



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**MODUS NYALA API DIFUSI PROPANA ( $C_3H_8$ ) DENGAN  
PENAMBAHAN GAS INERT ( $N_2$ ) SEBAGAI *CO-FLOW* PADA  
MEDAN ALIRAN BERLAWANAN**

**SKRIPSI**

**DANAL ARFAD  
06 06 07 30 13**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**MODUS NYALA API DIFUSI PROPANA (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) DENGAN  
PENAMBAHAN GAS INERT (N<sub>2</sub>) SEBAGAI *CO-FLOW* PADA  
MEDAN ALIRAN BERLAWANAN**

**SKRIPSI**

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

**DANAL ARFAD  
06 06 07 30 13**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Danal Arfad**

**NPM : 06 06 07 30 13**

**Tanda tangan :**

**Tanggal : 12 Juli 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Danal Arfad  
NPM : 06 06 07 30 13  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Modus Nyala Api Difusi Propana ( $C_3H_8$ ) Dengan  
Penambahan Gas Inert ( $N_2$ ) Sebagai *Co-Flow*  
Pada Medan Aliran Berlawanan

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.Ir. Harinaldi, M.Eng. ( )  
Penguji : Ardiyansyah, S.T., M.Eng. ( )  
Penguji : Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, M.T. ( )  
Penguji : Dr. Ir. Warjito, M.Eng. ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 12 Juli 2010

## UCAPAN TERIMA KASIH

*Assalamu'alaikum Wr. Wb.*

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang Maha Tinggi lagi Maha Besar. Tiada ilmu yang baik bagi kami melainkan semua datang dari-Mu, dan atas berkat, rahmat dan bimbingan-Mu, skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari banyak sekali bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sehingga penulis dapat menyusun skripsi ini, karena itu penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada berbagai pihak, antara lain:

1. Bapak Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng. selaku pembimbing skripsi dan ketua Departemen Teknik Mesin yang telah banyak meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Nasruddin selaku Pembimbing Akademis penulis dan dosen-dosen Departemen Teknik Mesin yang telah mengajarkan kami berbagai pengetahuan di bidang ini.
3. Seluruh karyawan DTM FTUI, antara lain: Mas Syarif, Mas Yasin, Mas Udiyono, Mba Yani, Mba Indah, dan lainnya yang telah banyak membantu penulis.
4. R. Achmad Fakhri selaku rekan satu bimbingan skripsi yang telah menemani pengambilan data dan memberikan bantuan serta dukungannya selama penulis mengerjakan skripsi ini.
5. Haris Munandar dan Fahrul Munajat, sebagai pendahulu kami dalam penelitian ini, yang telah melatih kami menggunakan alat-alat eksperimen secara aman dan terampil.
6. Kedua orang tua tercinta (Abid Rachman Hakim dan Yenny Rinaningsih) beserta keluarga besar yang telah memberikan kasih sayang, doa, dan dukungan yang tidak terhingga, baik moril maupun materiil kepada penulis.

7. Priya Nugraha, Dipo Andika, Danang Eka, R. Achmad Farid, dan Damora R yang menjadi rekan satu pembimbing skripsi yang telah banyak membantu dan memberikan semangat.
8. Lintang Martulesy yang selalu memberikan dukungan dan semangatnya agar penulis tetap semangat menyelesaikan skripsi ini.
9. Teman-teman Teknik Mesin 2006, Anggariawan Adi, Reza Kurnia, Edwin Waskito, Gunawan M. Alif, Ahmad Budiman, Deddy R. Sahar, Nursanty Elizabeth, yang telah mencairkan suasana disaat sibuk.
10. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan di sini, terima kasih atas bantuan dan dukungannya.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu khususnya di bidang teknik pembakaran.

*Wassalamu'alaikum Wr. Wb.*

Depok, Juli 2010

Danal Arfad  
06 06 07 30 13

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

---

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

Nama : Danal Arfad  
NPM : 06 06 07 30 13  
Program studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

**Modus Nyala Api Difusi Propana ( $C_3H_8$ ) Dengan Penambahan Gas Inert ( $N_2$ )  
Sebagai *Co-Flow* Pada Medan Aliran Berlawanan**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan 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  
Pada tanggal : 12 Juli 2010  
Yang menyatakan

(Danal Arfad)

## ABSTRAK

Nama : Danal Arfad  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Modus nyala api difusi propana ( $C_3H_8$ ) dengan penambahan gas inert ( $N_2$ ) sebagai co-flow pada medan aliran berlawanan

Penambahan *co-flow* nitrogen ( $N_2$ ) sebagai gas inert terhadap nyala difusi pada propana dalam medan aliran berlawanan telah diteliti secara eksperimental. Propana sebagai bahan bakar dialirkan melalui nosel bawah yang dihadapkan dengan nosel udara sebagai oksidator di bagian atas. Kedua nosel memiliki bentuk geometri yang sama, dilengkapi dengan *honeycomb* agar aliran udara seragam saat keluar nosel. *Co-flow* untuk aliran gas nitrogen ( $N_2$ ) diletakkan disisi luar dari nosel udara dan nosel bahan bakar yang diletakkan koaksial. Agar pencampuran reaktan terjadi secara optimal, maka ditambahkan *vortex generator* yang diletakkan pada jarak  $2d$  dari ujung nosel untuk meningkatkan turbulensi. Penelitian yang dilakukan adalah mengamati *flame modes*, yang bertujuan untuk mengetahui modus nyala api yang terjadi pada setiap parameter yang ditentukan. Dengan menggunakan referensi, dari penelitian yang dilakukan sebelumnya, tentang limit stabilitas nyala api (*extinction*) didapatkanlah fluks momentum untuk mengetahui letak stabilitas api, yang kemudian digunakan sebagai acuan untuk menentukan fluks momentum udara stabil yaitu 50 % dibawah kondisi *extinct*.

Dua parameter yang diatur dalam penelitian ini antara lain, yang pertama adalah parameter geometri (diameter dalam nosel dan rasio gap-diameter dalam nosel), yang kedua adalah dinamika fluida (fluks momentum bahan bakar, fluks momentum udara, dan fluks momentum nitrogen). Data yang didapat adalah data video bentuk nyala api pada setiap fluks momentum bahan bakar, dan kemudian dikonversikan menjadi gambar-gambar bentuk nyala api.

Dari penelitian didapatkan fluks momentum udara, bahan bakar dan nitrogen, yang ternyata sangat mempengaruhi stabilitas bentuk nyala api. Aliran nitrogen tidak hanya mengganggu terbentuknya bentuk nyala api dengan pipa api kontinu tetapi juga dapat membantu terbentuknya nyala api non tulip, nyala api dengan adanya pipa api, dan nyala api stagnasi, pada perbandingan propana, udara, dan nitrogen yang proporsional. Bentuk geometri nosel juga sangat mempengaruhi modus nyala api yang terbentuk.

Kata kunci:  
nyala difusi, *co-flow*, stabilitas nyala, pipa api, api stagnasi



## ABSTRACT

Name : Danal Arfad  
Study Program: Mechanical Engineering  
Title : Flame modes of counter flow diffusion flame of propane ( $C_3H_8$ )  
with the addition of inert gas ( $N_2$ ) as a co-flow.

Addition of nitrogen co-flow ( $N_2$ ) as an inert gas to the diffusion flame of propane in a counter flow field has been investigated experimentally. Propane as the fuel flowed through the bottom side nozzle which is faced with air nozzle as the oxidant at the upside nozzle. Both nozzles have the same geometry, equipped with a honeycomb so that air flows out uniform from the nozzle. The nitrogen co-flow is placed on outer side of air and fuel nozzle, which is placed coaxial. In order for an optimal mixing of reactants occurs, then the addition of vortex generators are placed at a distance  $2d$  from the tip of the nozzle to boost turbulence. The research is observing flame modes, aiming for the flame formed which each parameter is determined. By using references, from previous research, about the limit of flame stability (extinction), it is concluded that the flux of momentum to find out where the stability of the flame, which was then used as reference to determine the momentum flux for stable air, that is 50% under extinct conditions.

Two parameters set out in this study, there are, the first is geometric parameters (diameter of the nozzle and the gap-diameter ratio of nozzle), and the second is the fluid dynamics (momentum flux of fuel, momentum flux of air, and momentum flux of nitrogen). The data obtained are the videos form of flame data on any fuel momentum flux, and then converted into images of flame modes.

This research has shown that the momentum flux of air, fuel and nitrogen affect the stability of flame modes. The flow of nitrogen not only disrupt the formation of a flame mode with pipe flame continue, but can also help the formed of non tulip flame mode, flames pipe modes, and stagnation flame mode, in comparison propane, air and nitrogen are proportional. Nozzle geometry also affect the flame modes are formed.

Keywords:  
diffusion flame, co-flow, flame stability, flame pipe, stagnation flame

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR SIMBOL.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Pembatasan Masalah.....	4
1.5 Metode Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Prinsip-Prinsip Pembakaran.....	6
2.2 Nyala Api.....	7
2.2.1 Nyala Api Difusi.....	8
2.3 Stabilitas Nyala Api ( <i>Flame Stability</i> ).....	17
2.3.1 Fenomena <i>Flashback</i> .....	18
2.3.2 Fenomena <i>Lift-Off</i> .....	19
2.3.3 Fenomena <i>Blow-Off</i> .....	20
2.4 Propana ( $C_3H_8$ ).....	21
2.5 Oksigen ( $O_2$ ).....	24

2.6 Nitrogen (N <sub>2</sub> ).....	25
2.7 Aplikasi <i>Counterflow Diffusion Flame</i> .....	28
2.7.1 Gas Turbine.....	29
2.7.2 Industri Otomotif.....	29
2.7.3 Boiler Burner.....	30
<b>BAB 3 PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN .....</b>	<b>31</b>
3.1 Peralatan Penelitian.....	31
3.1.1 Peralatan Penelitian.....	31
3.1.2 Peralatan Penelitian Modus Nyala .....	38
3.2 Prosedur Penelitian.....	39
3.2.1 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Udara .....	40
3.2.2 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Bahan Bakar .....	42
3.2.3 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Nitrogen .....	43
3.2.4 Prosedur Purgings.....	44
3.3 Prosedur Pengambilan Data .....	46
3.3.1 Persiapan Awal.....	46
3.3.2 Prosedur Penelitian Modus Nyala .....	49
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>51</b>
4.1 Modus nyala api nosel diameter 5,5 mm .....	52
4.2 Modus nyala api nosel diameter 8,5 mm .....	58
4.3 Modus nyala api nosel diameter 18,5 mm .....	63
<b>BAB 5 KESIMPULAN.....</b>	<b>67</b>
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>68</b>
<b>LAMPIRAN PENGOLAHAN DATA .....</b>	<b>70</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Skema nyala difusi pada aliran berlawanan .....	2
Gambar 1.2 Skema nyala difusi pada aliran berlawanan dengan <i>co-flow</i> .....	3
Gambar 2.1 Profil nyala api [2].....	8
Gambar 2.2 <i>Over-ventilated</i> dan <i>under-ventilated</i> pada nyala api difusi [3].....	10
Gambar 2.3 Perubahan bentuk api terhadap kecepatan aliran bahan bakar [3] ....	11
Gambar 2.4 Diagram komposisi nyala api difusi berbahan bakar hidrogen [3] ...	12
Gambar 2.5 Diagram profil konsentrasi pada nyala api difusi tipe laminar [3]....	13
Gambar 2.6 Nyala difusi turbulen.....	14
Gambar 2.1 Skema nyala difusi pada aliran berlawanan [3] .....	15
Gambar 2.8. Bunsen burner dengan garis aliran laminar[14] .....	18
Gambar 2.9 Diagram stabilitas <i>flashback</i> , <i>lift-off</i> , dan <i>yellow tipping</i> untuk bahan bakar gas industri [15].....	19
Gambar 2.10 Struktur molekul propana.....	21
Gambar 2.11 Modus Nyala Api Stagnasi Pada Medan Aliran Berlawanan .....	28
Gambar 2.12 (a) Turbin Gas Mesin Jet, (b) Turbin Gas Pembangkit Listrik .....	29
Gambar 2.13 (a) Fire-tube Boiler, (b) Water-tube Boiler .....	30
Gambar 3.1 Skematik nosel yang digunakan.....	32
Gambar 3.2 Peralatan eksperimen nyala api difusi pada aliran berlawanan.....	33
Gambar 3.3 Konfigurasi alat pembakar .....	34
Gambar 3.4 Nosel.....	35
Gambar 3.5 <i>Vortex generator</i> untuk (a) $d = \text{Ø}18.5 \text{ mm}$ , (b) $d = \text{Ø}8.5 \text{ mm}$ , (c) $d = \text{Ø}5.5 \text{ mm}$ .....	35
Gambar 3.6 Ulir penggerak.....	36
Gambar 3.7 Skematik peralatan eksperimen nyala api difusi pada aliran berlawanan dengan penambahan <i>co-flow</i> .....	37
Gambar 3.8 Kamera Digital Panasonic DMC-FS20 .....	39
Gambar 3.9 Skema kalibrasi sistem suplai udara.....	40
Gambar 3.10 Level air pada <i>Wet Gas Meter</i> Shinagawa WE-2.5A.....	41
Gambar 3.11 Skema kalibrasi sistem suplai bahan bakar .....	42

Gambar 3.12 Skema kalibrasi sistem suplai nitrogen .....	43
Gambar 3.13 Skema proses purging .....	45
Gambar 3.14 Kurva persamaan kalibrasi kecepatan udara ( $V_{udara}$ ) untuk diameter nosel = $\varnothing$ 18.5 mm.....	47
Gambar 3.15 Kurva persamaan kalibrasi kecepatan udara ( $V_{propana}$ ) untuk diameter nosel = $\varnothing$ 8.5 mm.....	47
Gambar 3.16 Kurva persamaan kalibrasi kecepatan udara ( $V_{propana}$ ) untuk diameter nosel = $\varnothing$ 5.5 mm.....	48
Gambar 3.17 Kurva persamaan kalibrasi debit udara .....	48
Gambar 3.18 Kurva persamaan kalibrasi debit nitrogen sisi udara .....	49
Gambar 3.19 Skematik visualisasi dengan menggunakan kamera digital .....	50
Gambar 4.1 Modus nyala api nosel 5,5 mm dengan L/d 2,7 .....	52
Gambar 4.2 Modus nyala api nosel 5,5 mm dengan L/d 2,43 .....	53
Gambar 4.3 Modus nyala api nosel 5,5 mm dengan L/d 2,16 .....	53
Gambar 4.4 Nyala api dengan pipa api terbentuk kontinu.....	54
Gambar 4.5 Pola nyala api pipa api tidak terbentuk: (a) full flame, (b) split flame .....	55
Gambar 4.6 Pola nyala api pipa api tidak terbentuk dan terangkat pada nosel 5,5 mm L/d = 80/20, rasio debit nitrogen/fuel 2,7 .....	55
Gambar 4.7 Pola nyala api pipa api terbentuk tidak kontinu. ....	56
Gambar 4.8 Modus nyala api nosel 8,5 mm dengan L/d 2,7 .....	58
Gambar 4.9 Modus nyala api nosel 8,5 mm dengan L/d 2,43 .....	58
Gambar 4.10 Modus nyala api nosel 8,5 mm dengan L/d 2,16 .....	59
Gambar 4.11 Pola nyala api pipa api terbentuk tidak kontinu .....	60
Gambar 4.12 Nyala api difusi terangkat .....	61
Gambar 4.13 Nyala api stagnasi.....	62
Gambar 4.14 Modus nyala api nosel 18,5mm dengan L/d 2,7 .....	63
Gambar 4.15 Modus nyala api nosel 18,5mm dengan L/d 2,43 .....	63
Gambar 4.16 Modus nyala api nosel 18,5mm dengan L/d 2,16 .....	64
Gambar 4.17 Pola nyala api non tulip – no swirl.....	65
Gambar 4.18 Pola nyala api tulip – swirl.....	65
Gambar 4.19 Pola nyala api transisi.....	66

Gambar 4.20 Modus Nyala pipa api dalam api non-tulip ..... 66



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Properti Kimia Propana.....	23
Tabel 2.2 Properti Fisik Oksigen .....	25
Tabel 2.3 Properti Fisik Nitrogen.....	27
Tabel 3.1 Spesifikasi Kamera Digital Panasonic DMC-FS20 .....	38



## DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Dimensi
$d$	diameter dalam nosel	mm
$L$	jarak ( <i>gap</i> ) antar nosel	mm
$\tau_{udara}$	fluks momentum udara	kg/ms <sup>2</sup>
$\tau_{propana}$	fluks momentum propana (bahan bakar)	kg/ms <sup>2</sup>
$\rho_f$	massa jenis bahan bakar	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_o$	massa jenis udara	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{N_2}$	massa jenis nitrogen	kg/m <sup>3</sup>
$Q_{N_2}/Q_f$	rasio debit N <sub>2</sub> per debit propana	----
$\tau_{N_2}/\tau_f$	rasio fluks momentum N <sub>2</sub> per propana	----
$L/d$	rasio gap nosel	----



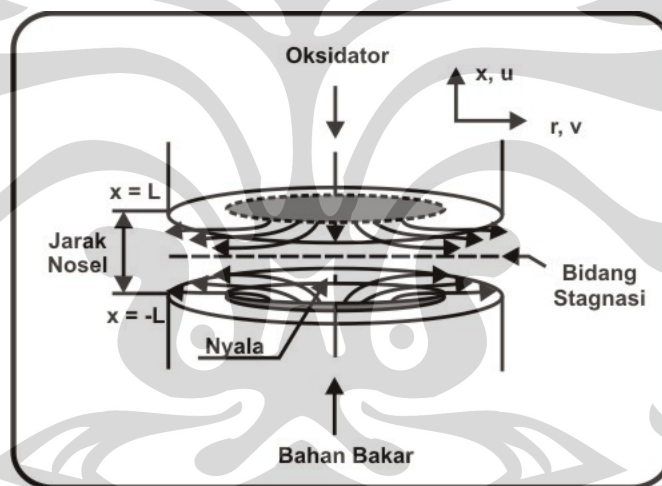
# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Energi mempunyai peranan penting dalam pencapaian tujuan sosial, ekonomi, dan lingkungan untuk pembangunan berkelanjutan, serta merupakan pendukung bagi kegiatan ekonomi nasional. Penggunaan energi di Indonesia meningkat pesat sejalan dengan pertumbuhan ekonomi dan penambahan penduduk. Peningkatan kebutuhan energi ini sayangnya berhadapan dengan masalah semakin berkurangnya cadangan energi dunia. Untuk menanggulangi masalah ini, perlu dilakukan kegiatan konservasi energi, yaitu pemanfaatan energi secara efektif dan efisien.

Pemanfaatan energi yang paling banyak digunakan adalah pemanfaatan energi mekanik dari energi kimia. Konversi dari energi kimia menjadi energi mekanik saat ini sangat luas digunakan. Salah satunya adalah melalui proses pembakaran. Proses pembakaran ini baik berupa pembakaran dalam (*internal combustion*) maupun pembakaran luar (*external combustion*) menjadi metode pembangkitan energi yang digunakan di berbagai bidang, seperti industri, rumah tangga, dan transportasi. Karena penggunaannya yang luas dan sangat vital, teknik pembakaran ini terus dikembangkan untuk mendapatkan hasil yang maksimal dan efisien. Berbagai penelitian pun telah dilakukan dengan maksud untuk lebih memahami tentang fenomena-fenomena yang terjadi dalam proses pembakaran. Pengujian-pengujian dilakukan untuk mendapatkan metode pembakaran yang lebih efisien, bersih, dan stabil.

Untuk menunjang hal tersebut, telah dilakukan berbagai eksperimen untuk mencapai efisiensi pembakaran yang relatif tinggi dengan melakukan perancangan sistem pembakaran yang dapat menjamin bahwa bahan bakar dapat terbakar sempurna. Salah satu rancangan sistem pembakaran yang diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pembakaran yang tinggi adalah dengan menggunakan nyala difusi pada aliran berlawanan (*counter flow diffusion flame*), dimana aliran bahan bakar dan udara sebagai oksidator dalam arah yang berlawanan. Dalam proses pembakaran ini, nyala terbentuk dari bahan bakar dan udara yang sebelumnya terpisah, lalu terbakar bersamaan dengan bercampurnya kedua zat tersebut dengan tingkat energi yang dilepaskan terbatas pada pusat pencampuran. Untuk lebih jelas mengenai skema aliran reaktan pada nyala difusi dalam medan aliran berlawanan, lihat gambar 1.1.



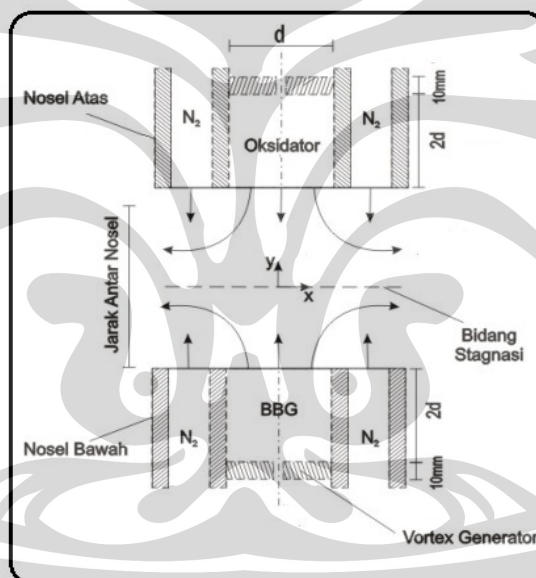
Gambar 1.1 Skema nyala difusi pada aliran berlawanan

Dalam sistem pembakaran, efisiensi pembakaran yang mendekati 100% dapat dicapai dengan menjaga temperatur pembakaran tetap tinggi dan juga waktu tahan nyala yang cukup lama. Hal ini merupakan korelasi nyata dari suatu stabilitas nyala.

Pada penelitian sebelumnya, yang dilakukan oleh Harinaldi, Harris Munandar dan Fahrul Munajat (2009), dengan menggunakan *Co-Flow* nitrogen yang terletak di sisi bahan bakar, disimpulkan bahwa bahwa dengan adanya aliran nitrogen yang menyelubungi daerah reaksi mencegah terjadinya difusi dengan

udara sekitar sehingga suplai udara yang menunjang terjadinya pembakaran hanya berasal dari nosel udara. Dan penggunaan rasio rasio terbesar dalam eksperimen ( $Q_{N_2}/Q_f = 80/20$ ;  $\tau_{N_2}/\tau_f = 16/1$ ) menyebabkan limit stabilitas nyala menurun rata-rata sekitar 27% dari kondisi non *Co-Flow*.

Kemudian dalam penelitian kali ini, dilakukan kajian yang lebih mendalam mengenai karakteristik stabilitas nyala difusi pada medan aliran berlawanan dengan penambahan satu *Co-Flow* nosel dimana gas nitrogen dipakai sebagai gas penyelubung baik dari sisi bahan bakar maupun dari sisi oksidator. *Co-Flow* nosel ini diletakkan pada sisi nosel oksidator, dimana debit nitrogen yang mengalir pada *Co-Flow* nosel dari sisi udara ini diatur sedemikian rupa sehingga menyamai debit oksidator. Sedangkan nitrogen yang mengalir pada *Co-Flow* nosel dari sisi bahan bakar, tetap menggunakan rasio penelitian sebelumnya.



Gambar 1.2 Skema nyala difusi pada aliran berlawanan dengan *co-flow*

## 1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini, rumusan masalah yang akan dibahas, yaitu mengenai pengaruh penambahan *Co-Flow* berupa gas *inert* (nitrogen) terhadap stabilitas nyala api, serta parameter dinamika fluida seperti fluks momentum aliran udara ( $\tau_{udara}$ ) dan fluks momentum aliran bahan bakar ( $\tau_{propana}$ ) terhadap karakteristik nyala difusi pada medan aliran berlawanan dengan menggunakan propana ( $C_3H_8$ ) sebagai bahan bakar, udara dari kompresor sebagai oksidator dan gas nitrogen

sebagai gas penyelubung (*Co-Flow*) yang dialirkan pada dua nosel yang diletakkan secara berlawanan.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk memperkaya basis data eksperimental mengenai modus stabilnya nyala api difusi pada medan aliran berlawanan (*counter-flow*) dengan menggunakan bahan bakar gas propana, udara kompresor sebagai oksidator dan gas nitrogen sebagai gas penyelubung (*Co-Flow*). Dan juga, diharapkan dengan penelitian ini akan diperoleh korelasi yang lebih nyata antara parameter-parameter praktis, dalam menghasilkan kondisi pencampuran bahan bakar dan udara yang efektif. Parameter-parameter tersebut di antaranya: geometri nosel, rasio debit  $N_2$  dan propana, dan dinamika fluida dari aliran.

### 1.4 Pembatasan Masalah

1. Penelitian dilakukan di lab. Teknik Pembakaran, DTM FTUI.
2. Alat ukur debit aliran yang digunakan adalah manometer-U.
3. Tidak menganalisa hasil atau gas buang pembakaran yang dihasilkan.
4. Variasi diameter dalam nosel ( $d$ ) yang digunakan adalah 18.5 mm, 8.5 mm, dan 5.5 mm.
5. Variasi jarak antar nosel dibandingkan diameter dalam nosel ( $L/d$ ) yang digunakan adalah 2.7, 2.43, dan 2.16.
6. Variasi rasio antara debit gas nitrogen dengan debit bahan bakar ( $Q_{N_2}/Q_F$ ) yang digunakan adalah 40/60, 50/50, 60/40, 70/30 dan 80/20.
7. Debit nitrogen (*Co-Flow*) dari arah oksidator, besarnya sama dengan debit oksidator.
8. *Co-Flow* (aliran selubung) terdapat pada sisi bahan bakar maupun sisi oksidator.
9. *Vortex generator* terletak  $2d$  dari ujung nosel.

## 1.5 Metode Penelitian

Pada penelitian ini, metode yang penulis lakukan yaitu dengan melakukan percobaan dan pengambilan data dengan menggunakan *counter flow diffusion flame apparatus with both side co-flow*. Parameter-parameter yang berpengaruh pada percobaan kemudian dicatat dan diolah. Parameter-parameter tersebut didasarkan pada studi literatur dari referensi yang berkaitan, terutama dari penelitian yang dilakukan oleh Harinaldi & Harris Munandar (2009).

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian, disusun berdasarkan format berikut:

### BAB I PENDAHULUAN

Berisikan latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan dari penelitian.

### BAB II DASAR TEORI

Berisikan penjabaran dari teori dasar sistem pembakaran yang digunakan untuk mendukung penelitian.

### BAB III PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN

Berisi tentang rincian peralatan yang digunakan selama berlangsungnya penelitian, dan penjelasan mengenai cara kerja alat beserta komponennya. Di samping itu, dikemukakan juga mengenai prosedur pengambilan data serta metode penelitian yang dilakukan.

### BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan mengenai pengolahan data mentah yang kemudian dipresentasikan dalam bentuk kurva beserta analisis hasil penelitian yang dilakukan.

### BAB V KESIMPULAN

Merupakan kesimpulan dari seluruh rangkaian proses penelitian yang dilakukan.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Prinsip-Prinsip Pembakaran**

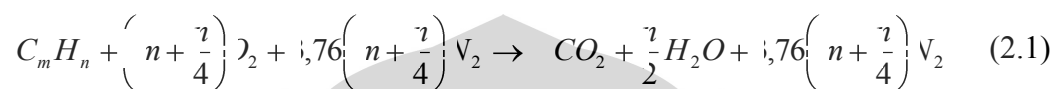
Pembakaran bermula pada senyawa yang memiliki energi potensial panas yang tinggi yang disebut bahan bakar. Bahan bakar (*fuel*) merupakan segala substansi yang melepaskan panas ketika dioksidasi dan secara umum mengandung unsur-unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Sementara oksidator adalah segala substansi yang mengandung oksigen (misalnya udara) yang akan bereaksi dengan bahan bakar (*fuel*).

Dalam proses pembakaran, fenomena-fenomena yang terjadi antara lain interaksi proses-proses kimia dan fisika, pelepasan panas yang berasal dari energi ikatan-ikatan kimia, proses perpindahan panas, proses perpindahan massa, dan gerakan fluida.

Terdapat berbagai pengertian mengenai pembakaran, antara lain menurut *Oxford Concise Dictionary*, pembakaran adalah 1. Konsumsi oleh api; 2. Pembentukan nyala dan panas melalui kombinasi kimia. Sedangkan menurut *Webster's Dictionary*, pembakaran merupakan 1. Oksidasi yang terjadi dengan cepat, menghasilkan kalor dan cahaya; 2. Oksidasi terjadi secara lambat disertai dengan sejumlah kecil kalor dan tanpa adanya cahaya [1].

Dari beberapa pengertian di atas, dapat diambil kesimpulan secara umum, bahwa pembakaran merupakan proses reaksi kimia antara bahan bakar (*fuel*) dan oksidator dengan melibatkan pelepasan energi yang tersimpan menjadi energi termal atau panas. Selain itu, selama pembakaran juga dihasilkan sejumlah kecil energi elektromagnetik (cahaya), energi listrik (ion dan elektron bebas), dan energi mekanikal (*noise*).

Seperti telah diuraikan sebelumnya, proses pembakaran akan terjadi jika unsur-unsur bahan bakar teroksidasi oleh oksidator. Proses ini akan menghasilkan panas sehingga akan disebut sebagai proses oksidasi eksotermis. Jika oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran diperoleh dari udara, di mana udara terdiri dari 21% oksigen dan 78% nitrogen, maka reaksi stoikiometrik pembakaran hidrokarbon murni  $C_mH_n$  dapat ditulis dengan persamaan :

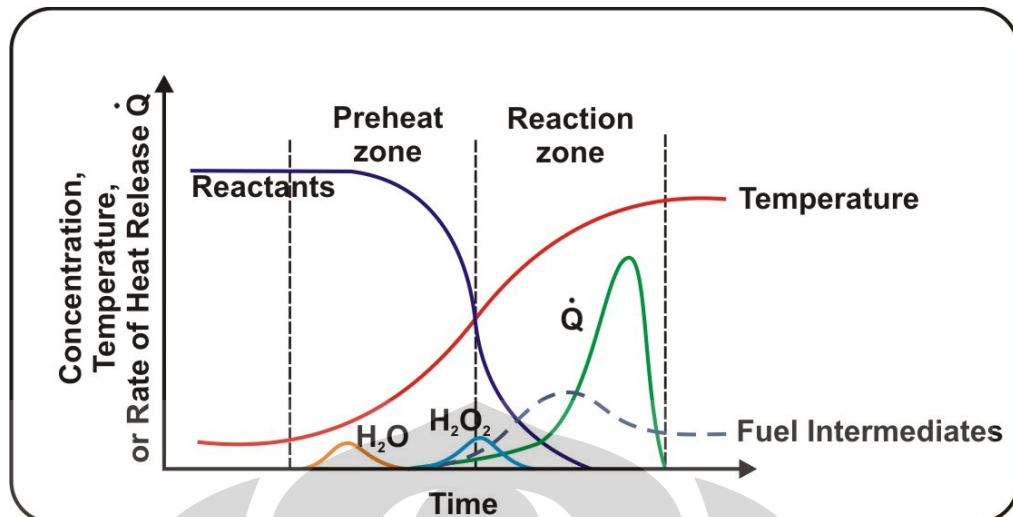


Persamaan ini merupakan hasil penyederhanaan, mengingat cukup sulit untuk memastikan proses pembakaran yang sempurna dengan rasio ekivalen yang tepat dari udara. Jika terjadi pembakaran tidak sempurna, maka hasil persamaan di atas yang hanya menghasilkan  $CO_2$  dan  $H_2O$  tidak akan terjadi, akan tetapi terbentuk hasil oksidasi parsial berupa  $CO$ ,  $CO_2$ , dan  $H_2O$ . Juga sering terbentuk hidrokarbon tak jenuh, formaldehida dan kadang-kadang didapat juga karbon.

## 2.2 Nyala Api

Suata nyala api adalah penyebaran sendiri reaksi eksotermal secara terus menerus yang dibatasi luminasi zona reaksi. Api tidak akan berpindah-pindah jika gas reaktan bergerak menuju arah api dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan reaksinya.

Terdapat dua klasifikasi utama dari nyala api yaitu nyala api *premixed* (*premixed flame*) dan nyala api difusi (*diffusion flame*). Nyala api *premixed* (*premixed flame*) adalah jenis di mana bahan bakar dan udara bercampur sebelum terjadinya proses pembakaran. Nyala api difusi timbul sewaktu udara berdifusi ke bahan bakar di dalam nyala api (*flame*).



Gambar 2.1 Profil nyala api [2]

Dari gambar di atas terlihat bahwa nyala terdiri dari 2 daerah, yaitu:

1. Zona pra pemanasan (*preheat zone*)

Daerah di mana sedikit panas yang dilepaskan dan masih banyak bahan bakar yang belum terbakar (*unburned fuel*).

2. Zona pemanasan (*reaction zone*)

Daerah di mana sebagian besar energi kimia dilepaskan.

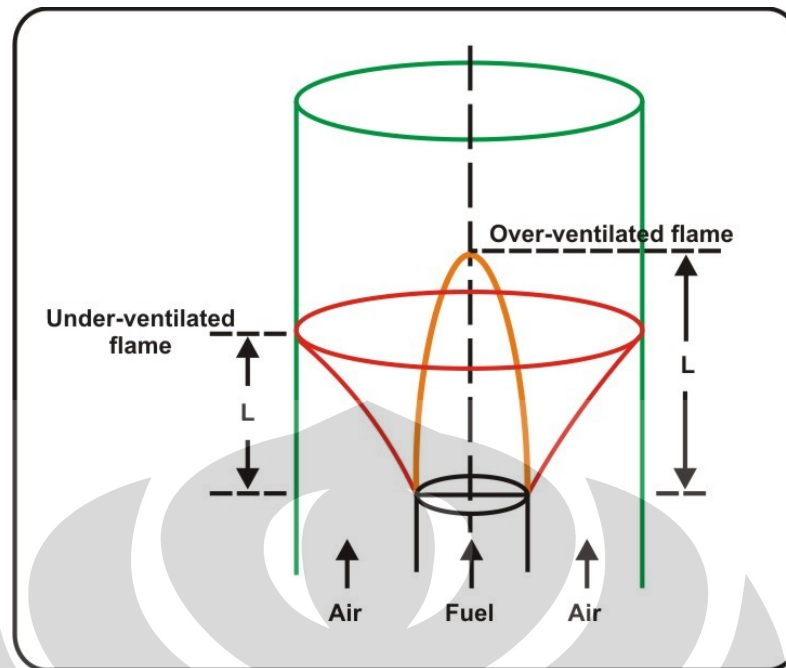
### 2.2.1 Nyala Api Difusi

Pada pembakaran *diffusion flame*, bahan bakar dan oksidator (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 di sekitarnya. 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 *premixed*. Nyala difusi dapat berupa nyala laminar (*laminar flame*) atau nyala turbulen (*turbulent flame*).



Nyala api difusi memiliki karakteristik yang berbeda dengan nyala api *premixed*, yaitu laju pembakaran ditentukan oleh laju dimana bahan bakar dan oksidator dialirkan dalam ukuran yang tepat untuk reaksi. Sedangkan laju pembakaran untuk nyala api *premixed* ditentukan oleh laju pelepasan energi dan laju reaksi oksidasi yang telah tercampur sebelumnya antara bahan bakar dengan oksidator. Reaksi antara bahan bakar dan udara pada nyala api difusi biasanya terjadi pada daerah temperatur maksimum. Sedangkan pada nyala api *premixed* reaksi oksidasi terjadi sebelum daerah temperatur maksimum. Laju konsumsi oksidator per bagian volume pada nyala api difusi seribu kali lebih sedikit dibanding dengan nyala api *premixed*. Oleh karena itu, pada nyala api *premixed* terjadi pembakaran yang lebih sempurna. Di dalam nyala api difusi, ketika bahan bakar gas bercampur, dengan cara dialirkan ke atas, partikel gas akan mengalir ke sisi bagian luar sedangkan partikel oksidator akan mengalir ke sisi bagian dalam.

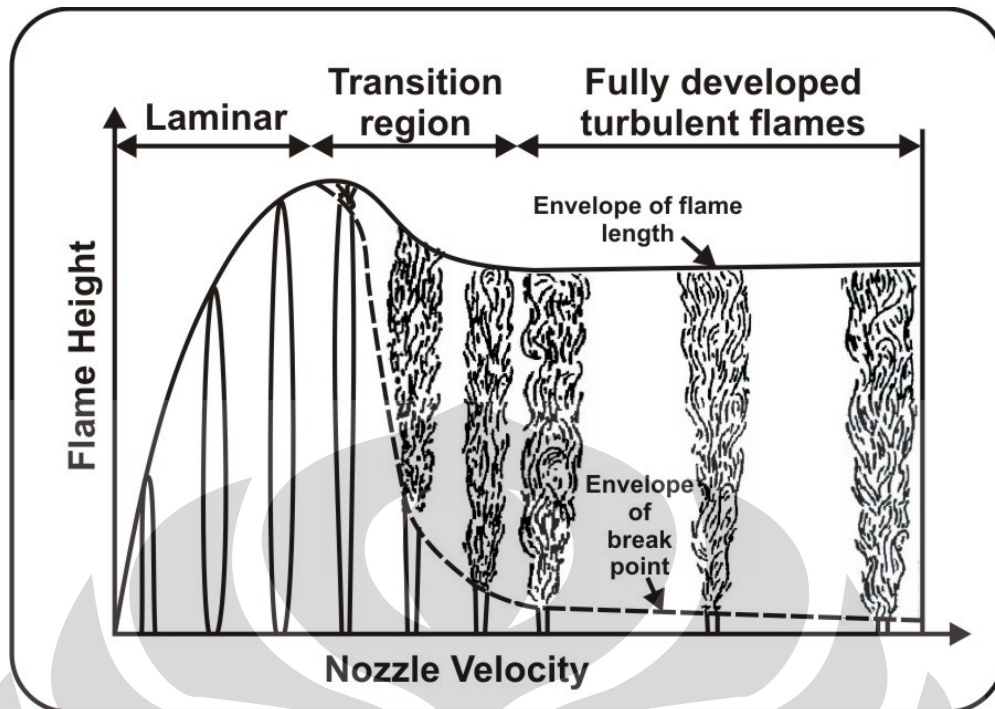
Burke dan Schumman (1928) mempelajari nyala api difusi di dalam sebuah tabung dimana aliran bahan bakar dikelilingi oleh aliran udara dengan kedua aliran tersebut memiliki kecepatan yang sama. Bentuk api yang terbentuk tergantung dari apakah aliran udara tersebut memiliki lebih banyak oksigen (*over-ventilated*) atau kekurangan oksigen (*under-ventilated*) untuk kebutuhan reaksi pembakaran yang sempurna dengan bahan bakar. Bentuk dari *flame front* dari kondisi tersebut, yaitu seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.2 *Over-ventilated* dan *under-ventilated* pada nyala api difusi [3]

Di dalam nyala api *over-ventilated*, batas api menuju ke sumbu *axis* silinder, sedangkan pada nyala api *under-ventilated* batas api bergerak menuju ke dinding luar silinder. Beberapa bentuk nyala api dapat terjadi di antara dua batas tersebut, yaitu dengan mengubah rasio bahan bakar dan udara, biasanya dengan menambah atau mengurangi jumlah aliran bahan bakar atau udara pada flowmeter. Untuk nyala api difusi, batas nyala api didefinisikan sebagai permukaan (*surface*) ketika reaksi pembakaran telah sempurna, yaitu terjadi pada keadaan rasio stoikiometri [4].

Dengan ditingkatkannya laju aliran udara, karakter dari nyala api difusi laminar berubah. Selama dalam masa transisi, ujung api menjadi turbulen sedangkan bagian bawah atau dasar api masih dalam fase laminar. Selain itu, peningkatan kecepatan aliran mengakibatkan semakin berkurangnya tinggi dari api laminar. Titik dimana aliran laminar berubah menjadi aliran turbulen dinamakan *break point*. Ketika *break point* terletak dekat dengan nosel bahan bakar, tinggi api dan tinggi *break point* sudah tidak berubah lagi, yang berubah adalah perubahan timbulnya intensitas suara yang semakin tinggi.

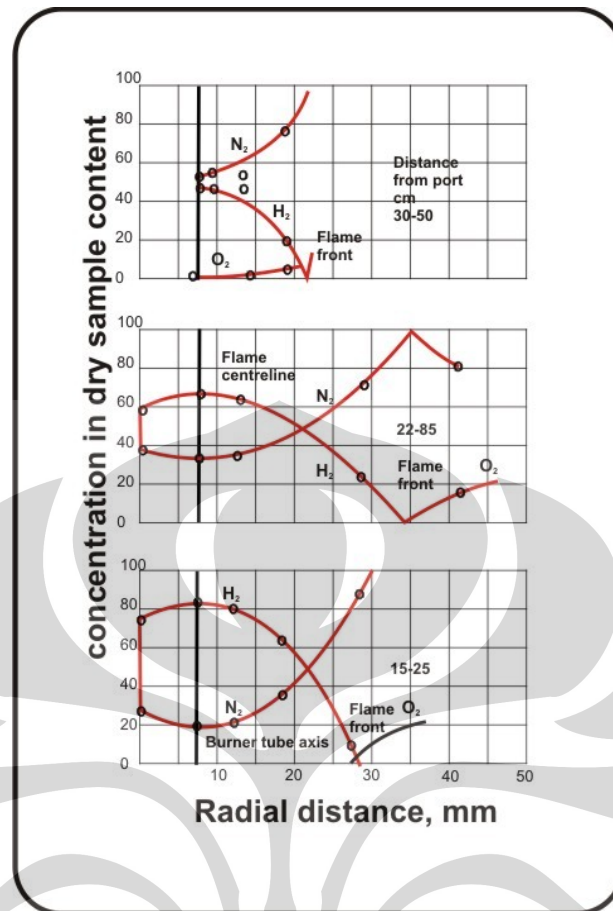


Gambar 2.3 Perubahan bentuk api terhadap kecepatan aliran bahan bakar [3]

Gambar di atas menunjukkan perubahan pada tinggi dan posisi *break point* dengan meningkatkan kecepatan aliran. Pada daerah laminar, tinggi api meningkat mendekati linier dengan peningkatan kecepatan aliran. Namun pada daerah turbulen, tinggi api semakin berkurang dibandingkan dengan tinggi api pada daerah laminar dan setelah itu, tinggi api tidak berpengaruh lagi terhadap kecepatan aliran.

#### 2.2.2.1 Struktur Nyala Difusi Laminar

Distribusi dari berbagai komponen pada perbedaan ketinggian di nyala api difusi laminar pertama kali ditemukan oleh *Hattel dan Hawthorne*. Hasil yang mereka dapatkan untuk nyala api berbahan bakar hidrogen ditunjukkan oleh gambar di bawah ini.

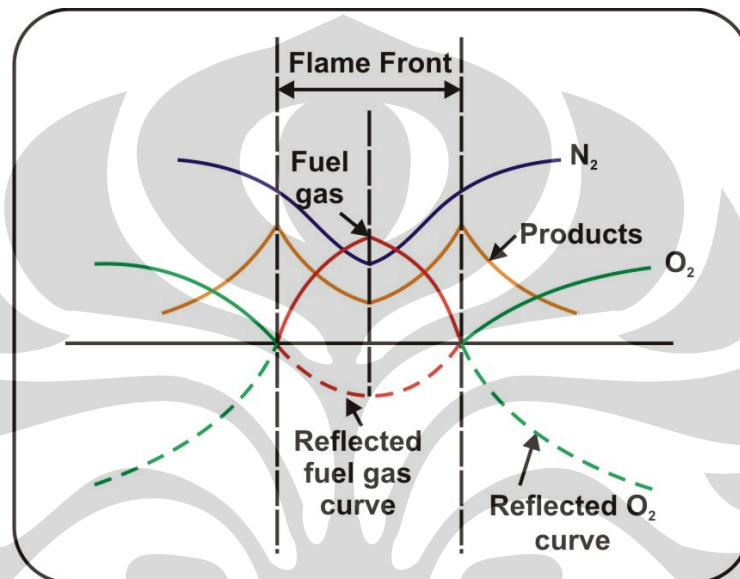


Gambar 2.4 Diagram komposisi nyala api difusi berbahan bakar hidrogen [3]

Bahan bakar hidrogen dipilih karena struktur kimianya yang sederhana. Setelah diteliti bahwa konsentrasi hidrogen dan udara sudah habis saat mencapai daerah *flame front*. Konsentrasi bahan bakar habis pada saat mencapai *flame front* dan memiliki jumlah maksimal pada saat berada pada *axis burner*, sedangkan kadar oksigen maksimal berada di aliran udara sekitar, sehingga dapat diasumsikan bahwa pada daerah *flame front* bahan bakar dan oksigen telah mencapai keadaan stoikiometri dan dikonsumsi seketika itu juga.

Pada percobaan tersebut, *flame front* diasumsikan sebagai zona reaksi yang tipis. Gambar di atas memberikan jumlah konsentrasi hidrogen, nitrogen, dan oksigen pada ketinggian berbeda di atas *burner port*. Posisi dari *flame front* tetap bergerak karena terdapat perbedaan lebar dari api. Pengukuran konsentrasi oksigen pada sisi bahan bakar ditandai dengan masuknya udara melalui pipa karena pergerakan api.

Dari hasil tersebut, secara umum gambar dari struktur api difusi laminar dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Gambar ini menunjukkan perubahan pada konsentrasi bahan bakar, oksigen, dan produk pembakaran. Garis pada kurva tersebut menunjukkan konsentrasi bahan bakar dan oksigen dengan bernilai negatif.



Gambar 2.5 Diagram profil konsentrasi pada nyala api difusi tipe laminar [3]

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

#### 2.2.2.2 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 2.6 dibawah ini.



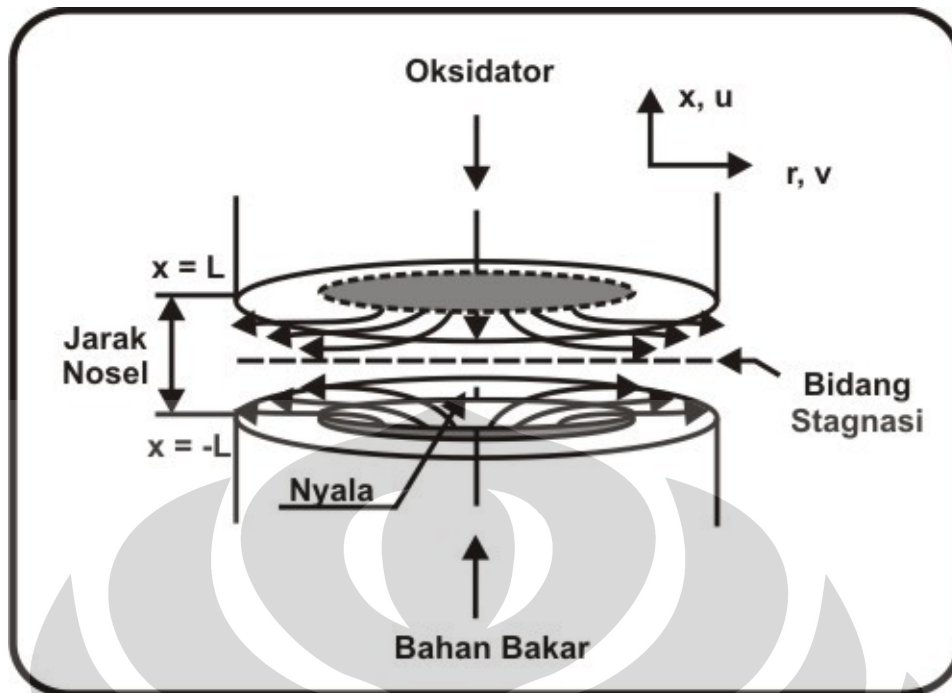
Gambar 2.6 Nyala difusi turbulen

Turbulensi pada gas yang tidak terbakar akan meningkatkan laju penjararan 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*).

### 2.2.2.3 Counter Flow Diffusion Flame

Terdapat berbagai macam nyala turbulen yang didefinisikan dengan intensitas turbulensi dan karakteristik nyala. Terutama pada *flamelet regime*, nyala api turbulen dapat dipertimbangkan sebagai korelasi dari nyala api tidak tunak dan laminar, sehingga pemahaman mengenai nyala api tidak tunak merupakan hal penting untuk mempelajari nyala api laminar dan perencanaan turbulensi pembakaran.

Dalam mempelajari nyala api tidak tunak, penelitian mengenai fenomena nyala api padam (*extinct*) merupakan suatu hal yang berguna, karena efek ketidak-tunakan terlihat sangat jelas pada saat nyala api akan padam. Untuk itulah, digunakan *counter flow diffusion flame burner* karena nyala yang terbentuk mempunyai struktur skalar yang sama sebagai *flamelet* dalam zona pencampuran dari reaksi aliran turbulen.



Gambar 2.1 Skema nyala difusi pada aliran berlawanan [3]

Pada skema *counter flow diffusion flame* di atas, aliran bahan bakar berasal dari nosel bawah dan udara sebagai oksidator dari nosel atas. Nyala api stagnasi akan dihasilkan pada posisi *stagnation plane* dan biasanya nyala api yang paling stabil akan didapatkan jika volume aliran bahan bakar dan oksidator sama besar, dan juga dengan menambahkan nitrogen atau gas *inert* lain pada bahan bakar dan oksidator dengan jumlah yang proporsional. Dua variabel yang sering digunakan untuk mengatur durasi dari area nyala dan gradien temperatur sepanjang nyala adalah debit aliran keseluruhan antara bahan bakar dan oksidator dan juga jarak antara masing-masing nosel (*burner gap*).

Terdapat beberapa penelitian mengenai *counter flow diffusion flame* yang diantaranya untuk mempelajari proses pembentukan jelaga pada area antara di depan titik stagnasi dan zona nyala.

Penelitian ini diawali oleh Tsuji dan Yamaoka [5], dimana mereka meneliti tentang pengaruh parameter aerodinamik dan parameter kimia seperti kecepatan aliran udara, kecepatan injeksi bahan bakar, diameter nosel, komposisi bahan bakar terhadap lokasi nyala, *blow-off limit*, dan distribusi temperatur nyala.

Penelitian mereka menghasilkan bahwa ada beberapa kondisi campuran komposisi bahan bakar yang tidak akan mampu mencapai *stagnation flame*, tidak

peduli seberapa besar injeksi bahan bakarnya. Penelitian ini berhasil mendapatkan api stagnasi dimana jarak api stagnasi dengan nosel diukur dengan parameter *non dimensional* dan sangat berhubungan dengan parameter *non dimensional* keluaran setiap kombinasi bahan bakar yang diberikan.

J.C Rolon [6] meneliti pengaruh *vortex ring* pada nyala api difusi *counter flow*. Pada penelitian tersebut, *vortex ring* diletakan pada salah satu nosel saja yaitu pada nosel udara. Dari penelitian tersebut, diketahui bahwa *vortex ring* berpengaruh besar pada mekanisme *extinction/blow-out*.

Uen Do Lee [7] yang melakukan penelitian mengenai pengaruh perubahan kecepatan aliran terhadap batas nyala api padam (*extinct*) pada nyala difusi *counter flow*, selanjutnya V.R Katta [8] juga mempelajari kriteria *extinction* pada nyala difusi dalam medan aliran berlawanan. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa nyala api dinamik atau tidak tunak akan berada pada *strain rates* yang lebih tinggi dari pada nyala api tunak (*steady flames*).

Jongmook Lim dan Raymond Viskanta [9] juga mempelajari mengenai pengaruh pemanasan awal udara (*air preheat*) terhadap struktur nyala difusi pada medan aliran berlawanan dengan menggunakan bahan bakar metana. Dalam hal ini, udara diatur pada cakupan 300 sampai dengan 560 K. Hasil dari penelitian mereka menunjukkan bahwa dengan kenaikan pemanasan awal udara akan menyebabkan kenaikan puncak konsentrasi dari CO dan H<sub>2</sub> yang dihasilkan.

Dawn A Santoianni dan Michelle Dercoix [10] meneliti tentang sebaran temperatur pada *counterflow* propana-udara dengan *co-flow*. Penelitian ini menggunakan paparan sinar laser untuk mengambil data temperatur reaksi dengan frekuensi paparan sinar laser 25Hz. Hasil penelitian ini adalah bahwa besar kecilnya zona reaksi dari propana-udara tidak berpengaruh signifikan terhadap temperaturnya.

W.F. Carnell Jr., M.W. Renfro [11] mencoba membentuk garis nyala api stabil pada *counterflow* metana dan berhasil mendapatkannya, dengan menggunakan nosel *co-annular* dengan nitrogen sebagai gas *co-flow*, pada penelitiannya diterangkan bahwa penggunaan gas *co-flow* dengan rasio yang cukup tinggi akan menyebabkan gas tersebut melindungi bagian inti dari reaksi serta menghilangkan sisa-sisa api di sekitarnya.



I.E.S Kim dan Mastorakos [12] mencoba menyimulasikan *counterflow flames* dari metana-udara dengan analisis komputasi orde pertama. Pada percobaan simulasi ini digunakan CFD dengan menggunakan software FLUENT untuk memperhitungkan difusi turbulen, energi kinetik turbulen, dan variabel dinamika fluida lain yang akan digunakan untuk memperkirakan struktur dari api dan batas *extinction*nya. Hasil yang di dapat dari simulasi tersebut berupa data kecepatan *extinction* yang ternyata berbeda dengan hasil eksperimental.

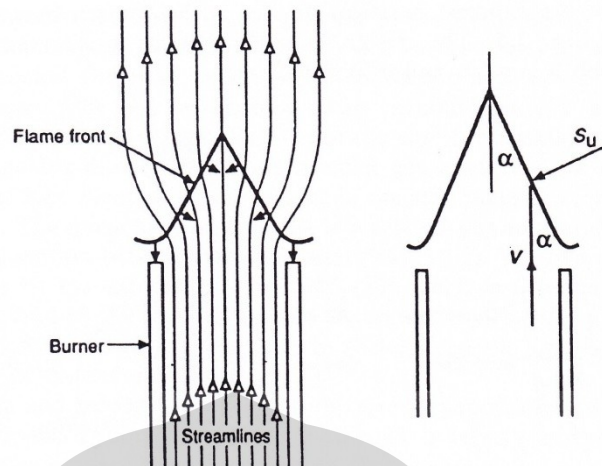
June Sung Park, Dong Jin Hwang, dkk [13] meneliti tentang *flame extinction behavior* dan bentuk osilasi nyala, untuk nyala api yang lebih kecil dibanding diameter burnernya. Eksperimen ini menggunakan *counterflow combustion device* dengan metana sebagai bahan bakar, dan nitrogen sebagai gas campuran premix dari bahan bakar. Hasil yang di dapat dari penelitian ini adalah bahwa lebar dari nyala api sangat berhubungan dengan *lateral heat loss* yang terjadi, dan lateral heat loss ini diperhitungkan sangat mempengaruhi *extinction* dari api dan juga mempengaruhi osilasi dari api. Pada penelitian ini juga di dapatkan tiga jenis osilasi api yaitu, berkembang, *decaying*, harmonis.

### 2.3 Stabilitas Nyala Api (*Flame Stability*)

Pergerakan penjalaran api dan bentuk dari kestabilan nyala api selalu dipengaruhi oleh kesetimbangan antara laju aliran massa dinamik gas yang melibatkan perhitungan kekekalan massa, kekekalan momentum, dan kekekalan energi.

Metode yang umum digunakan ketika ingin meneliti kestabilan api adalah menggunakan Bunsen Burner, metode ini dianggap paling mudah dan murah. Ada 3 keuntungan menggunakan Bunsen Burner untuk meneliti api laminar premix yaitu[18]:

1. Memungkinkan pencampuran bahan bakar dan oksidator dalam komposisi yang benar.
2. Menyediakan bagian yang tepat untuk mendapatkan api laminar.
3. Berlaku seperti *heat sink* dimana hal tersebut akan membatasi gerakan api.



Gambar 2.8. Bunsen burner dengan garis aliran laminar[14]

Ada beberapa ketidakstabilan dalam *Bunsen burner* yaitu:

4. Ketidakstabilan sistem, meliputi interaksi aliran pada komposisi reaksi sistem yang berbeda.
5. Ketidakstabilan akustik, meliputi interaksi gelombang suara dengan proses pembakaran.
6. Ketidakstabilan Taylor, meliputi efek gaya apung atau percepatan pada fluida dengan perubahan densitas.
7. Ketidakstabilan Landau, ketidakstabilan hidrodinamika dari bentuk pembakaran yang diasosiasikan tidak meliputi akustik ataupun *buoyancy* tetapi hanya meliputi penurunan kerapatan yang dihasilkan oleh pembakaran aliran tak mampu mampat (*incompressible*).
8. Ketidakstabilan diffusivitas termal, meliputi hubungan reaksi difusi dan kalor dengan nyala primer.

Suatu hal yang sangat penting dalam perencanaan pembakaran gas adalah mencegah terjadinya *flashback* dan *lift-off*. Batas kestabilan nyala berhubungan erat dengan fenomena *flashback*, *lift-off*, *blow-off*, dan warna nyala pada tabung pembakar (*burner*).

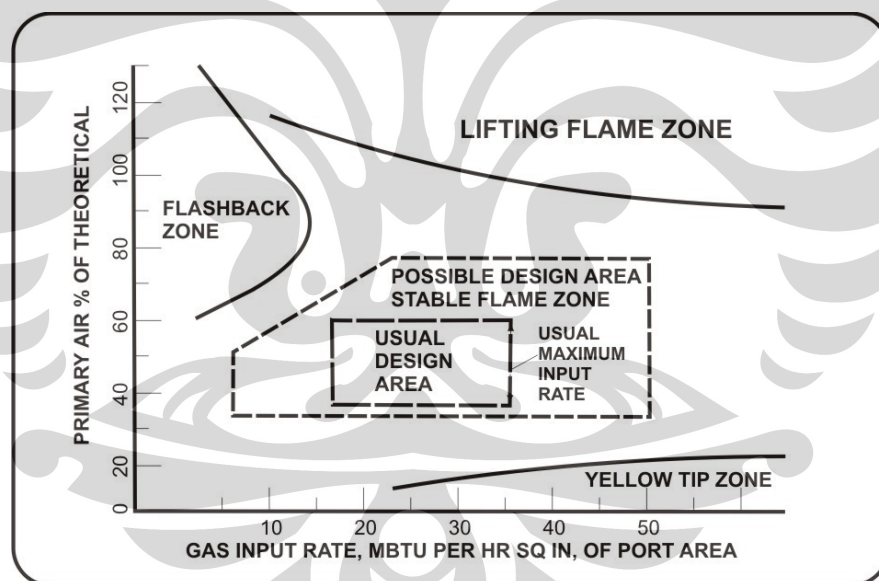
### 2.3.1 Fenomena *Flashback*

*Flashback* terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih cepat daripada kecepatan campuran udara-bahan bakar sehingga nyala api masuk balik dan

merambat kembali ke dalam tabung pembakar, dapat disebut juga sebagai *back fire* atau *light back*.

*Flashback* tidak hanya mengganggu, tetapi juga dari sisi keamanan bisa menjadi berbahaya. Fenomena *flashback* berhubungan dengan kecepatan nyala laminar lokal dan kecepatan aliran lokal sebanding. *Flashback* secara umum merupakan kejadian sesaat yang terjadi apabila aliran bahan bakar dikurangi atau ditutup. Ketika kecepatan nyala lokal melebihi kecepatan aliran lokal, perambatan nyala menjauh melalui tabung. Saat aliran bahan bakar dihentikan, nyala akan membalik atau *flashback* melalui tabung dan lebih besar dari jarak *quenching*.

Gambar di bawah menunjukkan daerah stabilitas nyala dengan bahan bakar industri yang berisi hidrogen. Bekerja pada daerah kiri *flashback* mengakibatkan terjadinya *flashback*, sementara itu untuk menghindari terjadinya *flashback* daerah kerja dirancang pada sisi kanannya yaitu pada daerah stabilitas nyala.



Gambar 2.9 Diagram stabilitas *flashback*, *lift-off*, dan *yellow tipping* untuk bahan bakar gas industri [15]

### 2.3.2 Fenomena *Lift-Off*

*Lift-off* adalah kondisi di mana nyala api tidak menyentuh permukaan mulut tabung pembakar, tetapi agak stabil pada jarak tertentu dari tabung pembakar. Sama seperti halnya *flashback*, fenomena *lift-off* juga berhubungan dengan kecepatan nyala api laminar lokal dan kecepatan aliran lokal yang sebanding.

Dengan meningkatkan kecepatan aliran hingga tercapai kecepatan kritis, ujung nyala akan meloncat ke posisi jauh dari ujung (mulut) pembakar dan nyala dikatakan terangkat. Kondisi nyala terangkat inilah yang dinamakan sebagai *lift-off*, dan jika kecepatan aliran terus dinaikkan, maka nyala secara kasar akan padam dan kondisi ini tidak diinginkan.

Munis dan Mungal [16] mempelajari fenomena lift-off menggunakan metana dan ethylene sebagai bahan bakar dan udara dengan *co-flow*. Penelitian mereka menghasilkan ketinggian *lift-off* dari api meningkat ketika kecepatan jet *outlet* dan *co-flow* meningkat, dan api akan stabil ketika kecepatan *fuel* mendekati kecepatan api laminar *premixed*, dan tidak sampai melebihinya. Penelitian mereka menggunakan *particle image velocimetry* menunjukkan api turbulen akan terangkat (*lift-off*) ketika reynolds numbernya 7000 sampai 19.500.

### 2.3.3 Fenomena *Blow-Off*

*Blow-off* merupakan suatu keadaan di mana nyala api padam akibat dari batas kecepatan aliran lebih besar dari laju nyala atau kecepatan pembakaran. Kondisi seperti ini harus dihindari karena selain boros bahan bakar, terjadinya *blow-off* secara terus menerus dapat merusak nosel pembakar dan dapat mengganggu proses produksi yang pada akhirnya dapat menimbulkan kerugian. Untuk mengantisipasi hal tersebut, maka harus diketahui batas aliran bahan bakar yang aman dapat digunakan sebelum terjadinya *blow-off* dan tidak terletak tepat di ujung burner. Hal ini bertujuan untuk mengurangi penerimaan panas yang lebih besar dari api terhadap nosel sehingga penggunaannya lebih awet.

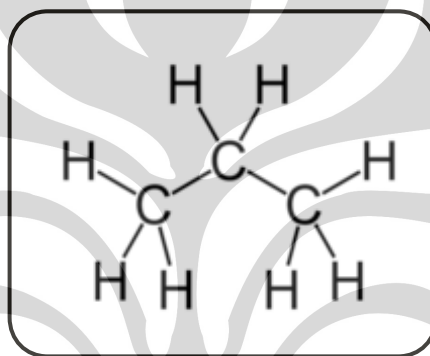
Penelitian terhadap fenomena *Blow-off* salah satunya dilakukan Hiroki Ishida [17] yang meneliti tentang pengaruh fisik dan kimiawi gas inert pada fenomena *blow-off*, *lift-off* pada api jet laminar. Pada penelitian ini gas inert yang digunakan adalah Helium, Argon, Karbon Dioksida dan Nitrogen.

Pada penelitian ini gas inert dicampur secara premix kepada campuran metana dan oksigen dengan rasio 2,1 - 2,4 dan kecepatan *flow* keluar nosel 120 cm/s. Hasil dari penelitiannya menunjukkan bahwa semakin tinggi densitas gas *inert* yang digunakan, maka fenomena *lift-off* yang terjadi akan sangat tidak stabil dan dengan cepat berubah menjadi fenomena *blow-off*, sedangkan untuk

penggunaan gas *inert* dengan densitas yang rendah (Helium) fenomena *lift-off* bisa sangat stabil.

#### 2.4 Propana (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)

Propana adalah senyawa alkana tiga karbon (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) yang berwujud gas dalam keadaan normal, tapi dapat dikompresi menjadi cairan yang mudah dipindahkan dalam kontainer yang tidak mahal. Senyawa ini diturunkan dari produk petroleum lain pada pemrosesan minyak bumi atau gas alam. Propana umumnya digunakan sebagai bahan bakar untuk mesin, pemanggang, dan di rumah-rumah.



Gambar 2.10 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, seperti:

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

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

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 galon, atau lb per ft<sup>3</sup>. Gravitasi jenis disingkat sp.gr. atau sg. Definisinya adalah perbandingan berat bahan bakar terhadap berat air, diukur pada 600°F, yang pada suhu tersebut berat air = 62.4 lb/ft<sup>3</sup>.

### 4. Viskositas atau kekentalan

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

### 5. *Flash point*

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

### 6. Titik bakar atau "*ignition point*"

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

Untuk lebih mengetahui 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 <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Wujud	Gas
Warna	Tidak berwarna
Massa molar	44.096 g/mol
Titik didih	-43.67°F (-42.04°C) @ 1 atm
Gravitasi jenis	1.5223 pada 70°F (21.1°C) @ 1 atm
Titik uap	305.84F (-187.69C) @ 1 atm
Tekanan uap	109.73 psig, (756.56kPa) pada 70°F (21.1°C)
Densitas	1.83 g/L, gas (0.5077 Kg/L liquid)
<i>Solubility</i> dalam air	0.1 g/cm <sup>3</sup> (37.80C)
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*

Propana melalui reaksi pembakaran yang sama dengan reaksi pada hidrokarbon lainnya dan dengan adanya kelebihan udara (*excess air*), propana terbakar dan membentuk uap air dan karbon dioksida. Maka reaksinya akan seperti ini:



Namun jika tidak terdapat kelebihan udara (*excess air*), maka propana akan menghasilkan uap air dan karbon monoksida seperti pada reaksi berikut:



Tidak seperti gas alam, propana lebih berat atau memiliki densitas lebih besar dari udara. Pada kondisi standar dan bebas, propana cenderung untuk jatuh akibat gravitasi karena beratnya. Propana cair akan berubah menjadi uap pada tekanan atmosfer dan berwujud putih karena pengembunan dari udara.

**Universitas Indonesia**

Pembakaran propana jauh lebih bersih dari bensin, tetapi tidak sebersih gas alam. Kehadiran ikatan molekul C-C ditambah ikatan berlipat-lipat dari *propylene* dan *butylene*, menghasilkan gas buang organik disamping karbon dioksida dan uap air selama pembakaran khusus. Ikatan ini juga menyebabkan pembakaran propana menghasilkan nyala api yang dapat terlihat secara visual.

Propana bisa digunakan sebagai bahan bakar industri, bahan bakar kendaraan, dan sebagai refrigeran pada sistem refrigerasi.

## 2.5 Oksigen (O<sub>2</sub>)

Oksigen merupakan salah satu komponen penyusun udara, diproduksi oleh tumbuhan selama fotosintesis, dan dibutuhkan untuk respirasi aerob oleh hewan dan manusia.

Dalam pembakaran, oksigen biasanya didapat dari udara. Untuk perhitungan, ditetapkan udara kering terdiri dari 20.95% oksigen dan 79.05% gas inert (nitrogen, argon, dsb) untuk basis volum, atau 23.15% oksigen dan 76.85% gas inert untuk basis massa. Selain itu, oksigen juga didapat dari proses pencairan (*liquification*) dan distilasi fraksi dari udara.

Terlalu banyak konsentrasi oksigen dalam suatu ruang akan dapat menimbulkan terjadinya reaksi pembakaran dan akhirnya berakibat kemunculan api atau bahkan ledakan bila di tempat tersebut juga ada bahan bakar.



**Tabel 2.2** Properti Fisik Oksigen

CIRI-CIRI FISIK	
Fase	Gas
Massa Jenis	(0 °C; 101,325 kPa) 1,429 g/L
Titik Lebur	54,36 K (-218,79 °C, -361,82 °F)
Titik Didih	90,20 K (-182,95 °C, -297,31 °F)
Kalor Peleburan	(O <sub>2</sub> ) 0,444 kJ/mol
Kalor Penguapan	(O <sub>2</sub> ) 6,82 kJ/mol
Kapasitas Kalor	(25 °C) (O <sub>2</sub> ) 29,378 J/(mol·K)
<u>Konduktivitas Termal</u>	(300 K) 26,58 mW/(m·K)
<u>Kecepatan Suara</u>	(gas, 27 °C) 330 m/s

## 2.6 Nitrogen (N<sub>2</sub>)

Nitrogen merupakan suatu merupakan gas diatomik, bukan logam yang stabil, lebih dikenal sebagai gas inert yang tidak berbau, berasa, dan beracun. Meskipun mudah terbakar, gas inert ini sangat sulit bereaksi dengan unsur atau senyawa lainnya. Gas inert mempunyai manfaat yang cukup potensial dalam berbagai sektor kehidupan. Manfaat-manfaat itu antara lain:

- Mengurangi atau menghilangkan nyala api atau ledakan.
- Meminimalkan terjadinya reaksi oksidasi.
- Digunakan pada proses metalurgi.
- Purgung dan blanketing tangki penyimpanan.
- Pengapalan LNG dan minyak mentah.
- Mengontrol oksidasi selama proses pengelasan.

Pada proses pembakaran, gas inert yang banyak digunakan adalah nitrogen dan karbondioksida, karena kedua jenis gas ini mempunyai nilai panas jenis ( $C_p$ )

yang tinggi ( $C_p.CO_2 = 37,564 \text{ J/mol K}$  dan  $C_p.N_2 = 28,98 \text{ J/ mol K}$ ) sehingga lebih mudah menyerap panas dibandingkan dengan gas inert lain. Dalam penelitian ini, gas inert yang digunakan adalah gas nitrogen.

Nitrogen ditemukan oleh kimiawan dan fisikawan Daniel Rutherford di tahun 1772. Dia memisahkan oksigen dan karbon dioksida dari udara dan menunjukkan gas yang tersisa tidak menunjang pembakaran atau makhluk hidup. Gas nitrogen ( $N_2$ ) terkandung sebanyak 78,1% di udara. Dari atmosfer bumi, gas nitrogen dapat dihasilkan melalui proses pencairan (*liquefaction*) dan distilasi fraksi. Nitrogen ditemukan pada makhluk hidup sebagai bagian senyawa-senyawa biologis.

Pelepasan nitrogen yang begitu banyak dalam suatu ruang tertutup akan dapat menyebabkan bahaya asphyxiation karena proporsi oksigen yang dihirup akan menjadi berkurang. Bila nitrogen dihirup pada tekanan lebih dari 3 atm, nitrogen akan bersifat sebagai zat anestetik, sehingga akan dapat menyebabkan nitrogen narcosis, yaitu kondisi tak dapat merasakan bagian tubuh sebagian. Nitrogen juga dapat melarut di aliran darah, sehingga mengakibatkan dekompresi ketika gelembung nitrogen terbentuk di aliran darah, hal ini seperti fenomena yang dialami penyelam ketika terlalu cepat muncul ke permukaan atau astronot yang terlalu cepat masuk ke ruang dalam pesawat ulang alik setelah berada di kabin pressure.

**Tabel 2.3** Properti Fisik Nitrogen

Ciri-ciri Fisik	
Fase	Gas
Massa Jenis	(0 °C; 101,325 kPa)
Titik Lebur	1.251 g/L 63.15 K
Titik Didih	(-210.00 °C, -346.00 °F) 77.36 K
Titik Kritis	(-195.79 °C, -320.42 °F) 126.21 K, 3.39 MPa
Kalor peleburan	(N <sub>2</sub> ) 0.720 kJ/mol
Kalor penguapan	(N <sub>2</sub> ) 5.57 kJ/mol
Kapasitas kalor	(25 °C) (N <sub>2</sub> ) 29.124 J/(mol·K)
<u>Konduktivitas Termal</u>	(300 K) 25.83 mW/(m·K)
<u>Kecepatan Suara</u>	(gas, 27 °C) 353 m/s

## 2.7 Aplikasi *Counterflow Diffusion Flame*

Di dunia, kurang lebih 90% produksi energi didapatkan dari proses pembakaran. Mengingat bahwa sebagian besar proses pembakaran adalah menggunakan bahan bakar fosil yang merupakan sumber daya yang tidak dapat diperbaharui. *Counterflow diffusion flame* atau biasa juga dikenal sebagai *opposed jet diffusion flame* saat ini dikembangkan dalam perkembangan teknik pembakaran. Dimana kondisi api yang stabil, temperatur yang tinggi, polusi yang rendah, dan penggunaan bahan bakar yang efisien, serta diharapkan mendapatkan nyala api stagnasi (*stagnation flame*) dimana api melayang atau yang biasa disebut dalam keadaan *lift off* akan membuat api yang tidak merusak nosel penyembur bahan bakar dan juga oksidatornya. Keadaan nyala api stagnasi dapat dilihat pada gambar 2.11.

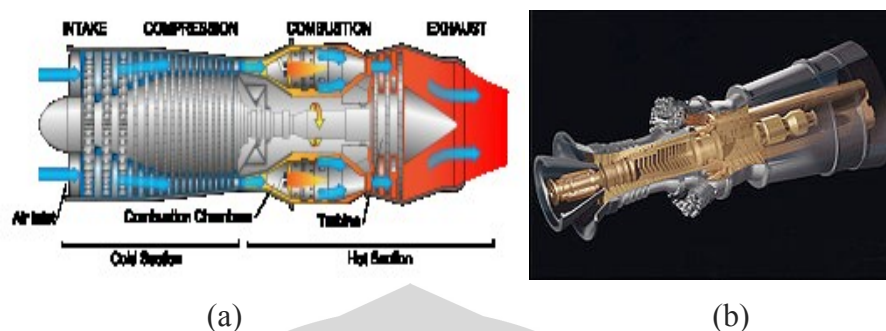


Gambar 2.11 Modus Nyala Api Stagnasi Pada Medan Aliran Berlawanan

Dalam perkembangannya, *Counterflow diffusion flame* diharapkan dapat menggantikan teknik pembakaran klasik, baik itu *engines combustion (internal combustion and external combustion)* dan pembakaran pada *burner* yang digunakan industri.

*Counterflow diffusion flame* mungkin dapat diaplikasikan kedalam beberapa bidang yang menggunakan jasa proses pembakaran sebagai energi utama, contohnya pada *combustion chamber* atau ruang bakar pada mesin jet pesawat terbang, dan jenis-jenis diffusion burner seperti *rocket engines*, *diesel engines* atau *gas turbines* adalah suatu tantangan besar untuk beberapa

*combustion chambers* tersebut bila teknik ini dapat diterapkan pada mesin-mesin tersebut.



Gambar 2.12 (a) Turbin Gas Mesin Jet, (b) Turbin Gas Pembangkit Listrik

### 2.7.1 Gas Turbine

Sebuah turbin gas, juga disebut turbin pembakaran, adalah sebuah mesin berputar yang energi keluaran didapat dari sebuah aliran pembakaran gas. Turbin gas memiliki hulu kompresor digabungkan ke hilir turbin, dan sebuah ruang pembakaran (*combustion chamber*). Energi yang ditambahkan pada aliran gas di ruang bakar, di mana bahan bakar dicampur dengan udara dan dinyalakan. Dalam lingkungan tekanan tinggi pada ruang bakar, pembakaran bahan bakar akan meningkatkan temperatur. Produk pembakaran dipaksa ke bagian turbin. Di sini, kecepatan dan volume tinggi dari aliran gas diarahkan melalui nosel atas dari *blade* turbin itu, turbin yang berputar menggerakkan kompresor dan, untuk beberapa turbin, sebagai *output drive* mekanis mereka. Energi yang diberikan sampai dengan turbin berasal dari penurunan suhu gas buang.

Energi keluaran dalam bentuk daya poros, kompresi udara dan dorongan, atau dapat dikombinasikan, dan digunakan untuk daya pesawat, kereta api, kapal, atau generator.

Dibidang pembakaran eksternal telah digunakan untuk tujuan pembakaran yang menggunakan batu bara atau biomassa sebagai bahan bakar. Dimana hasil dari proses pembakarannya juga dapat diggunakan untuk menggerakkan turbin.

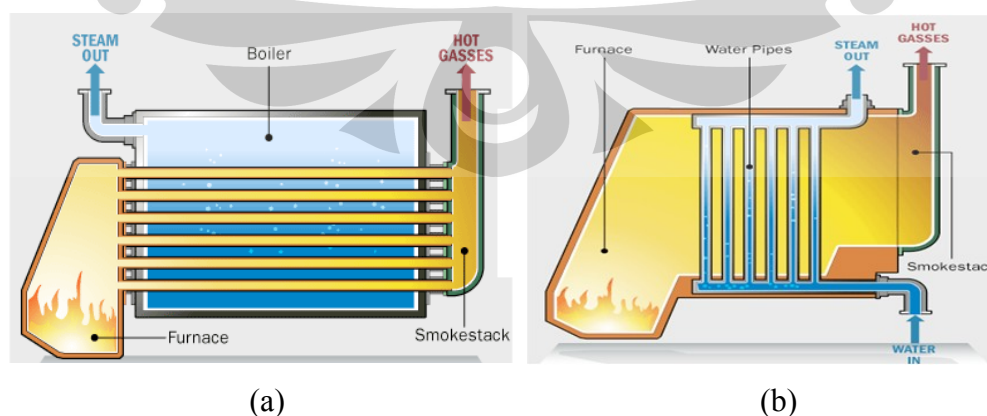
### 2.7.2 Industri Otomotif

Industri otomotif perlu terus berusaha meningkatkan mesin pembakaran internal, sehingga dapat memberikan efisiensi yang besar dan emisi polutan yang rendah. Dengan demikian teknik pembakaran *counterflow diffusion flame* dapat

menjadi solusi yang dapat dikembangkan dikemudian hari untuk *internal combustion*. Tapi mungkin perlu beberapa modifikasi pada suplai bahan bakar dan oksidator yang awalnya difusi diubah menjadi *premix*, dimana bahan bakar dan oksidator bercampur terlebih dahulu dan kemudian dilakukan pembakaran. Topologi api kemudian berturut-turut harus dipertimbangkan seperti: pengapian-otomatis, propagasi dari api *premix* depan dan akhirnya pembentukan nyala difusi. Tantangan dalam pemodelan pembakaran yang tepat adalah langkah difusi, dimana nilai perbedaan jenis (*heterogeneities*) tinggi muncul antara bahan bakar dan senyawa oksidator mendorong rentang suhu yang besar. Sebagai struktur nyala akhir *non-premixed*, tahap terakhir dari proses ini akan mendukung pembentukan hidrokarbon terbakar. Hal-hal terkait yang menarik khususnya untuk industri otomotif karena norma-norma lingkungan masa depan. Perlunya sebuah model yang disederhanakan mewakili langkah terakhir ini yaitu *laminar counterflow diffusion flame*. [18]

### 2.7.3 Boiler Burner

Sumber panas untuk boiler adalah proses pembakaran dari setiap beberapa bahan bakar, seperti kayu, batubara, minyak, atau gas alam. Bila teknik pembakaran yang digunakan menggunakan metode *Counter Diffusion Flame* tentu saja menggunakan bahan bakar gas. Proses pembakaran akan menghasilkan panas yang akan digunakan untuk memanaskan air dalam *boiler*. *Boiler* yang cocok adalah *water tube boiler* karena ruang bakar yang cukup luas dan cakupan permukaan yang terkena panas pun luas.



Gambar 2.13 (a) *Fire-tube Boiler*, (b) *Water-tube Boiler*

## **BAB 3**

### **PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN**

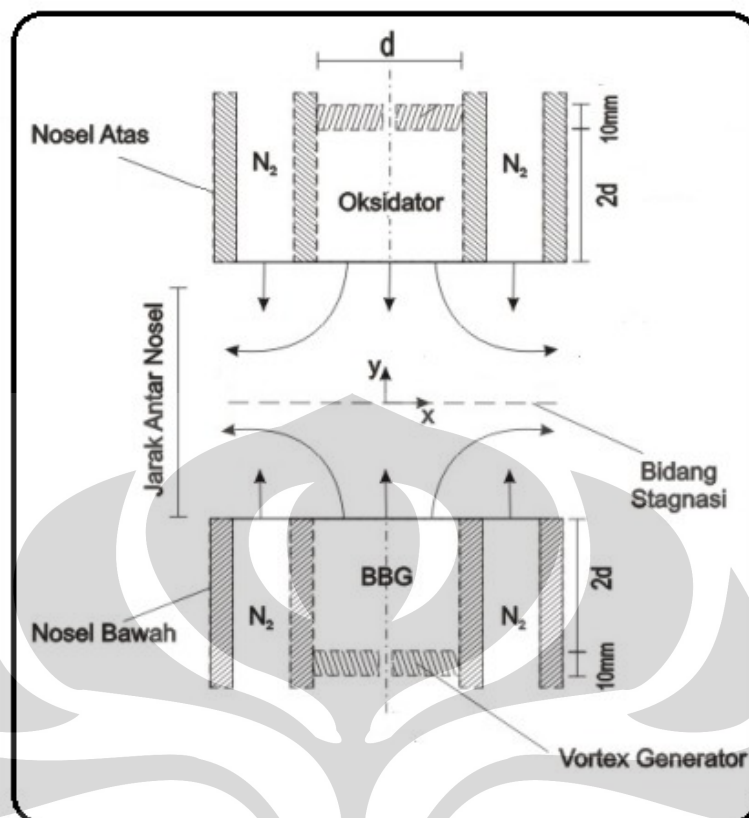
Penelitian mengenai nyala difusi pada medan aliran berlawanan ini merupakan kelanjutan dari penelitian sebelumnya, yang telah meneliti mengenai limit stabilitas nyala difusi pada medan aliran berlawanan dengan penambahan satu arah *co-flow* nitrogen dari arah bahan bakar dan menggunakan variasi diameter dalam nosel bahan bakar dan udara pada  $\varnothing 18.5$  mm,  $\varnothing 8.5$  mm dan  $\varnothing 5.5$  mm, kemudian pada tiap diameter tersebut dilakukan variasi perbandingan jarak antara nosel dan diameter dalam nosel ( $L/d$ ) dengan rasio 2.7, 2.43, dan 2.16.

Sementara dalam penelitian kami kali ini, kami akan membahas mengenai pengaruh penambahan *co-flow* pada setiap nosel bahan bakar maupun nosel oksidator terhadap karakteristik nyala tersebut. Agar pengaruh penambahan *co-flow* pada karakteristik nyala tersebut dapat diidentifikasi dengan tepat, maka rasio antara debit nitrogen ( $N_2$ ) yang keluar dari arah oksidator diatur sedemikian rupa sehingga menyamai debit oksidator. Sedangkan debit *co-flow* nitrogen yang keluar dari arah bahan bakar menggunakan rasio penelitian sebelumnya dimana  $(Q_{N_2}/Q_{C_3H_8}) = 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60$ .

### **3.1 Peralatan Penelitian**

#### **3.1.1 Peralatan Penelitian**

Proses pengamatan karakteristik nyala ini dilakukan dengan memasang *vortex generator* sejauh 2 kali diameter nosel dan diletakkan di tiap masing-masing pasangan nosel tersebut.



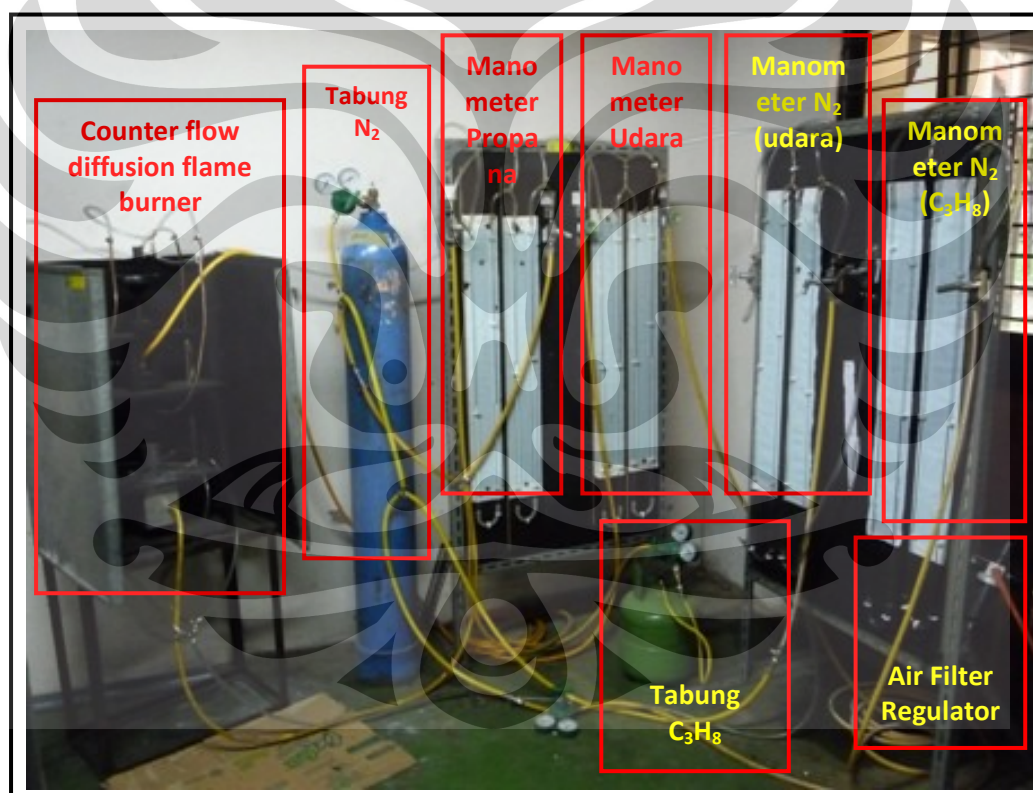
Gambar 3.1 Skematik nosel yang digunakan

Pada penelitian ini, pengamatan dilakukan terhadap pola nyala yang terjadi dengan adanya *vortex generator* pada kedua nosel yang terletak simetris sehingga didapat titik tertentu dimana kestabilan nyala terjadi. Pada nosel sisi atas, digunakan udara kompresor yang berfungsi sebagai oksidator dan nitrogen sebagai *co-flow* yang dimaksudkan untuk menyelubungi udara. Dalam hal ini, baik udara dari kompresor, maupun nitrogen mengalir melewati manometer tabung-U sebelum masuk ke dalam nosel. Pada bagian atas nosel, terdapat ruang berisi bola-bola baja dengan diameter bola = 4 mm sebagai *honeycomb* yang berfungsi untuk membuat aliran udara seragam sebelum akhirnya masuk ke dalam nosel besar. Sedangkan nitrogen masuk melalui samping nosel tanpa melalui *honeycomb*.

Sedangkan, pada nosel sisi bawah, jenis noselnya adalah nosel *co-flow* dengan aliran dalam digunakan sebagai suplai bahan bakar, dan aliran luar

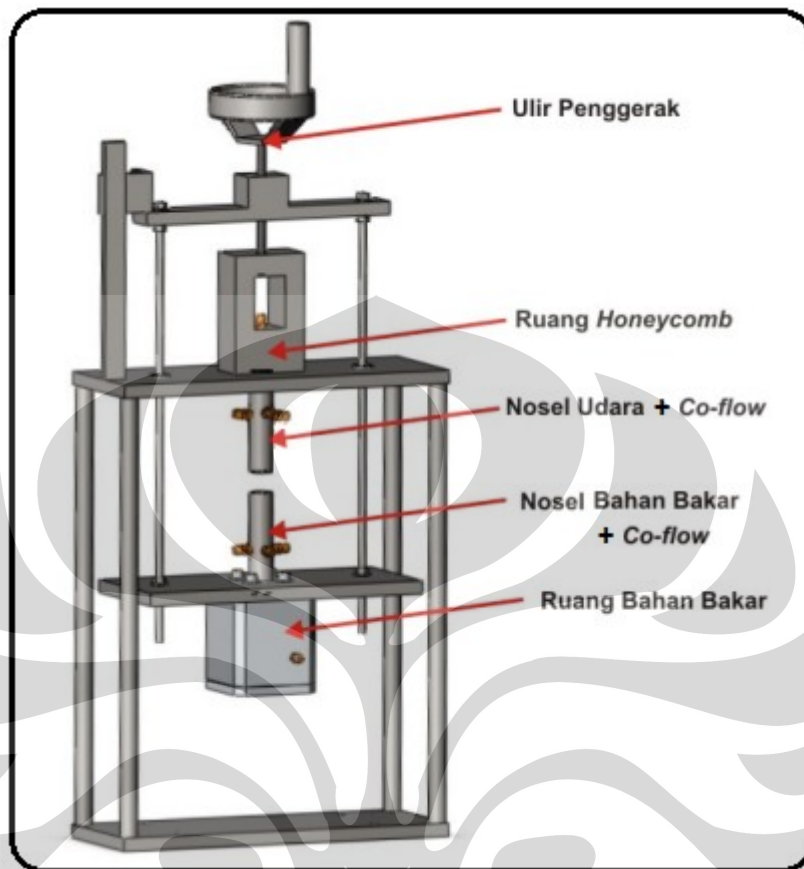


(annulus) digunakan sebagai aliran gas nitrogen ( $N_2$ ). Dalam hal ini, propana sebagai bahan bakar mengalir melewati manometer tabung-U dan *mixing chamber* sebelum masuk ke dalam nosel besar. Tapi pada penelitian ini *mixing chamber* tersebut tidak difungsikan sebagai tempat pencampuran bahan bakar dan udara, ataupun nitrogen, karena penelitian yang dilakukan adalah mengenai nyala difusi. Gas nitrogen, sebagai gas penyelubung, juga dialirkan terlebih dahulu melalui manometer tabung-U sebelum masuk ke dalam nosel *co-flow*. Peralatan yang dipakai untuk mempelajari nyala difusi pada medan aliran berlawanan secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.3 di bawah ini. Secara garis besar peralatan penelitian ini terdiri dari sistem suplai udara-bahan bakar, sistem suplai nitrogen untuk nosel *co-flow* dan *counterflow burner* yang terdiri dari 2 nosel yang diletakkan berlawanan secara vertikal dan simetris.



Gambar 3.2 Peralatan eksperimen nyala api difusi pada aliran berlawanan

### 3.1.1.1 Konfigurasi Detail Alat Pembakar



Gambar 3.3 Konfigurasi alat pembakar

a. Nosel udara & nosel *co-flow*

Bahan : Baja karbon tinggi (S50C)

Panjang : 115 mm

Fungsi : Sebagai tempat untuk mengalirnya udara sebelum mencapai tempat pencampuran.

Diameter dalam nosel yang digunakan adalah  $\varnothing 18.5$  mm,  $\varnothing 8.5$  dan  $\varnothing 5.5$  mm. Untuk lebih jelasnya (lihat gambar 3.4) mengenai detail dari nosel yang digunakan.



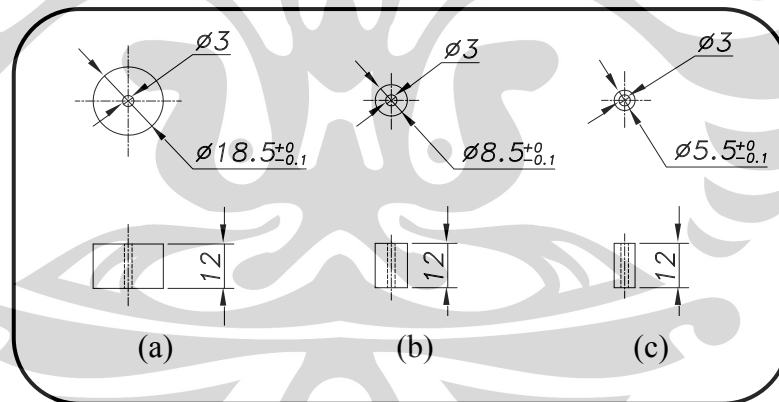
Gambar 3.4 Nosel

b. *Vortex generator*

Bahan : Baja karbon tinggi (S50C)

Panjang : 12 mm

Fungsi : Untuk meningkatkan turbulensi pada aliran bahan bakar dan udara.



Gambar 3.5 *Vortex generator* untuk (a)  $d = \text{Ø}18.5 \text{ mm}$ , (b)  $d = \text{Ø}8.5 \text{ mm}$ , (c)  $d = \text{Ø}5.5 \text{ mm}$

## c. Ruang bahan bakar

Bahan : Aluminium

Fungsi : Sebagai tempat penampungan bahan bakar sebelum masuk nosel

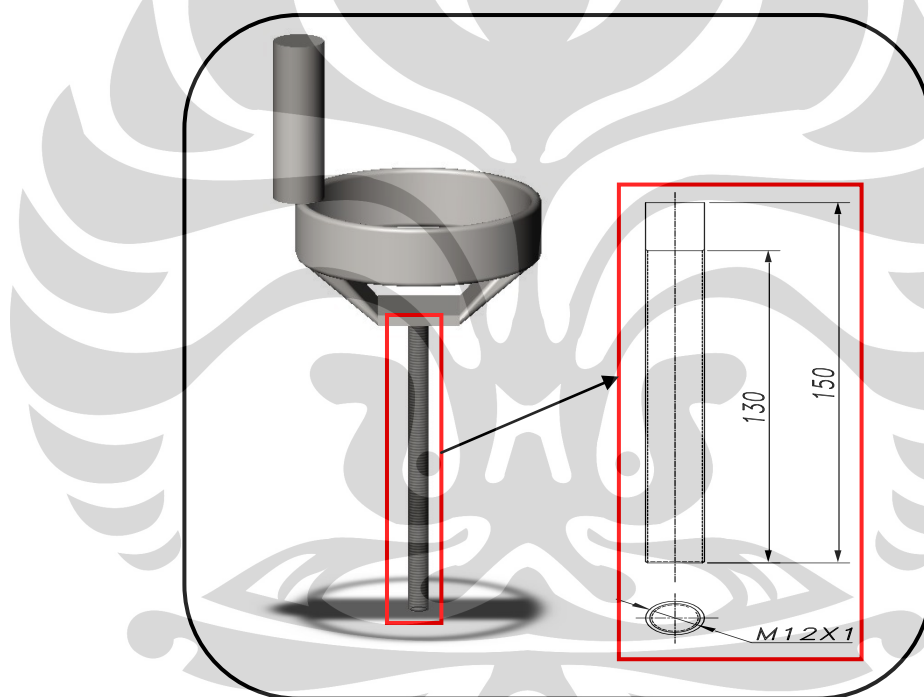
d. Ruang *honeycomb*

Bahan : Baja karbon tinggi (S50C)

Ukuran : 84 x 51 x 23  
 Fungsi : Untuk membuat aliran udara menjadi seragam sebelum akhirnya masuk ke dalam nosel besar. Di dalamnya berisi bola-bola baja (*honeycomb*) dengan diameter 4 mm.

e. Ulir penggerak

Bahan : Baja karbon tinggi (S50C)  
 Ukuran : M12x1, dan panjang = 150 mm  
 Fungsi : Sebagai penggerak, yang digunakan untuk mengatur jarak ( $L$ ) antara nosel bahan bakar dan udara.

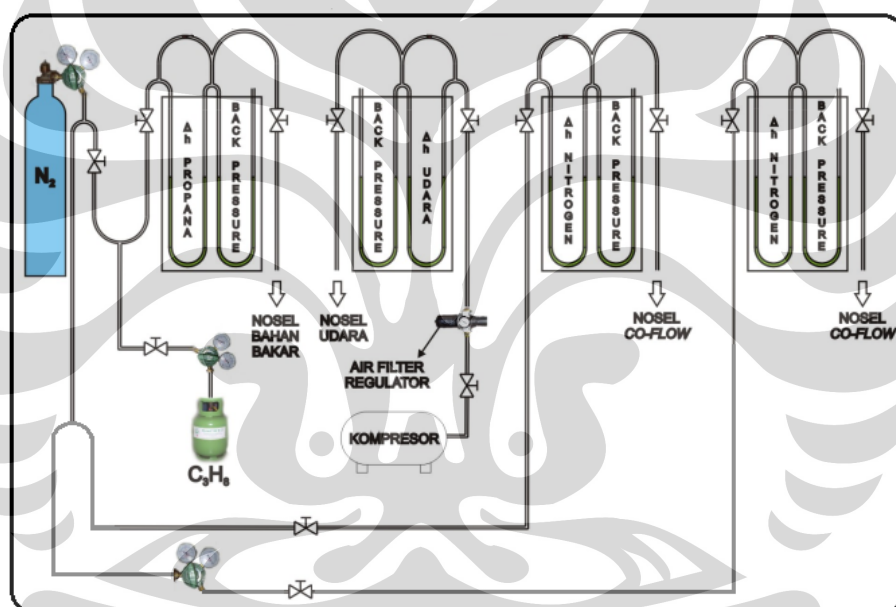


Gambar 3.6 Ulir penggerak

### 3.1.1.2 Sistem Suplai Bahan Bakar, Udara dan Gas Nitrogen

Sistem ini berfungsi untuk mengatur besarnya debit/aliran bahan bakar, udara dan gas nitrogen yang akan dialirkan menuju *burner*. Sistem suplai bahan bakar, udara, dan nitrogen ini terdiri dari 4 pasang manometer tabung U yang masing-masing dilengkapi dengan sepasang katup jarum (*needle valve*) untuk bahan bakar dan nitrogen, sedangkan untuk suplai udara menggunakan *gate valve*. Untuk sepasang manometer yang digunakan sebagai pengatur debit aliran bahan bakar dan pengatur *back*

*pressure*, mempunyai ukuran panjang 1000 mm, terbuat dari pipa *acrylic* diameter 11 mm. Sepasang manometer yang kedua digunakan sebagai pengatur debit aliran udara dan pengatur *back pressure*, mempunyai panjang 1000 mm, juga terbuat dari pipa *acrylic* dengan diameter 11 mm. Sedangkan dua pasang manometer yang terakhir digunakan sebagai pengatur debit aliran gas nitrogen yang akan menuju nosel *co-flow*, mempunyai panjang 1000 mm dengan diameter 8 mm. Alat ini juga dilengkapi dengan orifis dengan berbagai ukuran diameter mulai dari 0.8 mm sampai 2.0 mm, yang pemakaiannya disesuaikan dengan kebutuhan penelitian. Gambar skematik sistem suplai udara, bahan bakar dan nitrogen pada manometer tabung-U ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Skematik peralatan eksperimen nyala api difusi pada aliran berlawanan dengan penambahan co-flow

### 3.1.2 Peralatan Penelitian Modus Nyala

Pada penelitian untuk mengetahui modus nyala api stabil ini, kami menggunakan kamera digital Panasonic DMC-FS20 ini digunakan dalam penelitian untuk mendapatkan gambar modus nyala api (flame mode).

Berikut ini adalah spesifikasi teknis dari kamera yang digunakan dalam penelitian:

**Tabel 3.1** Spesifikasi Kamera Digital Panasonic DMC-FS20

Jenis	Ultra Compact
Megapixels	10 Megapixels
Rasio Cetak	4:3, 16:9, 3:2
Format File	JPEG
Kartu memori penyimpanan	SD, SDHC
Pembesaran (zoom)	4x
Focal length equivalent	30 - 120mm
Kecepatan pengambilan gambar	8 hingga 1/2000 detik, untuk mode Starry Sky: 15, 30, 60 detik.
Celah lensa	Lebar: F3.3 / F8.0 Jauh: F5.8 / F
Sensitifitas	Auto / 100 / 200 / 400 / 800 / 1600 (High Sensitivity Mode: Auto (1600-6400))
Pengaturan <i>white balance</i>	<i>Auto / Daylight / Cloudy / Shade / Halogen / White Set</i>
Kompensasi eksposur	-2EV to +2EV (in 1/3EV steps)
Mode pencari gambar	Tidak tersedia
Lebar layar LCD	3 inci
Mode Flash	<i>Auto, Auto/Red-eye Reduction, Forced On, Forced Off</i>
Jangkauan Flash	6,3 m
Fitur mode pengambilan gambar	<i>Portrait, Soft Skin, Scenery, Sports, Night Portrait, Night Scenery, Self-Portrait, Food, Party, Candle Light, Fireworks, Starry Sky, Beach, Aerial Photo, Snow, High Sensitivity, Baby 1&amp;2, Sunset, Pet, Hi-Speed Burst</i>
Maksimum resolusi movie	848 x 480 pixels
Maksimum movie frame per detik	30 frame per detik
Maksimum durasi pengambilan movie	Tergantung kapasitas kartu memori
Fokus besar (macro)	10 cms
Pengukuran	Multiple Intelligent
Pengaturan manual	Tidak tersedia
Stabilisasi gambar	Tersedia
Konverter lensa	Tidak tersedia
Self timer	10 detik atau 2 detik
Video out	Terdapat
Penghubung ke komputer	Terdapat
Batere	Lithium Ion

Dimensi	94.9 x 57.1 x 22.9 mm
Berat	132 gram

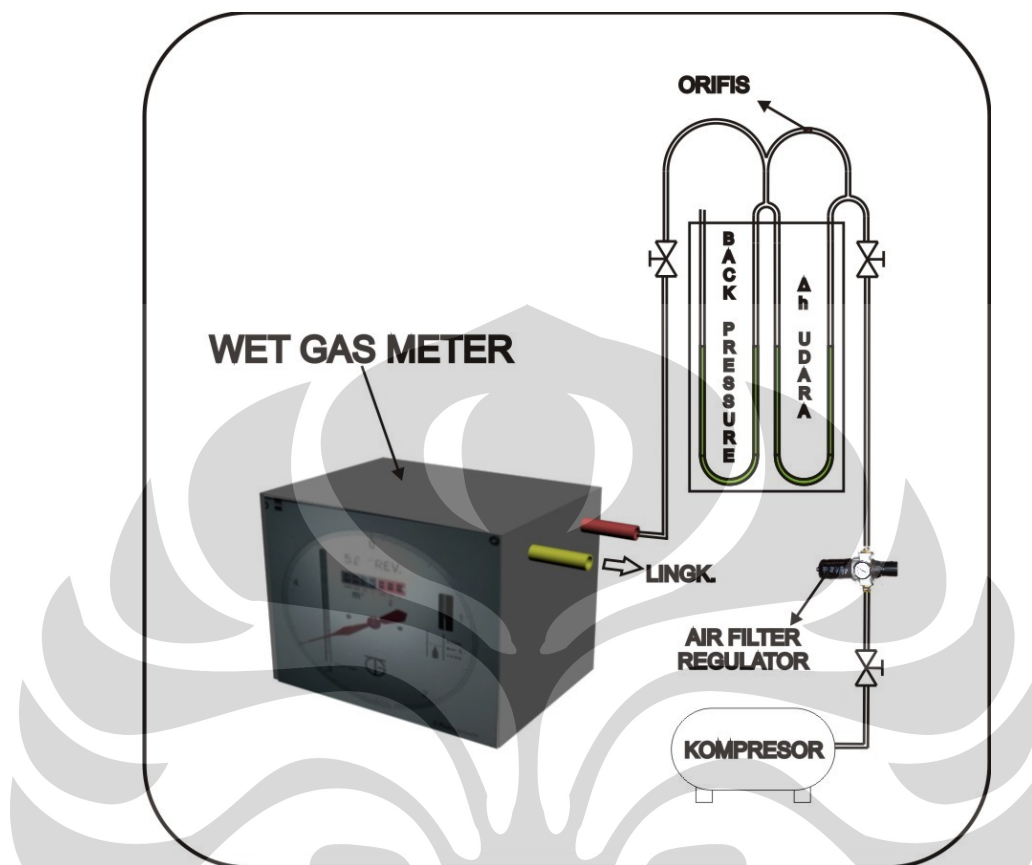


Gambar 3.8 Kamera Digital Panasonic DMC-FS20

### 3.2 Prosedur Penelitian

Dalam melakukan suatu pekerjaan eksperimental, prosedur mengenai hal-hal yang akan dilakukan berkaitan dengan pengaturan alat ukur, kalibrasi dan pengambilan data harus dimengerti dan dilaksanakan dengan benar. Hal itu bertujuan untuk keselamatan, menghindari kerusakan alat, dan juga pembuangan waktu karena kesalahan dalam pengambilan data. Untuk itu, berikut ini merupakan tahapan prosedur-prosedur dalam melakukan penelitian *counter flow diffusion flame with double co-flow*.

### 3.2.1 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Udara

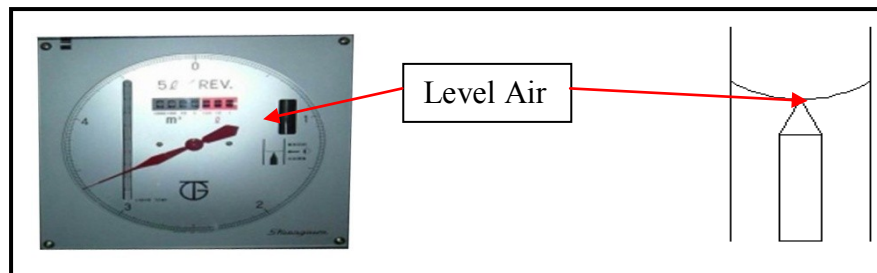


Gambar 3.9 Skema kalibrasi sistem suplai udara

Prosedur kalibrasi sistem suplai udara, yaitu:

1. Instalasi sistem dengan memasukan saluran udara ke dalam keluaran kompresor dan masukan manometer tabung-U.
2. Isi manometer tabung-U dengan air hingga mencapai angka 0-0 dan pasang orifis sesuai ukuran yang diinginkan untuk pengambilan data.
3. Isi *Wet Gas Meter* Shinagawa WE-2.5 A dengan air hingga level yang ditetapkan *manual book*.



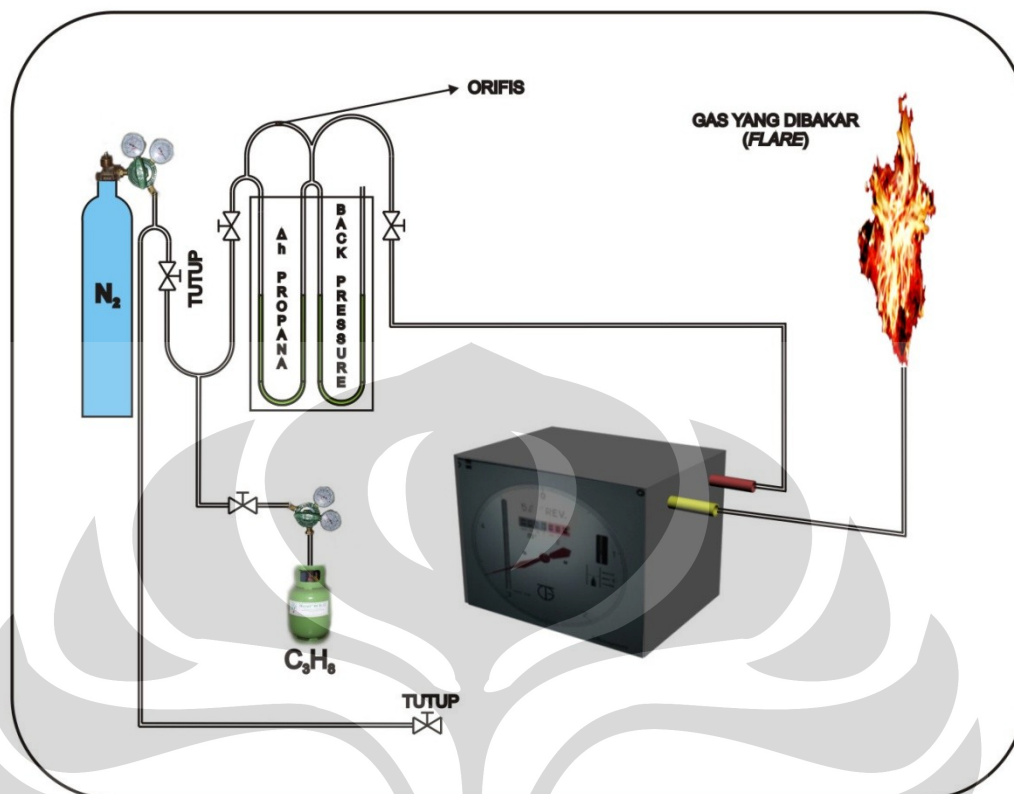


Gambar 3.10 Level air pada *Wet Gas Meter* Shinagawa WE-2.5A

4. Instalasi sistem dengan memasang keluaran manometer tabung-U ke masukan *Wet Gas Meter* Shinagawa dan pasang selang untuk keluaran fluida dari *Wet Gas Meter* Shinagawa.
5. Alirkan udara dari kompresor melewati manometer tabung-U dan tentukan nilai *back pressure* udara yang diinginkan.
6. Tentukan perbedaan ketinggian permukaan  $\Delta h$  dengan menyetel *needle valve* udara dan pertahankan nilai *back pressure* udara tetap konstan.
7. Tiap nilai *back pressure* udara, diambil data setiap kenaikan 100 mm pada manometer tabung-U dengan menggunakan variasi ukuran orifis mulai dari 0.8-2.00 mm.
8. Data yang didapat adalah volume udara yang mengalir dan waktu yang diperlukan dalam satu putaran penuh jarum *Wet Gas Meter* Shinagawa pada  $\Delta h$  tertentu. (volume udara, waktu,  $\Delta h$ ).

Pada penelitian kali ini, orifis yang digunakan pada sistem suplai udara adalah  $\varnothing 2$  mm dengan  $\Delta h$  *back pressure* = 300 mm.

### 3.2.2 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Bahan Bakar



Gambar 3.11 Skema kalibrasi sistem suplai bahan bakar

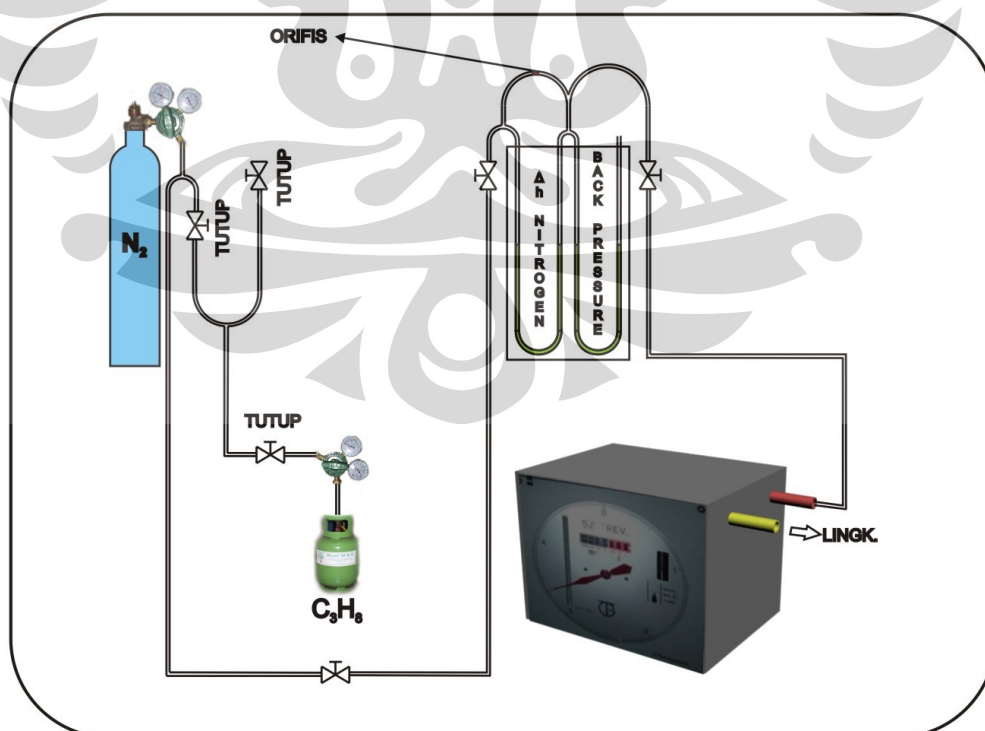
Adapun prosedur kalibrasi sistem suplai bahan bakar, yaitu:

1. Instalasi sistem dengan memasukkan saluran bahan bakar pada tabung bahan bakar dan masukan manometer tabung-U.
2. Isi manometer tabung-U dengan air hingga mencapai angka 0-0 dan pasang orifis sesuai ukuran yang diinginkan untuk pengambilan data.
3. Isi *Wet Gas Meter* Shinagawa WE-2.5 A dengan air hingga level yang ditetapkan *manual book*.
4. Instalasi sistem dengan memasang keluaran manometer tabung-U ke masukan *Wet Gas Meter* Shinagawa dan pasang selang untuk keluaran fluida dari *Wet Gas Meter* Shinagawa.
5. Alirkan bahan bakar keluar dari tabung dengan mengatur tekanan keluar 1-2  $\text{kg/cm}^2$  (dapat dilihat pada *pressure regulator*) dan tentukan nilai *back pressure* bahan bakar yang diinginkan.

6. Tentukan perbedaan ketinggian permukaan  $\Delta h$  dengan menyetel *needle valve* bahan bakar dan pertahankan nilai *back pressure* bahan bakar tetap konstan (Jangan lupa untuk membakar bahan bakar (*flare*) yang keluar dari *Wet Gas Meter* Shinagawa agar tidak terjadi akumulasi udara yang dapat mengakibatkan reaksi pembakaran jika terkena api atau terhirup karena melebihi ambang batas yang diperbolehkan).
7. Tiap nilai *back pressure* bahan bakar, diambil data tiap kenaikan  $\Delta h$  50 mm pada manometer tabung-U dengan menggunakan variasi ukuran orifis 0.8-2.0 mm.
8. Data yang didapat adalah volume bahan bakar yang mengalir dan waktu yang diperlukan dalam satu putaran penuh jarum *Wet Gas Meter* Shinagawa pada  $\Delta h$  tertentu. (volume bahan bakar, waktu,  $\Delta h$ ).

Pada penelitian kali ini, orifis yang digunakan pada sistem suplai bahan bakar adalah  $\varnothing$  0.8 mm dengan  $\Delta h$  *back pressure* = 300 mm.

### 3.2.3 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Nitrogen



Gambar 3.12 Skema kalibrasi sistem suplai nitrogen

Prosedur kalibrasi sistem suplai nitrogen adalah sebagai berikut.

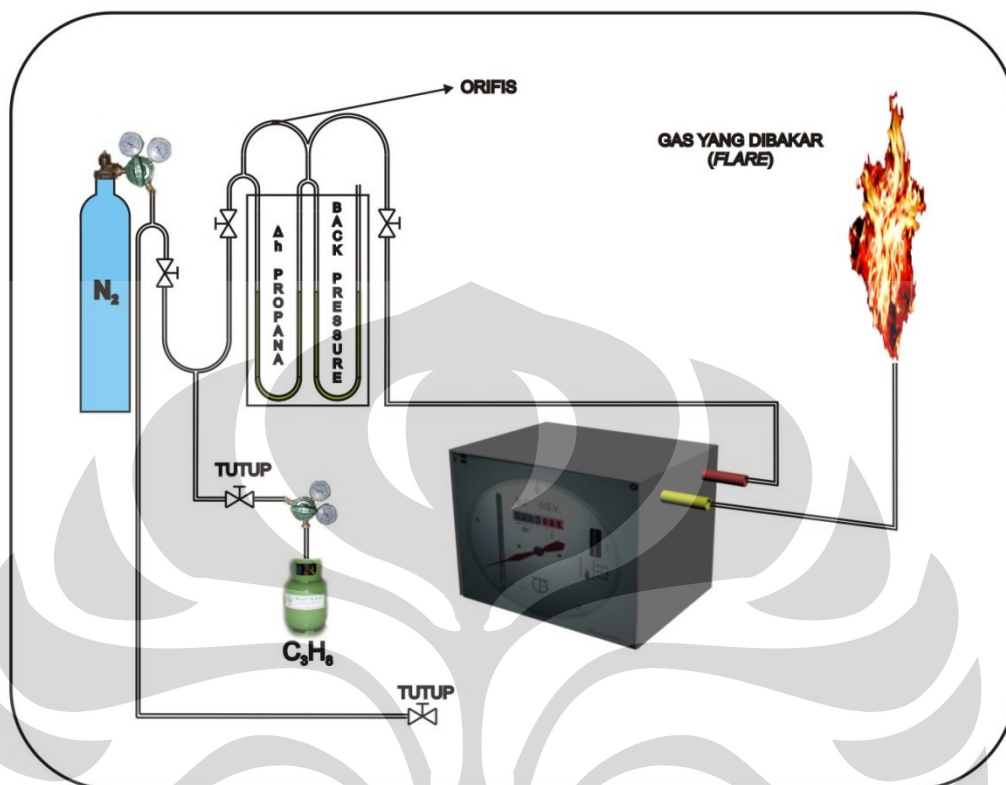
1. Instalasi sistem dengan memasukan saluran nitrogen ke tabung nitrogen dan masukan manometer tabung-U.
2. Isi manometer tabung-U dengan air hingga mencapai angka 0-0 dan pasang orifis sesuai ukuran yang diinginkan untuk pengambilan data.
3. Isi *Wet Gas Meter* Shinagawa WE-2.5 A dengan air hingga level yang ditetapkan *manual book*.
4. Instalasi sistem dengan memasang keluaran manometer tabung-U ke masukan *Wet Gas Meter* Shinagawa dan pasang selang untuk keluaran fluida dari *Wet Gas Meter* Shinagawa.
5. Alirkan nitrogen dari tabung dengan mengatur tekanan keluar 1-2 kg/cm<sup>2</sup> untuk kemudian melewati manometer tabung-U lalu tentukan nilai *back pressure* nitrogen yang diinginkan.
6. Tentukan perbedaan ketinggian permukaan  $\Delta h$  dengan menyetel *needle valve* nitrogen dan pertahankan nilai *back pressure* nitrogen tetap konstan.
7. Tiap nilai *back pressure* nitrogen, diambil data setiap kenaikan 100 mm pada manometer tabung-U dengan menggunakan variasi ukuran orifis mulai dari 0.8-2.00 mm. Pada penelitian ini, digunakan 2 buah orifis yang berbeda ukurannya agar rasio yang diinginkan tercapai.
8. Data yang didapat adalah volume nitrogen yang mengalir dan waktu yang diperlukan dalam satu putaran penuh jarum *Wet Gas Meter* Shinagawa pada  $\Delta h$  tertentu. (volume nitrogen, waktu,  $\Delta h$ ).

Pada penelitian kali ini, orifis yang digunakan pada sistem suplai bahan bakar adalah  $\varnothing$  1 mm untuk nitrogen dari arah bahan bakarm dan  $\varnothing$  1,2 mm untuk nitrogen dari arah udara dengan  $\Delta h$  *back pressure* = 300 mm.

### 3.2.4 Prosedur Purguing

Proses *purguing* merupakan proses pembersihan seluruh sistem suplai saluran bahan bakar dari udara. Proses ini dilakukan sebelum dan sesudah melakukan kalibrasi sistem saluran bahan bakar dengan mengalirkan gas nitrogen masuk ke

dalam sistem tersebut untuk memastikan tidak adanya udara yang dapat mengakibatkan reaksi pembakaran terjadi.



Gambar 3.13 Skema proses purging

Prosedur-prosedur dalam melakukan proses *purging*, yaitu:

1. Tutup saluran bahan bakar yang masuk ke dalam manometer tabung-U sebelum dan sesudah melakukan kalibrasi sistem saluran bahan bakar.
2. Buka saluran nitrogen yang masuk ke dalam manometer tabung-U dengan cara membuka penuh tekanan keluar pada tabung. (Pastikan terlebih dahulu bahwa *needle valve* untuk mengatur masuknya fluida pada manometer tabung-U bahan bakar dalam keadaan tertutup).
3. Atur tekanan nitrogen yang masuk ke dalam manometer tabung-U sebesar 1-2  $\text{kg/cm}^2$ . Pembacaan angka ini dapat ditunjukkan pada *pressure regulator*.
4. Buka *needle valve back pressure* pada manometer tabung-U secara penuh dan *needle valve*-nya secara perlahan.

5. Lakukan *purging* dengan mengalirkan nitrogen pada sistem suplai bahan bakar sebanyak 3x putaran penuh pada penunjukan jarum *Wet Gas Meter* Shinagawa dengan disertai dengan membakar bahan bakar (*flare*) sampai padam untuk memastikan bahwa tidak adanya sisa udara yang dapat tercampur pada saat kalibrasi sistem suplai bahan bakar.
6. Tutup saluran nitrogen yang masuk ke dalam manometer tabung-U serta katup pada tabung nitrogen.
7. Kemudian lepaskan tekanan pada pressure regulator dengan membuka *needle valve* yang masuk ke dalam manometer tabung-U.
8. Setelah *level* air pada manometer menunjukkan angka 0-0, lepaskan seluruh instalasi yang berhubungan dengan *Wet Gas Meter* Shinagawa.

### 3.3 Prosedur Pengambilan Data

#### 3.3.1 Persiapan Awal

Medapatkan data *extinction* untuk limit stabilitas nyala api difusi propana [referensi: skripsi "karakteristik stabilisasi nyala api difusi propana pada medan aliran berlawanan."]

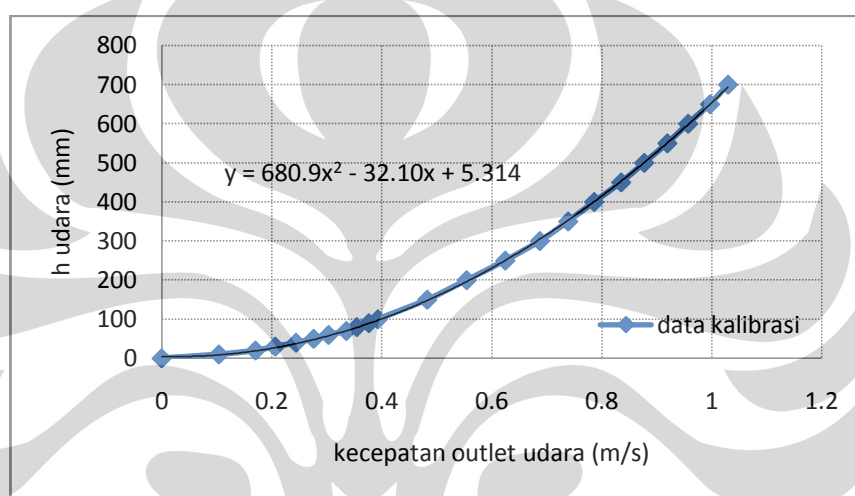
Pengukuran modus nyala api untuk nyala stabil dilakukan dengan cara menetapkan bahwa kondisi nyala stabil berada pada 50 % di bawah kondisi *extinct* atau dengan kata lain setengah kali *fluks* momentum udara pada limit stabilitas nyalanya . Untuk debit nitrogen co-flow sisi udara disesuaikan dengan debit udara yang keluar, karena parameter yang penulis gunakan adalah debit nitrogen atas sama dengan debit udara yang dikeluarkan. Sementara untuk kondisi bahan bakar dan nitrogen sisi bahan bakarnya nya tidak berubah, mengikuti sesuai pengambilan data stabilitas nyala.

Setelah diketahui fluks momentum udara nyala stabilnya, maka yang perlu diketahui adalah nilai  $\Delta h$  manometer udaranya sehingga didapat nyala stabil untuk bereksperimen mengambil modus nyala stabil. Langkah-langkah untuk mendapatkannya adalah sebagai berikut.

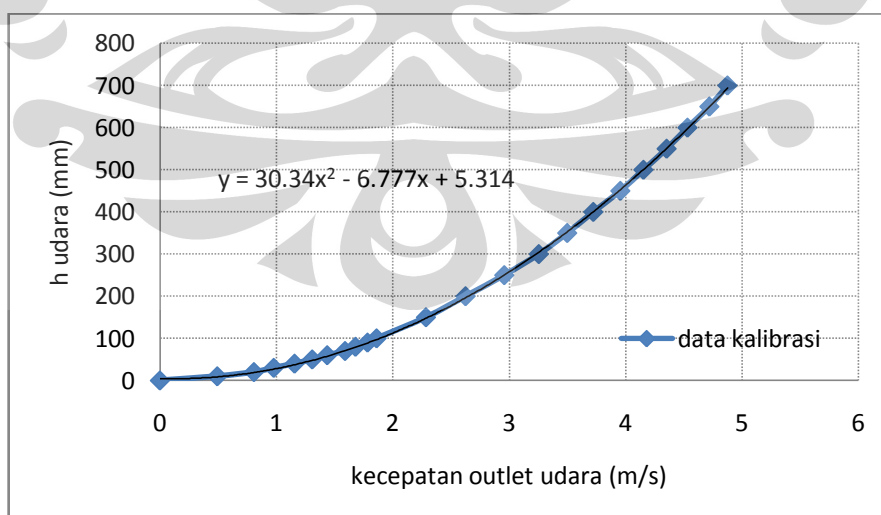
1. Fluks momentum tersebut dibagi dengan densitas udara ( $\rho$ ), sehingga didapat kuadrat kecepatan alirannya.

2. Dengan persamaan kalibrasi udara dan nilai kecepatan alirannya, diperoleh nilai  $\Delta h$  manometer udara. Dan kemudian didapatkan pula  $\Delta h$  nitrogen sisi udara.
3. Kemudian setelah itu, lakukan pengambilan modulusnya nyala stabil yang prosedurnya hampir sama dengan pengambilan data limit stabilitas nyala.

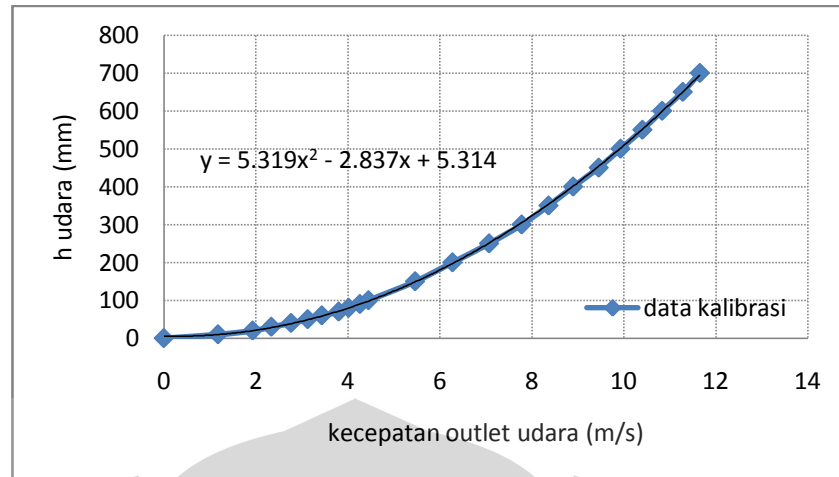
Berikut ini adalah persamaan yang dipakai untuk mengonversikan data mentah nyala stabil yang berupa data kecepatan udara menjadi  $\Delta h$  manometer udara.



Gambar 3.14 Kurva persamaan kalibrasi kecepatan udara ( $V_{udara}$ ) untuk diameter nosel =  $\varnothing 18.5$  mm

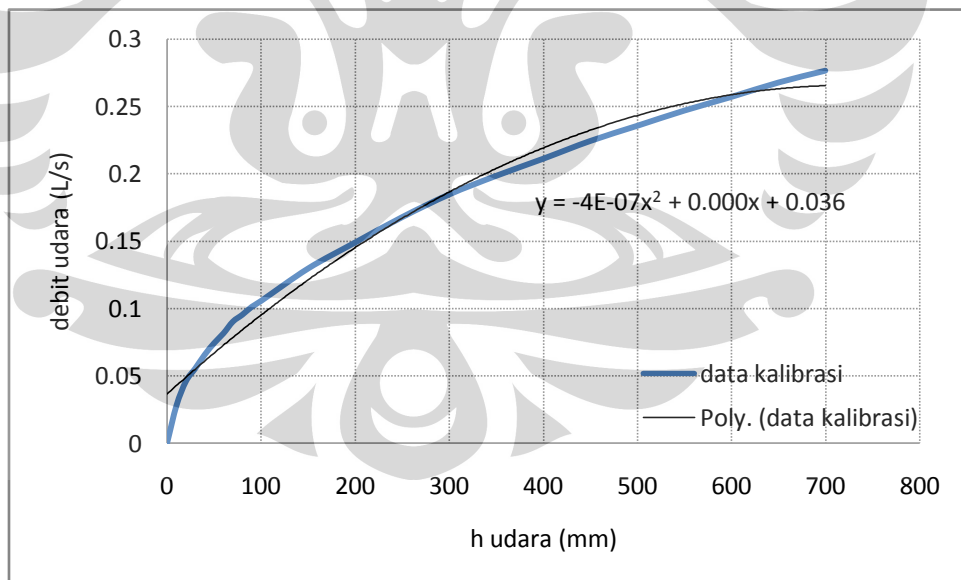


Gambar 3.15 Kurva persamaan kalibrasi kecepatan udara ( $V_{propana}$ ) untuk diameter nosel =  $\varnothing 8.5$  mm



Gambar 3.16 Kurva persamaan kalibrasi kecepatan udara ( $V_{propana}$ ) untuk diameter nosel =  $\varnothing 5.5$  mm

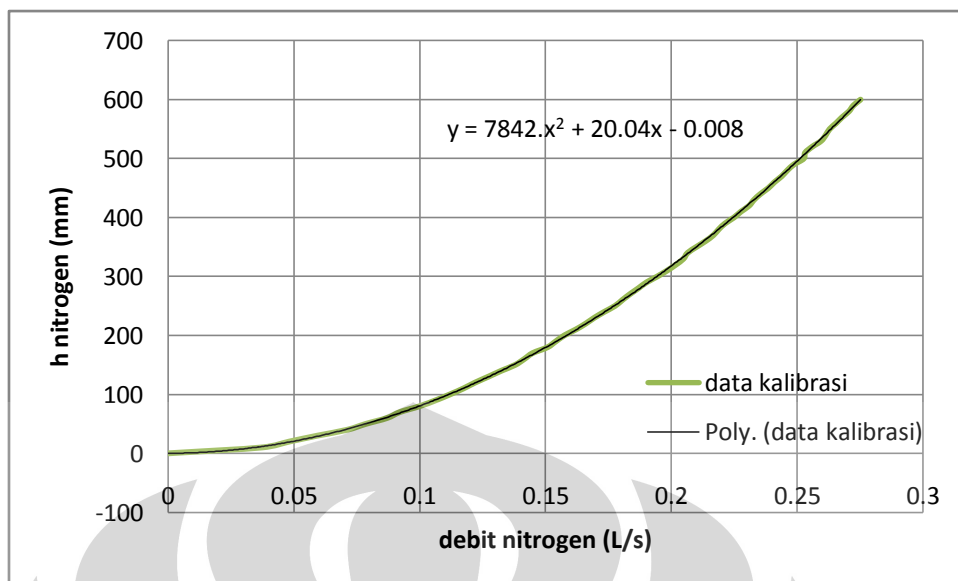
Setelah didapatkan  $\Delta h$  dari udara yang digunakan, kemudian mencari  $\Delta h$  dari nitrogen dari sisi udara. Untuk mendapatkan parameter tersebut, yang harus diketahui terlebih dahulu adalah berapa debit dari udara, karena dalam pengambilan data, debit nitrogen sisi udara sama dengan debit udara yang digunakan. Grafik dibawah ini digunakan untuk mengetahui debit udara yang digunakan dalam pengambilan data.



Gambar 3.17 Kurva persamaan kalibrasi debit udara

Setelah didapatkan debit udara maka didapatkan debit nitrogennya, dan kemudian mencari  $\Delta h$  dari nitrogen sisi udara dengan menggunakan kalibrasi debit nitrogen sisi udara dibawah ini.





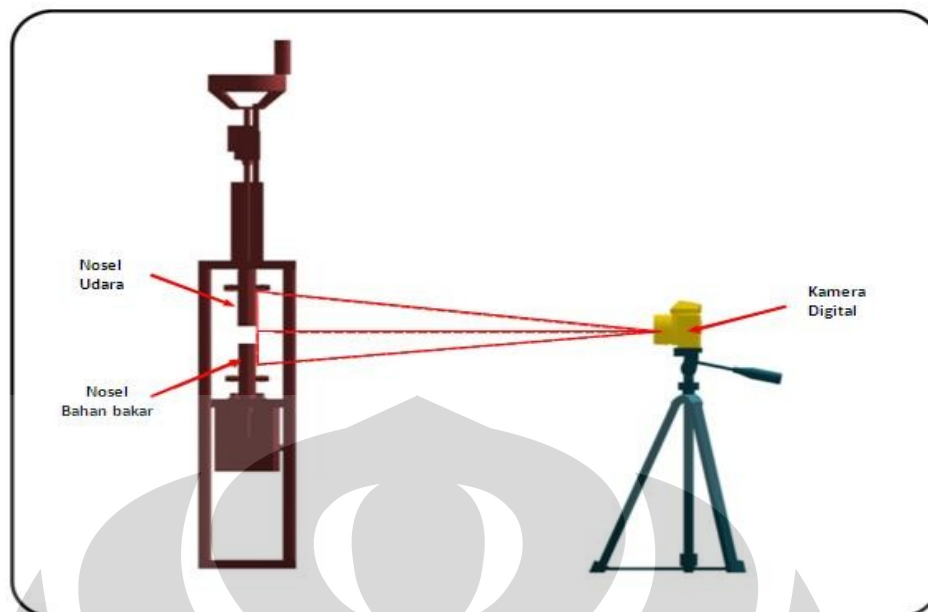
Gambar 3.18 Kurva persamaan kalibrasi debit nitrogen sisi udara

### 3.3.2 Prosedur Penelitian Modus Nyala

Delam melakukan suatu pekerjaan eksperimental, prosedur mengenai hal-hal yang akan berkaitan dengan pengaturan alat perekam (kamera) dan tripod. Proses pengambilan data harus dimengerti, dilakukan dengan benar dan hati-hati. Hal ini bertujuan untuk menghindari kerusakan alat, keselamatan, dan dapat menghindari pembuangan waktu jika terjadi kesalahan dalam pengambilan data.

Prosedur penelitian Modus Nyala Api Stabil (*Flame Mode*):

Pada penelitian mengenai visualisasi bentuk nyala api ini kami menggunakan kamera digital Panasonic DMC-FS20 sebagai media perekam. Sesuai dengan tujuan yang ingin diambil yaitu hanya mendapatkan modus atau bentuk atau pola dari nyala api itu saja.



Gambar 3.19 Skematik visualisasi dengan menggunakan kamera digital

Prosedur dari penelitian modus nyala api (*flame mode*) adalah sebagai berikut:

1. Memasang tripod tepat di depan burner, atur sedemikian rupa sehingga jarak lensa kamera berjarak kurang lebih 40 cm dari zona reaksi pembakaran.
2. Memasang kamera digital pada dudukan kamera di tripod.
3. Melakukan pembakaran api pada burner sesuai dengan prosedur pengambilan data limit stabilitas nyala, tetapi dengan kondisi nyala stabil.
4. Setelah nyala api didapatkan, maka proses perekaman dilakukan dengan format video MOV selama 5 detik.
5. Data mentah yang didapat adalah *file* video api berekstensi MOV.
6. Setelah melakukan pengambilan data maka dilakukan *purging*.
7. Mengonversi file video menjadi beberapa frame gambar untuk meneliti modus nyala apinya menggunakan *software* adobe premiere pro CS 4.

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam melakukan karakteristik nyala difusi counterflow ini, penulis melakukan analisa dengan menggunakan pendekatan fluks momentum, yaitu laju perubahan momentum persatuan luas. Hal ini didasarkan pada tipe aliran bahan bakar dan udara yang diuji yaitu tipe tabarakan aliran fluida. Dimana diketahui bahwa dalam fenomena ini terdapat beberapa variabel yang berperan diantaranya massa fluida sebagai korelasi dari sifat fluida (densitas) dan juga kecepatan fluida.

$$\tau = \rho v^2 \quad (4.1)$$

dimana:

$\tau$  = fluks momentum, (kg/ms<sup>2</sup>)

$\rho$  = kerapatan fluida, (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = kecepatan aliran fluida, (m/s)

Pada perhitungan fluks momentum ini, kerapatan (*density*) udara dan bahan bakar dianggap konstan, pada kondisi  $T_{\infty} = 300$  K dan  $P = 1$  atm = 101.325 Pa.

$$\rho_{\text{oksigen}} = 1.1614 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{propana}} = 1.854 \text{ kg/m}^3$$

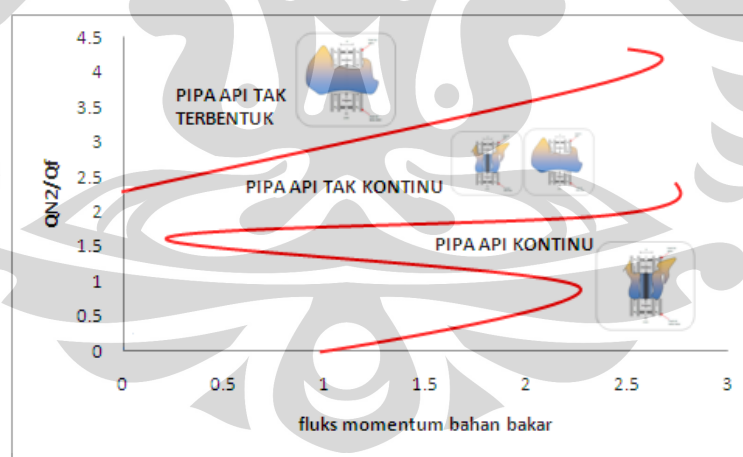
$$\rho_{\text{nitrogen}} = 1.138 \text{ kg/m}^3$$

(dari Ref. [2]. An Introduction to Combustion: Concepts and Application)

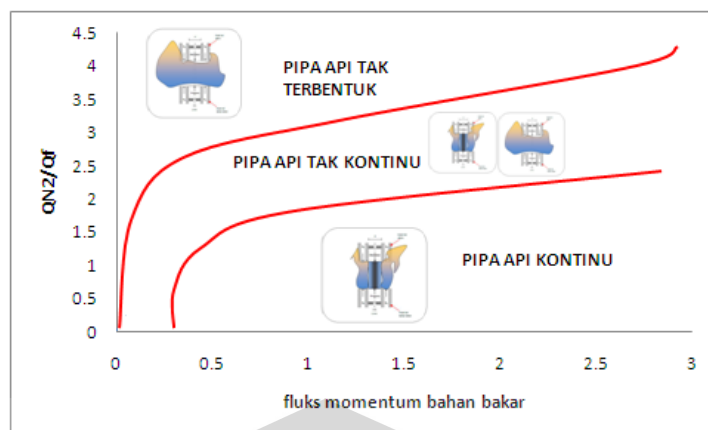
Penelitian modus nyala api dilakukan pada kondisi  $\Delta h$  udara stabil, yang ditentukan dimana kondisi stabil pada saat fluks momentum udara stabil adalah setengah kali fluks momentum udara pada kondisi *extinct*. Pada analisa modus nyala api ini, semua data dikelompokkan berdasarkan kesamaan antara parameter geometri (diameter nosel dan rasio L/d) dan rasio antara debit nitrogen dan debit bahan bakar. Hal yang dibahas di analisa modus nyala api ini adalah bentuk atau pola api yang tertangkap oleh kamera, kamera yang digunakan adalah kamera digital Panasonic DMC-FS20.

#### 4.1 Modus nyala api nosel diameter 5,5 mm

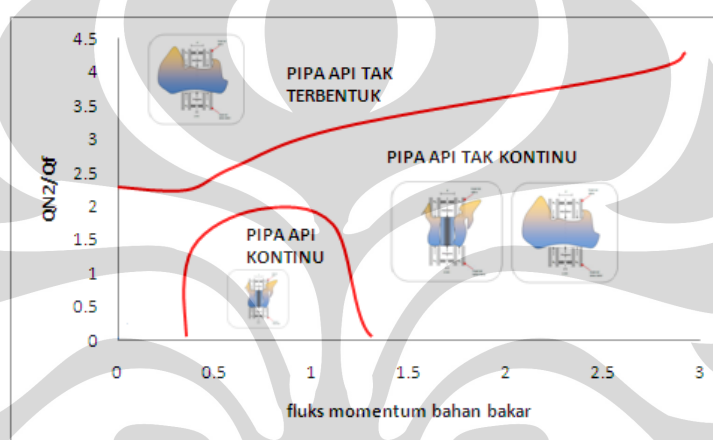
Setelah dilakukan penelitian sesuai prosedur yang telah dituliskan pada bab sebelumnya, maka data kemudian dilihat pola bentuk nyala api yang terjadi untuk kemudian dianalisa. Pengelompokannya berdasarkan geometrisnya, yaitu diameter dalam nosel dan rasio L/d. Berikut ini merupakan modus pola nyala api pada nosel diameter 5,5 mm.



Gambar 4.1 Modus nyala api nosel 5,5 mm dengan L/d 2,7



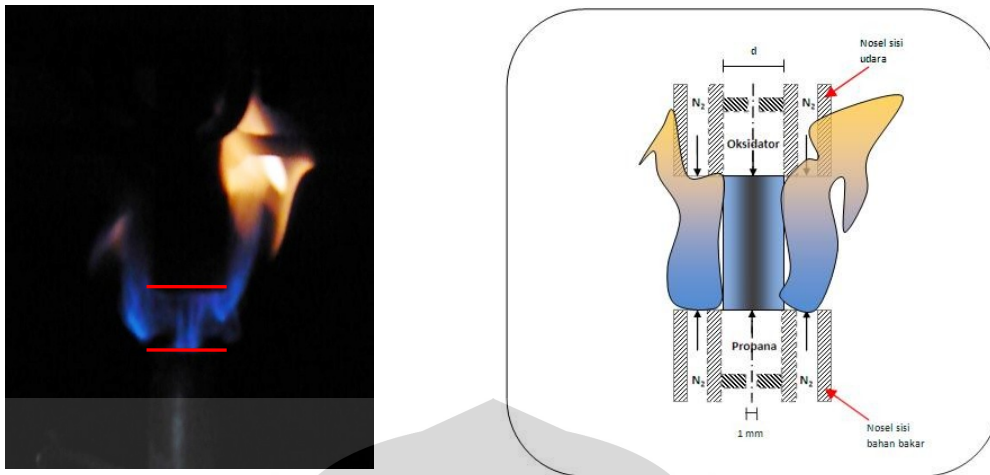
Gambar 4.2 Modus nyala api nosel 5,5 mm dengan L/d 2,43



Gambar 4.3 Modus nyala api nosel 5,5 mm dengan L/d 2,16

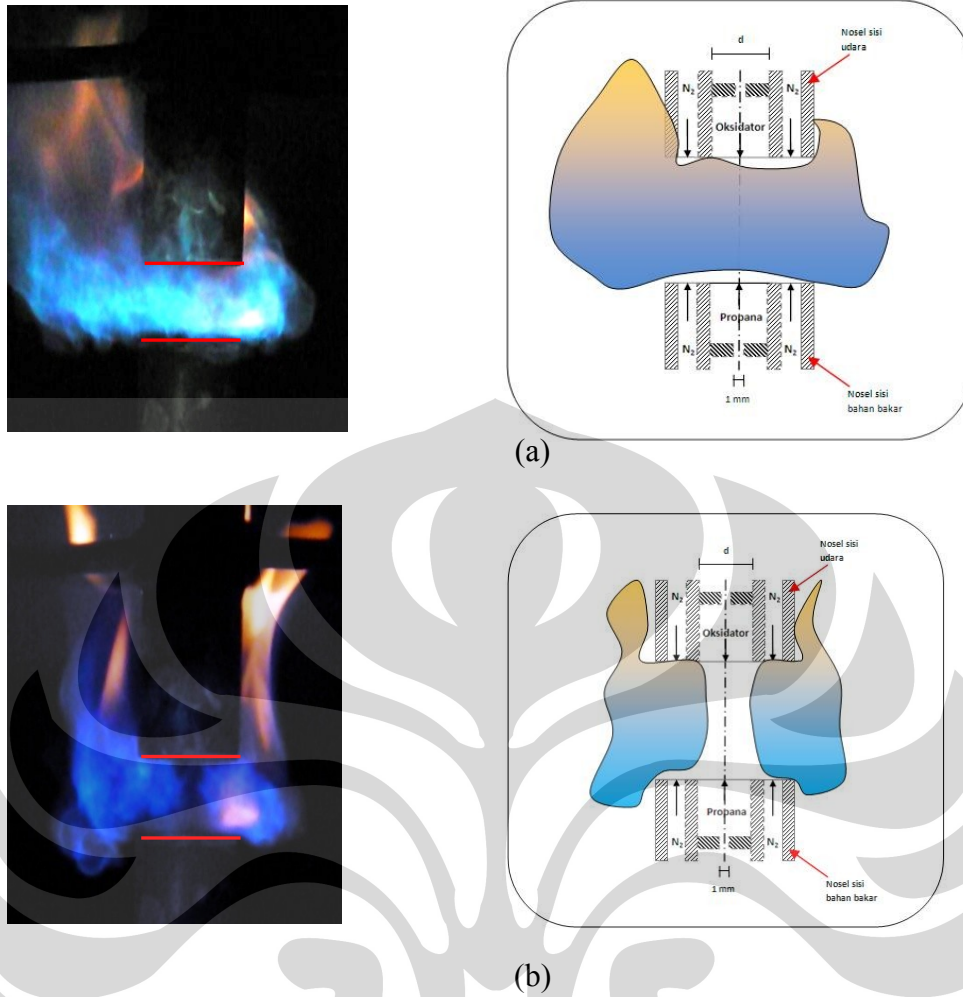
Bentuk nyala api yang terjadi pada nosel 5,5 mm secara umum terbentuk nyala api dengan terbentuknya pipa api (yang dapat di bagi menjadi kontinu atau tak kontinu) dan pipa api tak terbentuk. Modus nyala api seperti ini terjadi pada rasio gap terhadap diameter dalam (L/d) sebesar 2,7, 2,43, dan 2,16.

Contoh pipa api kontinu bisa dilihat pada gambar 4.4, dimana terjadi pada rasio 40/60, dengan fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ ) sebesar  $2,1905 \text{ kg/ms}^2$  pada L/d 2,7. Bentuk nyala api ini terjadi karena pada kondisi tersebut rasio antara fluks momentum udara stabil ( $\tau_o$ ) dengan fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ ), berada pada nilai yang tepat untuk membentuk pipa api, yaitu sebesar 9,96 khusus untuk nosel 5,5 mm L/d 2,7 dan rasio 40/60. Penyebab lain adalah aliran nitrogen yang keluar dari nosel co-flow tidak mengganggu aliran campuran bahan bakar-udara, sehingga campuran ini bisa bereaksi pada zona reaksi yang ada.

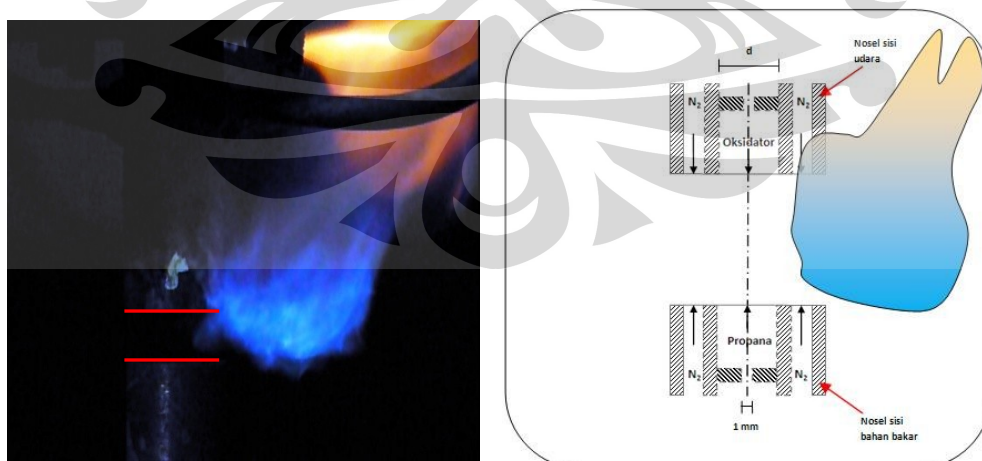


Gambar 4.4 Nyala api dengan pipa api terbentuk kontinu

Bentuk nyala kedua adalah tidak terbentuknya pipa api. Bentuk nyala api seperti ini, dapat dilihat pada gambar 4.5, yang terjadi pada fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ ) sebesar  $1,4162 \text{ kg/ms}^2$ . Bentuk api seperti ini dapat terjadi karena fluks momentum udara ( $\tau_o$ ) yang ada sebesar,  $16,12 \text{ kg/ms}^2$ , dan sehingga rasio  $(\tau_o) / (\tau_f)$  hanya mencapai angka 11,38. Khusus untuk rasio debit nitrogen/debit bahan bakar sebesar 80/20. Nyala api juga cenderung terangkat, hal ini diakibatkan oleh besarnya aliran nitrogen yang ada pada kondisi tersebut, sehingga campuran bahan bakar-udara terbakar dibagian nosel atau bisa saja diluar daerah reaksi yang seharusnya. Seperti yang bisa dilihat pada gambar 4.6. Ini terjadi pada jarak antara nosel sama dengan 2,7, pada fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ ) sebesar  $1,887 \text{ kg/ms}^2$  pada  $L/d$  sama dengan 80/20.

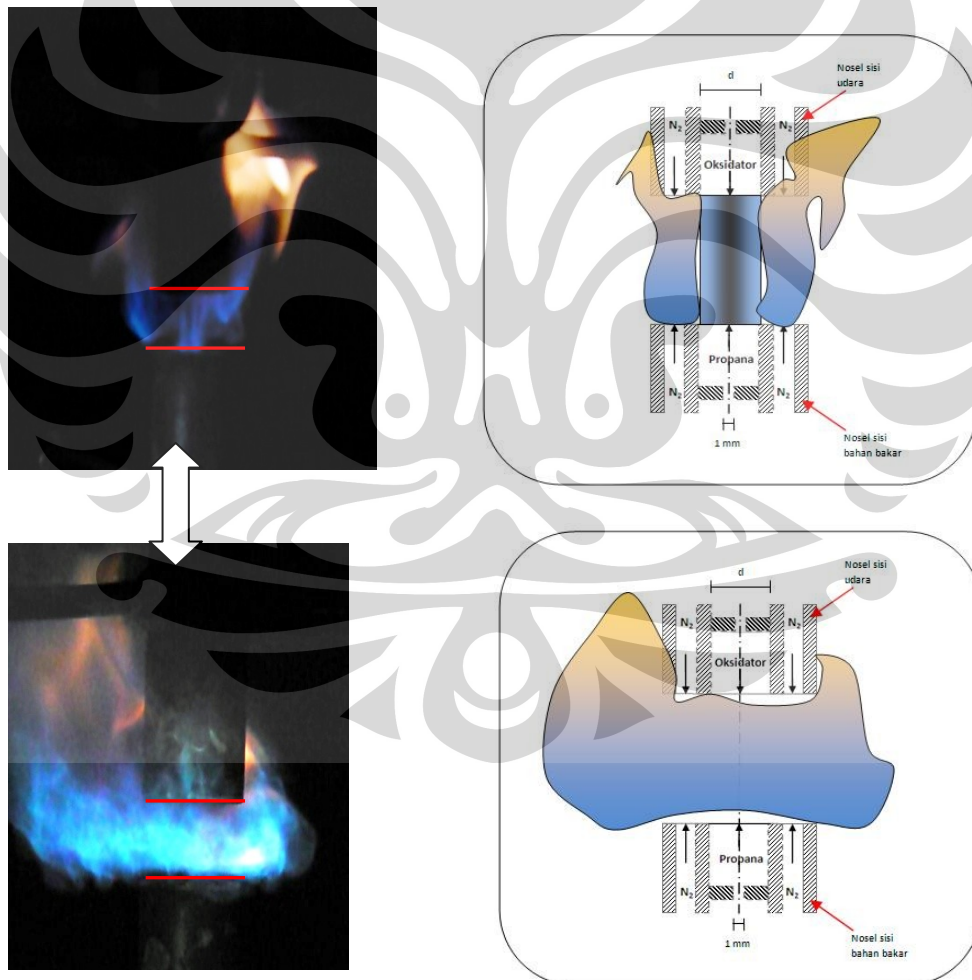


Gambar 4.5 Pola nyala api pipa api tidak terbentuk: (a) full flame, (b) split flame



Gambar 4.6 Pola nyala api pipa api tidak terbentuk dan terangkat pada nosel 5,5 mm  $L/d = 80/20$ , rasio debit nitrogen/fuel 2,7

Sedangkan untuk bentuk modus nyala yang terakhir adalah kombinasi antar terbentuknya pipa api atau tidak, penulis menyebutnya nyala api dengan pipa api tak kontinu, dapat dilihat pada gambar 4.7 bentuk nyala ini terjadi pada kondisi fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ ) sebesar  $0,998 \text{ kg/ms}^2$ , pada rasio debit nitrogen-bahan bakar sebesar 40/60 (pada  $L/d$  2,7). Bentuk nyala api dapat terjadi karena pada kondisi ini, rasio antara fluks momentum udara stabil ( $\tau_o$ ) dengan fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ ), berada pada nilai yang tepat untuk membentuk pipa api tak kontinu, yaitu sebesar 15,53 (khusus untuk nosel 5,5 mm,  $l/d$  2,7 dan rasio 40/60). Pada pola nyala api seperti ini, nyala api cenderung sulit untuk membentuk pipa api namun sesekali pipa api muncul, dan biasanya api cenderung terangkat.



Gambar 4.7 Pola nyala api pipa api terbentuk tidak kontinu.

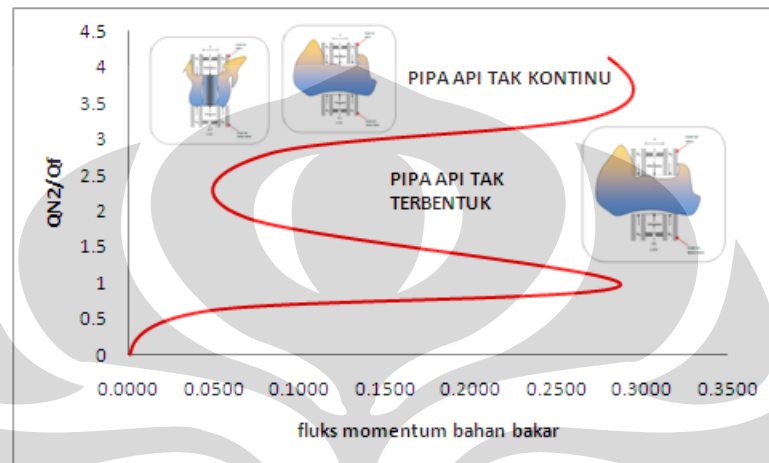


Aliran nitrogen sangat mempengaruhi terbentuk atau tidaknya pipa api. Nyala api tidak membentuk pipa api pada rasio  $(\tau_o / \tau_f) / (\tau_{N2a} / \tau_{o N2f}) = 13,2-9,2$ , angka ini terlalu besar untuk membentuk pipa api. Nyala api dengan pipa api tidak kontinu terjadi pada rasio  $(\tau_o / \tau_f) / (\tau_{N2a} / \tau_{o N2f}) = 5,8-2,8$ , angka ini terlalu besar untuk membentuk pipa api kontinu. Nyala api dengan pipa api kontinu terjadi pada rasio  $(\tau_o / \tau_f) / (\tau_{N2a} / \tau_{o N2f}) = 3,1-0,9$  dan  $0,5-0,28$ . Nyala api dengan pipa api kontinu yang tipis dan terjadi di garis stagnasi terjadi pada rasio  $(\tau_o / \tau_f) / (\tau_{N2a} / \tau_{o N2f}) = 1,04-1,01$  dan  $0,7-0,5$ .

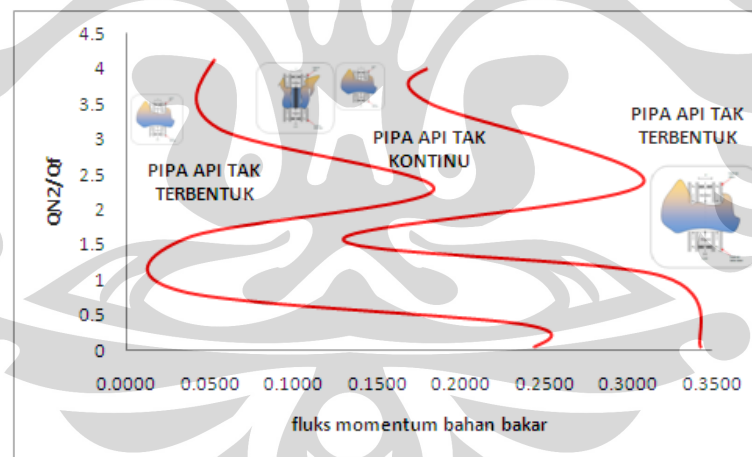
Pada debit nyala api pada aliran menegah. Nyala api cenderung terangkat terjadi pada rasio  $(\tau_o / \tau_f) / (\tau_{N2a} / \tau_{o N2f}) = 3,02-0,96$  dan  $0,5-0,28$ . Pada debit aliran fuel yang tinggi. Nyala api cenderung terangkat pada debit aliran fuel yang tinggi. Aliran nitrogen menyebabkan reaction zone tidak terjadi diantara nosel. Nyala api akan membentuk pipa api, saat rasio perbandingan fluks momentum zat yang bereaksi dengan fluks momentum gas inert semakin menurun. Nyala api terangkat terjadi pada aliran bahan bakar yang tinggi, dengan fluks momentum bahan bakar,  $\tau_{prop} = 3,6- 5,02 \text{ kg/ms}^2$  dan perbandingan rasio  $\tau_o / \tau_f$  kurang lebih 10.

## 4.2 Modus nyala api nosel diameter 8,5 mm

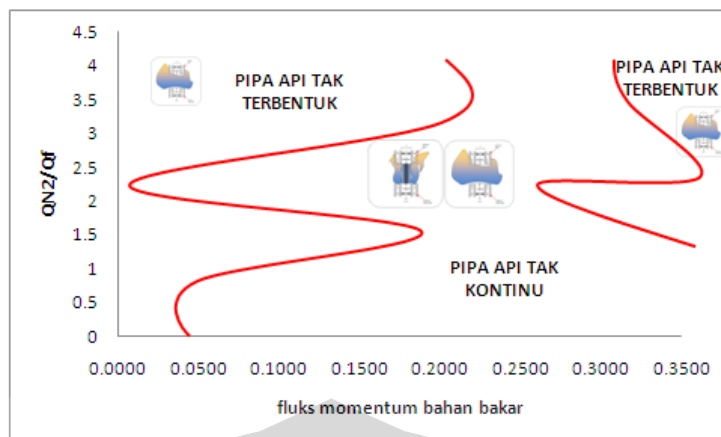
Bentuk nyala api yang terjadi pada nosel 8,5 mm ini hampir sama dengan apa yang terjadi pada nosel 5,5 mm yang membedakan hanyalah pada nosel 8,5 mm ini tidak terdapat pipa api kontinu. Modus nyala apinya dapat dilihat dibawah ini.



Gambar 4.8 Modus nyala api nosel 8,5 mm dengan L/d 2,7



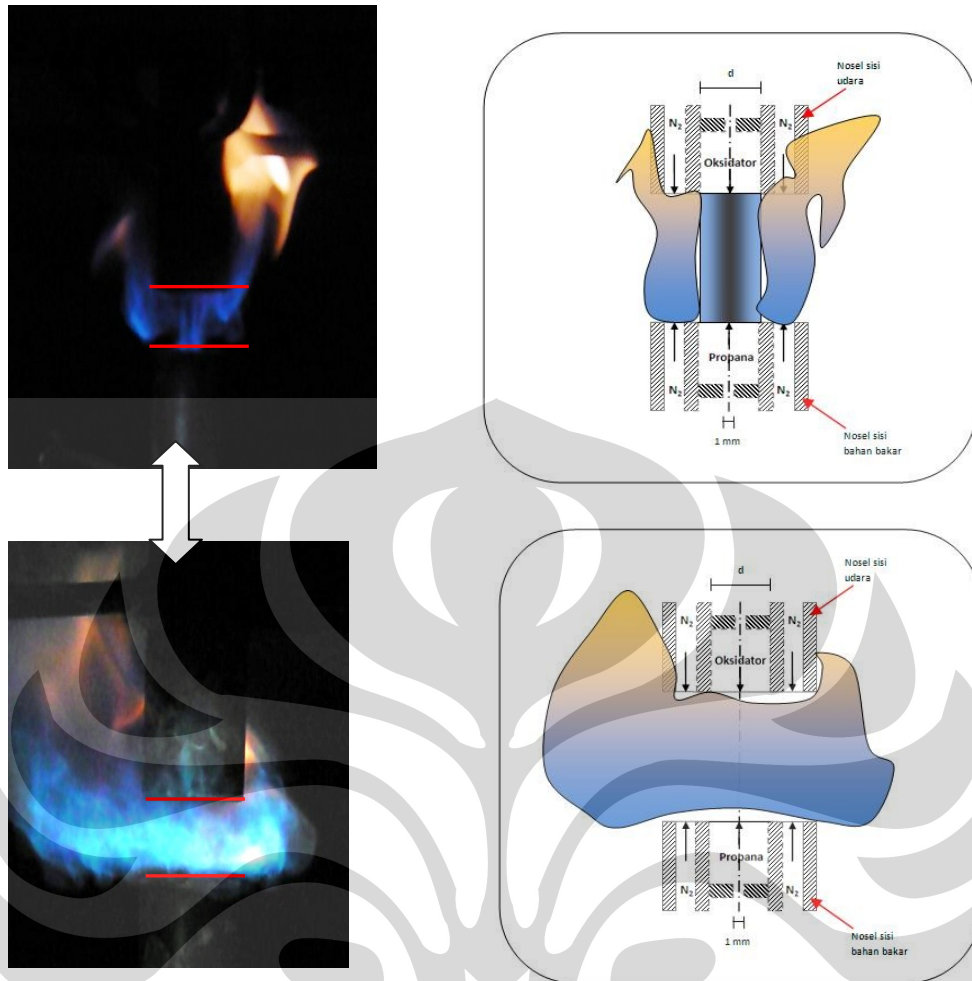
Gambar 4.9 Modus nyala api nosel 8,5 mm dengan L/d 2,43



Gambar 4.10 Modus nyala api nosel 8,5 mm dengan  $L/d$  2,16

Bentuk nyala api yang terjadi pada nosel 8,5 mm ini secara umum menyerupai bentuk nyala api yang terjadi pada nosel 5,5, yaitu bentuk nyala api dengan terbentuknya pipa api atau pipa api tidak terbentuk. Namun pada nosel ini nyala api dengan pipa api terbentuk secara kontinu tidak terjadi. Modus nyala api yang terbentuk hanyalah nyala api dengan pipa api tak kontinu dengan nyala api dengan pipa api tak terbentuk.

Pada fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ ), sebesar  $0,092 \text{ kg/ms}^2$  (dengan  $L/d = 2,7$  dan perbandingan debit nitrogen sisi bahan bakar/debit bahan bakar = 50/50) maka nyala api tidak kontinu. Seperti yang dapat dilihat pada gambar 4.11. dengan rasio fluks momentum udara/fluks momentum bahan bakar sebesar 2,21.



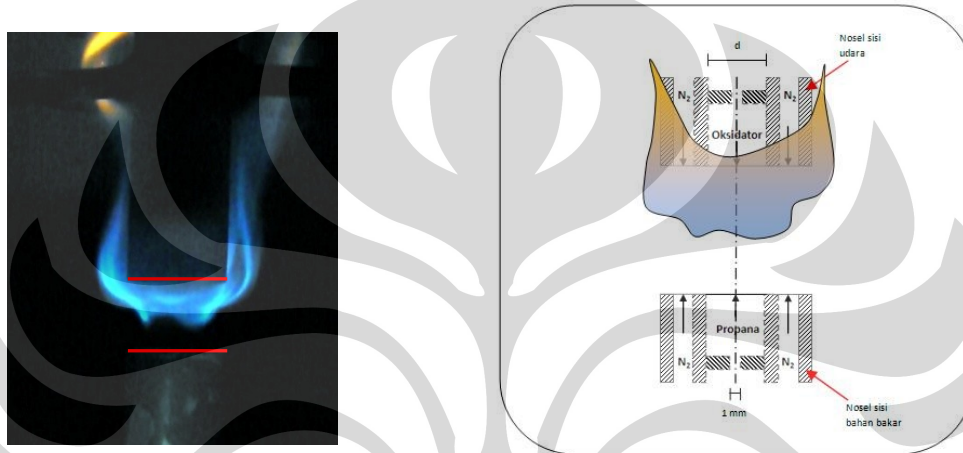
Gambar 4.11 Pola nyala api pipa api terbentuk tidak kontinu

Dan yang kedua adalah nyala api tak membentuk pipa api. Terjadi pada fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ ), sebesar  $0,3285 \text{ kg/ms}^2$ , pada perbandingan debit nitrogen pada sisi bahan bakar dan debit bahan bakar sama dengan 70/30 dan pada  $L/d = 2,7$ . Dengan rasio perbandingan fluks momentum udara dan fluks momentum bahan bakar sebesar 5,07.

Fenomena yang terjadi pada nosel diameter 8,5 mm ini sangat unik, karena aliran nitrogen sangat mempengaruhi terbentuk tidaknya nyala api dengan pipa api terbentuk secara kontinu. Dengan kata lain kehadiran aliran nitrogen mengganggu terbentuknya pipa api.

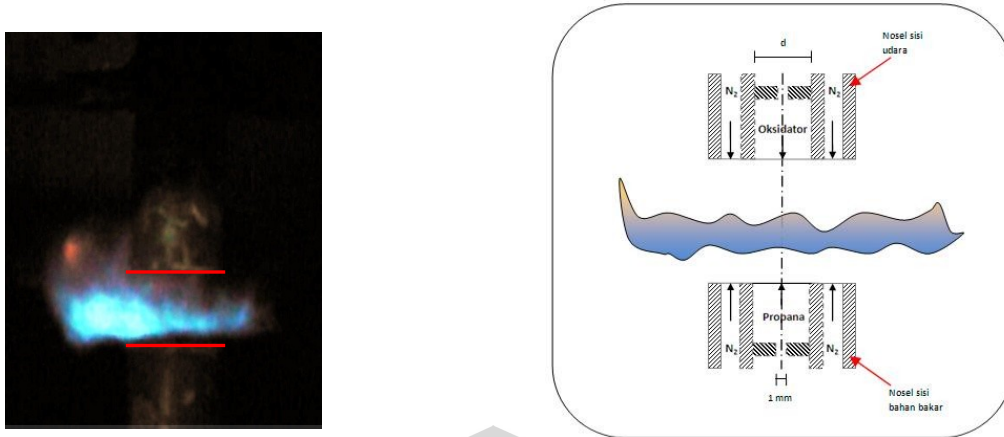
Namun disamping bentuk atau modus nyala api yang secara umum sering terjadi pada nosel diameter 8,5 mm ini, terdapat beberapa nyala api yang jarang dijumpai yaitu, nyala api difusi terangkat dan nyala api stagnasi.

Pada nyala api difusi terangkat, api akan terbentuk dengan tidak melekat pada nosel bahan bakar, tetapi melayang. Nyala api seperti ini lah yang ingin di kondisikan dalam penelitian karakteristik nyala api difusi pada medan aliran berlawanan agar nyalanya api tidak merusak nosel. Api difusi terangkat dapat dilihat pada gambar 4.12. Namun api yang terbaik adalah api stagnasi dimana api terbentuk dengan tidak menyentuh kedua nosel. Api jenis ini dapat dilihat pada gambar 4.13.



Gambar 4.12 Nyala api difusi terangkat

Nyala api difusi terangkat ini terjadi pada fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ ), sebesar  $0,0335 \text{ kg/ms}^2$ , dan  $0,0918 \text{ kg/ms}^2$  pada perbandingan debit nitrogen pada sisi bahan bakar dan debit bahan bakar sama dengan 70/30 dan pada  $L/d = 2,43$ . Dengan rasio perbandingan fluks momentum udara dan fluks momentum bahan bakar sebesar 20,08 dan 19,80.

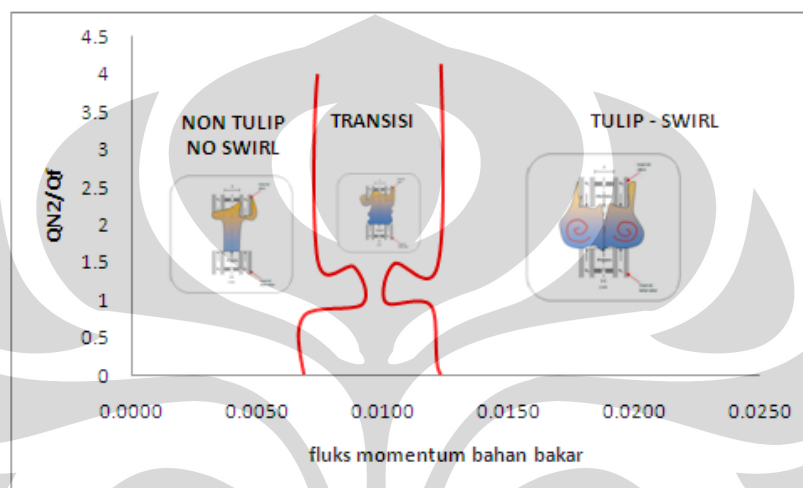


Gambar 4.13 Nyala api stagnasi

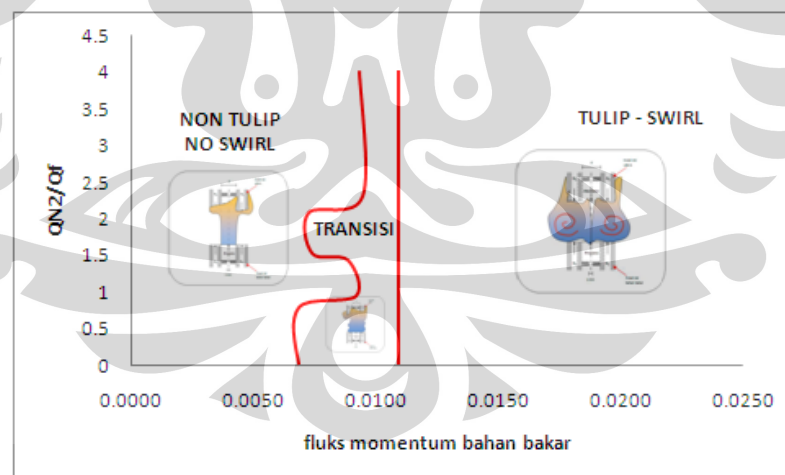
Nyala api stagnasi ini terjadi pada fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ ), sebesar  $0,0918 \text{ kg/ms}^2$ , pada perbandingan debit nitrogen pada sisi bahan bakar dan debit bahan bakar sama dengan 40/60 dan pada  $L/d = 2,7$ . Dengan rasio perbandingan fluks momentum udara dan fluks momentum bahan bakar sebesar 26,385. Dengan rasio perbandingan fluks momentum nitrogen sisi udara dan fluks momentum nitrogen sisi bahan bakar sebesar 21,35. Angka ini adalah angka dimana api dalam kondisi untuk mendapatkan api stagnasi, dimana debit bahan bakar, udara, dan nitrogen berada pada ukuran yang proporsional.

### 4.3 Modus nyala api nosel diameter 18,5 mm

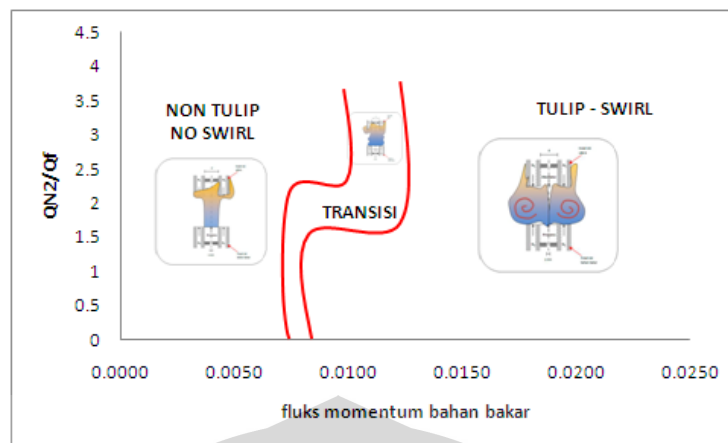
Pada nosel ini yang terbentuk adalah nyala api tulip, non tulip dan transisi. Hal ini berbeda dengan data yang diperoleh sebelumnya. Dikarenakan geometri nosel yang jauh berbeda. Berikut ini adalah modus nyala api pada nosel diameter 18,5 berdasarkan jarak antar nosel.



Gambar 4.14 Modus nyala api nosel 18,5mm dengan L/d 2,7



Gambar 4.15 Modus nyala api nosel 18,5mm dengan L/d 2,43



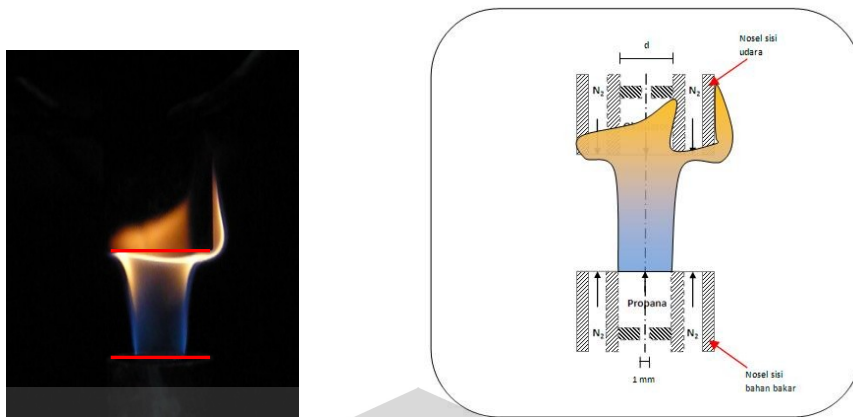
Gambar 4.16 Modus nyala api nosel 18,5mm dengan L/d 2,16

Untuk nosel diameter 18,5 mm ini, secara umum bentuk nyala apinya berbeda dengan yang terjadi pada nosel diameter 5,5 mm dan 8,5mm. Modus nyala apinya antara lain, tulip, non tulip, dan transisi.

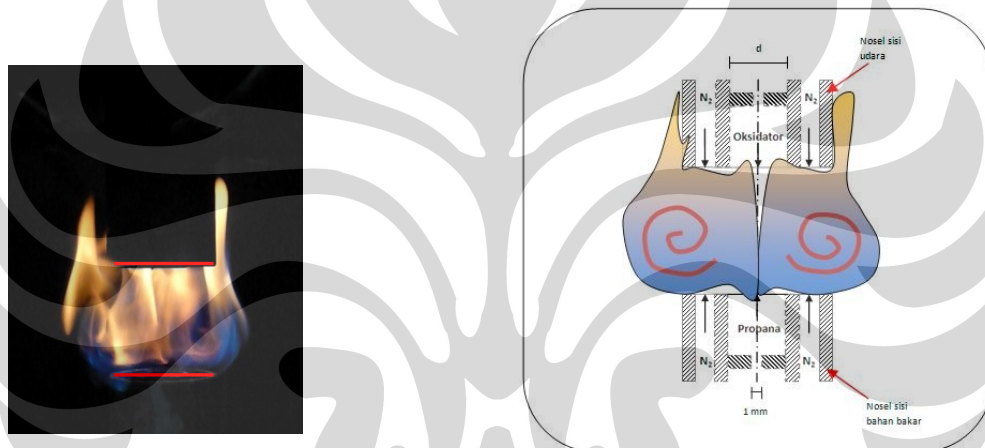
Nyala api tulip berbentuk seperti silinder pipa api, karena suplai udara yang kurang maka api hanya nyala difusi. Gas inert sebagai selubung pelindung agar api tetap dalam bentuk pipa tersebut. Sedangkan dalam nyala api tulip, api berbentuk menyerupai bunga tulip dimana tidak terdapat lagi silinder pipa api seperti yang terjadi pada nyala api non tulip. Dalam modus nyala api ini terbentuk suatu putaran yang disebut *swirl*.

Bentuk nyala api non tulip dan tidak terjadi swirl, bisa dilihat pada kondisi fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ )  $0,0017 \text{ kg/ms}^2$  dan  $0,0048 \text{ kg/ms}^2$ , pada L/d 2,7 dan rasio debit nitrogen sisi bahan bakar/debit bahan bakar sebesar 40/60. Bentuk nyala api ini dapat dilihat pada gambar. 4.17. Bentuk nyala api tulip dan terjadi swirl, bisa dilihat pada kondisi fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ )  $0,016 \text{ kg/ms}^2$  dan  $0,0192 \text{ kg/ms}^2$ , pada L/d 2,7 dan rasio debit nitrogen sisi bahan bakar/debit bahan bakar sebesar 40/60. Bentuk nyala api ini dapat dilihat pada gambar. 4.18.



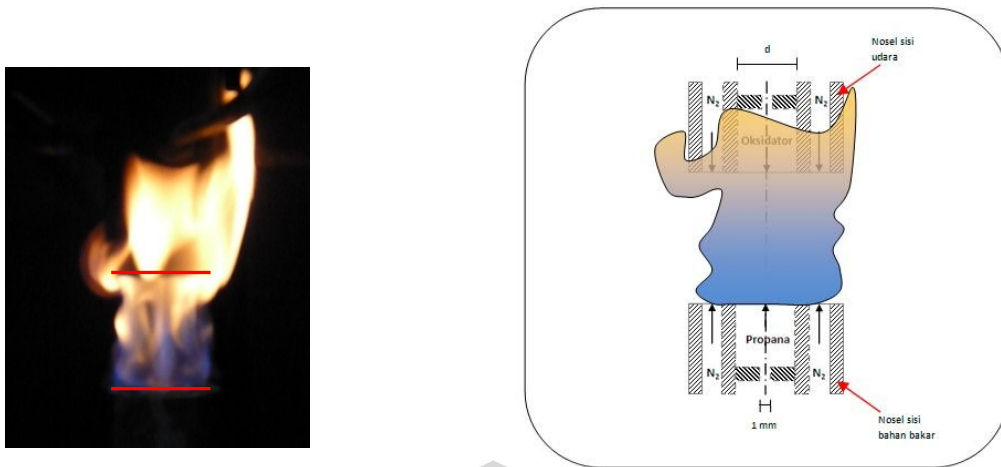


Gambar 4.17 Pola nyala api non tulip – no swirl



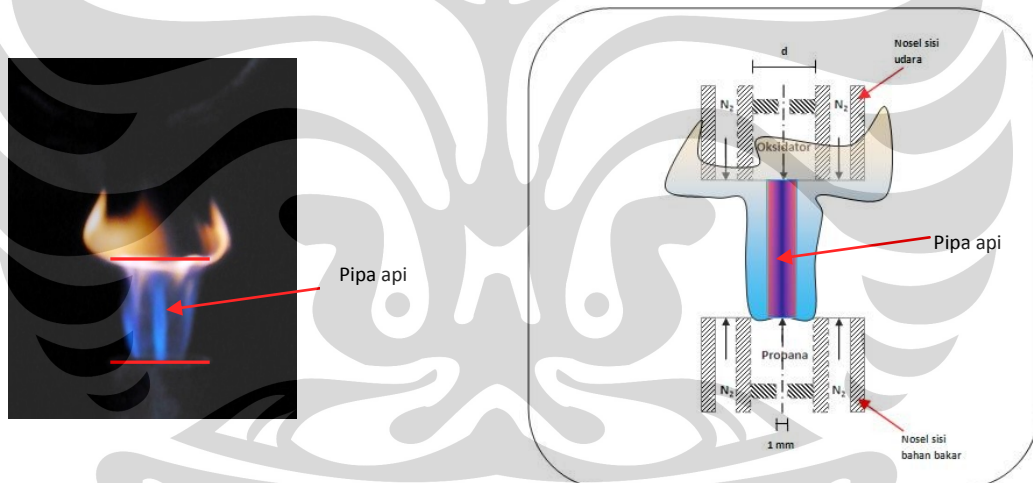
Gambar 4.18 Pola nyala api tulip – swirl

Bentuk pola nyala api yang ketiga adalah transisi adalah nyala api peralihan antara pola nyala api non tulip dan tulip. Pada nyala api transisi, disini nyala api sudah mulai bergejolak, dimana aliran bahan bakar, udara dan gas inert terjadi pada komposisi yang tepat untuk membentuk api ini. Dan dalam nyala api ini terdapat putaran atau swirl dalam kondisi yang tidak stabil atau tidak sampai terjadi swirl. Untuk penjelasan lebih lanjut dapat dilihat pada gambar 4.19.



Gambar 4.19 Pola nyala api transisi

Pola transisi terjadi pada fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ )  $0,0089 \text{ kg/ms}^2$ , dengan rasio debit nitrogen sisi bahan bakar/debit bahan bakar  $70/30$  dan  $L/d$   $2,7$ . Pada nosel diameter  $18,5 \text{ mm}$  ini ditemukan pula modus nyala api non tulip dengan adanya terdapat pipa api di tengah.



Gambar 4.20 Modus Nyala pipa api dalam api non-tulip

Untuk mendapatkan mosus api ini, debit bahan bakar, debit udara dan debit nitrogen berada pada kondisi yang proporsional Modus api ini terjadi pada kondisi fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ )  $0,0017 \text{ kg/ms}^2$ , pada  $L/d$   $2,7$  dan rasio debit nitrogen sisi bahan bakar/debit bahan bakar sebesar  $40/60$ . Dengan rasio fluks momentum udara/fluks momentum bahan bakar sebesar  $14,28$ . Dan rasio fluks momentum nitrogen sisi udara/fluks momentum nitrogen sisi bahan bakar sebesar  $9,01$ .

## BAB 5 KESIMPULAN

Berdasarkan data yang diperoleh dari penelitian ini, maka didapatkan hasil pengolahan data dan pembahasan mengenai modus nyala api difusi untuk bahan bakar propane pada medan aliran berlawanan yang telah diuraikan sebelumnya, terdapat beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini, antara lain:

1. Modus nyala api yang terjadi pada masing-masing nosel dengan rasio gap nosel-diameter nosel ( $L/d$ ), bukan hanya dipengaruhi oleh rasio fluks momentum udara stabil ( $\tau_o$ ) dengan fluks momentum bahan bakar ( $\tau_f$ ), tetapi juga rasio fluks momentum nitrogen ( $\tau_{N2}$ ), dari kedua sisi co-flow.
2. Semakin terjadi penurunan rasio gap-diameter nosel ( $L/d$ ), maka untuk nosel 5,5 mm cenderung membentuk nyala api dengan membentuk pipa api, sedangkan untuk nosel 8,5 mm maka nyala api berkebalikan dengan nosel 5,5, justru pada nosel ini akan membentuk nyala api yang tidak terdapat pipa api. Dan untuk nosel 18,5 mm membentuk nyala api tulip dan terdapat swirl.
3. Untuk rasio debit nitrogen sisi bahan bakar-debit bahan bakar tertentu, aliran nitrogen mengganggu campuran udara-bahan bakar yang terjadi, sehingga mengakibatkan nyala api terangkat. Dan terdapat titik dimana nyala api stagnasi yang terjadi saat  $(\tau_o)/(\tau_f)$ , sebesar 26,385 dan  $(\tau_{N2a})/(\tau_{N2f})$  sebesar 21,35.

## DAFTAR REFERENSI

- [1] Kartika, I Made, dan Yulianto S. Nugroho. "Lecture 1", *Handout Mata Kuliah Teknik Pembakaran*, 2007.
- [2] Turns, Stephen R. *Introduction to Combustion Concept and Application*. Pennsylvania, 1996, p.210.
- [3] Sharma, SP, and Chander Mohan. *Fuels and Combustion*. Bombay: Tata McGraw-Hill, 1984, p.300-305.
- [4] Peters, Norbert. *Turbulent Combustion*. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [5] Tsuji H., Yamaoka I. "Structure Analysis of Counterflow Diffusion Flame in The Forward Stagnation region of a Pours Cylinder." *Combustion and Flame*, 13 (1971).
- [6] Rolon, J. C., et all. "Experiment on the Interaction Between a Vortex and a Strained Diffusion Flame." *Combustion and Flame*, 100 (1995), p.422-429.
- [7] Eun Do Lee, et all. "Extinction Limit Extension of Unsteady Counterflow Diffusion Flame Affected by Velocity Change." *Combustion and Flame*, 144 (2006), p.792-808.
- [8] Katta, V. R., et all. "Extinction Criterion for Unsteady, Opposing Jet Diffusion Flame." *Combustion and Flame*, 137 (2004), p.198-221.
- [9] Jongmook Lim. et all. "A Study of the Effect of Air Preheat on the Structure on Methane/Air Counterflow Diffusion Flame." *Combustion and Flame*, 121 (2000), p.262-274.
- [10] Santoianni, Dawn A, and Michelle Dercoix. (2000). *Temperature Imaging Unsteady Propane Air*.
- [11] Carnell Jr., W. F. an M. W. Renfro, *Combustion Flame*, 141 (2005), p.350-359
- [12] Kim, I. E. S. and Mastorakos, (2006). *Simulations of Turbulent Non-Premixed Counterflow Flames with First-Order Conditional Moment Closure*.
- [13] Park, June Sung, et all. (2006). *Edge Flame Instability in Low-Stain-Rate Counter Flow Diffusion Flames*.

- [14] Griffiths, J.F. *Flame of Combustion Third Edition*. Glasgow: Blakie Academic and Professional, 1995, p.37-38.
- [15] Turns, Stephen R. *An Introduction to Combustion Concept and Application*. Pennsylvania, 1996, p.246.
- [16] Munis and Mungal. (1997). *OH-Radical Behavior of Unsteady Lifted Flame Based on Instantaneous Change of the Equivalent Ratio*.
- [17] Hiroki Ishida. (2004). *Lift-off and Blow-off of Laminar Jet Premix Flame of Flammable Mixture with Inert Gas*.
- [18] E. Betbeder-rey, et al. (2009) *Experimental and Numerical study of the structure of n-decane counterflow diffusion flames: Effect of Carbon Dioxide as an Additive*.

