



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API DAERAH  
LAPISAN GESER PADA RUANG BAKAR  
BACKWARD-FACING STEP**

**SKRIPSI**

**MUHAMMAD FAJAR KAZIRENGGA  
0906604956**

**UNIVERSITAS INDONESIA  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JANUARI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API DAERAH LAPISAN  
GESER PADA RUANG BAKAR  
BACKWARD-FACING STEP**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**MUHAMMAD FAJAR KAZIRENGGA  
0906604956**

**UNIVERSITAS INDONESIA  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JANUARI 2012**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

### **VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API DAERAH LAPISAN GESER PADA RUANG BAKAR JENIS *BACKWARD- FACING STEP***

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan untuk menjadi Sarjana Teknik Pada Program Studi Teknik Mesin Program Pendidikan Sarjana Ekstensi Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar Sarjana di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, Januari 2012

Penulis,



**Muhammad Fajar Kazirengga**

**NPM . 0906604956**

## PERSETUJUAN

Skripsi dengan judul :

### **VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API DAERAH LAPISAN GESER PADA RUANG BAKAR JENIS *BACKWARD- FACING STEP***

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan kurikulum program Sarjana Bidang Ilmu Teknik Universitas Indonesia guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Pendidikan Sarjana Ekstensi Program Studi Teknik Mesin.

Skripsi ini dapat disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian Skripsi.

Depok, Januari 2012

Dosen Pembimbing,



**Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng.**

**NIP. 132048279**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Muhammad Fajar Kazirengga

NPM : 0906604956

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : Visualisasi Kecepatan Tinggi Nyala Api Daerah Lapisan Geser  
pada Ruang Bakar *Backward-Facing Step*

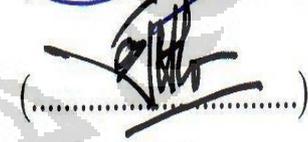
**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng.



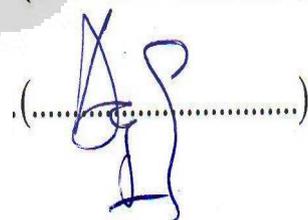
Penguji : Ir. Warjito, M.Sc., Ph.D



Penguji : Dr. Ir. Engkos A. K., M.T.



Penguji : Dr. Ir. Agus Pamitran, M.Eng.



Ditetapkan di : Depok (Universitas Indonesia)

Tanggal : 13 Januari 2012

## UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan mengucapkan kata Alhamdulillah, penulis bersyukur kepada Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini.

Bersama dengan ini, kami bermaksud untuk mengucapkan terima kasih setulus-tulusnya kepada :

1. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng. selaku Kepala Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia (DTM-FTUI) sekaligus sebagai pembimbing skripsi atas bimbingan dan arahannya.
2. Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto, M.Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
3. Dr. Ir. R. Danardono Agus Sumarsono DEA. PE selau pembimbing akademis.
4. Kedua orang tua tercinta yang senantiasa tanpa henti mendoakan anaknya agar selalu dibeli kemudahan dan kelancaran dalam segala urusannya.
5. Putri Rina Mariana atas semangat serta dukungan yang diberikan kepada penulis.
6. Erwanto Peres, Budiman Raharja R, dan Kris Kurnia atas segala bantuan, jerih payah dan kerja samanya selama penyusunan skripsi ini.
7. 17 anggota NSS atas segala kebersamaannya selama menimba ilmu di kampus tercinta Universitas Indonesia.
8. Seluruh rekan-rekan seperjuangan Program Pendidikan Sarjana Ekstensi Teknik Mesin angkatan 2009.

Dan seluruh pihak, tanpa mengecilkan arti bantuan dan kontribusinya yang positif, yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

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

---

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

Nama : Muhammad Fajar Kazirengga

NPM : 0906604956

Program Studi: Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

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

**VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API DAERAH LAPISAN GESER  
PADA RUANG BAKAR *BACKWARD-FACING STEP***

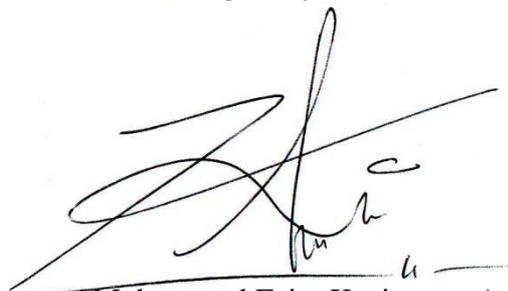
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok (Universitas Indonesia)

Pada tanggal : 25 Januari 2012

Yang menyatakan



( Muhammad Fajar Kazirengga )

## ABSTRAK

Nama : Muhammad Fajar Kazirengga  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Visualisasi Kecepatan Tinggi Nyala Api Daerah Lapisan Geser Pada Ruang Bakar Backward-Facing Step

Pembakaran pada ruang bakar *Backward-Facing Step* dengan menggunakan slot injeksi dan ketinggian tangga dengan perbandingan  $Lf/h = 2; 2,67$  dan  $4$  menunjukkan nyala api terjadi pada daerah lapisan geser. Dengan menggunakan bantuan High Speed Video Camera dapat diketahui mengenai karakteristik serta pola pergerakan dari nyala api daerah lapisan geser tersebut sehingga dapat diketahui pola nyala api yang terbentuk pada beberapa titik. Kemudian dengan menggunakan bantuan perangkat lunak ImageJ, nyala api yang didapat diolah untuk mendapatkan luasan secara 2 dimensi. Dengan mengetahui luasan masing-masing titik, korelasi antara luasan nyala api dan perubahan nilai efisiensi bahan bakar dapat diketahui. Akan tetapi korelasi yang didapat tidak selalu dapat dijadikan acuan perbandingan antara perubahan luas nyala api dengan perubahan nilai efisiensi. Hal lain yang mempengaruhi perubahan nilai efisiensi adalah ketinggian tangga ( $h$ ), bentuk geometri ruang bakar serta asupan udara dari blower. Beberapa fenomena yang tertangkap oleh *High Speed Video Camera* seperti pola pergerakan nyala api pada titik efisiensi tertinggi dari nyala stabil hingga berada pada titik padamnya api dapat diketahui.

Kata Kunci : Ruang Bakar Backward-Facing Step, Nyala Api Daerah Lapisan Geser, Efisiensi.

## **ABSTRACT**

*Name : Muhammad Fajar Kazirengga*

*Study Program : Mechanical Engineering*

*Title : High Speed Visualization of Shear Layer Flame in Backward-Facing Step Combustor*

*Combustion inside a backward-facing step combustor using injection nozzle and height of step ratio  $L_f/h = 2; 2,67$  and  $4$  shows a shear layer flame. By using a high speed video camera, the shear layer flame characteristic and its pattern of movement can be analyzed so that how the pattern of movements characteristic on a various spot can be studied too. Then by using software named ImageJ the shear layer flame visualization that we have can be analyzed so we will get an the flame area in 2 dimensional state. By knowing flames area on a various spot, we can analyze the correlation between changes in area and changes in fuel consumption efficiency. However the parameter of ratio correlation between area changes and fuel consumption efficiency changes can not always be identified. The other parameter that also affect the changes of fuel consumption efficiency is the changes of step ( $h$ ), geometrical shape of its combustion chamber and also the air supply from blower. A various numbers of phenomenon that have been captured by the high speed video camera included flame pattern of movement on the maximum fuel efficiency from the stabilized flame into the extinct point can be analyzed.*

*Keywords : Backward-Facing Step Combustor, Shear Layer Flame, Efficiency.*

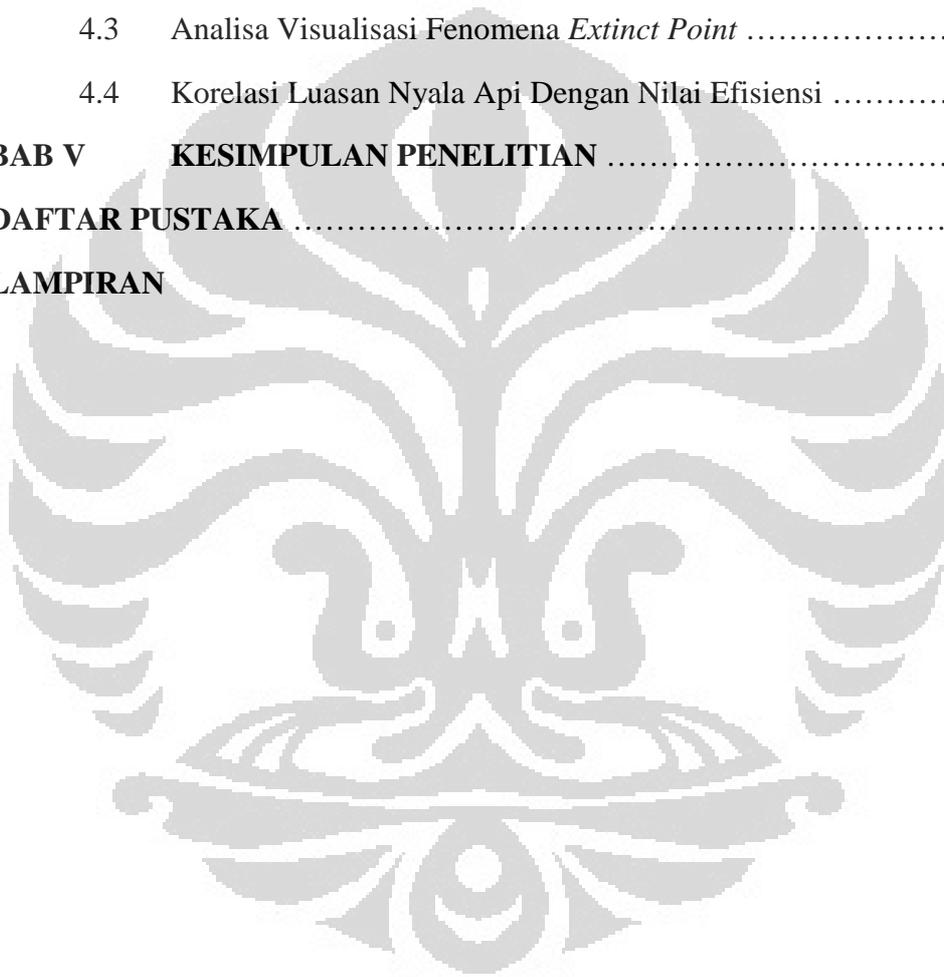
# DAFTAR ISI

Halaman

<b>HALAMAN SAMPUL</b>	
<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI</b> .....	<b>i</b>
<b>PERSETUJUAN</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>iii</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR NOTASI</b> .....	<b>xiii</b>
<b>BAB I      PENDAHULUAN</b>	
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Tujuan Penelitian .....	3
1.3    Batasan Masalah .....	3
1.4    Metodologi Penelitian .....	4
1.5    Sistematika Penulisan Laporan .....	5
<b>BAB II     TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 <i>Backward-Facing Step</i> .....	6
2.2    Stabilitasi Nyala .....	8
2.3    Nyala Difusi .....	9
2.3.1    Struktur Nyala Difusi Laminar .....	9
2.3.2    Struktur Nyala Difusi Turbulen .....	10
2.4    Efisiensi Bahan Bakar .....	11

2.5	Sifat Fisika Kimia Bahan Bakar .....	13
<b>BAB III PROSEDUR PENELITIAN</b>		
3.1	Peralatan Penelitian .....	17
3.1.1	Sistem Suplai Udara .....	18
3.1.1.1	Blower .....	18
3.1.1.2	Sistem Perpipaian .....	18
3.1.1.3	<i>Wind Tunnel</i> Skala Kecil .....	19
3.1.2	Test Section .....	20
3.1.3	Sistem Suplai Bahan Bakar .....	21
3.2	Kalibrasi .....	23
3.2.1	Kalibrasi Sistem Suplai Bahan Bakar .....	23
3.2.2	Kalibrasi Sistem Suplai Udara .....	24
3.3	Prosedur Pengambilan Data .....	25
3.3.1	Stabilisasi Penyalaan .....	25
3.3.2	Visualisasi Nyala Api .....	26
3.3.3	Parameter-Parameter Pengambilan Gambar .....	27
3.4	Persamaan-Persamaan Konversi Data Mentah .....	28
3.4.1	Stabilisasi Penyalaan .....	28
3.5	Analisa Kesalahan .....	29
3.5.1	Kesalahan Sistematis .....	30
3.5.2	Kesalahan Acak .....	31
3.5.3	Kesalahan Keseluruhan .....	31
<b>BAB IV HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Hasil Visualisasi Nyala Api .....	33
4.1.1	Hasil Visualisasi $l_f/h = 2$ dengan $(h) = 40$ mm .....	33
4.1.2	Hasil Visualisasi $l_f/h = 2,67$ dengan $(h) = 30$ mm .....	35
4.1.3	Hasil Visualisasi $l_f/h = 4$ dengan $(h) = 20$ mm .....	37

4.1.4	Hasil Visualisasi Nilai Efisiensi Terendah .....	39
4.2	Hasil Perhitungan Luas Nyala Api .....	40
4.2.1	Perhitungan Luasan Nyala Api $L_f/h = 2$ , $(h) = 40$ mm ..	42
4.2.2	Perhitungan Luasan Nyala Api $L_f/h = 2,67$ $(h) = 30$ mm	43
4.2.3	Perhitungan Luasan Nyala Api $L_f/h = 4$ , $(h) = 20$ mm ..	43
4.2.4	Perhitungan Luasan Nyala Api Nilai Efisiensi Terendah	44
4.3	Analisa Visualisasi Fenomena <i>Extinct Point</i> .....	45
4.4	Korelasi Luasan Nyala Api Dengan Nilai Efisiensi .....	46
<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN PENELITIAN</b> .....	<b>51</b>
	<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>53</b>
	<b>LAMPIRAN</b>	



## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1. Prinsip Dasar Ruang Bakar Berkontur Tangga .....	2
2.1. <i>Backward-facing step</i> .....	7
2.2. (a) <i>Overventilated Flame</i> dan (b) <i>Underventilated Flame</i> .....	10
2.3. Nyala Api Turbulen .....	10
2. 4 Struktur Molekul Propana .....	14
3.1 Skema Peralatan Penelitian .....	17
3.2 Blower Utuk Suplai Udara .....	18
3.3 Sistem Perpipaan .....	19
3.4 Wind Tunnel Skala Kecil .....	20
3.5 Test Section .....	21
3.6 Pengatur dan Pengukur Suplai Bahan Bakar .....	22
3.7 Wet Gas Meter Shinagawa .....	22
3.8 Skema Kalibrasi Manometer Bahan Bakar .....	23
3.9 Skema Kalibrasi Sistem Suplai Udara .....	24
3.10 Parameter Pengukuran .....	26
3.11 <i>High Speed Video Camera</i> .....	27
3.12 Grafik Hasil Kalibrasi Sistem Suplai Udara .....	29
3.13 Grafik Hasil Kalibrasi Sistem Bahan Bakar .....	29
4.1 Visualisasi Nyala Api pada V udara 6.0 m/s dan V bahan bakar 0.139 m/s (a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara .....	33
4.2 Visualisasi Nyala Api pada V udara 8.1 m/s dan V bahan bakar 0.141 m/s (a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara .....	34

4.3 Visualisasi Nyala Api pada V udara 10.1 m/s dan V bahan bakar 0.198 m/s	
(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara .....	34
4.4 Visualisasi Nyala Api pada V udara 6.0 m/s dan V bahan bakar 0.174 m/s	
(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara .....	35
4.5 Visualisasi Nyala Api pada V udara 8.1 m/s dan V bahan bakar 0.178 m/s	
(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara .....	36
4.6 Visualisasi Nyala Api pada V udara 10.1 m/s dan V bahan bakar 0.223 m/s	
(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara .....	36
4.7 Visualisasi Nyala Api pada V udara 6.0 m/s dan V bahan bakar 0.178 m/s	
(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara .....	37
4.8 Visualisasi Nyala Api pada V udara 8.1 m/s dan V bahan bakar 0.178 m/s	
(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara .....	38
4.9 Visualisasi Nyala Api pada V udara 10.1 m/s dan V bahan bakar 0.223 m/s	
(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara .....	38
4.10 Visualisasi Nyala Api pada V udara 6.0 m/s dan V bahan bakar 0.223 m/s	
(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara .....	40
4.11 Kalibrasi ukuran tinggi <i>step</i> ( <i>h</i> ) sebagai acuan pengukuran luas (mm) ...	41
4.12 Penentuan parameter-parameter kalibrasi .....	41
4.13 Hasil perhitungan luasan nyala api (mm <sup>2</sup> ) .....	42
4.14 Visualisasi Nyala Api pada Δ <i>h</i> udara 10 mm dan Δ <i>h</i> bahan bakar 110 mm dengan perbandingan $l_f/h = 2$ , ( <i>h</i> ) = 40 mm	
(a) Nyala Api pada detik ke 1,(b) Nyala api pada detik ke 2 .....	45
(c) nyala api pada detik ke 3, (d) Nyala api detik ke 4 .....	45
(e) dan (f) Nyala api pada detik ke 4 hingga padam .....	46
4.15 Grafik Korelasi Luasan Nyala Api Dengan Nilai Efisiensi, $l_f/h = 2$ .....	47
4.16 Grafik Korelasi Luasan Nyala Api Dengan Nilai Efisiensi , $l_f/h = 2,67$ .48	
4.17 Grafik Korelasi Luasan Nyala Api Dengan Nilai Efisiensi, $l_f/h = 4$ .....	50

## DAFTAR NOTASI

Keterangan notasi :

$f_s$	= <i>Fuel / air</i> stoikiometri
$m_f$	= Massa bahan bakar
$m_u$	= Massa udara
$N_f$	= Jumlah molekul bahan bakar stoikiometri
$M_{rf}$	= Berat molekul bahan bakar stoikiometri
$N_u$	= Jumlah molekul udara stoikiometri
$M_{ru}$	= Berat molekul udara stoikiometri
$f_a$	= Aktual rasio bahan bakar udara
$\phi$	= Rasio ekivalen
$m_{u\ ak}$	= Massa udara aktual
$V_{ud}$	= Kecepatan udara
$h$	= Ketinggian manometer udara
$\rho_{ud}$	= Massa jenis udara
$m_{f\ akt}$	= Massa bahan bakar actual
$m_{f\ sto}$	= Massa bahan bakar stoikiometri
$\eta_{bb}$	= Efisiensi bahan bakar
$X$	= Nilai pengukuran
$\bar{x}$	= Nilai pengukuran rata-rata
$N$	= Banyaknya pengukuran

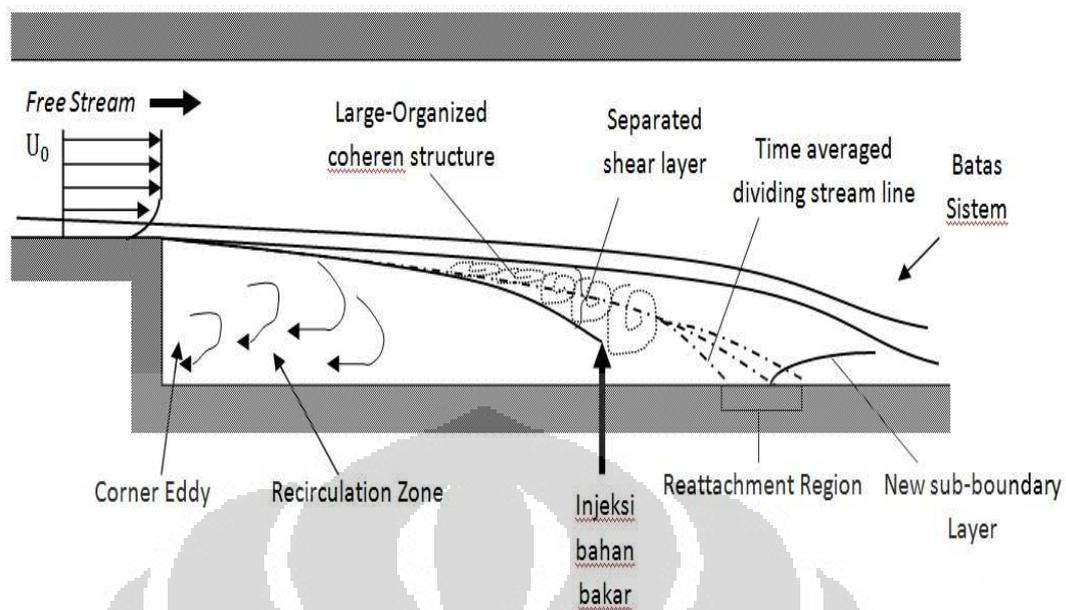
# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Sumber daya alam yang ada di muka bumi ini digolongkan menjadi 2 jenis berdasarkan kemampuan terbentuknya, yaitu sumber daya alam yang dapat diperbaharui (*renewable resources*) dan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui (*non-renewable resources*). Dan tentunya sudah kita ketahui bersama bahwa sejak puluhan tahun lalu banyak sekali penelitian yang dilakukan guna menghemat persediaan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui ini. Banyak penelitian telah dilakukan guna meningkatkan efisiensi dari sebuah siklus atau sistem pembakaran dimana bertujuan untuk mengurangi jumlah konsumsi bahan bakar tanpa mengurangi kapasitas serta kerja sistem tersebut. Hal yang dititikberatkan oleh para peneliti terdahulu adalah mengenai peningkatan efisiensi konsumsi bahan bakar pada ruang bakar yang menggunakan bahan bakar jenis gas dan minyak bumi. Penelitian demi penelitian telah dilakukan, mulai dari pencampuran bahan bakar hingga variasi bentuk geometri ruang bakar. Penelitian-penelitian terdahulu akhirnya sampailah pada sebuah bentuk geometri ruang bakar berkontur tangga dengan pembesaran tiba-tiba (*backward-facing step with combustion chamber with sudden expansion*) berskala sederhana dimana bentuk geometri dari ruang bakar tersebut dapat menjaga nyala api dalam medan maliran berkecepatan tinggi, ruang bakar berkontur tangga dengan pembesaran tiba-tiba ini disinyalir dapat mengakomodir kebutuhan *flame holding* yang erat kaitannya dengan stabilitasi nyala api difusi dan efisiensi konsumsi bahan bakar.

*Sudden expansion* adalah salah satu bentuk geometri dari *combustor* dimana terjadi pembesaran tiba-tiba dari saluran udara bersih untuk pembakaran pada sisi masuk *combustor*. Apabila udara bersih ini dialirkan dengan kecepatan tinggi melalui *combustor* seperti ini maka akan menghasilkan aliran terpisah yang terdiri dari *recirculation flowm shear layer* dan *re-developing boundary layer*. (Gambar 1.1)



**Gambar 1.1. Prinsip Dasar Ruang Bakar Berkontur Tangga**

Pada *combustor* ini *sudden expansion* dimanfaatkan untuk menghasilkan *recirculation flow* dimana aliran ini dapat menghasilkan kestabilan penyalaan karena aliran ini sangat stabil dan mudah untuk dikontrol. Bahan bakar yang diinjeksikan pada *recirculation flow* udara yang berkecepatan rendah akibat melalui *sudden expansion* dimanfaatkan untuk menciptakan dan mempertahankan penyalaan. Penyalaan ini akan memanaskan *recirculation flow* dan bahan bakar masuk ke dalam daerah penyalaan untuk mempertinggi efisiensi pembakaran.

Penelitian telah dilakukan terhadap proses pencampuran antara bahan bakar yang diinjeksikan dengan aliran udara yang melalui *sudden expansion* pada kondisi dingin<sup>[1]</sup> yang kemudian dilanjutkan dengan penggunaan 3 jenis bahan bakar dan variasi bentuk geometri ruang bakar guna mendapatkan stabilisasi nyala dan efisiensi bahan bakar<sup>[2]</sup>. Beberapa aspek pencampuran termasuk penetrasi, fluktuasi dan distribusi dari bahan bakar yang diinjeksikan di dalam *recirculation flow* telah dijelaskan pada penelitian ini. Begitu juga dalam penelitian yang lain, dengan menggunakan pengukuran LDV memperjelas bahwa struktur aliran, sifat turbulensi aliran dan karakteristik struktur coherent yang terjadi sangat dipengaruhi oleh peningkatan momentum didekat *step* (tangga).

Hasil-hasil penelitian diatas memberikan informasi dasar keseimbangan antara faktor geometrik dengan parameter dinamika fluida dalam menentukan

kriteria desain combustor untuk meningkatkan pencampuran bahan bakar-udara. Penelitian telah dilakukan dengan menggunakan gas panas yang diinjeksikan untuk mendapatkan pendekatan fenomena perpindahan panas dan massa yang terjadi di dalam combustor.

Dari kesemua penelitian yang telah dilakukan belum disertai dengan adanya analisa dari bentuk nyala api yang didapat dari hasil penelitian-penelitian terdahulu baik itu yang terjadi pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*) maupun yang terjadi pada daerah lapisan geser (*shear layer*) dengan alat penelitian yang memadai serta pembahasan tentang korelasi antara perubahan bentuk api dengan perubahan nilai efisiensi.

Hal inilah yang mendorong penulis untuk melakukan penelitian secara lebih mendalam mengenai visualisasi bentuk nyala api dengan menggunakan *high speed video camera* pada daerah lapisan geser (*shear layer*) didalam ruang bakar berkontur tangga dengan menggunakan bahan bakar gas propana serta korelasi perubahan bentuk api dengan perubahan nilai efisiensi bahan bakar.

## 1.2 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan visualisasi berupa foto atau gambar mengenai bentuk api dan serta melakukan analisa mengenai karakteristik serta korelasinya terhadap nilai efisiensi bahan bakar pada daerah lapisan geser (*shear layer*) di dalam ruang bakar berkontur tangga (*backward-facing step*) tipe pembesaran tiba-tiba (*sudden expansion*) menggunakan *high speed video camera*. Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah gas Propana ( $C_3H_8$ ). Selain itu diharapkan dalam penelitian ini didapat visualisasi mengenai bagaimana fenomena yang terjadi pada nyala api difusi daerah lapisan geser dengan nilai efisiensi tertinggi ketika memasuki *extinct point* hingga api tersebut padam.

## 1.3 BATASAN MASALAH

Penelitian ini dititikberatkan pada analisa hasil visualisasi nyala api serta bagaimana korelasinya terhadap nilai efisiensi pembakaran yang terjadi pada

daerah lapisan geser (*shear layer*) di dalam ruang bakar kanal berkontur tangga menggunakan bahan bakar propana ( $C_3H_8$ ).

Beberapa asumsi dan batasan dilakukan dalam penelitian ini dilakukan untuk menyederhanakan kompleksitas masalah yaitu :

1. Penelitian dilakukan pada perbandingan  $l_f/h = 2; 2,67$  dan  $4$  dengan letak injeksi  $l_f = 80$  mm dari batas tangga.
2. Aliran yang terjadi di dalam *test section* adalah aliran dua dimensi karena mempunyai hubungan yang dekat dengan aliran pada penelitian yang telah dilakukan Harinaldi.
3. Parameter-parameter pengujian seperti perbandingan  $l_f/h$ ,  $l_f$ , nilai efisiensi, batas limit stabilitas nyala api difusi dan persamaan-persamaan yang digunakan dalam konversi data mengacu kepada penelitian yang dilakukan Maymuchar<sup>[2]</sup>.
4. Aliran udara yang keluar dari *nozzle* adalah seragam atau telah mencapai profil *top hat*.
5. Penelitian dilakukan dengan peralatan berskala laboratorium.

#### 1.4 METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian mengenai analisa visualisasi nyala api serta korelasinya dengan perubahan nilai efisiensi pembakaran pada daerah lapisan geser (*shear layer*) di dalam ruang bakar berkontur tangga (*backward-facing step*) dengan menggunakan bahan bakar propana ini dilakukan secara eksperimental yang dilakukan secara langsung oleh penulis di laboratorium Pembakaran Teknik Mesin Universitas Indonesia, Depok. Parameter-parameter pengujian meliputi variasi kecepatan *free stream* udara, variasi ketinggian tangga dan letak injeksi sehingga menghasilkan variasi bentuk geometri ruang bakar. Parameter-parameter penelitian yang diambil seperti titik nyala api berdasarkan  $\Delta h$  udara dan  $\Delta h$  bahan baker serta nilai efisiensi pada masing-masing titik mengacu kepada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya<sup>[2]</sup>. Selain itu diharapkan dari penelitian ini didapat kesimpulan bagaimana karakteristik api ketika memasuki *extinct point* sehingga

dapat diketahui korelasinya dengan energi yang dihasilkan dari pembakaran tersebut.

## **1.5 SISTEMATIKA PENULISAN LAPORAN**

Sesuai dengan tata cara sistematika penulisan skripsi yang baku, maka dalam penulisan skripsi ini penulis menjabarkan dalam beberapa bab, yaitu :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini menguraikan latar belakang dilakukannya penelitian ini, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan laporan.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisikan secara singkat penelitian-penelitian mengenai aliran pada *backward-facing step* yang telah dilakukan, stabilisasi penyalaan, efisiensi konsumsi bahan bakar, serta sifat-sifat fisika-kimia bahan bakar.

### **BAB III PROSEDUR PENELITIAN**

Berisikan peralatan-peralatan yang digunakan selama penelitian, kalibrasi alat pengukuran, prosedur pengambilan data dan persamaan-persamaan yang digunakan untuk mengolah data mentah.

### **BAB IV HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini disajikan hasil visualisasi nyala api yang didapatkan serta hasil-hasil pengujian lainnya yang telah diolah beserta pembahasan hasil penelitian.

### **BAB V KESIMPULAN**

Bab ini merupakan kesimpulan yang dapat penulis ambil dari keseluruhan proses penelitian yang dilakukan.

### **DAFTAR PUSTAKA**

### **LAMPIRAN**

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Penelitian yang dilakukan oleh peneliti dan industri yang berkecimpung pada ruang bakar peralatan supersonik atau hipersonik cukup menarik dan penting. Dari sudut pandang sistem propulsi atau tenaga pendorong, hal ini dapat diwujudkan dengan penggunaan mesin ram/seram jet yang didesain untuk dapat beroperasi dalam kondisi supersonik. Banyak masalah yang muncul dalam pengembangan mesin jet tersebut. Salah satu dari banyaknya masalah yang muncul adalah ketidakmampuan untuk mengungkapkan dan memperkirakan sifat dari proses pembakaran yang terjadi di dalam kondisi supersonik atau hipersonik. Maka diperlukan suatu kondisi ruang bakar yang mampu menciptakan mekanisme untuk menstabilkan nyala dalam keadaan temperature dan kecepatan aliran yang tinggi pada medan aliran reaksi.

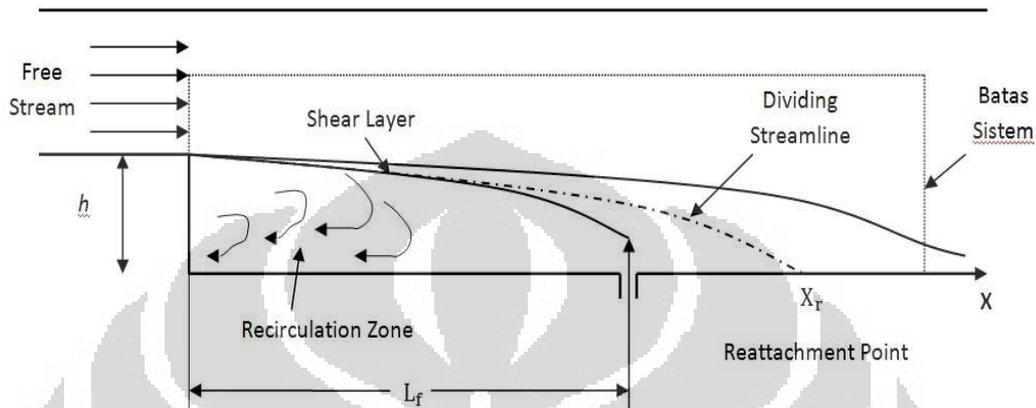
Sejalan dengan itu, perkembangan mesin jet tidak hanya terbatas untuk menghasilkan kecepatan yang lebih tinggi. Effisiensi dan juga dampak lingkungan yang berhubungan erat dengan effisiensi, proses pembakaran dalam ruang bakar tersebut. Oleh karena itu, penelitian mengenai jenis bahan bakar yang sesuai dengan ruang bakar tersebut juga sangat penting.

Khusus pada aplikasi ruang bakar mesin jet untuk menghasilkan gaya dorong yang besar dan meminimalkan kerugian tekanan, aliran resirkulasi turbulen yang terbentuk pada daerah pojok tangga diyakini oleh banyak peneliti sebagai kandidat *flame holder* terbaik. Konfigurasi ini dapat membentuk medan aliran berkecepatan rendah dimana nyala api difusi dapat stabil dengan menginjeksikan bahan bakar di daerah ini walaupun aliran udara utamanya supersonik.

#### **2.1 BACKWARD-FACING STEP**

Pada Gambar 2.1 menggambarkan secara sederhana aliran dua dimensi pada *backward-facing step*, yang menunjukkan kompleksitas aliran yang terjadi. Aliran udara melalui *backward-facing step* menghasilkan aliran separasi yang memuat daerah resirkulasi, lapisan geser dan lapisan batas yang berkembang kembali

(*redeveloping boundary layer*). Aliran separasi mulai terjadi tepat pada titik di ujung tinggi *step* dan membentuk lapisan geser bebas. Pada titik separasi, garis *streamline* hamper paralel dengan dinding. Timbullah daerah aliran resirkulasi kecepatan rendah pada bagian bawah separasi.



Gambar 2.1. *Backward-facing step*

Diantara aliran dua dimensi, *backward-facing step* merupakan sebuah geometri paling sederhana untuk menghasilkan aliran separasi dan *reattaching*. Karena alasan di atas orang sering kali memanfaatkan *backward-facing step* untuk mengembangkan model aliran turbulen. Meskipun *backward-facing step* merupakan aliran *reattaching* paling sederhana, daerah alirannya masih sangat rumit. Ketika lapisan batasnya laminar, akan terbentuk transisi secara cepat setelah separasi, walaupun bilangannya Reynolds nya sangat rendah. Lapisan geser separasi akan terlihat lebih besar ketika melewati bagian pertama dari zona aliran separasi. Garis aliran pembagi (*dividing streamline*) digambarkan dengan garis putus-putus pada Gambar 2.1 dan lapisan gesernya cukup tipis dan tidak dipengaruhi oleh keberadaan dinding sekitarnya.

Daerah resirkulasi mempunyai karakteristik aliran berkecepatan rendah walaupun aliran utamanya berkecepatan tinggi. Dalam daerah ini terdapat turbulensi dan di daerah dekat titik *reattachment* terjadi lapisan turbulen yang sangat tinggi. Karakteristik ini memungkinkan untuk membentuk api difusi dengan menginjeksikan bahan bakar ke dalam daerah aliran tersebut.

Penelitian sebelumnya banyak membahas mengenai peranan struktur medan aliran di belakang tangga dan injeksi serta campuran berbagai tipe bahan bakar gas kedalam medan aliran dalam mekanisme stabilisasi nyala api, yang terfokus pada aplikasi system propulsi. <sup>[10]</sup>

Shinjo, Matsuyama, Mizobuchi, dan Ogawa<sup>[3]</sup> telah melakukan penelitian terhadap nyala api dinamik dengan menggunakan bantuan bahan bakar jet yang dikontrol oleh simulasi arus *Eddy*.

Andre Sobiesiak., Jamie C. Wanzell<sup>[4]</sup> melakukan penelitian bagaimana karakteristik dan struktur nyala api inverse pada gas alam. Sedangkan Murat, Raymond, Hudgins dan Ghoniem<sup>[5]</sup> meneliti dampak dari perubahan osilasi rasio ekivalen pada sebuah pembakaran dinamis dalam ruang bakar berkontur tangga (*backward-facing step*).

## 2.2 STABILITASI NYALA

Mekanisme stabilisasi nyala pada aliran udara berkecepatan tinggi akan menghadapi permasalahan bagaimana mempertahankan nyala dalam medan aliran tersebut, pada kondisi dimana nyala yang terbentuk mempunyai derajat yang sama dengan nyala yang terbentuk dalam aliran udara berkecepatan rendah. Untuk menstabilkan nyala pada aliran yang sangat cepat, yang biasanya juga sangat turbulen, kita harus menggunakan *hot pilot flame* yang kecil atau menggunakan mekanisme aliran resirkulasi. Strehlow<sup>[11]</sup> menyatakan ada 3 (tiga) cara untuk membentuk aliran resirkulasi. Daerah resirkulasi akan terbentuk di belakang benda pejal (bola atau silinder) atau lebih dikenal dengan *bluff body*, *flameholder* tipe *V-gutter*, dan di daerah belakang saluran yang berekspansi mendadak berkontur tangga (*sudden expansion-backward facing-step*).

Khusus untuk aplikasi ruang bakar mesin jet, untuk menghasilkan gaya dorong yang besar, kerugian tekanan harus sekecil mungkin. Oleh sebab itu, aliran resirkulasi turbulen yang terbentuk pada daerah pojok tangga diyakini oleh banyak peneliti sebagai kandidat *flame holder* dengan kerugian tekanan yang rendah di dalam medan aliran yang sangat cepat, karena dapat membentuk medan aliran berkecepatan rendah, dimana nyala api difusi dapat stabil dengan

menginjeksikan bahan bakar di daerah ini, walaupun aliran udara utamanya supersonik.

Dalam berbagai tinjauan pustaka, terdapat berbagai macam pengertian dari limit stabilitas nyala. Stabilitas nyala dapat di definisikan sebagai suatu kondisi campuran bahan bakar dan udara, yang dapat menjaga nyala sampai dengan padamnya nyala (*extinct*). Komposisi campuran bahan bakar dan udara inilah yang nantinya digunakan sebagai pembatas antara nyala yang stabil dan tidak.

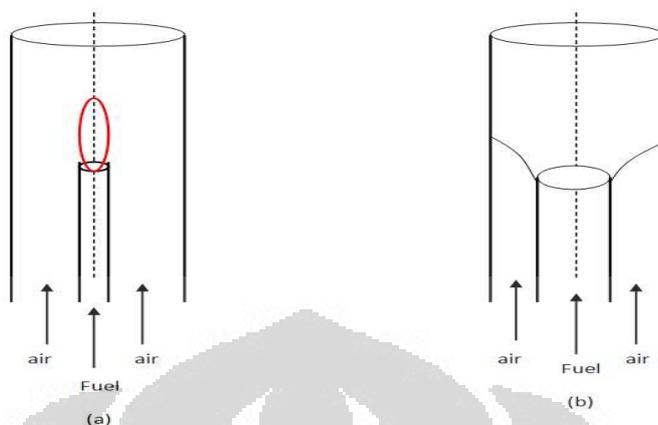
### 2.3 NYALA DIFUSI

Pada pembakaran *Diffusion Flame*, bahan bakar dan oksidan (udara) pada awalnya terpisah. Pembakaran akan berlangsung pada daerah dimana bahan bakar dan udara kemudian bercampur. Aliran bahan bakar yang keluar dari ujung nosel akan bercampur dengan udara secara difusi. Jika diberi pengapian campuran ini akan terbakar bila konsentrasi bahan bakar dan udara terdapat dalam jangkauan batas nyalanya. Pemunculan dari nyala akan bergantung pada sifat dari bahan bakar dan kecepatan pancaran bahan bakar terhadap udara disekitarnya. Laju pencampuran bahan bakar dengan udara lebih rendah dari laju reaksi kimia. Nyala difusi pada suatu pembakaran cenderung mengalami pergerakan nyala lebih lama dan menghasilkan asap lebih banyak daripada nyala *premix*. Nyala difusi dapat berupa nyala laminar (*Laminar Flame*) atau nyala turbulen (*Turbulent Flame*).

#### 2.3.1 Struktur Nyala Difusi Laminar

Nyala laminar (*Laminar Flame*) diperoleh pada laju aliran bahan bakar yang rendah. Bentuk dari nyala difusi dapat dibedakan menjadi dua bentuk nyala berdasarkan perbandingan diameter nosel pembawa udara. Jika diameter nosel pembawa udara relatif besar, sehingga dapat memberikan udara yang cukup untuk pembakaran yang sempurna, maka akan terbentuk *overventilated flame* yakni batas nyala akan konvergen terhadap sumbu dari nosel. Sebaliknya jika diameter nosel pembawa udara terlalu kecil, sehingga tidak dapat mensuplai udara yang cukup untuk pembakaran yang sempurna, maka akan terbentuk *underventilated flame* yakni permukaan nyala akan membesar dan menyentuh permukaan dalam

nosel pembawa udara. Bentuk dari *overventilated flame* dan *underventilated flame* ditunjukkan pada gambar 2.2 dibawah ini.



**Gambar 2.2.** (a) *Overventilated Flame* dan (b) *Underventilated Flame*

Nyala difusi laminar dapat dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu nyala difusi jet bebas, nyala difusi jet konsentrik, dan nyala difusi *counter flow*.

### 2.3.2 Struktur Nyala Difusi Turbulen

Jika laju pancaran bahan bakar pada nyala laminar dipercepat, maka mulai muncul aliran turbulen. Munculnya turbulen pada ujung nyala (*flame tip*), akan menyebabkan tinggi nyala berkurang dengan meningkatnya laju aliran dan mencapai nilai konstan pada nyala yang turbulen sepenuhnya. Bentuk transisi dari laminar menjadi turbulen terjadi pada saat bilangan Reynolds aliran ( $Re$ ) lebih dari 4000. Hubungan antara tinggi momentum nyala nosel sebagai fungsi kecepatan nosel ditunjukkan sebagai perubahan nyala turbulen. Bentuk nyala turbulen dapat ditunjukkan pada gambar 2.3 dibawah ini.



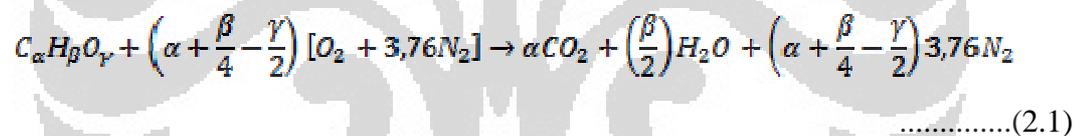
**Gambar 2.3.** Nyala api turbulen

Turbulensi pada gas yang tidak terbakar akan meningkatkan laju penjarangan nyala pada campuran bahan bakar-udara. Mekanisme turbulensi akan meningkatkan efisiensi proses perpindahan (kalor dan senyawa reaksi) sebagai hasil dari mixing pada permukaan nyala (*flame front*). Dengan demikian, kecepatan pembakaran pada campuran turbulen adalah tinggi.

## 2.4 EFFISIENSI BAHAN BAKAR

Effisiensi bahan bakar pada penelitian ini didefinisikan sebagai perbandingan antara massa bahan bakar actual yang terbakar dengan massa bahan bakar stoikiometri. Untuk itu pendekatan dalam menganalisa efisiensi bahan bakar yang dipakai adalah pembakaran yang sempurna atau stoikiometri.

Hasil pembakaran dari bahan bakar hidrokarbon yang terjadi secara sempurna akan menghasilkan gas buang yang terdiri dari  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , dan  $\text{N}_2$ . Persamaan kesetimbangan atom C, H, O dan N akan memenuhi persamaan seperti berikut :



dimana  $\alpha$ ,  $\beta$  dan  $\gamma$  adalah jumlah atom dari karbon, hidrogen, dan oksigen dalam senyawa pembakaran.

Sedangkan rasio bahan bakar dengan udara  $f$ , adalah sebagai berikut :

$$f = \frac{m_f}{m_{u_a}} = \frac{Mr_f \cdot n_f}{Mr_{u_a} \cdot n_{u_a}} \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

Perbedaan antara  $f$  aktual dengan  $f$  stoikiometri atau disebut dengan rasio ekivalen ( $\phi$ ) secara formula adalah sebagai berikut :

$$\phi = \frac{f_a}{f_s} \dots\dots\dots(2.3)$$

Ini berarti apabila  $\phi$  lebih besar dari 1 menunjukkan bahwa pada proses pembakaran terjadi kelebihan bahan bakar sehingga campuran seperti ini disebut dengan campuran kaya bahan bakar. Sedang bila  $\phi$  kurang dari 1 ini berarti terdapat kekurangan bahan bakaran campuran ini disebut dengan campuran miskin bahan bakar. Pembakaran yang baik adalah campuran yang nilai rasio ekivalennya mendekati nilai 1, yang berarti reaksi pembakarannya mendekati sempurna.

Rasio ekivalen  $\phi$  berhubungan dengan besarnya udara lebih pada proses pembakaran yang dinyatakan pada formula dibawah ini

$$\phi = \frac{100}{(\% UL + 100)} \dots\dots\dots(2.4)$$

Udara minimum yang dibutuhkan dalam proses pembakaran disebut udara teoritis. Dalam proses pembakaran yang sebenarnya sulit untuk melakukan pembakaran dengan menggunakan udara teoritis, sehingga proses pembakaran ini menggunakan udara lebih. Campuran udara kaya akan menghasilkan pembakaran yang tidak sempurna dan menghasilkan kadar CO yang tidak diinginkan.

Kadar udara berlebih dapat dihitung dari analisa gas buang yang menunjukkan kadar  $CO_2$  dan  $O_2$ . Udara berlebih ini dapat dihitung dengan formula:

$$\% UL = \frac{\chi_{O_2}}{\frac{\chi_{N_2}}{3,76} - \chi_{O_2}} \dots\dots\dots(2.5)$$

Massa udara aktual yang tersedia pada aliran resirkulasi dapat dihitung dengan menggunakan formula yang telah didapat pada penelitian terdahulu dimana terlihat bahwa ketinggian tangga, kecepatan *free stream* udara dan lebarnya sisi inlet bahan bakar mempengaruhi banyaknya udara yang bersirkulasi. Formula untuk menghitung massa udara aktual ini adalah sebagai berikut :

$$m_{ud\ akt} = 0,06 \cdot V_{ud} \cdot h \cdot 0,08 \cdot \rho_{ud} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

Dengan didapat banyaknya udara aktual yang bersirkulasi serta rasio bahan bakar dan udara yang sebenarnya, maka diperoleh besarnya massa bahan bakar aktual pada proses pembakaran yaitu :

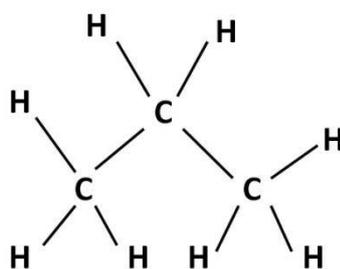
$$m_{f\ akt} = f_a \cdot m_{ud\ akt} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

Effisiensi bahan bakar sendiri merupakan perbandingan antara massa bahan bakar yang sebenarnya dengan massa bahan bakar stoikiometri atau diformulasikan sebagai berikut :

$$\eta_{bb} = \frac{m_{f\ akt}}{m_{f\ sto}} \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

## 2.5 SIFAT FISIKA-KIMIA BAHAN BAKAR

Propana adalah senyawa hidrokarbon yang didapat dari fraksi kondensat sumur-sumur gas alam atau fraksi ringan minyak mentah. Propana ini termasuk dalam kategori senyawa alkali yang memenuhi formula  $C_nH_{2n+2}$  sehingga propane mempunyai 3 unsur karbon akan mempunyai 8 unsur hidrogen atau  $C_3H_8$ .



Gambar 2. 4 Struktur molekul propana

Dalam penggunaan sehari-hari sebagai bahan bakar, propane dikenal juga sebagai LPG (*liquified petroleum gas*) yang dapat berupa campuran dengan sejumlah kecil propena, butana dan butena. Kadang ditambahkan juga etanetiol sebagai bahan pemberi bau agar dapat digunakan sebagai deteksi jika terjadi kebocoran. Pada umumnya dalam proses pembakaran pemilihan bahan bakar yang akan digunakan didasarkan pada properti fisik dan kimia yang terkandung dalam bahan bakar itu sendiri. Bentuk fisik propana ini dalam kondisi atmosfer dan temperatur 60 °F adalah gas dengan berat jenis yang lebih besar disbanding udara. Propana yang digunakan pada penelitian ini mempunyai kadar 95% sedang dalam konsentrasi yang kecil terdapat gas ikutan seperti gas etana, butana dan iso-butana. Gas propana ini memiliki berat jenis 1,87 kg/m<sup>3</sup>. Properti fisik dan kimia lainnya yang terkandung dalam bahan bakar itu sendiri diantaranya:

1. Nilai kalor (*heating value*) dan kalor pembakaran (*calorific value*).

Nilai kalor adalah kalor yang dihasilkan oleh pembakaran sempurna 1 kg atau satu satuan berat bahan bakar padat atau cair atau 1 m<sup>3</sup> atau 1 satuan volume bahan bakar gas, pada keadaan baku.

2. Kandungan air di dalam bahan bakar

Air yang terkandung dalam bahan bakar padat terdiri dari:

- Kandungan air internal atau air kristal, yaitu air yang terikat secara kimiawi.
- Kandungan air eksternal atau air mekanikal, yaitu air yang menempel pada permukaan bahan dan terikat secara fisis atau mekanis.

Air yang terkandung dalam bahan bakar menyebabkan penurunan mutu bahan bakar karena:

- Menurunkan nilai kalor dan memerlukan sejumlah kalor untuk penguapan,
  - Menurunkan titik nyala,
  - Memperlambat proses pembakaran, dan menambah volume gas buang.
3. Gravitasi jenis (*Spesific Gravity*)

Berat jenis dinyatakan dalam gram per ml, dalam derajat API, dalam lb per gallon, atau lb per ft<sup>3</sup>. Gravitasi jenis disingkat sp.gr. atau sg. Definisinya adalah perbandingan berat bahan bakar terhadap berat air diukur pada 600°F, yang pada suhu tersebut berat air = 62.4 lb/ft<sup>3</sup>.

4. Viskositas atau Kekentalan

Viskositas adalah kebalikan fluiditas atau daya alir. Makin tinggi viskositas maka makin sukar mengalir.

5. *Flash Point*

*Flash point* adalah suhu dimana bahan bakar terbakar dengan sendirinya oleh udara sekelilingnya disertai kilatan cahaya.

6. Titik bakar atau *Ignition Point*

Titik bakar adalah suhu dimana bahan bakar cair yang dipanaskan pada keadaan baku dapat terbakar selama waktu sekurang-kurangnya 5 detik.

Untuk lebih mengetahui lebih jelas tentang properti fisik dan kimia yang terkandung dalam propana, maka dapat dilihat pada table 2.1 dibawah ini.

Tabel 2.1 Properti Kimia Propana

Rumus Molekul	$C_3H_8$
Wujud	Gas
Warna	Tidak berwarna
Massa molar	44.096 g/mol
Titik didih	-43.67 °F (-42.04 ° C) pada 1 atm
Gravitasi jenis	1.5223 pada 70 °F (21.1 ° C) pada 1 atm

Universitas Indonesia

Titik uap	305.84 °F (-187.69 °C) pada 1 atm
Tekanan uap	109.73 psig, (756.56 kPa) pada 70 °F (21.1 °C)
Densitas	1.83 g/L, gas (0.5077 Kg/L liquid)
Solubility dalam air	0.1 g/cm <sup>3</sup> (37.80 °C)
Titik nyala	156 °F (-104 °C)
Suhu pembakaran	842 °F (432 °C)
Batas nyala bawah, LFL	2.2 %
Batas nyala atas, UFL	9.5 %

*Sumber : International Industrial Gases LTD*

## BAB III

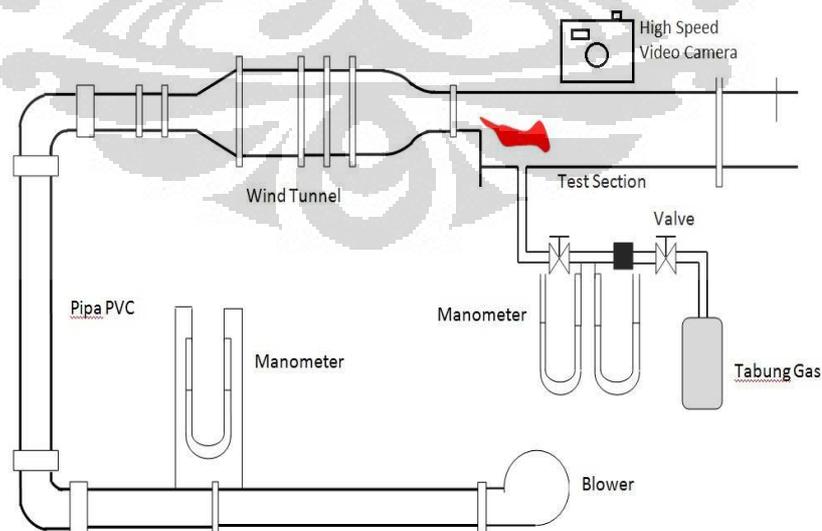
### PROSEDUR PENELITIAN

#### 3.1 PERALATAN PENELITIAN

Penelitian ini merupakan rangkaian penelitian mengenai *backward-facing step combustor* atau ruang bakar berkontur tangga tipe pembesaran tiba-tiba. Beberapa penelitian yang telah dilakukan antara lain mengenai distribusi temperatur, distribusi tekanan, mekanisme *flame holding*, dan limit stabilitas nyala, serta efisiensi konsumsi bahan bakar.

Sedangkan penelitian yang dilakukan kali ini adalah mengenai analisa hasil visualisasi nyala api difusi serta korelasinya terhadap perubahan nilai efisiensi pembakaran pada daerah lapisan geser (*shear layer*) dengan menggunakan *high speed video camera* pada ruang bakar berkontur tangga tipe pembesaran tiba-tiba dengan menggunakan bahan bakar propana.

Untuk memperoleh keseluruhan data penelitian diatas, maka penulis menggunakan peralatan yang dibutuhkan yang terdiri dari sistem suplai bahan bakar, sistem suplai udara untuk pembakaran, *test section* dan *high speed video camera*. Secara skematik rangkaian peralatan pengujian dapat dilihat seperti pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.1 Skema Peralatan Penelitian**

Penjelasan mengenai peralatan pengujian ini adalah sebagai berikut :

### 3.1.1. Sistem Suplai Udara

Sistem suplai udara ini berfungsi untuk memberikan sejumlah udara yang dibutuhkan untuk proses pembakaran dari atmosfer ke ruang bakar (*test section*). Sistem ini terdiri dari :

#### 3.1.1.1. Blower

Berfungsi untuk menyuplai udara bertekanan dari lingkungan ke sistem dengan kondisi yang sesuai dengan kebutuhan penelitian. Spesifikasinya adalah sebagai berikut : ukuran diameter output 4", 1 phasa, 220V/2.5A, 3000-3600 rpm. *Blower* ini mampu mensuplai udara bertekanan dalam ruang bakar dengan kecepatan aliran maksimum 14m/s jika pada sistem perpipaan tidak ada hambatan seperti orifis.



Gambar 3.2 Blower untuk suplai udara

#### 3.1.1.2. Sistem Perpipaan

Berfungsi untuk menyalurkan udara bertekanan dari blower ke *wind tunnel*. Pipa yang dipakai adalah pipa PVC dengan diameter 4 inci. Pada sistem ini terdapat orifis dan 2 *pressure tap* yang dihubungkan dengan selang ke manometer. Sistem perpipaan dan blower dapat dilihat pada gambar 3.4



**Gambar 3.3 Sistem Perpipa**

### 3.1.1.3. *Wind Tunner* skala kecil

Berfungsi untuk menghasilkan aliran udara dengan profil kecepatan yang seragam pada keluaran *nozzle* nya yang berukuran 80x80mm. untuk memenuhi fungsinya *wind tunnel* ini terdiri dari beberapa bagian, diantaranya adalah :

- Penyearah aliran (*straighter*) yang berfungsi untuk menyearahkan aliran udara. Dalam *wind tunnel* ini terdapat dua penyearah, yang pertama terletak pada saat udara memasuki *wind tunnel*, dan yang kedua terletak setelah aliran udara melewati *diffuser* dengan dimensi yang lebih besar dibandingkan yang pertama.
- *Diffuser* berfungsi untuk mengurangi kecepatan aliran udara sehingga mengurangi turbulensi aliran udara yang berasal dari *blower*.
- Lapisan penyekat (*screens*) digunakan untuk memperkecil turbulensi udara sehingga pada saat udara memasuki *nozzle* diharapkan turbulensi udara cukup kecil. Diantara setiap bagian *wind tunnel* ditempelkan lapisan penyekat (*meshwire*) yang berukuran 18 lubang per in<sup>2</sup>.
- *Converging nozzle* merupakan bagian terakhir dari segala upaya desain untuk menghasilkan aliran yang seragam.
- *Settling chamber* merupakan bagian yang berisi *section-section wind tunnel* yang memiliki lapisan penyekat (*screen*). Bagian-bagian ini dapat

dibongkar pasang. Desain seperti ini dimaksudkan agar bagian di dalamnya dapat dibersihkan secara berkala.



**Gambar 3.4 Wind Tunnel Skala Kecil**

### **3.1.2. Test Section**

Alat ini merupakan tempat dimana dilakukan pengujian terhadap kondisi kestabilan nyala dan visualisasi menggunakan *high speed video camera* dengan berbagai parameter pengujian yang berbeda. Tempat pengujian ini terbuat dari pelat kuningan 5mm dan mempunyai dimensi panjang total 400 mm dengan lubang berbentuk bujur sangkar berukuran 80x80 mm pada sisi *inlet* dan 80x125 mm pada sisi *outlet* dan mempunyai tangga dengan ketinggian yang dapat diubah-ubah sesuai dengan kondisi yang diinginkan penguji dengan menggunakan *laboratory jack*. Pada pelat bagian dasar, terdapat celah melintang dengan panjang 70 mm, lebar 1,5 mm yang digunakan sebagai *injector* bahan bakar, dengan jarak  $l_f$  sebesar 80 mm dari tangga. Sedangkan pada sisi kanan dan kiri *test section* dipasang pelat alumunium pada saat pengambilan data limit stabilitas penyalan sedang pada saat visualisasi bentuk nyala api alumunium ini diganti dengan kaca tahan panas. Alat ini juga dilengkapi dengan tutup yang terbuat dari pelat besi 1 mm dengan lubang berukuran 20mm yang digunakan sebagai lubang pengamatan selama pengambilan data limit stabilitas nyala maupun efisiensi pembakaran sekaligus sebagai tempat masuk *lighter* untuk menyalakan campuran bahan bakar dan udara dalam *test section*.



**Gambar 3.5 Test section**

Selain itu, alat ini juga dilengkapi dengan *exhaust ducting* berdiameter 6 inchi pada sisi outlet, untuk memastikan seluruh gas buang sisa pembakaran dapat dikeluarkan dari laboratorium pengamatan.

### **3.1.3. Sistem Suplai Bahan Bakar**

Sistem ini berfungsi untuk mengatur besarnya aliran/debit bahan bakar yang akan dialirkan menuju *test section*. Alat ini terdiri dari 2 buah *U-shaped manometer*, yang masing-masing juga dilengkapi dengan sepasang katup jarum (*needle valve*). Sepasang *U-shaped manometer* pertama digunakan sebagai pengatur debit aliran bahan bakar, mempunyai panjang 1000 mm, terbuat dari pipa *acrylic* diameter 11 mm. alat ini juga dilengkapi dengan *capillary flowmeter* berukuran 0,8 mm.



**Gambar 3.6 Pengatur dan pengukur suplai bahan bakar**

Sebagai suatu sistem yang digunakan untuk menentukan debit aliran bahan bakar, sistem ini telah dikalibrasi dengan memakai *Wet Gas Meter* Shinagawa WE-2.5 A sebelum dipakai dalam pengujian.



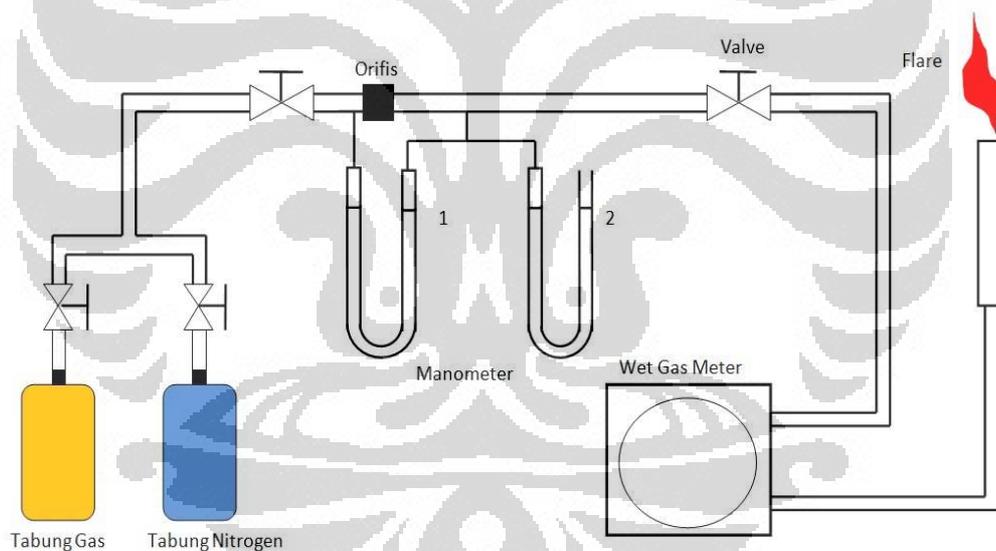
**Gambar 3.7 Wet gas meter shinagawa.**

## 3.2 KALIBRASI

### 3.2.1 Kalibrasi Sistem Suplai Bahan Bakar

Penelitian ini harus melalui beberapa prosedur penelitian pendahuluan sebelum melakukan prosedur pengambilan data yang sesuai dengan tujuan dari penelitian ini. Tahapan-tahapan tersebut adalah seperti yang diuraikan dibawah ini.

Tahapan ini dilakukan untuk mengkalibrasi manometer U yang akan dipakai sebagai *flowmeter* pengukur debit aliran bahan bakar yang disuplai ke dalam ruang bakar. Sistem ini dikalibrasi dengan menggunakan peralatan *Wet Gas Meter* Shinagawa WE – 2.5 A dengan skema kalibrasi seperti Gambar 3.7 dibawah ini.



Gambar 3.8 Skema Kalibrasi Manometer Bahan Bakar

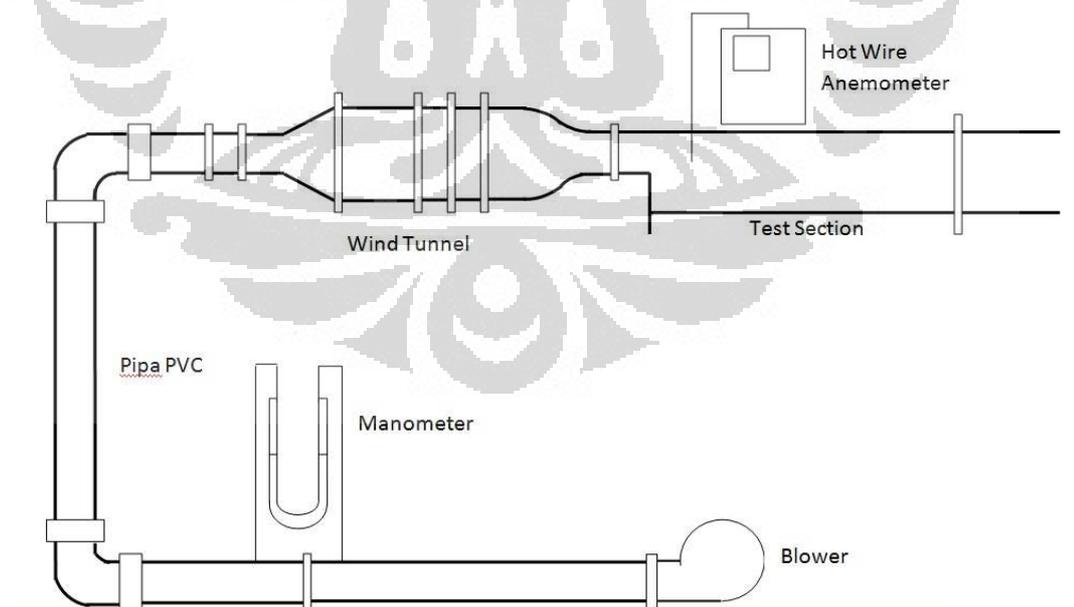
Bahan bakar propana dari tabung dialirkan melewati manometer U yang diantara keduanya telah dipasang *capillary flowmeter* (orifis), maka akan terbaca adanya perbedaan ketinggian permukaan  $\Delta h$  pada manometer 1. Sedangkan manometer 2 berfungsi untuk membaca *back pressure* yang dalam hal ini selalu dijaga konstan. Jika terjadi  $\Delta h$  pada manometer 1,  $\Delta h$  pada manometer 2 harus dijaga konstan. *Back pressure* yang dipakai selama kalibrasi adalah 300 mm.

Untuk setiap *back pressure* ini diambil data setiap kenaikan 50 mm pertama kemudian dilanjutkan setiap 100 mm dari manometer 1 untuk *capillary flowmeter* yang berukuran 0,8 mm. Untuk setiap kenaikan  $\Delta h$  tersebut diukur waktu yang diperlukan oleh gas untuk mengalir dengan kapasitas tertentu yang terbaca pada flow meter. Data mentah yang didapat adalah  $\Delta h$ , waktu dan volume gas.

Dari data tersebut dibuat grafik hubungan antara  $\Delta h$  dengan debit gas yang mengalir dan dari grafik tersebut diperoleh persamaan garisnya. Meskipun demikian hanya ada satu persamaan yang dipakai selama pengujian, yaitu yang diperoleh dari data untuk ukuran *capillary flowmeter*  $\varnothing$  0.8 mm dengan  $\Delta h$  *back pressure* = 300 mm. Data setiap kalibrasi suplai bahan bakar ini dapat dilihat pada Lampiran. Selain itu untuk setiap pengambilan data, sistem harus selalu dibersihkan (*purging*) dengan mengalirkan nitrogen ke dalamnya.

### 3.2.2 Kalibrasi Sistem Suplai Udara

Tahapan ini dilakukan untuk memastikan besarnya suplai udara yang mengalir dari *blower* menuju ruang bakar. Skema kalibrasinya dapat dilihat dari Gambar 3.8 di bawah ini.



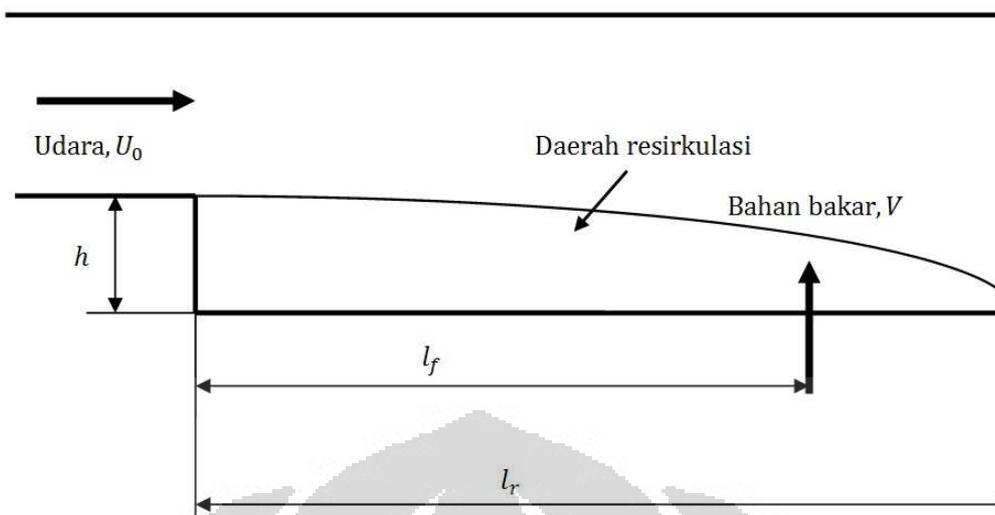
Gambar 3.9 Skema Kalibrasi Sistem Suplai Udara

Udara dialirkan dari *blower* menuju orifis. Adanya orifis ini menyebabkan terjadinya beda tekanan pada sisi-sisi saluran udara sebelum dan sesudah orifis. Beda tekanan inilah yang kemudian dibaca sebagai perbedaan ketinggian permukaan  $\Delta h$  pada manometer orifis. Besar kecilnya aliran udara dari *blower* dapat diatur dengan mengatur posisi bukaan hisapan *blower*. Kalibrasi dilakukan untuk setiap 2 mm kenaikan  $\Delta h$  pada manometer orifis. Aliran ini setelah melewati *wind tunnel*, kemudian kecepatannya akan dibaca oleh *Anemometer* tepat di sisi keluaran *wind tunnel*. Angka yang terbaca pada manometer *anemometer* ini kemudian direpresentasikan sebagai kecepatan *main stream*  $U_0$  aliran udara. Data-data kecepatan *main stream* untuk setiap kenaikan  $\Delta h$ , bukaan katup buang, dan ukuran orifis yang dipakai adalah  $\emptyset$  3 inci kemudian dibuat grafik dan persamaannya. Meskipun demikian, selama penelitian dilaksanakan, hanya dipakai satu persamaan, yaitu yang berasal dari data orifis  $\emptyset$  3,0 inci dengan bukaan katup buang  $0^\circ$ . Data lengkap hasil kalibrasi sistem suplai udara dapat dilihat pada Lampiran.

### 3.3 PROSEDUR PENGAMBILAN DATA

#### 3.3.1 Stabilisasi Penyalaan

Dalam penelitian ini pengukuran limit stabilitas nyala dilakukan untuk beberapa parameter diantaranya kecepatan aliran udara *main stream*  $U_0$ , ketinggian tangga  $h$ , kecepatan injeksi bahan bakar  $V$ , dan jarak lubang slot injeksi dari tangga  $l_f$  sedang  $l_r$  adalah jarak dari tangga ke *reattachment point*. Parameter kondisi pengukuran yang dipakai selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 3.9. Dalam penelitian ini dipakai 1 ukuran  $l_f$ , yaitu 80 mm. Sedangkan nilai  $h$  divariasikan dari 20 – 40 mm.



**Gambar 3.10 Parameter Pengukuran**

Sejumlah parameter geometri penulis variasikan guna mendapatkan data stabilitas nyala propane untuk berbagai macam kondisi, yaitu :

- Letak Injeksi ( $l_f$ ) : 80 mm
- Kecepatan *Main Stream* ( $U_0$ ) : 6 – 10 m/s
- Tinggi *Step* ( $h$ ) : 20 mm, 30mm dan 40 mm

Pengukuran dilakukan untuk setiap  $l_f$  dengan rasio  $l_f/h$  yang sama untuk masing-masing  $l_f$  yaitu sebesar 2, 2,67 dan 4. Di setiap titik kecepatan aliran udara yang telah ditentukan (dengan menyesuaikan kenaikan setiap 2 mm  $\Delta h$  manometer orifis *blower*) diamati sampai sejauh mana stabilitas nyala api propane akan tercapai dengan mengurangi suplai bahan bakar secara bertahap ke dalam ruang bakar yang ditandai dengan padamnya api. Pada saat nyala api mati maka pada kondisi inilah dikatakan batas stabilitas nyala.

### 3.3.2. Visualisasi Nyala Api

Proses pengambilan gambar yang dilakukan menggunakan *high speed video camera* dilakukan untuk mendapatkan visualisasi mengenai karakteristik nyala api difusi pada daerah lapisan geser (*shear layer*) dari mulai api menyala hingga mencapai titik batas stabilitas nyala. Proses pengambilan gambar dilakukan menggunakan AOS Technologies AG MotionXtra HG-SE dengan lensa

Universitas Indonesia

Nikon AF Micro Niccor 60mm 1:2,8D. Kemudian peralatan tersebut disambungkan dan dioperasikan dengan komputer menggunakan perangkat lunak VITcam 1.5.9 guna mendapatkan visualisasi berupa potongan-potongan gambar yang nantinya akan dianalisa luasan permukaan yang terbentuk secara 2 dimensi. Kecepatan potongan gambar yang ditetapkan adalah 250 gambar/detik dengan durasi pengambilan gambar selama 4 detik pada setiap parameter yang telah ditentukan. Kondisi *test section* bagian kanan menggunakan kaca tahan panas, bagian kiri ditutupi pelat alumunium dengan diberi warna hitam sebagai background pengambilan gambar dan bagian atas ditutupi pelat alumunium serta dibantu dengan penyalan lampu untuk mendapatkan asupan cahaya yang cukup.



**Gambar 3.11 High Speed Video Camera**

### 3.3.3 Parameter-Parameter Pengambilan Gambar

Dalam proses pengambilan gambar, terdapat parameter-parameter yang telah ditentukan dimana parameter-parameter tersebut merupakan hasil dari penelitian sebelumnya<sup>[2]</sup>.

Terdapat 3 letak injeksi bahan bakar berbeda yang diatur oleh perbandingan  $l_f/h$ , yaitu  $l_f/h = 2$  dengan ketinggian tangga 40 mm,  $l_f/h = 2,67$  dengan ketinggian tangga 30 mm dan  $l_f/h = 4$  dengan ketinggian tangga 20 mm.

- $l_f/h = 2$  dengan tinggi tangga ( $h$ ) 40 mm  
Pengambilan data sebanyak 3 kali dengan variasi  $V$  udara 6.0 m/s, 8.1 m/s, dan 10.1 m/s serta  $V$  bahan bakar 0.139 m/s, 0.141 m/s, dan 0.198 m/s.
- $l_f/h = 2,67$  dengan tinggi tangga ( $h$ ) 30 mm  
Pengambilan data sebanyak 3 kali dengan variasi  $V$  udara 6.0 m/s, 8.1 m/s, dan 10.1 m/s serta  $V$  bahan bakar 0.174 m/s, 0.178 m/s, dan 0.223 m/s
- $l_f/h = 4$  dengan tinggi tangga ( $h$ ) 20 mm  
Pengambilan data sebanyak 3 kali dengan variasi  $V$  udara 6.0 m/s, 8.1 m/s, dan 10.1 m/s serta  $V$  bahan bakar 0.174 m/s, 0.174 m/s, dan 0.223 m/s

Data diatas diambil berdasarkan nilai efisiensi tertinggi yang didapat dari penelitian sebelumnya pada masing masing kenaikan  $\Delta h$  udara serta perbandingan  $l_f/h$ . Kemudian selanjutnya pengambilan gambar dilakukan pada titik dimana terdapat nilai efisiensi paling rendah yaitu pada  $l_f/h = 4$  dengan tinggi tangga ( $h$ ) 20 mm pada  $V$  udara 6.0 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.223 m/s. Hal ini dilakukan bertujuan untuk mendapatkan parameter pembanding karakteristik nyala api dan luasan api yang terbentuk antara nilai efisiensi konsumsi bahan bakar tertinggi dengan nilai efisiensi konsumsi bahan bakar terendah.

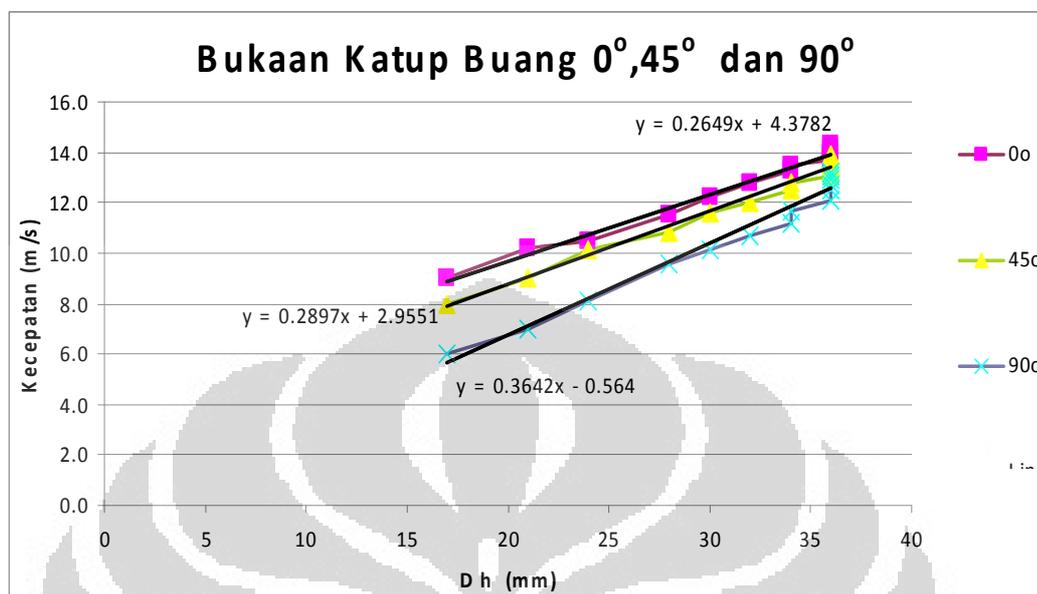
Kemudian pengambilan gambar dilakukan pada titik dimana terdapat nilai efisiensi tertinggi hingga nyala api padam guna mendapatkan karakteristik bentuk api pada *extinct point*. Nilai efisiensi konsumsi bahan bakar tertinggi terdapat pada  $l_f/h = 2$  dengan ( $h$ ) = 40 mm pada  $V$  udara 6.0 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.141 m/s.

### 3.4 PERSAMAAN-PERSAMAAN KONVERSI DATA MENTAH

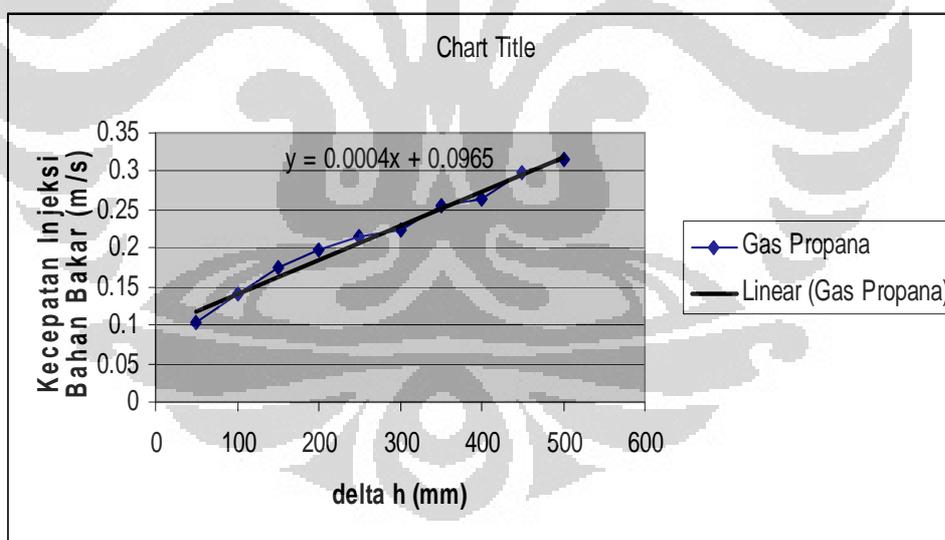
#### 3.4.1 Stabilisasi Penyalaan

Berikut ini adalah persamaan yang dipakai untuk mengkonversikan data mentah stabilitas nyala yang berupa  $\Delta h$  menjadi data kecepatan, baik itu kecepatan aliran *main stream* udara  $U_0$  maupun kecepatan injeksi bahan bakar,  $V$ .

Persamaan-persamaan ini diperoleh dari hasil kalibrasi sistem suplai udara dan sistem suplai bahan bakar.



Gambar 3.12 Grafik Hasil Kalibrasi Sistem Suplai Udara



Gambar 3.13 Grafik Hasil Kalibrasi Sistem Suplai Bahan Bakar

### 3.5. ANALISA KESALAHAN

Dalam melakukan pengukuran terdapat dua jenis kesalahan yaitu kesalahan sistematis (*systematical error*) dan kesalahan acak (*random error*). Kesalahan

sistematis merupakan kesalahan pembacaan dari alat ukur. Sedang acak merupakan kesalahan yang disebabkan faktor lingkungan atau kesalahan manusia (*human error*).

### 3.5.1. Kesalahan Sistematis

Pengukuran yang dilakukan pada penelitian ini adalah kecepatan injeksi bahan bakar dan kecepatan udara dimana alat ukurnya telah dikalibrasi. Peralatan kalibrasi itu sendiri adalah *hot wire anemometer* untuk mengukur kecepatan udara dan *stop watch* serta *wet gas meter*. *Hot wire anemometer* memiliki keakurasian  $\pm 2\%$ .

Untuk sistem suplai udara alat yang digunakan hanya *anemometer* sehingga faktor kesalahannya

Untuk sistem suplai bahan bakar alat yang digunakan *stop watch* dan *wet gas meter* sehingga faktor kesalahannya adalah

sehingga faktor kesalahan debit bahan bakar yang terbaca adalah

Sedang untuk pengukuran efisiensi bahan bakar alat yang digunakan adalah *gas analyzer* dimana untuk pengukuran  $\text{CO}_2$  alat ini memiliki keakurasian  $\pm 4\%$  dan untuk pengukuran  $\text{O}_2$  keakurasian sebesar  $\pm 2\%$ , sehingga

$$\frac{\Delta \text{CO}_2}{\text{CO}_2} = \frac{0,04}{0,8} = 0,05$$

$$\frac{\Delta O_2}{O_2} = \frac{0,02}{20,8} = 0,001$$

sehingga kesalahan dalam pengukuran efisiensi bahan bakar

$$\frac{\Delta CO_2}{CO_2} + \frac{\Delta O_2}{O_2} = 0,05 + 0,001 = 0,051$$

### 3.5.2. Kesalahan Acak

Kesalahan acak pada saat pengambilan data sangat sering terjadi. Untuk mendapatkan nilai kesalahan acak digunakan persamaan :

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{x})^2}{N}} \dots \dots \dots (3.1)$$

dengan,

$$\bar{x} = \frac{\sum X}{N}$$

sehingga nilai kesalahan acak :

Untuk sistem suplai bahan bakar = 0,01

Untuk sistem suplai udara = 0,015

Untuk pengukuran efisiensi bahan bakar = 0,00257

### 3.5.3. Kesalahan Keseluruhan

Untuk menentukan kesalahan keseluruhan pada pemakaian alat-alat digunakan persamaan dibawah ini :

$$E = \sqrt{(E_1)^2 + (E_2)^2} \dots \dots \dots (3.2)$$

dimana

$E$  = Kesalahan keseluruhan

$E_1$  = Kesalahan sistematis

$E_2$  = Kesalahan tidak disengaja

Jadi nilai keakurasian dari :

1. Pengukuran sistem bahan bakar = 0,014 atau 1,4 %
2. Pengukuran sistem suplai udara = 0,015 atau 1,5 %
3. Pengukuran efisiensi bahan bakar = 0,05 atau 5 %



## BAB IV

### HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 HASIL VISUALISASI NYALA API

Dari penelitian yang telah dilakukan, diperoleh data mentah berupa data gambar hasil visualisasi menggunakan *High Speed Video Camera*. Pengambilan gambar diklasifikasikan berdasarkan  $\Delta h$  udara dan  $\Delta h$  bahan bakar serta nilai efisiensi konsumsi bahan bakar. Durasi yang diambil setiap titik adalah 4 detik dengan jumlah *frame* 250 frame/detik. Maka jumlah data yang didapat adalah 1000 buah gambar pada masing-masing titik. Untuk memudahkan analisa maka diambil 30 buah gambar dari setiap titik yang ditentukan. Hasil yang didapat disertakan pada lampiran.

##### 4.1.1. Hasil Visualisasi $L_f/h = 2$ dengan $(h) = 40$ mm

Pada perbandingan  $L_f/h = 2$  telah ditentukan 3 titik pengambilan gambar yang mengacu kepada nilai efisiensi tertinggi untuk setiap perubahan kecepatan aliran *main stream* udara dan  $\Delta h$  bahan bakar.

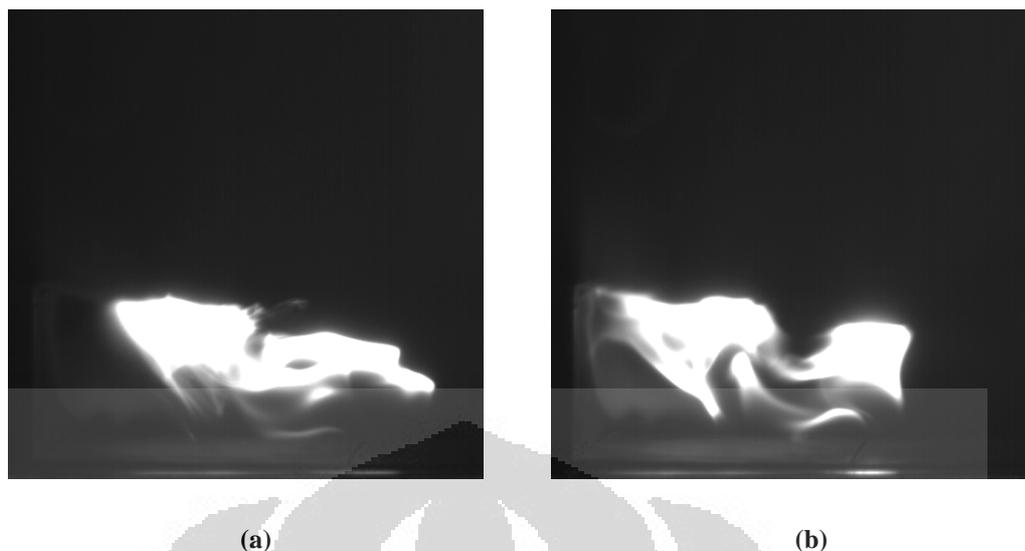


(a)

(b)

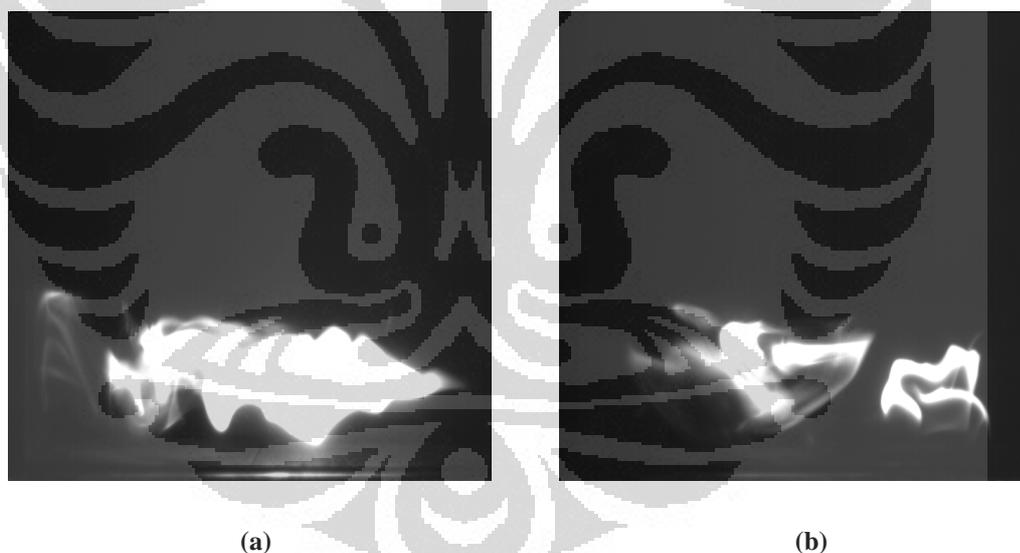
Gambar 4.1 . Visualisasi Nyala Api pada  $V$  udara 6.0 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.139 m/s.

(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara



**Gambar 4.2 . Visualisasi Nyala Api pada  $V$  udara 8.1 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.141 m/s.**

**(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara**



**Gambar 4.3 . Visualisasi Nyala Api pada  $V$  udara 10.1 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.198 m/s.**

**(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara**

Gambar 4.1 (a) dan (b) – 4.3 (a) dan (b) diatas diambil dengan kemampuan menangkap gambar sebanyak 250 gambar/detik dengan durasi 4 detik. Dari gambar diatas dapat kita lihat bahwa semakin tinggi kecepatan *free stream* udara dan debit bahan bakar yang masuk maka nyala api cenderung

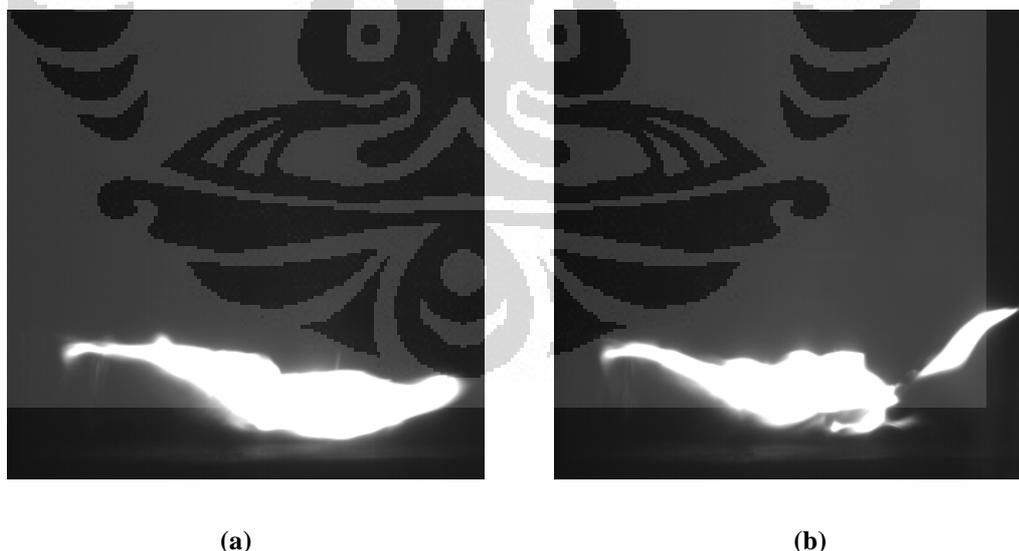
**Universitas Indonesia**

bergerak dari stabil menjadi turbulen. Terlihat bahwa pada gambar 4.1.(a) nyala api terlihat sangat stabil pada kecepatan udara 6,0 m/s. Fluktuasi perubahan terlihat jelas ketika  $V$  bahan bakar dan kecepatan *free stream* udara dinaikan pada gambar 4.2. (a) dan 4.3. (a). Karakter nyala api cenderung berubah dalam bentuk geometri serta waktu. Dari hasil perhitungan nilai efisiensi, nyala api yang terbentuk pada gambar 4.2. (a) memiliki nilai efisiensi konsumsi bahan bakar paling tinggi yaitu 35,77 %. Sedangkan untuk nilai efisiensi konsumsi bahan bakar terendah ada pada gambar 4.3. (a) yaitu sebesar 26,95 %.

Dari pengamatan ketiga buah titik nyala diatas dapat diketahui bahwa sekalipun pada nilai efisiensi tertinggi, tingkat turbulensi api serta ketidakstabilan bentuk masih sangat mungkin terjadi. Hal ini dapat diakibatkan oleh pengaruh geometri ruang bakar serta ketidakstabilan suplai udara dari blower.

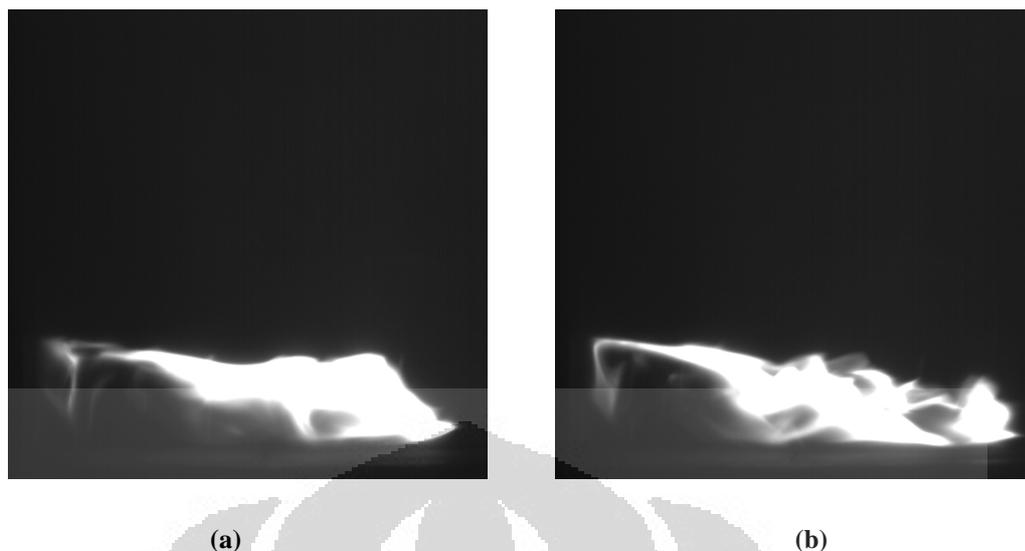
#### 4.1.2. Hasil Visualisasi $L_f/h = 2,67$ dengan $(h) = 30$ mm

Pada perbandingan  $L_f/h = 2,67$  telah ditentukan 3 titik pengambilan gambar yang mengacu kepada nilai efisiensi tertinggi untuk setiap perubahan kecepatan aliran *main stream* udara dan  $\Delta h$  bahan bakar.



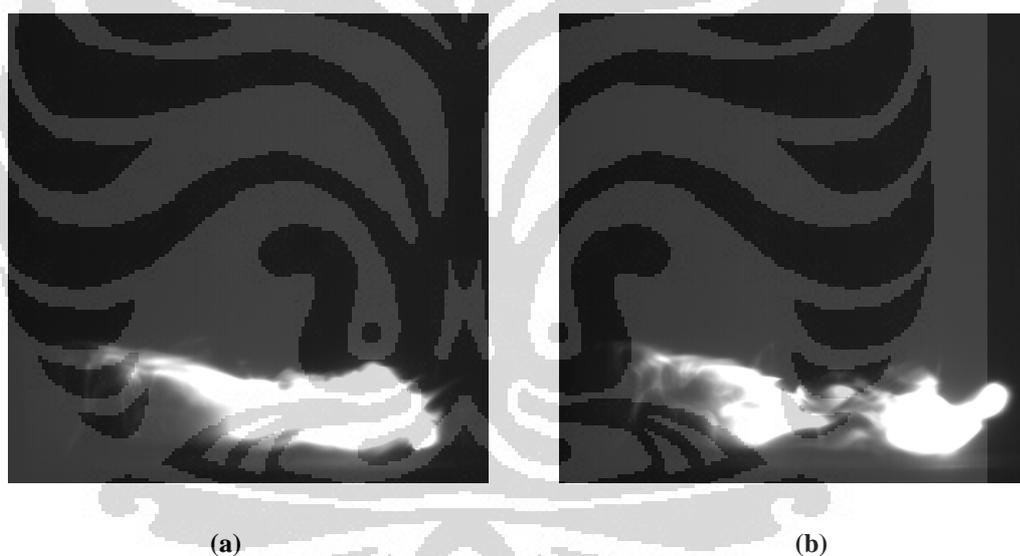
**Gambar 4.4. Visualisasi Nyala Api pada  $V$  udara 6.0 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.174 m/s.**

(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara



**Gambar 4.5 . Visualisasi Nyala Api pada  $V$  udara 8.1 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.178 m/s.**

**(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara**



**Gambar 4.6. Visualisasi Nyala Api pada  $V$  udara 10.1 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.223 m/s.**

**(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara**

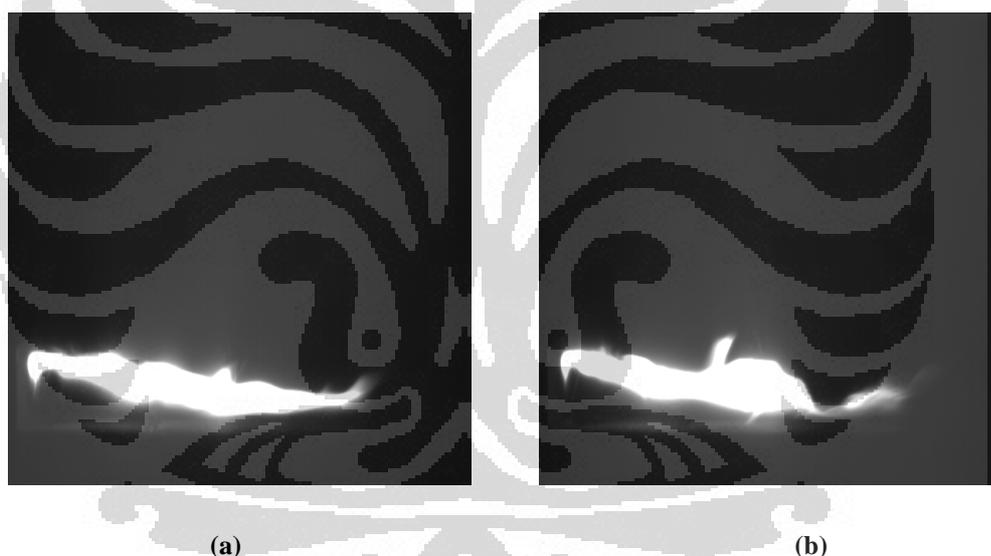
Gambar 4.4. (a) dan (b) - 4.6. (a) dan (b) diatas diambil dengan kemampuan menangkap gambar sebanyak 250 *frame*/detik dengan durasi 4 detik. Dari gambar diatas dapat kita lihat bahwa nyala api yang terjadi cenderung tidak memperlihatkan karakteristik perubahan bentuk yang signifikan pada setiap titik pengambilan gambar. Akan tetapi fenomena yang sama terjadi yaitu nyala api stabil terganggu oleh adanya turbulensi udara yang mungkin disebabkan oleh

**Universitas Indonesia**

bentuk geometri ruang bakar serta asupan udara yang tidak stabil. Perubahan yang terjadi pada setiap titik memiliki kecenderungan yang hampir sama yaitu adanya nyala api yang terpisahkan dari bagian utamanya seperti terlihat pada gambar 4.4. (b), 4.5. (b) dan 4.6. (c). Dari hasil perhitungan nilai efisiensi, nyala api yang terbentuk pada gambar 4.4. (a) memiliki nilai efisiensi konsumsi bahan bakar paling tinggi yaitu 19,70% %. Sedangkan untuk nilai efisiensi konsumsi bahan bakar terendah ada pada gambar 4.6. (a) yaitu sebesar 14,13 %.

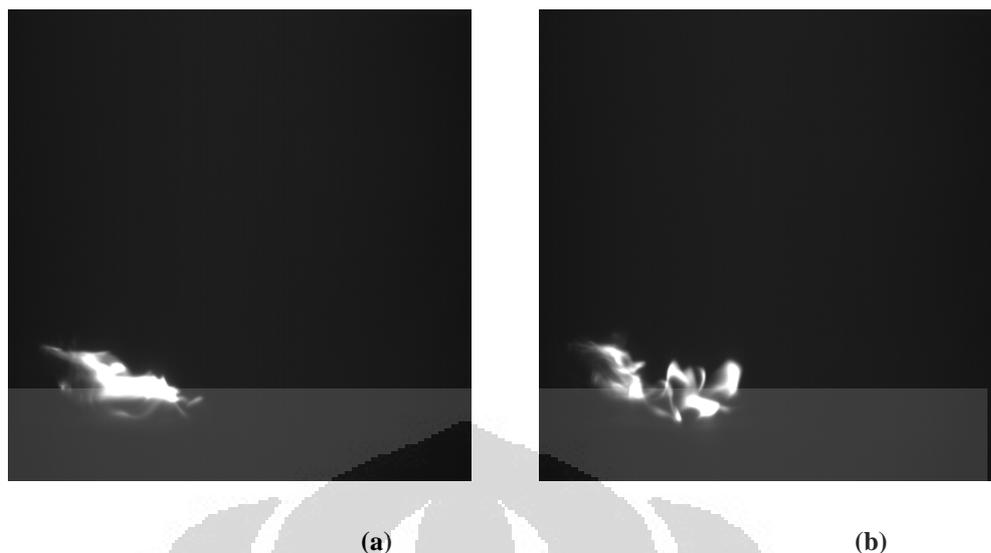
#### 4.1.3. Hasil Visualisasi $L_f/h = 4$ dengan $(h) = 20$ mm

Pada perbandingan  $L_f/h = 4$  telah ditentukan 3 titik pengambilan gambar yang mengacu kepada nilai efisiensi tertinggi untuk setiap perubahan kecepatan aliran *main stream* udara dan  $\Delta h$  bahan bakar.



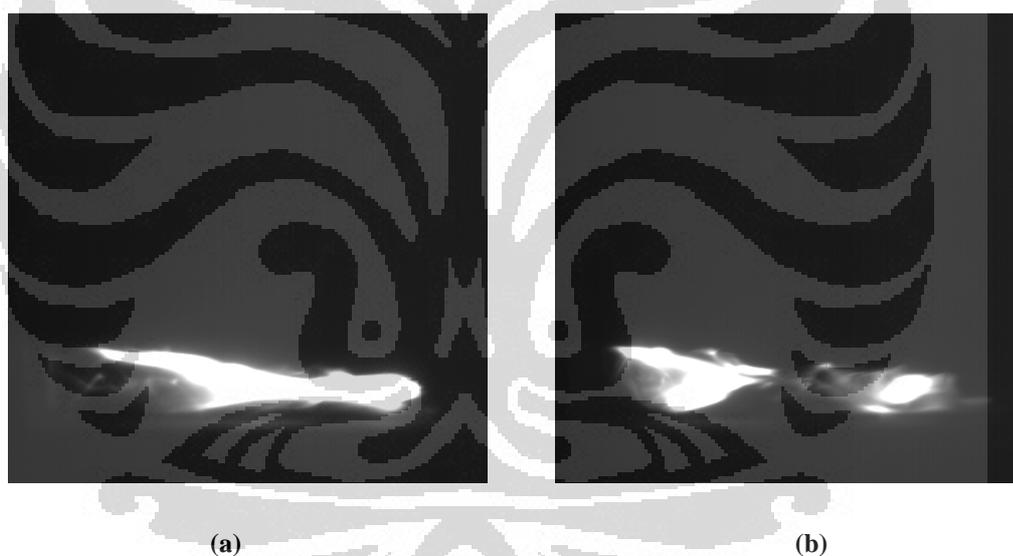
Gambar 4.7. Visualisasi Nyala Api pada  $V$  udara 6.0 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.174 m/s.

(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara



**Gambar 4.8. Visualisasi Nyala Api pada  $V$  udara 8.1 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.174 m/s.**

(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara



**Gambar 4.9. Visualisasi Nyala Api pada  $V$  udara 10.1 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.223 m/s.**

(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara

Gambar 4.7. (a) dan (b) - 4.9. (a) dan (b) diatas diambil dengan kemampuan menangkap gambar sebanyak 250 *frame*/detik dengan durasi 4 detik. Dari gambar diatas dapat kita lihat bahwa nyala api yang terjadi pada gambar 4.8. (a) cenderung memiliki bentuk geometri yang sangat berbeda dengan gambar 4.7. (a). Pada gambar 4.8. (a) terlihat bahwa nyala api yang terbentuk memiliki bentuk

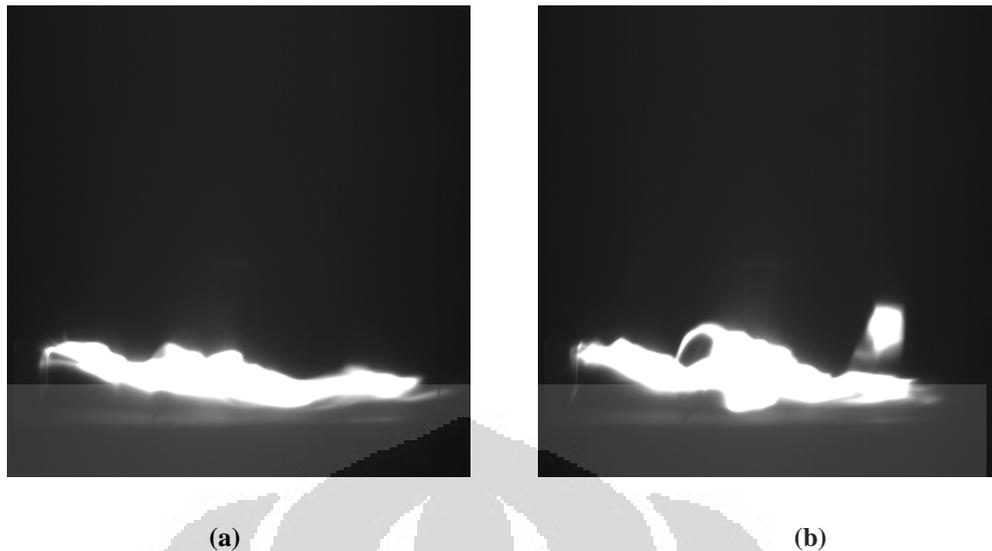
geometri yang lebih tidak stabil dibandingkan dengan gambar 4.7. (a) dikarenakan dengan asupan bahan bakar yang sama yaitu pada  $V$  bahan bakar 0.174 m/s, kecepatan *free stream* udara yang dialirkan lebih besar yaitu sebesar 8,1 m/s. Hal ini menyebabkan nyala api yang terbentuk cenderung memiliki bentuk geometri yang tidak stabil. Sedangkan pada gambar 4.9. (a). nyala api terlihat kembali stabil.

Akan tetapi fenomena yang sama terjadi pada ketiga titik pengambilan gambar tersebut yaitu adanya bagian api yang terlepas dari bagian utamanya. Kesamaan fenomena yang terjadi pada ketiga titik diatas dengan ketiga titik yang diambil pada  $l_f/h = 2,67$  dengan  $(h) = 30$  mm disebabkan oleh bentuk geometri ruang bakar dan fluktuasi perubahan waktu serta asupan udara yang tidak stabil. Akan tetapi dari hasil perhitungan nilai efisiensi, nyala api yang terbentuk pada gambar 4.8. (a) memiliki nilai efisiensi konsumsi bahan bakar paling tinggi yaitu 13,52 %. Sedangkan untuk nilai efisiensi konsumsi bahan bakar terendah ada pada gambar 4.9. (a) yaitu sebesar 11,51 %.

#### 4.1.4. Hasil Visualisasi Nilai Efisiensi Terendah

Visualisasi dari nilai efisiensi konsumsi bahan bakar terendah ini dilakukan berfungsi sebagai pembandingan antara nyala api pada nilai efisiensi di titik yang memiliki nilai paling tinggi. Hal ini dilakukan guna mendapatkan karakteristik serta gambaran mengenai fenomena yang terjadi antara nilai efisiensi tertinggi yang didapat dengan nilai efisiensi terendah.

Kondisi yang diambil pada visualisasi ini adalah pada perbandingan  $l_f/h = 4$  dimana posisi  $\Delta h$  udara berada pada 10 mm dengan kecepatan *free stream* udara sebesar 6,0 m/s dan posisi  $\Delta h$  bahan bakar berada pada 300 mm.



**Gambar 4.10. Visualisasi Nyala Api pada  $V$  udara 6.0 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.223 m/s.**

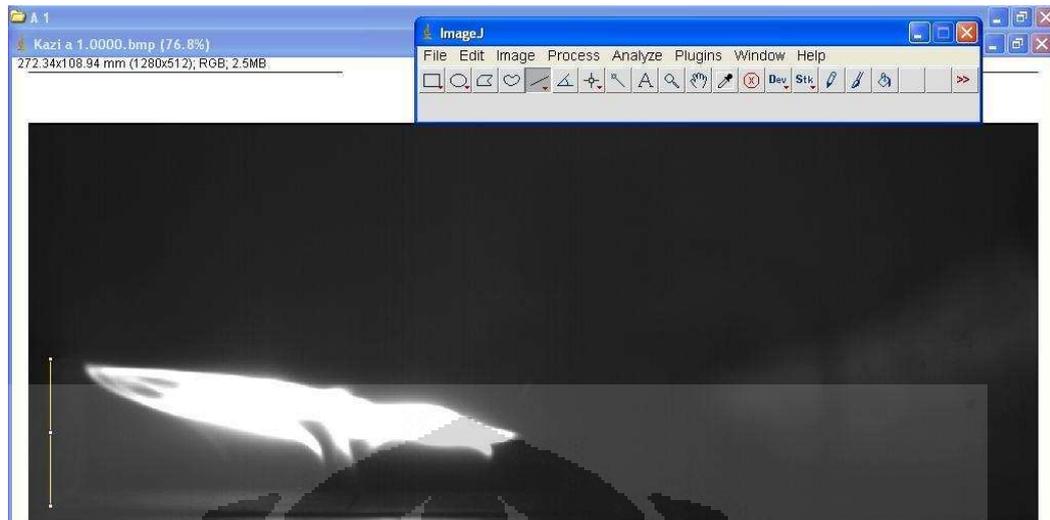
**(a) Nyala Api Stabil dan (b) Nyala api yang terkena turbulensi udara**

Dari hasil visualisasi diatas dapat diketahui bahwa karakteristik nyala api pada titik tersebut cenderung memiliki bentuk geometri yang paling panjang dibandingkan dengan dengan bentuk nyala api lainnya. Hal ini dipengaruhi oleh jumlah asupan bahan bakar yang terlalu besar pada kecepatan *free stream* udara 6,0 m/s.

Fenomena yang sama pun terjadi pada nyala api di titik ini yaitu adanya bagian nyala api yang terlepas dari bagian utamanya. Hal ini seperti yang telah diungkapkan diatas dipengaruhi oleh bentuk geometri ruang bakar serta asupan udara yang tidak stabil dari blower.

#### **4.2 HASIL PERHITUNGAN LUAS NYALA API**

Setelah mendapatkan visualisasi nyala api berupa gambar seperti yang ditunjukkan pada sub-bab diatas, dilakukan pengolahan data yang bertujuan untuk mendapatkan luasan gambar menggunakan software ImageJ sehingga akan tampak seperti dibawah ini.



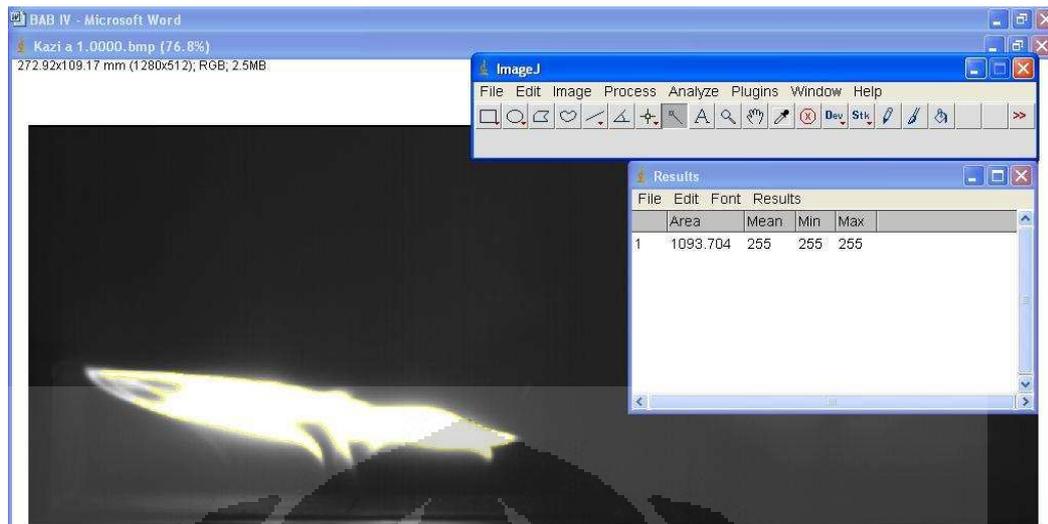
**Gambar 4.11. Kalibrasi ukuran tinggi  $step$  ( $h$ ) sebagai acuan pengukuran luas (mm)**

Sebelum melakukan pengukuran terhadap luasan nyala api yang terbentuk, hal yang pertama dilakukan adalah menentukan kalibrator yang digunakan sebagai titik acuan untuk mencari luas nyala api tersebut. Dalam hal ini yang paling mudah digunakan sebagai titik acuan kalibrasi adalah ketinggian  $step$  ( $h$ ) dalam satuan mm.



**Gambar 4.12. Penentuan parameter-parameter kalibrasi**

Setelah mendapatkan parameter dan kalibrator yang diinginkan hal selanjutnya adalah menentukan bentuk geometri nyala api yang akan diukur luasnya. Kemudian *software* tersebut akan secara langsung menampilkan luasan nyala api yang terukur.



**Gambar 4.13. Hasil perhitungan luasan nyala api (mm<sup>2</sup>)**

Dari hasil diatas didapatkan luasan yang terbentuk oleh nyala api pada gambar adalah 1093.704 mm<sup>2</sup>. Dalam satu titik perhitungan luasan diambil 30 buah sampel gambar yang bentuk geometrinya memiliki kecenderungan stabil. Setelah mendapatkan luasan dari keseluruhan sampel gambar tersebut, data diolah secara statistik untuk mendapatkan nilai rata-rata dari luasan yang didapat.

#### **4.2.1 Perhitungan Luasan Nyala Api $l_f/h = 2$ , ( $h$ ) = 40 mm**

Pada titik pengukuran pertama dimana V udara 6.0 m/s dan V bahan bakar 0.139 m/s, dilakukan pengukuran pada 30 titik guna mendapatkan rata-rata luasan yang diinginkan. Dari hasil perhitungan didapatkan luasan rata-rata untuk nyala api yang terjadi pada titik V udara 6.0 m/s dan V bahan bakar 0.139 m/s adalah sebesar 962,007 mm<sup>2</sup>. Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lembar lampiran.

Kemudian pada titik pengukuran kedua dimana V udara 8.1 m/s dan V bahan bakar 0.141 m/s, dilakukan pengukuran pada 30 titik guna mendapatkan rata-rata luasan yang diinginkan. Dari hasil perhitungan didapatkan luasan rata-rata untuk nyala api yang terjadi pada titik V udara 8.1 m/s dan V bahan bakar 0.141 m/s adalah sebesar 737,275 mm<sup>2</sup>. Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lembar lampiran.

Kemudian pada titik pengukuran ketiga dimana  $V$  udara 10.1 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.223 m/s, dilakukan pengukuran pada 30 titik guna mendapatkan rata-rata luasan yang diinginkan. Dari hasil perhitungan didapatkan luasan rata-rata untuk nyala api yang terjadi pada titik  $V$  udara 10.1 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.223 m/s adalah sebesar 1015,087 mm<sup>2</sup>. Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lembar lampiran.

#### **4.2.2 Perhitungan Luasan Nyala Api $l_f/h = 2,67$ , $(h) = 30$ mm**

Pada titik pengukuran pertama dimana  $V$  udara 6.0 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.174 m/s, dilakukan pengukuran pada 30 titik guna mendapatkan rata-rata luasan yang diinginkan. Dari hasil perhitungan didapatkan luasan rata-rata untuk nyala api yang terjadi pada titik  $V$  udara 8.1 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.174 m/s adalah sebesar 914,722 mm<sup>2</sup>. Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lembar lampiran.

Kemudian pada titik pengukuran kedua dimana  $V$  udara 8.1 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.178 m/s, dilakukan pengukuran pada 30 titik guna mendapatkan rata-rata luasan yang diinginkan. Dari hasil perhitungan didapatkan luasan rata-rata untuk nyala api yang terjadi pada titik  $V$  udara 8.1 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.178 m/s adalah sebesar 557,524 mm<sup>2</sup>. Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lembar lampiran.

Kemudian pada titik pengukuran ketiga dimana  $V$  udara 10.1 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.223 m/s, dilakukan pengukuran pada 30 titik guna mendapatkan rata-rata luasan yang diinginkan. Dari hasil perhitungan didapatkan luasan rata-rata untuk nyala api yang terjadi pada titik  $V$  udara 10.1 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.223 m/s adalah sebesar 757,959 mm<sup>2</sup>. Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lembar lampiran.

#### **4.2.3 Perhitungan Luasan Nyala Api $l_f/h = 4$ , $(h) = 20$ mm**

Pada titik pengukuran pertama dimana  $V$  udara 6.0 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.174 m/s, dilakukan pengukuran pada 30 titik guna mendapatkan rata-rata luasan yang diinginkan. Dari hasil perhitungan didapatkan luasan rata-rata untuk nyala

api yang terjadi pada titik V udara 8.1 m/s dan V bahan bakar 0.174 m/s adalah sebesar 1299,024 mm<sup>2</sup>. Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lembar lampiran.

Kemudian pada titik pengukuran kedua dimana V udara 8.1 m/s dan V bahan bakar 0.174 m/s, dilakukan pengukuran pada 30 titik guna mendapatkan rata-rata luasan yang diinginkan. Dari hasil perhitungan didapatkan luasan rata-rata untuk nyala api yang terjadi pada titik V udara 8.1 m/s dan V bahan bakar 0.174 m/s adalah sebesar 266,617 mm<sup>2</sup>. Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lembar lampiran.

Kemudian pada titik pengukuran ketiga dimana V udara 10.1 m/s dan V bahan bakar 0.223 m/s, dilakukan pengukuran pada 30 titik guna mendapatkan rata-rata luasan yang diinginkan. Dari hasil perhitungan didapatkan luasan rata-rata untuk nyala api yang terjadi pada titik V udara 10.1 m/s dan V bahan bakar 0.223 m/s adalah sebesar 525,291 mm<sup>2</sup>. Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lembar lampiran.

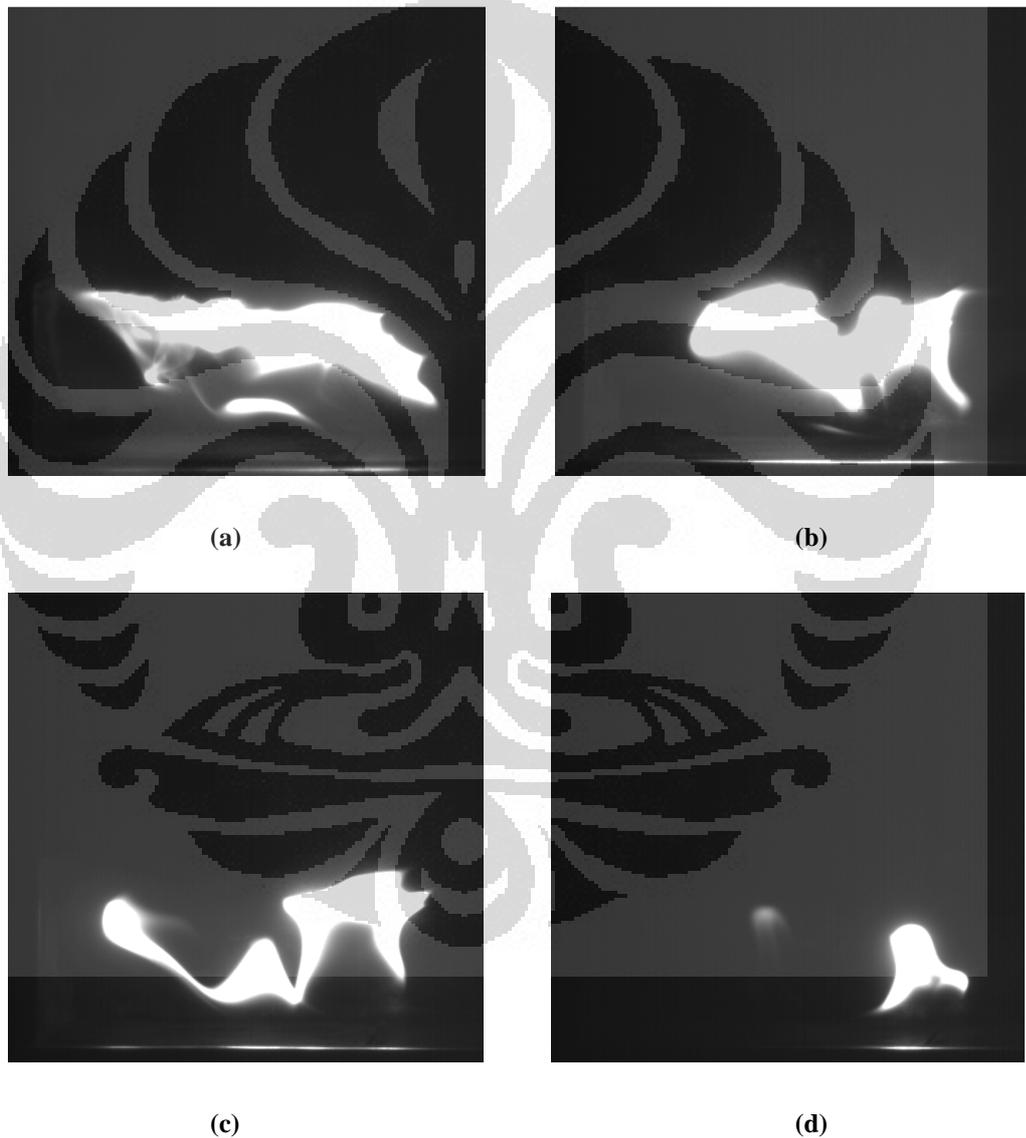
#### **4.2.4 Perhitungan Luasan Nyala Api Nilai Efisiensi Terendah**

Pada titik dimana terdapat efisiensi terendah yaitu dimana V udara 6.0 m/s dan V bahan bakar 0.223 m/s dengan perbandingan  $l_f/h = 4$  dengan  $(h) = 20$  mm, hasil yang didapat dari perhitungan rata-rata 30 sampel nyala api adalah 1591,054 mm<sup>2</sup>. Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lembar lampiran.

Dapat dilihat bahwa ternyata bentuk nyala api yang memiliki luasan terbesar adalah nyala api dengan nilai efisiensi konsumsi bahan bakar terendah. Hal ini dikarenakan tidak seimbangnya antara asupan  $\Delta h$  bahan bakar dengan  $\Delta h$  udara dimana pada V bahan bakar 0.223 m/s, kecepatan *free stream* udara dari blower hanya sebesar 6,0 m/s.

### 4.3 ANALISA VISUALISASI FENOMENA EXTINGT POINT

Setelah mengetahui tentang karakteristik nyala api pada beberapa titik yang dianggap memiliki nilai efisiensi tertinggi maka hal selanjutnya adalah analisa dari karakteristik serta fenomena yang terjadi pada *extinct point* dari titik yang memiliki nilai efisiensi konsumsi bahan bakar tertinggi. Hasil visualisasi mengenai fenomena apa saja yang terjadi pada *extinct point* tersebut dijelaskan melalui gambar dibawah ini.





**Gambar 4.14. Visualisasi Nyala Api pada  $V$  udara 6.0 m/s dan  $V$  bahan bakar 0.141 m/s dengan perbandingan  $l_f/h = 2$ ,  $(h) = 40$  mm**

**(a) Nyala Api pada detik ke 1, (b) Nyala api pada detik ke 2, (c) nyala api pada detik ke 3, (d), (e), (f) nyala api pada detik ke 4 hingga padam**

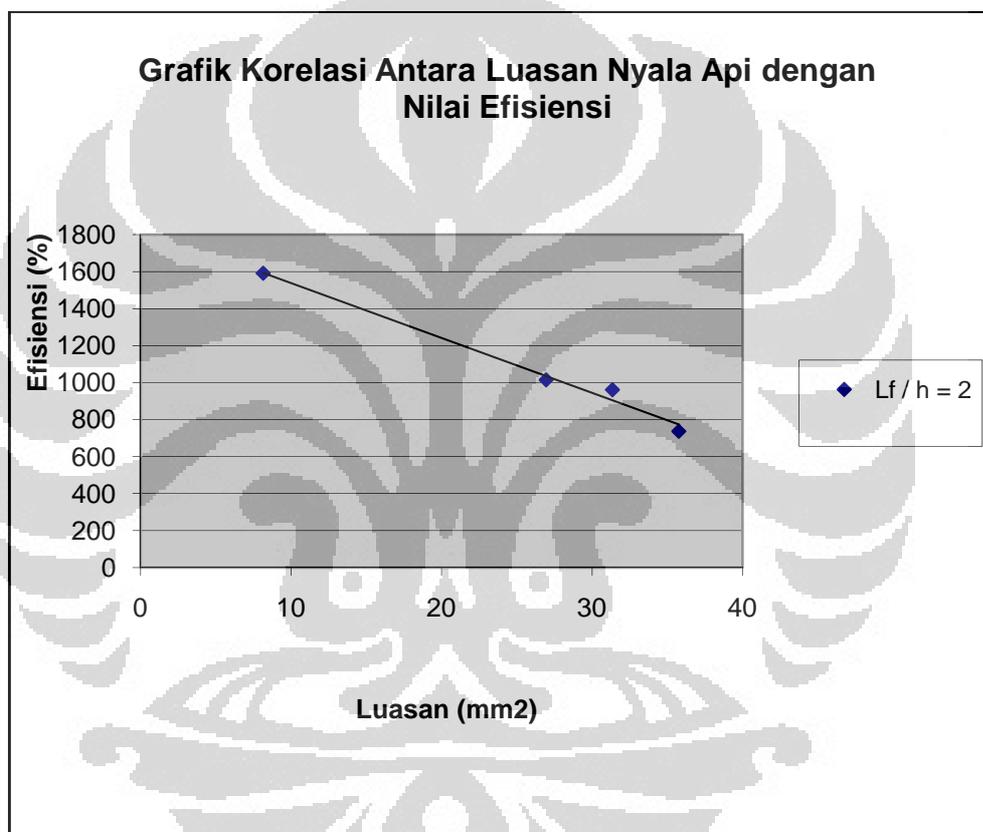
Gambar diatas diambil dengan kemampuan menangkap gambar sebanyak 250 *frame*/detik dengan durasi 4 detik. Hal yang penulis analisa adalah fenomena yang terjadi setiap detik dimulai detik pertama yaitu ketika api mencapai stabilisasi penyalaan hingga detik ke empat dimana api padam.

Dapat dilihat bahwa pada detik ke 1 nyala api terlihat sangat stabil mulai dari mulut *step* hingga pada batas lapisan geser (*shear layer*). Ketika nyala api memasuki detik ke 2 dengan asupan bahan bakar dikurangi secara konstan maka dapat kita lihat bahwa fenomena yang terjadi adalah bentuk nyala api mulai berubah dari ditandai dengan lepasnya nyala api yang menempel pada mulut tangga (*step*) serta pada nyala api daerah lapisan geser (*shear layer*). Bentuk nyala api yang terjadi pun mulai tidak stabil serta membentuk huruf “V”. Pada detik ke 3 nyala api semakin tidak stabil akibat asupan bahan bakar yang terus dikurangi secara konstan sehingga luasan nyala api tersebut berkurang secara signifikan. Pada fase ini nyala api yang terbentuk lebih cenderung membentuk huruf “W”. Sedangkan pada detik ke 4 sampai padam terlihat sangat jelas bahwa luasan nyala

api berkurang sangat signifikan hingga hanya terkonsentrasi pada titik nosel hingga akhirnya benar-benar padam.

#### 4.4 KORELASI LUASAN NYALA API DENGAN NILAI EFISIENSI

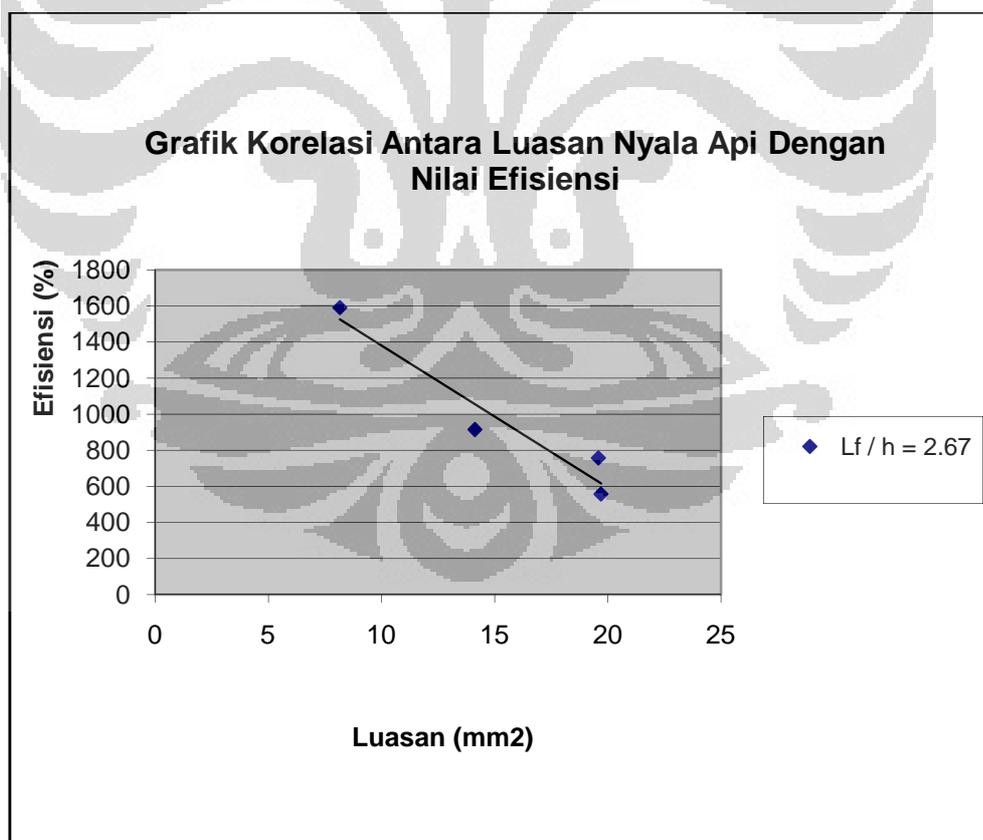
Setelah mendapatkan luasan yang diinginkan dari beberapa titik pengambilan gambar, hal yang selanjutnya penulis ingin analisa adalah antara karakteristik perubahan luasan nyala api terhadap perubahan nilai efisiensi dilihat dari asupan bahan bakar serta suplai udara.



Gambar 4.15 Grafik Korelasi Luasan Nyala Api Dengan Nilai Efisiensi,  $L_f/h = 2$

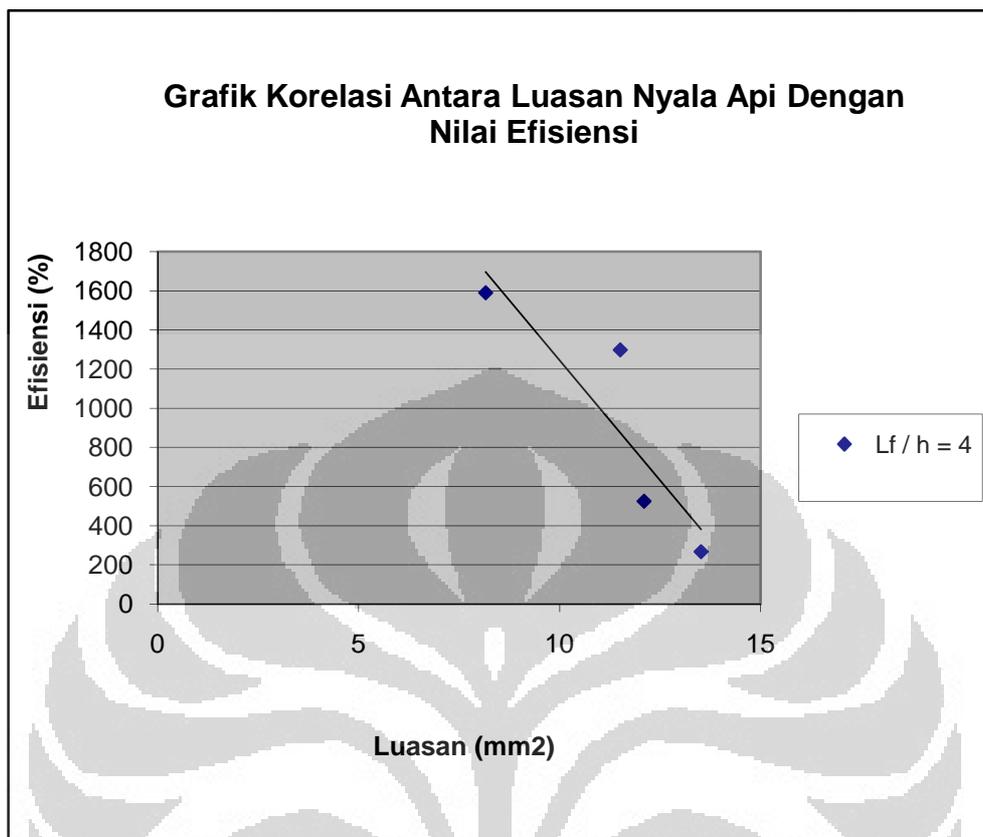
Pada perbandingan  $L_f/h = 2$  dimana ( $h$ ) = 40 mm, dapat kita lihat secara jelas mengenai dampak dari perubahan luasan terhadap nilai efisiensi. Pada titik dimana  $V$  bahan bakar 0.141 m/s dan kecepatan *main stream* udara sebesar 8,1 m/s memiliki nilai efisiensi paling tinggi yaitu 35,77 % dengan luasan 737,275 mm<sup>2</sup>. Akan tetapi nilai efisiensi kemudian berkurang seiring dengan bertambahnya luasan api pada titik dimana  $V$  bahan bakar 0.139 m/s dan

kecepatan *main stream* udara sebesar 6 m/s. Hal ini diakibatkan oleh tidak seimbangnya pengurangan asupan udara dari blower dengan pengurangan  $V$  bahan bakar sehingga bahan bakar yang terbakar menimbulkan luasan api yang lebih besar. Dilihat dari perhitungan dan grafik yang ada terlihat adanya penurunan nilai efisiensi konsumsi bahan bakar menjadi 31,37 % yang diiringi dengan peningkatan luasan nyala api menjadi 962,007 mm<sup>2</sup>. Hal yang sama terjadi pada titik ke dimana  $V$  bahan bakar 0.198 m/s dan *main stream* udara sebesar 10.1 m/s. Seiring dengan meningkatnya asupan bahan bakar yang tidak sebanding dengan asupan udara dari blower maka bentuk luasan nyala api menjadi bertambah luas dan nilai efisiensi menjadi turun. Akan tetapi perubahan yang ditunjukkan oleh grafik tidak terlalu signifikan. Sedangkan pada titik dimana  $L_f/h = 4$ ,  $V$  bahan bakar 0.223 m/s dan kecepatan *main stream* udara sebesar 6 m/s yang menjadi nilai efisiensi terkecil sangat terlihat jelas perubahan luasan nyala api menjadi 1591,054 mm<sup>2</sup>.



**Gambar 4.16 Grafik Korelasi Luasan Nyala Api Dengan Nilai Efisiensi ,  $L_f/h = 2,67$**

Pada perbandingan  $L_f/h = 2,67$  dimana  $(h) = 30$  mm, terjadi fenomena dimana perubahan luas tidak mengacu kepada luasan nyala api seperti yang ditunjukkan grafik diatas. Pada titik dimana  $V$  bahan bakar  $0.174$  m/s dan kecepatan *main stream* udara sebesar  $6,0$  m/s memiliki nilai efisiensi paling tinggi yaitu  $19,70$  % dengan luasan  $914,722$  mm<sup>2</sup>. Akan tetapi nilai efisiensi kemudian berkurang seiring berkurangnya luasan api pada titik dimana  $V$  bahan bakar  $0.178$  m/s dan kecepatan *main stream* udara sebesar  $8,1$  m/s. Hal ini diakibatkan oleh tidak seimbangnya pengurangan asupan udara dari blower dengan pengurangan  $V$  bahan bakar sehingga bahan bakar yang terbakar menimbulkan luasan api yang lebih kecil. Dilihat dari perhitungan dan grafik yang ada terlihat adanya penurunan nilai efisiensi konsumsi bahan bakar yang tidak terlalu signifikan menjadi  $19,58$  % yang diiringi dengan penurunan yang sangat signifikan dari luasan nyala api menjadi  $557,542$  mm<sup>2</sup>. Akan tetapi hal yang terjadi pada titik berikutnya memiliki fenomena yang sama dengan grafik sebelumnya dimana dengan  $V$  bahan bakar  $0.223$  m/s dan *main stream* udara sebesar  $10.1$  m/s menghasilkan kenaikan luasan nyala api menjadi  $757,959$  mm<sup>2</sup> yang diiringi dengan penurunan nilai efisiensi menjadi  $14,13$  %. Seiring dengan meningkatnya asupan bahan bakar yang tidak sebanding dengan asupan udara dari blower maka bentuk luasan nyala api menjadi bertambah luas dan nilai efisiensi menjadi turun. Hal ini menyebabkan penurunan nilai efisiensi yang cukup signifikan. Sedangkan pada titik dimana  $L_f/h = 4$ ,  $V$  bahan bakar  $0.223$  m/s dan kecepatan *main stream* udara sebesar  $6$  m/s yang menjadi nilai efisiensi terkecil sangat terlihat jelas perubahan luasan nyala api menjadi  $1591,054$  mm<sup>2</sup> dengan nilai efisiensi hanya mencapai  $8,16$  %.



**Gambar 4.17** Grafik Korelasi Luasan Nyala Api Dengan Nilai Efisiensi,  $L_f/h = 4$

Pada perbandingan  $L_f/h = 4$  dimana ( $h$ ) = 20 mm, terjadi fenomena dimana perubahan luas tidak mengacu kepada luasan nyala api seperti yang ditunjukkan grafik diatas serta seperti pada perbandingan  $L_f/h = 2,67$  dimana ( $h$ ) = 30 mm. Pada titik dimana  $V$  bahan bakar 0.174 m/s dan kecepatan *main stream* udara sebesar 8,1 m/s memiliki nilai efisiensi paling tinggi yaitu 13,52 % dengan luasan 266,617 mm<sup>2</sup>. Kemudian nilai efisiensi berkurang seiring bertambahnya luasan api pada titik dimana  $V$  bahan bakar berada pada 0.174 m/s dan kecepatan *main stream* udara sebesar 6,0 m/s. Hal ini diakibatkan oleh tidak seimbangnya pengurangan asupan udara dari blower dengan pengurangan  $V$  bahan bakar sehingga bahan bakar yang terbakar menimbulkan luasan api yang lebih besar. Dilihat dari perhitungan dan grafik yang ada terlihat adanya penurunan nilai efisiensi konsumsi bahan bakar yang tidak terlalu signifikan menjadi 12,1 % yang diiringi dengan peningkatan yang sangat signifikan dari luasan nyala api menjadi

Universitas Indonesia

1299,024 mm<sup>2</sup>. Akan tetapi hal yang terjadi pada titik berikutnya memiliki fenomena yang sama dengan grafik ke 2 ( $L_f/h = 2,67$ ) titik dimana  $V$  bahan bakar 0.178 m/s dan kecepatan *main stream* udara sebesar 8,1 m/s terjadi penurunan nilai efisiensi yang disertai penurunan luasan nyala api secara drastis dimana  $V$  bahan bakar 0.223 m/s dan *main stream* udara sebesar 10.1 m/s menghasilkan kenaikan luasan nyala api menjadi 525,291 mm<sup>2</sup> yang diiringi dengan penurunan nilai efisiensi menjadi 11,51 %. Seiring dengan meningkatnya asupan bahan bakar yang tidak sebanding dengan asupan udara dari blower maka bentuk luasan nyala api menjadi bertambah kecil dan nilai efisiensi menjadi turun. Akan tetapi penurunan nilai efisiensi yang terjadi tidak terlalu signifikan. Sedangkan pada titik dimana  $L_f/h = 4$ ,  $\Delta h$   $V$  bahan bakar 0.223 m/s dan kecepatan *main stream* udara sebesar 6 m/s yang menjadi nilai efisiensi terkecil sangat terlihat jelas perubahan luasan nyala api menjadi 1591,054 mm<sup>2</sup> dengan nilai efisiensi hanya mencapai 8,16 %.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN PENELITIAN**

Analisa visualisasi nyala api daerah lapisan geser (*shear layer*) pada ruang bakar *backward-facing step* menggunakan *High Speed Video Camera* dilakukan dengan latar belakang melanjutkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Maymuchar guna mengetahui lebih jelas fenomena dan karakteristik api yang telah didapat pada penelitian sebelumnya.

Dari data-data yang telah diperoleh dan dianalisa penulis menarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Meskipun pada penelitian terdahulu telah didapatkan visualisasi sederhana mengenai stabilitas nyala api daerah lapisan geser pada ruang bakar *backward-facing step* ternyata setelah dilakukan penelitian dengan parameter yang sama menggunakan *High Speed Video Camera* dapat diketahui bahwa pada nyala api stabil penelitian sebelumnya masih terdapat ketidakstabilan nyala api yang tertangkap oleh kamera dengan kecepatan pengambilan gambar 250 *frame/detik*. Hal ini ditunjukkan oleh adanya bagian nyala api yang terlepas dari bagian utamanya dimana memiliki kecenderungan bergerak searah dengan arah *free stream* udara.
2. Ketidakstabilan nyala api yang tertangkap oleh *High Speed Video Camera* dapat disebabkan oleh bentuk geometri ruang bakar yang belum sempurna dan suplai udara dari blower yang tidak stabil.
3. Fenomena yang terjadi menjelang *extinct point* hingga api padam dapat diketahui. Karakteristik bentuk nyala api yang tertangkap *High Speed Video Camera* menunjukkan bahwa padamnya api dimulai dengan terpisahnya bagian api yang menempel dengan mulut tangga (*step*) yang dilanjutkan dengan berkurangnya luasan api secara signifikan hingga nyala api yang hanya terkonsentrasi di sekitar lubang injeksi bahan bakar sampai akhirnya nyala api benar-benar padam.

4. Dengan menggunakan *software* ImageJ kita dapat menghitung luasan dari nyala api yang terbentuk sehingga dapat menganalisa dampak dari perubahan luasan nyala api terhadap flutuasi nilai efisiensi konsumsi bahan bakar. Dampak dari perubahan luasan tidak selalu sama pada setiap perbandingan  $l_f/h$ . Karakteristik perubahan nilai efisiensi tidak selalu dapat ditentukan dari perubahan luasan tetapi sangat dipengaruhi oleh asupan bahan bakar serta kecepatan *main stream* udara.
5. Pada perbandingan  $l_f/h = 2$  dimana  $(h) = 40$  mm perubahan nilai efisiensi sangat dipengaruhi oleh perubahan luasan nyala api dimana terjadi kecenderungan peningkatan nilai efisiensi yang diiringi dengan penurunan luasan nyala api yang terbentuk. Akan tetapi pada perbandingan  $l_f/h = 2,67$  dimana  $(h) = 30$  mm dan  $l_f/h = 4$  dimana  $(h) = 20$  mm kecenderungan yang terjadi pada perbandingan  $l_f/h = 2$  dimana  $(h) = 40$  mm dimana peningkatan nilai efisiensi bisa diukur atau dibandingkan dengan penurunan luasan nyala api tidak berlaku akan tetapi sangat dipengaruhi oleh asupan bahan bakar dan asupan udara dari blower.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Syaugi A., dan Putu S.W., “*Efek Injeksi Gas Panas Terhadap Karakteristik Medan Temperatur Dalam Aliran Resirkulasi Pada Backward-Facing Step*”, Skripsi, 2003. Jakarta : Universitas Indonesia.
2. Maymuchar, “*Kajian Stabilitas Nyala Dan Efisiensi Bahan Bakar Pada Nyala Difusi Dalam Aliran Resirkulasi Pada Backward-Facing Step*”, Thesis, 2005, Jakarta : Universitas Indonesia.
3. J. Shinjo, S. Matsuyama, Y. Mizobuchi, S. Ogawa, “*Study on Flame Dynamics with Secondary Fuel Injection Control by Large Eddy Simulation*”, International Journal, 2007. Tokyo : Institute of Aerospace Technology.
4. Andreh Sobiesiak., Jamie C. Wanzell, “*Characteristics and Structure of Inverse Flames of Natural Gas*”, International Journal, 2001. Ontario : University of Windsor.
5. H. Murat Altay, Raymond L. Septh, Duane E. Hudgins, Ahmed F Ghoniem, “*The Impact of Equivalence Ratio Oscillations on Combustion Dynamics in a Bacward-Facing Step Combustor*”, International Journal, 2009. Cambridge : Massachusetts Institute of Technology.
6. F. El-Mahallawy., S. El-Din Habik., “*Fundamentals and Technology of Combustion*” 2002. Egypt : Faculty of Engineering of Port-Said, Suez Canal University.
7. Gaydon., and Wolfhard., “*Flames : Their Structure Radiation and Their Temperature*”, Fourth Edition, 1979. London : Capman and Hall.
8. Gary L. Borman., Kenneth W. Ragland., “*Combustion Engineering*”, International Edition, 1998. Madison : Departemen of Mechanical Engineering, University of Wisconsin. McGraw-Hill.

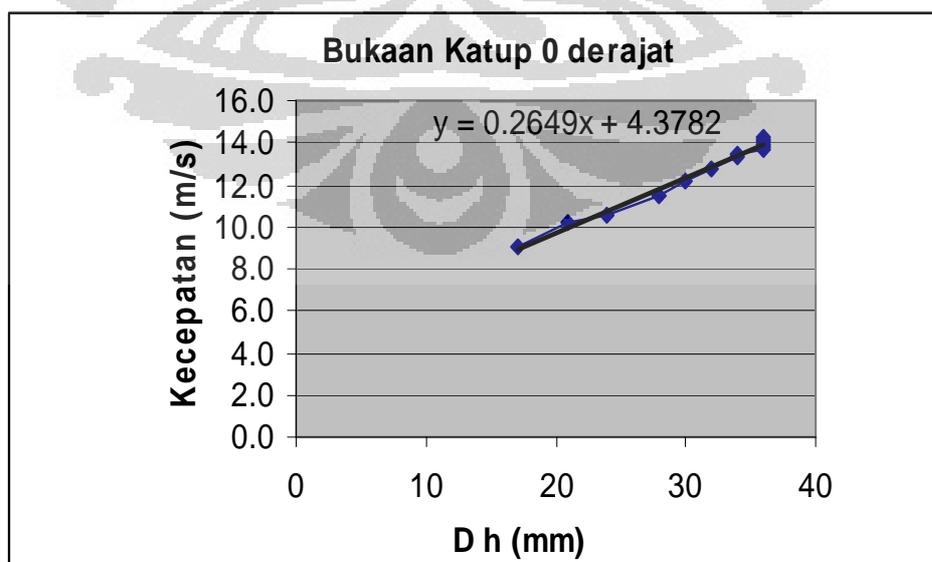
# LAMPIRAN



## Kalibrasi Sistem Pengukuran Udara

Diameter Orifis 3.0 inc.

Posisi Bukaan Blower	Bukaan Katup Buang					
	0°		45°		90°	
	$\Delta h$ (mm)	$V_{\text{nozzle}}$ (m/s)	$\Delta h$ (mm)	$V_{\text{nozzle}}$ (m/s)	$\Delta h$ (mm)	$V_{\text{nozzle}}$ (m/s)
0	17	9.0	14	8.0	10	6.0
1	21	10.2	18	9.0	12	7.0
2	24	10.5	22	10.1	16	8.1
3	28	11.5	26	10.8	20	9.6
4	30	12.2	28	11.6	22	10.1
5	32	12.8	30	12.0	25	10.7
6	34	13.3	32	12.5	26	11.2
7	34	13.5	33	12.8	28	11.7
8	36	13.7	34	13.1	29	12.1
9	36	13.8	35	13.3	32	12.5
10	36	13.9	35	13.4	32	12.7
11	36	14.0	35	13.5	32	12.9
12	36	14.1	35	13.7	33	13.1
13	36	14.3	36	13.9	34	13.2



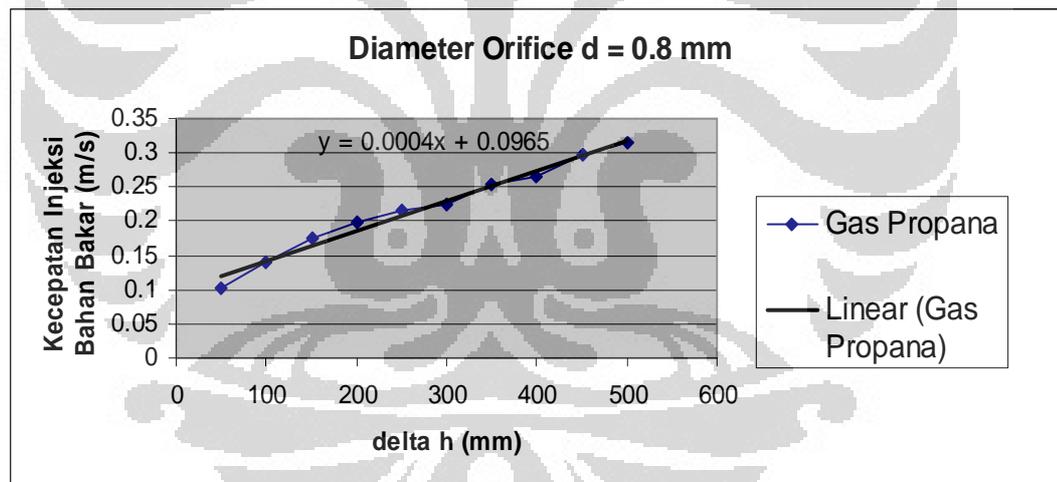
### Data Kalibrasi Manometer Bahan Bakar

Diameter Orifice : 0.8 mm

Jenis Gas : Propana

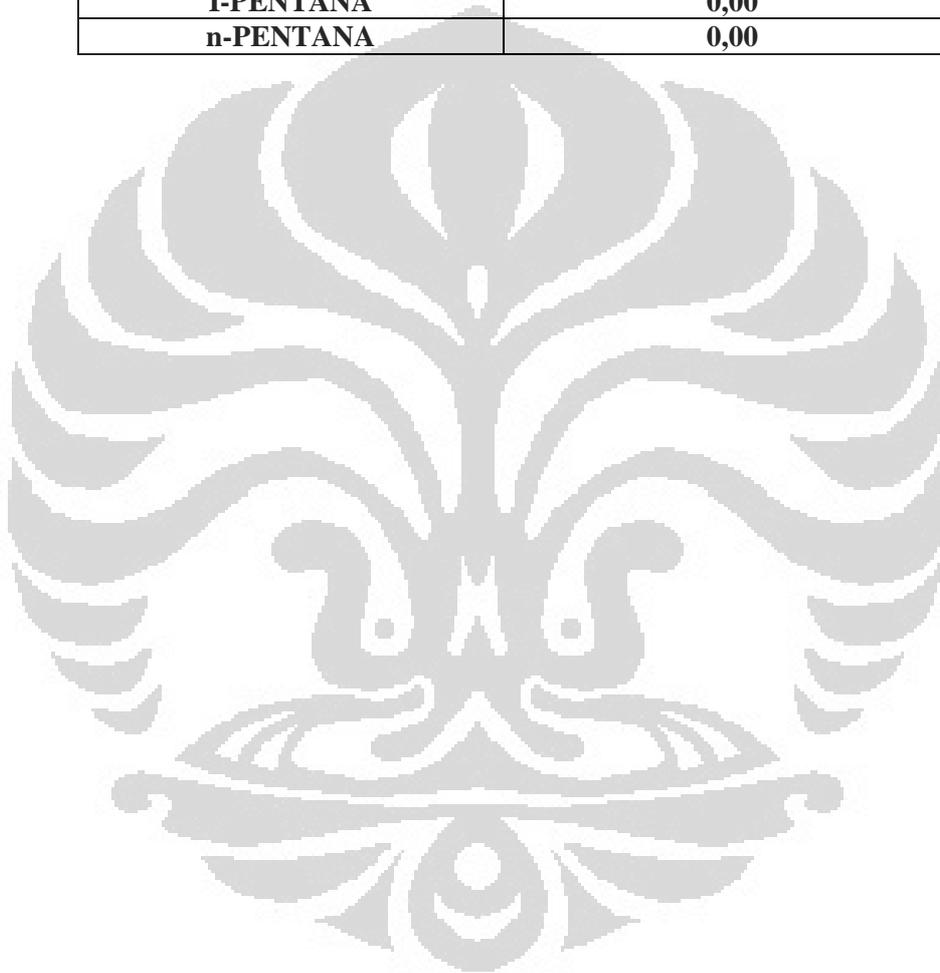
Back Pressure : 300 mm

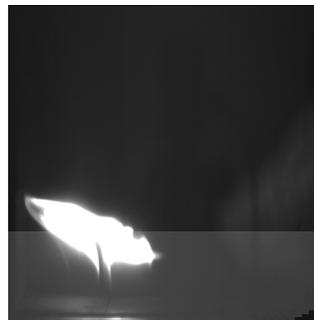
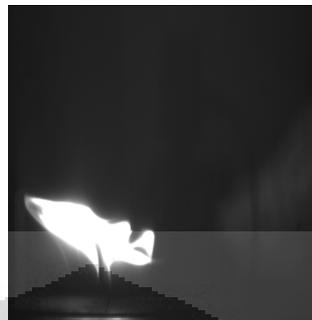
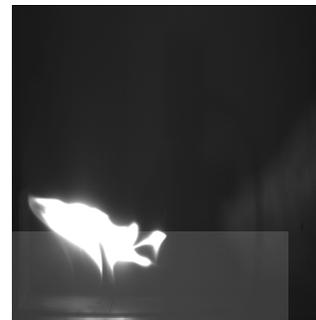
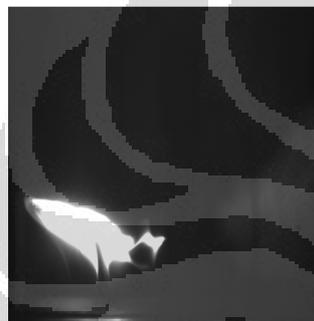
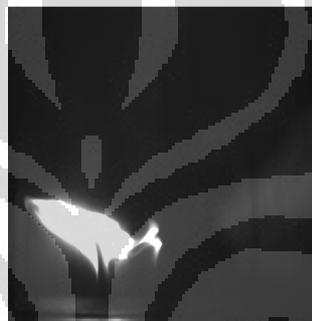
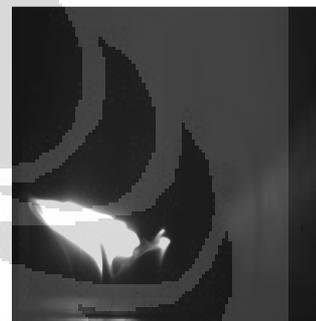
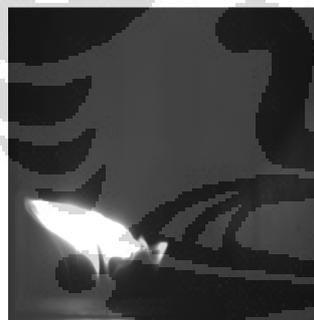
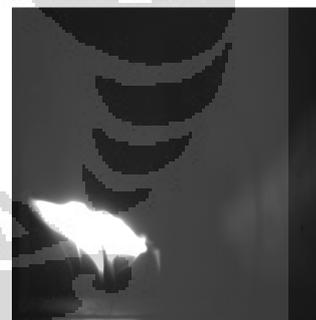
No	h fuel (mm)	Volume, V (m <sup>3</sup> )	waktu, t(s)	debit, Q (m <sup>3</sup> /s)	Luas inlet, A (m <sup>2</sup> )	Kecepatan inlet fuel, Vf (m/s)
1	50	0.001	92.86	1.07689E-05	0.000105	0.102560947
2	100	0.001	68.44	1.46113E-05	0.000105	0.139155604
3	150	0.001	54.63	1.8305E-05	0.000105	0.174332959
4	200	0.001	48.06	2.08073E-05	0.000105	0.198164992
5	250	0.001	44.38	2.25327E-05	0.000105	0.21459688
6	300	0.001	42.64	2.34522E-05	0.000105	0.223353882
7	350	0.001	37.47	2.6688E-05	0.000105	0.254171591
8	400	0.001	35.96	2.78087E-05	0.000105	0.264844536
9	450	0.001	31.90	3.1348E-05	0.000105	0.298552023
10	500	0.001	30.19	3.31236E-05	0.000105	0.315462389



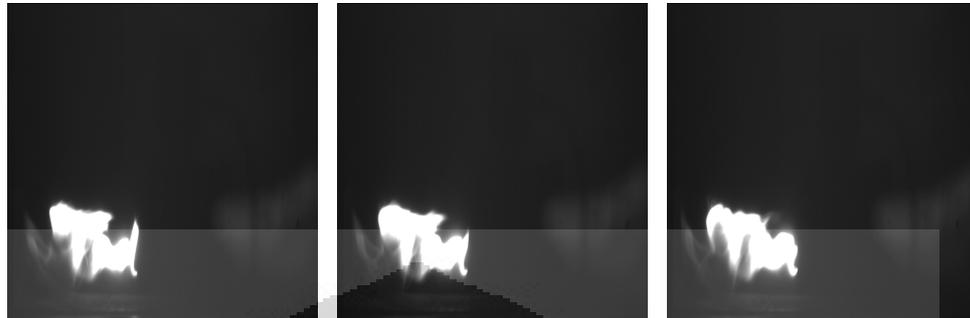
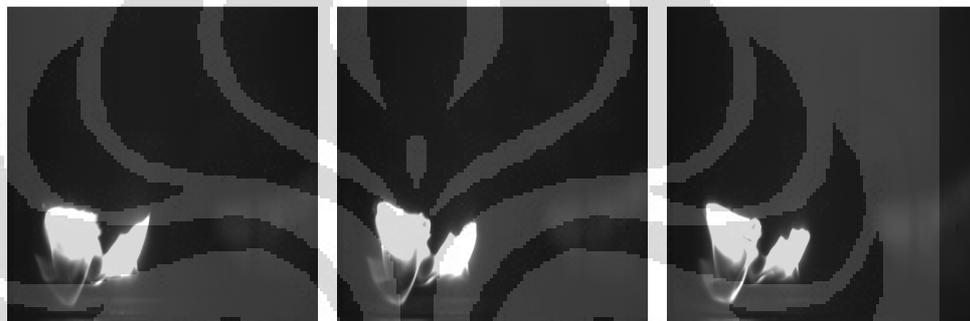
**KOMPOSISI BAHAN BAKAR GAS PROPANA**

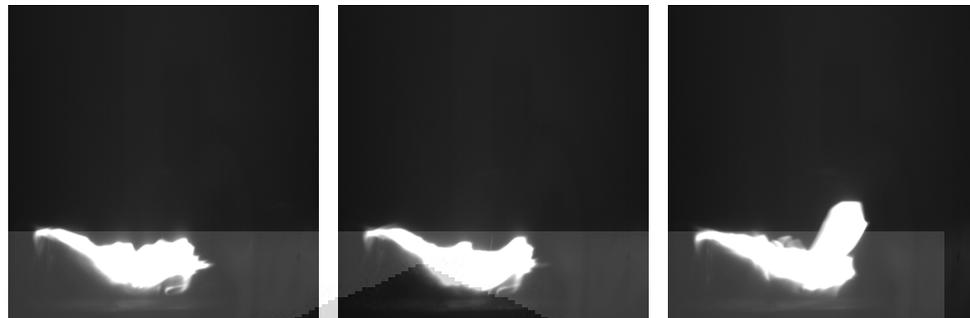
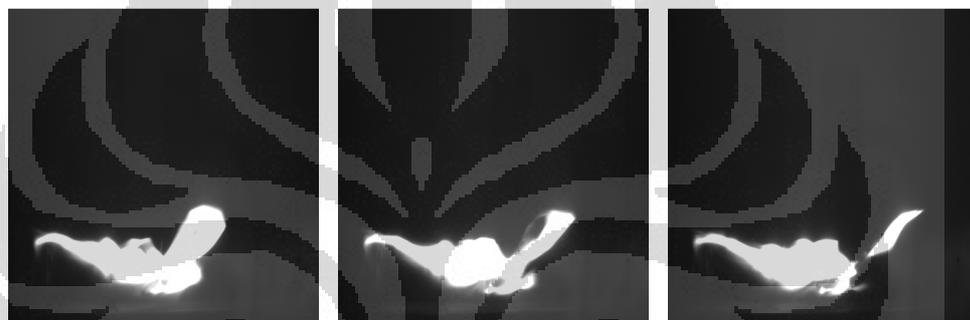
<b>SENYAWA</b>	<b>KADAR (%)</b>
<b>METANA</b>	<b>0,00</b>
<b>ETANA</b>	<b>0,02</b>
<b>PROPANA</b>	<b>95,00</b>
<b>BUTANA</b>	<b>2,60</b>
<b>I-BUTANA</b>	<b>2,38</b>
<b>BUTADIENA</b>	<b>0,00</b>
<b>BUTENA</b>	<b>0,00</b>
<b>I-PENTANA</b>	<b>0,00</b>
<b>n-PENTANA</b>	<b>0,00</b>

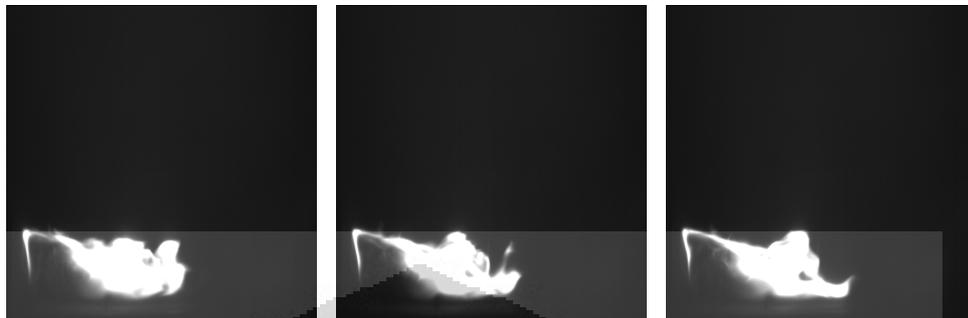
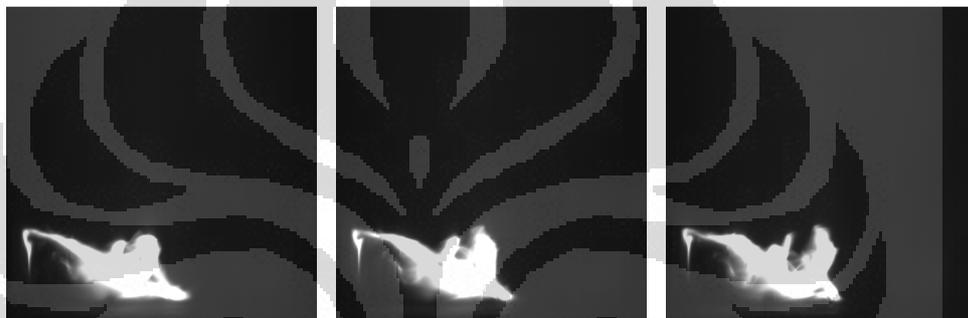


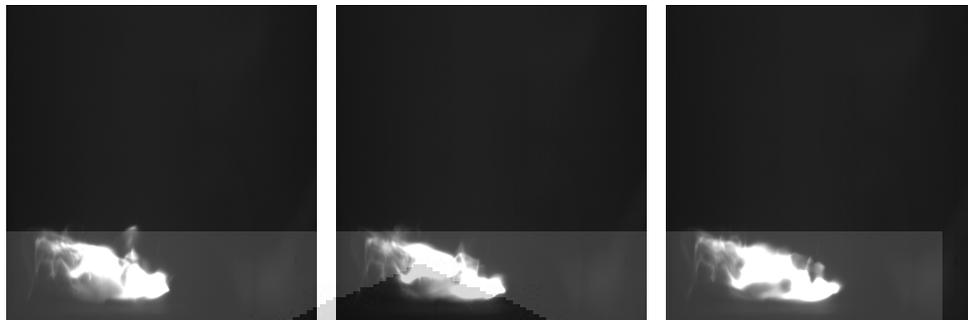
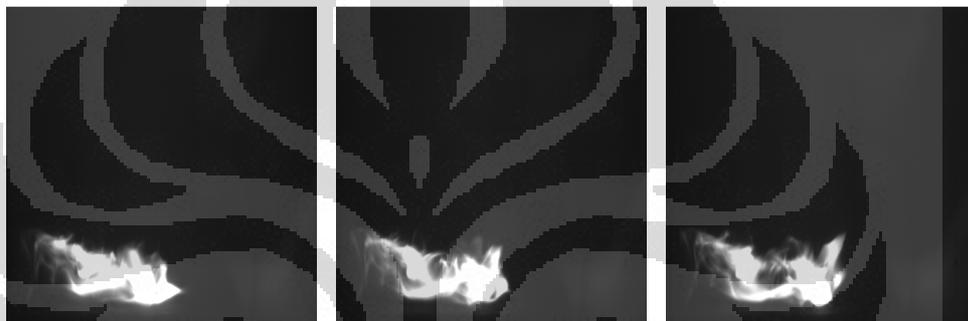
**Fenomena Nyala Api Pada  $L_f / h = 2$  dimana  $h = 40$  mm** **$\Delta h$  udara 10 mm dan  $\Delta h$  bahan bakar 100 mm****(a) Frame 0006****(b) Frame 0007****(c) Frame 0008****(d) Frame 0009****(e) Frame 0010****(f) Frame 0011****(g) Frame 0012****(h) Frame 0013****(i) Frame 0014**

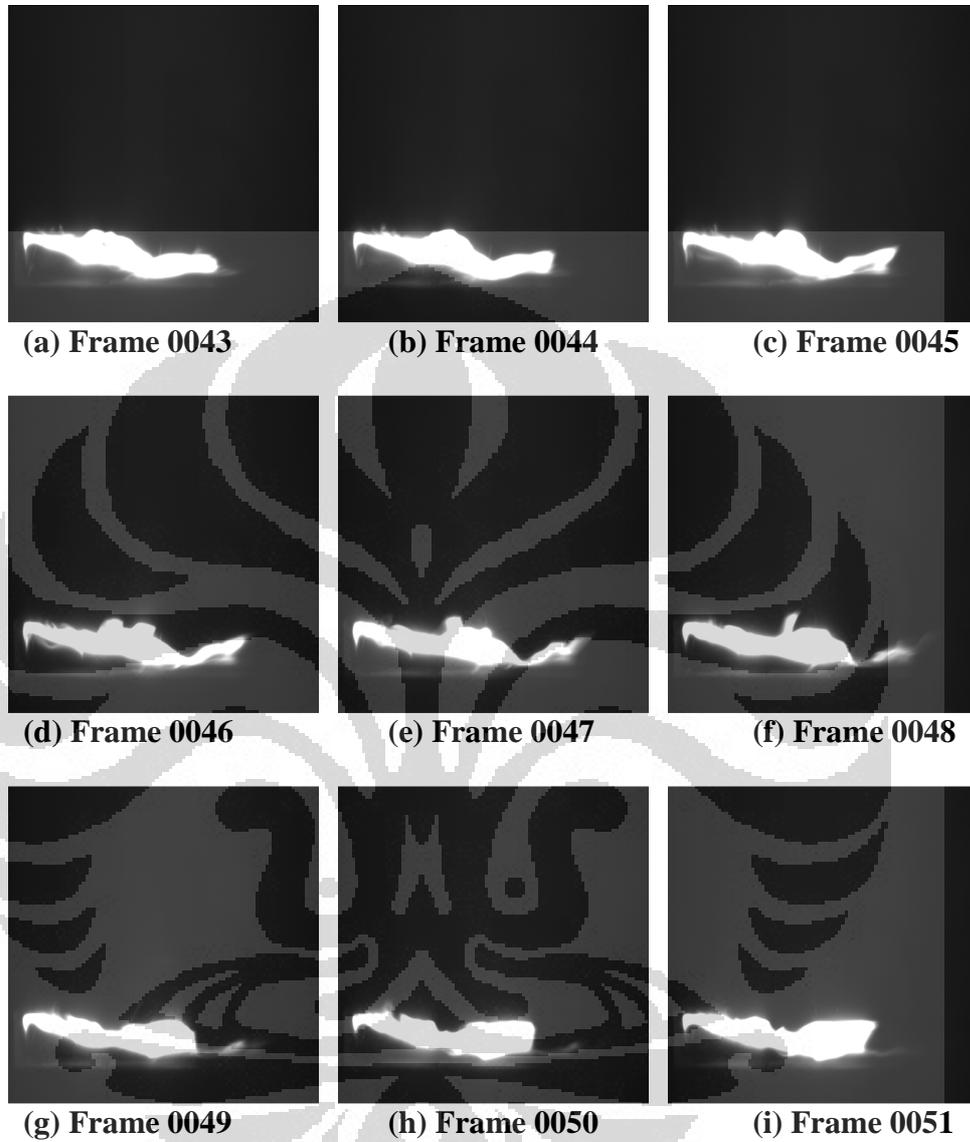
**Fenomena Nyala Api Pada  $L_f / h = 2$  dimana  $h = 40$  mm** **$\Delta h$  udara 16 mm dan  $\Delta h$  bahan bakar 110 mm**

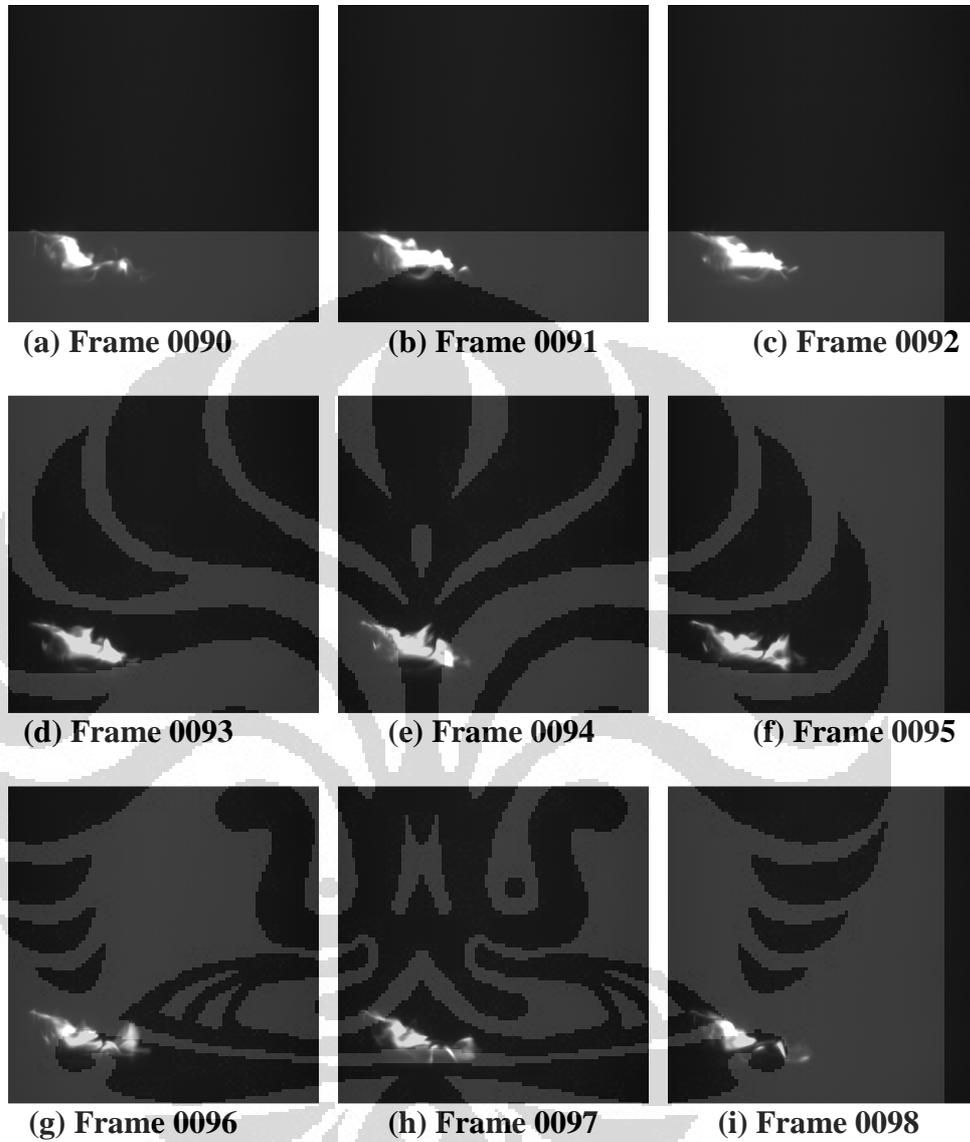
**Fenomena Nyala Api Pada  $L_f / h = 2$  dimana  $h = 40$  mm** **$\Delta h$  udara 22 mm dan  $\Delta h$  bahan bakar 200 mm****(a) Frame 0168****(b) Frame 0169****(c) Frame 0170****(d) Frame 0171****(e) Frame 0172****(f) Frame 0173****(g) Frame 0174****(h) Frame 0175****(i) Frame 0176**

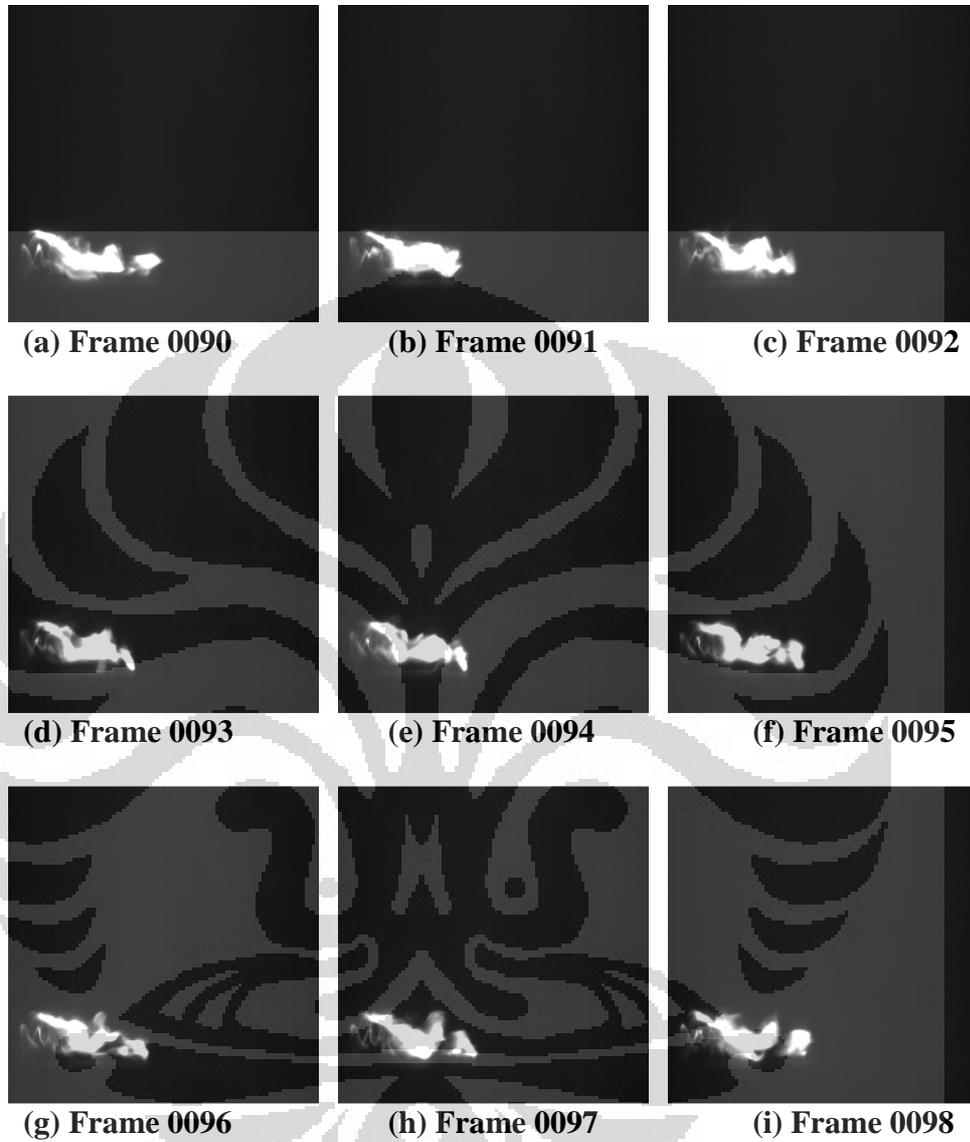
**Fenomena Nyala Api Pada  $L_f / h = 2.67$  dimana  $h = 30$  mm** **$\Delta h$  udara 10 mm dan  $\Delta h$  bahan bakar 150 mm****(a) Frame 0135****(b) Frame 0136****(c) Frame 0137****(d) Frame 0138****(e) Frame 0139****(f) Frame 0140****(g) Frame 0141****(h) Frame 0142****(i) Frame 0143**

**Fenomena Nyala Api Pada  $L_f / h = 2.67$  dimana  $h = 30$  mm** **$\Delta h$  udara 16 mm dan  $\Delta h$  bahan bakar 160 mm****(a) Frame 0707****(b) Frame 0708****(c) Frame 0709****(d) Frame 0710****(e) Frame 0711****(f) Frame 0712****(g) Frame 0713****(h) Frame 0714****(i) Frame 0715**

**Fenomena Nyala Api Pada  $L_f / h = 2.67$  dimana  $h = 30$  mm** **$\Delta h$  udara 22 mm dan  $\Delta h$  bahan bakar 300 mm****(a) Frame 0015****(b) Frame 0016****(c) Frame 0017****(d) Frame 0018****(e) Frame 0019****(f) Frame 0020****(g) Frame 0021****(h) Frame 0022****(i) Frame 0023**

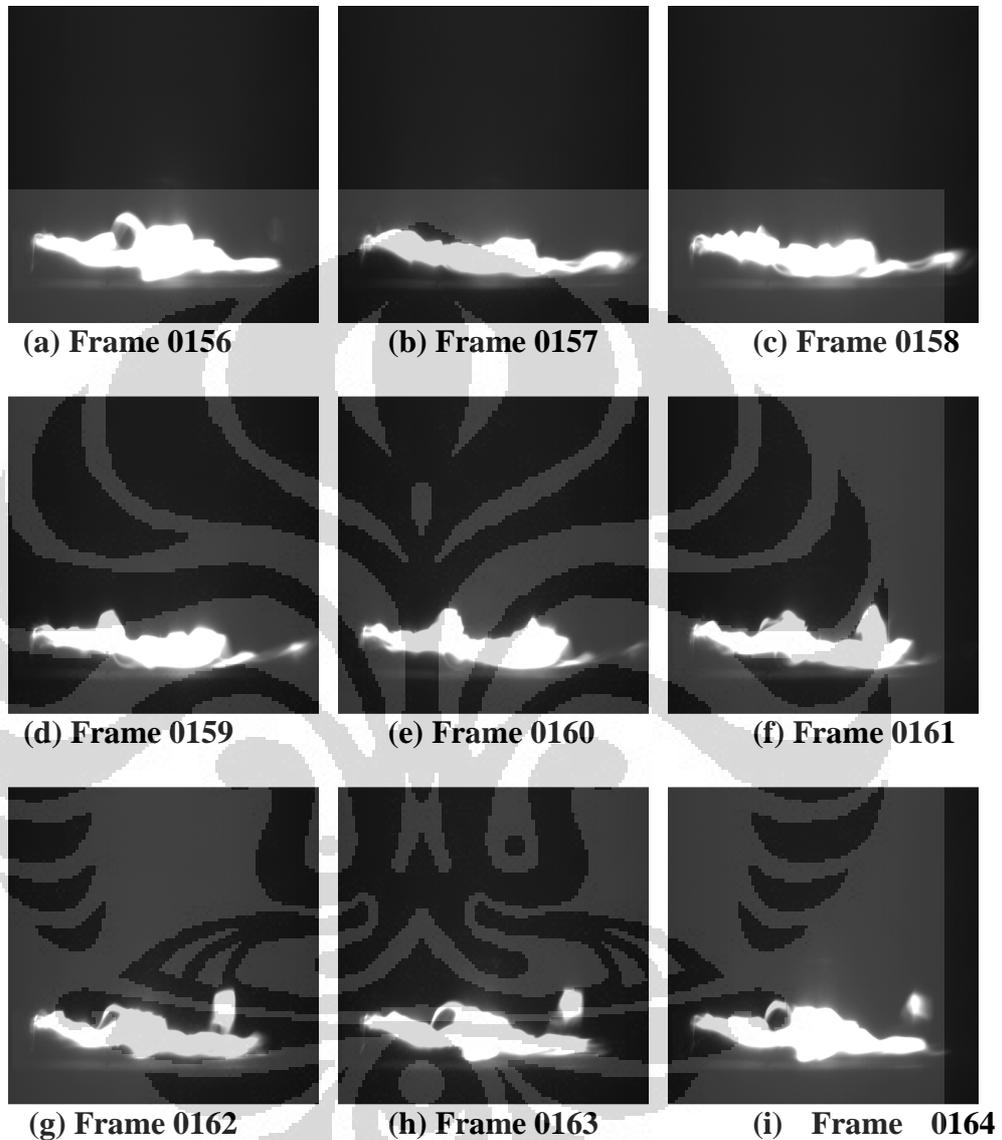
**Fenomena Nyala Api Pada  $L_f / h = 4$  dimana  $h = 20$  mm** **$\Delta h$  udara 10 mm dan  $\Delta h$  bahan bakar 150 mm**

**Fenomena Nyala Api Pada  $L_f / h = 4$  dimana  $h = 20$  mm** **$\Delta h$  udara 16 mm dan  $\Delta h$  bahan bakar 150 mm**

**Fenomena Nyala Api Pada  $L_f / h = 4$  dimana  $h = 20$  mm** **$\Delta h$  udara 22 mm dan  $\Delta h$  bahan bakar 300 mm**

**Fenomena Nyala Api Pada Nilai Efisiensi Terkecil  
 $L_f / h = 4$  dimana  $h = 20$  mm**

$\Delta h$  udara 22 mm dan  $\Delta h$  bahan bakar 300 mm



**TABEL HASIL PERHITUNGAN LUASAN NYALA API**  
 $L_f/h = 2$  dimana ( $h$ ) = 40 mm

Tabel 4.1.  
 $\Delta h$  udara 10 mm  
 $\Delta h$  bahan bakar 100

No	Frame	Luas (mm <sup>2</sup> )
1	0	1093.704
2	15	925
3	16	934.08
4	17	961.64
5	18	899.88
6	19	913.36
7	20	916.32
8	21	895.44
9	22	886.88
10	23	873.52
11	24	895.32
12	1	1183.926
13	25	943.4
14	26	984.12
15	27	976.84
16	28	927.72
17	29	829.64
18	30	808.12
19	72	860.68
20	73	853.8
21	78	926.08
22	79	947.28
23	2	1156.5
24	83	999.44
25	4	1144.618
26	5	1045.68
27	6	1045.24
28	13	930.36
29	14	940.52
30	3	1161.114
31	Luas Total (mm <sup>2</sup> )	28860.222
32	<b>Rata-Rata Luas (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>962.0074</b>

Tabel 4.2.  
 $\Delta h$  udara 16 mm  
 $\Delta h$  bahan bakar 110

No	Frame	Luas (mm <sup>2</sup> )
1	148	725.16
2	157	789.24
3	158	773.36
4	159	740.8
5	160	709.44
6	161	667.08
7	162	665.24
8	163	700.72
9	164	714.32
10	165	718.08
11	166	731.88
12	149	741.28
13	167	724.68
14	168	726.28
15	169	734.68
16	170	768.84
17	171	762.44
18	175	725.56
19	176	720.76
20	177	772.64
21	178	790.08
22	179	806.52
23	150	742.48
24	180	748.6
25	151	711.08
26	152	716.12
27	153	744
28	154	745.88
29	155	761.88
30	156	739.12
31	Luas Total (mm <sup>2</sup> )	22118.24
32	<b>Rata-Rata Luas (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>737.2746</b>

Tabel 4.3.

 $\Delta h$  udara 22 mm

No	Frame	Luas (mm <sup>2</sup> )
1	172	797.56
2	241	1537.28
3	242	1283.6
4	243	1297.28
5	251	1040.88
6	252	1038.32
7	253	1036.08
8	254	1073.52
9	255	1088.8
10	256	1088.12
11	257	1057.52
12	173	732.4
13	258	1009.32
14	260	966.4
15	584	890.44
16	585	866.36
17	586	905.85
18	587	1006.72
19	588	1001.16
20	589	944.2
21	590	865.8
22	591	924.2
23	174	663.92
24	602	844.56
25	175	503.604
26	176	451.32
27	237	1232.905
28	238	1430.88
29	239	1436.64
30	240	1436.96
31	Luas Total (mm <sup>2</sup> )	30452.599
32	<b>Rata-Rata Luas (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>1015.086633</b>

**TABEL HASIL PERHITUNGAN LUASAN NYALA API**  
 $L_f/h = 2,67$  dimana  $(h) = 30$  mm

Tabel 4.4.  
 $\Delta h$  udara 10 mm  
 $\Delta h$  bahan bakar 150

No	Frame	Luas (mm <sup>2</sup> )
1	0	946.92
2	27	892.004
3	66	892.965
4	67	923.533
5	68	979.054
6	69	942.365
7	70	938.645
8	71	901.717
9	72	892.17
10	78	896.302
11	79	902.877
12	1	921.96
13	80	944.744
14	81	969.417
15	82	1036.486
16	83	1049.105
17	84	1002.8
18	85	1076.969
19	86	1004.146
20	87	972.422
21	88	888.586
22	186	724.388
23	6	939.28
24	192	952.079
25	8	769.44
26	9	789.096
27	11	771.763
28	20	872.384
29	25	799.965
30	26	848.073
31	Luas Total (mm <sup>2</sup> )	27441.655
32	<b>Rata-Rata Luas (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>914.7218333</b>

Tabel 4.5.  
 $\Delta h$  udara 16 mm  
 $\Delta h$  bahan bakar 160

No	Frame	Luas (mm <sup>2</sup> )
1	30	510.476
2	201	440.358
3	202	399.79
4	203	414.539
5	244	220.072
6	245	497.728
7	259	605.724
8	290	584.277
9	291	629.745
10	320	793.316
11	321	892.851
12	31	497.641
13	322	736.859
14	323	671.179
15	324	609.874
16	325	772.786
17	326	795.689
18	349	507.335
19	350	482.994
20	351	522.726
21	354	485.708
22	356	589.169
23	32	542.426
24	360	601.935
25	33	517.946
26	191	532.3
27	192	495.426
28	192	495.426
29	199	429.939
30	200	449.475
31	Luas Total (mm <sup>2</sup> )	16725.709
32	<b>Rata-Rata Luas (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>557.5236333</b>

Tabel 4.6.  
 $\Delta h$  udara 22 mm  
 $\Delta h$  bahan bakar 300

No	Frame	Luas (mm <sup>2</sup> )
1	5	807.407
2	419	678.634
3	466	687.451
4	467	715.704
5	702	738.34
6	703	727.654
7	704	679.752
8	705	718.241
9	706	804.334
10	707	777.411
11	709	740.568
12	6	811.145
13	710	816.605
14	814	704.046
15	816	918.07
16	849	718.624
17	850	707.101
18	851	830.811
19	871	818.793
20	872	911.669
21	908	811.972
22	920	814.811
23	87	1033.209
24	945	708.364
25	88	877.258
26	325	785.644
27	415	615.517
28	416	624.319
29	417	547.041
30	418	608.266
31	Luas Total (mm <sup>2</sup> )	22738.761
32	<b>Rata-Rata Luas (mm<sup>2</sup>)</b>	757.9587

**TABEL HASIL PERHITUNGAN LUASAN NYALA API**  
 **$L_f/h = 4$  dimana ( $h$ ) = 20 mm**

Tabel 4.7.  
 $\Delta h$  udara 10 mm  
 $\Delta h$  bahan bakar 150

No	Frame	Luas (mm <sup>2</sup> )
1	0	1369.68
2	12	1426.541
3	13	254.904
4	14	1421.48
5	24	1281.853
6	25	1376.154
7	26	1473.552
8	27	254.987
9	28	1363.041
10	29	1379.159
11	30	1299.54
12	1	1326.79
13	31	1200.719
14	33	1208.388
15	34	1321.096
16	35	1314.65
17	36	1240.334
18	37	1433.716
19	38	1312.727
20	39	1299.443
21	40	1179.498
22	41	1197.597
23	2	1627.295
24	42	1221.52
25	3	1590.393
26	4	1583.421
27	5	1592.079
28	9	1555.243
29	10	1408.066
30	11	1456.856
31	Luas Total (mm <sup>2</sup> )	38970.722
32	<b>Rata-Rata Luas (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>1299.0241</b>

Tabel 4.8.  
 $\Delta h$  udara 16 mm  
 $\Delta h$  bahan bakar 150

No	Frame	Luas (mm <sup>2</sup> )
1	7	309.834
2	143	156.811
3	144	159.658
4	145	193.523
5	146	172.983
6	147	192.302
7	153	333.565
8	159	296.527
9	160	274.897
10	161	242.292
11	285	256.367
12	8	294.704
13	286	229.167
14	290	279.592
15	291	235.091
16	292	250.454
17	293	211.687
18	294	288.611
19	295	338.027
20	519	363.192
21	520	445.041
22	522	329.444
23	9	307.278
24	523	408.252
25	10	271.47
26	88	210.903
27	89	228.57
28	90	222
29	91	243.924
30	92	252.324
31	Luas Total (mm <sup>2</sup> )	7998.505
32	<b>Rata-Rata Luas (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>266.616833</b>

Tabel 4.9.  
 $\Delta h$  udara 22 mm  
 $\Delta h$  bahan bakar 300

No	Frame	Luas (mm <sup>2</sup> )
1	16	255
2	81	254.923
3	82	593.79
4	83	635.889
5	84	472.96
6	85	484.485
7	86	452.617
8	184	589.258
9	185	618.245
10	186	584.073
11	187	559.777
12	17	477.022
13	188	348.346
14	189	705.217
15	342	520.477
16	343	566.635
17	366	511.024
18	367	505.057
19	368	501.418
20	369	536.209
21	384	486.09
22	385	388.736
23	25	681.947
24	386	554.13
25	26	631.482
26	27	537.457
27	43	806.043
28	62	420.474
29	63	482.229
30	80	597.727
31	Luas Total (mm <sup>2</sup> )	15758.737
32	<b>Rata-Rata Luas (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>525.2912333</b>

Tabel 4.10. Lf/h = 4  
 $\Delta h$  udara 10 mm  
 $\Delta h$  bahan bakar 300

No	Frame	Luas (mm <sup>2</sup> )
1	0	2032.851
2	11	1694.226
3	12	1677.765
4	13	1545.051
5	24	1627.456
6	25	1382.047
7	26	1327.387
8	27	1567.252
9	28	1563.672
10	29	1449.459
11	30	1403.97
12	1	1870.823
13	31	1321.668
14	42	1397.54
15	43	1430.579
16	44	1249.663
17	46	1358.321
18	47	1333.129
19	48	1297.056
20	49	1464.981
21	50	1530.165
22	51	1710.771
23	2	2066.583
24	52	1639.463
25	3	1678.546
26	6	1865.134
27	7	1639.883
28	8	1731.987
29	9	1976.532
30	10	1897.659
31	Luas Total (mm <sup>2</sup> )	47731.619
32	<b>Rata-Rata Luas (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>1591.054</b>