Gambar 3.6 Susunan Skema Peralatan untuk Pengambilan Data	28
Gambar 4.1a Perbandingan Gambar Hasil Pengurutan Foto Api $Q_{air} = 0.04\text{L/s}$..	30
Gambar 4.1b Perbandingan Gambar Hasil Pengurutan Foto Api $Q_{air} = 0.22\text{L/s}$..	31
Gambar 4.2 Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu	35
Gambar 4.2a Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada $Q_{air} = 0.04\text{ L/s}$	36
Gambar 4.2b Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada $Q_{air} = 0.06\text{ L/s}$	36
Gambar 4.2c Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada $Q_{air} = 0.08\text{ L/s}$	36
Gambar 4.2d Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada $Q_{air} = 0.11\text{ L/s}$	37
Gambar 4.2e Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada $Q_{air} = 0.13\text{ L/s}$	37
Gambar 4.2f Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada $Q_{air} = 0.15\text{ L/s}$	37
Gambar 4.2g Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada $Q_{air} = 0.17\text{ L/s}$	38
Gambar 4.2h Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada $Q_{air} = 0.19\text{ L/s}$	38
Gambar 4.2i Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada $Q_{air} = 0.22\text{ L/s}$	38
Gambar 4.3 Grafik Perubahan Kecepatan <i>Flashback</i> terhadap Jarak Gabungan .	39
Gambar 4.3a Grafik Perubahan Kecepatan <i>Flashback</i> terhadap Jarak Tempuh Pada $Q_{air} = 0.04\text{ L/s}$	40
Gambar 4.3b Grafik Perubahan Kecepatan <i>Flashback</i> terhadap Jarak Tempuh Pada $Q_{air} = 0.06\text{ L/s}$	40
Gambar 4.3c Grafik Perubahan Kecepatan <i>Flashback</i> terhadap Jarak Tempuh Pada $Q_{air} = 0.08\text{ L/s}$	40
Gambar 4.3d Grafik Perubahan Kecepatan <i>Flashback</i> terhadap Jarak Tempuh Pada $Q_{air} = 0.11\text{ L/s}$	41
Gambar 4.3e Grafik Perubahan Kecepatan <i>Flashback</i> terhadap Jarak Tempuh Pada $Q_{air} = 0.13\text{ L/s}$	41
Gambar 4.3f Grafik Perubahan Kecepatan <i>Flashback</i> terhadap Jarak Tempuh Pada $Q_{air} = 0.15\text{ L/s}$	41
Gambar 4.3g Grafik Perubahan Kecepatan <i>Flashback</i> terhadap Jarak Tempuh Pada $Q_{air} = 0.17\text{ L/s}$	42
Gambar 4.3h Grafik Perubahan Kecepatan <i>Flashback</i> terhadap Jarak Tempuh Pada $Q_{air} = 0.19\text{ L/s}$	42
Gambar 4.3i Grafik Perubahan Kecepatan <i>Flashback</i> terhadap Jarak Tempuh Pada $Q_{air} = 0.22\text{ L/s}$	42

Gambar 4.4 Foto Urutan Jarak Maksimum <i>Flashback</i> Berdasarkan Skala Aliran Udara pada Rotameter	44
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Perubahan Jarak Maksimal terhadap Flowrate Udara dengan.....	45
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Jarak Maksimal Terhadap Burning Load.....	45
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Perubahan Kecepatan Maksimal terhadap Debit Udara	46
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Kecepatan Sambaran terhadap Perubahan Debit Udara	47
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Kecepatan Sambaran terhadap Jarak Maksimal.....	47
Gambar 4.10 Nyala Api Pada Kondisi Tanpa Aliran Udara ($Q_{air} = 0$).....	49



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Properti Bahan Bakar Gas.....	5
Tabel 2.2	Contoh Spesifikasi LPG Komersial.....	7
Tabel 2.3	Batas Mampu Nyala dari Beberapa Macam Gas	18
Tabel 3.1	Hasil Kalibrasi Skala Rotameter Aliran Udara.....	24
Tabel 3.2	Spesifikasi Instrumentasi Perekam	24
Tabel 4.1	Hasil Perhitungan Analitis Bil.Damkohler dan Karlovitz	32
Tabel 4.2	Data Hasil Pengukuran Gambar.....	33
Tabel 4.3	Hasil Pengolahan Data Jarak Maksimum	43



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Penggunaan gas LPG sebagai bahan bakar untuk kebutuhan rumah tangga semakin umum di kalangan masyarakat. Namun, penggunaan LPG ini malahan juga menyebabkan semakin banyak pula terjadinya kecelakaan kebakaran yang beberapa diantaranya berakibat fatal. Penyebab umum yakni biasanya karena ada kebocoran gas baik dari regulator tabung ataupun selang. Tetapi keberadaan sumber energi pemicu-lah yang dapat menyebabkan terjadinya ledakan atau kebakaran. Seperti umum diketahui bahwa api hanya dapat terbentuk bila seluruh kriteria dari ‘segitiga api’ yakni bahan bakar, oksigen, dan energi pemicu percikan itu terpenuhi, maka kebakaran pun hanya dapat terjadi bila ada sumber api di dekatnya, seperti misalnya api kompor, yang membakar gas yang bocor tersebut.

Salah satu parameter fundamental penyebab kebakaran tentunya yakni adalah proses pembakaran itu sendiri. Pembakaran didefinisikan sebagai reaksi eksotermik yang berlangsung sangat cepat disertai pembebasan energi berjumlah besar berupa panas dan nyala api sebagai produk hasil dari reaksinya. Api memiliki kemampuan untuk menyebar dan membesar (propagasi) melalui medium perantara yang cocok selama masih terdapat bahan bakar dan oksidator atau bila api tersebut belum dipadamkan.

Adalah sangat penting untuk melakukan penelitian tentang fenomena-fenomena pada api sebagai salah satu langkah untuk mencegah peristiwa kebakaran. Beberapa fenomena yang sering terjadi di kehidupan sehari-hari yakni *flame lift-up*, *extinction / blow-off*, dan *flashback*. Namun, umumnya yang masih jarang diketahui oleh masyarakat yakni adalah *flashback*, padahal fenomena ini sesungguhnya memiliki potensi bahaya ledakan yang besar. Beberapa kecelakaan yang seringkali diasosiasikan dengan fenomena *flashback* ini contohnya yakni pada proses pengelasan dengan bahan bakar campuran *oxy-acetylene*.

Pengertian *Flashback* yakni adalah fenomena api yang terjadi ketika nyala api merambat masuk (penetrasi) ke dalam *burner* atau saluran pencampur bahan

bakar. Dalam kasus seperti pada pengelasan *oxy-acetylene*, hal ini tentu saja dapat membahayakan karena api *flashback* ini akan dapat merambat memasuki selang bahan bakar atau bahkan tabung penyimpanan bahan bakar itu sendiri sehingga menyulut bahan bakar didalamnya. Ditambah lagi, fenomena ini sangat jarang disadari oleh masyarakat karena memang sangat sulit untuk melihat api merambat masuk ke dalam bila tidak menggunakan burner atau selang transparan.

Dikarenakan resiko bahaya yang sangat tinggi bila fenomena ini terjadi maka, sangat penting untuk melakukan penelitian tentang *flashback* ini. Hal ini juga dilakukan untuk mengetahui apakah ada keterkaitan *flashback* dengan sejumlah kasus ledakan tabung LPG yang terjadi. Penelitian ini juga dapat menjadi sebagai salah satu upaya mengenal dan memberi pengetahuan tambahan mengenai sejumlah fenomena dan karakter dari api yang terjadi sebagai dasar dalam menentukan langkah-langkah pencegahan peristiwa kecelakaan ledakan akibat *flashback*.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Flashback seringkali terjadi pada saat suplai aliran bahan bakar ditutup. Secara aplikasi pada kompor gas, hal itu dapat diketahui dari adanya suara letupan yang terdengar. Suara letupan tersebut berasal dari api yang menyambar balik setelah turun masuk ke dalam *burner*-nya. Pembahasan dalam penelitian ini yang menjadi permasalahan utamanya yakni pengamatan fenomena proses pembakaran yang terjadi pada saat *flashback*. Pengamatan ini mencakup pada jenis dan bentuk api yang terbentuk, serta kecepatan penetrasi api merambat ke dalam tabung *burner*. Dari sini, dapat ditentukan reaksi pembakaran yang terjadi serta parameter rasio bahan bakar dan udara yang dapat menghasilkan fenomena *flashback* ini dengan berdasarkan pada dasar teori yang ada.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Penelitian skripsi ini bertujuan untuk mendapatkan besar kecepatan dan jarak api turun ke bawah pada saat fenomena *flashback* terjadi yang diakibatkan dari perubahan variasi dari rasio perbandingan bahan-bakar dengan udaranya, melalui hasil pengamatan langsung yang dilanjutkan dengan pengukuran foto

hasil pengestraksian dari rekaman video nyala api yang terjadi. Selain kecepatan api, penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui karakteristik nyala api (*flame*) yang terbentuk selama fenomena *flashback* berlangsung.

1.4 BATASAN MASALAH

Batasan masalah pada penelitian skripsi tentang kecepatan *flashback* ini yakni adalah :

- Bahan bakar LPG yang digunakan adalah LPG Standar dari Pertamina dengan persentase campuran antara Propana dan Butana sebesar 50:50.
- Besar debit aliran bahan bakar LPG tidak terukur karena fenomena ini terjadi pada saat aliran bahan bakar ditutup.
- Pengukuran jarak terbatas pada ketelitian dari *software* pengukur gambar.
- Tidak melakukan pengamatan nyala api secara 3 dimensi, hanya dari tampak depan saja.

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan metodologi pengerjaan yang dilakukan dalam topic penelitian ini yakni adalah :

- Tahap perumusan masalah, yaitu mencari dasar-dasar teori berdasarkan variabel-variabel yang berpengaruh pada penelitian dari literatur-literatur berupa jurnal, buku, ataupun laporan penelitian yang berkaitan dengan penelitian ini.
- Tahap perancangan alat-alat percobaan, dimulai dari persiapan alat-alat percobaan, pemasangan instrument pengukur, melakukan kalibrasi dan pengetesan terhadap alat dengan melakukan percobaan awal pengambilan data, dan pengamatannya.
- Tahap penelitian dan pengambilan data, yaitu tahap pengamatan sekaligus dengan mengambil data yang diperlukan beserta pengolahan datanya.
- Tahap penulisan skripsi, mulai dari menganalisa data-data yang telah didapat dari percobaan berlandaskan pada teori-teori literatur.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Skripsi ini ditulis dengan sistematika sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang latar belakang masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penelitian.

BAB II DASAR TEORI

Bab ini berisikan teori-teori yang mendukung di dalam pengambilan data dan analisa.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisi tentang alat-alat penelitian yang digunakan dan juga cara kerjanya secara singkat. Dan dijelaskan pula mengenai langkah-langkah dan prosedur serta kondisi yang dilakukan dalam penelitian dan pengambilan data.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bab ini berisi tentang data-data dan grafik dari pengolahan data tersebut, serta analisis mengenai hasil yang diperoleh.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian yang dilakukan berdasarkan tujuan penelitian dan saran-saran yang berguna untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 BAHAN BAKAR GAS

Bahan bakar gas adalah bahan bakar berbentuk fasa gas yang sangat mudah menguap dan bercampur dengan oksidator. Karena sifatnya itulah maka bahan bakar ini sangat ideal untuk digunakan di dalam banyak macam keperluan proses pembakaran seperti misalnya aplikasi di mesin otomotif, pembangkit listrik, peralatan memasak, dan lain sebagainya. Keunggulan lainnya yakni adalah penanganan gas lebih mudah dan tidak mengandung residu padat, serta efisiensi pemanfaatan bahan bakar yang tinggi. Hampir seluruh jenis bahan bakar, termasuk bahan bakar gas mengandung zat-zat yang didalamnya mengandung senyawa Karbon (C), Hidrogen (H), Oksigen (O), dan Nitrogen (N) dan sedikit senyawa pengotor seperti Sulfur (S), dan Fosfor (P). Rantai kimia yang terbentuk biasanya berasal dari golongan hidrokarbon alkana meskipun tidak menutup kemungkinan akan terbentuk rantai kimia lainnya. Dibawah ini yakni tabel data properti beberapa contoh bahan bakar gas yang umum digunakan :

Tabel 2.1 Properti Bahan Bakar Gas [2]

Name of matter, chemical formula	Molecular mass M , kg/mol	Density ρ , kg/m ³	Gas constant R , J/(kg·°C)	Heat of combustion			
				Q_h^{vol}	Q_l^{vol}	Q_h^m	Q_l^m
				kJ/m ³		kJ/kg	
Carbon on combustion to CO (C)	12.01	—	—	—	—	9295	9295
Carbon on combustion to CO ₂ (C)	12.01	—	—	—	—	32908	32908
Carbon monoxide (CO)	28.01	1.25	297	12644	12644	10132	10132
Hydrogen (H ₂)	2.016	0.09	412	12770	10760	141974	119617
Methane (CH ₄)	16.04	0.717	518	39853	35797	56103	49404
Ethane (C ₂ H ₆)	30.07	1.34	276	70422	64351	51958	47430
Propane (C ₃ H ₈)	44.09	1.96	187	101823	93573	50409	46348
Butane (C ₄ H ₁₀)	58.12	2.59	143	134019	123552	49572	45720
Pentane (C ₅ H ₁₂)	70.13	3.13	—	150723	140928	48575	45025
Pentane (C ₅ H ₁₂)	72.14	3.22	115	148213	137143	48358	44661
Benzol (C ₆ H ₆)	78.11	3.48	—	146287	140383	42035	40340
Ethylene (C ₂ H ₄)	28.05	1.25	296	64016	14320	50786	47562
Propylene (C ₃ H ₆)	42.08	1.88	198	94370	88216	49279	46055
Butylene (C ₄ H ₈)	56.10	2.50	148	114509	107015	48692	45469
Acetylene (C ₂ H ₂)	26.03	1.16	320	58992	56940	50367	48651
Hydrogen sulfide (H ₂ S)	34.07	1.52	242	25707	23697	16705	15407
Sulfur (S)	32.06	—	—	—	—	9261	9261

Bahan bakar gas dapat berasal dari dua sumber yakni gas alam dan gas buatan. Gas alam berasal dari deposit minyak dan batubara alami yang tersimpan dalam perut bumi.. Komponen utama dari gas-gas alam ini yakni sebagian besar terdiri dari senyawa Metana (CH_4), Etana (C_2H_6), dan sedikit Propana (C_3H_8), butana (C_4H_{10}), maupun pentane (C_5H_{12}). Sedangkan untuk gas buatan, yaitu gas hasil proses *refinery* dari minyak bumi, maupun proses gasifikasi bahan bakar padat oleh manusia. Contohnya yakni Syngas, LNG, LPG, peat gas, wood gas, dan lain sebagainya.

Bahan bakar LPG merupakan salah satu bahan bakar gas buatan sebagai hasil proses sampingan dari penyulingan Bahan Bakar Minyak. LPG didapat dengan cara menambah tekanan atau menurunkan suhunya sehingga berubah fasa menjadi cairan. LPG terdiri dari campuran dari berbagai hydrocarbon terutama Propana dan Butana serta zat pembau etyl mercaptane sebagai indicator kebocorannya.

Gas LPG yang diproduksi dan dipasarkan di Indonesia oleh PT. Pertamina, dapat digolongkan menjadi 3 jenis yakni :

1. Bahan bakar gas LPG untuk kebutuhan rumah tangga, industri, dan komersial yaitu LPG campuran propana dan butana dengan komposisi campuran berbeda-beda sesuai kebutuhan
2. Bahan bakar gas LPG dengan kandungan propana murni
3. Bahan bakar gas LPG dengan kandungan butana murni

Pada jenis bahan bakar untuk kebutuhan rumah tangga, yang digunakan adalah LPG yang dikemas pada tabung 3 kg ataupun yang 12 kg. Keduanya harus sudah berdasarkan dari 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 dan Butana sebesar 97% dan maximum 2% adalah merupakan campuran Pentana (C_5H_{12}) dan hidrokarbon lainnya yang lebih berat. Batasan komposisi Propana dan Butana dalam spesifikasi tersebut dibatasi dengan parameter maksimum tekanan uap yang ditentukan adalah 145 psi [12]. Tabel (2.2) menjabarkan tentang contoh spesifikasi bahan bakar LPG komersial secara umum.

Tabel 2.2 Contoh Spesifikasi LPG Komersial Handigas [13]

Property	Propane	Butane	Handigas
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

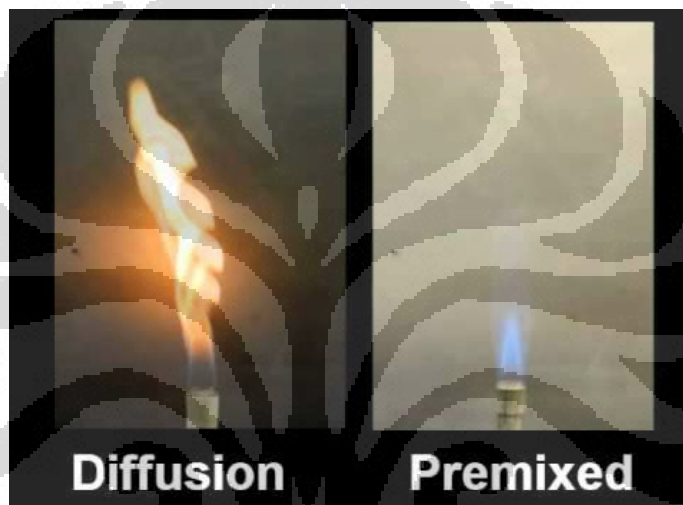
2.2 TEORI NYALA API

Api atau *Flame* digambarkan sebagai zona terjadinya proses reaksi yang bergerak sehubungan dengan gas pereaksinya. Dalam prakteknya, istilah ini biasanya dikhususkan untuk tipe reaksi berjenis eksotermik secara cepat dan fenomena ini sering juga disertai dengan emisi cahaya. Api dapat berupa api diam (stasioner) pada burner dan menyebar melalui aliran gas yang berasal dari tabung burner. Atau dapat juga berupa api bebas yang penyebarannya dimulai dari campuran gas yang pada awalnya diam. [1]

Api stasioner dapat dibedakan menjadi dua jenis, [1] yakni :

- (a) Premixed Flame dimana reaktannya sudah tercampur sebelum mendekati region api. Api jenis ini hanya dapat diperoleh jika campuran awal bahan bakar dan oksidatornya terletak di antara komposisi batas nyalanya.
- (b) Diffusion Flame dimana pencampuran bahan bakar dan udara serta proses pembakaran keduanya terjadi bersamaan pada satu region api.

Gambar 2.1 dibawah ini dapat memberi ilustrasi mudah bagaimana cara membedakan antara api difusi dengan api premixed :

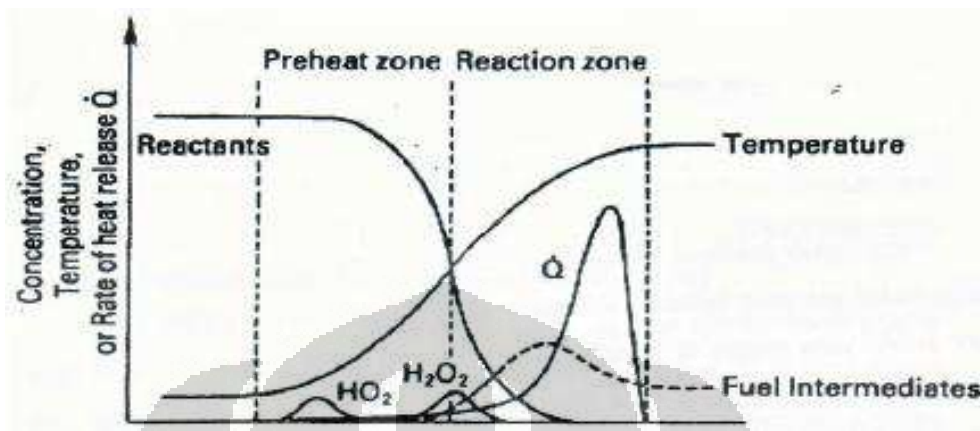


Gambar 2.1 Perbedaan Tampilan Warna Nyala Api Difusi dengan Api Premixed [11]

Kedua jenis api diatas juga dapat dibedakan berdasarkan sifat fisiknya. Untuk kondisi awal termodinamika tertentu, sistem premixed memiliki temperatur kesetimbangan adiabatik api dan pada kondisi teridealisasi dari api planar dalam medan aliran satu dimensi, api ini memiliki kecepatan pembakaran adiabatik atau fluks massa yang ekuivalen pada arah normal ke permukaan. Api difusi tidak memiliki kedua parameter seperti itu.

Nyala api sangat dipengaruhi oleh proses pembakaran yang terjadi. Pada proses pembakaran dalam suatu nyala api terdapat beberapa gabungan proses antara lain reaksi kimia, proses perpindahan panas baik secara konduksi, konveksi maupun radiasi, perpindahan massa dan momentum secara difusi dengan pola aliran tersendiri sehingga bentuk nyala api satu dimensi sangat dipengaruhi oleh

tahapan proses yang terjadi. Gambar 2.2 memperlihatkan gambaran terhadap zona-zona dari tahapan proses pembakaran yang terjadi.



Gambar 2.2 Zona-zona dalam Pembakaran [3]

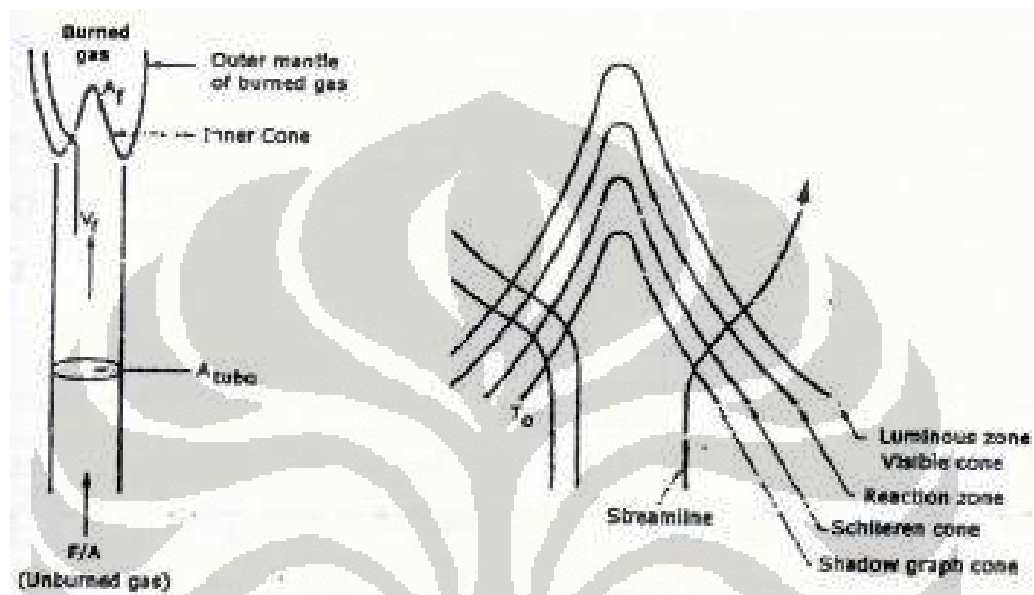
Zona tahapan proses itu antara lain :

1. *Unburned gas zone*, pada daerah ini gas premixed dengan konsentrasi, kecepatan, dan temperatur yang sama tetap berbentuk gas tanpa ada kenaikan temperatur.
2. *Pre-heating zone*, dimana di daerah ini temperatur mengalami kenaikan akibat menerima konduksi energi panas.
3. *Reaction zone*, terbagi lagi menjadi 2 yakni :
 - Zona reaksi primer, daerah dimana sebagian besar hidrokarbon bereaksi sehingga laju serta temperature naik secara cepat
 - Zona *after-burn*, dimana terjadi perubahan bentuk produk pertengahan seperti CO dan H₂ menjadi CO₂ dan H₂O dengan laju reaksi lebih lambat dengan kenaikan temperatur yang rendah
4. *Burned gas zone*, dimana pada daerah ini gas sudah bereaksi sepenuhnya / habis terbakar dan temperatur mulai menurun.

2.2.1 Api Premix Laminar

Api premixed adalah api yang memiliki suhu api adiabatik dan kecepatan pembakaran yang setimbang. Karena api bergerak dengan karakteristik kecepatan pembakaran tertentu, nyala stasioner dapat diperoleh dengan melewatkan reaktan ke dalam nyala api pada kecepatan yang sama pada arah sebaliknya. Namun pada

kenyataannya, api yang dicapai dengan cara ini pada umumnya tidak stabil dan memerlukan perangkat untuk menstabilkan nyala api atau burner, yang dapat berinteraksi lokal antara aliran dan proses pembakaran. Selain itu, api premixed hanya dapat diperoleh jika bahan bakar awal dan campuran oksidator terletak di antara batas komposisi tertentu yang disebut batas penyalaan api minimal.



Gambar 2.3 Struktur Lapisan Nyala Api Premix [3]

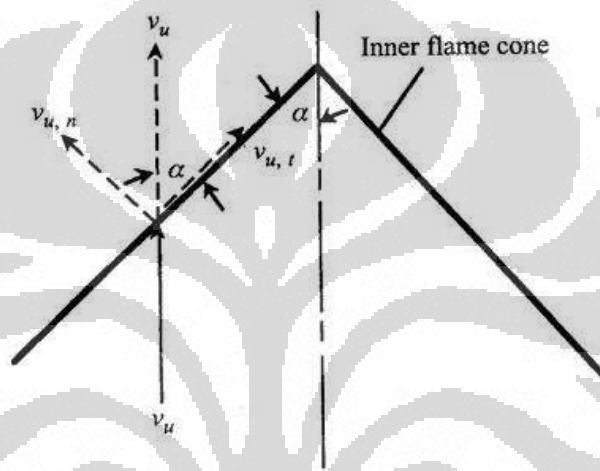
Gambar 2.3 diatas menjelaskan tentang skema struktur lapisan dari suatu api premix yang dihasilkan oleh Bunsen Burner. Nyala api khas hasil Bunsen Burner yakni nyala rangkap yaitu inti api premix dikelilingi oleh api difusi. Bentuk nyala api sangat ditentukan oleh kombinasi pengaruh profil kecepatan perambatan nyala api (*flame speed*) berdasarkan kecepatan pembakarannya serta pengaruh hilangnya panas ke dinding tabung.

2.2.2 Kecepatan Nyala Api Laminar

Kecepatan nyala api sangat dipengaruhi oleh kecepatan pembakaran yang terjadi. Kecepatan pembakaran didefinisikan sebagai kecepatan relatif linear antara flame front planar yang bergerak normal terhadap aliran gas yang belum terbakar dalam sistem aliran satu dimensi. Kecepatan pembakaran api dipengaruhi oleh radiasi api, meliputi suhu api, sifat properti dari gas seperti viskositas,

konduktivitas termal dan koefisien difusi, dan dipengaruhi juga oleh variabel-variabel seperti tekanan, rasio udara-bahan bakar dan panas reaksi mol campuran.

Jika kecepatan pembakaran lebih besar daripada kecepatan aliran gas, api akan bergerak lebih dekat ke tepi sampai kecepatan pembakaran menjadi sama dengan kecepatan aliran lokal. Sebaliknya jika kecepatan aliran melebihi kecepatan pembakaran, api akan bergerak naik hingga antara keduanya kembali seimbang. Dengan demikian, pada batasan kecepatan aliran tertentu api akan stabil atau tertahan di bibir tabung burner

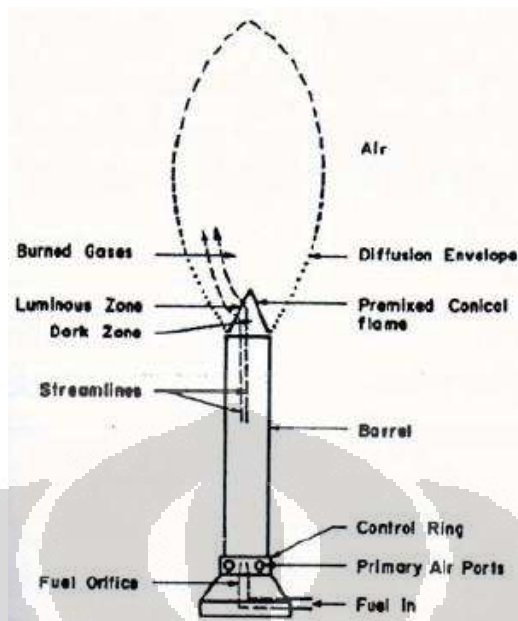


Gambar 2.4 Vektor Kecepatan Nyala Api [5]

Agar kontur struktur api tidak berubah, maka nyala api haruslah sama dengan kecepatan normal komponen dari campuran udara-bahan bakar yang belum terbakar pada setiap lokasinya. Pada kondisi aliran gas laminar dengan bilangan $Re < 2300$ maka kecepatan nyala api adalah termasuk kecepatan api laminar (S_L).

2.3 PEMBAKAR BUNSEN (*BUNSEN BURNER*)

Pembakar Bunsen diciptakan oleh Robert William Bunsen pada tahun 1855. Pembakar jenis ini merupakan pembakar jenis pertama yang mampu menghasilkan nyala api premix. Prinsip pengaturan aliran campuran udara-bahan bakarnya menggunakan cara kontinyu, artinya antara aliran bahan-bakar dengan udara mengalir melalui saluran berbeda secara terus menerus untuk kemudian bercampur pada tabung pembakar (*barrel*).



Gambar 2.5 Contoh Struktur Bunsen Burner [3]

Pada saat campuran aliran ini diberikan energi panas yang mencukupi (*minimal ignition energy*) maka, perbandingan campuran dengan konsentrasi tertentu akan bereaksi kemudian menyala dengan menghasilkan cahaya luminous sehingga terlihat apa yang disebut sebagai nyala api (*flame*). Gambar 2.5 menggambarkan bentuk nyala api yang terbentuk pada Bunsen burner.

Berdasarkan gambar 2.5 diatas, pada zona luminous sudah terjadi reaksi dan pelepasan energi panas sebagai entalpi reaksi gas yang terbakar, sedangkan di bawahnya terdapat daerah gelap (*dark zone*), yaitu tempat dimana molekul gas yang belum terbakar berubah alirannya dari arah sejajar sumbu tabung pembakar kearah luar tegak lurus permukaan batas daerah gelap. Gas yang belum terbakar ini selanjutnya mendapat energi panas hingga mencapai temperature nyala dan reaksi ini terus berulang selama masih ada aliran gas mengalir dari tabung.

Warna nyala api pada daerah *luminous* dapat berubah tergantung pada rasio udara dengan bahan bakarnya. Bila campuran sangat kurus (*lean*), maka warna kerucut dapat berubah menjadi keunguan sebagai pertanda dihasilkannya banyak CH radikal. Sedangkan pada campuran kaya, maka warna nyalanya akan biru kehijauan diakibatkan banyaknya konsentrasi molekul C_2 di api tersebut.

2.4 STOIKIOMETRI PEMBAKARAN

Secara umum, definisi pembakaran dapat didefinisikan sebagai reaksi oksidasi eksotermis yang sangat cepat. Pembakaran terjadi sebagai hasil reaksi antara bahan bakar dengan oksidator [6]. Bahan bakar (Fuel) biasanya berasal dari golongan Hidrokarbon yang mengandung senyawa Karbon (C), Hidrogen (H), Oksigen (O), Nitrogen (N), dan Sulfur (S) sedangkan oksidator adalah segala substansi yang mengandung molekul oksigen (O₂) seperti misalnya adalah udara.

Sebelum dapat terbakar, maka bahan bakar haruslah tercampur dahulu dengan oksidator sehingga di dalam penelitian fenomena api ini sangatlah penting untuk menghitung besaran rasio pencampuran antar keduanya. Dua analisis yang terutama dipakai didalam mencari rasio ini yakni berdasarkan fraksi volumetrik dan fraksi gravimetrik. Selain itu, juga dikenal dua macam tipe reaksi pencampuran bahan bakar tersebut yakni campuran stoikiometrik dan campuran non-stoikiometrik. Parameter lainnya yang juga sangat penting di dalam proses pembakaran adalah beban pembakaran (Burning Load) karena sangat berkaitan dengan nyala api yang terjadi.

2.4.1 Fraksi Volumetrik dan Fraksi Gravimetrik

Fraksi volumetrik dapat diperoleh dengan cara mendapatkan besaran perbandingan fraksi molnya. Fraksi mol (χ_i) adalah perbandingan jumlah mol komponen tersebut dengan jumlah mol total campuran (N_{cmprn}). Pada suatu campuran yang tersusun atas N_1 mol komponen 1, N_2 mol komponen 2, dan seterusnya dapat dirumuskan dengan persamaan seperti dibawah ini :

$$\chi_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} = \frac{N_i}{N_1 + \dots + N_{i+1} + \dots + N_n} = \frac{N_i}{N_{\text{total}}} = \frac{N_i}{N_{\text{cmprn}}} \quad [2.1]$$

Sedangkan untuk fraksi massa (ψ_i) sebuah komponen pada suatu campuran yakni perbandingan jumlah massa komponen tersebut dengan total jumlah massa campuran (m_{cmprn}). Pada suatu campuran yang terdiri dari m_1 kg komponen 1, m_2 kg komponen 2, dan seterusnya, dapat dirumuskan dengan persamaan seperti dibawah ini :

$$\psi_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{m_i}{m_1 + \dots + m_{i+1} + \dots + m_n} = \frac{m_i}{m_{\text{total}}} = \frac{m_i}{m_{\text{cmprn}}} \quad [2.2]$$

Jumlah dari fraksi mol ataupun fraksi massa yang tergabung dari berbagai komponen zat di dalam campuran total harus berjumlah satu. Maka, dari kedua macam rumus diatas, dapat diperoleh persamaan antara fraksi mol dengan fraksi massa yaitu :

$$\sum_N \chi_i = \sum_N \psi_i = 1$$

Selain dengan definisi perumusan diatas, relasi antara fraksi mol dengan fraksi massa suatu komponen campuran juga dapat didapat dengan melibatkan perhitungan data massa molekular komponen (m_i). Fraksi mol diperoleh dengan cara melakukan perbandingan antara kalkulasi massa reaktan dibagi massa molekular relatif (M_i) reaktan individual penyusun campuran dan massa total campuran dibagi massa molekular relatif komponen hasil pencampuran (M_{camp}). Secara ringkas dapat didefinisikan seperti berikut :

$$\chi_i = \frac{N_i}{N_{\text{cmprn}}} = \frac{\left(\frac{m_i}{M_i}\right)}{\left(\frac{m_{\text{cmprn}}}{M_{\text{cmprn}}}\right)} = \left(\frac{m_i}{m_{\text{cmprn}}}\right) \left(\frac{M_{\text{cmprn}}}{M_i}\right)$$

$$\chi_i = \psi_i \left(\frac{M_{\text{cmprn}}}{M_i}\right) \quad [2.3]$$

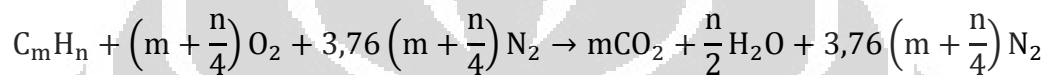
Didapat juga rumus perhitungan massa molecular campuran secara lebih ringkas melalui kaitan antara keduanya yakni :

$$M_{\text{cmprn}} = \sum_{i=1}^n \chi_i M_i$$

$$M_{\text{cmprn}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\psi_i / M_i \right)} \quad [2.4]$$

2.4.2 Campuran Stoikiometrik

Campuran stoikiometrik memiliki tujuan untuk mengetahui seberapa besar campuran antara oksidator dengan bahan bakar yang ideal. Pada campuran jenis ini proses pembakaran tidak menghasilkan produk sisa / berlebih sehingga dapat dikatakan juga sebagai reaksi pembakaran yang sempurna. Penulisan reaksi stoikiometrik antara hidrokarbon murni dengan udara atmosfer yakni :



Persamaan ini menjelaskan rincian dari pecahan ikatan antara atom-atom (atau unsur) yang menyusun molekul hidrokarbon dan oksigen, dan kemudian berikat kembali membentuk molekul karbon dioksida dan air. Sifat kimianya tidak akan berubah karena sifat gas nitrogen yang inert. Dari persamaan kimia diatas maka dapat ditentukan persamaan AFR (Air-Fuel Ratio) atau FAR (Fuel-Air Ratio) stoikiometriknya berdasarkan volume. Pada contoh seperti gas metana (CH_4) dengan reaksi $CH_4 + 3 O_2 + 7,52 N_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O + 7,52 N_2$ yakni:

$$AFR_{\text{stoich}} = \frac{m_a}{m_f} = \frac{2(1 + 3,76)}{1} = 9,76 \quad [2.5]$$

Berarti, diperlukan 9,76 liter udara untuk menghasilkan pembakaran sempurna untuk 1 liter gas metana.

Koefisien-koefisien di dalam suatu persamaan kimia biasanya dianggap sebagai jumlah kmol zat yang mengambil bagian di dalam proses reaksi. Juga dimana semua zat tersebut dapat diasumsikan sebagai gas ideal, koefisien dalam persamaan kimia dapat juga dianggap sebagai proporsi volumetrik, karena pada suhu dan tekanan tetap, setiap kmol dari gas ideal akan menempati volume yang sama.

2.4.3 Campuran Non-stoikiometrik

Setelah mengetahui seperti apa pembakaran dengan campuran sesuai atau campuran stoikiometrik, maka dapat pula ditemukan juga bagaimana proses pembakaran bila campuran tersebut tidak stoikiometrik. Pada campuran non-stoikiometrik ini ada dua istilah yakni campuran lean dan rich. Lean (atau miskin) dan rich digunakan dimana, untuk masing-masing oksidator dan bahan bakar yang tersedia lebih banyak dari proporsi stoikiometri mereka. Suatu campuran dikatakan lean bila proporsi oksidator / udara lebih besar dari yang seharusnya pada campuran stoikiometrik, dan rich bila proporsi bahan bakarnya yang lebih besar.

Proses pembakaran sempurna masih dimungkinkan pada reaksi untuk menghasilkan CO₂ dan H₂O dengan campuran kurus, hanya saja, oksigen berlebih juga dihasilkan pada sisi produk dari persamaan kimia [1]. Namun, mustahil untuk memiliki pembakaran sempurna bila campuran tersebut kaya sehingga pada situasi ini, diperlukan beberapa kriteria penentu tambahan. Kriteria-kriteria tersebut dideskripsikan seperti berikut ini :

a. Rasio Ekuivalen ϕ dan kekuatan campuran, (*Mixture Strength*).

Rasio ekuivalen, ϕ , didefinisikan sebagai rasio udara / bahan bakar yang tersedia dengan yang dibutuhkan untuk kuantitas campuran oksidator sesuai stoikiometri, yaitu :

$$\phi = \frac{(Air/Fuel)_{stoich}}{(Air/Fuel)_{aktual}} \quad [2.6]$$

Dari rumus ini, campuran dengan $\phi < 1$ disebut *lean*, sementara campuran dimana $\phi > 1$ disebut *rich*. Selain itu, kekuatan campuran, MS, dapat juga disebut rasio kesetaraan yang dinyatakan dalam persentase dan sering digunakan pada mesin pembakaran tipe reciprocating.

b. Rasio Air-fuel relatif dan persentase udara teoritis

Rasio udara relatif sering disebut juga sebagai rasio kesetaraan oksidator, dan didefinisikan sebagai AFR actual dibagi dengan AFR stoikiometrik, yaitu $1/\phi$. Juga, persentase udara teoritis didefinisikan sebagai :

$$\text{Percent theoretical air} = \frac{100}{\phi} \quad [2.7]$$

c. Persentase udara berlebih, (*Excess Air*)

Istilah ini biasanya paling umum digunakan untuk menggambarkan campuran kurus atau lemah dalam mesin dan teknologi boiler :

$$EA = \frac{AFR_{aktual} - AFR_{stoich}}{AFR_{stoich}} \times 100\% \quad [2.8]$$

Udara berlebihan kadang-kadang digunakan untuk memastikan agar terjadi pembakaran yang sempurna atau untuk mengurangi temperatur hasil produk pembakaran. Selanjutnya, persamaan 1.4 dan 1.5 biasanya digunakan untuk logam komposisi campuran yang mudah terbakar relatif terhadap komposisi stoikiometrinya.

2.4.4 Beban Pembakaran (*Burning Load*)

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

$$BL = \frac{Q_f \times \rho_f \times LHV}{A_b} \quad [2.9]$$

Dimana : Q_f = besar debit aliran gas (m^3/s)

P_f = densitas bahan bakar (kg/m^3)

LHV = Lower Heating Value dari bahan bakar (MJ/kg)

A_b = Luas penampang burner (m^2)

2.4.5 Batas Mampu Nyala

Campuran bahan bakar dan oksidator dapat mendukung terjadinya nyala api dalam daerah konsentrasi tertentu. Batas daerah tersebut dikenal dengan batas mampu nyala (*Flammability Limit*). Ada dua range, yakni pada batas (*Upper FL*)

atas dan pada batas bawah (Lower FL). Sebagai contoh adalah pada gas alam yang tidak akan terbakar bila proporsi dari gas kurang dari 4% pada batas bawah atau lebih dari 15% pada batas atas.

Pada konsentrasi rendah, walaupun mungkin terjadi penyalaan lokal, energi yang ada tidak cukup untuk memanaskan lapisan gas di dekatnya hingga ke temperature nyala. Seiring dengan naiknya tekanan parsial dari bahan bakar gas, kapasitas panas dari campuran udara-bahan bakar dan energi juga ikut naik ke titik yang akan menyalakan bahan bakar gas di dekatnya dan menyebarkan nyala api (propagating).

Batas flammability membatasi range antara campuran kaya-ke-miskin melebihi dari rasio fuel-air stoikiometrik sehingga fuel-air tersebut tidak dapat terbakar lagi setelah sumber pengapiannya dimatikan, meskipun campuran tersebut berada pada rentang ignition temperature-nya [1]. Beberapa nilai-nilai batas mampu nyala pada campuran kurus (ϕ)_L dan gemuk (ϕ)_R untuk beberapa bahan bakar diberikan pada tabel 2.2 dibawah ini :

Tabel 2.2 Batas Mampu Nyala dari Beberapa Macam Gas [1]

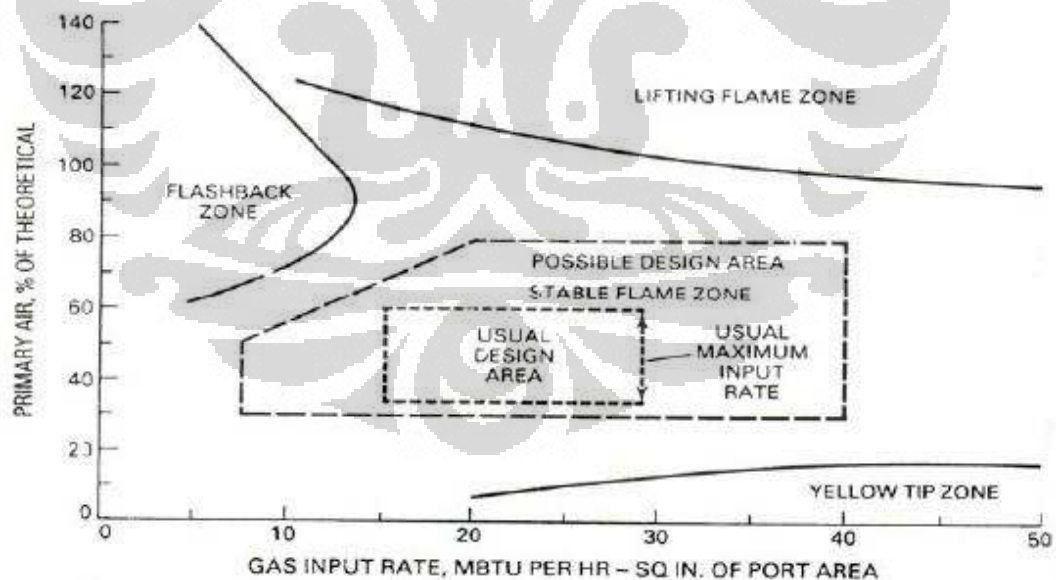
Compound	Formula	Flammability limits	
		Lean (ϕ) _L	Rich (ϕ) _R
Paraffin hydrocarbons			
Methane	CH ₄	0.464	1.64
Ethane	C ₂ H ₆	0.500	2.72
Propane	C ₃ H ₈	0.510	2.83
n-Butane	C ₄ H ₁₀	0.540	3.30
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	0.540	3.59
n-Hexane	C ₆ H ₁₄	0.510	4.00
n-Heptane	C ₇ H ₁₆	0.530	4.50
n-Octane	C ₈ H ₁₈	0.500	4.25
n-Nonane	C ₉ H ₂₀	0.470	4.34
Decane	C ₁₀ H ₂₂	0.450	3.56
Olefins			
Ethene	C ₂ H ₄	0.41	> 6.10
Propene	C ₃ H ₆	0.48	2.72
Butene-1	C ₄ H ₈	0.53	3.53
Acetylenes			
Acetylene	C ₂ H ₂	0.390	-

2.5 FENOMENA *FLASHBACK*

Flashback adalah perilaku intrinsik dari sistem api premixed dimana nyala api tersebut masuk dan merambat balik (penetrasi) ke dalam tabung *burner*. Pada fenomena *Flashback* ini, kecepatan pembakaran lebih cepat terjadi dibandingkan dengan kecepatan pencampuran bahan-bakar dengan udara. Fenomena ini dapat membahayakan karena pada saat merambat balik ke bawah, api ini dapat masuk ke dalam selang aliran bahan bakar sehingga menyebabkan ledakan.

Pada umumnya, *Flashback* terjadi pada saat aliran bahan-bakar sudah sangat rendah yakni misalnya, pada saat mematikan kompor gas. Ciri-ciri yang dapat diketahui bahwa pada kompor terjadi *Flashback* yakni adalah terdengarnya suara letupan ketika..suplai bahan bakar gasnya ditutup secara cepat. Suara letupan ini sering disebut juga sebagai '*noise of extinction*' [7] yang berasal dari api yang menyambar balik lalu padam setelah turun masuk ke dalam *burner*-nya.

Grafik Fuidge menjelaskan zona stabilitas nyala api yang dibatasi oleh daerah *Flashback*, *yellow tip* dan *blow off*. Contoh grafik Fuidge yakni ada pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Penggambaran zona stabilitas nyala api dengan menggunakan Diagram Fuidge [5]

Menurut Kurdyumov, dkk. ada beberapa tipe yang dapat digolongkan sebagai fenomena *flame Flashback* [8], yakni :

1. *Flashback* pada lapisan batas yang menempel pada dinding saluran campuran bahan bakar-nya, dimana kecepatan alirannya mendekati 0.
2. *Flashback* akibat pecahan pusaran arus api (*Vortex Breakdown*).
3. *Flashback* yang terjadi akibat ketidakstabilan yang terjadi dalam ruang bakar.

Dari sejumlah penyebab diatas, maka dapat diketahui bahwa *Flashback* adalah fenomena api yang tidak stabil.

Beberapa bilangan non-dimensional yang berpengaruh di dalam fenomena *flashback* ini adalah Bilangan Karlovitz dan Damkohler. Bilangan non-dimensional Karlovitz menjelaskan hubungan antara waktu karakteristik reaksi kimia dengan waktu karakteristik fisik aliran. Waktu reaksi kimia adalah waktu untuk terjadinya reaksi antara bahan bakar dan oksidator yang merupakan fungsi dari ketebalan nyala dibagi kecepatan nyala. Sedangkan waktu aliran fisik adalah waktu untuk mengalirnya campuran bahan bakar dan udara yang dapat dinyatakan sebagai kebalikan dari laju regangan nyala. [4]

Berdasarkan referensi, rumus bilangan Karlovitz (Ka) dapat dinotasikan seperti berikut [9] :

$$Ka = \frac{U \sin \theta}{r_f} \cdot \frac{\alpha}{(S_u)^2} \quad [2.10]$$

Dimana U adalah kecepatan aliran seragam dari campuran bahan bakar dan udara, (m/s), θ adalah sudut puncak dari nyala, r_f adalah radius nyala (m), dan α yakni difusivitas termal dari gas yang dapat dicari dari rumus berikut :

$$\alpha = \frac{k}{\rho_u \cdot C_p} \quad [2.11]$$

dengan k adalah konduktivitas termal dari gas (W/m.C), c_p koefisien panas spesifik gas (J/kg.C), ρ_u adalah massa jenis gas sebelum terbakar (kg/m^3).

Tidak hanya bilangan Karlovitz saja tetapi juga diperhitungkan bilangan Damkohler (Da) yang merupakan kebalikan dari bilangan Karlovitz [4].

$$Da = \frac{1}{Ka} \quad [2.12]$$

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 PERANGKAT PENELITIAN

Alat percobaan yang digunakan pada percobaan ini adalah bertujuan untuk mengukur kecepatan *flashback* api yang terjadi pada saat aliran bahan bakar sudah hampir habis pada berbagai variasi dari *flowrate* udara. Alat-alat yang digunakan antara lain tabung gas LPG 3 Kg, unit alat rotameter *Flame Propagation and Stability Unit* P.A. Hilton C551, pembakar Bunsen dengan tabung pencampur berbahan kaca bening, dan kamera perekam digital.

3.1.1 Tabung Gas LPG

Salah satu parameter penting di dalam penelitian kecepatan *flashback* ini yakni pada bahan bakar yang dipakai. Perbedaan bahan bakar sangat berpengaruh pada perhitungan beban pembakarannya (*Burning Load*) dikarenakan dari perbedaan nilai LHV (*Lower Heating Value*)-nya.

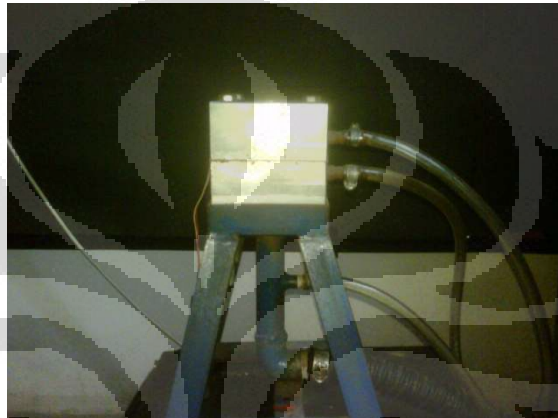


Gambar 3.1 Tabung gas LPG 3 Kg Pertamina

Khusus untuk percobaan ini, bahan bakar gas yang dipakai yakni adalah gas LPG produksi PT. Pertamina untuk kebutuhan rumah tangga berukuran 3 Kg. dengan komposisi campuran Propana dan Butana yakni 50%-50%.

3.1.2 Pembakar Bunsen

Burner yang dipakai adalah *Bunsen Burner* standar dari unit P.A. Hilton C551. Unit perlengkapan ini sudah dilengkapi dengan suplai udara sendiri berupa *fan blower* bertenaga motor AC. Pada burnernya juga sudah tersedia dudukan tabung pencampur berupa dudukan ulir sehingga mempermudah pemasangan tabung. Pada dudukan ini juga terdapat kipas pencampur udara dengan bahan bakar (*Rotating Fan Mixer / RFM*).



Gambar 3.2 Mixer Bahan Bakar-Udara Pembakar Bunsen

Tabung pembakar yang dipakai berjenis tabung tunggal. Karena digunakan untuk pengamatan nyala api di dalam tabung, maka bahan tabung yang dipakai adalah dengan bahan kaca *pyrex* yang lebih tahan panas pembakaran.



Gambar 3.3 Tabung Burner Kaca *Pyrex*

3.1.3 Flowmeter Aliran Gas dan Udara

Alat pengukur besar aliran gas dan udara yang dipakai adalah pengukur berjenis rotameter dari alat *Flame Propagation and Stability Unit* P.A. Hilton C551. Laju aliran fluida didalam rotameter diukur dengan menggunakan sebuah pelampung yang diangkat dengan adanya daya apung (*buoyancy*) dan juga kecepatan aliran yang melawan gaya gravitasi. Untuk aliran gas, gaya apung dianggap tidak ada, sehingga hanya berdasarkan kecepatan alirannya saja.



Gambar 3.4 Flowmeter *Flame Propagation and Stability Unit* P.A.Hilton C551

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 kalibrasi penyetaraan dinyatakan pada rumus (3.1)

$$Q_A = 0.0214x + 0.0449 \quad [3.1]$$

Sehingga, dari hasil persamaan regresi diatas didapat besaran debit udara dalam L/s pada skala rotameter sekian cm.

Tabel 3.1 Hasil Kalibrasi Skala Rotameter Aliran Udara

Skala Rotameter (cm)	Air Flow Rate (Qa) (L/s)
0	0.04
1	0.06
2	0.08
3	0.11
4	0.13
5	0.15
6	0.17
7	0.19
8	0.22

3.1.4 Kamera *Digital Recorder*

Alat perekam fenomena api yang digunakan yakni adalah kamera perekam digital berkemampuan 50 *frame* per detik. Kamera ini dapat menangkap perubahan api yang terjadi dan direkam menjadi satu gambar dalam interval waktu setiap 0,02 detik. Spesifikasi detail dari kamera perekam dalam eksperimen ini tertera pada tabel (3.1) dibawah ini.

Tabel 3.1 Spesifikasi Instrumentasi Perekam [10]

CANON EOS 1D MARK IV + EF LENS 70-200 mm	
	
Camera Sensor	<ul style="list-style-type: none"> • 27.9 x 18.6 mm CMOS sensor • 1.3x crop factor • RGB Color Filter Array

	<ul style="list-style-type: none"> • Built-in fixed low-pass filter (with self-cleaning unit) • 17 million total pixels • 16.1 million effective pixels • 3:2 aspect ratio
Processor	Dual DIGIC 4
Movie Mode	<ul style="list-style-type: none"> • MOV (Video: H.264, Sound: Linear PCM) • 1920 x 1080 (29.97, 25, 23.976 fps) • 1280 x 720 (59.94, 50 fps) • 640 x 480 (59.94, 50 fps) • Max duration: 29min 59sec • Max file size: 4GB
Sensitivity	<ul style="list-style-type: none"> • ISO 100 - 12800 • 0.3 or 1.0 EV increments • ISO 50 (Enhanced L) • ISO 25600 (Enhanced H1) • ISO 51200 (Enhanced H2) • ISO 102400 (Enhanced H3)
Shutter	<ul style="list-style-type: none"> • Focal-plane shutter • 30 - 1/8000 sec • 0.3, 0.5 or 1.0 EV increments • Bulb
White Balance	<ul style="list-style-type: none"> • Auto (using the imaging sensor) • Daylight • Shade • Cloudy • Tungsten • Fluorescent • Flash • Custom (up to 5 can be stored) • Kelvin (2500 - 10000 K in 100 K steps)

3.1.5 Peralatan Pendukung Lainnya

Peralatan pendukung lainnya yang digunakan untuk mendukung percobaan ini yakni adalah :

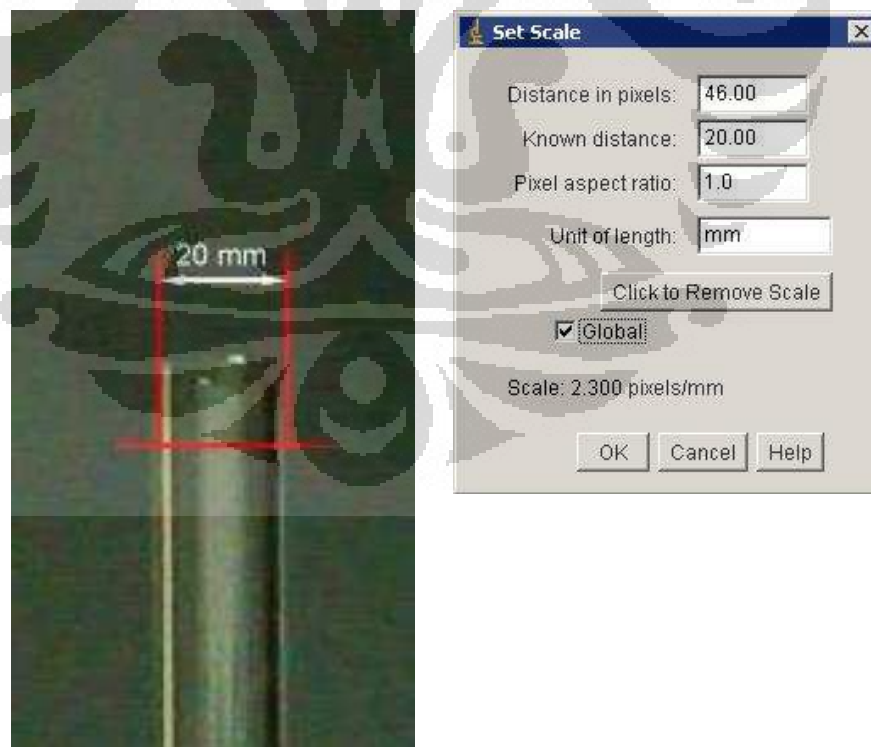
1. Regulator gas bermembran, sebagai pengeluar aliran gas
2. Selang LPG standar SNI
3. *Needle Valve*, sebagai pengatur bukaan debit LPG yang dibutuhkan
4. Pemantik api sistem magnet
5. Stand tripod penyangga kamera
6. Karton hitam dan kain hitam sebagai pembentuk latar belakang gelap serta penutup cahaya dari jendela.

3.2 PROSES KALIBRASI SOFTWARE PENGUKUR

Karena pengukuran jarak panjang api masuk ke dalam tabung dilakukan melalui teknik pemrosesan gambar, maka diperlukan pengkalibrasian *software* pengukur yang digunakan sehingga diperoleh tolok ukur pengukurannya. Teknik melalui bantuan program komputer ini dianggap dapat menghasilkan hasil yang lebih teliti dan akurat ketimbang dengan menggunakan pengukuran manual dengan penggaris.

Program pengukur panjang api *flashback* yang digunakan dalam penelitian ini adalah program *IMAGE J* versi 1.44. Software ini secara umum sudah banyak digunakan di dalam bidang fotografi *scientific* bidang kedokteran untuk mengukur jarak antar titik tertentu pada foto sel atau jaringan mikroskopis makhluk hidup sehingga memiliki ketelitian yang sangat baik.

Proses pengkalibrasian awal pada program *Image J* untuk mendapatkan tolok pertama pengukuran panjang yakni adalah melakukan *Set Scale* pada software seperti gambar dibawah ini. Proses ini bertujuan untuk menyamaratakan rasio pengukuran antara pixel gambar dengan panjang mm-nya. untuk semua gambar.



Gambar 3.5 Cara Penetapan Skala Pengukuran Gambar

Dari tabel *Set Scale* untuk mulut burner diatas, dapat diketahui bahwa jarak *pixel* mulut burner di gambar adalah 46 pixel. Jarak *Pixel* ini kemudian dikomparasi dengan diameter burner yang sesungguhnya yakni 20 mm. Satuan yang digunakan kemudian diisi pada kolom *units of length* yaitu dalam millimeter, sehingga didapat skalanya yaitu 2,3 pixel per 1 mm. Fungsi *Global* harus dicentang sehingga skala ini berlaku untuk semua gambar yang akan diukur.

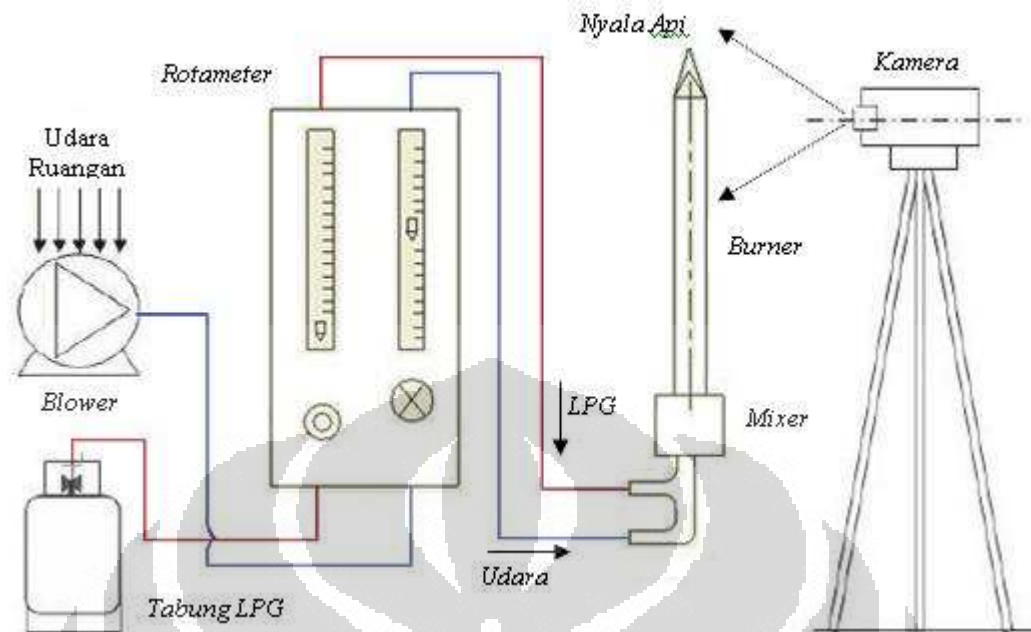
3.3 METODE PENGAMBILAN DATA

Pengambilan data untuk fenomena *flashback* ini digunakan dengan cara eksperimental yakni mengatur kondisi fenomena api yang terjadi melalui berbagai variabel. Parameter yang dicari atau variabel bebas dalam kajian eksperimen ini adalah kecepatan api masuk ke dalam tabung pencampur sedangkan variabel yang diubah yakni aliran massa (*flowrate*) udara sebagai indikator pengamatan bilamana terjadi perubahan fenomena nyala api *flashback* tersebut. Variasi udara yang diambil yakni sebanyak 9 variasi pembacaan skala rotameter. Mulai dari 0 (tertutup total / Kondisi tanpa udara) 1 cm, 2 cm, hingga 8 cm. Dari hasil pengamatan, besar aliran udara maksimal untuk terjadi *flashback* yakni posisi 8 cm pada rotameter karena bila lebih banyak dari itu maka api akan langsung padam (*blow-off*).

Agar hasil data yang didapat semakin baik, eksperimen ini menggunakan perekaman dengan resolusi tinggi (1280x720p) dengan *aspect ratio* 16:9. Selain itu, untuk menyamakan hasil dan kualitas gambar yang diperoleh, *setting* kamera yang digunakan juga harus disetarakan. Setting yang dipakai yakni dengan standar sensitivitas cahaya ISO 6400. serta *Shutter Speed* sebesar 1/60 detik, agar gambar nyala api yang diperoleh dapat sangat detil dan jernih. Untuk pengambilan gambar kecepatan api saat mulai masuk ke dalam tabung hingga mati, juga menggunakan pencatatan waktu yang didapat dari kamera dengan rentang waktu perekaman gambar setiap 0,02 detik.

Fenomena api *flashback* yang terekam dari kamera tersebut akan diinput ke dalam komputer dengan bantuan program *software* komputer khusus untuk pengolahan gambar. Program yang digunakan di dalam percobaan ini yakni adalah *Adobe Photoshop CS3*, *Image J*, dan *ZoomBrowser*.

3.3.1 Skema Peralatan Penelitian



Gambar 3.6 Susunan Skema Peralatan untuk Pengambilan Data

3.3.2 Langkah-langkah Persiapan

Persiapan-persiapan yang harus dilakukan sebelum melakukan pengambilan data yakni adalah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan tabung gas LPG 3 kg
2. Memasang perangkat perekaman mulai dari stand tripod kamera hingga mengatur setting kameranya.
3. Memeriksa kerataan pemasangan tabung pembakar
4. Mengondisikan ruangan dalam keadaan gelap, seperti menutup jendela memasang tirai gelap, dan mematikan lampu
5. Mengetatkan sambungan-sambungan pada alat yang mempunyai ulir, seperti *burner*, regulator gas, klem pengaman selang, dan *needle valve*.
6. Mengetes kebocoran yang terjadi pada alat uji, seperti di regulator, dan pada sambungan-sambungan lain dengan menggunakan air sabun

3.3.3 Prosedur Pengambilan Data

Pengambilan data untuk mendapatkan gambar api *flashback* dilakukan dengan langkah-langkah seperti dibawah ini :

1. Alat rotameter pengukur flow udara di unit P.A. Hilton dipasang pada titik 0 sedangkan untuk flow bahan bakar diatur pada titik 3 cm
2. Menyulut gas yang keluar dari tabung burner dengan pemantik api panjang
3. Menunggu hingga nyala api menjadi stabil selama kurang lebih 3 detik
4. Mengaktifkan kamera hingga posisi *ready* untuk memulai merekam nyala apinya
5. Menutup aliran bahan bakar secara tiba-tiba tanpa merubah aliran udaranya hingga terjadi *flashback*
6. Mengulangi proses penyalaan api – penutupan aliran gas hingga 3 kali untuk mendapatkan data pembanding
7. Mengulangi prosedur ke-1 hingga ke-6 untuk variasi aliran gas LPG dari posisi 1 cm hingga 8 cm dari skala rotameter

3.3.4 Prosedur Pengolahan Gambar

Setelah data berupa gambar didapat, pengolahan gambar dilakukan untuk mendapatkan kecepatan *flashback*-nya. Langkah-langkahnya adalah seperti dibawah ini :

1. Meng-*extract* gambar-gambar / *frame* diam dari rekaman video apinya dengan *ZoomBrowser EX*
2. Memilih gambar api *flashback* dengan interval waktu tertentu dari saat api mulai turun ke dalam tabung hingga padam.
3. Mengurutkan gambar-gambar api tersebut kemudian digabungkan dengan *Adobe Photoshop CS3*
4. Membuat patokan awal pengukuran pada gambar urutan nyala api yang sudah digabung sesuai dengan kalibrasi awal yaitu pada mulut tabung *burner*.
5. Melakukan pengukuran gambar satu-satu dengan *Image J*
6. Data jarak yang didapat dari pengukuran *Image J* disimpan dalam format *.xls* sehingga bisa diolah di *Microsoft Excel*

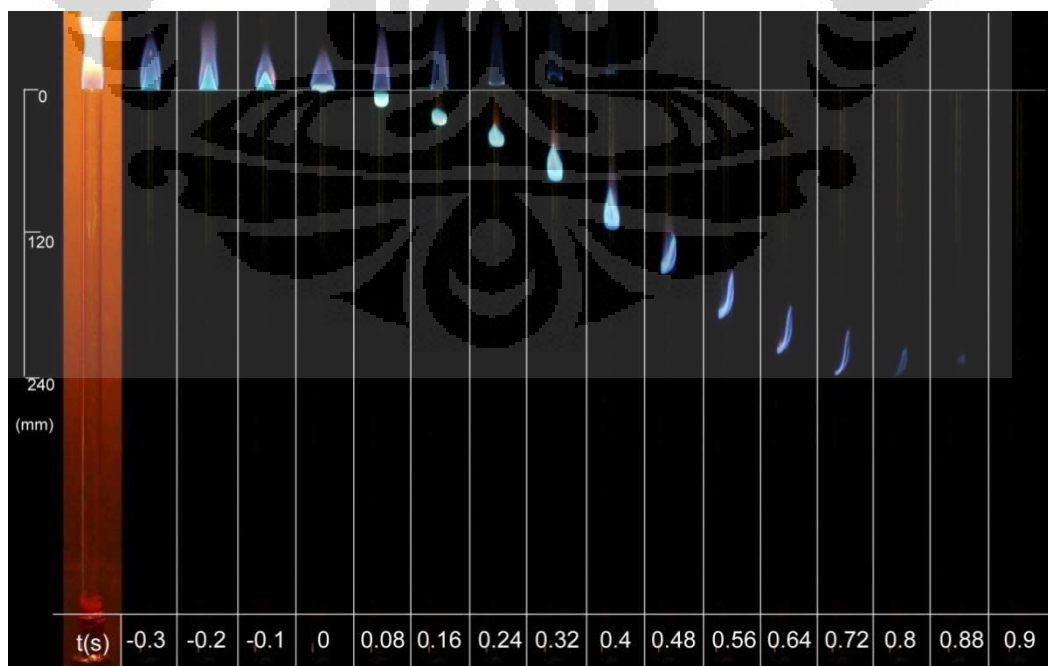
BAB 4

PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS

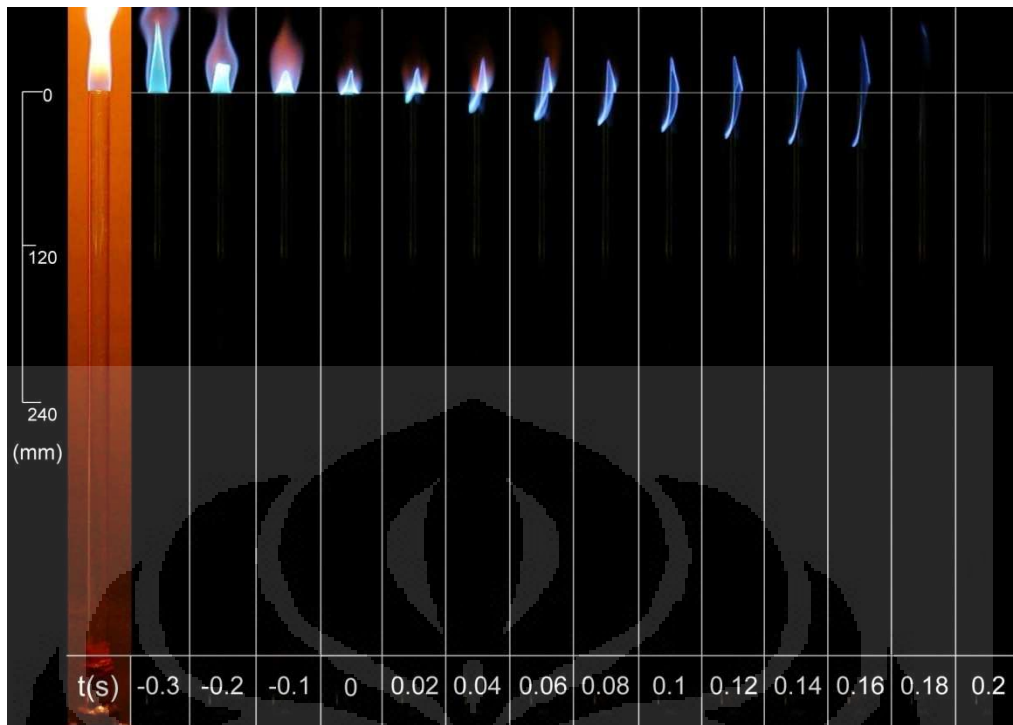
4.1 HASIL DAN ANALISIS PENGAMATAN NYALA API

Hasil pengolahan data yang didapat dari pengambilan perekaman nyala api adalah berupa gambar diam / foto api dari proses ekstraksi video rekaman menjadi foto dan kemudian diurutkan menggunakan program *image processing*. Setelah diurutkan, foto-foto api tersebut kemudian diukur dengan program pengukur jarak pixel pada gambar yang sebelumnya sudah dikalibrasi terlebih dahulu ke dalam perbandingan satuan pixel/mm. Pengambilan titik mulai pengukuran adalah dimulai dari lubang keluaran burner yang dapat terlihat pada saat api masih menyala terang. Angka-angka yang tertera di bagian bawah gambar menunjukkan pada waktu detik keberapa saja titik tersebut terfoto. Sedangkan latar belakang gelap pada gambar adalah karena proses perekaman video harus dilakukan dalam kondisi cahaya seminimal mungkin sehingga warna nyala api yang terlihat dapat semakin jelas.

Gambar (4.1)a dan b dibawah ini menunjukkan perbandingan hasil pengamatan nyala api dari hasil proses pengurutan gambar tersebut :



(a)



(b)

Gambar 4.1 Perbandingan Gambar Hasil Pengurutan Foto Api (a) Hasil Foto Pengambilan Data pada Qudara 0.04 L/s (b) Hasil Foto Pengambilan Data pada Qudara 0.22 L/s

Terlihat dengan sangat jelas dari gambar 2, tahapan perubahan nyala api dari 0,3 detik sebelum mulai masuk ke dalam tabung *burner*, hingga pada akhirnya padam setelah 0,9 detik. Bagian nyala api *premixed* yang berwarna biru muda cerah (*luminous zone*) mengecil lalu kemudian menguncup dan pada akhirnya pada titik 0 mulai merambat masuk ke dalam tabung. Warna apinya pun berubah bertahap dari warna biru muda cerah hingga warna biru tua gelap dengan semakin jauhnya jarak tempuh api *Flashback* tersebut.

Bila dilihat dari gambar-gambar diatas, maka dapat terlihat pula bahwa pada zona *luminous* perlahan-lahan terjadi perubahan bentuk dari kerucut (*conical*) menjadi seperti terpilin (*tilted flame*). Yang mempengaruhi terjadinya bentuk nyala api terpilin ini dapat disebabkan akibat terjadinya peregangan nyala (*flame stretch*) sebagai dampak dari adanya turbulensi dari aliran gas di dalam tabung pencampur.

Parameter-parameter penyebab peregangan nyala api diatas dapat dijelaskan melalui hasil perhitungan dari nilai bilangan non-dimensional Karlovitz dan

Damkohler. Seperti dapat terlihat pada rumus bilangan Karlovitz ($Ka = \frac{U \sin \theta}{r_f} \cdot \frac{\alpha}{(s_u)^2}$) menjelaskan hubungan antara faktor *stretchrate* dari api dengan difusivitas termal dari aliran LPG serta kecepatan nyala api laminar-nya. Difusivitas termal ($\alpha = \frac{k}{\rho_u \cdot c_p}$) sendiri dipengaruhi oleh konduktivitas termal dari gas, koefisien panas spesifik gas, dan massa jenis gas sebelum terbakar pada temperatur dan tekanan tertentu. Bila hasil bilangan Karlovitz lebih kecil daripada 1 ($Ka < 1$), maka reaksi pembakaran lebih cepat terjadi dan efek turbulensi aliran sangat rendah atau tidak mempengaruhi struktur nyala api sehingga terbentuk aliran gas yang laminar [14]. Sedangkan untuk bilangan Damkohler adalah kebalikan dari bilangan Karlovitz. Bila hasil bilangan Damkohler lebih kecil daripada 1 ($Da < 1$), maka efek turbulensi aliran lebih dominan dibandingkan dari kecepatan reaksi kimia yang terjadi [14]. Tabel 4.1 memperlihatkan besar nilai bilangan hasil perhitungan analitis Damkohler dan Karlovitz yang terjadi pada jarak penetrasi api maksimal dengan debit udara tertentu.

Tabel 4.1 Hasil Perhitungan Analitis Bilangan Damkohler dan Karlovitz

Debit Udara (L/s)	Bilangan Karlovitz (Ka)	Bilangan Damkohler (Da)
0.04	6.484	0.154
0.06	7.212	0.139
0.08	6.968	0.144
0.11	9.953	0.100
0.13	12.190	0.082
0.15	11.251	0.089
0.17	21.148	0.047
0.19	9.405	0.106
0.22	15.654	0.064

Bila dilihat dari nilai-nilai kedua bilangan dimensional pada tabel diatas yakni $Ka > 1$ dan $Da < 1$, maka dapat terbukti bahwa ada pengaruh turbulensi aliran gas pada fenomena api *flashback* dalam penelitian skripsi ini. Hal ini sekaligus menunjukkan efek turbulensi terhadap nyala api yang menjadi terpinlin terlihat dari foto-foto hasil percobaan. Dari tabel diatas dapat diketahui juga bahwa efek turbulensi dipengaruhi juga oleh aliran debit udara. Terlihat pada debit sedikit, nilai Ka tidak sebesar pada debit udara besar.

4.2 HASIL DATA PENGARUH BESAR DEBIT UDARA TERHADAP PERUBAHAN JARAK DAN KECEPATAN *FLASHBACK*

Berikut ini ialah hasil yang didapat dari pengolahan data pada beberapa posisi skala aliran udara dari rotameter P.A. Hilton.

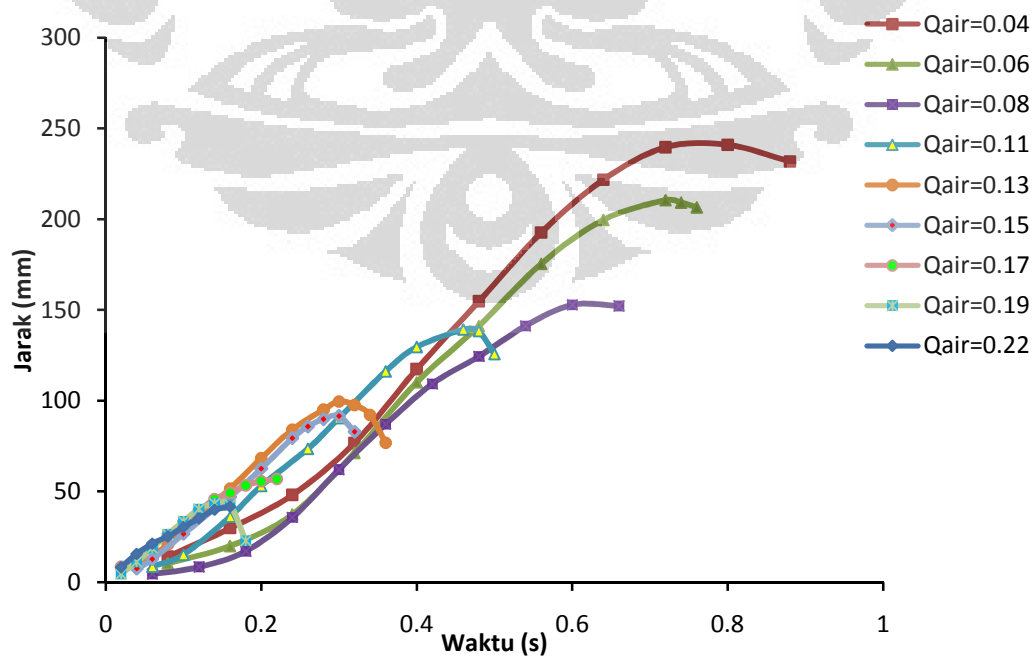
Tabel 4.2 Data Hasil Pengukuran Gambar :

Qudara (L/s)	Titik ke-	t (s)	L <i>Flashback</i> (mm)	u <i>Flashback</i> (mm/s)
0.04	1	0.08	14.20	177.50
	2	0.16	29.86	195.69
	3	0.24	48.12	228.26
	4	0.32	76.81	358.69
	5	0.4	117.39	507.25
	6	0.48	154.78	467.39
	7	0.56	192.61	472.83
	8	0.64	221.74	364.14
	9	0.72	239.57	222.83
	10	0.8	240.87	16.30
	11	0.88	231.74	114.13
0.06	1	0.08	10.44	130.44
	2	0.16	20.00	119.56
	3	0.24	37.39	217.40
	4	0.32	71.30	423.90
	5	0.4	110.15	485.51
	6	0.48	141.16	387.68
	7	0.56	175.36	427.54
	8	0.64	199.57	302.54
	9	0.72	210.44	135.88
	10	0.74	209.13	65.25
	11	0.76	206.52	130.40
0.08	1	0.06	4.49	74.88
	2	0.12	8.41	65.22
	3	0.18	17.10	144.92
	4	0.24	35.65	309.18
	5	0.3	62.03	439.62
	6	0.36	86.96	415.47
	7	0.42	109.28	371.97
	8	0.48	124.35	251.22
	9	0.54	141.16	280.18
	10	0.6	152.75	193.25

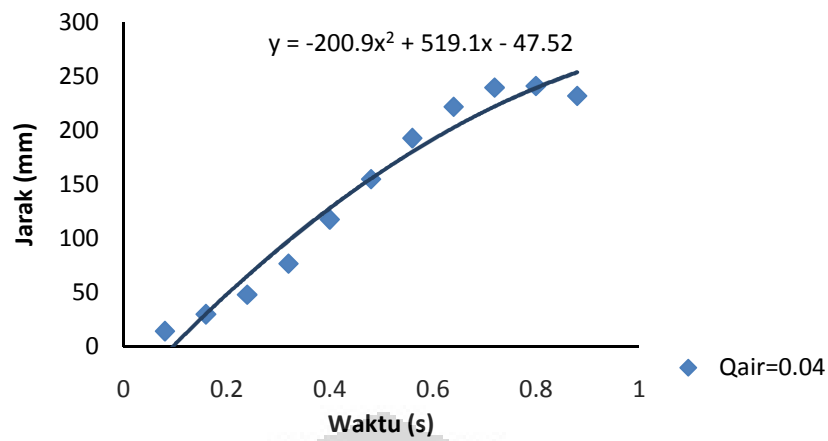
	11	0.66	152.17	9.67
0.11	1	0.06	7.54	125.60
	2	0.1	16.81	231.90
	3	0.16	40.58	396.13
	4	0.2	56.23	391.30
	5	0.26	84.06	463.77
	6	0.3	103.77	492.75
	7	0.36	128.12	405.80
	8	0.4	139.71	289.85
	9	0.46	144.93	86.97
	10	0.48	135.07	492.80
	11	0.5	120.58	724.60
0.13	1	0.04	9.28	231.88
	2	0.08	20.87	289.88
	3	0.12	36.23	384.05
	4	0.16	51.59	384.05
	5	0.2	68.41	420.30
	6	0.24	84.06	391.30
	7	0.28	95.07	275.35
	8	0.3	99.57	224.90
	9	0.32	97.68	94.50
	10	0.34	92.17	275.50
	11	0.36	76.81	768.00
0.15	1	0.04	7.54	188.40
	2	0.06	12.75	260.90
	3	0.1	26.67	347.83
	4	0.14	40.58	347.83
	5	0.16	46.96	318.85
	6	0.2	62.61	391.30
	7	0.24	79.42	420.28
	8	0.26	85.80	318.85
	9	0.28	89.86	202.90
	10	0.3	91.59	86.95
	11	0.32	82.90	434.75
0.17	1	0.02	8.70	434.80
	2	0.04	14.49	289.85
	3	0.06	20.29	289.85
	4	0.08	26.09	289.85
	5	0.1	33.04	347.80
	6	0.12	39.42	318.85

	7	0.14	45.80	318.85
	8	0.16	49.28	173.90
	9	0.18	53.33	202.90
	10	0.2	55.65	115.95
	11	0.22	56.81	58.00
0.19	1	0.02	4.65	232.35
	2	0.04	11.30	282.60
	3	0.06	18.84	314.02
	4	0.08	26.38	329.71
	5	0.1	33.62	336.23
	6	0.12	40.29	335.75
	7	0.14	43.48	310.56
	8	0.16	42.61	266.31
	9	0.18	22.90	127.22
0.22	1	0.02	8.26	413.05
	2	0.04	15.65	369.55
	3	0.06	21.30	282.60
	4	0.08	25.22	195.65
	5	0.1	30.44	260.90
	6	0.12	35.22	239.10
	7	0.14	40.00	239.15
	8	0.16	41.74	86.95

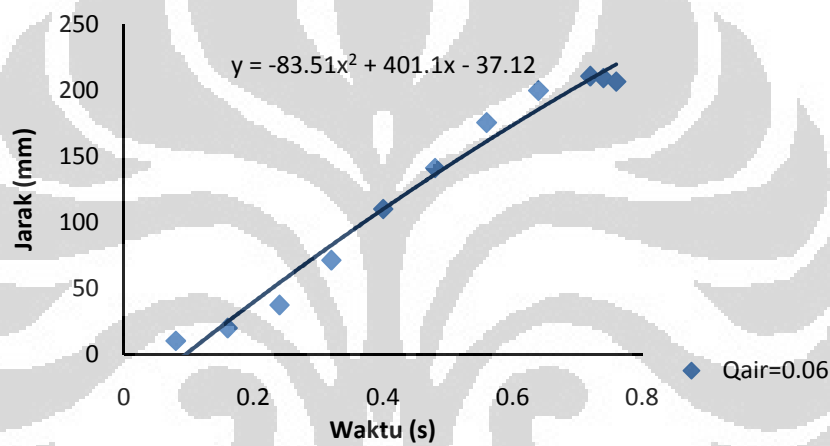
4.2.1 Grafik dan Analisis Perubahan Jarak Terhadap Waktu



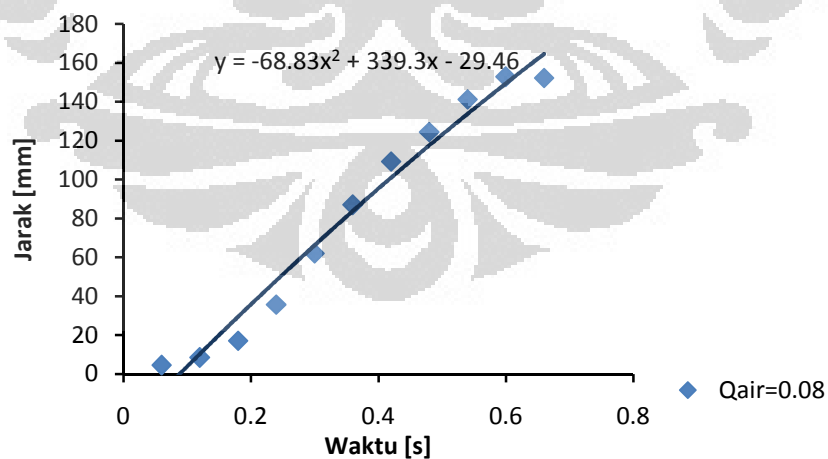
Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Jarak *Flashback* terhadap Waktu



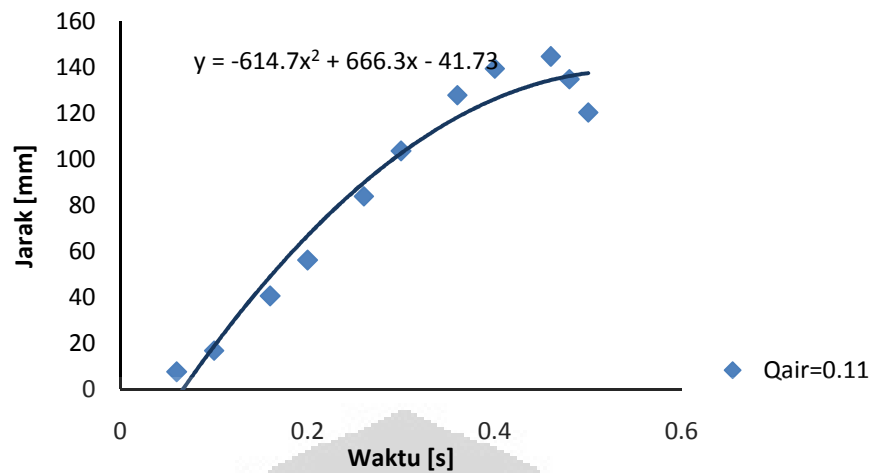
Gambar 4.2a Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada Qudara = 0.04 L/s



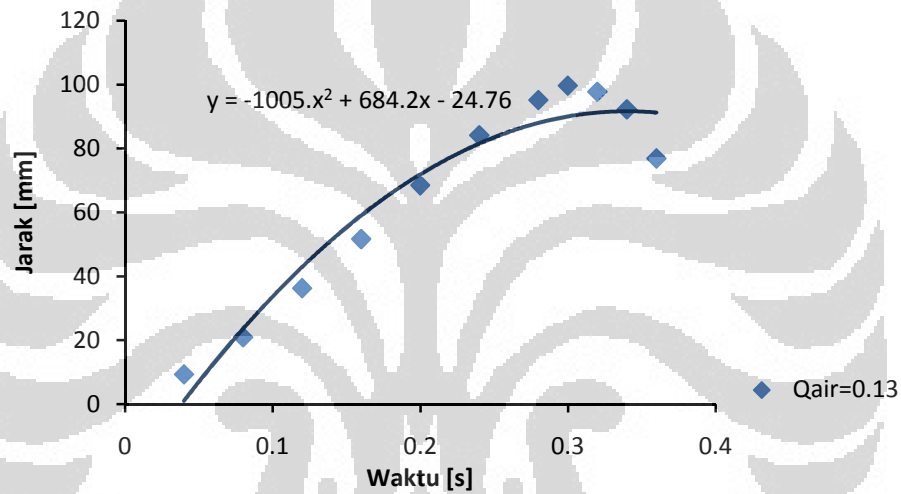
Gambar 4.2b Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada Qudara = 0.06 L/s



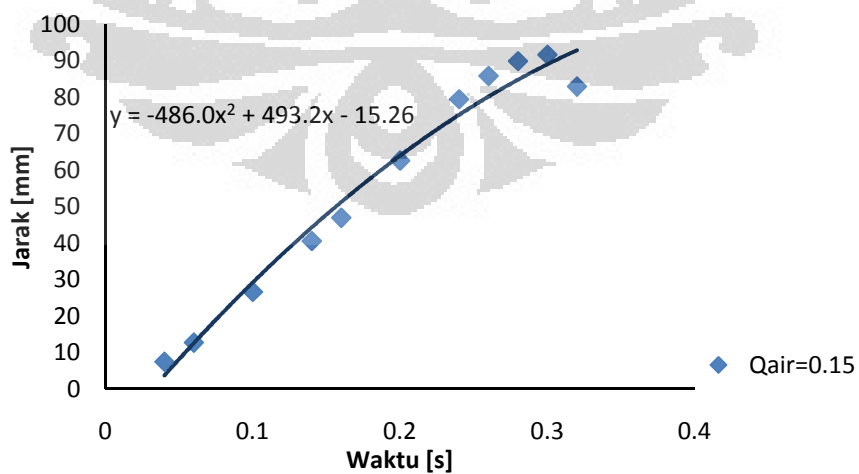
Gambar 4.2c Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada Qudara = 0.08 L/s



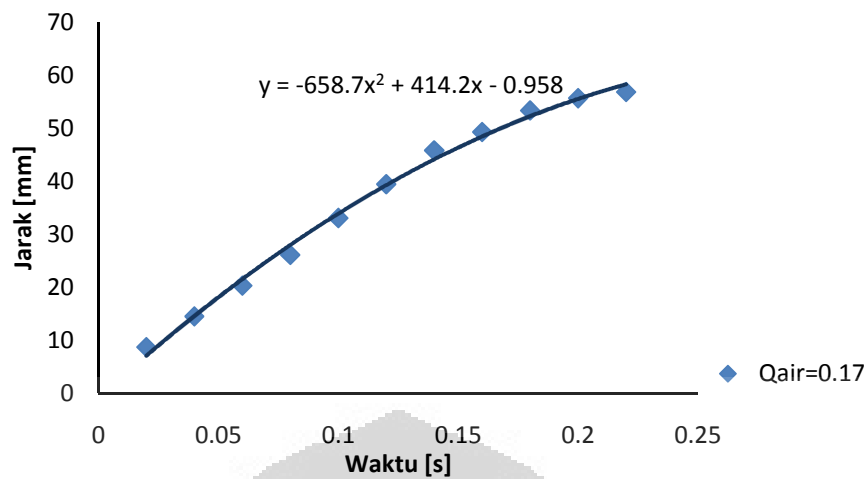
Gambar 4.2d Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada Qudara = 0.11 L/s



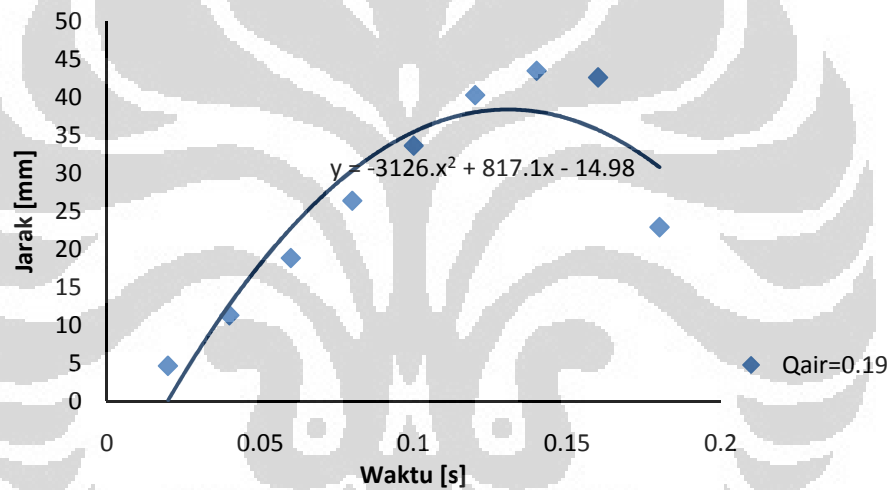
Gambar 4.2e Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada Qudara = 0.13 L/s



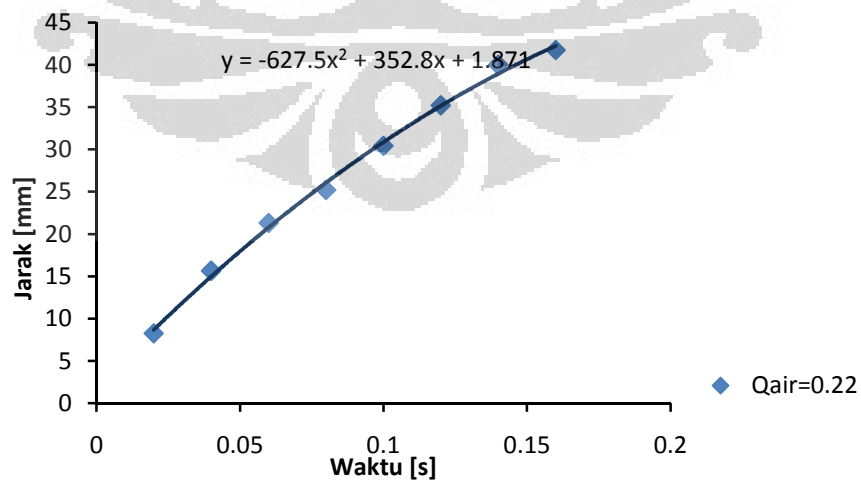
Gambar 4.2f Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada Qudara = 0.15 L/s



Gambar 4.2g Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada Qudara = 0.17 L/s



Gambar 4.2h Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada Qudara = 0.19 L/s



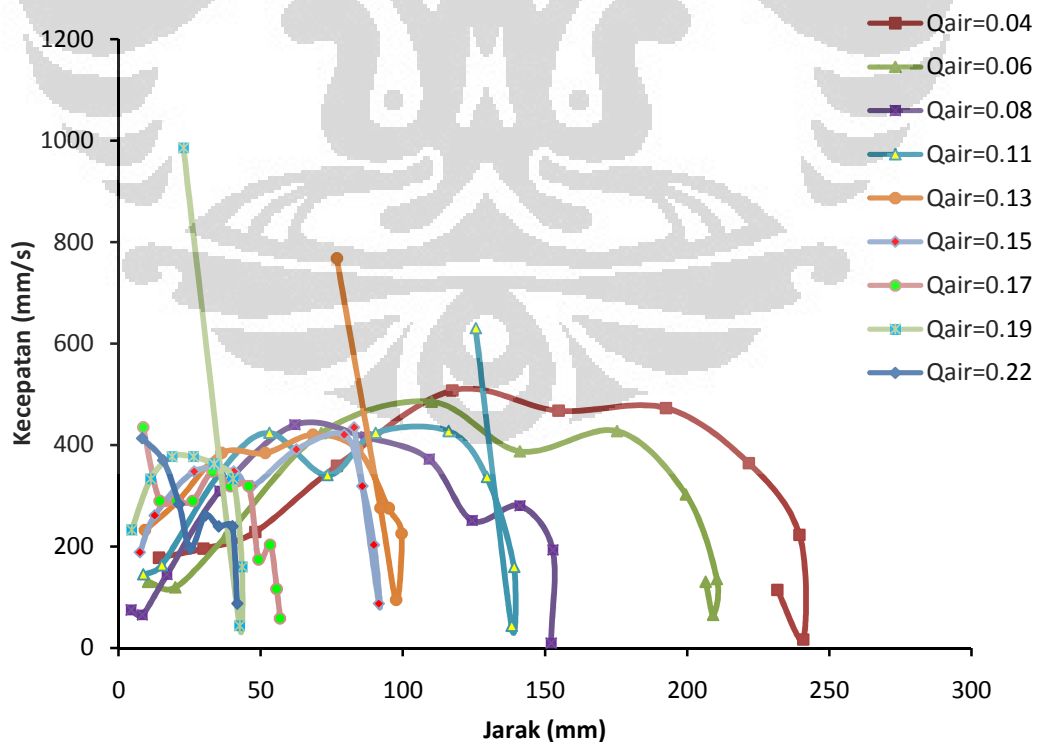
Gambar 4.2i Grafik Perubahan Jarak Terhadap Waktu Pada Qudara = 0.22 L/s

Dari grafik perbandingan jarak api *Flashback* dengan waktu diatas, dapat terlihat bahwa perubahan jaraknya tidak bersifat linear pada semua variasi aliran udaranya. Terlihat pada sejumlah grafik bahwa ada yang kemiringan kurvanya bertambah menjadi lebih curam namun ada pula kalanya melandai pada titik-titik tertentu. Hal ini menandakan bahwa terdapat adanya perbedaan kecepatan di setiap titik perpindahan jaraknya dalam waktu tertentu.

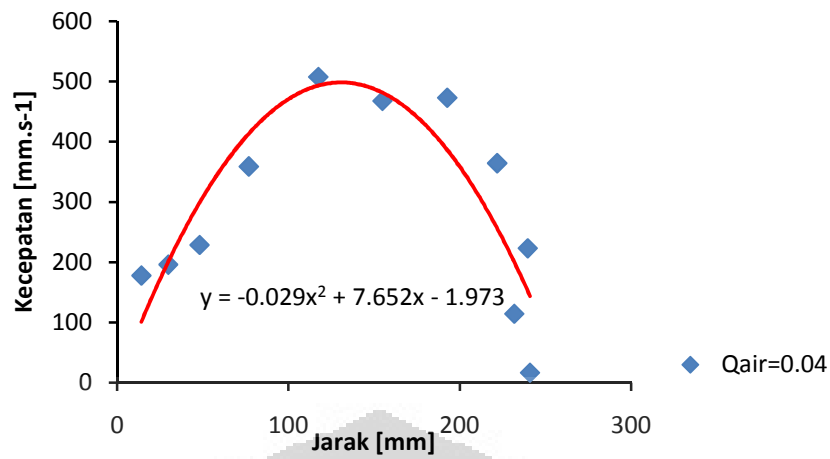
Dari sisi lama waktu *Flashback*nya, terlihat juga bahwa rentang waktu *Flashback* pun semakin cepat selesai seiring dengan bertambahnya jumlah aliran udara yang masuk ke dalam *burner*. Dari grafik terlihat bahwa waktu terlama terjadinya *Flashback* adalah pada debit udara (Q_{udara}) sebesar 0,04 Ltr/s dan waktu tercepat adalah pada debit aliran udara 0,22 Ltr/s.

Kemudian, fenomena lain yang terlihat adalah pada waktu di titik akhir *Flashback* terdapat penurunan kembali jarak turunnya setelah sebelumnya mencapai jarak maksimal. Interval waktunya pun memendek sesaat setelah api mencapai jarak maksimum sebelum padam.

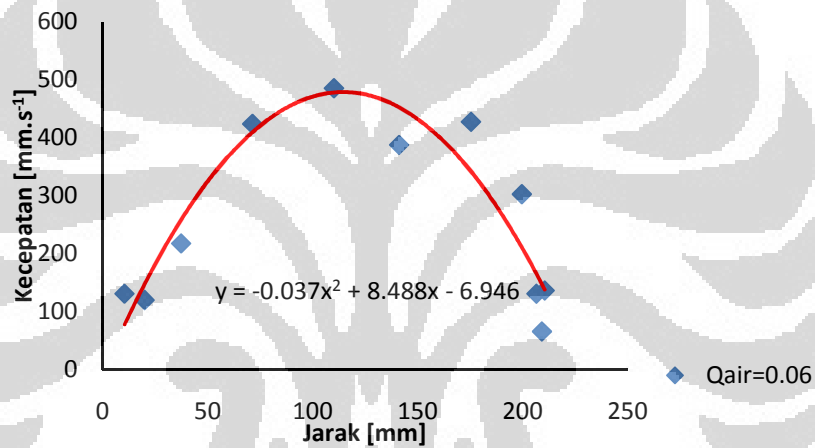
4.2.2 Grafik dan Analisis Perubahan Kecepatan terhadap Jarak Tempuh



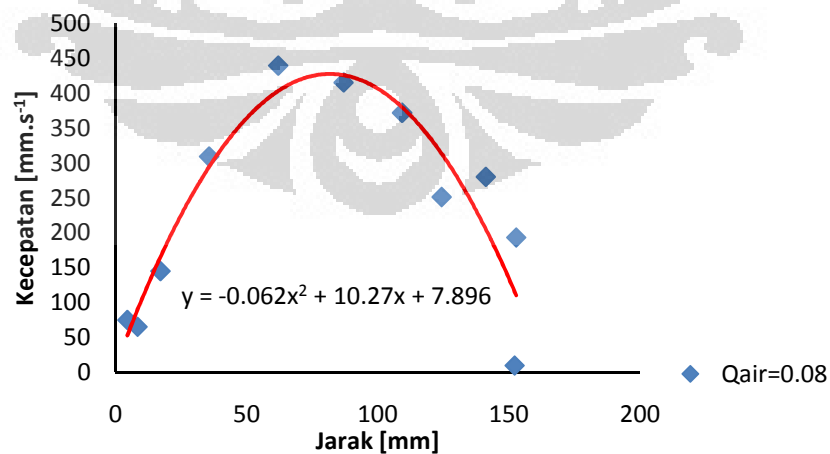
Gambar 4.3 Grafik Perubahan Kecepatan *Flashback* terhadap Jarak Gabungan



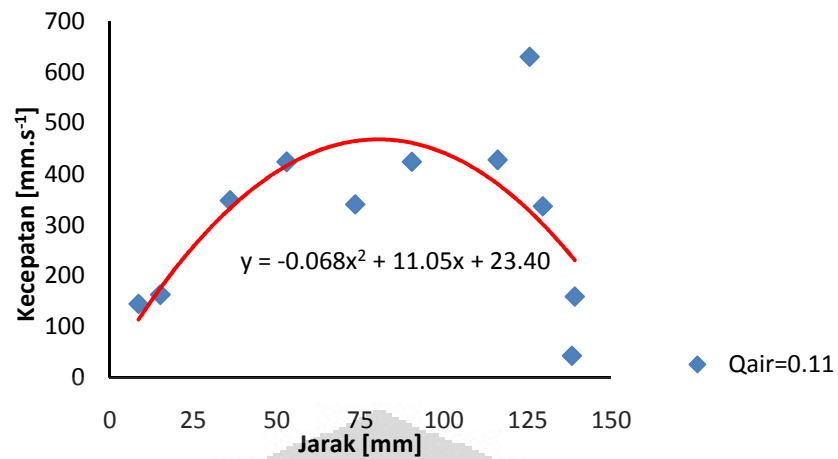
Gambar 4.3a Grafik Perubahan Kecepatan *Flashback* terhadap Jarak Tempuh pada Qudara = 0.04 L/s



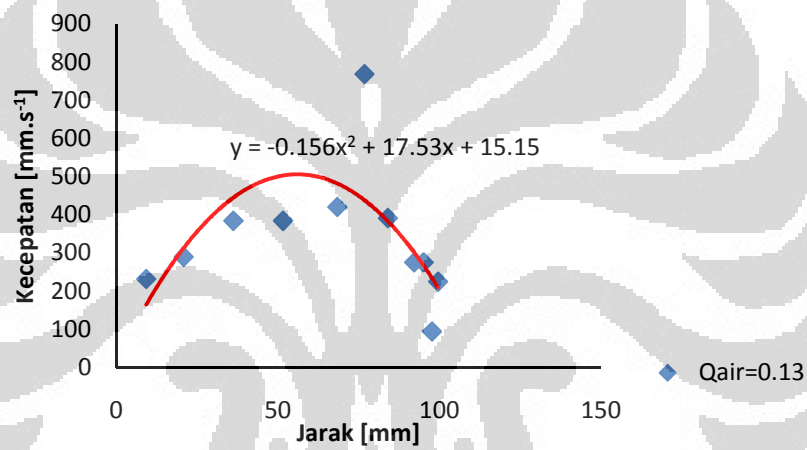
Gambar 4.3b Grafik Perubahan Kecepatan *Flashback* terhadap Jarak Tempuh pada Qudara = 0.06 L/s



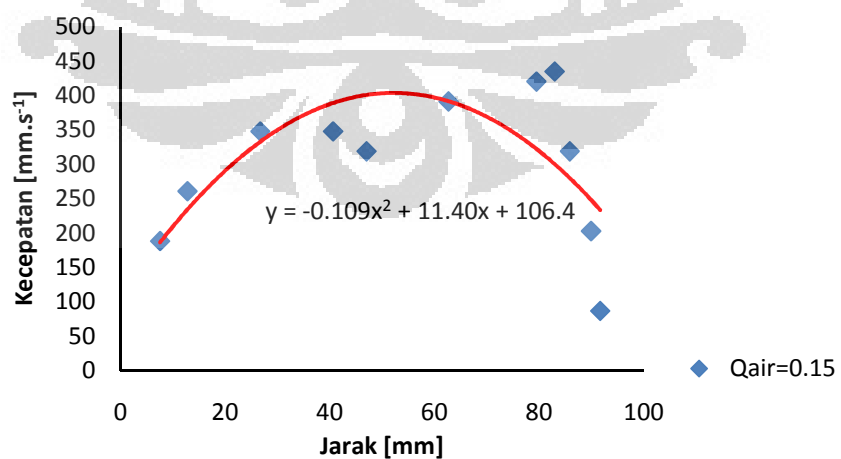
Gambar 4.3c Grafik Perubahan Kecepatan *Flashback* terhadap Jarak Tempuh pada Qudara = 0.08 L/s



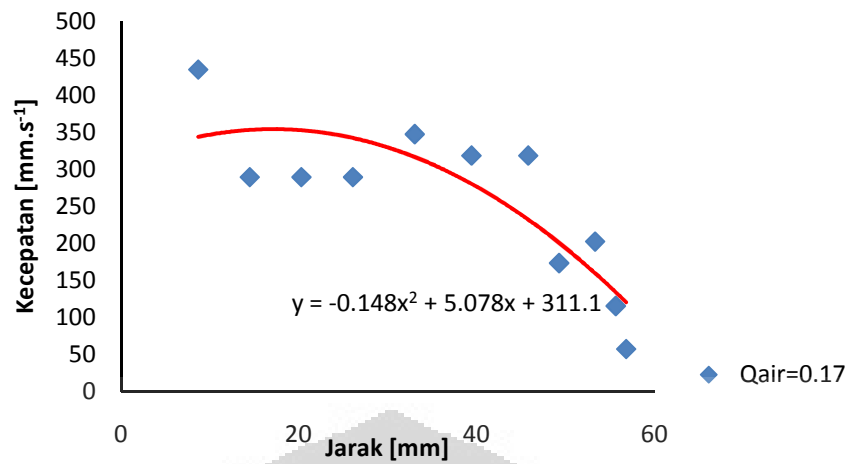
Gambar 4.3d Grafik Perubahan Kecepatan *Flashback* terhadap Jarak Tempuh pada Qudara = 0.11 L/s



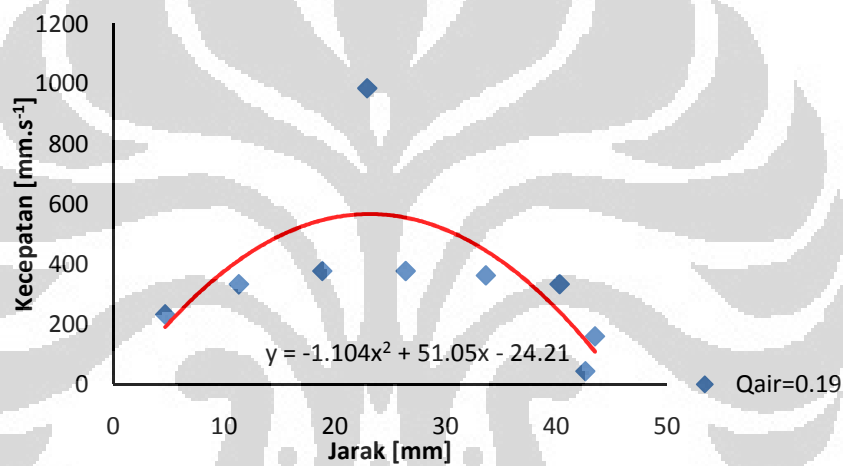
Gambar 4.3e Grafik Perubahan Kecepatan *Flashback* terhadap Jarak Tempuh pada Qudara = 0.13 L/s



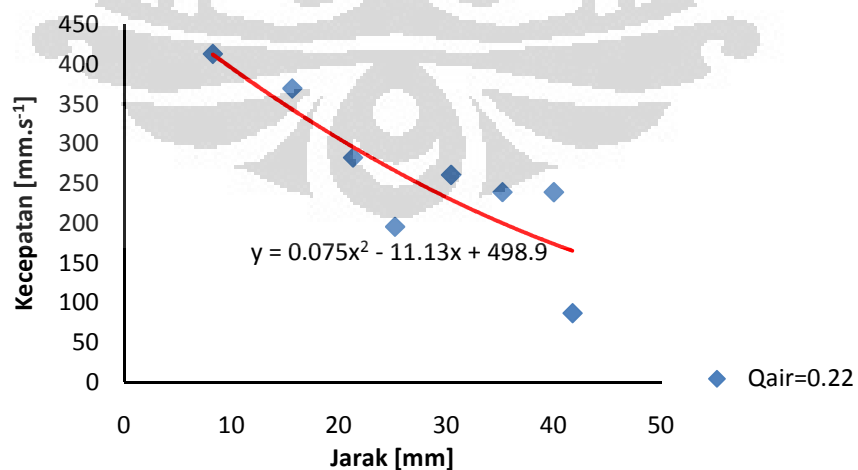
Gambar 4.3f Grafik Perubahan Kecepatan *Flashback* terhadap Jarak Tempuh pada Qudara = 0.15 L/s



Gambar 4.3g Grafik Perubahan Kecepatan *Flashback* terhadap Jarak Tempuh pada Qudara = 0.17 L/s



Gambar 4.3h Grafik Perubahan Kecepatan *Flashback* terhadap Jarak Tempuh pada Qudara = 0.19 L/s



Gambar 4.3i Grafik Perubahan Kecepatan *Flashback* terhadap Jarak Tempuh pada Qudara = 0.22 L/s

Terlihat pada grafik-grafik perubahan kecepatan diatas bahwa perubahan kecepatan yang terjadi tidak konstan dan berubah-ubah pada setiap titik. Sebagian besar dari kurva yang terbentuk menunjukkan adanya percepatan dan perlambatan secara tiba-tiba pada saat api *Flashback* menempuh jarak tertentu.

Selain itu, terdapat juga titik membalik dari *Flashback* dimana api yang sudah turun mencapai jarak maksimumnya kembali menyambar naik sedikit sebelum akhirnya padam karena suplai bahan bakar yang habis. Terlihat sekali pada beberapa grafik, dengan *flowrate* udara besar, pada saat menyambar balik terjadi peningkatan kecepatan secara tajam kembali kearah mulut *burner*. Tetapi pada grafik-grafik yang *flowrate* udaranya sedikit, kecepatan api hanya naik sedikit lalu padam.

4.3 DATA DAN ANALISIS HUBUNGAN ANTARA ALIRAN UDARA DAN BURNING LOAD TERHADAP *DEPTH OF PENETRATION* DAN KECEPATAN *FLASHBACK* MAKSIMUM

Tabel 4.3 Hasil Pengolahan Data Jarak Penetrasi Maksimum

Skala Rota-meter	Q_{udara} (L/s)	Q_{fuel} (m^3/s)	Burning Load	Jarak Penetrasi Maks. (mm)	Kecepatan Maks. (mm/s)	Kecepatan Sambaran Balik (mm/s)
0	0.04	9.43E-07	0.52	240.87	507.25	114.13
1	0.06	1.39E-06	0.76	210.44	485.51	130.4
2	0.08	1.84E-06	1.01	152.75	439.52	9.67
3	0.11	2.29E-06	1.26	139.13	630.45	630.45
4	0.13	2.74E-06	1.51	99.57	768.00	768
5	0.15	3.19E-06	1.75	72.46	434.75	434.75
6	0.17	3.64E-06	2.00	56.81	434.80	58
7	0.19	4.09E-06	2.25	43.48	985.50	985.5
8	0.22	4.54E-06	2.49	41.74	413.05	86.95

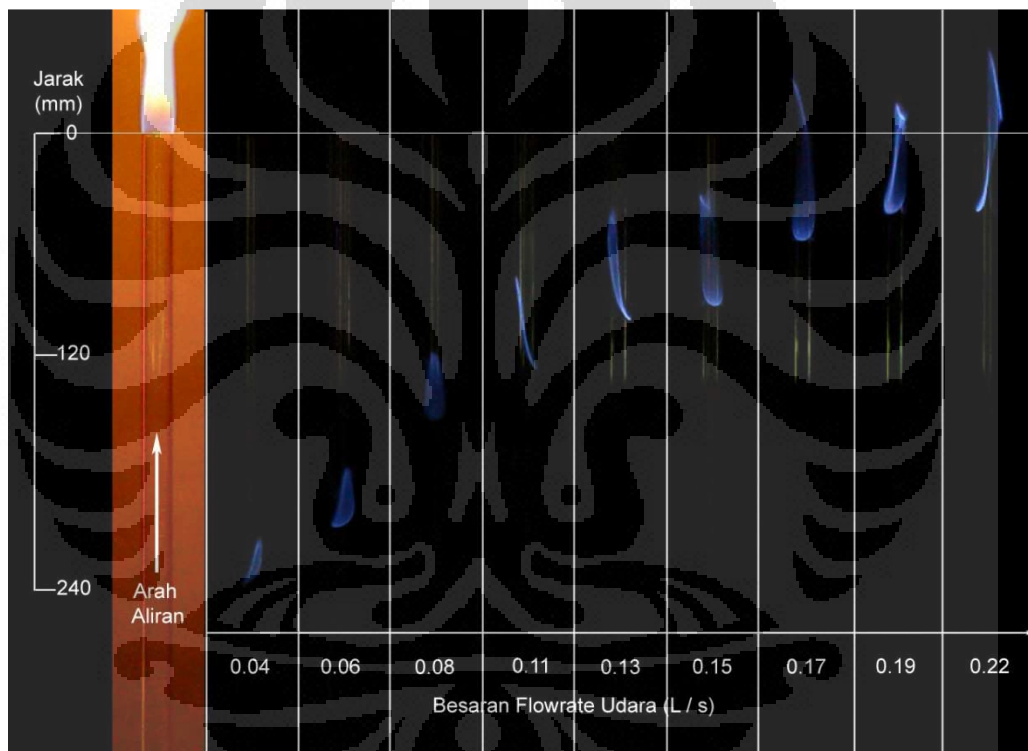
Pengolahan data untuk mendapatkan perbandingan efek perubahan jarak terhadap *Burning Load* dan *flowrate* udara dihitung berdasarkan data yang diketahui seperti berikut :

1. Batas Bawah *Lean Flammability Limit* LPG/udara : 2,1 % sehingga didapat besar perbandingan AFR : 47,6/1

2. *Lower Heating Value* (LHV) LPG rata-rata adalah sebesar: 46,03 MJ /kg
3. Luasan lubang keluaran *Burner* = 176,667 mm²

Pemilihan asumsi udara-fuel ratio minimal sebesar 47,6 : 1 adalah berdasarkan pengamatan fenomena *Flashback* ini yang hanya terjadi bila bahan bakar sudah sangat sedikit sehingga campurannya sudah sedemikian kurus. Hal ini juga berdasarkan pengamatan warna nyala api yang terjadi yaitu warna biru gelap sehingga dapat diketahui jenisnya adalah *lean-premixed*.

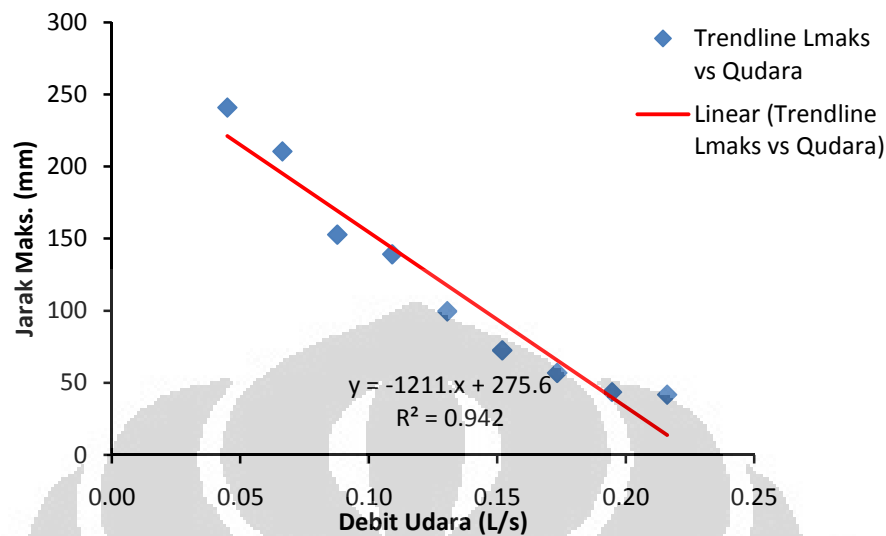
Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat dari gambar dibawah ini, diurutkan mulai dari aliran udara paling sedikit ke yang paling banyak :



Gambar 4.4 Foto Urutan Jarak Maksimum *Flashback* Berdasarkan Besaran Debit Aliran Udara

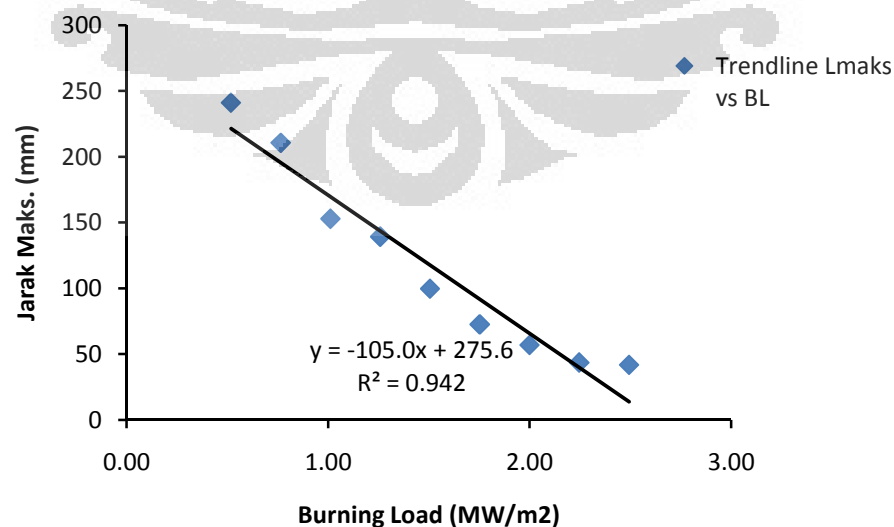
Dari foto-foto inilah kemudian diukur jarak titik api terjauh *Flashback*-nya satu persatu untuk di-plot di dalam bentuk grafik. Dari sini didapatkan dua macam grafik yakni perbandingan jarak maksimal terhadap aliran udara dan karena *flowrate* bahan bakarnya diketahui dari hasil perhitungan AFR, maka didapat pula grafik perbandingan jarak dengan Burning Load-nya.

4.3.1 Grafik-grafik Perbandingan Jarak Penetrasi Maksimal



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Perubahan *Flowrate* Udara dengan Jarak Maksimal

Berdasarkan grafik diatas, dapat terlihat dengan jelas bahwa *flowrate* udara sangatlah mempengaruhi jarak nyala api *Flashback*. Terlihat bahwa tren dari panjang jarak turunnya api ke dalam burner-nya adalah semakin panjang bilamana aliran udaranya semakin sedikit. Jarak api *Flashback* terjauh terdapat pada debit udara yang paling sedikit yakni pada Qudara : 0.04 L/s sedangkan yang terpendek adalah pada Qudara : 0.22 L/s.

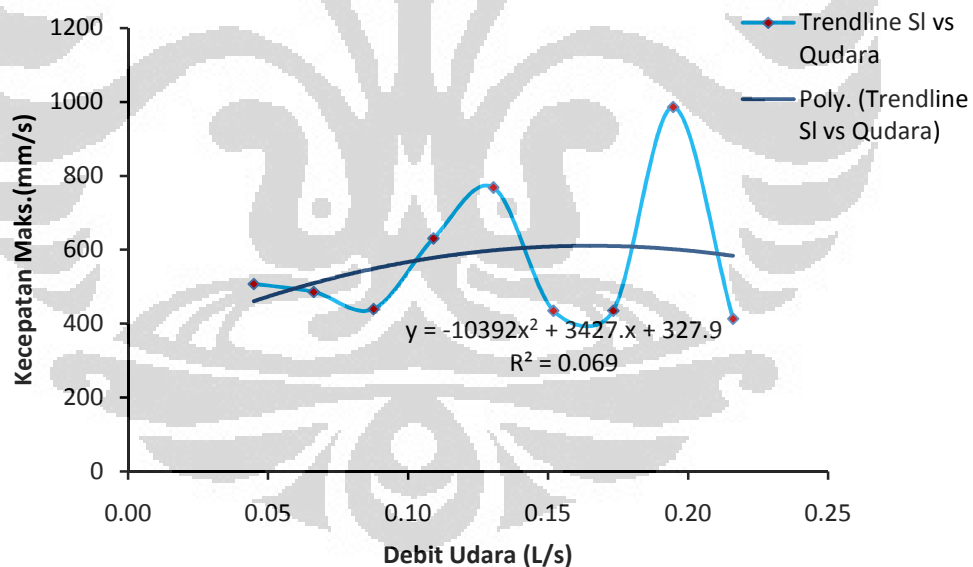


Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Jarak *Flashback* Terhadap Burning Load

Untuk grafik perbandingan jarak maksimum dengan *Burning Load*, terlihat kesamaan *trendline* seperti yang terdapat pada grafik perbandingan jarak dengan debit udara pada Gambar 4.6. Jarak penetrasi *flashback* terjauh terdapat pada *Burning Load* (BL) = 0,52 MW/m² dan terdekat adalah pada BL = 2,49 MW/m².

Terlihat bahwa tren dari kedalaman jarak penetrasi api ke dalam burner-nya menunjukkan semakin kecil *Burning Load*-nya, semakin dalam jangkauan jarak penetrasi api *flashback* itu bergerak mendekati pangkal burner. Hal ini dapat disebabkan karena korelasi antara besar aliran udara dan bahan bakar dari persamaan AFR yang menentukan besaran rasio campuran juga turut mempengaruhi jangkauan *flashback*. Seperti sudah diketahui sebelumnya bahwa pada campuran gemuk jumlah debit udaranya lebih sedikit, maka hal ini menjadi sebanding dengan kedua grafik yang dihasilkan.

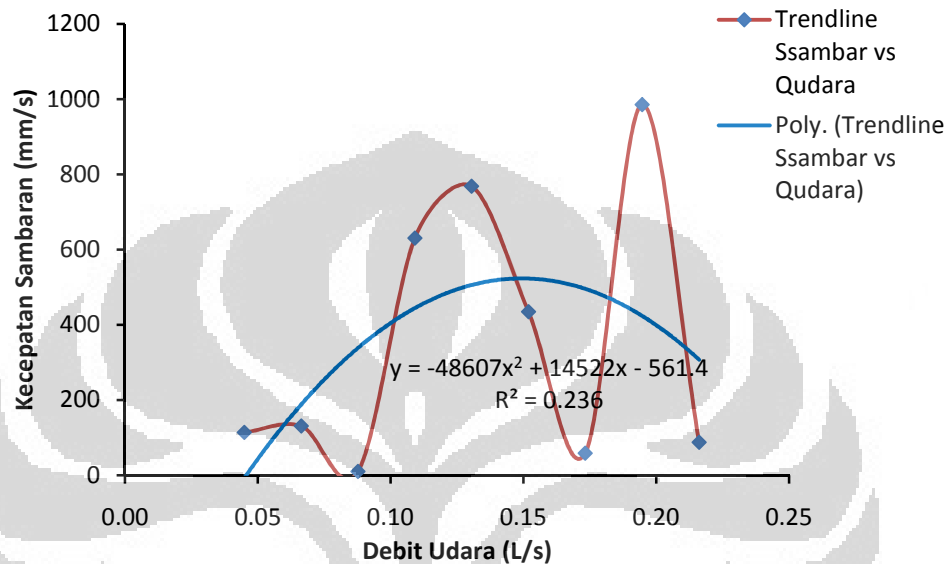
4.3.2 Grafik-grafik Perbandingan Perubahan Kecepatan



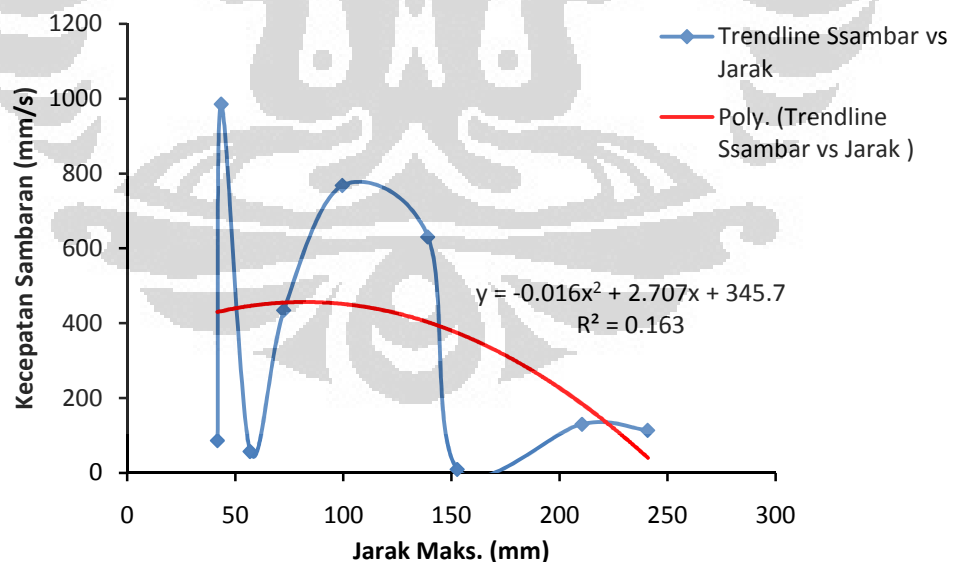
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Kecepatan Maksimal Terhadap Perubahan *Flowrate* Udara

Untuk grafik perbandingan kecepatan maksimal *Flashback* dengan perubahan *flowrate* udara pada gambar 4.8, Besaran *flowrate* udara juga mempengaruhi kecepatan penetrasi api *Flashback*. Terlihat dari grafik bahwa untuk kecepatan maksimum *Flashback* ini naik-turun mulai dari debit udara sedikit, kemudian naik tajam pada debit udara sedang dan lalu turun pada saat

debit udara banyak. Pada beberapa aliran debit udara, kecepatan yang paling cepat terjadi ketika api mulai menyambar balik kembali ke mulut burner. Kecepatan *Flashback* tercepat terdapat pada *flowrate* udara pada Qudara : 0.19 L/s sedangkan yang terendah adalah pada Qudara : 0.22 L/s.



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Kecepatan Sambaran Terhadap Perubahan *Flowrate* Udara



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Kecepatan Sambaran Terhadap Jarak Maksimum

Pada grafik perbandingan antara kecepatan sambaran terhadap perubahan *flowrate* udara diatas, hampir sama dengan pada grafik kecepatan maksimal,

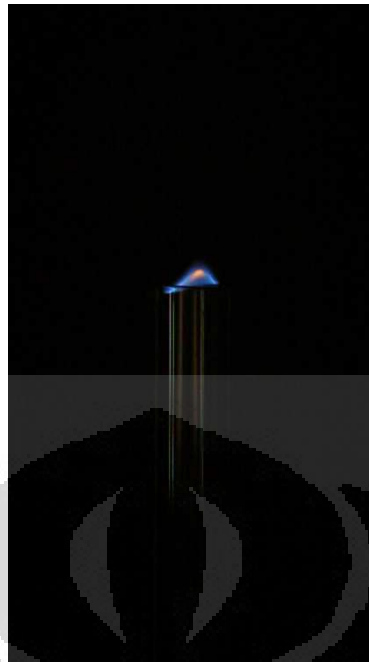
terlihat bahwa kecepatan sambaran juga berbeda-beda dengan pola naik-turun tidak menentu. Kecepatan sambaran tercepat terdapat pada *flowrate* udara pada Qudara : 0.19 L/s sedangkan yang terendah adalah pada Qudara : 0.08 L/s.

Lain halnya dengan grafik perbandingan antara kecepatan sambaran terhadap perubahan jarak. Terlihat bahwa tren dari grafik ini cenderung turun yang artinya dengan semakin bertambah dalam jarak penetrasinya, maka kecepatan sambarannya semakin turun meskipun terdapat pola naik-turun pada titik-titik tertentu. Hasil plot pada grafik menunjukkan kecepatan sambaran tercepat terdapat pada besaran jarak $L = 43,48$ mm sedangkan yang terendah adalah pada $L = 152,7$ mm.

Adanya perubahan kecepatan maksimum maupun kecepatan sambaran balik secara tidak teratur pada fenomena *flashback* di dalam eksperimen ini dapat disebabkan karena beberapa faktor, diantaranya : (a) Adanya efek percepatan dan perlambataan sesaat pada fenomena *flashback* yang bisa disebabkan karena gesekan antara *flame front* beserta aliran gas dengan dinding tabung burner. (b) Adanya perubahan-perubahan bentuk nyala api sebagai hasil dari proses pembakaran yang tidak stabil sehingga secara tidak langsung mempengaruhi hasil pengukuran gambar.

Untuk fenomena terjadinya suara letupan / 'extinction noise' pada saat sambaran balik [6], dapat disebabkan dari kecepatan membalik api pada aliran debit udara tertentu yang meningkat tajam secara mendadak. Meskipun dalam eksperimen ini tidak dilakukan pengukuran tingkat suara letupan yang dihasilkan, secara pendengaran langsung dapat diketahui bahwa yang menghasilkan suara terbesar adalah pada saat kecepatan membalik yang tertinggi dari grafik pada gambar 4.9 dan 4.10 yakni pada Qudara = 0,19 L/s dengan $L = 43,48$ mm.

Namun hal yang menarik adalah pada saat tidak ada aliran udara sama sekali atau pada kondisi tertutup total, yang terjadi adalah api tidak turun ke dalam *burner* melainkan diam diatas mulut keluaran tabung. Meskipun pada saat aliran bahan bakar sudah ditutup, juga tetap tidak terjadi *Flashback*. Fenomena ini menjadi tambahan data pengamatan yang didapat meskipun sebelumnya sudah diketahui bahwa semakin sedikit aliran udara, semakin panjang nyala api turunnya.



Gambar 4.10 Nyala Api Pada Kondisi Tanpa Aliran Udara ($Q_{udara} = 0$)

Pada pengamatan fenomena api pada aliran udara 0, sebelum aliran bahan bakar ditutup juga terlihat pula dari nyala api yang terbentuk adalah berupa api difusi dan bukannya api premix dari ciri warna pijar merah jingganya. Api difusi terbentuk dikarenakan hanya ada aliran bahan bakar saja yang keluar dari tabung burner sehingga proses pencampuran baru terjadi setelah bahan bakar bersentuhan dengan udara luar bersamaan pada region nyala api. Barulah kemudian pada saat bahan bakar ditutup apinya secara perlahan berubah warna menjadi biru gelap. Namun, api hanya melekat saja di tepi lubang keluaran burner hingga padam. Hal ini dapat disebabkan karena nyala api yang terjadi setelah bahan bakar ditutup hanya menghabiskan sisa bahan bakar yang keluar saja hingga akhirnya padam. Hal ini juga sekaligus membuktikan bahwa *flashback* hanya terjadi pada burner tipe *premixed* saja dengan terlebih dahulu terdapat campuran bahan bakar-oksidator (*Oxy-fuel*) pada saluran pencampurnya.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Dari hasil pengolahan data dan pengamatan langsung fenomena api *flashback* di dalam penelitian ini, kesimpulan yang didapat adalah :

1. Fenomena api *flashback* hanya dapat terjadi bila terdapat aliran udara, meskipun dalam jumlah yang sedikit.
2. Jenis api yang terjadi pada *flashback* adalah berjenis *lean-premixed* terlihat dari ciri-ciri warna biru tuanya.
3. Pada campuran bahan-bakar dengan udara yang semakin gemuk atau dengan debit aliran udara pembakaran sedikit, jarak sambaran api *flashback* (*depth of penetration*) semakin jauh ke dalam *burner*.
4. Terdapat efek percepatan dan perlambatan sesaat yang tidak konstan / berubah-ubah pada nyala api *flashback*.

5.2 SARAN

Dari penelitian ini, ada beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya yakni antara lain sebagai berikut :

1. Penggunaan alat pengukur bahan bakar (*flowmeter*) presisi yang dapat mengukur pada rentang skala aliran yang sangat rendah.
2. Penggunaan alat perekam *high speed camera* dan memiliki kemampuan koreksi pencahayaan yang lebih baik untuk memperjelas dan mengurangi efek *noise* pada gambar apinya.
3. Penggunaan tabung burner dengan ukuran diameter dan bentuk yang berbeda-beda untuk mendapatkan variasi *burning load*-nya.
4. Dilakukan pengukuran temperatur nyala api *flashback* dan temperatur gas yang belum terbakar pada daerah *flame front*-nya.

DAFTAR REFERENSI

- [1]. El-Mahallawy, Fauzy and Habik, Saad El-Din. *Fundamentals and Technology of Combustion*. Oxford : Elsevier Science Ltd, 2002.
- [2]. Kazanstsev, E. I. *Industrial Furnaces*. Moscow : Mir Publishers, 1977.
- [3]. Kuo, Kenneth K. *Principle of Combustion*. Canada : John Wiley and Sons, 1986.
- [4]. Sharma, S.P., Mohan Chander. *Fuels and Combustion*. New Delhi : Tata McGrawHill Publishing Company Ltd., 1984.
- [5]. Turns, Stephen R. *An Introduction to Combustion Concepts and Applications* 2nd Edition. Pennsylvania : McGraw Hill, 2000.
- [6]. Williams, Forman A. *Combustion Theory*. Princeton : Benjamin/Cummings Publishing, 1985.
- [7]. *Quenching of Flame and Flashback on Shut-off with Gas Appliance Burner*. Wilson, C. W. Baltimore : American Chemical Society, 1958.
- [8]. Experimental and Numerical Study of Premixed Flame Flashback. V. Kurdyumov, E. Fernandez Tarrazo, et.al. s.l. : *Proceedings of the Combustion Institute 31*, 2007, 1275-1282.
- [9] Karlovitz Number for Predicting a Flame Lift-Up on Propane Combustion. I Made Kartika Dhiputra, Eko Warsito, Cokorda Prapti Mahandari. *Proceeding of The 1st International Meeting on Advances in Thermofluid*, UTM Johor, 2008.
- [10].<http://www.dpreview.com/news/2009/10/20/canon1d4> Akses : Selasa, 12 Juni 2012
- [11].http://wn.com/diffusion_flame?orderby=relevance&upload_time=all_time. Akses: Selasa, 12 Juni 2012.
- [12].Komposisi LPG Sesuai Spesifikasi dan Standar Keselamatan. (2009).Akses: Rabu,13 Juni 2012. <http://www.bumn.go.id/>
- [13].<http://www.awsgroup.co.za/data/L.P.G.pdf>. Akses : Jumat,15 Juni 2012
- [14] *Karlovitz Number*. Akses: Jumat, 13 Juli 2012. MediaWiki. http://www.cfd-online.com/Wiki/Karlovitz_number.

LAMPIRAN

Lampiran 1 : Menghitung Bilangan Karlovitz (Ka)

$$Ka = \frac{U \sin \theta}{r_f} \cdot \frac{\alpha}{(S_u)^2}$$

Sumber Jurnal :

Karlovitz Number for Predicting a Flame Lift-Up on Propane Combustion. I Made Kartika Dhiputra, Eko Warsito, Cokorda Prapti Mahandari. *Proceeding of The 1st International Meeting on Advances in Thermofluid*, UTM Johor, 2008.

Dimana, U = kecepatan aliran campuran bahan bakar dan udara, (m/s),

θ = sudut puncak dari nyala,

r_f = radius nyala (m),

α = difusivitas termal dari gas (m^2/s)

Contoh Perhitungan :

- Menghitung Difusivitas termal

Asumsi : Data dari REFPROP pada P gas = 1,03 bar (tekanan keluar regulator) dan T LPG yang belum terbakar = 27°C

1. $k_{LPG} : 0,01732 \text{ W/mK}$

2. $C_{p_{LPG}} : 1,724 \text{ kJ/kgK}$

3. $\rho_{LPG} : 2,116 \text{ kg/m}^3$

$$\alpha = \frac{k}{\rho_u \cdot C_p} = \frac{0,01732}{2,116 \cdot 1,724} = 0,00475 \text{ m}^2/s$$

- Menghitung U

$$U = \frac{4 Q_f}{\pi \cdot D_b^2} = \frac{4 (4,49 \cdot 10^{-5} + 9,43 \cdot 10^{-7})}{\pi \cdot (0,015)^2} = 0,26 \text{ m/s}$$

Dimana, Q_f = debit gabungan udara dan bahan bakar (m^3/s),

D_b = Diameter dari burner (m)

- Menghitung $\sin \theta$

Hasil Pengukuran Gambar Nyala Api :

1. Tinggi nyala api (h_f) = 23,9 mm = 0,0239 m
2. Radius nyala api (r_f) = 7,5 mm = 0,0075 m

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{h_f}{\sqrt{h_f^2 + r_f^2}} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{0,0239}{\sqrt{0,0239^2 + 0,0075^2}} \right) = 72,57^\circ$$

- Menghitung S_u (Kecepatan Nyala Api , m/s)

$$S_u = \frac{2 Q_f}{\pi \cdot r_f \sqrt{h_f^2 + r_f^2}} = \frac{2(4,49 \cdot 10^{-5} + 9,43 \cdot 10^{-7})}{\pi \cdot 0,0075 \sqrt{0,0239^2 + 0,0075^2}} = 0,16 \text{ m/s}$$

- Menghitung Bilangan Ka

$$Ka = \frac{U \sin \theta}{r_f} \cdot \frac{\alpha}{(S_u)^2}$$

$$Ka = \frac{0,26 \sin 72,57^\circ}{0,0075} \cdot \frac{0,00475}{(0,16)^2} = 6,48$$

- Menghitung bilangan Damkohler, merupakan kebalikan dari bilangan Karlovitz

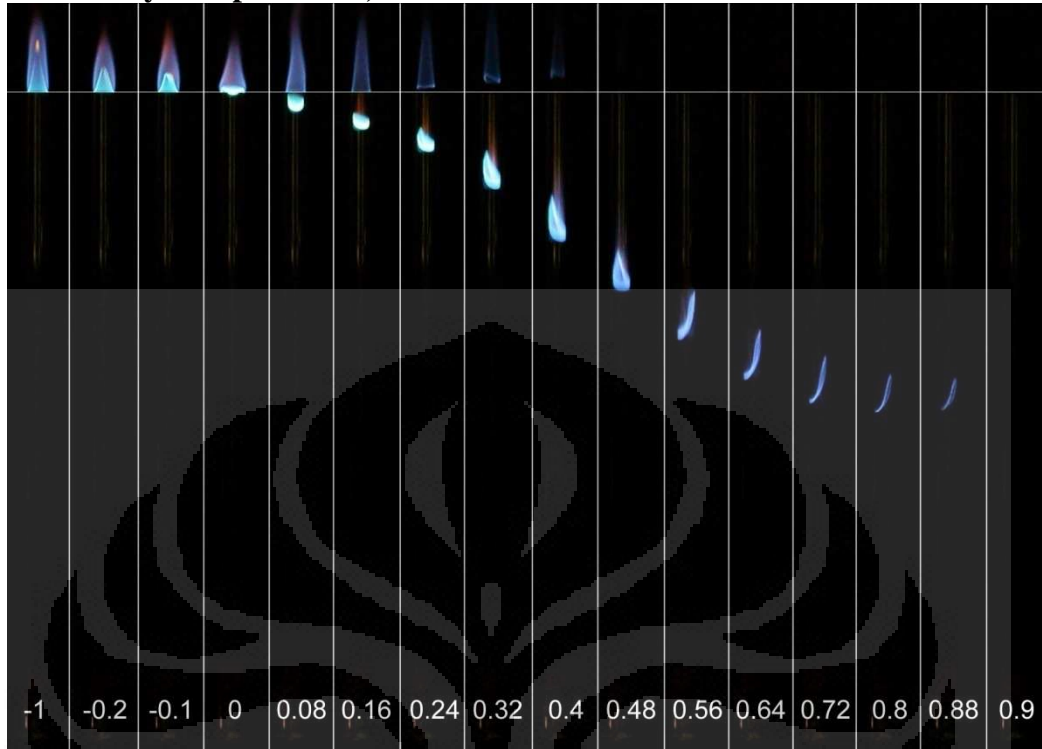
$$Da = \frac{1}{Ka} = \frac{1}{6,48} = 0,154$$

Tabel Hasil Kalkulasi Perhitungan Bilangan Karlovitz dan Damkohler :

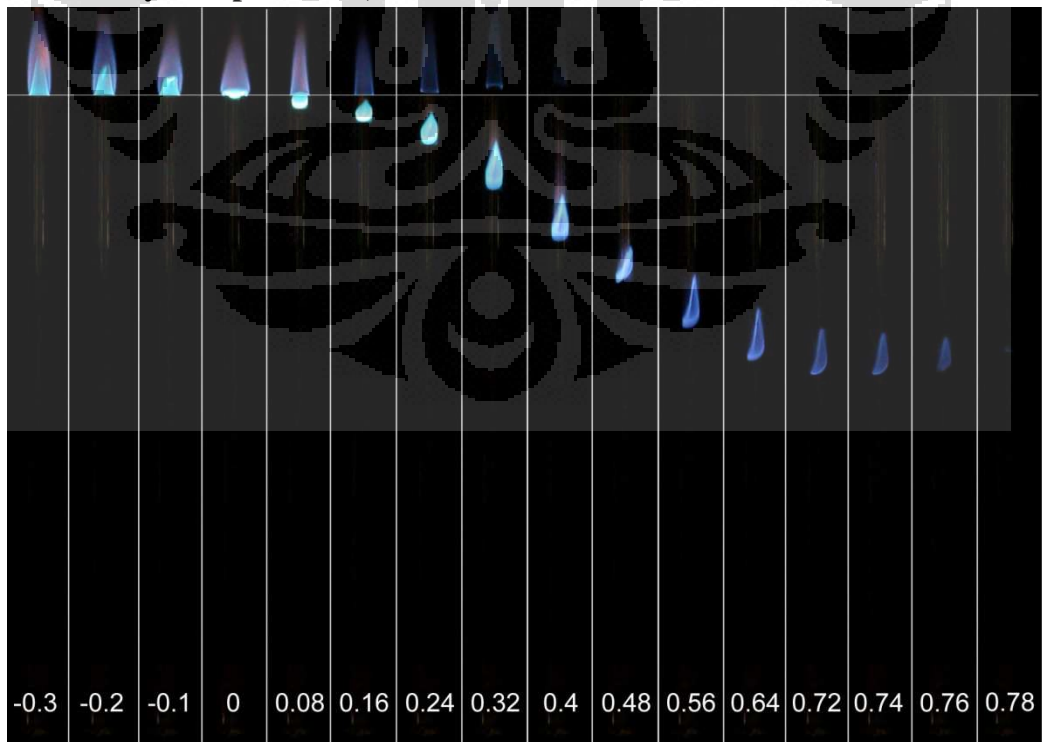
Tinggi Nyala Api, hf (mm)	hf (m)	hf²+ rf²	θ	sin θ	Kec. Nyala Laminar, Su (m/s)	α/Su²	Kec. Uniform Flow, U (m/s)	Stretchrate	Ka Number	Da Number
23.913	0.024	0.00063	72.570	0.954	0.155	0.196	0.260	33.015	6.484	0.154
30.87	0.031	0.00101	77.270	0.975	0.181	0.145	0.383	49.823	7.212	0.139
35.217	0.035	0.00130	76.01	0.970	0.211	0.106	0.507	65.567	6.968	0.144
47.012	0.047	0.00227	80.56	0.986	0.199	0.120	0.631	82.912	9.953	0.100
56.957	0.057	0.00330	82.85	0.992	0.197	0.122	0.754	99.779	12.190	0.082
59.13	0.059	0.00355	81.98	0.990	0.221	0.097	0.878	115.907	11.251	0.089
86.522	0.087	0.00754	89.9	0.999	0.173	0.158	1.002	133.572	21.148	0.047
61.304	0.061	0.00381	81.21	0.988	0.273	0.063	1.125	148.265	9.405	0.106
83.478	0.083	0.00702	82.14	0.991	0.224	0.095	1.249	165.061	15.654	0.064

Lampiran 2 : Foto-foto Nyala Api Hasil Eksperimen

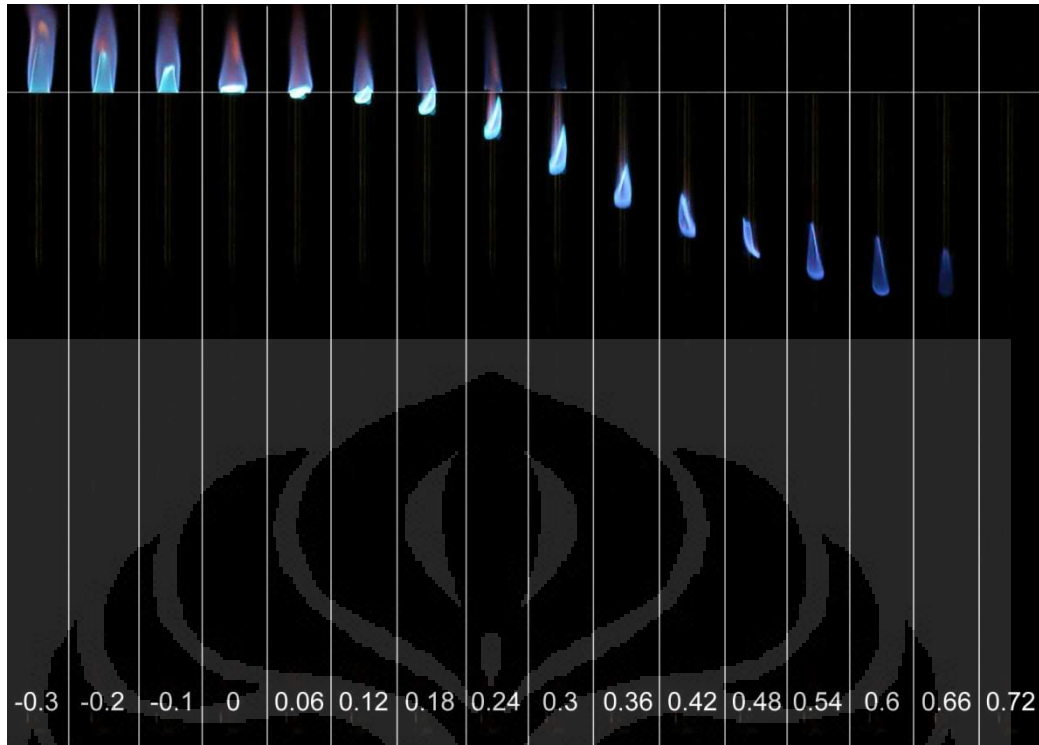
• **Foto Nyala Api Debit 0,04 L/s**



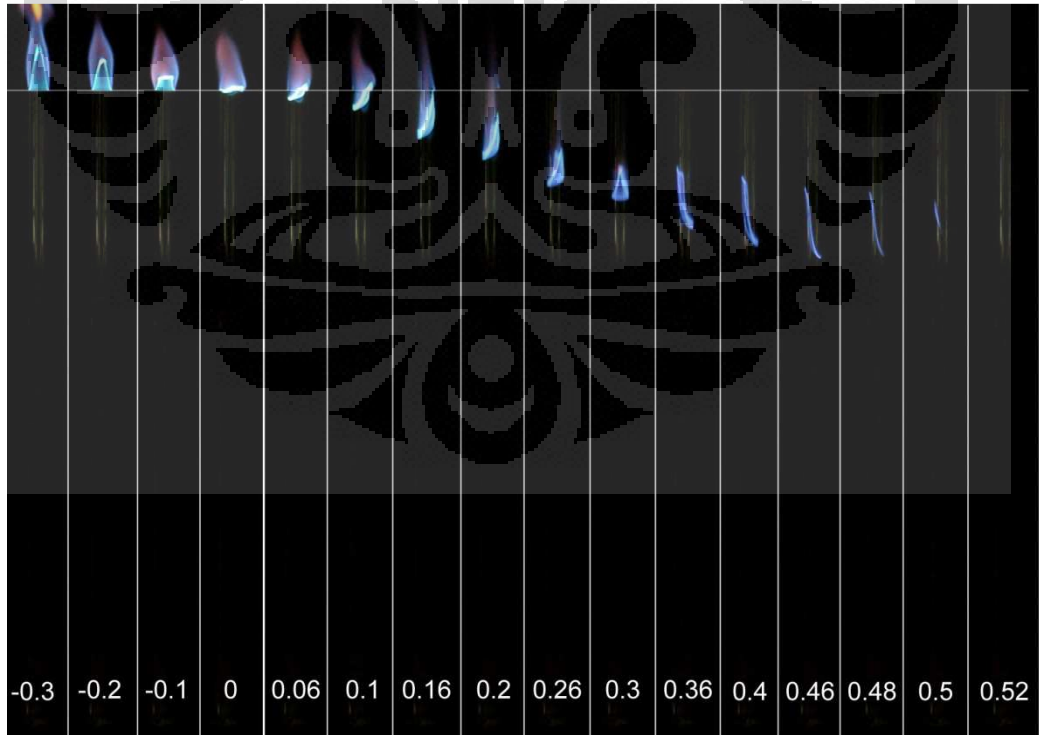
• **Foto Nyala Api Debit 0,06 L/s**



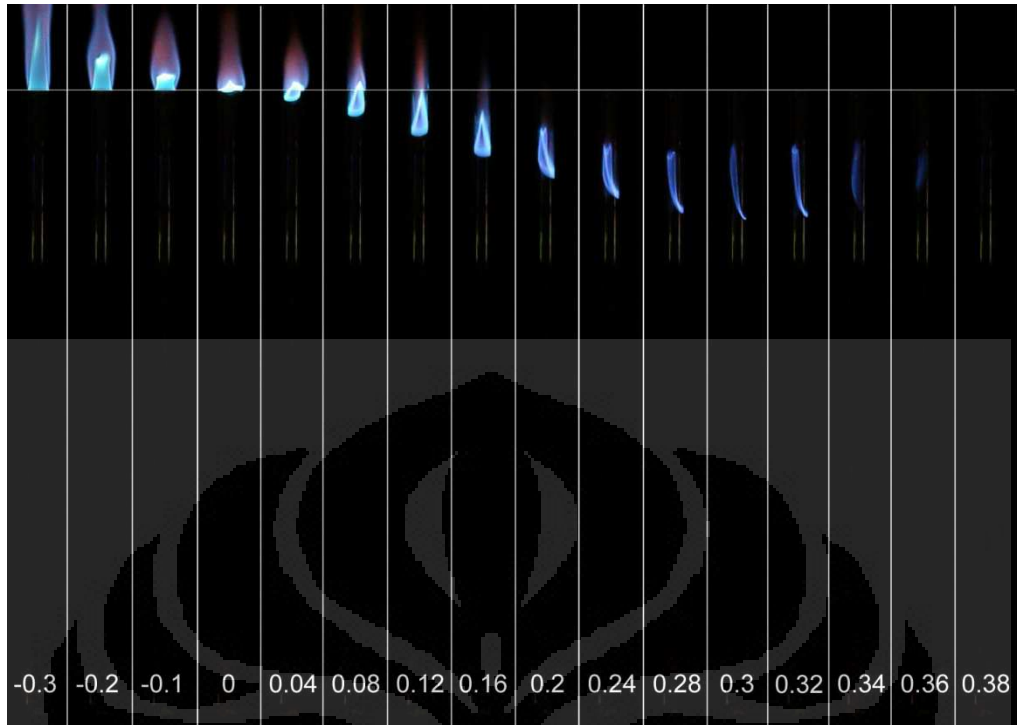
- Foto Nyala Api Debit 0,08 L/s



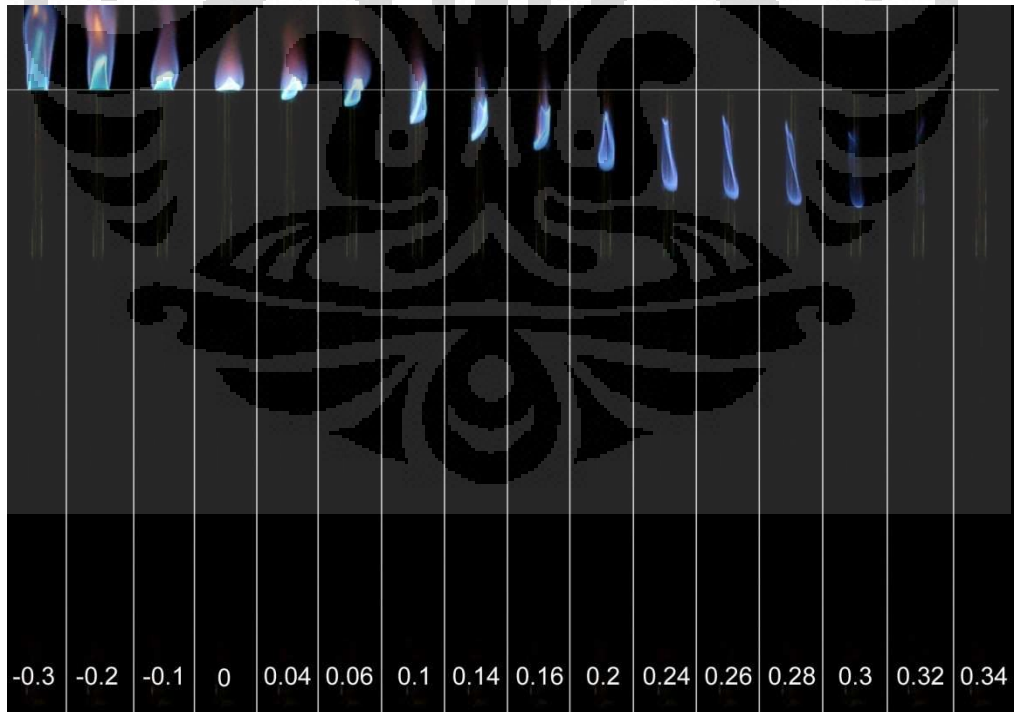
- Foto Nyala Api Debit 0,11 L/s



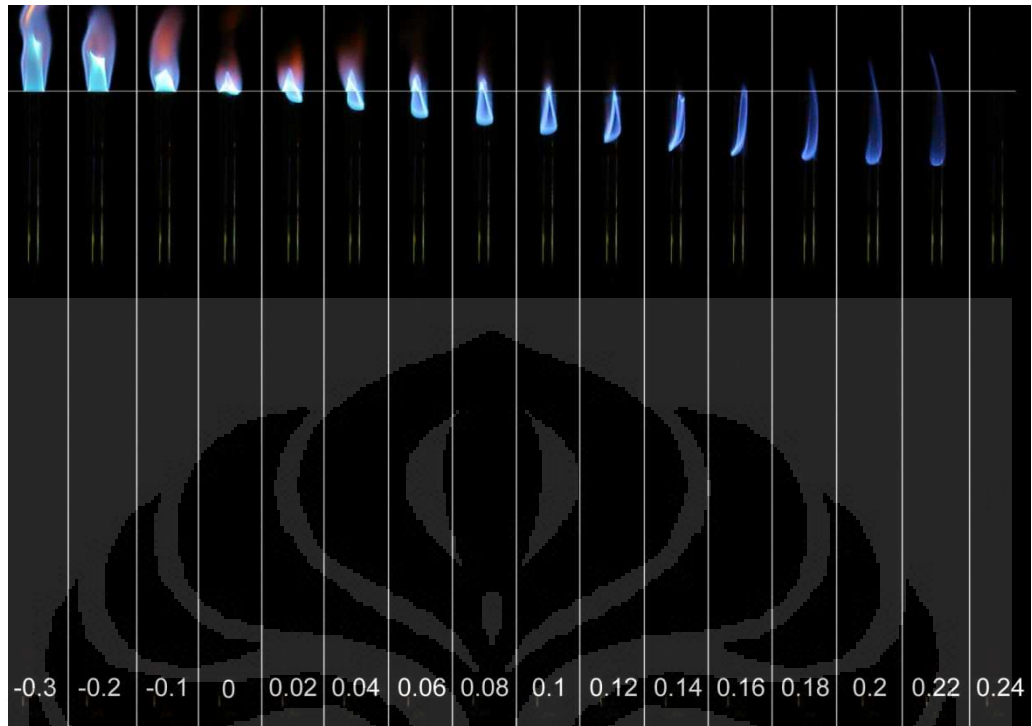
- Foto Nyala Api Debit 0,13 L/s



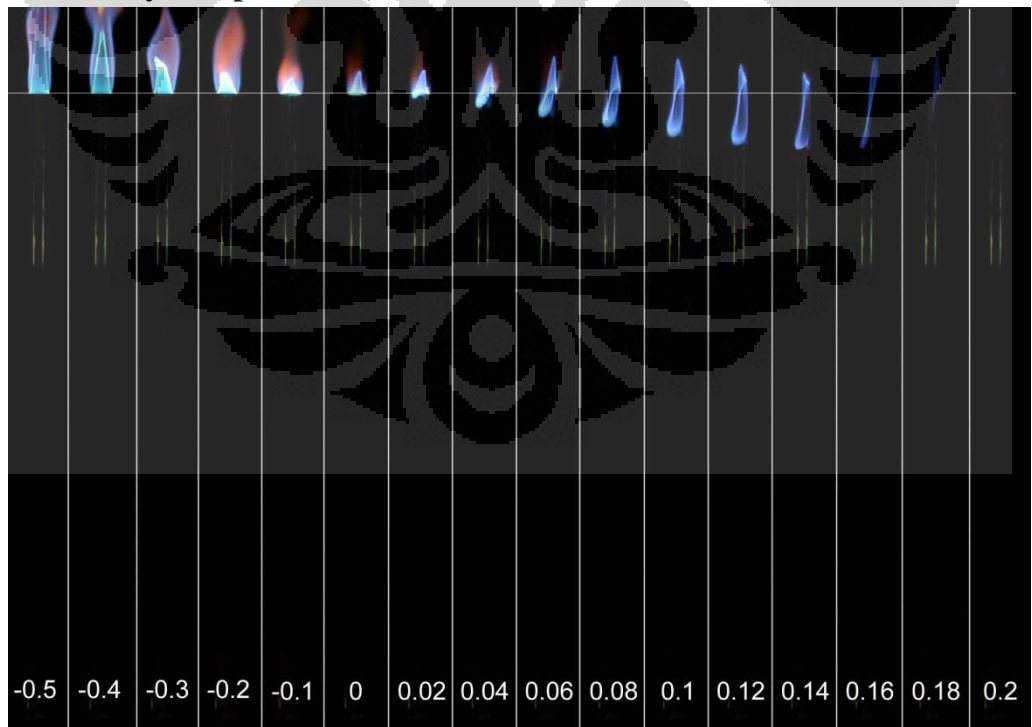
- Foto Nyala Api Debit 0,15 L/s



- **Foto Nyala Api Debit 0,17 L/s**



- **Foto Nyala Api Debit 0,19 L/s**



- Foto Nyala Api Debit 0,22 L/s

