



UNIVERSITAS INDONESIA

**VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API
DALAM ZONA RESIRKULASI PADA RUANG BAKAR
*BACKWARD-FACING STEP***

SKRIPSI

**ERWANTO PERES TARIGAN
0906604735**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API
DALAM ZONA RESIRKULASI PADA RUANG BAKAR
*BACKWARD-FACING STEP***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**ERWANTO PERES TARIGAN
0906604735**

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Ewanto Peres Tarigan

NPM : 0906604735

Tanda Tangan :

Tanggal : 13 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Erwanto Peres Tarigan
NPM : 0906604735
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Visualisasi Kecepatan Tinggi Nyala Api dalam
Zona Resirkulasi 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

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas segala berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya sangat menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada :

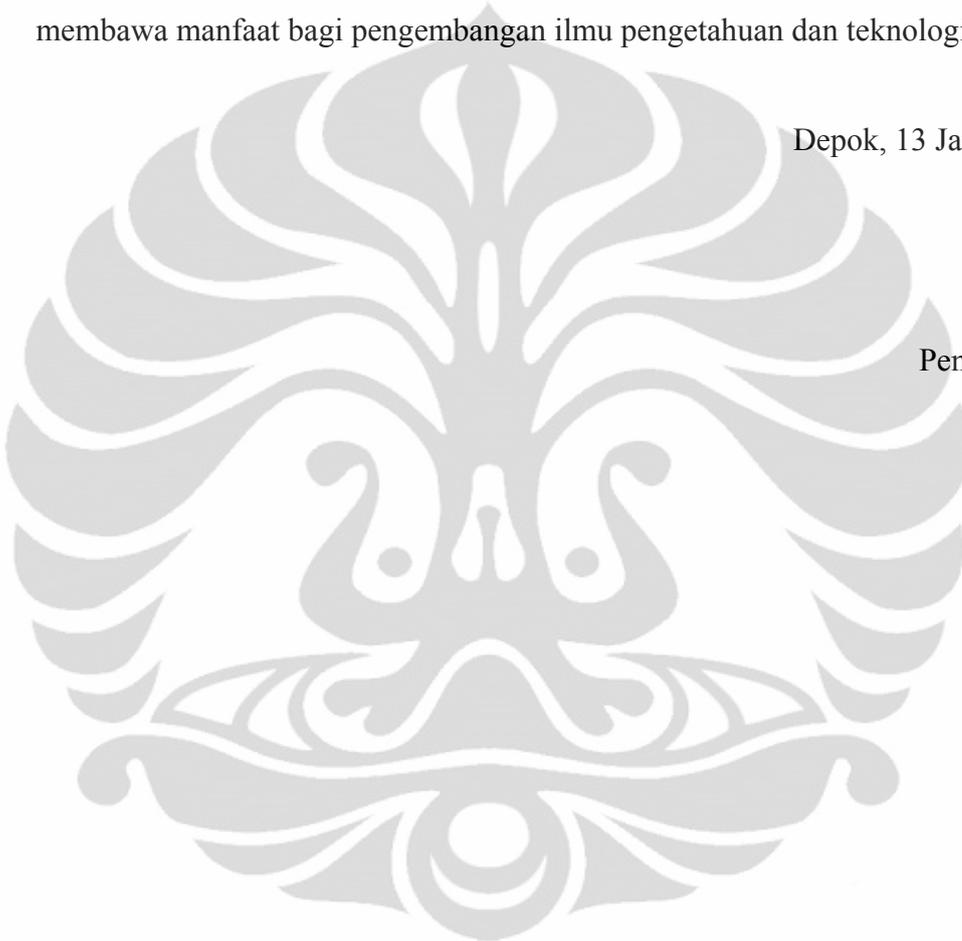
1. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng., selaku dosen pembimbing karena telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran serta membimbing saya untuk menyelesaikan skripsi ini.
2. Ayahanda tercinta Setiawan Tarigan dan Ibunda tercinta Ermina Syafrini, yang selalu memberikan doa, motivasi, bimbingan, dan pendidikan terbaik kepada saya selama ini. Kaka saya, Eirene Liastawati, yang telah menjadi kaka yang sangat hebat untuk saya. Adik-adik saya, Marita Rani dan Raja Lagagana, yang tidak pernah bosan untuk memberikan semangat kepada saya.
3. Dosen – dosen Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang telah mengajar saya dari awal perkuliahan hingga penulisan skripsi ini.
4. Damora Rhakasywi, ST. M.Eng., selaku mahasiswa S3 yang telah memberikan banyak ilmu dan pengalaman serta bimbingan.
5. Muhammad Fajar Kazirengga, sebagai partner sejati dan rekan satu tim yang selalu bersemangat serta selalu menopang untuk mengerjakan skripsi ini. Budiman Raharja R. dan Kris Kurnia, sebagai rekan satu team yang tidak pernah lelah membantu saya dalam mengerjakan skripsi ini.
6. Seluruh anggota “Never Stop Study” atas segala waktu, ilmu, dan kebersamaannya selama menimba ilmu di kampus tercinta Universitas Indonesia. HIDUP NSS.
7. Sahabat - sahabat Sumur yang selalu memberikan semangat serta bantuan selama ini.

8. Teman – teman Ekstensi Teknik Mesin 2009 atas dukungan dan kebersamaanya selama menimba ilmu di Universitas Indonesia.
9. Dan seluruh pihak, tanpa mengecilkan arti bantuan dan kontribusinya yang positif, yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan untuk membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, 13 Januari 2012

Penulis



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Erwanto Peres Tarigan
NPM : 0906604735
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian 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 DALAM ZONA RESIRKULASI 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



(Erwanto Peres Tarigan)

ABSTRAK

Nama : Erwanto Peres Tarigan
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : **Visualisasi Kecepatan Tinggi Nyala Api dalam Zona Resirkulasi pada Ruang Bakar *Backward-Facing Step***

Telah banyak penelitian untuk meningkatkan efisiensi dalam pembakaran, mulai dari pencampuran bahan bakar hingga variasi bentuk geometri ruang bakar. Pada akhirnya ditemukan satu rancangan dengan bentuk ruang bakar berkontur tangga dengan pembesaran tiba-tiba (*backward facing step with sudden expansion combustor*) yang disinyalir dapat mengakomodir kebutuhan *flame holding*. Penelitian kali ini terfokus pada ruang bakar *Backward-Facing Step* dengan menggunakan slot injeksi dengan rasio L_f/h sebesar 2, 2.67 dan 4 pada jarak $L_f = 40$ mm yang menunjukkan nyala api terstabilisasi pada daerah resirkulasi (*recirculation stabilized flame*). Dengan menggunakan bantuan *High Speed Video Camera* diperoleh hasil visualisasi kecepatan tinggi nyala api, sehingga dapat diketahui karakteristik dan pola pergerakan serta fenomena nyala api yang terjadi pada daerah resirkulasi. Tahapan selanjutnya adalah menghitung luasan nyala api dalam bentuk 2 dimensi, yang nantinya akan menjadi data pembandingan dengan nilai efisiensi bahan bakar. Korelasi antara nilai efisiensi dengan luas nyala api memperlihatkan hasil grafik yang menyimpulkan bahwa semakin tinggi efisiensi konsumsi bahan bakar, maka luas nyala api yang terbentuk akan semakin kecil. Perubahan luas nyala api lebih dikarenakan perubahan bentuk geometri ruang bakar, asupan bahan bakar dan kecepatan udara dari blower.

Kata Kunci :

Backward-Facing Step, Visualisasi Kecepatan Tinggi, Recirculation Stabilized Flame.

ABSTRACT

Name : Erwanto Peres Tarigan
Study Program : Mechanical Engineering
Title : ***High Speed Visualization of Recirculation Zone Flame in Backward Facing Step Combustor***

Many experiments have been done to improve the efficiency of combustion, from the mixing of fuel to the combustor geometry variations. Eventually, was used a design of backward facing step with sudden expansion combustor which was allegedly able to accommodate the needs of flame holding. The current experiment focused on the Backward-Facing Step combustor using the slot injection with a ratio L_f/h of 2, 2.67 and 4 at $L_f = 40$ mm, which shows recirculation stabilized flame. By using High Speed Video Camera, high-speed visualization of the flame can be obtained, so that the characteristics and movement patterns along flame phenomena in the recirculation zone can be analyzed. The next stage of the experiments is to calculate the extent of two-dimensional flame area, which is compared to the fuel consumption efficiency. Correlation between the fuel consumption efficiency and flame area graphs shows the higher efficiency of fuel consumption generate the smaller flame area. Various of flame area is caused by the geometry of combustor, fuel intake and main stream velocity from the blower.

Keywords :

Backward-Facing Step, High Speed Visualization, Recirculation Stabilized Flame.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR NOTASI	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Metodologi Penelitian	4
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 <i>Backward-Facing Step</i>	6
2.2 Stabilisasi 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
BAB 3. PROSEDUR PENELITIAN	16
3.1 Peralatan Penelitian	16
3.1.1 Sistem Suplai Udara	17
3.1.1.1 Blower	17
3.1.1.2 Sistem Perpipaan	17
3.1.1.3 <i>Wind Tunnel</i> Skala Kecil	17
3.1.2 <i>Test Section</i>	18
3.1.3 Sistem Suplai Bahan Bakar	19
3.1.4 <i>High Speed Video Camera</i>	21
3.2 Kalibrasi	22
3.2.1 Kalibrasi Sistem Suplai Bahan Bakar	22
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 Menggunakan <i>High Speed Video Camera</i>	26

3.3.3 Parameter-Parameter Pengambilan Gambar	26
3.4 Persamaan Konversi Data Mentah	27
3.4.1 Stabilisasi Penyalaan	27
3.5 Analisa Kesalahan	28
3.5.1 Kesalahan Sistematis	29
3.5.2 Kesalahan Acak	29
3.5.3 Kesalahan Keseluruhan	30
BAB 4. HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Hasil Visualisasi Nyala Api	31
4.1.1 Hasil Visualisasi $l_f/h=2$ dengan $h=20$ mm	31
4.1.2 Hasil Visualisasi $l_f/h=2.67$ dengan $h=15$ mm	35
4.1.3 Hasil Visualisasi $l_f/h=4$ dengan $h=10$ mm	38
4.1.4 Hasil Visualisasi Nilai Efisiensi Terendah	41
4.2 Analisa Visualisasi Fenomena Extinct Point	43
4.3 Hasil Perhitungan Luas Nyala Api	45
4.3.1 Perhitungan Luas Nyala Api $l_f/h=2$ dengan $h=20$ mm	47
4.3.2 Perhitungan Luas Nyala Api $l_f/h=2.67$ dengan $h=15$ mm ..	47
4.3.3 Perhitungan Luas Nyala Api $l_f/h=2$ dengan $h=10$ mm	48
4.3.4 Perhitungan Luas Nyala Api Nilai Efisiensi Terendah	48
4.4 Korelasi Antara Nilai Efisiensi Bahan Bakar dengan Luas Nyala Api	49
BAB 5. KESIMPULAN	54
DAFTAR PUSTAKA	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Prinsip Dasar Ruang Bakar Berkontur Tangga	2
Gambar 2.1	<i>Backward-facing step</i>	7
Gambar 2.2	(a) <i>Overventilated Flame</i> dan (b) <i>Underventilated Flame</i>	10
Gambar 2.3	Nyala Api Turbulen	10
Gambar 2.4	Struktur Molekul Propana	13
Gambar 3.1	Skema Peralatan Penelitian	16
Gambar 3.2	Sistem Suplai Udara	17
Gambar 3.3	Wind Tunnel Skala Kecil	18
Gambar 3.4	Test Section	19
Gambar 3.5	Pengatur dan Pengukur Suplai Bahan Bakar	20
Gambar 3.6	Wet Gas Meter Shinagawa	20
Gambar 3.7	<i>High Speed Video Camera</i>	22
Gambar 3.8	Skema Kalibrasi Manometer Bahan Bakar	23
Gambar 3.9	Skema Kalibrasi Sistem Suplai Udara	24
Gambar 3.10	Parameter Pengukuran	25
Gambar 3.11	Grafik Hasil Kalibrasi Sistem Suplai Udara	28
Gambar 3.12	Grafik Hasil Kalibrasi Sistem Bahan Bakar	28
Gambar 4.1	Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 10 mm dan Δh bahan bakar 28 mm	32
Gambar 4.2	Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 16 mm dan Δh bahan bakar 50 mm	33
Gambar 4.3	Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 22 mm dan Δh bahan bakar 50 mm	34
Gambar 4.4	Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 10 mm dan Δh bahan bakar 20 mm	36
Gambar 4.5	Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 16 mm dan Δh bahan bakar 20 mm	37
Gambar 4.6	Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 22 mm dan Δh bahan bakar 30 mm	38
Gambar 4.7	Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 10 mm dan Δh bahan bakar 14 mm	39
Gambar 4.8	Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 16 mm dan Δh bahan bakar 16 mm	39

Gambar 4.9	Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 10 mm dan Δh bahan bakar 16 mm	40
Gambar 4.10	Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 10 mm dan Δh bahan bakar 300 mm	42
Gambar 4.11	Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 22 mm dan Δh bahan bakar 50 mm dengan perbandingan $L_f/h = 2$, $(h) = 40$ mm	47
Gambar 4.12	Jarak lubang slot injeksi dari tangga (L_f) sebagai acuan pengukuran luas	44
Gambar 4.13	Menetapkan Skala Luas Nyala Api	44
Gambar 4.14	Perhitungan Luas Nyala Api pada ImageJ 1.44	47
Gambar 4.15	Grafik Korelasi Luasan Nyala Api Dengan Nilai Efisiensi pada $L_f/h = 2$	49
Gambar 4.16	Grafik Korelasi Luasan Nyala Api Dengan Nilai Efisiensi pada $L_f/h = 2,67$	50
Gambar 4.17	Grafik Korelasi Luasan Nyala Api Dengan Nilai Efisiensi pada $L_f/h = 4$	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Properti Kimia Propana.....	15
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>High Speed Video Camera</i>	21



DAFTAR NOTASI

$\%UL$	persen udara lebih
X_{O_2}	persen kadar O_2 dari <i>gas analyzer</i>
X_{N_2}	persen kadar N_2
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
Φ	rasio ekivalen
$m_{u_{akt}}$	massa udara aktual
V_{ud}	kecepatan udara
H	ketinggian manometer udara
ρ_{ud}	massa jenis udara
$m_{f_{akt}}$	massa bahan bakar aktual
$m_{f_{sto}}$	massa bahan bakar stoikiometri
η_{bb}	effisiensi konsumsi bahan bakar
SD	standar deviasi
X	nilai pengukuran
\bar{X}	nilai pengukuran rata-rata
N	banyaknya pengukuran

DAFTAR LAMPIRAN

- L1 Data Kalibrasi Sistem Pengukuran Udara dengan Diameter Orifice 2,5 inch
- L2 Data Kalibrasi Manometer Bahan Bakar dengan Diameter Orifice 0.8 mm, Gas Propana, dan Back Pressure 300 mm
- L3 Komposisi Bahan Bakar Gas Propana
- L4 Data Hasil Perhitungan Efisiensi Bahan Bakar Gas Propana pada $L_f = 40$ mm
- L5 Data Hasil Perhitungan Luas Nyala Api pada $L_f/h=2$, $L_f/h=2.67$, dan $L_f/h=4$
- L6 Foto Alat
- L7 Fenomena Nyala Api yang ditampilkan pada Sub Bab 4.1

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

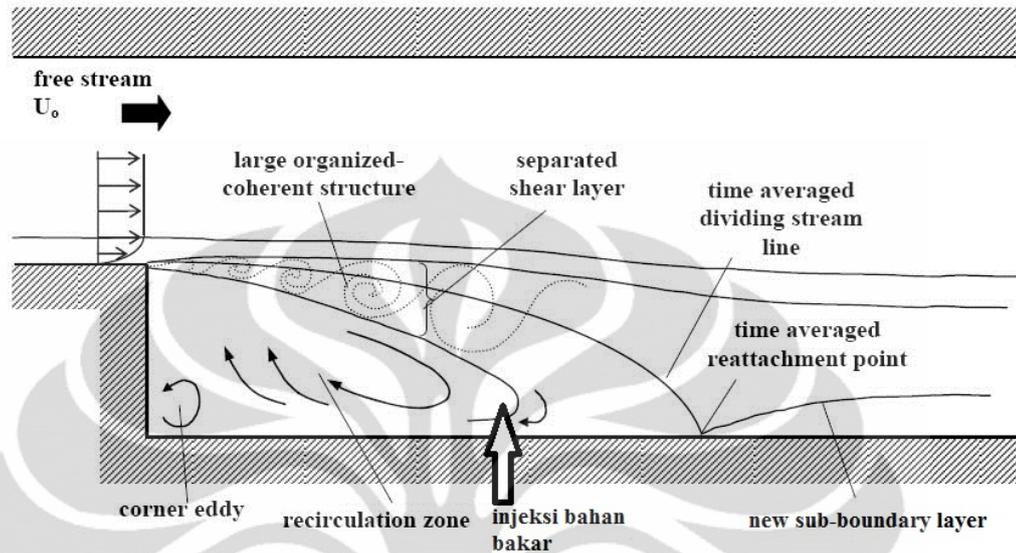
Seiring dengan bertambahnya waktu tentu saja persediaan sumber energi utama yaitu minyak bumi dan gas alam semakin menipis, selain itu kebutuhan kita akan energi terus meningkat. Hal ini menjadi penting karena minyak bumi dan gas alam merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui (*non-renewable*) dimana suatu saat energi ini pasti akan habis. Bahkan beberapa ahli berpendapat bahwa dengan pola konsumsi seperti sekarang, maka dalam waktu 50 tahun cadangan minyak bumi dunia akan habis

Himbauan untuk melakukan penghematan energi dan dan penemuan-penemuan energi baru terus dilakukan, tetapi penghematan energi tidak selalu menekan pemakaian bahan bakar. Hal terpenting dalam penghematan energi adalah keefisienan dalam pemakaian energi tersebut. Efisiensi yang dimaksud disini adalah efisiensi dalam proses konversi bahan bakar, khususnya dalam proses pembakaran. Dengan meningkatnya efisiensi pembakaran, maka pemakaian bahan bakar dapat diperkecil dan hasil keluaran (*output*) akan tetap sama.

Tentu saja telah banyak penelitian yang dilakukan oleh para peneliti untuk meningkatkan efisiensi dalam pembakaran, mulai dari pencampuran bahan bakar hingga variasi bentuk geometri ruang bakar. Banyak peneliti telah merancang bentuk geometri ruang bakar sederhana yang dapat menjaga nyala api dalam medan aliran berkecepatan tinggi, dan pada akhirnya ditemukan satu rancangan dengan bentuk ruang bakar berkontur tangga dengan pembesaran tiba-tiba (*backward facing step sudden expansion combustor*) yang disinyalir dapat mengakomodir kebutuhan *flame holding*, yang erat kaitannya dengan stabilisasi nyala dan efisiensi pembakaran.

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 flow*, *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 sebelumnya yang dilakukan oleh Maymuchar, menjelaskan tentang karakteristik stabilisasi nyala dan efisiensi pembakaran dalam ruang bakar berkontur tangga dengan menggunakan 3 jenis bahan bakar, yaitu propana, butana dan LPG komersial^[2]. Penelitian ini menggunakan variasi bentuk geometri ruang bakar guna mendapatkan stabilisasi nyala dan efisiensi bahan bakar. Namun penelitian ini 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 resirkulasi (*recirculation zone*) 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 melakukan analisa mengenai karakteristik serta korelasinya terhadap nilai efisiensi bahan bakar pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*) 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 hubungan antara bentuk geometris injeksi, dinamika fluida dari aliran dan kondisi pencampuran bahan bakar dan udara yang efektif yang dapat meningkatkan stabilitasi nyala dan efisiensi pembakaran. Dari data-data yang didapat diharapkan menjadikan masukan dalam memperbaiki rancangan ruang bakar.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini dititikberatkan pada analisa hasil visualisasi nyala api serta bagaimana korelasinya terhadap nilai efisiensi pembakaran yang terjadi pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*) di dalam ruang bakar 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 $L_f = 40$ 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^[2].
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 resirkulasi (*recirculation zone*) 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 menghasilkan variasi bentuk nyala api. Data-data yang mutlak untuk stabilisasi penyalaan yang diperoleh diolah berdasarkan persamaan yang didapat dari hasil kalibrasi sistem bahan bakar dan sistem suplai udara. Sedangkan untuk efisiensi konsumsi bahan bakar digunakan persamaan-persamaan yang telah berlaku.

1.5 Sistematika Penulisan

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.

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

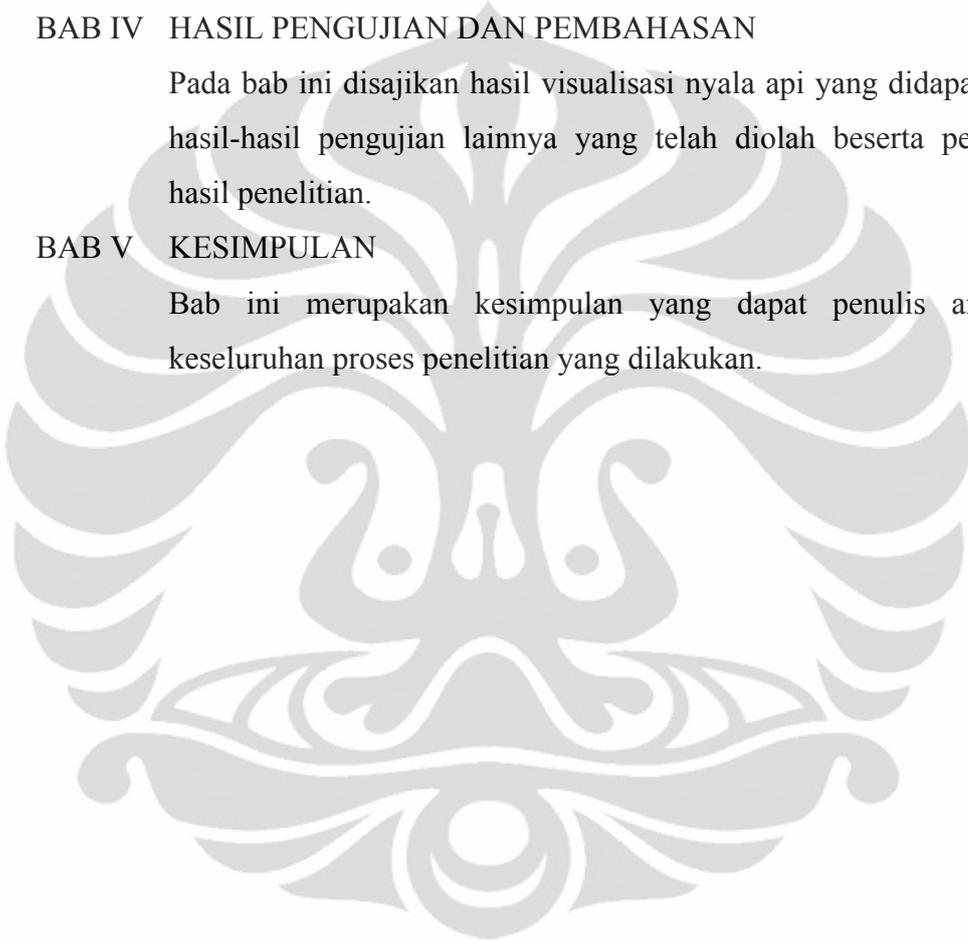
Berisikan peralatan-peralatan yang digunakan selama penelitian, kalibrasi alat pengukuran, prosedur pengambilan data dan persamaan-persamaan yang digunakan untuk mengolah data mentah.

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.



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 temperatur dan kecepatan aliran yang tinggi pada medan aliran reaksi.

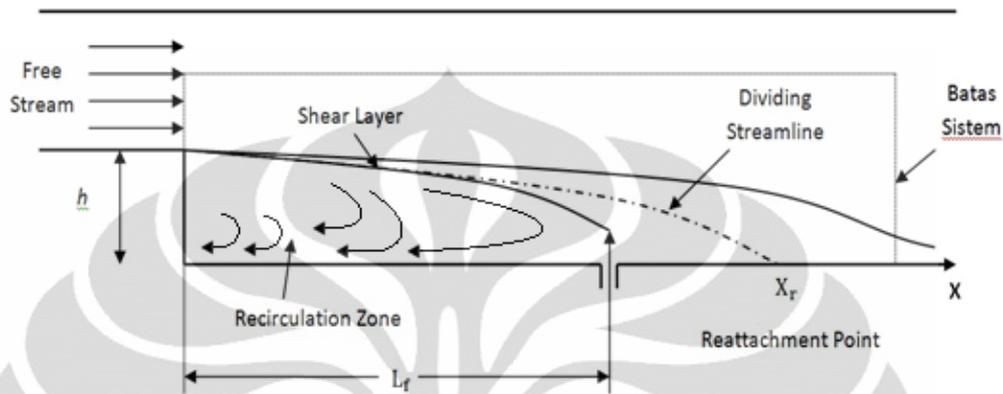
Sejalan dengan itu, perkembangan mesin jet tidak hanya terbatas untuk menghasilkan kecepatan yang lebih tinggi. Efisiensi dan juga dampak lingkungan yang berhubungan erat dengan efisiensi, proses pembakaran dalam ruang bakar tersebut. Oleh karena itu, penelitian mengenai jenis bahan bakar yang sesuai 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* hampir 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 bilangan 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 menjelaskan tentang efek injeksi gas panas terhadap karakteristik medan temperatur dalam aliran resirkulasi pada *backward-*

facing step^[1], kemudian dilanjutkan mengenai karakteristik stabilisasi nyala dan efisiensi pembakaran dalam ruang bakar berkontur tangga dengan menggunakan 3 jenis bahan bakar, yaitu propana, butana dan LPG komersial^[2]. Penelitian ini menggunakan variasi bentuk geometri ruang bakar guna mendapatkan stabilisasi nyala dan efisiensi bahan bakar.

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

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

2.2 Stabilisasi 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 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*, *flame holder* 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.

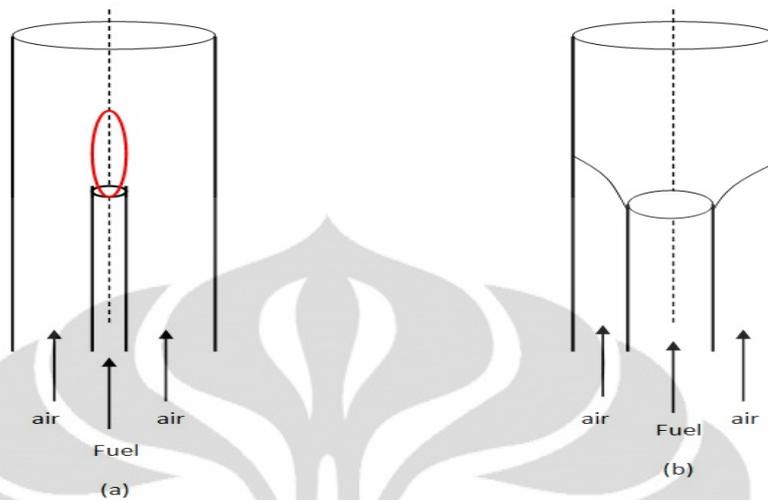
2.3 Nyala Difusi

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.



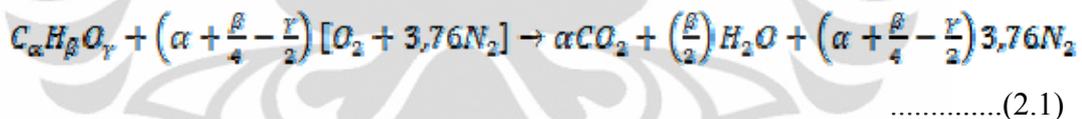
Gambar 2.3. nyala api turbulen

Turbulensi pada gas yang tidak terbakar akan meningkatkan laju penjaran 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 Efisiensi Bahan Bakar

Efisiensi bahan bakar pada penelitian ini didefinisikan sebagai perbandingan antara massa bahan bakar aktual 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 CO_2 , H_2O , dan N_2 . Persamaan kesetimbangan atom C, H, O dan N akan memenuhi persamaan seperti berikut :



dimana α , β dan γ adalah jumlah atom dari karbon, hidrogen, dan oksigen dalam senyawa pembakaran.

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

$$f = \frac{m_f}{m_u} = \frac{Mr_f \cdot n_f}{Mr_u \cdot n_u} \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

Perbedaan antara f aktual dengan f stoikiometri atau disebut dengan rasio ekuivalen (ϕ) secara formula adalah sebagai berikut :

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

Ini berarti apabila ϕ 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 ϕ kurang dari 1 ini berarti terdapat kekurangan bahan bakar 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 ϕ 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:

$$\% UL = \frac{\% O_2}{2,76 - \% O_2} \dots\dots\dots(2.5)$$

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 beresirkulasi serta rasio bahan bakar dan udara yang sebenarnya, maka diperoleh besarnya massa bahan bakar aktual pada proses pembakaran yaitu :

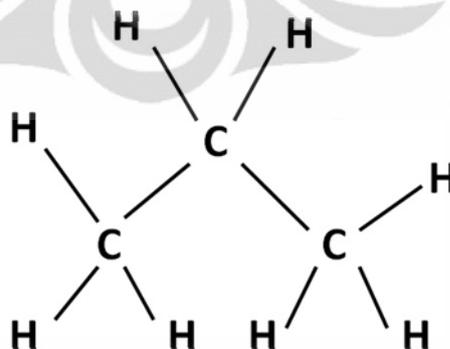
$$m_{f\ akt} = f_a \cdot m_{ud\ akt} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

Efisiensi 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 $C_n H_{2n+2}$ sehingga propane mempunyai 3 unsur karbon akan mempunyai 8 unsur hidrogen atau $C_3 H_8$.



Gambar 2.4 Struktur molekul propana

Dalam penggunaan sehari-hari sebagai bahan bakar, propana 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/m³.

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 m³ 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 (*Specific Gravity*)

Berat jenis dinyatakan dalam gram per ml, dalam derajat API, dalam lb per gallon, atau lb per ft³. 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/ft³.

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 tabel 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
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 ³ (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

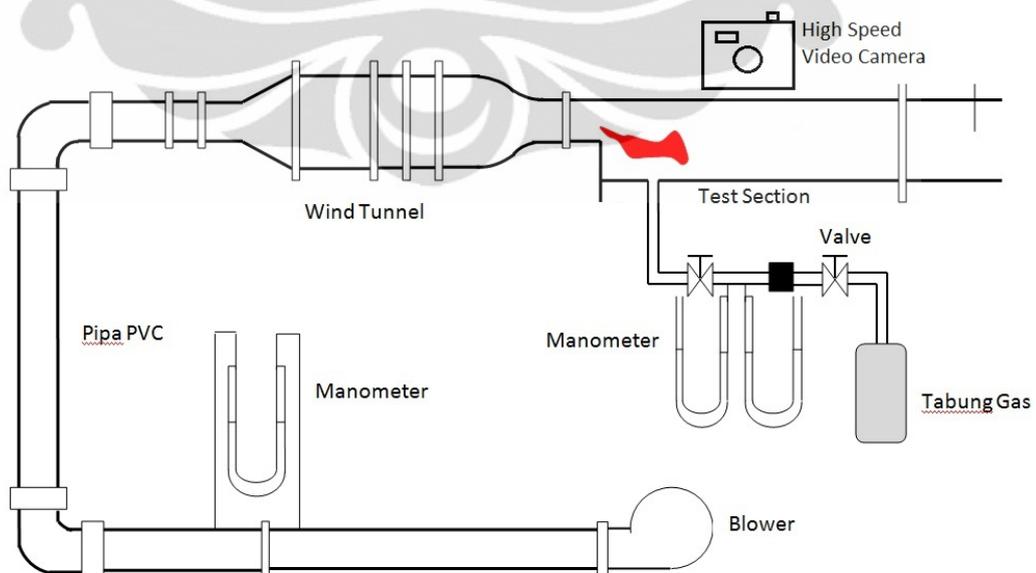
PROSEDUR PENELITIAN

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 resirkulasi (*recirculation zone*) 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 fasa, 220V/2.5A, 3000-3600 rpm. *Blower* ini mampu mensuplai udara bertekanan dalam ruang bakar dengan kecepatan aliran maksimum 14 m/s jika pada sistem perpipaan tidak ada hambatan seperti orifis.



Gambar 3.2 Sistem 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 inchi. Pada sistem ini terdapat orifis dan 2 *pressure tap* yang dihubungkan dengan selang ke manometer.

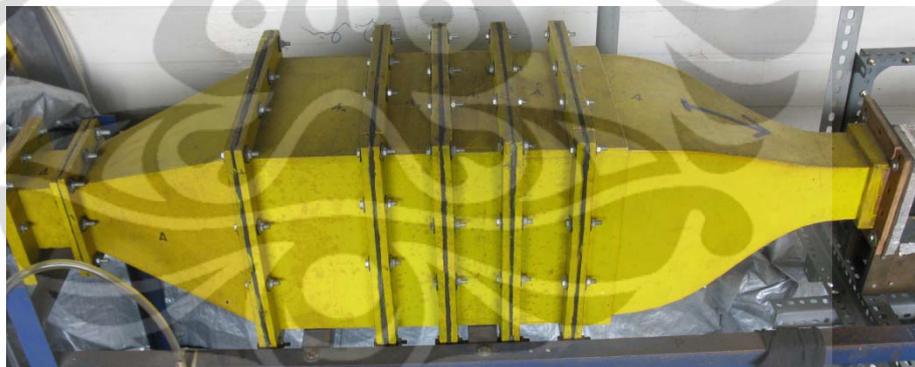
3.1.1.3 *Wind Tunnel* skala kecil

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 in².
- *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 3.3 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 5 mm 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_j sebesar 40 mm dari tangga. Sedangkan pada bagian depan *test section* dipasang kaca tahan panas dan pada bagian belakang dipasang pelat aluminium dengan *background* hitam. Alat ini juga dilengkapi dengan tutup yang terbuat dari pelat besi 1 mm dengan lubang berukuran 20 mm 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 3.4 Test Section

Selain itu, alat ini juga dilengkapi dengan *exhaust ducting* berdiameter 6 inci 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 3.5 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 3.6 Wet Gas Meter Shinagawa

3.1.4 High Speed Video Camera

Penelitian ini menggunakan *high speed video camera* Motion Xtra HG SE.

Berikut ini adalah spesifikasi dari *high speed video camera* Motion Xtra HG SE:

Tabel 3.1 Spesifikasi *high speed video camera* Motion Xtra HG SE

Perangkat lunak	“Point and click” dapat bekerja pada sistem operasi windows 2000 dan windows XP/ Pro.
Persyaratan komputer yang diperlukan	Minimal memakai processor Pentium III 560 MHz dengan MMX, 1024x768 monitor, 256 MB RAM, 10 GB Hard Drive, OHCI Compliant IEEE 1394 interface (400 Mbps).
Format file	AVI
Resolusi sensor CMOS	1280x1024 pixels, setiap pixel 12 micron persegi (8 bit mono) pada 500 fpd.
Laju perekaman	Bisa sampai 32000 fpd dengan mengurangi resolusi vertikalnya.
Jenis perekaman	Circular buffer: Merekam gambar kedalam memori internal sampai dipicu, kemudian pengguna dapat merekam hasil dari memori internal tersebut dengan frame yang dapat dipilih dari 0 sampai batas maksimal memori yang direkam. Record on trigger: Merekam dengan pemicu yang bias dipilih dari kapasitas memori.
Kapasitas penyimpanan frame	1024 frame (memori 1.3 GB)
Laju pemutaran ulang	7.5-15 (resolusi penuh) bergantung pada kecepatan komputer yang digunakan.
Lensa	Standard C-Mount (1”format).
Sambungan eksternal	Sambungan binder untuk sinyal pemicu. Sambungan IEEE 1394 6-pin.
Ukuran (dimensi)	Kepala kamera: 97x71x71 mm.
Berat	Kepala kamera: 0.8 kg.

Daya listrik yang diperlukan	Kurang lebih 12 W, pada suplai luar (8-12V)
Temperatur kerja	Operasional: -18° s/d 45°C (0° to 122°F) Non-operasional: -25° s/d 65°C (-13° to 149°F)
Kelembaban kerja	Operasional: maks.80% (tidak beruap), pada 45°C (113°F) untuk operasi selama 8 jam. Non-operasional: maks.40% (tidak beruap), pada 70°C (158°F) selama 48 jam.
Benturan	Getaran puncak sebesar 100 g dengan lebar getaran sebesar 15 ms.

Sumber: VITCam Manual V 1.5.9



Gambar 3.7 High speed video camera Motion Xtra HG SE

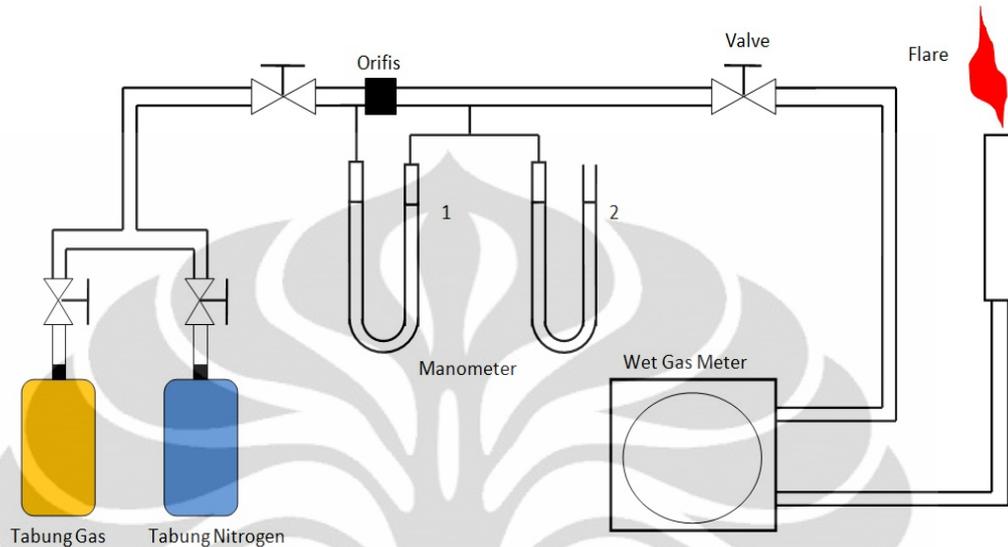
3.2 Kalibrasi

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 3.8 dibawah ini.



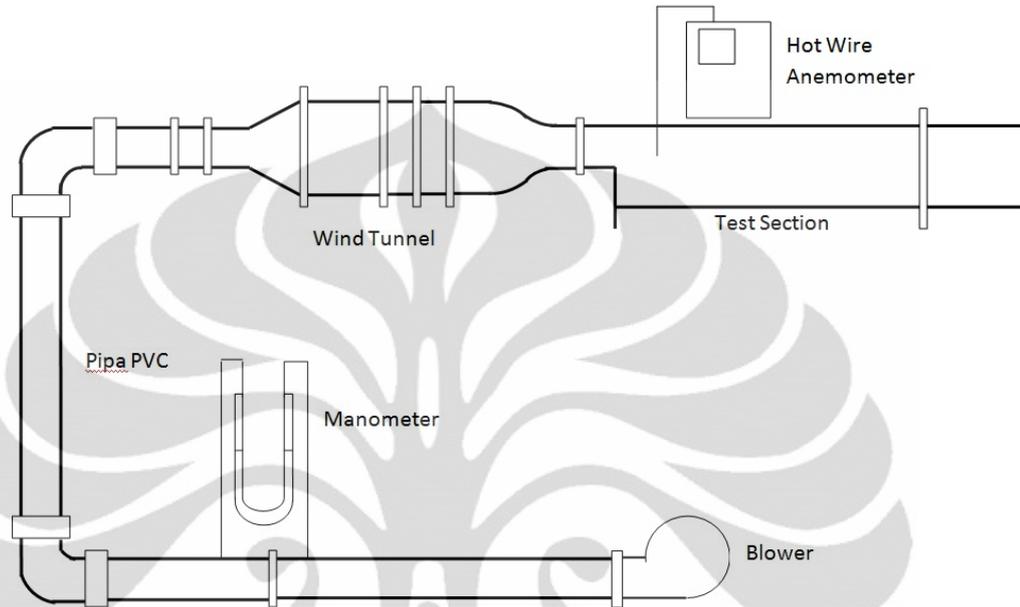
Gambar 3.8 Skema Kalibrasi Manometer Bahan Bakar

Bahan bakar propana dari tabung dialirkan melewati manometer U yang diantara keduanya telah dipasang *capillary flowmeter* (orifis), maka akan terbaca adanya perbedaan ketinggian permukaan Δh pada manometer 1. Sedangkan manometer 2 berfungsi untuk membaca *back pressure* yang dalam hal ini selalu dijaga konstan. Jika terjadi Δh pada manometer 1, Δh pada manometer 2 harus dijaga konstan. *Back pressure* yang dipakai selama kalibrasi adalah 300 mm. Untuk setiap *back pressure* ini diambil data setiap kenaikan 100 mm dari manometer 1 untuk *capillary flowmeter* yang berukuran 0,8 mm. Untuk setiap kenaikan Δh tersebut diukur waktu yang diperlukan oleh gas untuk mengalir dengan kapasitas tertentu yang terbaca pada flowmeter. Data mentah yang didapat adalah Δh , waktu dan volume gas.

Dari data tersebut dibuat grafik hubungan antara Δh 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 Δh *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 kedalamnya.

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 3.9 di bawah ini.



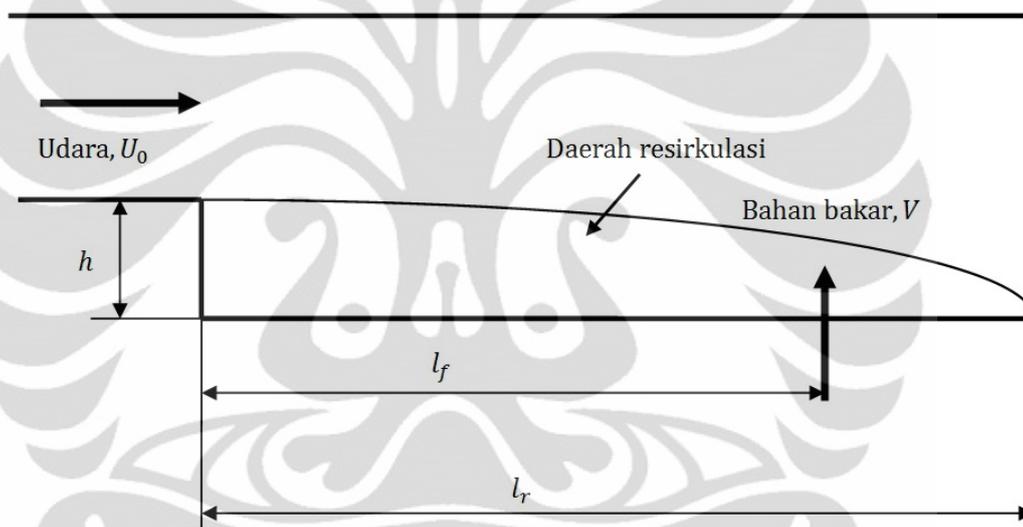
Gambar 3.9 Skema Kalibrasi Sistem Suplai Udara

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 Δh pada manometer orifis. Besar kecilnya aliran udara dari blower dapat diatur dengan mengatur posisi bukaan hisapan *blower*. Kalibrasi dilakukan untuk setiap 2 mm kenaikan Δh 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 Δh , bukaan katup buang, dan ukuran orifis yang dipakai adalah \varnothing 3 inchi kemudian dibuat grafik dan persamaannya. Meskipun demikian, selama penelitian dilaksanakan, hanya dipakai satu persamaan, yaitu yang berasal dari data orifis \varnothing 3,0 inchi dengan bukaan katup buang 0° . 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 3.10. Dalam penelitian ini dipakai 1 ukuran l_f , yaitu 40 mm. Sedangkan nilai h divariasikan dari 10 – 20 mm.



Gambar 3.10 Parameter Pengukuran

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

- Letak Injeksi (l_f) : 40 mm
- Kecepatan *Main Stream* (U_0) : 6 – 14 m/s
- Tinggi *Step* (h) : 10 mm, 15mm dan 20 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 Δh manometer orifis *blower*) diamati sejauh mana stabilitas nyala api propana

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 Menggunakan *High Speed Video Camera*

Proses pengambilan gambar yang dilakukan menggunakan *high speed video camera* dilakukan untuk mendapatkan visualisasi mengenai karakteristik nyala api difusi pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*) dari mulai api menyala hingga mencapai titik batas stabilitas nyala. Proses pengambilan gambar dilakukan menggunakan AOS Technologies AG MotionXtra HG-SE dengan lensa 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 dan 125 gambar/detik dengan durasi pengambilan gambar selama 8 detik berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Kondisi *test section* bagian depan menggunakan kaca tahan panas, bagian belakang 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.

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^[2].

Terdapat 3 letak injeksi bahan bakar berbeda yang diatur oleh perbandingan L_f/h , yaitu $L_f/h = 2$ dengan ketinggian tangga 20 mm, $L_f/h = 2,67$ dengan ketinggian tangga 15 mm dan $L_f/h = 4$ dengan ketinggian tangga 10 mm.

- $L_f/h = 2$ dengan tinggi tangga (h) 20 mm

Pengambilan data sebanyak 3 kali dengan variasi Δh udara 10 mm, 16mm, dan 22 mm serta Δh bahan bakar 28 mm, 50 mm, 50 mm.

- $L_f/h = 2,67$ dengan tinggi tangga (h) 30 mm

Pengambilan data sebanyak 3 kali dengan variasi Δh udara 10 mm, 16 mm, dan 22 mm serta Δh bahan bakar 20 mm, 20 mm, 30 mm.

- $L_f/h = 3$ dengan tinggi tangga (h) 20 cm

Pengambilan data sebanyak 3 kali dengan variasi Δh udara 10 mm, 16 mm, dan 22 mm serta Δh bahan bakar 14 mm, 16 mm, 16 mm.

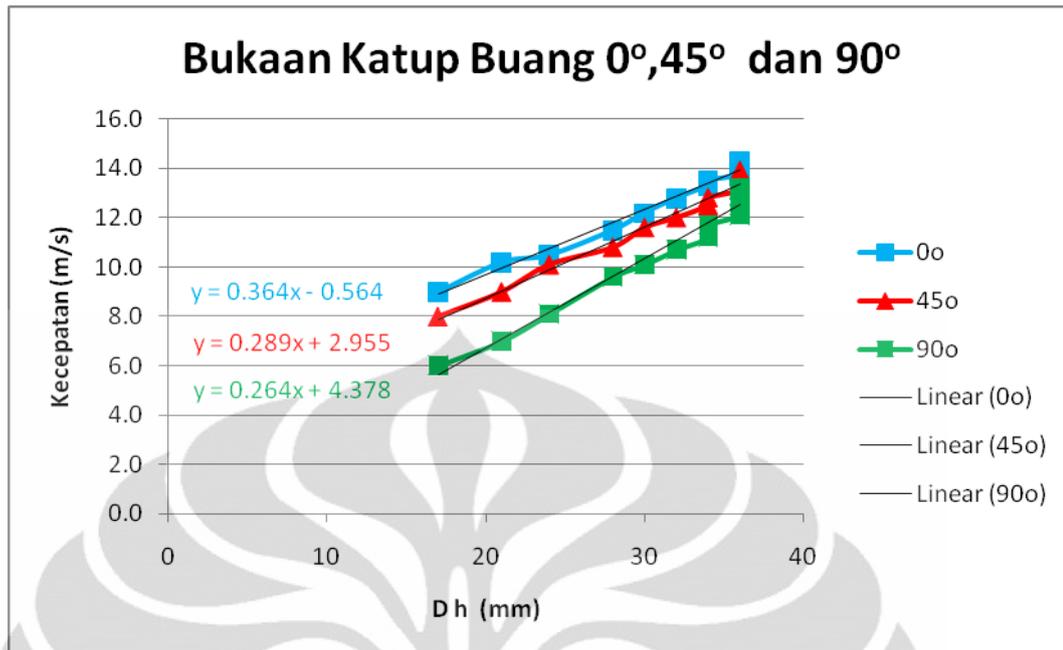
Data diatas diambil berdasarkan nilai efisiensi tertinggi yang didapat dari penelitian sebelumnya pada masing masing kenaikan Δh udara serta perbandingan L_f/h . Kemudian pengambilan gambar dilakukan pada titik dimana terdapat nilai efisiensi paling rendah yaitu pada $L_f/h = 4$ dengan tinggi tangga (h) 10 mm pada Δh udara 10 mm dan Δh bahan bakar 200 mm. 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 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) = 20 mm pada Δh udara 22 mm dan Δh bahan bakar 50 mm.

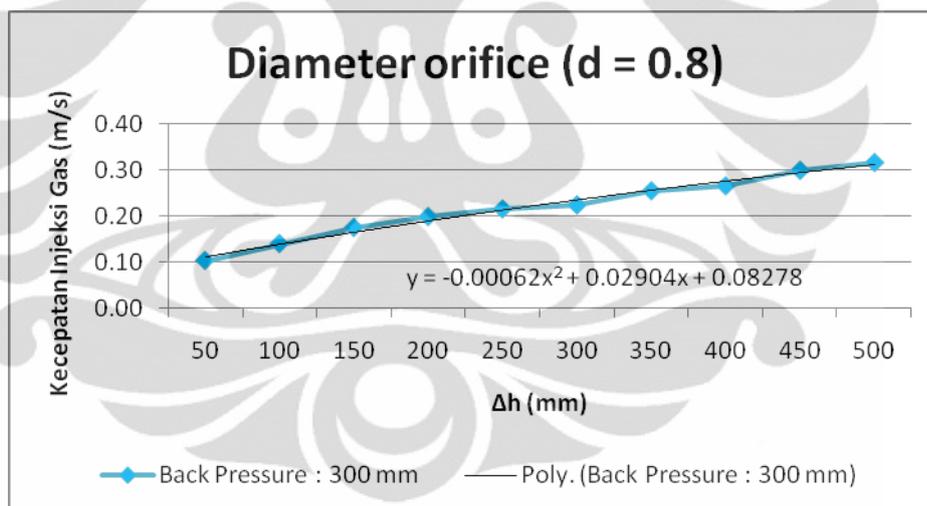
3.4 Persamaan-Persamaan Konversi Data Mentah

3.4.1 Stabilisasi Penyalaan

Berikut ini adalah persamaan yang dipakai untuk mengkonversikan data mentah stabilitas nyala yang berupa Δh 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 3.11 Grafik Hasil Kalibrasi Suplai Udara



Gambar 3.12 Grafik Hasil Kalibrasi 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 *stopwatch* serta *wet gas meter*. *Hot wire anemometer* memiliki keakurasian $\pm 2\%$.

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

$$\frac{\Delta U_0}{U_0} = \frac{0,02}{12,5} = 0,004$$

Untuk sistem suplai bahan bakar alat yang digunakan *stopwatch* dan *wet gas meter* sehingga factor kesalahannya adalah

$$\frac{\Delta V_t}{V_t} = \frac{0,01}{1} = 0,01$$
$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{0,02}{42,7} = 0,0004$$

sehingga factor kesalahan debit bahan bakar yang terbaca adalah

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta V_t}{V_t} + \frac{\Delta T}{T} = 0,01 + 0,0004 = 0,0504$$

Sedang untuk pengukuran efisiensi bahan bakar alat yang digunakan adalah *gas analyzer* dimana untuk pengukuran CO_2 alat ini memiliki keakurasian $\pm 4\%$ dan untuk pengukuran O_2 keakurasian sebesar $\pm 2\%$, sehingga

$$\frac{\Delta \text{CO}_2}{\text{CO}_2} = \frac{0,04}{0,8} = 0,05$$
$$\frac{\Delta \text{O}_2}{\text{O}_2} = \frac{0,02}{20,8} = 0,001$$

sehingga kesalahan dalam pengukuran efisiensi bahan bakar

$$\frac{\Delta \text{CO}_2}{\text{CO}_2} + \frac{\Delta \text{O}_2}{\text{O}_2} = 0,05 + 0,001 = 0,051$$

3.5.2 Kesalahan Acak

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

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

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 :

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

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

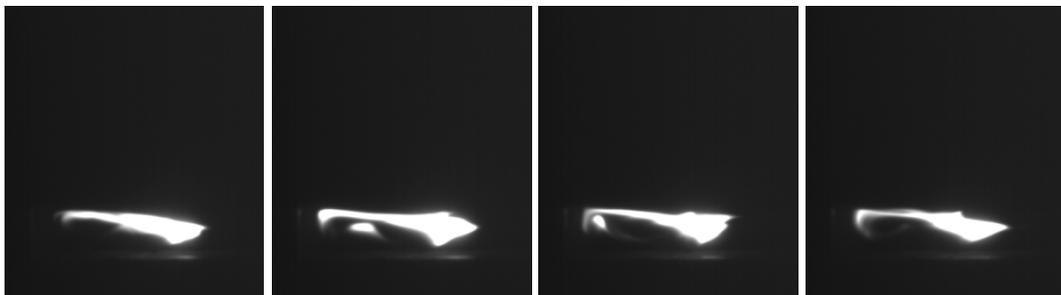
4.1 Hasil Visualisasi Nyala Api

Dari penelitian yang telah dilakukan pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*) mulai dari api menyala hingga mencapai titik batas stabilitas nyala, diperoleh berbagai macam visualisasi mengenai karakteristik nyala api pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*) dengan menggunakan *high speed video camera*. Pengambilan gambar diklasifikasikan berdasarkan Δh udara dan Δh bahan bakar serta nilai efisiensi konsumsi bahan bakar. Durasi yang diambil pada setiap titik berbeda-beda sesuai dengan hasil visualisasi yang terbaik, yaitu 4 detik dengan kecepatan pengambilan gambar 250 frame/detik dan 8 detik dengan kecepatan pengambilan gambar 125 frame/detik. Maka jumlah data yang didapat adalah 1000 buah gambar pada masing-masing titik. Untuk memudahkan analisa maka diambil beberapa gambar yang menunjukkan beberapa fenomena dari setiap titik yang ditentukan. Hasil yang didapat disertakan pada lampiran.

4.1.1 Hasil Visualisasi Nyala Api $L_f/h = 2$ dengan $h = 20$ mm

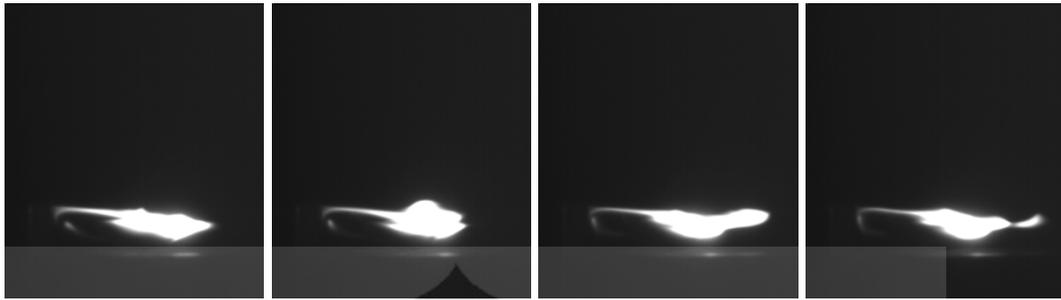
Pada perbandingan $L_f/h = 2$ telah ditentukan 3 titik pengambilan gambar yang mengacu kepada nilai efisiensi tertinggi untuk setiap perubahan kecepatan aliran *main stream* udara dan Δh bahan bakar. Durasi yang diambil pada 3 titik ini, yaitu 4 detik dengan kecepatan pengambilan gambar 250 frame/detik.

(a)



Frame 676, 684, 693, dan 700

(b)

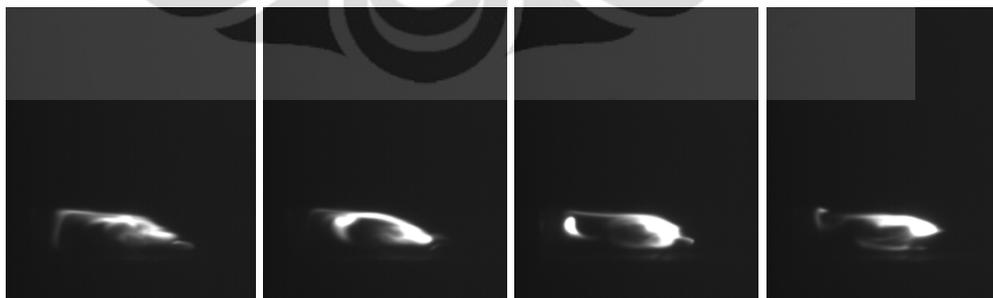


Frame 622, 624, 626, dan 627

Gambar 4.1. Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 10 mm dan Δh bahan bakar 28 mm
(a) Nyala api mengikuti aliran resirkulasi
(b) Nyala api pengaruh turbulensi udara

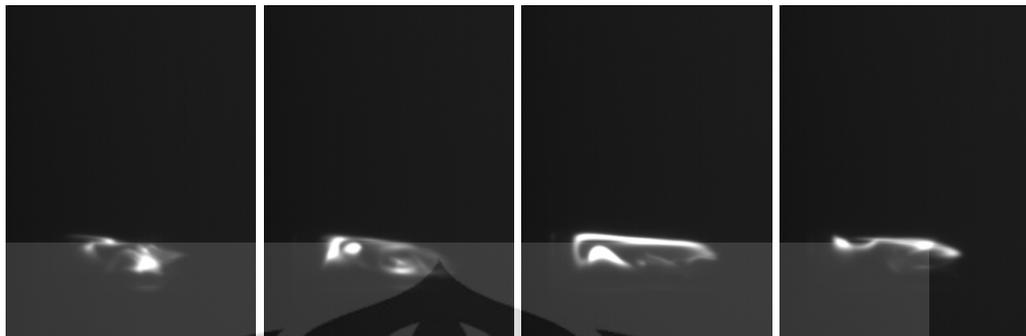
Fenomena yang terjadi pada gambar 4.1.(a) dimana terdapat nyala api yang berputar searah jarum jam di sekitar tangga, merupakan fenomena nyala api yang diakibatkan oleh aliran resirkulasi yang berada pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*). Api tersebut mengikuti aliran udara yang bersirkulasi pada daerah resirkulasi. Sedangkan pada gambar 4.1.(b), fenomena yang terjadi adalah sebagian kecil bagian api berpisah dari bagian utamanya yang terlihat pada gambar ke-4. Fenomena ini menjelaskan bahwa nyala api yang melewati daerah lapisan geser memiliki kecenderungan berturbulensi atau terpecah seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1.(b). Dari hasil perhitungan nilai efisiensi, gambar 4.1 memiliki efisiensi konsumsi bahan bakar paling rendah, yaitu 43,29%.

(a)



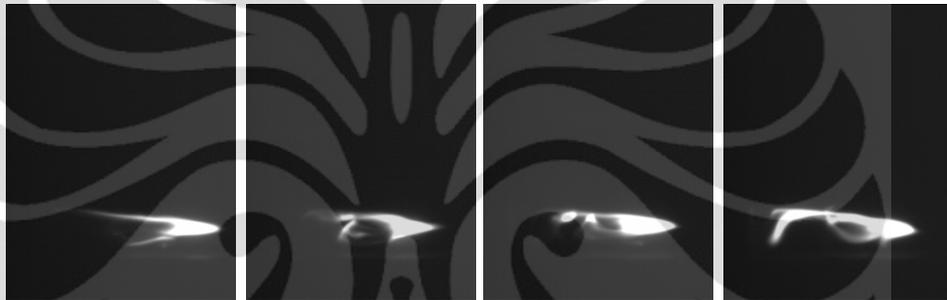
Frame 386, 390, 395, dan 402

(b)



Frame 696, 700, 707, dan 716

(c)



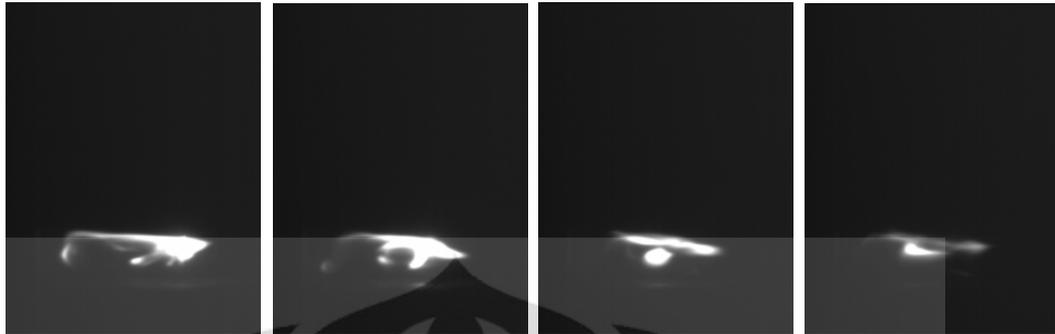
Frame 608, 619, 622, dan 627

Gambar 4.2. Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 16 mm dan Δh bahan bakar 50 mm

- | | |
|-----|--|
| (a) | Nyala api mengikuti aliran resirkulasi |
| (b) | Nyala api mengikuti aliran resirkulasi |
| (c) | Nyala api mengikuti aliran resirkulasi |

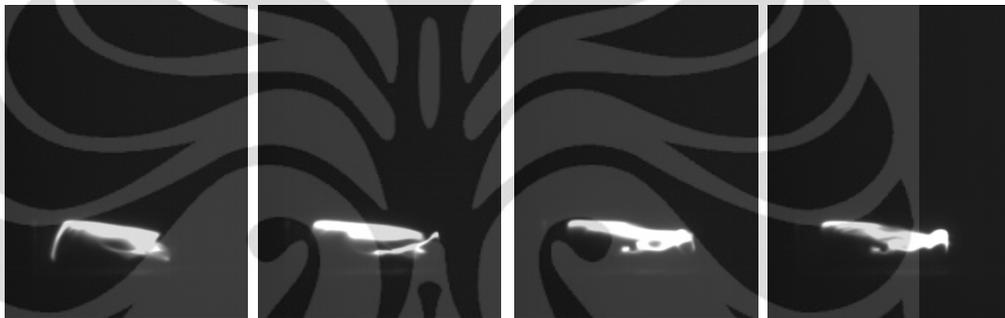
Fenomena yang terjadi pada gambar 4.2.(a),(b),dan (c) hampir sama dengan fenomena yang terlihat pada gambar 4.1, hanya saja pada ketiga gambar ini terlihat fenomena yang bervariasi mulai dari nyala api yang hampir berbentuk oval (gambar 4.2.a), pergerakan sebagian kecil api yang mengikuti kontur tangga (gambar 4.2.b), dan pergerakan api yang bersirkulasi di tengah dan hampir membentuk lingkaran (gambar 4.2.c) dimana semua fenomena ini merupakan fenomena nyala api yang diakibatkan oleh aliran resirkulasi yang berada pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*). Api tersebut mengikuti aliran udara yang bersirkulasi pada daerah resirkulasi. Dari hasil perhitungan nilai efisiensi, gambar 4.2 memiliki efisiensi konsumsi bahan bakar sebesar 44,27%.

(a)



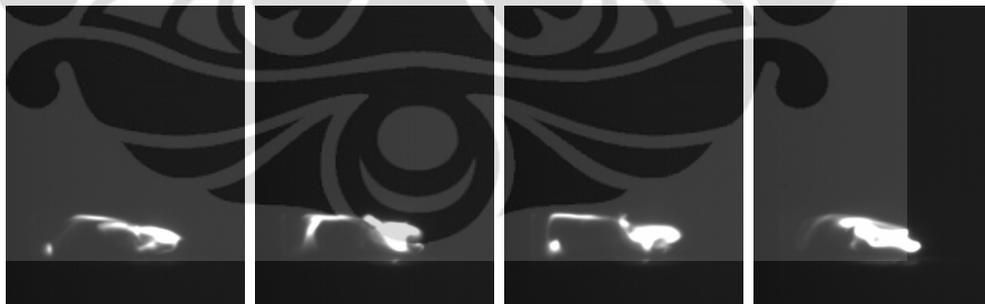
Frame 309, 314, 318, dan 320

(b)



Frame 454, 458, 461, dan 462

(c)



Frame 624,628,630,634

Gambar 4.3. Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 22 mm dan Δh bahan bakar 50 mm

(a)

Nyala api mengikuti aliran resirkulasi

(b)

Nyala api mengikuti aliran resirkulasi

(c)

Nyala api pada Arus Eddy

Fenomena yang terjadi pada gambar 4.3.(a),(b) hampir sama dengan fenomena yang terlihat pada gambar 4.1 dan 4.2, hanya saja terdapat variasi gerakan dari nyala api. Fenomena ini merupakan fenomena nyala api yang sama, diakibatkan oleh aliran resirkulasi yang berada pada daerah resirkulasi

(*recirculation zone*). Api tersebut mengikuti aliran udara yang bersirkulasi pada daerah resirkulasi.

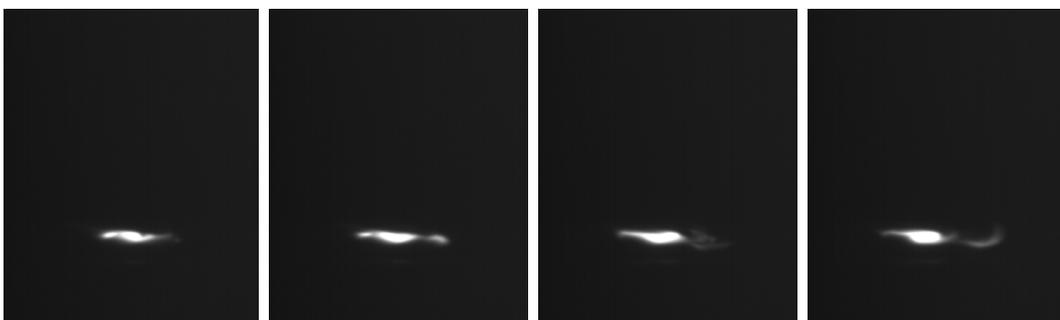
Lain halnya dengan gambar 4.3.(c). fenomena yang terlihat berbeda dengan fenomena yang lainnya, dapat terlihat ada sebagian kecil api yang berputar/berpusat pada ujung tangga yang biasa disebut dengan Arus Eddy. Hal ini dikarenakan titik ini memiliki efisiensi tertinggi dari titik lainnya, sehingga fenomena nyala api yang berpusat pada Arus Eddy ini dikarenakan oleh efisiensi yang tinggi. Dari hasil perhitungan nilai efisiensi, gambar 4.3 memiliki efisiensi konsumsi bahan bakar sebesar 51,81%.

Dari pengamatan ketiga buah titik nyala api diatas dapat diketahui bahwa, masih banyak terlihat api yang terlepas dalam zona resirkulasi mengikuti aliran resirkulasi udara, api yang melewati daerah lapisan geser memiliki kecenderungan berturbulensi atau terpecah, dan terjadinya ketidakstabilan bentuk. Hal ini dapat diakibatkan oleh pengaruh geometri ruang bakar serta ketidakstabilan suplai udara dari blower. Selain itu, pada efisiensi tertinggi terlihat nyala api yang bersirkulasi pada Arus Eddy.

4.1.2 Hasil Visualisasi Nyala Api $L_f/h = 2.67$ dengan $h = 15$ mm

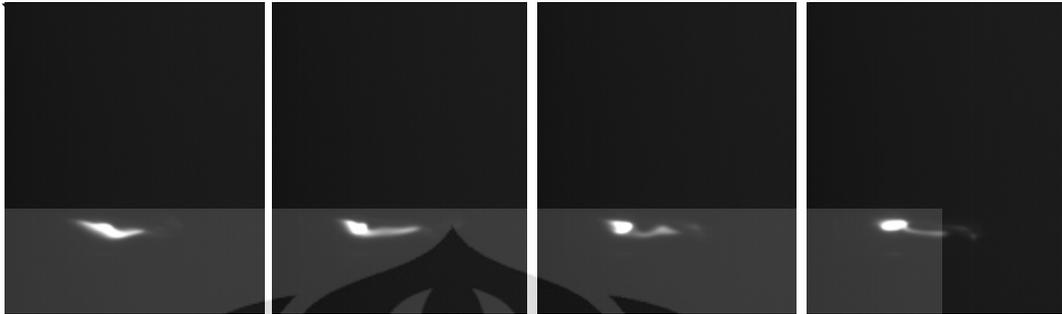
Pada perbandingan $L_f/h = 2.67$ telah ditentukan 3 titik pengambilan gambar yang mengacu kepada nilai efisiensi tertinggi untuk setiap perubahan kecepatan aliran *main stream* udara dan Δh bahan bakar. Durasi yang diambil pada 3 titik ini, yaitu 4 detik dengan kecepatan pengambilan gambar 250 frame/detik.

(a)



Frame 85, 87, 89, dan 91

(b)



Frame 579, 584, 586, dan 587

Gambar 4.4. Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 10 mm dan Δh bahan bakar 20 mm

(a)

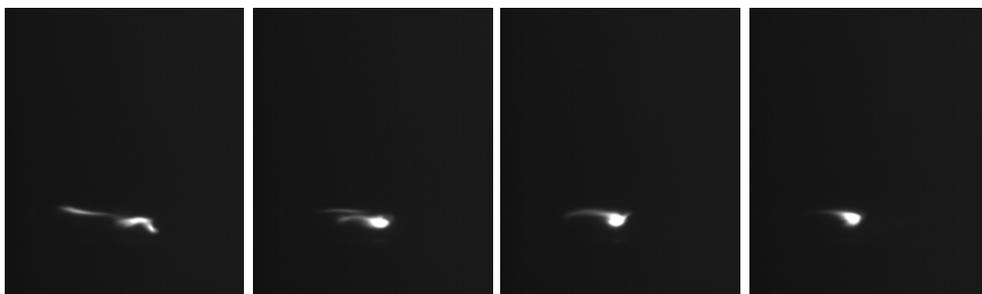
Nyala api pengaruh turbulensi udara

(b)

Nyala api mengikuti aliran resirkulasi

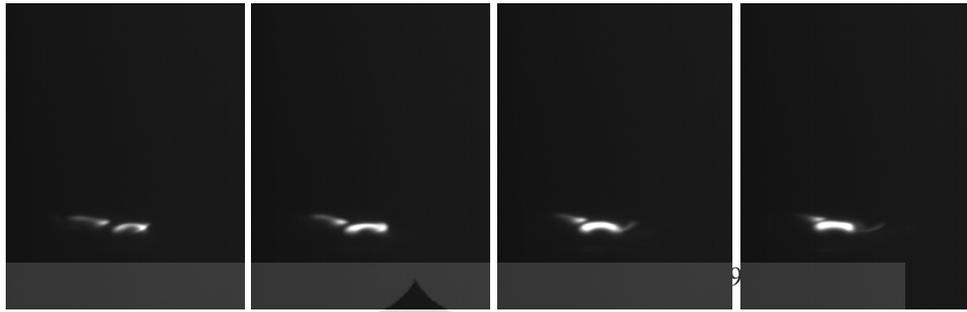
Pada gambar 4.4.(a), fenomena yang terjadi adalah sebagian kecil api berpisah dari bagian utamanya yang terlihat pada gambar ke-4. Fenomena ini menjelaskan bahwa nyala api yang melewati daerah lapisan geser memiliki kecenderungan berturbulensi atau terpecah seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4.(a). Sedangkan fenomena yang terjadi pada gambar 4.4.(b) dimana terdapat nyala api yang berputar searah jarum jam di sekitar tangga, merupakan fenomena nyala api yang diakibatkan oleh aliran resirkulasi yang berada pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*). Nyala api pada gambar 4.4.(b). ini menggambarkan nyala api yang melingkar-lingkar. Api tersebut mengikuti aliran udara yang bersirkulasi pada daerah resirkulasi. Dari hasil perhitungan nilai efisiensi, gambar 4.4 memiliki efisiensi konsumsi bahan bakar paling rendah, yaitu 34,78%.

(a)



Frame 465, 470, 473, dan 476

(b)



Gambar 4.5. Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 16 mm dan Δh bahan bakar 20 mm

(a)

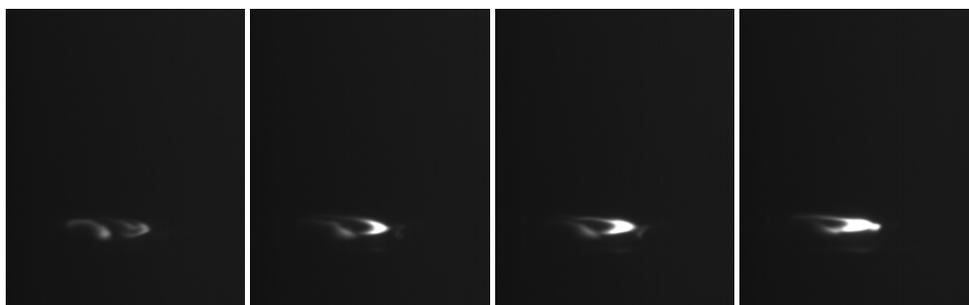
Nyala api mengikuti aliran resirkulasi

(b)

Nyala api mengikuti aliran resirkulasi

Fenomena yang terjadi pada gambar 4.5.(a),(b) hampir sama dengan fenomena yang terlihat pada gambar 4.1, 4.2, 4.3 dan 4.4 hanya saja terdapat variasi gerakan dari nyala api. Pada gambar 4.5.(a) terlihat fenomena api kecil yang berputar satu arah saja, hal ini dikarenakan asupan bahan bakar yang sedikit sehingga api terlihat kecil, tetapi fenomena resirkulasi masih terlihat jelas. Kemudian pada gambar 4.5.(b) fenomena nyala api mengikuti aliran resirkulasi ini membentuk karakteristik yang menyerupai kuping. Fenomena ini merupakan fenomena nyala api yang sama, diakibatkan oleh aliran resirkulasi yang berada pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*). Api tersebut mengikuti aliran udara yang bersirkulasi pada daerah resirkulasi. Dari hasil perhitungan nilai efisiensi, gambar 4.5 memiliki efisiensi konsumsi bahan bakar paling tinggi, yaitu 41,92%. Tetapi pada efisiensi ini tidak ditemukan nyala api yang terpusat pada Arus Eddy dikarenakan efisiensi bahan bakarnya masih belum maksimum, sehingga fenomena Arus Eddy belum terlihat.

(a)



Frame 665, 667, 669, dan 671

(b)



Frame 687, 689, 693, dan 695

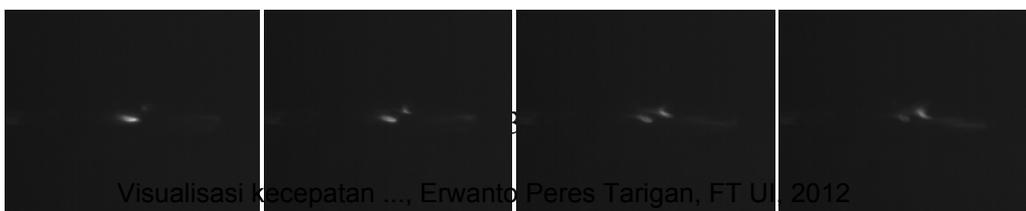
Gambar 4.6. Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 22 mm dan Δh bahan bakar 30 mm
(a) Nyala api mengikuti aliran resirkulasi
(b) Nyala api mengikuti aliran resirkulasi

Fenomena yang terjadi pada gambar 4.6.(a),(b) hampir sama dengan fenomena yang terlihat pada gambar 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 dan 4.5 hanya saja terdapat variasi gerakan dari nyala api. Pada gambar 4.6.(a) terlihat fenomena api kecil menyerupai kuping, hal ini dikarenakan asupan bahan bakar yang sedikit sehingga api terlihat kecil, tetapi fenomena resirkulasi masih terlihat jelas. Kemudian pada gambar 4.6.(b) fenomena nyala api mengikuti aliran resirkulasi ini membentuk karakteristik yang menyerupai persegi panjang. Fenomena ini merupakan fenomena nyala api yang sama, diakibatkan oleh aliran resirkulasi yang berada pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*). Api tersebut mengikuti aliran udara yang bersirkulasi pada daerah resirkulasi. Dari hasil perhitungan nilai efisiensi, gambar 4.6 memiliki efisiensi konsumsi bahan bakar sebesar 39,79%.

Dari pengamatan ketiga buah titik nyala api diatas dapat diketahui bahwa, masih banyak terlihat api yang terlepas dalam zona resirkulasi mengikuti aliran resirkulasi udara, api yang melewati daerah lapisan geser memiliki kecenderungan berturbulensi atau terpecah, dan terjadinya ketidakstabilan bentuk. Hal ini dapat diakibatkan oleh pengaruh geometri ruang bakar serta ketidakstabilan suplai udara dari blower.

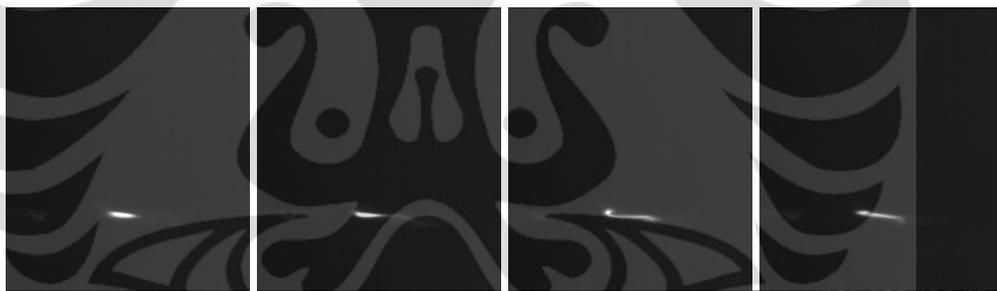
4.1.3 Hasil Visualisasi Nyala Api $L_f/h = 4$ dengan $h = 10$ mm

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 Δh bahan bakar. Durasi yang diambil pada 3 titik ini, yaitu 4 detik dengan kecepatan pengambilan gambar 250 frame/detik dan 8 detik dengan kecepatan pengambilan gambar 125 frame/detik .



**Gambar 4.7. Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 10 mm dan Δh bahan bakar 14 mm
Nyala api mengikuti aliran resirkulasi**

Fenomena yang terjadi pada gambar 4.7 dimana terdapat nyala api yang berputar searah jarum jam di sekitar tangga, merupakan fenomena nyala api yang diakibatkan oleh aliran resirkulasi yang berada pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*). Api yang terlihat sangat kecil karena asupan bahan bakar juga sangat sedikit dan api yang dihasilkan berwarna biru. Api tersebut mengikuti aliran udara yang bersirkulasi pada daerah resirkulasi. Dari hasil perhitungan nilai efisiensi, gambar 4.7 memiliki efisiensi konsumsi bahan bakar paling rendah, yaitu 24,50%.



Frame 321,322,323,324

**Gambar 4.8. Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 16 mm dan Δh bahan bakar 16 mm
Nyala api mengikuti aliran resirkulasi**

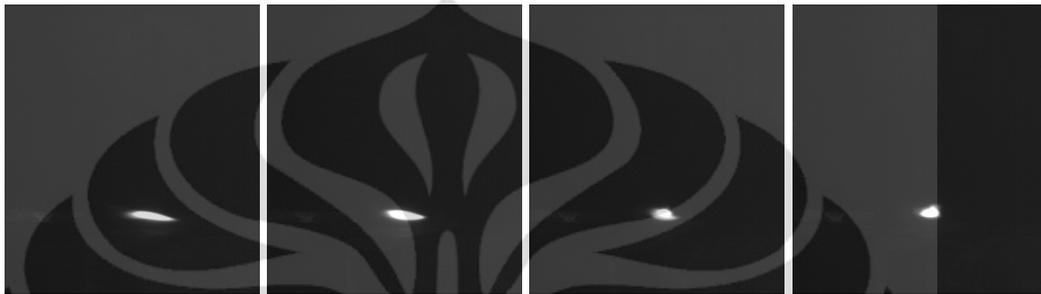
Fenomena yang terjadi pada gambar 4.8 dimana terdapat nyala api yang hampir menyerupai huruf s, merupakan fenomena nyala api yang diakibatkan oleh aliran resirkulasi yang berada pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*). Api yang terlihat sangat kecil karena asupan bahan bakar juga sangat kecil. Api tersebut mengikuti aliran udara yang bersirkulasi pada daerah resirkulasi. Dari hasil perhitungan nilai efisiensi, gambar 4.8 memiliki efisiensi konsumsi bahan bakar sebesar 28,99%. Pada titik ini penelitian menggunakan kecepatan pengambilan gambar 125 frame/detik dikarenakan gambar tidak tertangkap jika menggunakan kecepatan pengambilan gambar 250 frame/detik.

(a)



Frame 393, 394, dan 395

(b)



Frame 886, 887, 888, dan 889

Gambar 4.9. Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 22 mm dan Δh bahan bakar 16 mm
(a) Nyala api mengikuti aliran resirkulasi
(b) Nyala api mengikuti aliran resirkulasi

Pada gambar 4.9.(a) terlihat fenomena api kecil menyerupai kuping, hal ini dikarenakan asupan bahan bakar yang sedikit sehingga api terlihat kecil, tetapi fenomena resirkulasi masih terlihat jelas. Kemudian pada gambar 4.9.(b) terlihat fenomena api kecil yang berputar satu arah saja, hal ini dikarenakan asupan bahan bakar yang sedikit sehingga api terlihat kecil. Semua fenomena ini merupakan fenomena nyala api yang diakibatkan oleh aliran resirkulasi yang berada pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*). Api tersebut mengikuti aliran udara yang bersirkulasi pada daerah resirkulasi. Dari hasil perhitungan nilai efisiensi, gambar 4.9 memiliki efisiensi konsumsi bahan bakar sebesar 39,79%. Pada titik ini penelitian menggunakan kecepatan pengambilan gambar 125 frame/detik dikarenakan gambar tidak tertangkap jika menggunakan kecepatan pengambilan gambar 250 frame/detik.

Dari pengamatan ketiga buah titik nyala api diatas dapat diketahui bahwa, masih banyak terlihat api yang terlepas dalam zona resirkulasi mengikuti aliran resirkulasi udara, api yang melewati daerah lapisan geser memiliki kecenderungan berturbulensi atau terpecah, dan terjadinya ketidakstabilan bentuk. Hal ini dapat diakibatkan oleh pengaruh geometri ruang bakar serta ketidakstabilan suplai udara dari blower.

4.1.4 Hasil Visualisasi Nyala Api dengan 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.

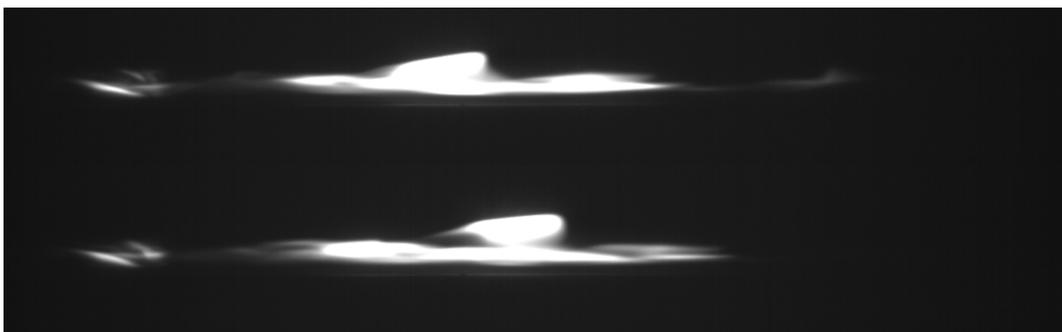
Kondisi yang diambil pada visualisasi ini adalah pada perbandingan $l_f/h = 4$ dimana posisi Δh udara berada pada 10 mm dengan kecepatan *free stream* udara sebesar 6,0 m/s dan posisi Δh bahan bakar berada pada 200 mm. Durasi 4 detik dengan kecepatan pengambilan gambar 250 frame/detik.

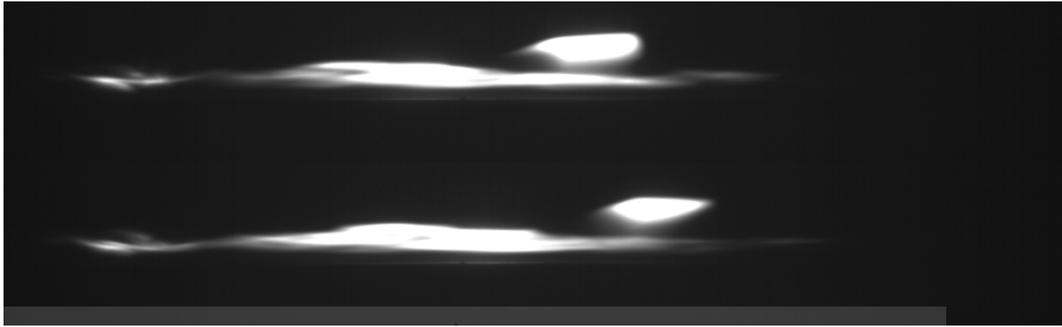
(a)



Frame 742, 744, 745, dan 746

(b)





Frame 926, 927, 928, dan 929

Gambar 4.10. Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 22 mm dan Δh bahan bakar 16 mm

(a)

Nyala api mengikuti aliran resirkulasi

(b)

Nyala api pengaruh turbulensi udara

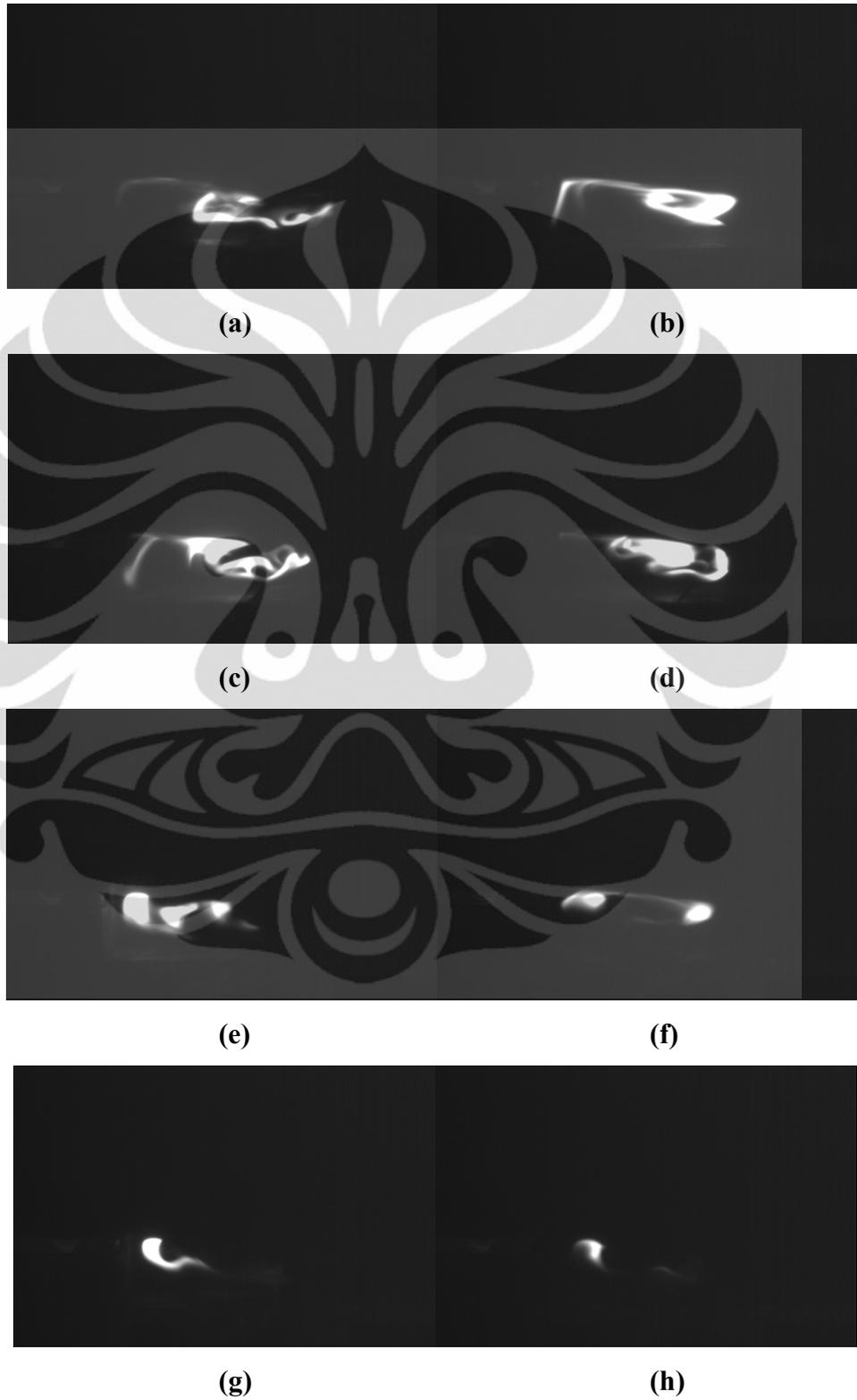
Dari hasil visualisasi diatas dapat diketahui bahwa karakteristik nyala api pada titik tersebut cenderung memiliki bentuk geometri yang paling panjang dibandingkan dengan dengan bentuk nyala api lainnya. Hal ini dikarenakan konsentrasi bahan bakar lebih banyak daripada konsentrasi udara sehingga terjadi terjadi pencampuran yang tidak seimbang untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna.

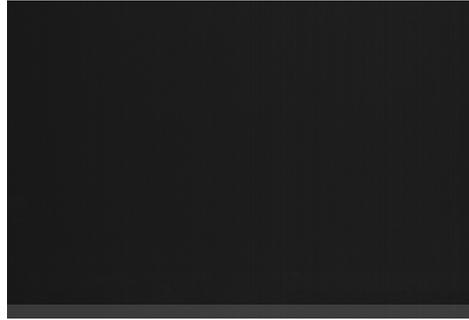
Fenomena yang terjadi pada gambar 4.10.(a) dimana terdapat nyala api yang berputar mengikuti aliran resirkulai, merupakan fenomena nyala api yang diakibatkan oleh aliran resirkulasi yang berada pada daerah resirkulasi (*recirculation zone*). Api tersebut mengikuti aliran udara yang bersirkulasi pada daerah resirkulasi. Sedangkan pada gambar 4.10.(b), fenomena yang terjadi adalah sebagian api berpisah dari bagian utamanya yang terlihat pada gambar ke-4. Fenomena ini menjelaskan bahwa nyala api yang melewati daerah lapisan geser memiliki kecenderungan berturbulensi atau terpecah seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.10.(b). Hal ini dipengaruhi oleh bentuk geometri ruang bakar serta asupan udara yang tidak stabil dari blower. Dari hasil perhitungan nilai efisiensi, gambar 4.10 memiliki efisiensi konsumsi bahan bakar paling rendah, yaitu sebesar 10,30%.

4.2 Analisa Visualisasi Fenomena *Extinct 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.





(i)

Gambar 4.11. Visualisasi Nyala Api pada Δh udara 22 mm dan Δh bahan bakar 50 mm dengan perbandingan $L_f/h = 2$, $(h) = 20$ mm

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

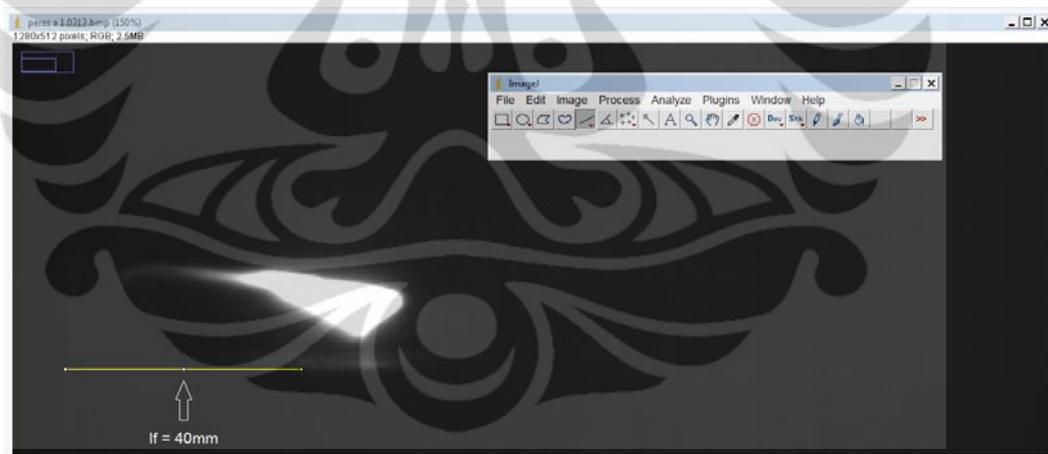
Gambar diatas diambil dengan kemampuan menangkap gambar sebanyak 250 *frame*/detik dengan durasi 4 detik. Hal yang penulis analisa adalah fenomena yang terjadi setiap detik dimulai detik pertama yaitu ketika api mencapai stabilisasi penyalaan hingga detik ke empat dimana api padam.

Dapat dilihat bahwa pada detik ke 1 (gambar a dan b) nyala api terlihat sedang beresirkulasi. Ketika nyala api memasuki detik ke 2 (gambar c dan d) dengan asupan bahan bakar dikurangi secara konstan maka dapat kita lihat bahwa fenomena yang terjadi adalah bentuk nyala api mulai berubah dari ditandai dengan turbulensi yang semakin meningkat, dikarenakan kecepatan free stream udara tetap tetapi bahan bakar dikurangi. Bentuk nyala api yang terjadi pun mulai tidak stabil terlihat dengan api yang sudah mulai acak. Pada detik ke 3 (gambar e dan f) 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 titik-titik yang berpisah dan tetap beresirkulasi. Sedangkan pada detik ke 4 (gambar g,h dan i) sampai padam terlihat sangat jelas bahwa luasan nyala api berkurang sangat signifikan hingga hanya terkonsentrasi pada titik nosel dan hanya membentuk nyala api seperti “cacing” kecil hingga akhirnya benar-benar padam.

4.3 Hasil Perhitungan Luas Nyala Api

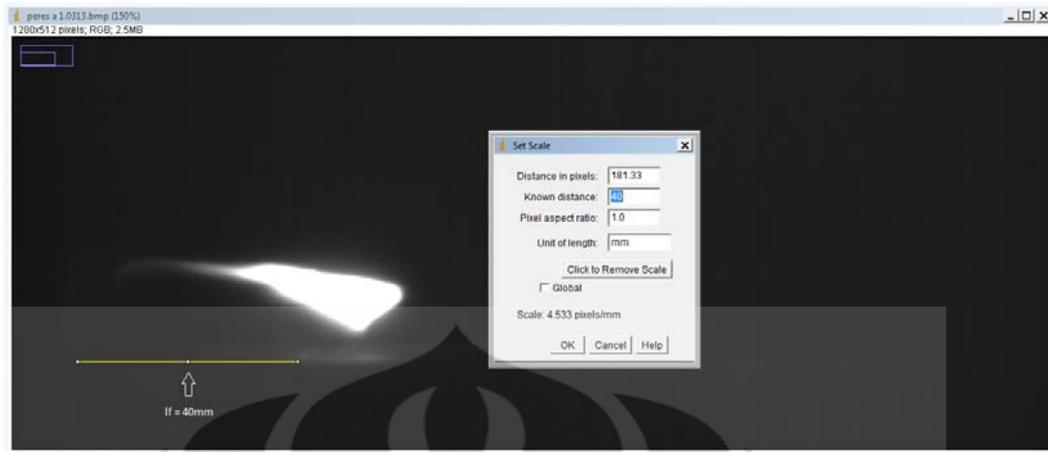
Perhitungan luas nyala api ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar nyala api yang dihasilkan pada setiap parameter yang telah ditentukan, kemudian hasil perhitungan nyala api ini akan dibandingkan dengan efisiensi bahan bakar yang telah didapat. Dari setiap parameter akan diambil sampling sebanyak 30 gambar/foto nyala api yang memiliki kecenderungan stabil. Kemudian seluruh hasil perhitungan akan dirata-ratakan, yang nantinya akan menjadi data luas nyala api tiap parameter.

Software yang digunakan dalam perhitungan luas nyala api ini adalah ImageJ 1.44. Hal yang pertama dilakukan adalah menentukan kalibrator yang digunakan sebagai titik acuan untuk mencari luas nyala api tersebut. Jarak lubang slot injeksi dari tangga (L_f) atau ketinggian tangga (h) dapat menjadi acuan dalam perhitungan luas nyala api pada gambar/foto hasil pengujian, dalam hal ini kalibrator yang paling jelas terlihat pada gambar sebagai titik acuan kalibrasi adalah jarak lubang slot injeksi dari tangga (L_f). Untuk lebih jelasnya, ditunjukkan pada gambar 4.12.



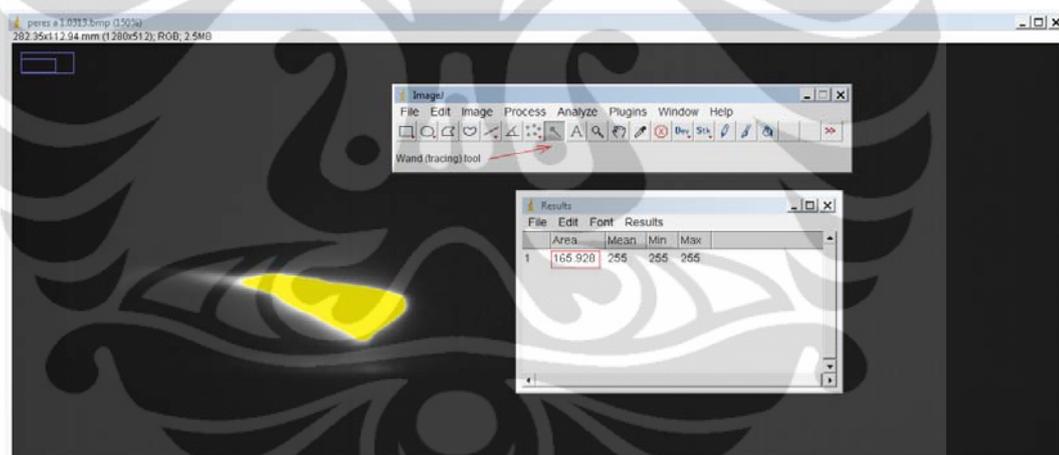
Gambar 4.12. Jarak lubang slot injeksi dari tangga (L_f) sebagai acuan pengukuran luas (mm)

Hal selanjutnya adalah menetapkan skala yang akan digunakan untuk semua gambar yang akan dihitung. Software ini akan membaca jarak lubang slot injeksi dari tangga (L_f) yang telah ditentukan dalam satuan pixel, kemudian data tersebut dikalibrasi dengan jarak yang sebenarnya dalam satuan mm. Sehingga didapatkan skala dengan satuan pixel/mm, yang dapat dilihat pada gambar 4.13.



Gambar 4.13 Menetapkan Skala Luas Nyala Api

Setelah mendapatkan parameter dan kalibrator yang diinginkan, hal selanjutnya adalah menentukan bentuk geometri nyala api yang akan diukur luasnya. Dengan bantuan *wand (tracing) tool*, didapatkan secara langsung luasan nyala api yang terukur dalam satuan mm^2 , terlihat pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Perhitungan Luas Nyala Api pada ImageJ 1.44

Daerah yang berwarna kuning merupakan luas nyala api yang diukur oleh software imageJ 1.44. Setelah mendapatkan luas nyala api dari keseluruhan sampel gambar tersebut, data akan diolah secara statistik untuk mendapatkan nilai rata-rata dari luas nyala api yang telah dihitung.

4.3.1 Perhitungan Luasan Nyala Api $i_f/h = 2$ dengan $(h) = 20 \text{ mm}$

Pada titik pengukuran pertama dimana Δh udara = 10 mm dan Δh bahan bakar 28 mm, 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 Δh udara = 10 mm dan Δh bahan bakar 28 mm adalah sebesar 223,69 mm². Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lampiran.

Kemudian pada titik pengukuran kedua dimana Δh udara = 16 mm dan Δh bahan bakar 50 mm, 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 Δh udara = 16 mm dan Δh bahan bakar 50 mm adalah sebesar 108,70 mm². Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lampiran.

Kemudian pada titik pengukuran kedua dimana Δh udara = 22 mm dan Δh bahan bakar 50 mm, 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 Δh udara = 22 mm dan Δh bahan bakar 50 mm adalah sebesar 122,95 mm². Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lampiran.

4.3.2 Perhitungan Luasan Nyala Api $v_f/h = 2,67$ dengan $(h) = 15$ mm

Pada titik pengukuran pertama dimana Δh udara = 10 mm dan Δh bahan bakar 20 mm, 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 Δh udara = 10 mm dan Δh bahan bakar 20 mm adalah sebesar 46,65 mm². Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lampiran.

Kemudian pada titik pengukuran kedua dimana Δh udara = 16 mm dan Δh bahan bakar 20 mm, 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 Δh udara = 16 mm dan Δh bahan bakar 20 mm adalah sebesar 25,00 mm². Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lampiran.

Kemudian pada titik pengukuran kedua dimana Δh udara = 22 mm dan Δh bahan bakar 30 mm, 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 Δh udara = 22 mm dan Δh bahan bakar 30

mm adalah sebesar 28,35 mm². Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lampiran.

4.3.3 Perhitungan Luasan Nyala Api $l_f/h = 4$ dengan $(h) = 20$ mm

Pada titik pengukuran pertama dimana Δh udara = 10 mm dan Δh bahan bakar 14 mm, 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 Δh udara = 10 mm dan Δh bahan bakar 14 mm adalah sebesar 26,71 mm². Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lampiran.

Kemudian pada titik pengukuran kedua dimana Δh udara = 16 mm dan Δh bahan bakar 16 mm, 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 Δh udara = 16 mm dan Δh bahan bakar 16 mm adalah sebesar 31,41 mm². Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lampiran.

Kemudian pada titik pengukuran kedua dimana Δh udara = 22 mm dan Δh bahan bakar 16 mm, 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 Δh udara = 22 mm dan Δh bahan bakar 16 mm adalah sebesar 33,24 mm². Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lampiran.

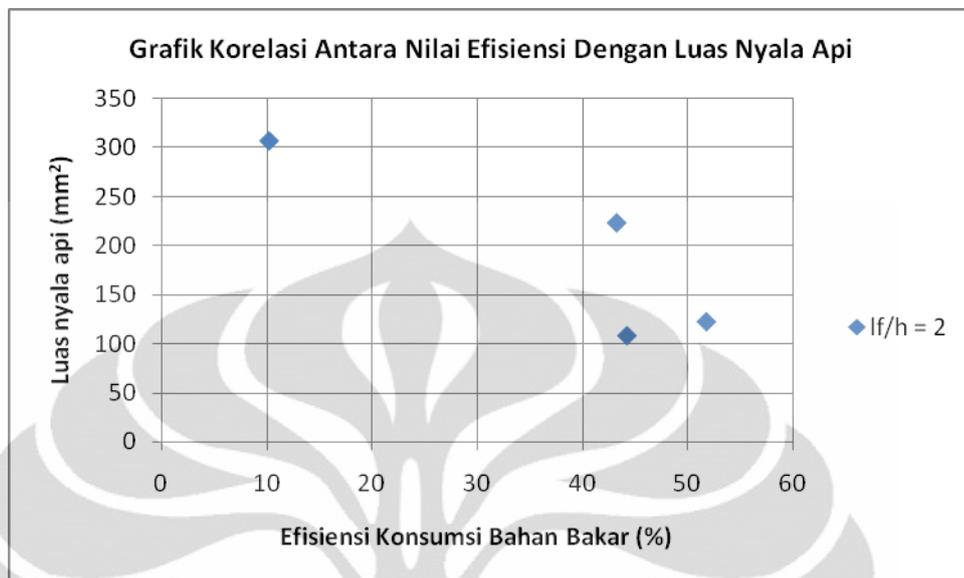
4.3.4 Perhitungan Luasan Nyala Api Nilai Efisiensi Terendah

Pada titik efisiensi terendah dimana Δh udara = 10 mm dan Δh bahan bakar 200 mm dengan perbandingan $l_f/h = 4$ dengan $(h) = 10$ mm, hasil yang didapat dari perhitungan rata-rata 30 sampel nyala api adalah 307,15 mm². Data hasil perhitungan dapat dilihat pada lampiran.

4.4 Korelasi Antara Nilai Efisiensi Bahan Bakar dengan Luas Nyala Api

Setelah mendapatkan luas nyala api sesuai dengan parameter yang telah ditetapkan, hal selanjutnya yang dianalisa adalah korelasi antara perubahan nilai

efisiensi konsumsi bahan bakar terhadap karakteristik perubahan luasan nyala api dilihat dari asupan bahan bakar dan suplai udara.



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

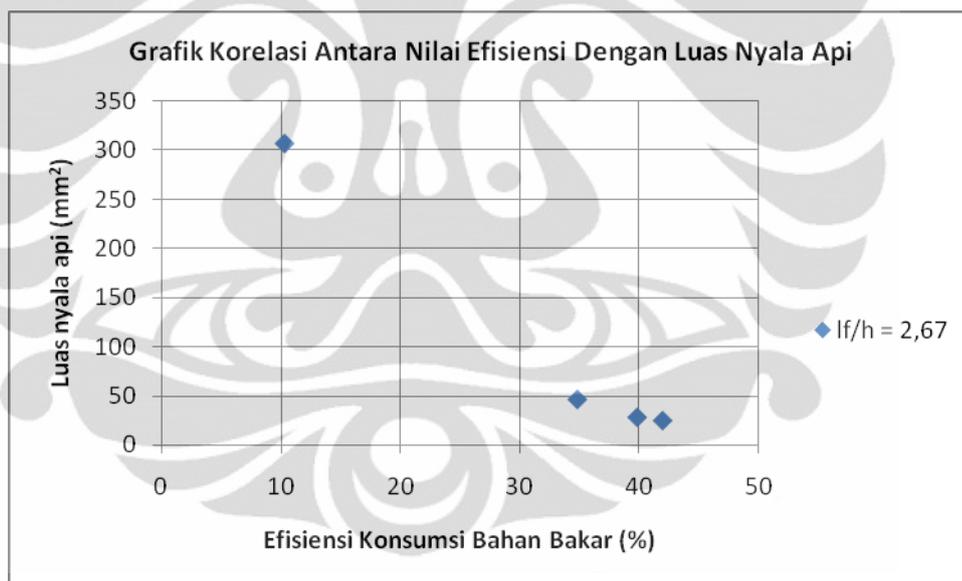
Gambar diatas merupakan grafik titik perbandingan $L_f/h = 2$ dimana (h) = 20 mm, pada grafik titik ini dapat kita lihat secara jelas mengenai dampak perubahan luasan terhadap nilai efisiensi. Dari grafik diatas, dapat diambil kesimpulan mengenai dampak perubahan luasan terhadap nilai efisiensi, yaitu semakin tinggi efisiensi konsumsi bahan bakar, maka luas nyala api yang terbentuk akan semakin kecil.

Jika dilihat dari sebelah kiri grafik, pada nilai efisiensi paling rendah yaitu 10,3 % dengan Δh bahan bakar 200 mm dan kecepatan *main stream* udara sebesar 6 m/s dihasilkan luasan nyala api sebesar 307,15 mm². Dengan asupan bahan bakar yang sangat besar dan suplai udara dari blower yang lebih rendah, didapatkan luasan nyala api yang sangat besar.

Kemudian terjadi penurunan luas nyala api seiring dengan meningkatnya efisiensi konsumsi bahan bakar. Hal ini dapat terlihat pada titik selanjutnya, dengan efisiensi 43,29 % dimana Δh bahan bakar sebesar 28 mm dan kecepatan *main stream* udara 6 m/s didapatkan luasan nyala api sebesar 223,69 mm². Walaupun kecepatan *main stream* udara tetap, luasan nyala api yang didapatkan semakin kecil, hal ini disebabkan oleh penurunan asupan bahan bakar yang sangat besar.

Selanjutnya hal yang sama terjadi pada efisiensi tertinggi, yaitu 51,81 % dimana Δh bahan bakar sebesar 50 mm dan kecepatan *main stream* udara 10,1 m/s didapatkan luasan nyala api sebesar 122,95 mm². Penurunan luasan nyala api diakibatkan oleh peningkatan kecepatan *main stream* udara menjadi 10,1 m/s, kecepatan *main stream* udara yang semakin tinggi menyebabkan luas nyala api menjadi semakin kecil.

Hal yang berbeda terjadi pada nilai efisiensi 44,27 % dimana Δh bahan bakar sebesar 50 mm dan kecepatan *main stream* udara 8,1 m/s didapatkan luasan nyala api sebesar 108,7 mm². Dengan penurunan kecepatan *main stream* udara menjadi 8,1 m/s dan asupan bahan bakar yang tetap, justru didapatkan luas nyala api yang semakin rendah. Penurunan luasan nyala api diakibatkan oleh titik balik dari puncak efisiensi nyala api yang menyebabkan luasan nyala api cenderung kebalikan dari yang sebelumnya terjadi.



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

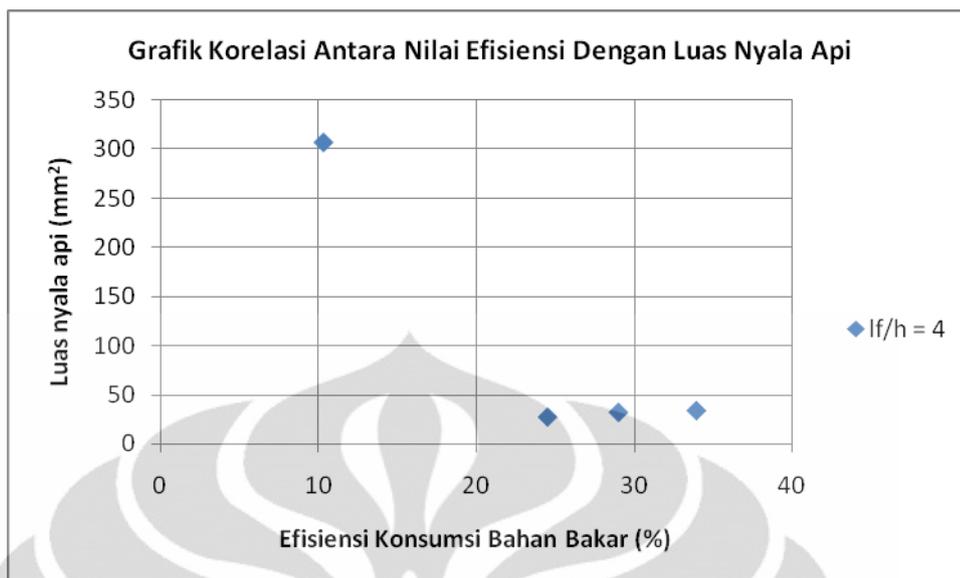
Gambar diatas merupakan grafik titik perbandingan $l_f/h = 2,67$ dimana (h) = 15 mm, pada grafik titik ini dapat kita lihat secara jelas mengenai dampak perubahan luasan terhadap nilai efisiensi. Dari grafik diatas, dapat diambil kesimpulan yang sama mengenai dampak perubahan luasan terhadap nilai efisiensi, yaitu semakin tinggi efisiensi konsumsi bahan bakar, maka luas nyala api yang terbentuk akan semakin kecil.

Jika dilihat dari sebelah kiri grafik, pada nilai efisiensi paling rendah yaitu 10,3 % dengan Δh bahan bakar 200 mm dan kecepatan *main stream* udara sebesar 6 m/s dihasilkan luasan nyala api sebesar 307,15 mm². Dengan asupan bahan bakar yang sangat besar dan suplai udara dari blower yang lebih rendah, didapatkan luasan nyala api yang sangat besar.

Kemudian terjadi penurunan luas nyala api seiring dengan meningkatnya efisiensi konsumsi bahan bakar. Hal ini dapat terlihat pada titik selanjutnya, dengan efisiensi 34,78 % dimana Δh bahan bakar sebesar 20 mm dan kecepatan *main stream* udara 6 m/s didapatkan luasan nyala api sebesar 46,5 mm². Walaupun kecepatan *main stream* udara tetap, luasan nyala api yang didapatkan semakin kecil, hal ini disebabkan oleh penurunan asupan bahan bakar yang sangat besar.

Pada titik berikutnya, dengan efisiensi 39,79 % terjadi penurunan luasan nyala api menjadi 28,35 mm². Penurunan luas nyala api ini seiring dengan meningkatnya efisiensi konsumsi bahan bakar, peningkatan Δh bahan bakar dari 20 mm menjadi 30 mm dan kecepatan *main stream* udara dari 6 m/s menjadi 10,1 m/s justru mengakibatkan luasan nyala api yang semakin kecil. Hal ini diakibatkan oleh tidak seimbangnya penambahan Δh bahan bakar dengan asupan udara dari blower sehingga luasan nyala api semakin kecil, dimana peningkatan kecepatan *main stream* udara lebih besar dibandingkan dengan peningkatan asupan bahan pada proses pembakaran.

Sama halnya pada titik terakhir atau titik paling kanan, pada efisiensi 41,92 % dimana Δh bahan bakar sebesar 20 mm dan kecepatan *main stream* udara 8,1 m/s didapatkan luasan nyala api sebesar 25 mm². Kemudian seiring dengan meningkatnya efisiensi bahan bakar, maka luasan nyala api pun semakin kecil. Hal ini diakibatkan oleh penurunan Δh bahan bakar dari 30 mm menjadi 20 mm dan kecepatan *main stream* udara dari 10,1 m/s menjadi 8,1 m/s. Tidak seimbangnya penurunan asupan bahan bakar dan udara inilah yang menyebabkan luasan nyala api menjadi semakin kecil.



Gambar 4.17 Grafik Korelasi Luasan Nyala Api Dengan Nilai Efisiensi pada $l_f/h = 4$

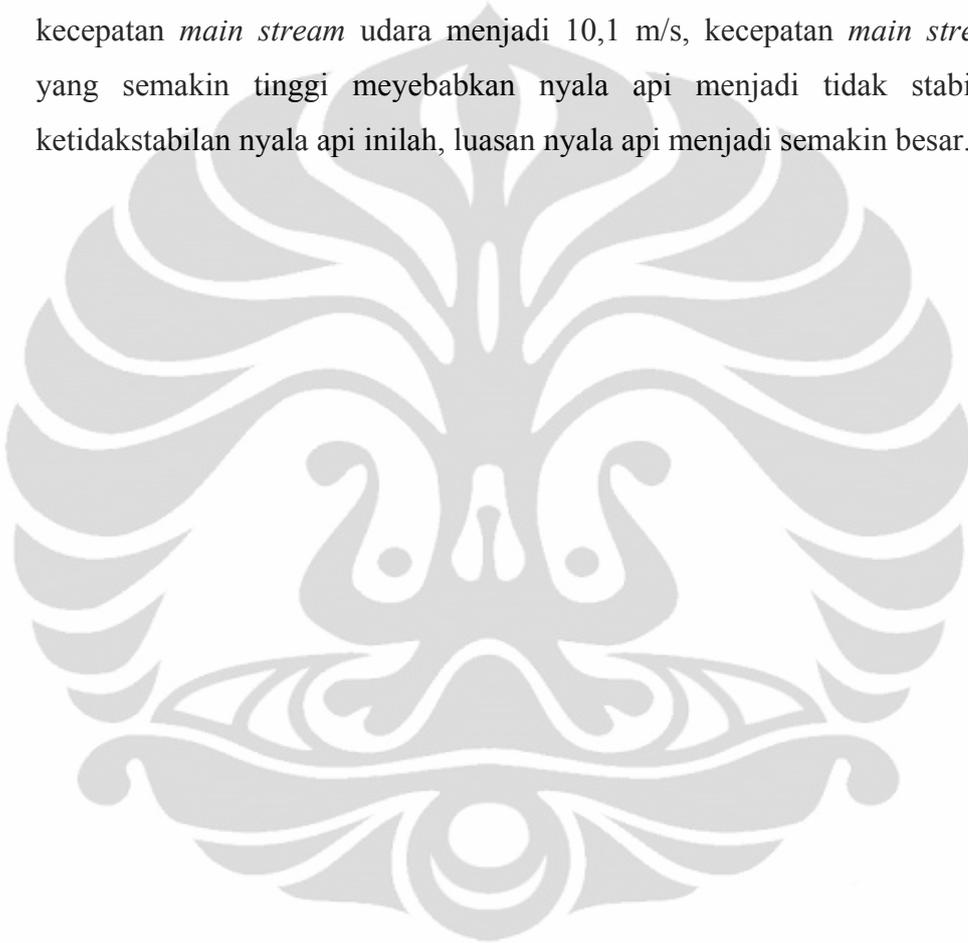
Gambar diatas merupakan grafik perbandingan $l_f/h = 4$ dimana (h) = 10 mm, pada grafik titik ini dapat kita lihat secara jelas mengenai dampak perubahan luasan terhadap nilai efisiensi. Dari grafik sebelumnya, dapat diambil kesimpulan mengenai dampak perubahan luasan terhadap nilai efisiensi, yaitu semakin tinggi efisiensi konsumsi bahan bakar, maka luas nyala api yang terbentuk akan semakin kecil. Tetapi tidak berlaku pada grafik ini, grafik ini menunjukkan bahwa semakin tinggi efisiensi konsumsi bahan bakar, maka luas nyala api yang terbentuk akan semakin besar.

Jika dilihat dari sebelah kiri grafik, pada nilai efisiensi paling rendah yaitu 10,3 % dengan Δh bahan bakar 200 mm dan kecepatan *main stream* udara sebesar 6 m/s dihasilkan luasan nyala api sebesar 307,15 mm². Dengan asupan bahan bakar yang sangat besar dan suplai udara dari blower yang lebih rendah, didapatkan luasan nyala api yang sangat besar.

Kemudian terjadi penurunan luasan nyala api, pada nilai efisiensi 24,5 % dimana Δh bahan bakar sebesar 14 mm dan kecepatan *main stream* udara 6 m/s didapatkan luasan nyala api sebesar 26,71 mm². Seiring dengan naiknya efisiensi bahan bakar, maka luasan nyala api pun semakin meningkat. Ini dapat terlihat pada titik berikutnya dengan efisiensi 28,99 % didapatkan luasan nyala api sebesar 31,41 mm². Pembesaran luasan nyala api diakibatkan oleh peningkatan Δh bahan bakar dari 14 mm menjadi 16 mm dan kecepatan *main stream* udara dari 6

m/s menjadi 8,1 m/s. Tidak seimbangya penambahan Δh bahan bakar dengan asupan udara dari blower menyebabkan luasan nyala api semakin besar.

Kemudian hal yang sama terjadi pada titik selanjutnya, dengan efisiensi 33,93 % dimana Δh bahan bakar sebesar 16 mm dan kecepatan *main stream* udara 10,1 m/s didapatkan luasan nyala api sebesar 33,24 mm². Luasan nyala api yang didapat lebih besar dari titik sebelumnya, hal ini diakibatkan oleh peningkatan kecepatan *main stream* udara menjadi 10,1 m/s, kecepatan *main stream* udara yang semakin tinggi meyebabkan nyala api menjadi tidak stabil. Akibat ketidakstabilan nyala api inilah, luasan nyala api menjadi semakin besar.



BAB V

KESIMPULAN

Analisa visualisasi nyala api daerah resirkulasi 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. Hasil visualisasi kecepatan tinggi nyala api dalam daerah resirkulasi (*recirculation zone*) pada ruang bakar *backward-facing step* menunjukkan bentuk nyala api yang cenderung membentuk pusaran mengikuti gerakan aliran resirkulasi. Pada efisiensi tertinggi terlihat fenomena nyala api yang bersirkulasi pada Arus *Eddy*.
2. Masih terdapat ketidakstabilan nyala api yang tertangkap oleh *High Speed Video Camera*. Hal ini ditunjukkan oleh adanya bagian nyala api yang terlepas ketika bersirkulasi dalam aliran resirkulasi dan nyala api yang terlepas ketika melewati daerah lapisan geser dimana memiliki kecenderungan bergerak searah dengan arah *free stream* udara. Ketidakstabilan nyala api ini disebabkan oleh bentuk geometri ruang bakar yang belum sempurna dan suplai udara dari blower yang tidak stabil.
3. Fenomena *Extinct Point* ditunjukkan dengan berkurangnya luasan secara bertahap hingga nyala api hanya terkonsentrasi di dekat slot injeksi dan kemudian benar-benar padam.
4. Semakin tinggi efisiensi konsumsi bahan bakar, maka luas nyala api yang terbentuk akan semakin kecil. Perubahan luas nyala api lebih dikarenakan perubahan bentuk geometri ruang bakar, asupan bahan bakar dan kecepatan udara dari blower.

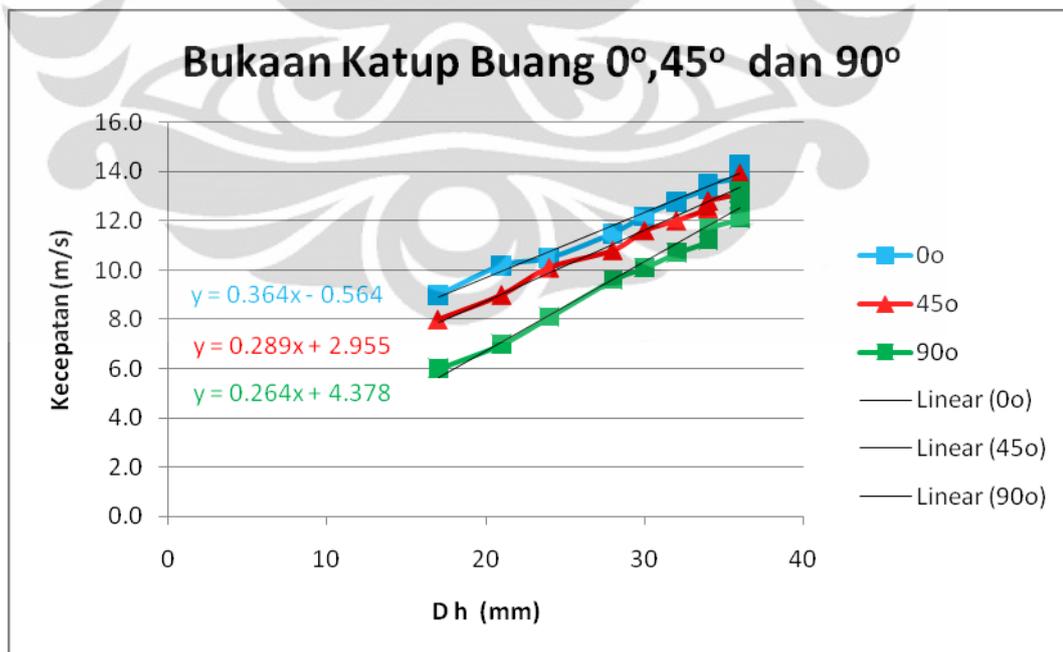
DAFTAR PUSTAKA

- [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*”, Tesis, 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.



L1
Data Kalibrasi Sistem Pengukuran Udara
Diameter Orifice 2,5 inch

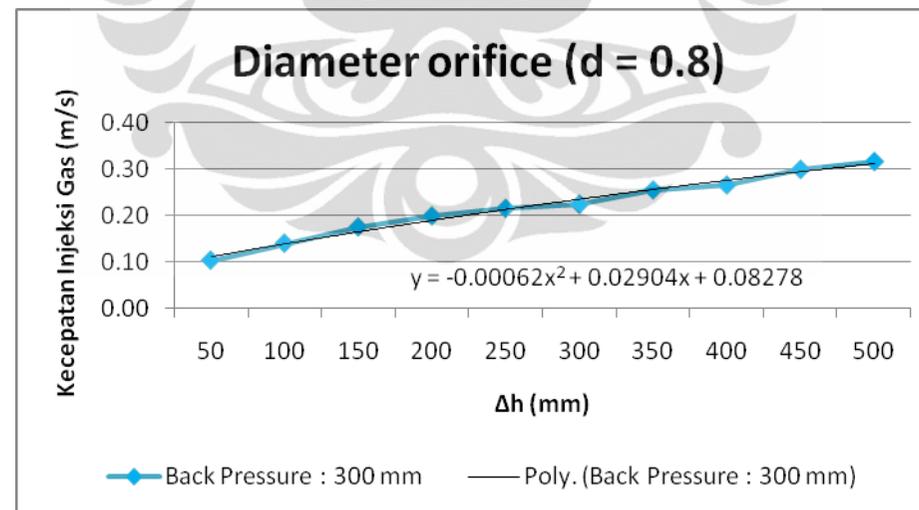
Posisi Bukaan Blower	Bukaan Katup Buang					
	0°		45°		90°	
	Δh (mm)	V_{nozzle} (m/s)	Δh (mm)	V_{nozzle} (m/s)	Δh (mm)	V_{nozzle} (m/s)
0	17	9.0	14	8.0	10	6.0
1	21	10.2	18	9.0	12	7.0
2	24	10.5	22	10.1	16	8.1
3	28	11.5	26	10.8	20	9.6
4	30	12.2	28	11.6	22	10.1
5	32	12.8	30	12.0	25	10.7
6	34	13.3	32	12.5	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



L2

Data Kalibrasi Manometer Bahan Bakar
Diameter Orifice 0.8 mm, Gas Propana, dan Back Pressure 300 mm

No	h fuel (mm)	Volume, V (m ³)	waktu, t(s)	debit, Q (m ³ /s)	Luas inlet, A (m ²)	Kecepatan inlet fuel, Vf (m/s)
1	50	0.001	92.86	0.000011	0.000105	0.10
2	100	0.001	68.44	0.000015	0.000105	0.14
3	150	0.001	54.63	0.000018	0.000105	0.17
4	200	0.001	48.06	0.000021	0.000105	0.20
5	250	0.001	44.38	0.000023	0.000105	0.21
6	300	0.001	42.64	0.000023	0.000105	0.22
7	350	0.001	37.47	0.000027	0.000105	0.25
8	400	0.001	35.96	0.000028	0.000105	0.26
9	450	0.001	31.90	0.000031	0.000105	0.30
10	500	0.001	30.19	0.000033	0.000105	0.32



SENYAWA	KADAR (%)
ETANA	0,02
PROPANA	95,00
BUTANA	2,60
I-BUTANA	2,38

L4

Data Hasil Perhitungan Efisiensi Bahan Bakar Gas Propana
Lf = 40 mm

Lf/h	h (m)	Δh_{ud}	Δh_f	$Q_f (m^3/s)$	$Eff_{bb} (\%)$
2	0.02	10	28	0.000011	43.29
2	0.02	16	50	0.000012	44.27
2	0.02	22	50	0.000012	51.81
2.67	0.015	10	20	0.000010	34.78
2.67	0.015	16	20	0.000010	41.92
2.67	0.015	22	30	0.000011	39.79
4	0.01	10	14	0.000009	24.50
4	0.01	16	16	0.000009	28.99
4	0.01	22	16	0.000009	33.93
4	0.01	10	200	0.000024	10.30

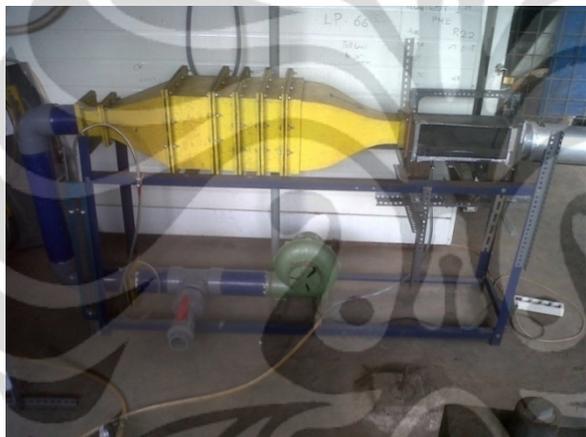
*Berdasarkan hasil perhitungan Tesis Maymuchar

L5

Data Hasil Perhitungan Luas Nyala Api
Lf/h=2, Lf/h=2.67, dan Lf/h=4

Sampling	If/h=2			If/h=2.67			If/h=4			
	Efisiensi			Efisiensi			Efisiensi			
	43,29 %	44,27 %	51,81 %	34,78 %	41,92 %	39,79 %	24,5 %	28,99 %	33,93 %	10,30 % *
	Area (mm ²)									
1	283.830	81.778	112.788	28.209	18.162	12.800	36.759	26.546	35.986	267.697
2	176.694	77.527	188.190	27.581	16.471	12.704	38.836	26.963	41.879	208.043
3	236.783	85.304	204.613	30.141	13.235	7.680	33.667	33.067	14.056	253.689
4	243.690	77.237	153.991	32.460	9.950	9.033	29.707	29.414	19.804	533.172
5	173.216	82.502	70.426	30.528	9.129	13.960	39.705	39.496	47.192	491.052
6	184.132	74.291	83.468	16.037	9.467	11.206	28.837	42.687	25.504	219.490
7	249.342	131.578	96.462	19.515	8.067	70.185	31.204	37.692	30.673	150.610
8	195.918	147.035	94.288	18.645	7.101	60.862	31.542	21.737	29.707	247.120
9	221.857	137.713	118.826	18.645	34.102	55.935	34.585	32.559	17.148	228.620
10	234.561	132.351	117.329	20.094	24.055	70.185	18.065	29.229	32.363	325.951
11	165.342	114.817	61.152	22.654	37.049	39.367	20.819	41.022	25.601	409.757
12	204.516	78.155	67.190	49.125	27.195	39.850	21.688	27.101	29.851	428.451
13	188.335	76.851	62.505	36.517	29.465	38.981	25.601	33.252	34.585	226.881
14	139.693	92.308	150.610	57.481	14.056	45.647	25.456	32.790	25.118	195.387
15	145.538	105.978	156.261	60.911	33.378	36.034	16.133	36.675	35.938	363.483
16	261.659	101.340	190.267	56.950	40.913	36.324	23.089	39.403	44.246	425.842
17	206.642	112.837	92.887	72.648	38.546	32.750	20.142	44.491	42.555	373.578
18	185.243	178.771	96.413	54.969	31.397	28.982	18.355	25.436	42.169	265.813
19	211.569	186.837	88.540	69.847	32.460	23.234	21.592	30.478	28.644	339.717
20	213.646	190.122	92.936	65.403	29.175	20.384	17.534	26.361	21.350	382.804
21	197.657	192.006	147.229	51.636	59.172	7.584	20.722	31.125	27.098	291.849
22	205.676	112.547	159.015	70.958	14.974	7.390	24.200	28.396	26.857	144.765
23	276.488	94.964	141.480	78.686	14.443	6.521	16.616	25.806	46.226	248.086
24	279.773	100.085	156.310	52.264	16.037	34.295	20.142	26.223	43.521	274.170
25	285.424	96.462	166.164	65.065	23.717	29.417	16.954	26.408	37.387	267.504
26	311.750	98.587	116.797	50.863	25.939	28.982	32.508	39.265	29.803	268.953
27	276.585	92.791	116.411	50.815	23.958	22.026	39.899	32.512	32.991	379.036
28	255.573	94.192	130.661	52.892	39.947	10.192	41.203	27.518	52.119	234.706
29	265.040	60.379	134.863	81.826	36.566	20.867	25.118	25.436	44.777	486.656
30	234.464	53.520	120.324	56.177	31.977	17.099	30.479	23.170	31.929	281.560
Jumlah	6710.636	3260.865	3688.396	1399.542	750.103	850.476	801.157	942.258	997.077	9214.442
Rata-rata	223.69	108.70	122.95	46.65	25.00	28.35	26.21	31.41	33.24	307.15

L6
Foto Alat





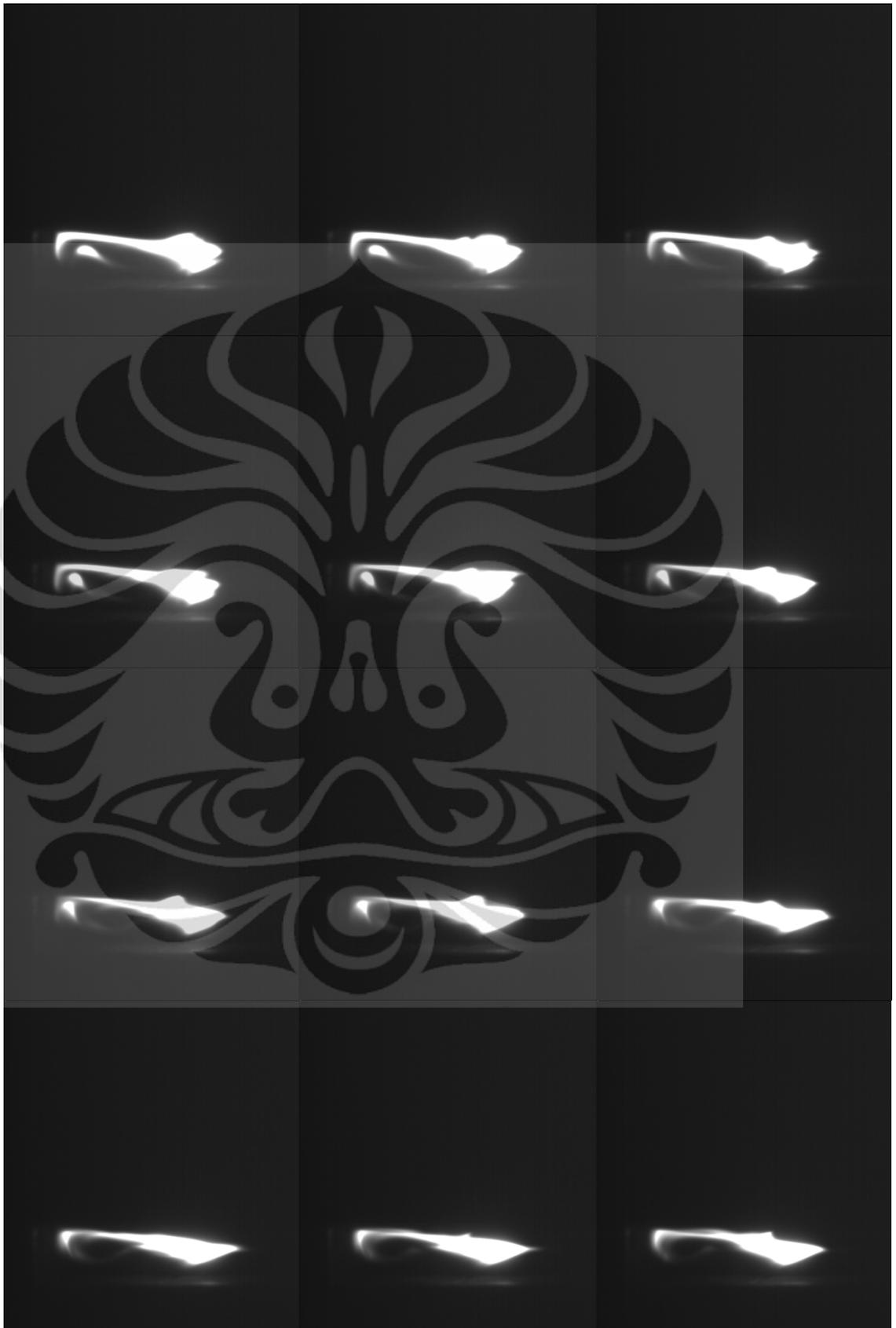
L7
Fenomena Nyala Api
yang ditampilkan pada Sub Bab 4.1



pada $l_f/h=2$, Δh udara 10, dan Δh bahan bakar 28

(a)





Frame 676-700

(b)

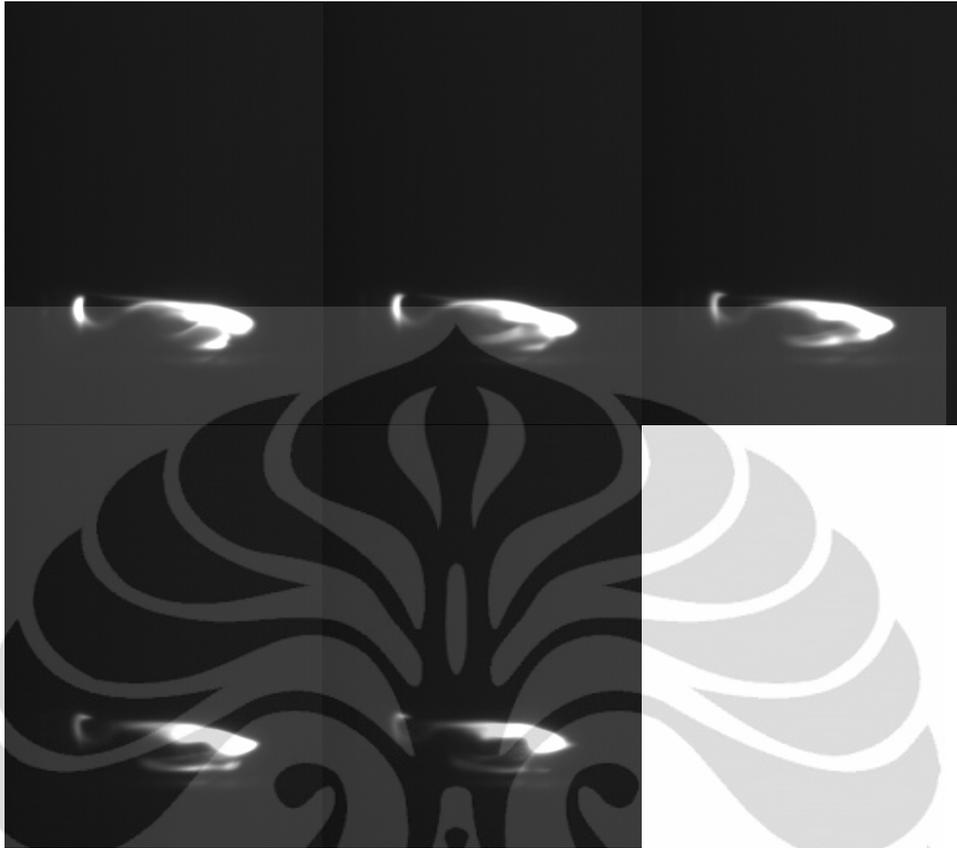


Frame 622-628

pada $l_f/h=2$, Δh udara 16, dan Δh bahan bakar 50

(a)

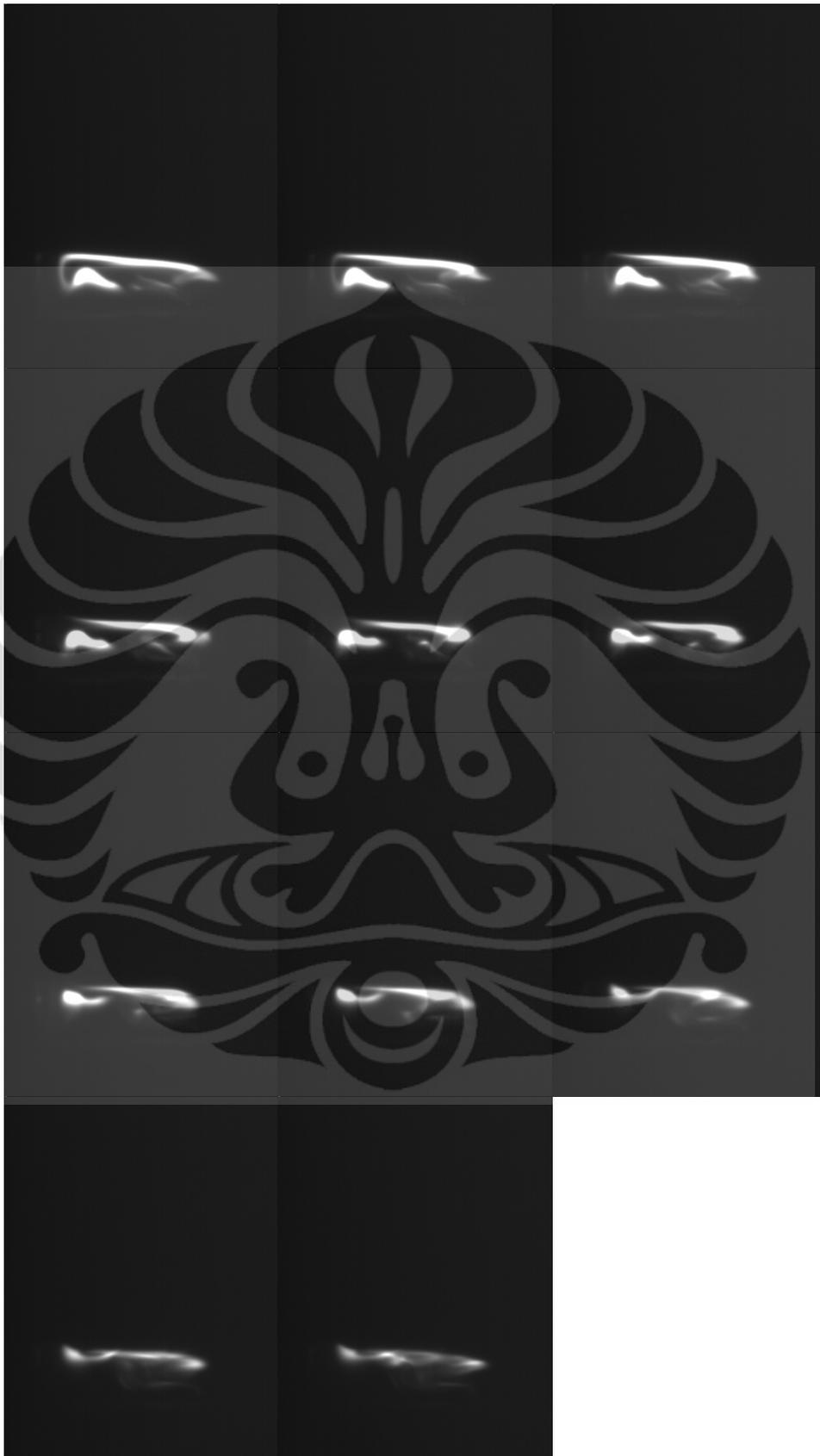




Frame 386-402

(b)





Frame 696-718

(c)



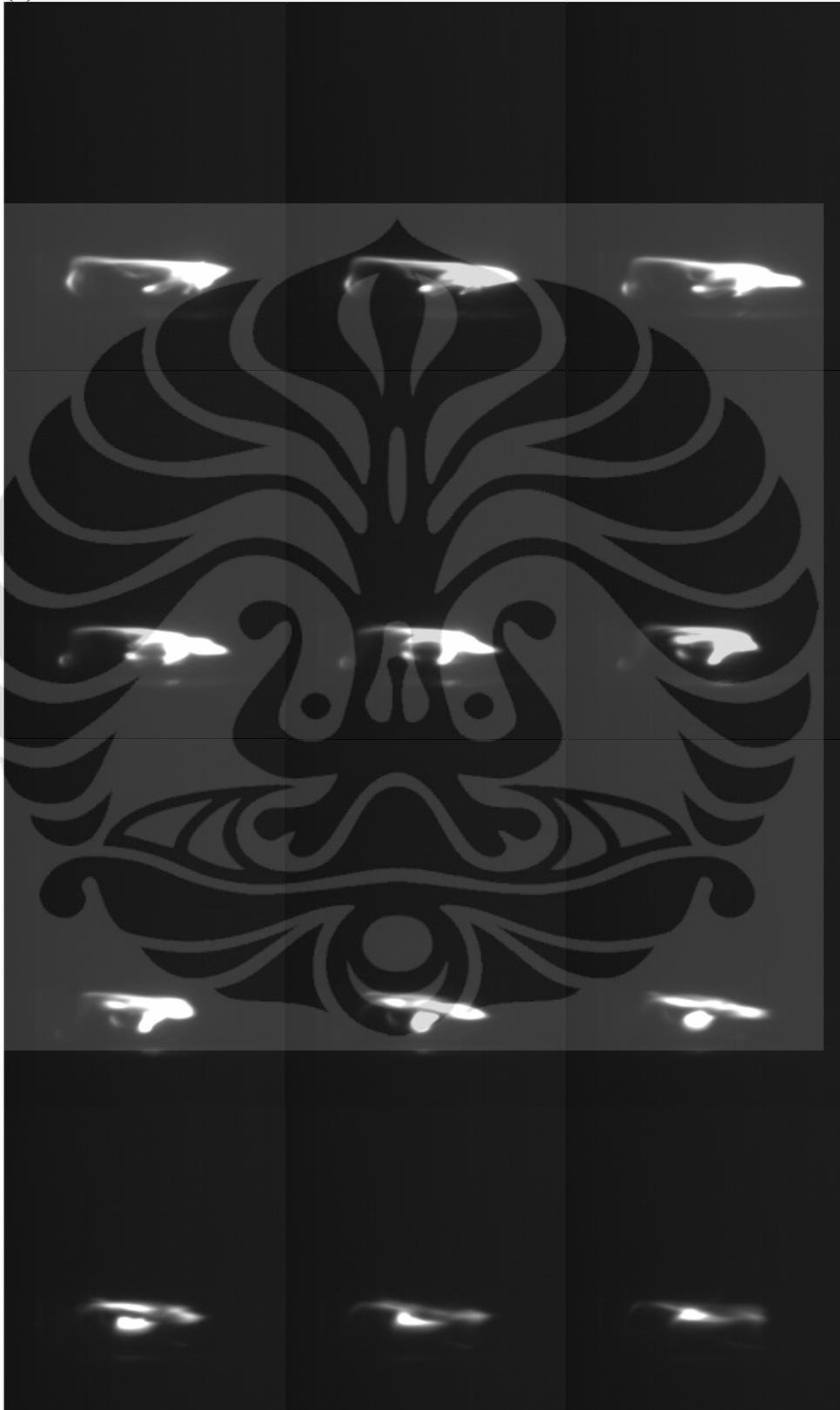




Frame 600-629

pada $l_f/h=2$, Δh udara 22, dan Δh bahan bakar 50

(a)



Frame 309-320

(b)



Frame 454-462

(c)



Frame 624-635

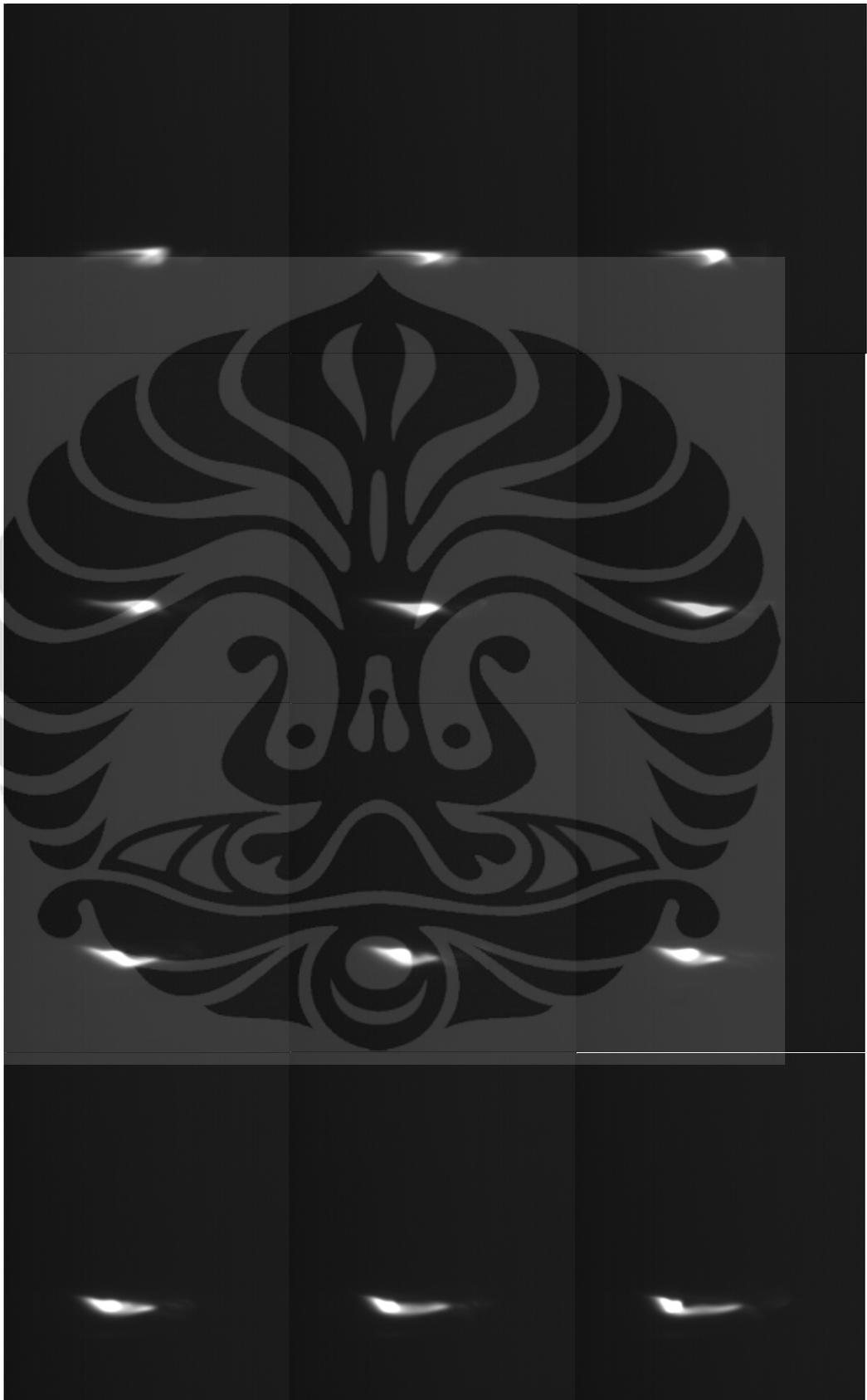
pada $l_f/h=2.67$, Δh udara 10, dan Δh bahan bakar 20

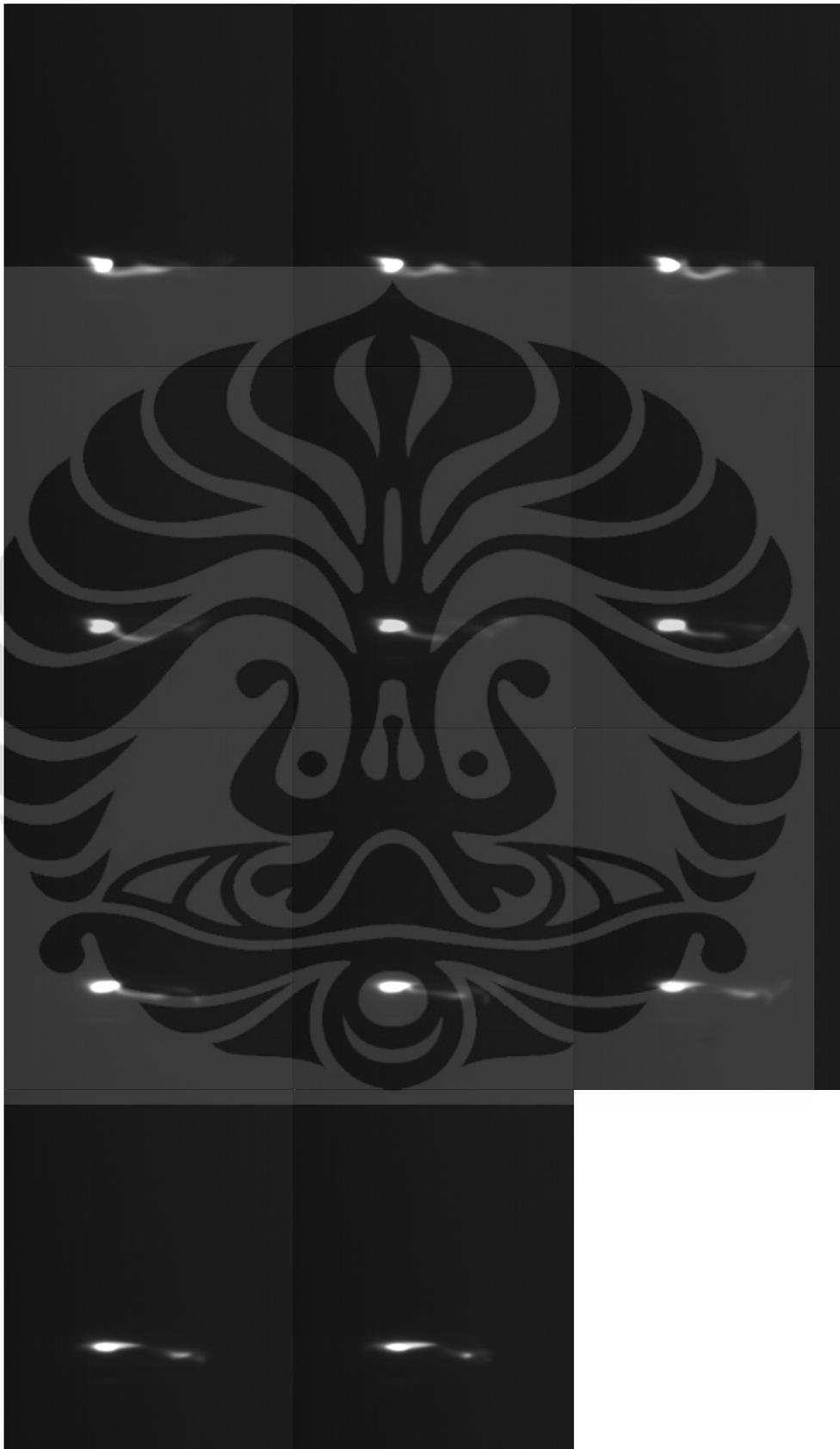
(a)



Frame 85-92

(b)

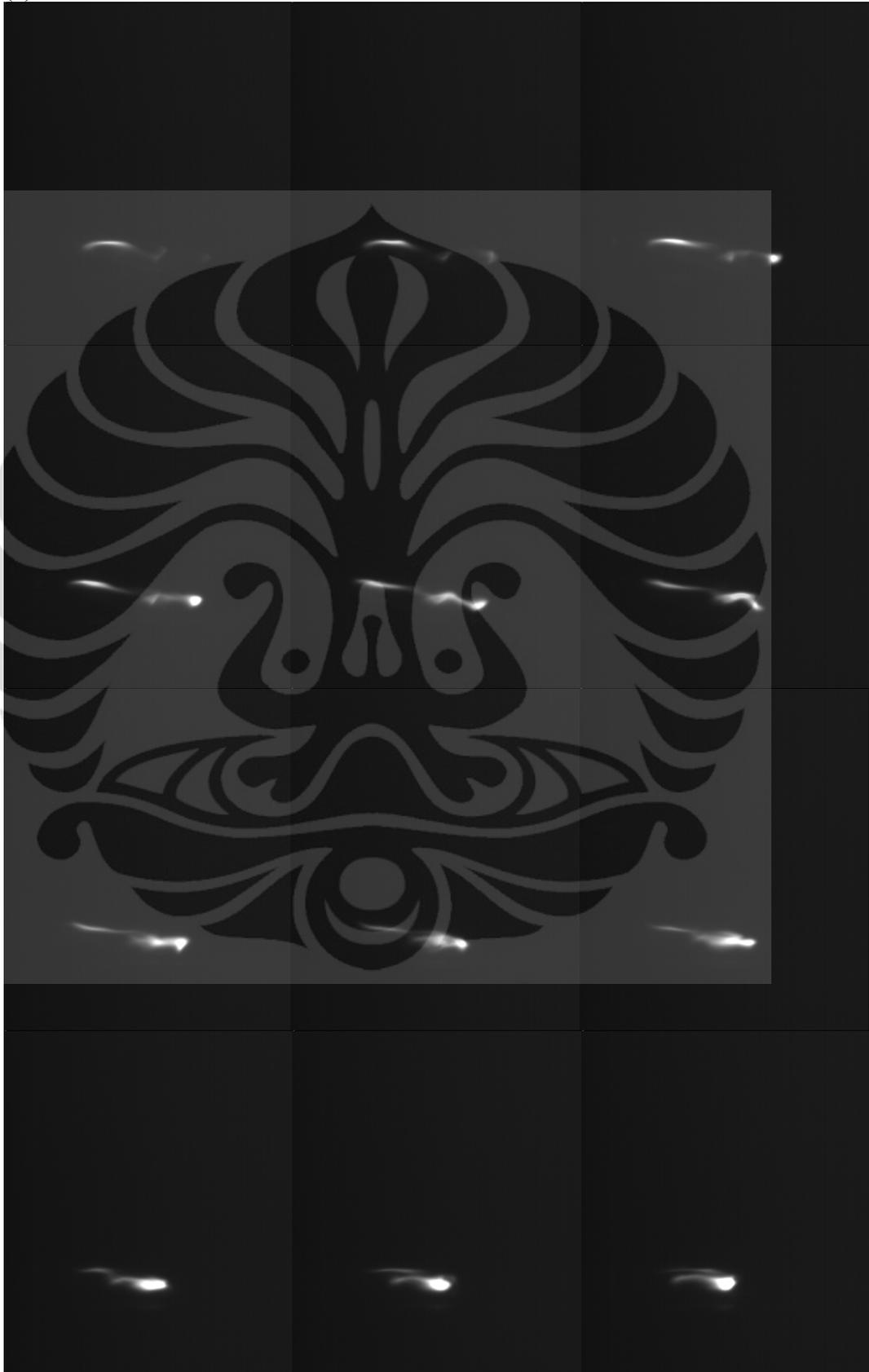


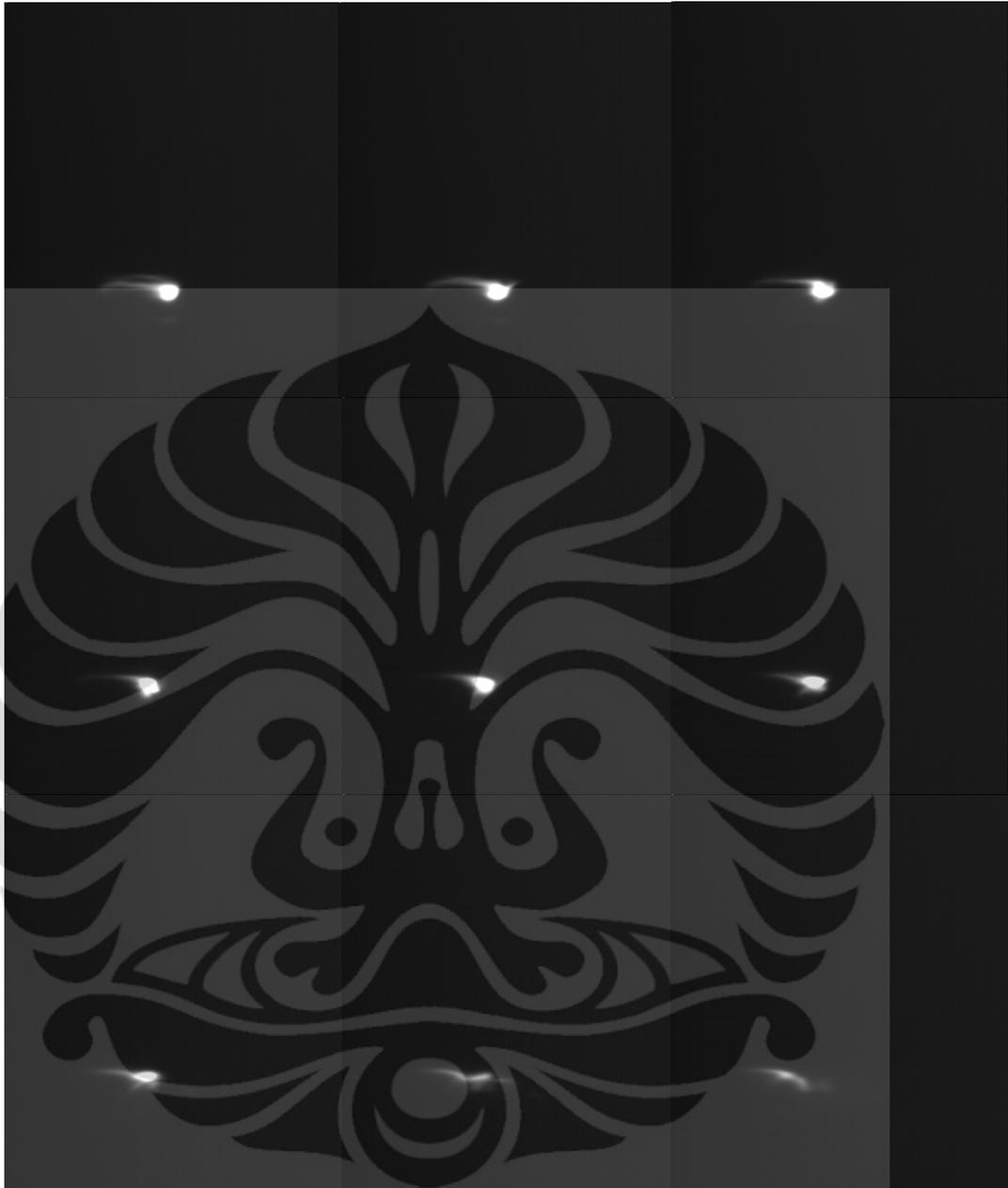


Frame 573-595

pada $l_f/h=2.67$, Δh udara 16, dan Δh bahan bakar 20

(a)





Frame 460-480

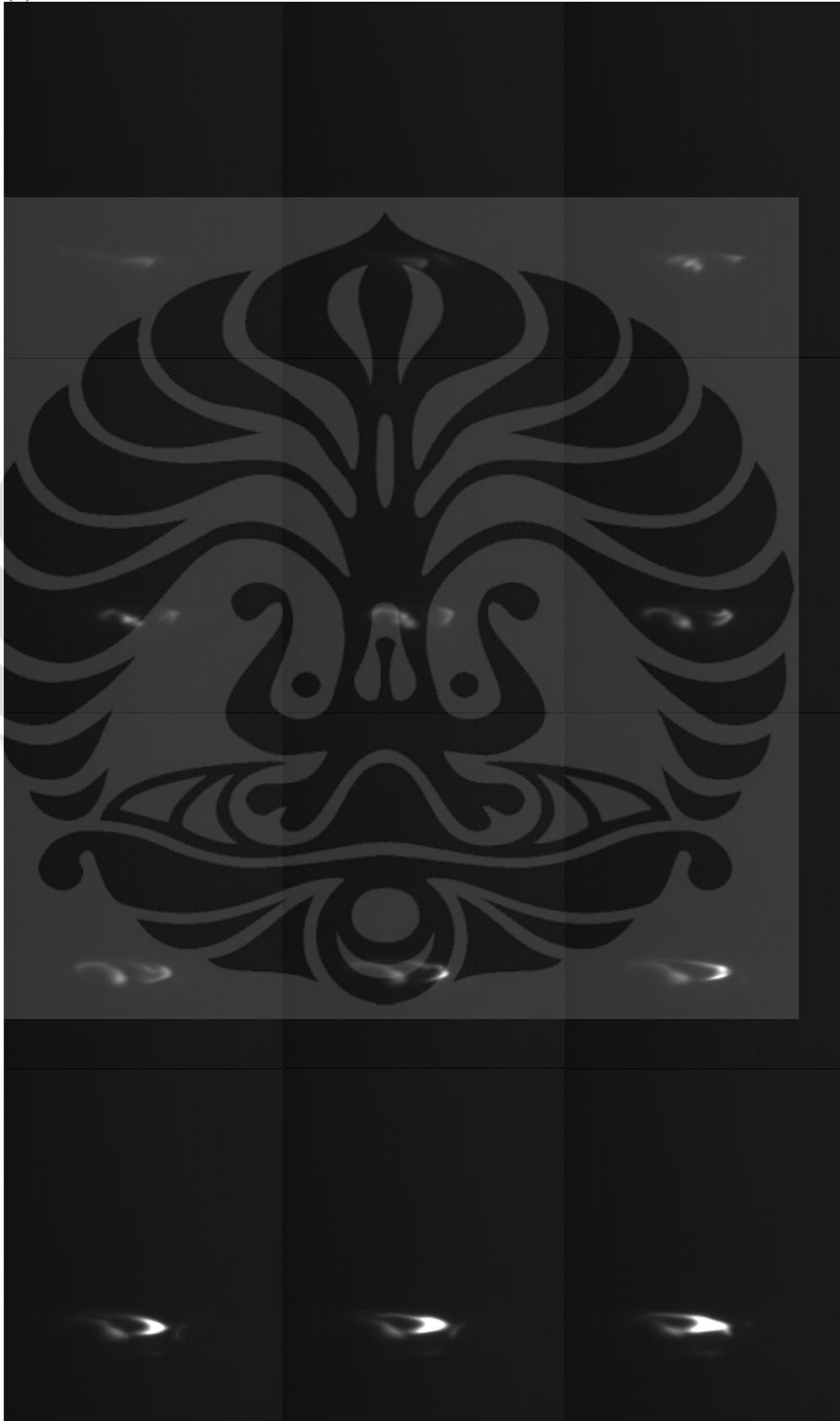
(b)

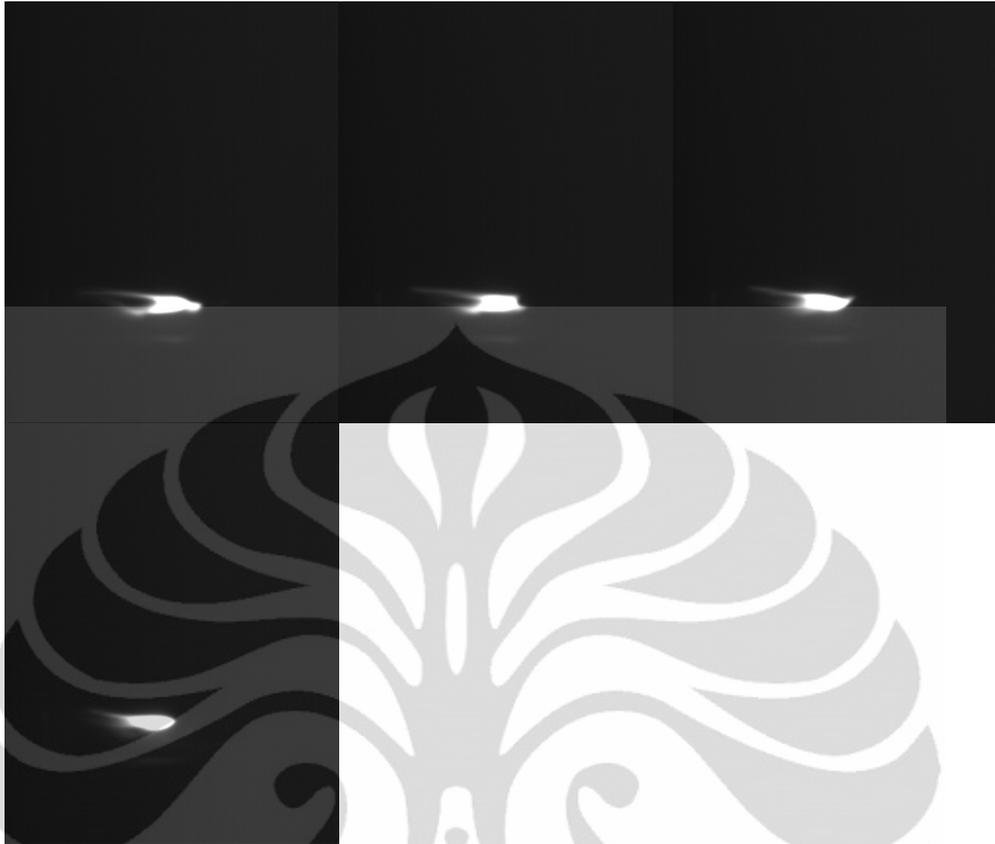


Frame 944-952

pada $lf/h=2.67$, Δh udara 22, dan Δh bahan bakar 30

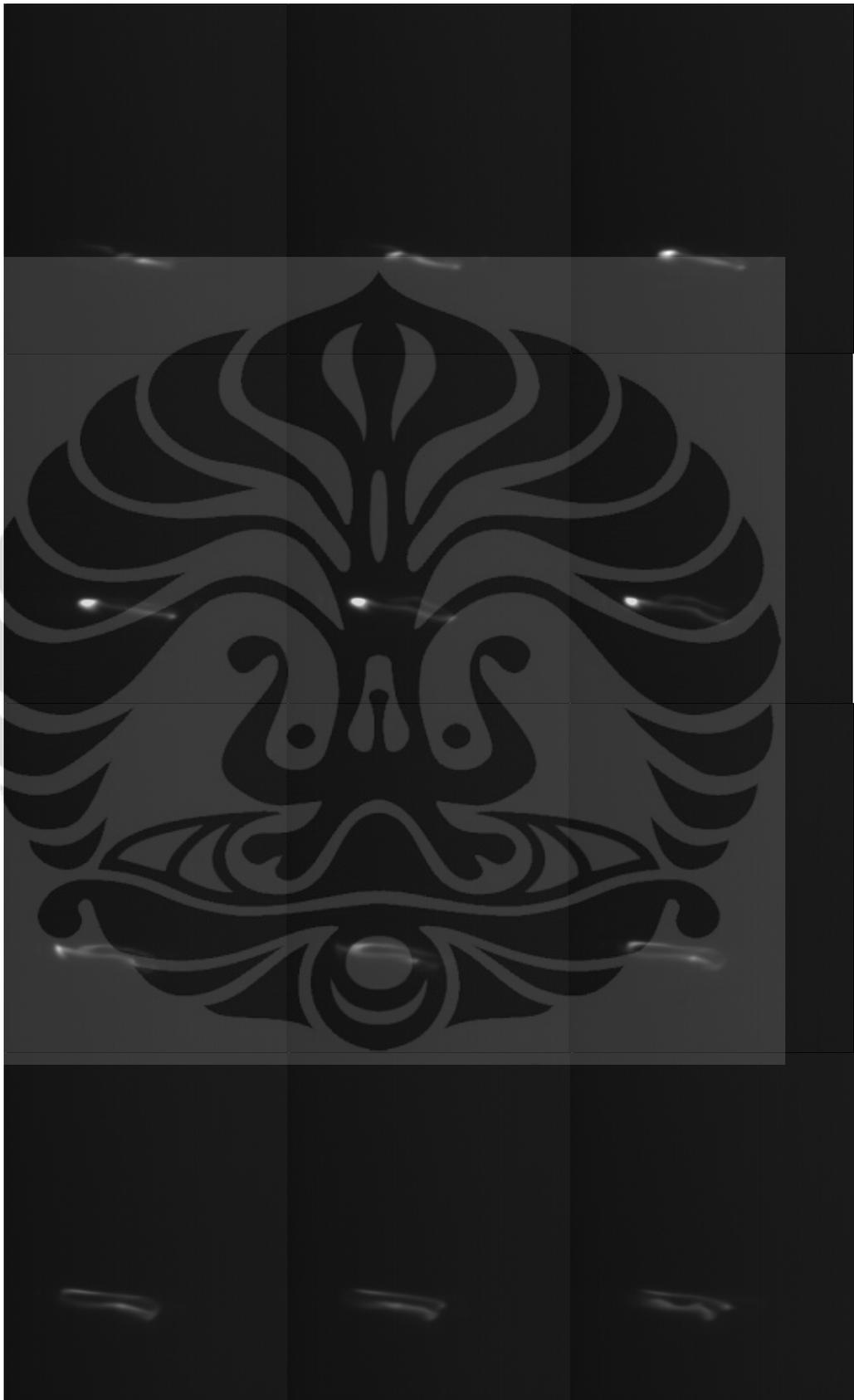
(a)





Frame 659-674

(b)



Frame 684-695

pada $l_f/h=4$, Δh udara 10, dan Δh bahan bakar 14



Frame 745-756

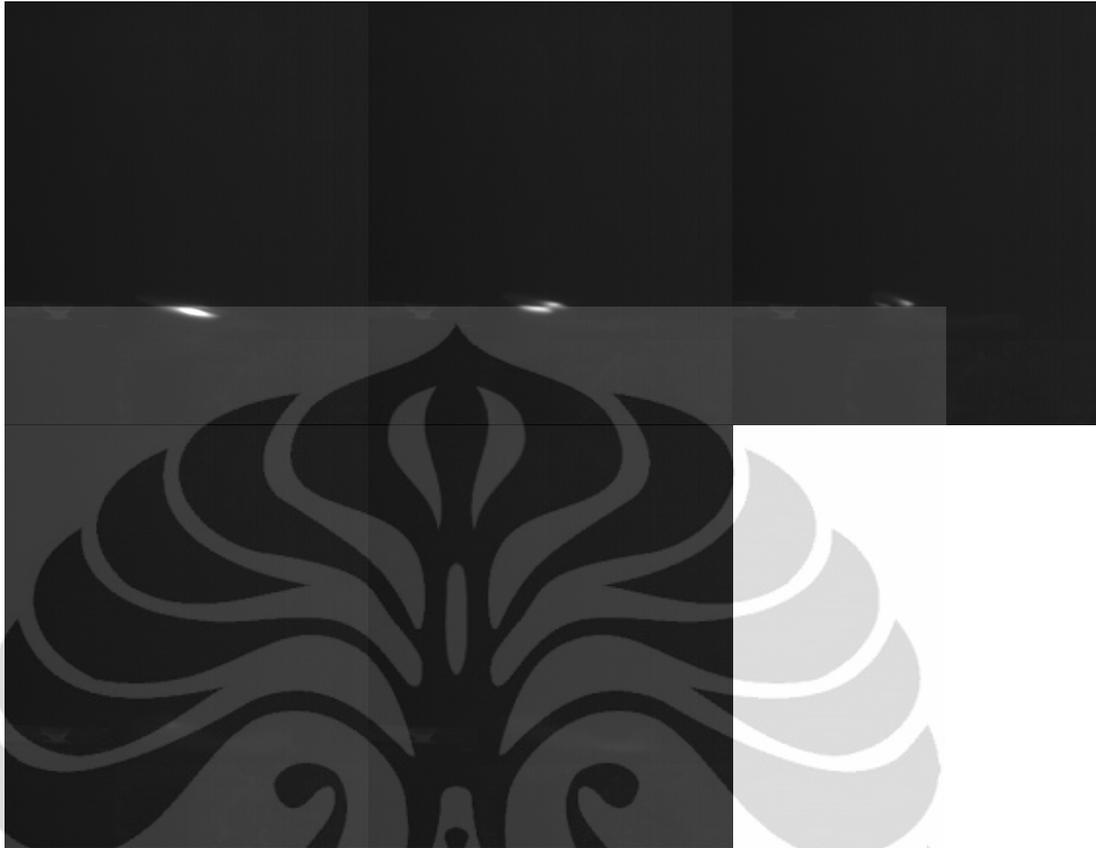
pada $l_f/h=4$, Δh udara 16, dan Δh bahan bakar 16



Frame 321-325

pada $l_f/h=4$, Δh udara 22, dan Δh bahan bakar 16

(a)



Frame 393-397

(b)

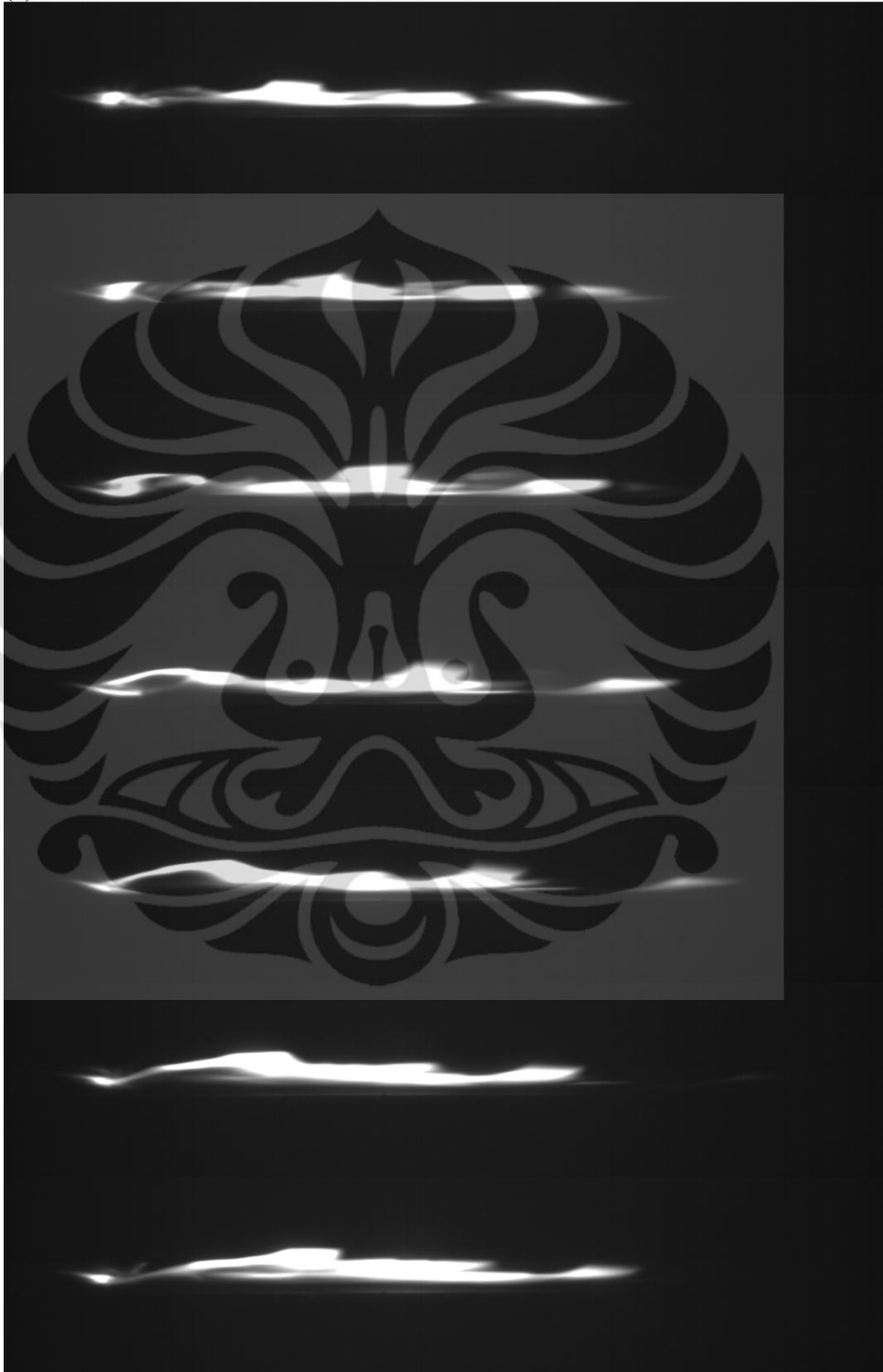


Frame 885-890



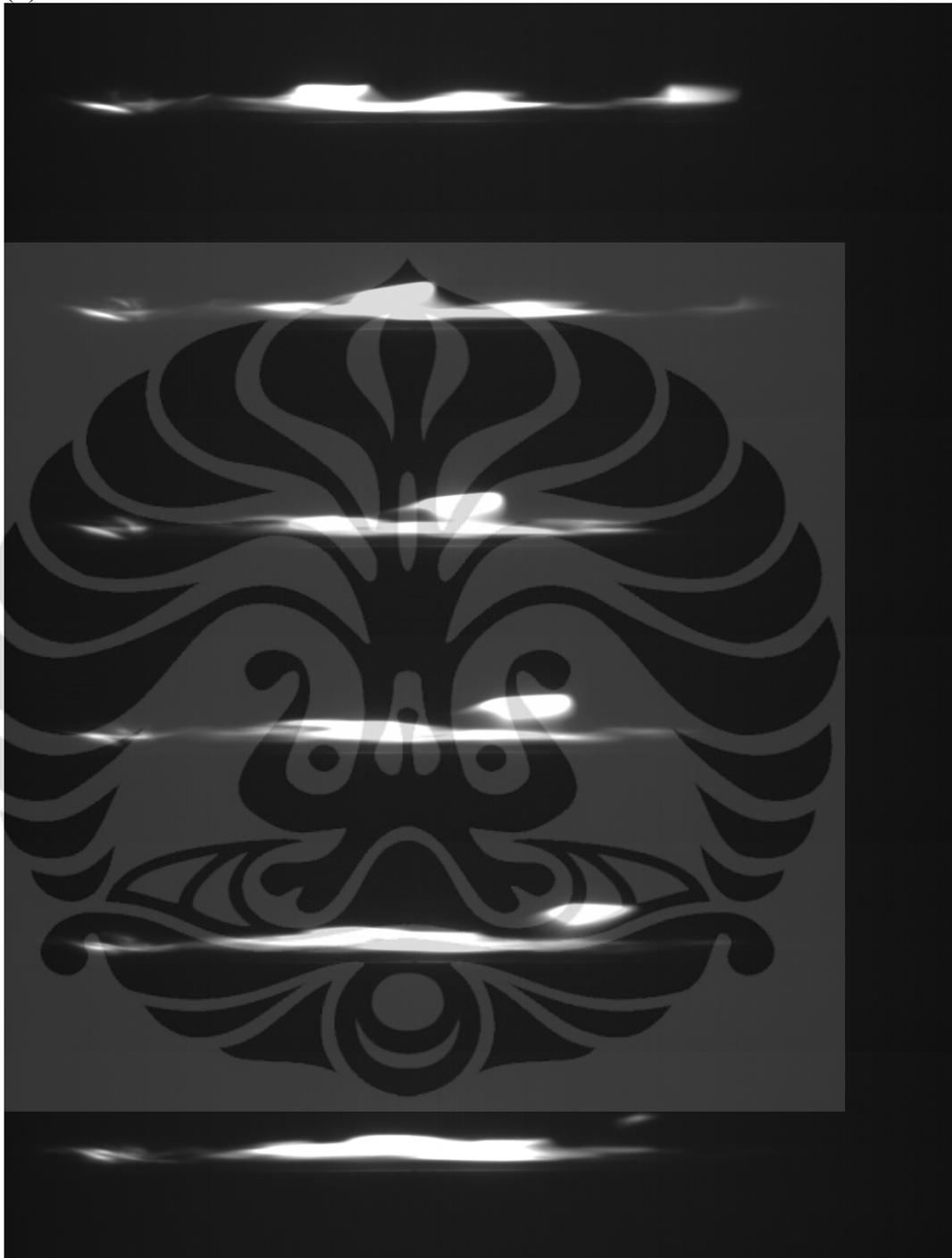
pada Efisiensi Terkecil ($l_f/h=4$, $\Delta h_u=10$, dan $\Delta h_f=200$)

(a)



Frame 742-748

(b)



Frame 925-930