



UNIVERSITAS INDONESIA

**VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API DIFUSI
TIPE SWIRL PADA MEDAN ALIRAN BERLAWANAN
DENGAN RASIO GAP DIAMETER KECIL**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**KRIS KURNIA HERLAMBANG
0906604905**

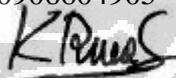
**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JANUARI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API DIFUSI TIPE SWIRL PADA MEDAN ALIRAN BERLAWANAN DENGAN RASIO GAP DIAMETER KECIL

yang dibuat untuk melengkapi sebagai persyaratan menjadi sarjana teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah di publikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Nama : Kris Kurnia Herlambang
NPM : 0906604905
Tanda Tangan : 
Tanggal : 13 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Kris Kurnia Herlambang
NPM : 0906604905
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API
DIFUSI TIPE SWIRL PADA MEDAN ALIRAN BERLAWANAN
DENGAN RASIO GAP DIAMETER KECIL

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 : Dr. Ir. Warjito, M.Eng. 
Penguji : Dr. Agus Pamitran, ST., M.Eng 
Penguji : Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, MT. 

Ditetapkan di : Universitas Indonesia, Depok
Tanggal : 13 Januari 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana teknik mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa dalam proses pembuatan hingga selesainya skripsi ini banyak pihak yang telah membantu dan menyemangati saya dalam pembuatan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada :

- 1) Orang tua, adik dan seluruh keluarga tercinta yang selalu memberikan bantuan baik moril maupun materiil.
- 2) Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- 3) Budiman Raharja Rukmana sebagai partner satu tim yang solid yang selalu bersemangat, kreatif dan aktif dalam mengerjakan skripsi ini.
- 4) Karyawan-karyawan DTM yang juga ikut membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.
- 5) Teman-teman teknik mesin PPSE 2009 yang telah membantu dan mendukung selama penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan akhir ini masih banyak terdapat kekurangan, baik dalam cara penulisan maupun dalam pengumpulan dan pengolahan data. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dari para pembaca agar menjadi masukan untuk penulisan-penulisan selanjutnya. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi para pembaca.

Depok, Januari 2012

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Kris Kurnia Herlambang
NPM : 0906604905
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 yang berjudul :

VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API DIFUSI TIPE SWIRL PADA MEDAN ALIRAN BERLAWANAN DENGAN RASIO GAP DIAMETER KECIL

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

Demikian Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : 13 Januari 2012

Yang menyatakan,



(Kris Kurnia Herlambang)

ABSTRAK

Nama : Kris Kurnia Herlambang
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Visualisasi Kecepatan Tinggi Nyala Api Difusi Tipe Swirl Pada Medan Aliran Berlawanan Dengan Rasio Gap Diameter Kecil

Nyala difusi tipe swirl pada medan aliran berlawanan dihasilkan dengan propana sebagai bahan bakar yang disuplai dari nosel bagian bawah dan udara kompresor sebagai oksidator disuplai dari nosel bagian atas dengan diameter nosel yang sama. Sementara aliran nitrogen dialirkan dari kedua sisi nosel tersebut. Pada penelitian ini juga digunakan vortex generator untuk meningkatkan turbulensi sehingga dapat dicapai pencampuran reaktan yang optimal. Penelitian dilakukan untuk mengetahui bentuk nyala api difusi tipe swirl yang terjadi pada setiap kondisi parameter yang ada. Penelitian menggunakan high speed video camera (Motion Xtra HG-SE).

Dua parameter utama yang diatur dalam penelitian ini adalah parameter geometri (memakai rasio gap diameter 2.16) dan dinamika fluida (fluks momentum bahan bakar, fluks momentum udara, dan debit nitrogen). Data mentah yang didapat adalah video bentuk nyala api pada setiap nilai fluks momentum bahan bakar, yang selanjutnya dikonversi menjadi gambar-gambar bentuk nyala api.

Dari hasil penelitian diketahui bentuk nyala api swirl yang terjadi untuk kecepatan sudut putar pada masing-masing rasio debit berbeda. Pada rasio debit kecil mempunyai sudut putar yang tinggi, sedangkan pada rasio debit besar kecepatan sudut putarnya rendah. Nyala api swirl pada rasio debit kecil tidak terlihat jelas karena kecepatan putarnya yang tinggi. Aliran nitrogen mengganggu aliran bahan bakar-udara sehingga menyebabkan nyala api seperti terangkat. Pada api dengan kondisi swirl, kecepatan sudutnya dapat diketahui dengan bantuan high speed video camera.

Kata kunci : Gap diameter 2.16, kecepatan sudut putar, swirl

ABSTRACT

*Name : Kris Kurnia Herlambang
Study Program : Mechanical Engineering
Title : High Speed Visualization of Swirl Type Diffusion
Flame In A Counter Flow Field With Low Ratio of Gap
To Diameter*

Swirl type diffusion flame in a counter flow field was generated by propane as a fuel. Propane was supplied upward through a nozzle, and air as an oxidant was supplied downward through a similar nozzle. Then nitrogen was supplied from the both sides. This experiment also used vortex generator to increase turbulence, so that optimal mixing of reactants can be achieved. The major of this study is to find out the swirl type diffusion flame mode at every condition parameters. This experiment used high speed video camera (Motion Xtra HG-SE).

Two main parameters that had been set up in this experiment were geometry parameters (used ratio of gap to diameter 2.16) and fluid dynamic (momentum flux of fuel and air, and flow rate of nitrogen). Raw data obtained in this experiment were videos of swirl type diffusion flame mode at every point of momentum flux of fuel, and then the data were converted to the flame mode images by using image processing software.

Experiment result showed that swirl type diffusion flame mode which happen at an angular velocity which depends on ratio of flow rate. Low ratio of flow rate had higher angular velocity than the high ones. Swirl type diffusion flame modes on a low ratio of flow rate are not clearly visible because of the high angular velocity. Nitrogen flow disturbs the air-fuel flow and causes the flame to be lifted. Angular velocity can be found with high speed video camera assistanee.

Key words: Ratio of gap to diameter 2.16, the angular velocity, swirl

DAFTAR ISI

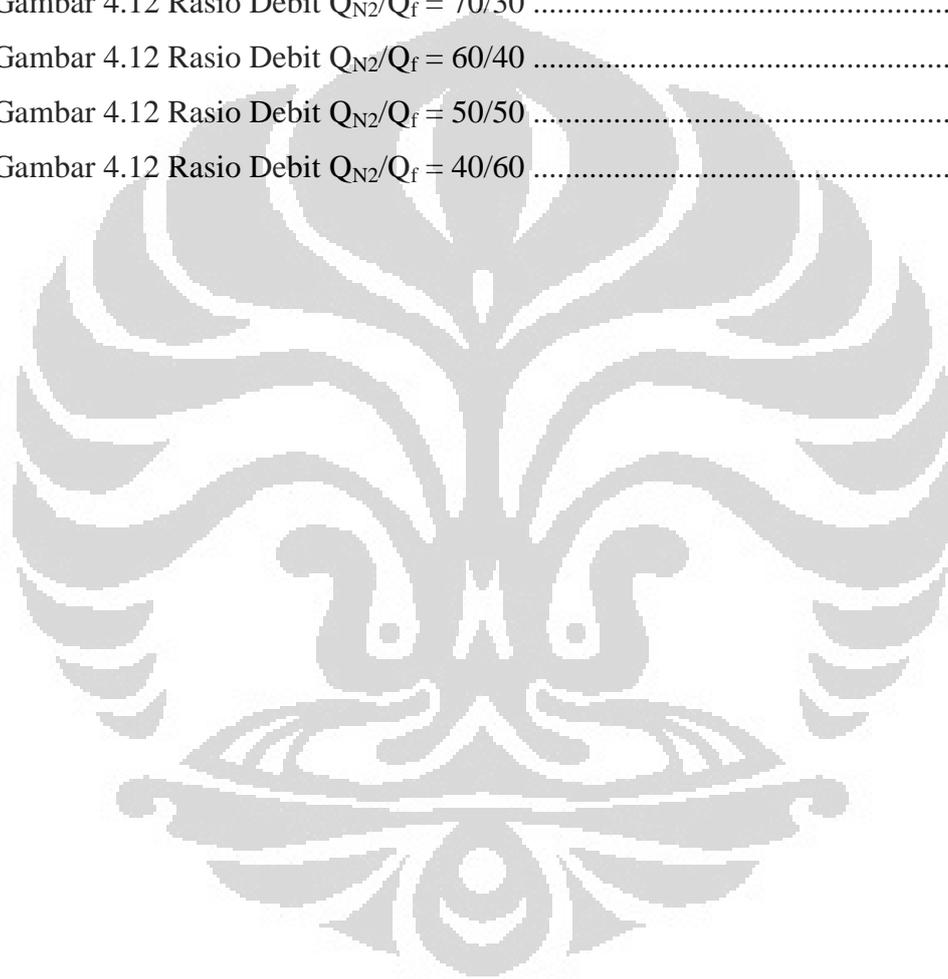
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI.	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR SIMBOL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Pembatasan Masalah	4
1.5 Metodologi Penulisan.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Pengertian Pembakaran	7
2.2 Nyala Api.....	8
2.2.1 Nyala Api <i>Premixed (Premixed Flame)</i>	9
2.2.1.1 Laju Nyala Api <i>Permixed Laminar</i>	11
2.2.1.2 <i>Conter Flow Premixed Flame</i>	11
2.2.2 Nyala Difusi	12
2.2.2.1 Struktur Nyala Difusi Laminar.....	15
2.2.2.2 Struktur Nyala Difusi Turbulen	17
2.2.2.3 <i>Counter Flow Diffusion Flame</i>	18
2.3 Karakteristik Nyala.....	20
2.4 Stabilitas Nyala Api.....	21
2.4.1 Fenomena <i>Flashback</i>	22
2.4.2 Fenomena <i>Lift Off</i>	23
2.4.3 Fenomena <i>Blow-Off</i>	24
2.5 Propana (C ₃ H ₈)	24
2.6 Oksigen (O ₂)	28
2.7 Nitrogen (N ₂)	29

BAB 3 PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN	31
3.1 Peralatan Penelitian.....	31
3.1.1 Peralatan Penelitian Medan Aliran Berlawanan	31
3.1.2 Peralatan Penelitian Nyala Api Kondisi Swirl	33
3.2 Prosedur Penelitian.....	36
3.2.1 Prosedur Kalibrasi Suplai Udara.....	36
3.2.2 Prosedur Kalibrasi Suplai Bahan Bakar.....	38
3.2.3 Prosedur Proses Purgung	40
3.2.4 Prosedur Penelitian Dengan High Speed Camera.....	43
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	45
4.1 Analisa High Speed Video Camera.....	45
4.1.1 Kondisi Swirl Pada Saat $Q_{N2}/Q_f = 80/20$	46
4.1.2 Kondisi Swirl Pada Saat $Q_{N2}/Q_f = 70/30$	48
4.1.3 Kondisi Swirl Pada Saat $Q_{N2}/Q_f = 60/40$	50
4.1.4 Kondisi Swirl Pada Saat $Q_{N2}/Q_f = 50/50$	52
4.1.5 Kondisi Swirl Pada Saat $Q_{N2}/Q_f = 40/60$	54
4.2 Pembahasan.....	55
4.2.1 Perbandingan Kecepatan Putar Terhadap Rasio Debit	55
4.2.2 Hubungan Antara Nyala Api Tipe Swirl Dengan Limit Stabilitas Nyala	56
BAB 5 KESIMPULAN	60
DAFTAR REFERENSI	61
DAFTAR PUSTAKA	62
LAMPIRAN PENGOLAHAN DATA	

DAFTAR GAMBAR

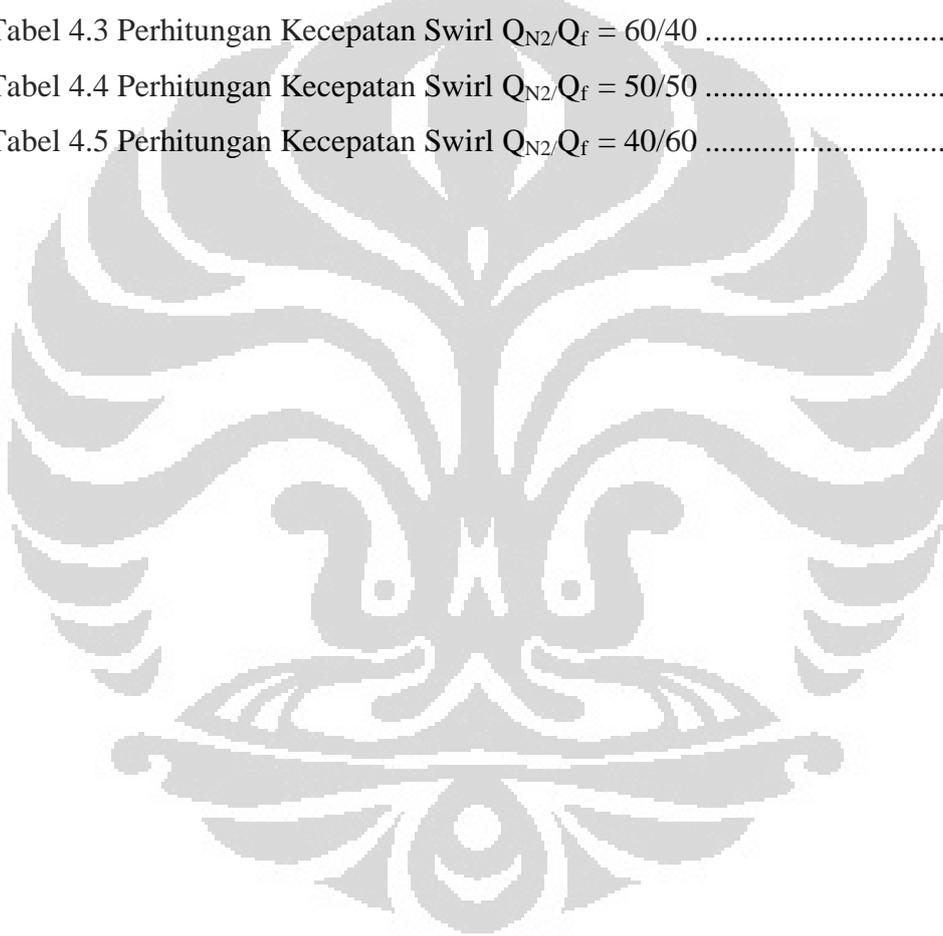
Gambar 1.1 Skema Nyala Difusi Pada Aliran Berlawanan	2
Gambar 2.1 Profil Nyala Api Laminar	8
Gambar 2.2 Struktur Nyala Api <i>Premixed</i>	9
Gambar 2.3 Vektor Diagram Nyala Kecepatan Laminar	10
Gambar 2.4 Nyala <i>Premixed</i> Pada Aliran Berlawanan	12
Gambar 2.5 <i>Over-ventilated</i> dan <i>under-ventilated</i> Pada Nyala Api Difusi	14
Gambar 2.6 Perubahan Bentuk Api Terhadap Kecepatan Aliran Bahan Bakar	15
Gambar 2.7 Diagram Komposisi Nyala Api Difusi Berbahan Bakar Nitrogen.	16
Gambar.2.8 Diagram Profil Konsentrasi Pada Nyala Api Difusi Tipe Laminar	17
Gambar 2.9 Nyala Turbulen.....	18
Gambar 2.10 Skema Nyala Difusi Pada Aliran Berlawanan	19
Gambar 2.11 Diagram Stabilitas Flashback, Lift-off, dan Yellow tipping Untuk Bahan Bakar Gas Industri	23
Gambar 2.12 Struktur Molekul Propana.....	25
Gambar 3.1 Skema Nosel Udara dan Nosel Bahan Bakar.....	32
Gambar 3.2 Skema Nosel Udara dan Nosel Bahan Bakar.....	32
Gambar 3.3 Sistem Suplai Medan Aliran Berlawanan	33
Gambar 3.4 <i>High Speed Video Camera Motion Xtra HG SE</i>	35
Gambar 3.5 Skema Kalibrasi Sistem Suplai Udara	37
Gambar 3.6 Grafik Persamaan Kalibrasi Kec.Udara (V_o) Untuk \varnothing 18.5 mm	38
Gambar 3.7 Skema Kalibrasi Sistem Suplai Bahan Bakar	39
Gambar 3.8 Grafik Persamaan Kalibrasi Kec.Propana (V_f) Untuk \varnothing 18.5 mm	40
Gambar 3.9 Skema Proses Purgings.....	42
Gambar 3.10 Grafik Persamaan Kalibrasi Kec.Nitrogen (V_{N_2}) Untuk \varnothing 18.5 mm....	42
Gambar 3.11 Skema Penelitian Menggunakan <i>High Speed Video Camera</i>	44
Gambar 4.1 Grafik Nilai ω (kecepatan sudut) terhadap t (waktu) $Q_{N_2}/Q_f = 80/20$	47
Gambar 4.2 Penampakan Swirl Pada Frame 614 s/d 626	48
Gambar 4.3 Grafik Nilai ω (kecepatan sudut) terhadap t (waktu) $Q_{N_2}/Q_f = 70/30$	49
Gambar 4.4 Penampakan Swirl Pada Frame 738 s/d 745	49
Gambar 4.5 Grafik Nilai ω (kecepatan sudut) terhadap t (waktu) $Q_{N_2}/Q_f = 60/40$	51

Gambar 4.6 Penampakan Swirl Pada Frame 176 s/d 194	52
Gambar 4.7 Grafik Nilai ω (kecepatan sudut) terhadap t (waktu) $Q_{N2}/Q_f = 50/50$	53
Gambar 4.8 Penampakan Swirl Pada Frame 911 s/d 917	53
Gambar 4.9 Grafik Nilai ω (kecepatan sudut) terhadap t (waktu) $Q_{N2}/Q_f = 40/60$	54
Gambar 4.10 Penampakan Swirl Pada Frame 952 s/d 959	55
Gambar 4.11 Perbandingan Kecepatan Putar Terhadap Rasio Debit	55
Gambar 4.12 Rasio Debit $Q_{N2}/Q_f = 80/20$	56
Gambar 4.12 Rasio Debit $Q_{N2}/Q_f = 70/30$	57
Gambar 4.12 Rasio Debit $Q_{N2}/Q_f = 60/40$	57
Gambar 4.12 Rasio Debit $Q_{N2}/Q_f = 50/50$	58
Gambar 4.12 Rasio Debit $Q_{N2}/Q_f = 40/60$	58



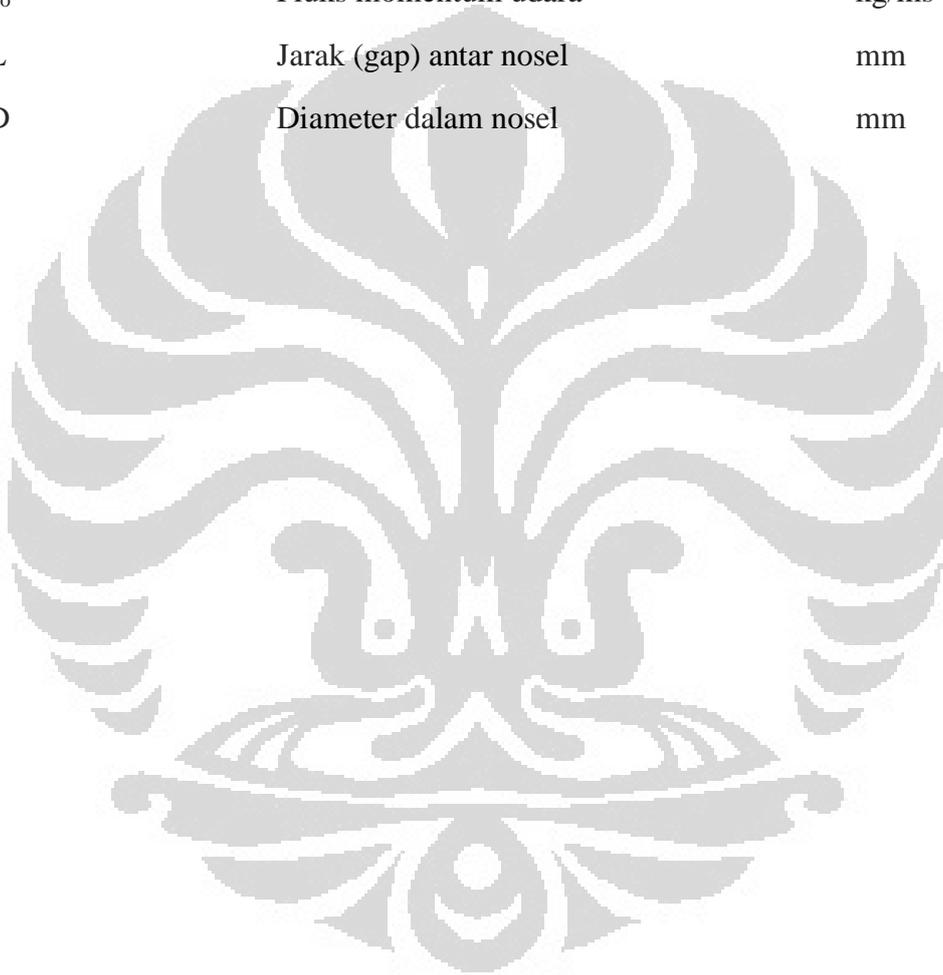
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Properti Kimia Propana.....	26
Tabel 2.2 Properti Fisik Oksigen	28
Tabel 2.3 Properti Fisik Nitrogen.....	30
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>High Speed Video Camera</i> Motion Xtra HG SE.....	34
Tabel 4.1 Perhitungan Kecepatan Swirl $Q_{N2}/Q_f = 80/20$	46
Tabel 4.2 Perhitungan Kecepatan Swirl $Q_{N2}/Q_f = 70/30$	48
Tabel 4.3 Perhitungan Kecepatan Swirl $Q_{N2}/Q_f = 60/40$	50
Tabel 4.4 Perhitungan Kecepatan Swirl $Q_{N2}/Q_f = 50/50$	52
Tabel 4.5 Perhitungan Kecepatan Swirl $Q_{N2}/Q_f = 40/60$	54



DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Dimensi
ρ_f	Massa jenis bahan bakar (propana)	kg/m^3
ρ_o	Massa jenis udara	kg/m^3
τ_f	Fluks momentum bahan bakar (propana)	kg/ms^2
τ_o	Fluks momentum udara	kg/ms^2
L	Jarak (gap) antar nosel	mm
D	Diameter dalam nosel	mm



BAB 1

PENDAHULUAN

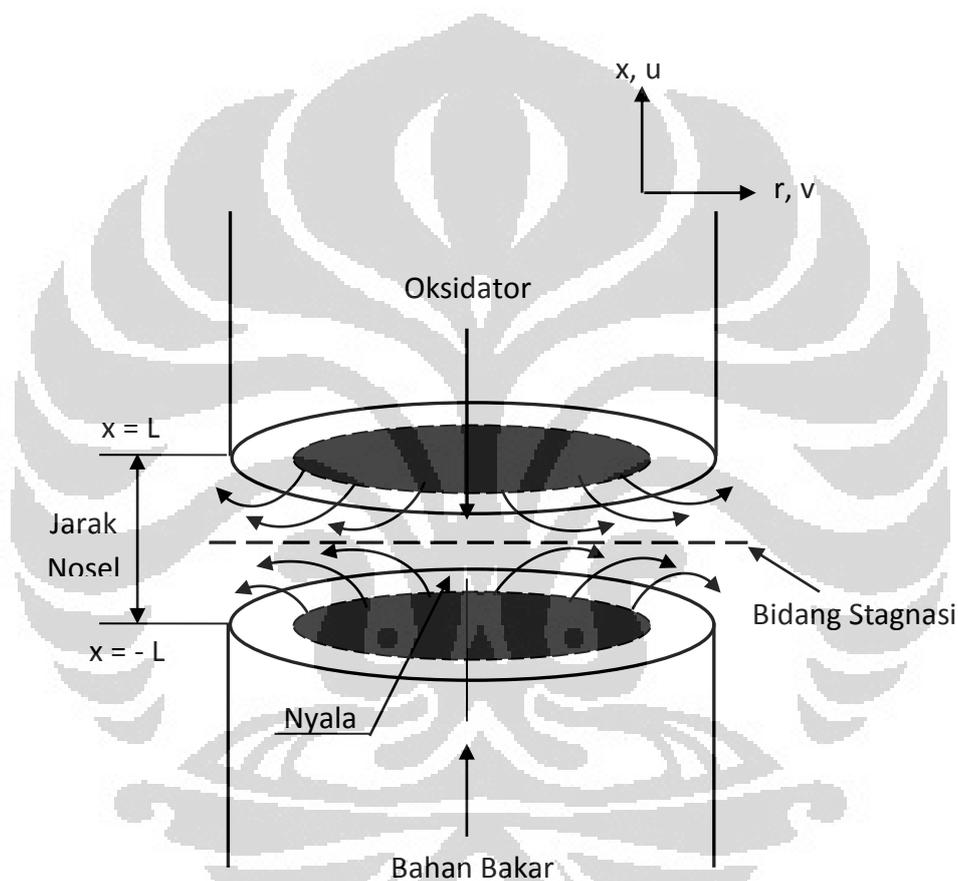
1.1 Latar Belakang

Energi memiliki peranan penting dalam kehidupan manusia di muka bumi. Seperti diketahui ada dua jenis energi, yaitu energi yang dapat diperbaharui dan energi yang tidak dapat diperbaharui. Dengan perkembangan zaman sekarang maka konsumsi akan kebutuhan energi semakin meningkat, termasuk di Indonesia. Penggunaan sumber energi di Indonesia meningkat pesat seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan bertambahnya jumlah penduduk. Akan tetapi, seiring meningkatnya kebutuhan energi ini menimbulkan masalah baru, yaitu semakin berkurangnya cadangan energi dunia. Oleh karena itu diperlukan suatu cara untuk mengatasi masalah tersebut, yaitu dengan menggunakan energi secara efektif dan efisien.

Penggunaan energi tidak hanya penghematan dalam menggunakan bahan bakar, akan tetapi efektivitas dari pemakaiannya pun harus diperhatikan. Tingkat keefisienan dan keefektifan pemakaian bahan bakar berhubungan erat dengan konfigurasi, karakteristik, kalor yang dihasilkan dan stabilitas nyala pada suatu reaksi pembakaran. Dan seperti diketahui bahwa hal ini akan semakin menurunkan konsentrasi gas buang yang dapat menyebabkan polusi. Banyak penelitian yang dilakukan untuk menggunakan energi secara efektif dan efisien, salah satunya melalui proses pembakaran. Penelitian tersebut dilakukan untuk memahami dan menjelaskan tentang berbagai fenomena yang terjadi selama proses pembakaran.

Untuk mencapai hal tersebut, telah dilakukan berbagai macam eksperimen agar memperoleh tingkat pembakaran yang efektif dan efisien. Caranya dengan melakukan perancangan sistem pembakaran yang menjamin bahan bakar dapat terbakar secara sempurna. Salah satu rancangan sistem pembakaran yang diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pembakaran yang tinggi yaitu dengan menggunakan nyala difusi pada medan aliran berlawanan (*counter flow diffusion*

flame), dimana nosel yang berisi aliran bahan bakar dan nosel yang berisi aliran udara sebagai oksidan berada dalam arah yang berlawanan. Dalam proses pembakaran ini, nyala api terbentuk dari bahan bakar dan udara yang sebelumnya terpisah, lalu terbakar bersamaan dengan bercampurnya kedua zat tersebut. Agar lebih jelas (lihat Gambar 1.1) mengenai skema aliran pada nyala difusi dalam medan aliran berlawanan di bawah ini.



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 Furjiyanto (2008), diketahui bahwa kenaikan fluks momentum udara (τ_o), akan menyebabkan turunnya limit stabilitas nyala. Dan setiap penurunan rasio gap terhadap diameter

nosel (L/d), maka akan menyebabkan naiknya limit stabilitas nyala. Lalu penelitian yang dilakukan oleh Fahrul Munajat (2009), diketahui bahwa modus nyala api yang terjadi pada masing-masing nosel dengan rasio gap nosel-diameter nosel (L/d) dipengaruhi oleh rasio antara fluks momentum udara stabil (τ_o) dan fluks momentum bahan bakar (τ_f). Dan pada setiap penurunan rasio gap nosel-diameter nosel (L/d) maka sebagian besar bentuk nyala api yang terjadi adalah membentuk pipa api (kontinu dan tak kontinu), pipa api tak terbentuk, dan membentuk nyala api tulip dan swirl. Terbentuknya pipa api kontinu disebabkan karena rasio antara fluks momentum udara stabil (τ_o) dengan fluks momentum bahan bakar (τ_f) berada pada kondisi yang tepat untuk membentuk pipa api kontinu. Penyebab lainnya aliran nitrogen yang keluar dari nosel *co-flow* tidak mengganggu campuran bahan bakar-udara. Pada pipa api tak terbentuk hal ini disebabkan diameter nosel yang lebih besar sehingga kecepatan fluida yang mengalir akan menjadi kecil sehingga dibutuhkan udara yang lebih tinggi untuk membentuk pipa api kontinu. Sedangkan munculnya api tulip dan terjadi swirl disebabkan besarnya diameter nosel sehingga kecepatan aliran bahan bakar menjadi kecil, akibatnya aliran ini tidak terlalu cukup kuat membentuk pipa api.

Dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya belum dilengkapi dengan visualisasi dan analisa nyala api yang terjadi. Hal itu yang mendorong untuk dilakukannya kajian yang lebih mendalam mengenai nyala api difusi pada kondisi swirl dengan menggunakan *high speed video camera* pada medan aliran berlawanan yang disertai dengan penambahan *co-flow* nosel dimana gas nitrogen dipakai sebagai gas penyelubung. *Co-flow* nosel ini diletakkan pada sisi nosel bahan bakar dan pada nosel sisi udara, dimana debit aliran nitrogen yang mengalir pada *co-flow* nosel ini diatur sedemikian rupa, sehingga rasio antara debit nitrogen dengan debit bahan bakar sesuai dengan nilai yang ditetapkan. Dengan adanya nyala api pada kondisi swirl diharapkan tercapai reaksi pembakaran yang sempurna.

1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini, rumusan masalah yang akan dibahas, yaitu mengenai nyala api difusi pada saat kondisi swirl disertai penambahan *co-flow* berupa gas

inert (nitrogen), serta parameter dinamika fluida seperti fluks momentum aliran udara (τ_o) dan fluks momentum bahan bakar (τ_f) terhadap karakteristik nyala difusi pada medan berlawanan dengan menggunakan propana (C_3H_8) sebagai bahan bakar, udara dari kompresor sebagai oksidan dan gas nitrogen sebagai gas penyelubung (*co-flow*) yang dialirkan pada dua nosel yang diletakkan secara berlawanan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan data visualisasi berupa foto atau gambar mengenai bentuk nyala api serta melakukan analisa pada kondisi swirl medan aliran berlawanan (*counter-flow*) dengan menggunakan bahan bakar gas propana, udara kompresor sebagai oksidan 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 fuel, dan dinamika fluida dari aliran. Selain itu bisa dijadikan masukan untuk memperbaiki rancangan ruang bakar.

1.4 Pembatasan Masalah

Penelitian dilakukan di Lab. Termodinamika dan Teknik Pembakaran, DTM FTUI.

1. Alat ukur debit aliran yang digunakan adalah manometer-U.
2. Tidak menganalisa hasil atau gas buang pembakaran yang dihasilkan.
3. Diameter dalam nosel (d) yang digunakan adalah 18.5 mm.
4. Variasi jarak antar nosel dibandingkan diameter dalam nosel (L/d) yang digunakan adalah 2.16.
5. Variasi 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.
6. *Co-flow* (aliran selubung) terdapat pada sisi bahan bakar dan sisi udara.

1.5 Metode Penelitian

Pada penelitian ini, metode yang dilakukan penulis yaitu dengan melakukan percobaan dan pengambilan data dengan menggunakan *counter flow diffusion flame apparatus with co-flow* yang direkam menggunakan *high speed video camera*. Parameter yang berpengaruh pada percobaan kemudian dicatat kemudian diolah. Parameter-parameter tersebut didasarkan pada studi literature dari referensi yang berkaitan, terutama dari penelitian yang dilakukan oleh Harinaldi dan Furjiyanto (2008), Fahrul Munajat (2009).

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian, disusun berdasarkan ketentuan yang berlaku, yaitu sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini berisikan tentang latar belakang dilakukannya penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan dari penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan tentang uraian dari teori dasar sistem pembakaran yang digunakan untuk mendukung penelitian yang dilakukan.

BAB III PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN

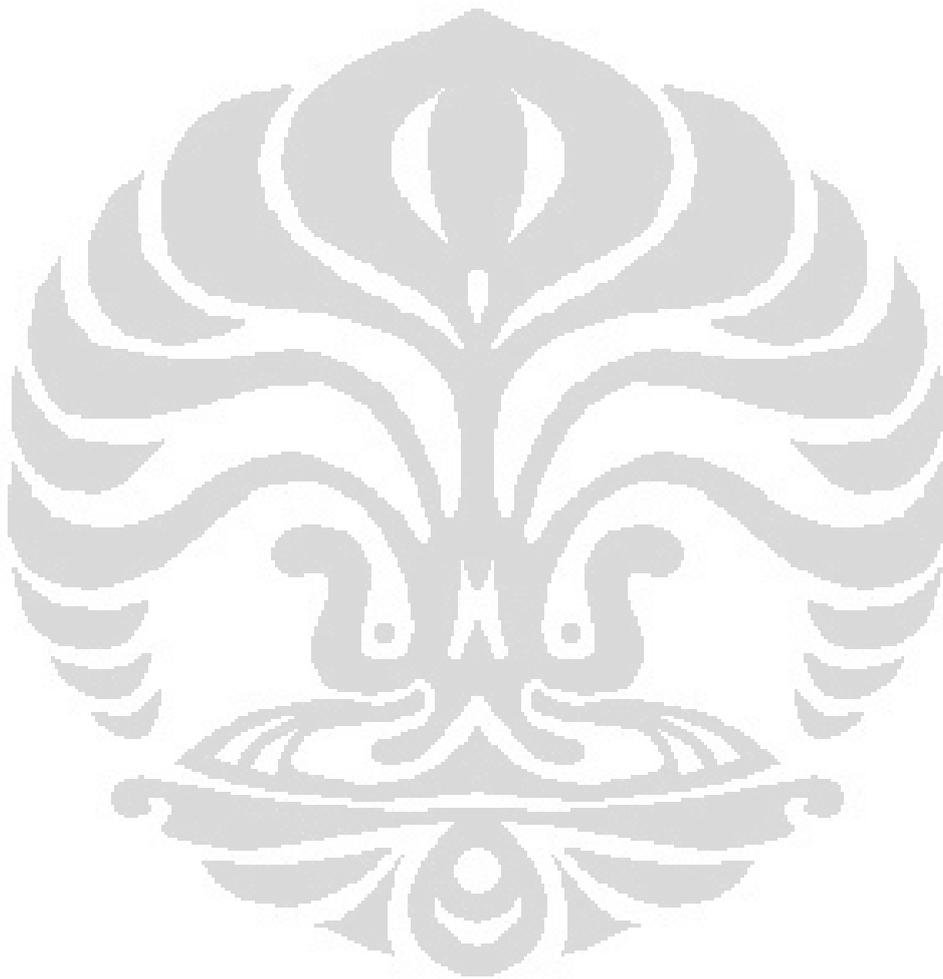
Bab ini berisi tentang rincian peralatan yang digunakan selama berlangsungnya penelitian, dan menjelaskan mengenai cara kerja alat beserta komponennya. Selain itu, dijelaskan juga mengenai prosedur pengambilan data serta metode penelitian yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan mengenai hasil visualisasi nyala api difusi pada kondisi swirl beserta analisis visualisasi hasil penelitian yang dilakukan.

BAB V KESIMPULAN

Merupakan kesimpulan dari seluruh rangkaian proses penelitian yang dilakukan.



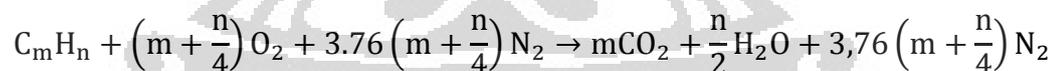
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian Pembakaran

Pembakaran bisa diartikan sebagai proses reaksi kimia antara bahan bakar (fuel) dan oksidator dengan melibatkan pelepasan energi yang tersimpan menjadi panas dan menimbulkan nyala. Bahan bakar (fuel) merupakan segala kesatuan yang melepaskan panas ketika dioksidasi dan secara umum yang mengandung unsur-unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan Sulfur (S). Sementara oksidator adalah segala kesatuan yang mengandung oksigen (misalnya udara) yang akan bereaksi dengan bahan bakar (fuel).

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

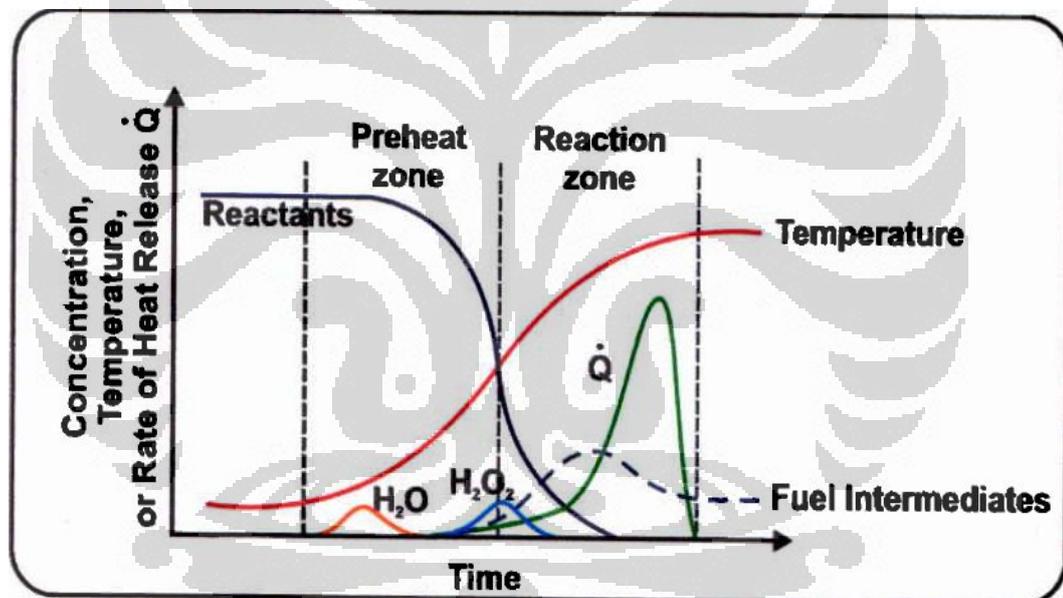
Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses pembakaran akan terjadi jika unsur-unsur bahan bakar teroksidasi oleh oksidator. Proses ini akan menghasilkan panas sehingga akan disebut sebagai proses oksidasi eksotermis. Jika oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran diperoleh dari udara, dimana udara 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

Dalam bidang teknik pembakaran terdapat berbagai macam jenis kategori nyala, akan tetapi sebagian diantaranya belum sepenuhnya teridentifikasi. Jika ditinjau dari metode pencampuran reaktan, nyala api digolongkan kedalam dua jenis, yaitu nyala api premix dan nyala api difusi. Jika berdasarkan aliran reaktan yang masuk, maka dapat digolongkan menjadi nyala laminar dan nyala turbulen. Nyala api premixed (*premixed flame*) adalah di mana bahan bakar dan udara bercampur sebelum terjadinya proses pembakaran. Pengapian diperlukan untuk memberikan sejumlah energi dalam bentuk yang sesuai, sehingga dapat menilai suatu proses pembakaran. Lalu akan terjadi penjaralan (*propagation*) ke campuran, sebagai suatu nyala (*flame*).



Gambar 2.1 Profil nyala api laminar [1]

Dari gambar diatas terlihat bahwa nyala api terdiri dari 3 daerah, yaitu:

1. Zona *pre-heat*

Dimana temperatur gas yang tidak terbakar meningkat sampai suatu nilai yang berubah-ubah, dan sedikit panas yang dilepaskan.

2. Zona reaksi

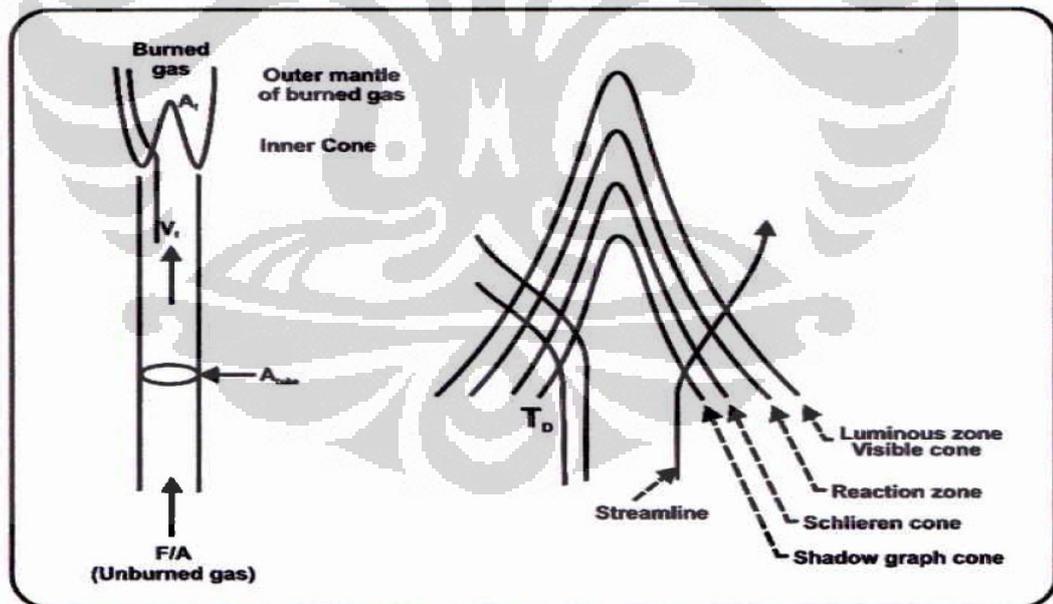
Daerah dimana pembakaran berlangsung dan sebagian besar energi kimia dilepaskan.

3. Zona *post-flame*

Daerah dengan temperatur yang tinggi dan pengkombinasian ulang menuju kesimbangan setempat.

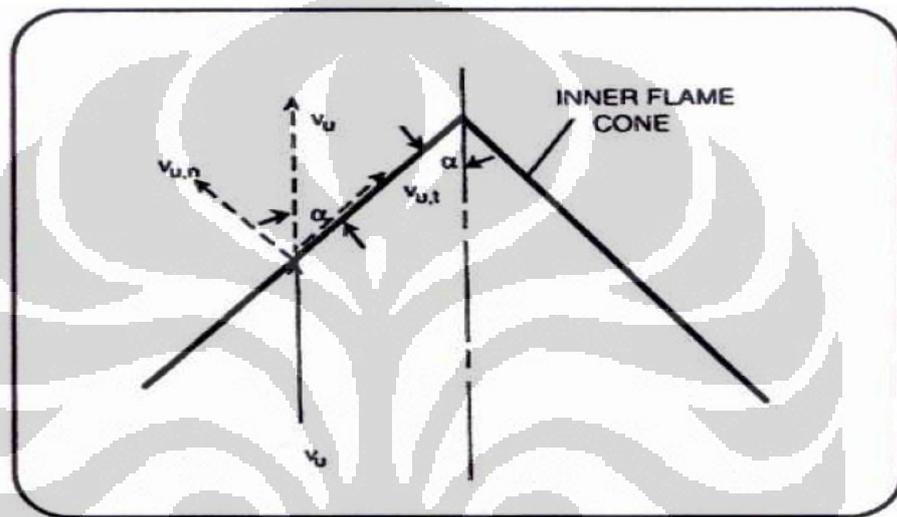
2.2.1 Nyala Api *Premixed* (*Premixed Flame*)

Nyala api *premixed* (*premixed flame*) terdiri atas daerah terang, menunjukkan tempat terjadinya reaksi dan energi panas dilepaskan daerah reaksi (*reaction zone*) yang mempunyai ketebalan ± 1 mm. Warna terang ini dapat berubah-ubah tergantung rasio udara dan bahan bakar. Daerah Schlieren (*Schlieren zone*) dan daerah gelap (*dark zone*), merupakan daerah transisi terjadinya perubahan molekul gas menjadi gas yang siap bereaksi pada jarak daerah pemanasan awal (*preheat zone*).



Gambar 2.2 Struktur nyala api *premixed* [2]

Gambar di atas menunjukkan secara skematik suatu struktur nyala api yang dihasilkan oleh suatu *Bunsen burner*. Nyala api khas hasil *bunsen burner* adalah nyala rangkap, yaitu inti nyala *premixed* yang kaya akan bahan bakar dikelilingi dengan nyala difusi. Bentuk nyala api sangat ditentukan oleh kombinasi pengaruh profil kecepatan perambatan nyala api (*flame propagation*) dan pengaruh hilangnya panas ke dinding tabung (*flame quenching*).



Gambar 2.3 Vektor diagram kecepatan nyala laminar [1]

Supaya kontur struktur nyala api tidak berubah, maka kecepatan nyala api harus sama dengan kecepatan normal komponen dari campuran udara-bahan bakar yang belum terbakar pada setiap lokasinya, dan khususnya pada kondisi aliran gas laminar dengan dengan bilangan $Re < 2300$, maka kecepatan nyala api termasuk kecepatan nyala api laminar (S_L) tidak dipengaruhi oleh bilangan Reynolds dan dapat dituliskan persamaannya sebagai berikut:

$$S_L = V_u \sin \alpha$$

2.2.1.1 Laju Nyala Api *Premixed* Laminar

Proses reaksi pembakaran dalam suatu nyala api adalah gabungan dari reaksi kimia, perpindahan panas (konduksi, konveksi dan radiasi), perpindahan massa dan momentum dengan difusi dan pola aliran sehingga bentuk dan ukuran nyala sangat dipengaruhi oleh tahapan proses yang terjadi, sehingga bentuk nyala api dimensi satu dibagi menjadi empat daerah tahapan proses yaitu:

- Daerah gas yang belum terbakar (*unburned gas zone*).
- Daerah pemanasan awal (*preheating zone*).
- Daerah reaksi (*reaction zone*).
- Daerah gas terbakar (*burned gas*).

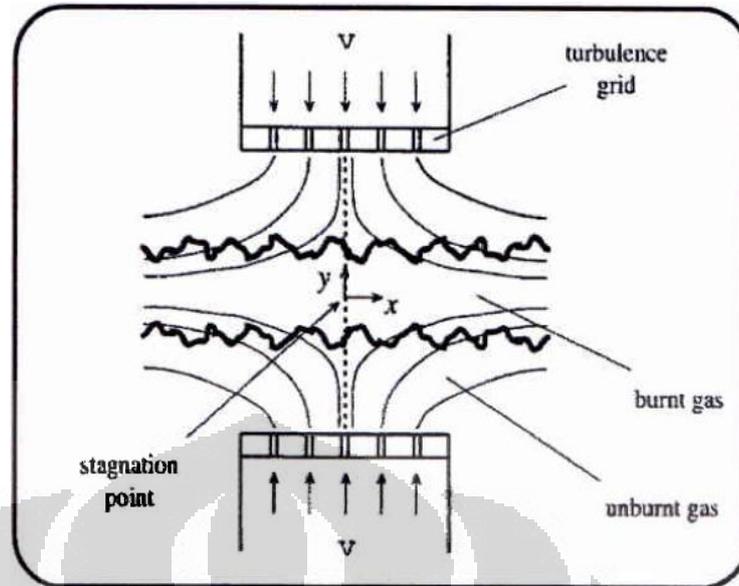
Gas *premixed* yang akan berubah menjadi nyala *premixed* memiliki kesamaan pada kecepatan, temperatur, dan konsentrasi dengan bentuk fisik yang tetap dalam daerah gas yang belum terbakar (*unburned gas zone*). Dalam daerah *preheating*, temperatur naik akibat konduksi energi panas dan pada daerah ini gas *premixed* menerima energi panas lebih besar dibandingkan daerah lain.

Daerah reaksi dibagi menjadi dua daerah yaitu:

1. Daerah reaksi primer, dimana sebagian besar hidrokarbon bereaksi, akibatnya laju reaksi dan temperatur naik secara cepat.
2. Daerah setelah pembakaran (*after-burning region*), dimana terjadi perubahan bentuk produk pertengahan seperti CO dan H₂ menjadi CO₂ dan H₂O dengan laju reaksi lebih lambat dan kenaikan temperatur yang rendah.

2.2.1.2 *Counter Flow Premixed Flame*

Modifikasi geometri aliran stagnasi yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini merupakan salah satu konfigurasi aliran berlawanan, dimana dua bentuk nyala api distabilkan oleh aliran simetris dari dua nosel. Pada kondisi ini terjadi pencampuran bahan bakar dan udara sebelum memasuki zona reaksi. Sehingga nyala yang terjadi dikenal dengan *counter flow premixed flames*.



Gambar 2.4 Nyala *premixed* pada aliran berlawanan [3]

Pada kondisi aliran laminar, komponen kecepatan pada arah sumbu y akan semakin turun dari suatu nilai tertentu pada keluaran nosel sampai nol pada titik stagnasi, dan tidak dipengaruhi oleh variabel pada arah x . Sehingga permukaan nyala akan normal pada arah sumbu y . Kelemahan dari konfigurasi ini adalah eksistensi dari *mean strain* dan kenyataan bahwa dua permukaan nyala mungkin berhubungan satu sama lain.

Terdapat sejumlah penelitian yang telah menggunakan konfigurasi ini untuk mempelajari struktur dari *turbulent premixed flames*, diantaranya Alejandro Bionis [4] yang mempelajari mengenai pengaruh tekanan terhadap nyala api *premixed* sebagian pada medan aliran berlawanan dengan reaktan H_2 -udara. Dari hasil penelitiannya menunjukkan bahwa dengan kenaikan tekanan, ketebalan masing-masing zona reaksi (*reaction zone*) akan semakin turun, dan yang paling penting jarak masing-masing zona reaksi akan semakin turun juga.

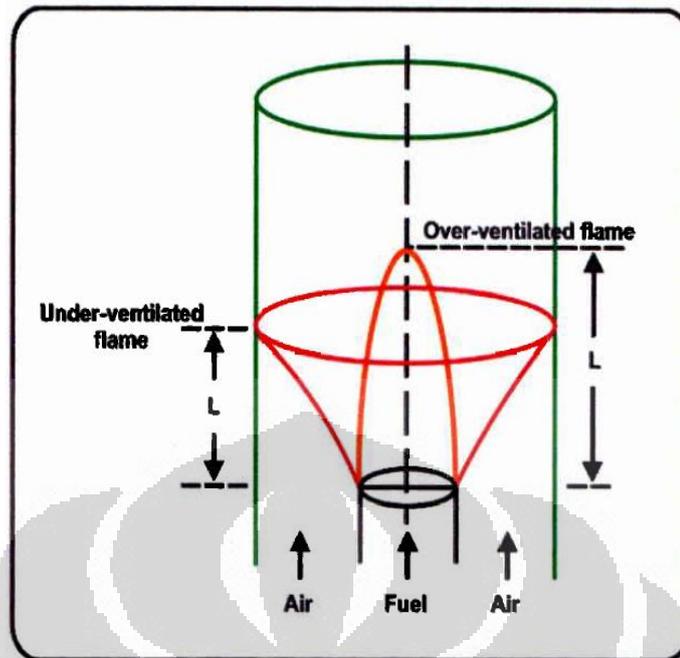
2.2.2 Nyala Difusi

Pada pembakaran *diffusion flame*, bahan bakar dan oksidan (udara) pada awalnya terpisah. Pembakaran akan berlangsung pada daerah dimana bahan bakar dan udara kemudian bercampur. Aliran bahan bakar yang keluar dari ujung nosel

akan bercampur dengan udara secara difusi. Jika diberi pengapian campuran ini akan terbakar bila konsentrasi bahan bakar dan udara terdapat dalam jangkauan batas nyalanya. Pemunculan dari nyala akan bergantung pada sifat dari bahan bakar dan kecepatan pancaran bahan bakar terhadap udara 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.

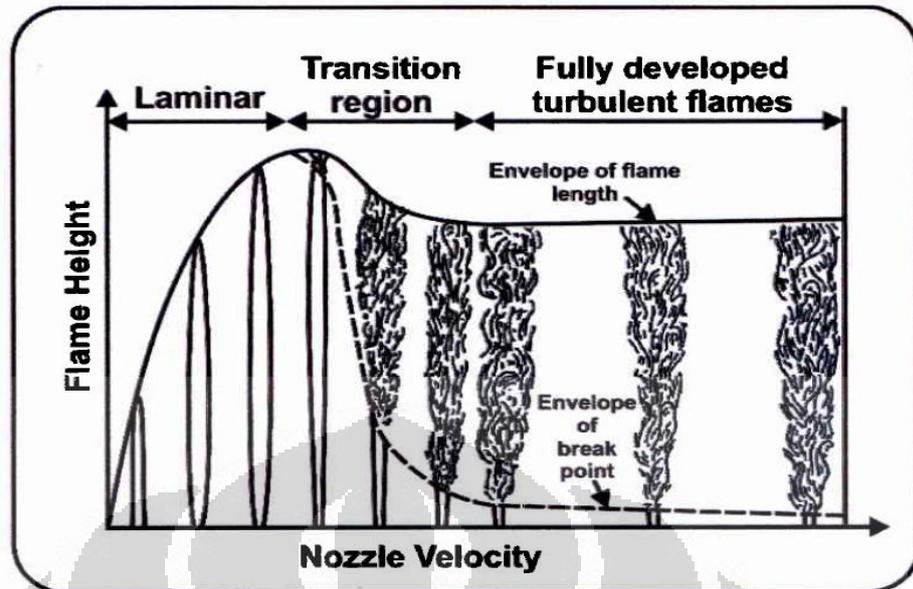
Burke dan Schumman (1928) mempelajari nyala api difusi dalam sebuah tabung dimana aliran bahan bakar dikelilingi oleh aliran udara dengan kedua aliran tersebut memiliki kecepatan yang sama. Bentuk api yang terbentuk tergantung dari apakah aliran udara tersebut memiliki lebih banyak oksigen (*over-ventilated*) 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 2.5 *Over-ventilated* dan *under-ventilated* pada nyala api difusi [5]

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 diantara 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 [6].

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 api laminar. Titik dimana aliran laminar berubah menjadi aliran turbulen dinamakan *break point*. Ketika *break point* terletak dengan nosel bahan bakar, tinggi api dan tinggi *break point* sudah tidak berubah lagi, yang berubah adalah perubahan timbulnya intensitas suara yang semakin tinggi.

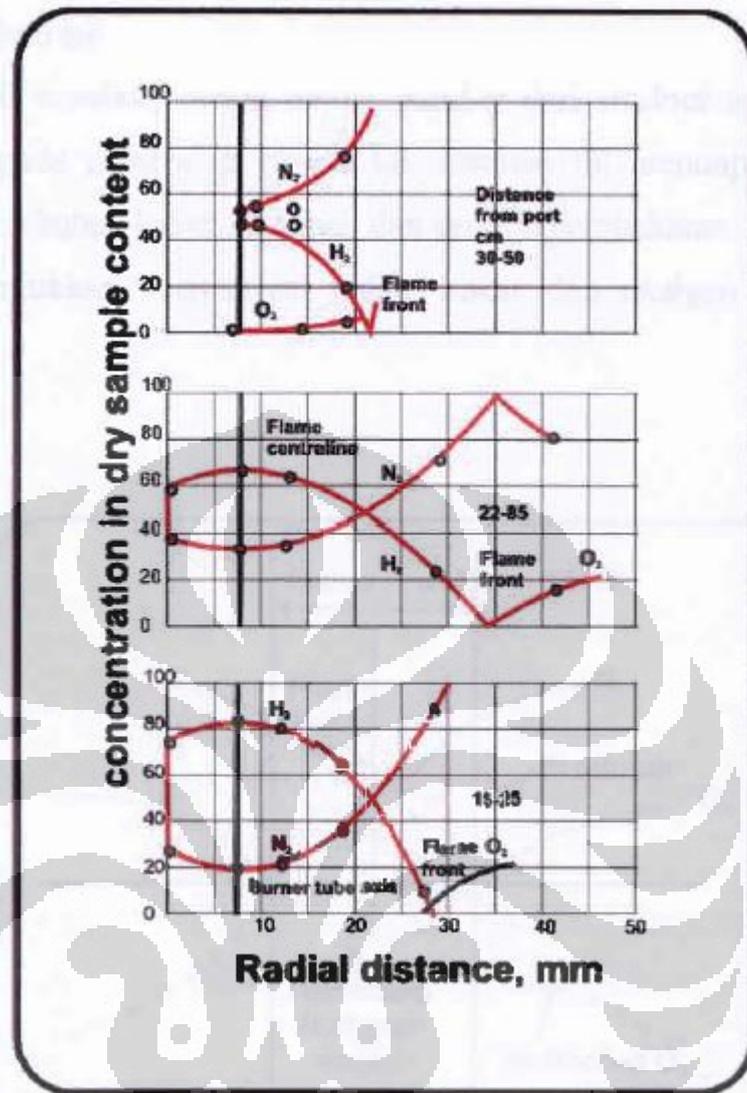


Gambar 2.6 Perubahan bentuk api terhadap kecepatan aliran bahan bakar [7]

Gambar di atas menunjukkan perubahan pada tinggi dan posisi *break point* dengan meningkatkan kecepatan aliran. Pada daerah laminar, tinggi api mendekati linear 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.



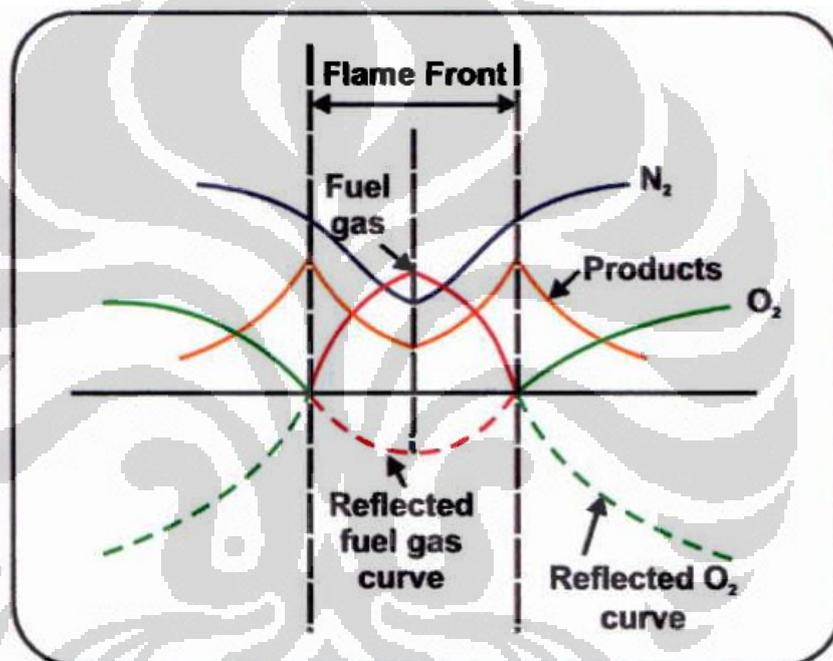
Gambar 2.7 Diagram komposisi nyala api difusi berbahan bakar nitrogen [8]

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 bakas 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 diatas 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 ditandakan 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 2.8 Diagram profil konsentrasi pada nyala api difusi tipe laminar [9]

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 di bawah ini.



Gambar 2.9 Nyala turbulen [10]

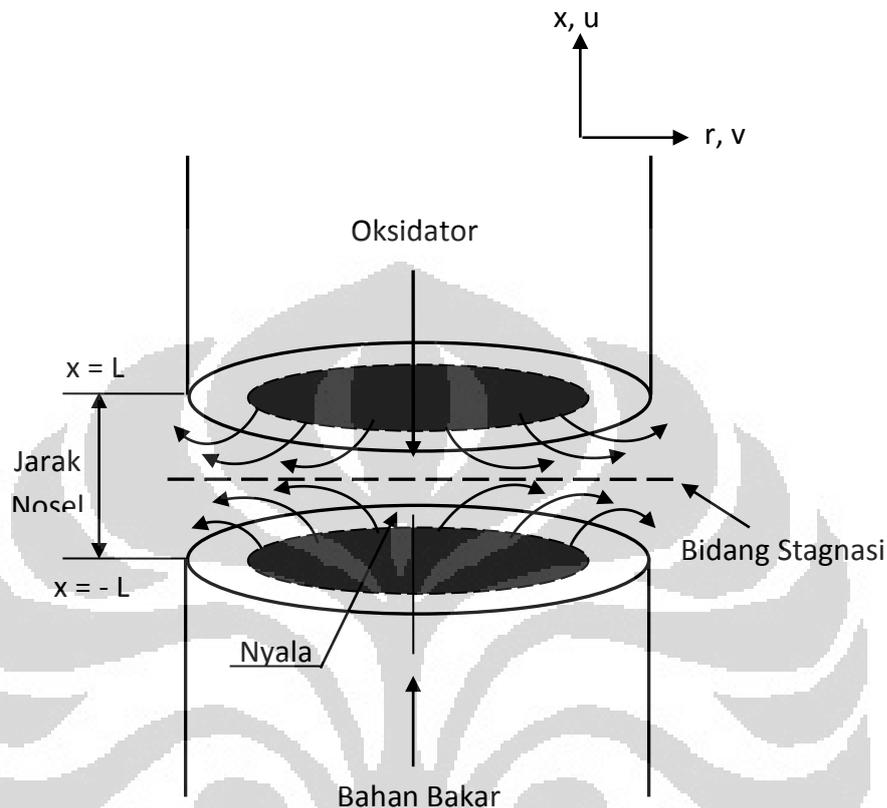
Turbulensi pada gas yang tidak terbakar akan meningkatkan laju penjarangan nyala pada campuran bahan bakar –udara. Mekanisme turbulensi akan meningkatkan efisiensi proses perpindahan (kalor dan senyawa reaksi) sebagai hasil dari *mixing* pada permukaan nyala (*flame front*).

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 ketidaktunakan 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 2.10 Skema nyala difusi pada medan aliran berlawanan [3]

Pada skema *counter flow diffusion flame* di atas, aliran bahan bakar berasal dari nosel bawah dan udara sebagai oksidan 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 oksidan sama besar, dan juga dengan menambahkan nitrogen atau gas *inert* lain pada bahan bakar dan oksidan 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 oksidan 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 [11]. Dimana hasil dari penelitian mereka menunjukkan bahwa debit aliran bahan bakar memiliki pengaruh yang sangat kecil terhadap temperatur nyala dan juga pembentukan jelaga (*soot*) juga kurang begitu dipengaruhi oleh debit aliran bahan bakar. Pengukuran temperatur pada *counter flow diffusion flame* ini menunjukkan bahwa pada kecepatan aliran yang sangat rendah, temperatur akan turun dan *extinction* pada aliran yang sangat rendah terkait dengan rugi kalor pada *burner*.

J.C Rolon [12] 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 [13] yang melakukan penelitian mengenai pengaruh perubahan kecepatan aliran terhadap batas nyala api padam (*extinc*) pada nyala difusi *counter flow*, selanjutnya V. R Katta [14] juga mempelajari kriteria *extinction* pada nyala difusi dalam medan aliran berlawanan. Hasil penelitian mereka menunjukan 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 [15] juga mempelajari mengenai pengaruh pemanasan awal udara (*air pressure*) 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 H₂ yang dihasilkan.

2.3 Karakteristik Nyala

Faktor fisik dan kimia diketahui dapat mempengaruhi karakteristik nyala, variabel-variabel fisik itu diantaranya adalah temperatur dan tekanan, sedangkan variabel kimia diantaranya adalah rasio campuran, penambahan *inert* dan struktur hidrokarbon.

Pengaruh komposisi campuran sangat penting bagi kecepatan pembakaran, nyala hanya akan merambat pada konsentrasi campuran tertentu. Konsentrasi

bahan bakar minimum dalam campuran yang sudah dapat menyala dinamakan batas nyala terbawah, dan biasanya konsentrasi bahan bakar dan udara dikondisikan pada keadaan standar yaitu campuran stokiometri. Dengan penambahan konsentrasi bahan bakar pada campuran, maka campuran akan kaya dan oksigen berkurang, kecepatan pembakaran turun dan api akan padam, hal ini juga berkaitan dengan batas nyala yang dinamakan batas nyala atas.

2.4 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.

Ada beberapa ketidakstabilan dalam *Bunsen burner* yaitu:

1. Ketidakstabilan sistem, meliputi interaksi aliran pada komposisi reaksi sistem yang berbeda.
2. Ketidakstabilan akustik, meliputi interaksi gelombang suara dengan proses pembakaran.
3. Ketidakstabilan Taylor, meliputi efek gaya apung atau percepatan pada fluida dengan perubahan densitas.
4. Ketidakstabilan Landau, ketidakstabilan hidrodinamika dari bentuk pembakaran yang diasosiasikan tidak meliputi akustik ataupun bouyancy tetapi hanya meliputi penurunan kerapatan yang dihasilkan oleh pembakaran aliran tak mampu mampat.
5. Ketidakstabilan diffusivitas termal, meliputi hubungan reaksi diffusi dan kalor dengan nyala primer.

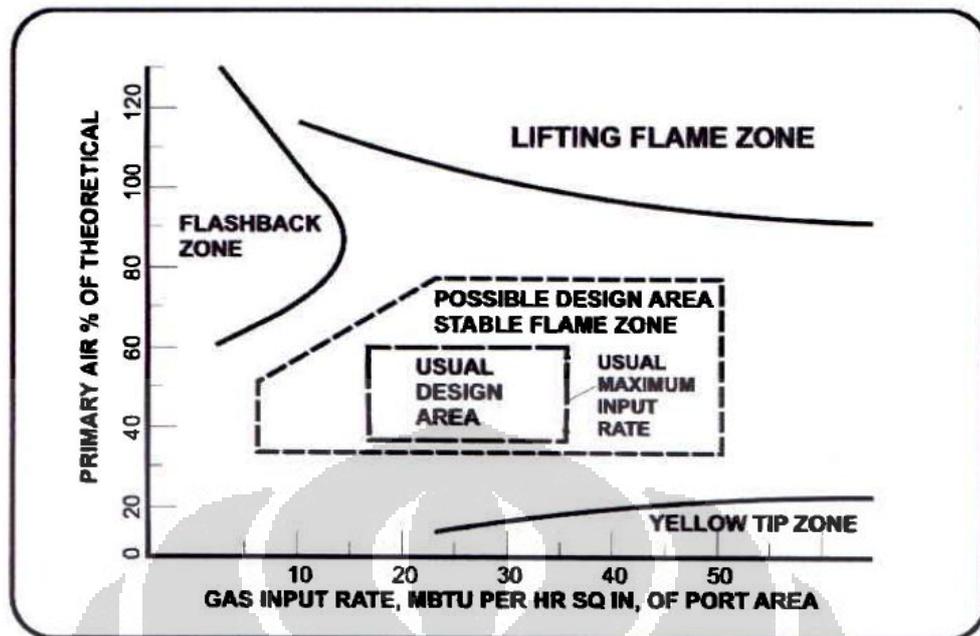
Suatu hal yang sangat penting dalam perencanaan pembakaran gas adalah mencegah terjadinya *flashback* dan *lift-off*. Batas kestabilan nyala berhubungan erat dengan fenomena *flashback*, *lift-off*, *blow-off*, dan warna nyala pada tabung pembakar (*burner*).

2.4.1 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 *flasback* melalui tabung dan lebih besar dari jarak *quenching*.

Gambar di bawah ini 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 2.11 Diagram stabilitas flashback, lift-off, dan yellow tipping untuk bahan bakar gas industri [16]

2.4.2 Fenomena *Lift Off*

Lift-off adalah kondisi dimana 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.

Fenomena nyala api terangkat (*lift-off*) sangat tergantung pada nyala api lokal dan sifat aliran dekat ujung (mulut) tabung pembakar. Apabila kecepatan aliran cukup rendah, ujung bawah nyala api berada sangat dekat dengan ujung tabung pembakar dan hal ini dikatakan menempel. Jika kecepatan dinaikkan, maka sudut kerucut nyala turun sesuai dengan kondisi $\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{S_L}{V_u} \right)$ dan ujung nyala bergeser sedikit ke bawah.

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-*

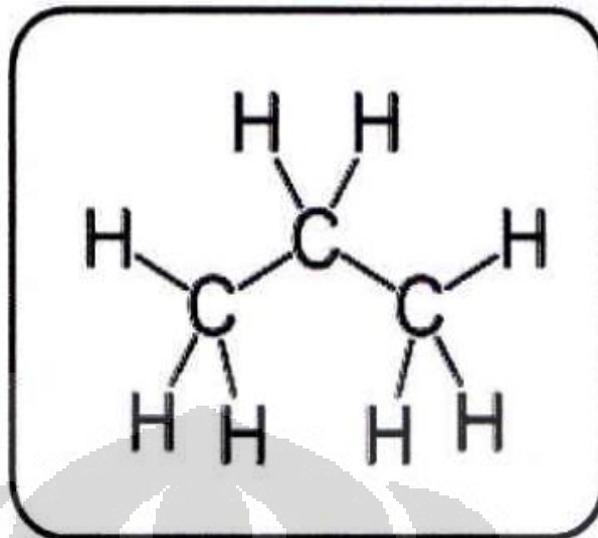
off, dan jika kecepatan aliran terus dinaikkan, maka nyala secara kasar akan padam dan kondisi ini tidak diinginkan.

2.4.3 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.

2.5 Propana (C₃H₈)

Propana adalah senyawa alkana tiga karbon (C₃H₈) 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 2.12 Struktur molekul propane

Dalam penggunaan sehari-hari sebagai bahan bakar, propane dikenal juga sebagai LPG (*liquified petroleum gas*) yang dapat berupa campuran dengan sejumlah kecil propena, butana dan butena. Kadang ditambahkan juga etanetiol sebagai bahan pemberi bau agar dapat digunakan sebagai deteksi jika ada 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 1kg atau satu satuan berat bahan bakar padat atau cair atau 1m^3 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 ft³. Gravitasi jenis disingkat sp.gr. atau sg. Definisinya adalah perbandingan berat bahan bakar terhadap berat air, diukur pada 600⁰F, yang pada suhu tersebut berat air = 62,4 lb/ft³.

4. Viskositas atau kekentalan

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

5. *Flash point*

Flash point adalah suatu 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 di bawah ini.

Tabel 2.1 Properti kimia propana

Rumus molekul	C ₃ H ₈
Wujud	Gas
Warna	Tidak berwarna
Massa molar	44.096 g/mol
Titik didih	-43.67°F (-42.04°C) pada 1 atm
Gravitasi jenis	1.5223 pada 70°F (21.1°C) pada 1 atm
Titik uap	305.84F (-187.69C) pada 1 atm
Tekanan uap	109.73 psig, (756.56 kPa) pada 70°F (21.1°C)

Densitas	1.83 g/L, gas (0.5077 kg/L liquid)
Solubility dalam air	0.1 g/cm ³ (37.80C)
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: *Internasional 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.

Pembakaran propana jauh lebih bersih dari bensin, tetapi tidak sebersih gas alam. Kehadiran ikatan molekul C-C ditambah ikatan berlipat 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

2.6 Oksigen (O₂)

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 volume, 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

Physical properties						
Phase	Gas					
Density	(0°C, 101.325 kPa)					
	1.429 g/L					
Melting point	54.36 K					
	(-218.79°C, -361.82°F)					
Boiling point	90.20 K					
	(-182.95°C, -297.31°F)					
Critical point	154.59 K, 5.043 Mpa					
Heat of fusion	(O ₂) 0.444 kJ mol ⁻¹					
Heat of vaporization	(O ₂) 6.82 kJ mol ⁻¹					
Heat capacity	(25°C) (O ₂)					
	29.378 J.mol ⁻¹ .K ⁻¹					
Vapor pressure						
P/Pa	1	10	100	1 k	10 k	100 k
at T/K				61	73	90

Sumber: Pocket Wikipedia for Windows, 2009

2.7 Nitrogen (N₂)

Gas inert merupakan suatu gas yang tidak mudah terbakar, tidak reaktif, tidak mencemari dan tidak beracun. Gas inert mempunyai manfaat yang cukup potensial dari 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 ($C_p \cdot \text{CO}_2 = 37,564 \text{ J/mol K}$ dan $C_p \cdot \text{N}_2 = 28,98 \text{ J/mol K}$) 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 karbondioksida dari udara dan menunjukkan gas yang tersisa tidak menunjang pembakaran atau makhluk hidup. Gas nitrogen (N₂) 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 3 atm, nitrogen akan bersifat 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

Physical properties						
Phase	Gas					
Density	(0°C, 101.325 kPa)					
	1.251 g/L					
Melting point	63.15 K					
	(-200.00°C, -346.00°F)					
Boiling point	77.36 K					
	(-195.79°C, -320.42°F)					
Critical point	126.21 K, 3.39 Mpa					
Heat of fusion	(N ₂) 0.720 kJ mol ⁻¹					
Heat of vaporization	(N ₂) 5.57 kJ mol ⁻¹					
Heat capacity	(25°C) (N ₂)					
	29.124 J.mol ⁻¹ .K ⁻¹					
Vapor pressure						
P/Pa	1	10	100	1 k	10 k	100 k
at T/K	37	41	46	53	62	77

Sumber: Pocket Wikipedia for Windows, 2009

BAB 3

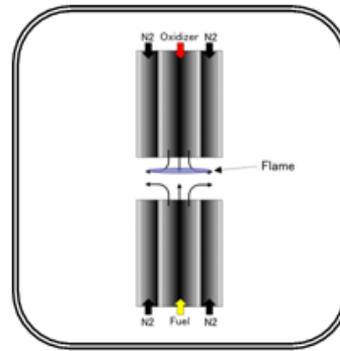
PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN

Pada penelitian kali ini, kami hanya akan membahas mengenai analisa visualisasi nyala api difusi pada kondisi swirl dengan penambahan *co-flow* pada nosel bahan bakar dan nosel udara, dimana gas yang dialirkan pada *co-flow* nya adalah gas nitrogen (N_2). Berdasarkan penelitian sebelumnya, nyala api difusi pada kondisi swirl hanya muncul pada saat menggunakan nosel \emptyset 18.5 mm. Sedangkan untuk \emptyset 8.5 mm, dan \emptyset 5.5 mm tidak digunakan karena nyala api yang terbentuk adalah nyala api pipa api terbentuk kontinu dan nyala api pipa api terbentuk tidak kontinu. Rasio antara debit nitrogen (N_2) dan bahan bakarnya (C_3H_8) atau Q_{N_2}/Q_f ditetapkan pada rasio 40/60, 50/50, 60/40, 70/30, dan 80/20.

3.1 Peralatan Penelitian

3.1.1 Peralatan Penelitian Medan Aliran Berlawanan

Dalam proses penelitian kali ini masih menggunakan peralatan yang sama dengan penelitian sebelumnya. Hanya saja pada penelitian kali ini kami menggunakan nosel \emptyset 18.5 mm untuk mengamati nyala api pada kondisi swirl. Proses pengamatan nyala api difusi kondisi swirl ini dilakukan dengan memasang dua buah nosel yang diletakkan berlawanan secara vertikal dan simetris dengan perbandingan rasio gap diameter 2.16. Pada nosel bagian atas, digunakan udara kompresor yang berfungsi sebagai oksidator. Nosel bagian atas ini, udara juga diselimuti oleh aliran gas nitrogen. Sedangkan untuk nosel bagian bawah digunakan sebagai suplai bahan bakar yang diselimuti juga oleh aliran gas nitrogen.



Gambar 3.1 Skema nosel udara dan nosel bahan bakar



Gambar 3.2 Skema nosel udara dan nosel bahan bakar

Secara keseluruhan, peralatan penelitian ini terdiri dari sistem suplai udara-bahan bakar, sistem suplai nitrogen, dan counterflow burner terdiri dari 2 buah nosel yang diletakkan berlawanan secara vertikal dan simetris.



Gambar 3.3 Sistem suplai medan aliran berlawanan

3.1.2 Peralatan Penelitian Nyala Api Difusi Kondisi Swirl

Pada penelitian nyala api difusi kondisi swirl ini menggunakan *high speed video camera* Motion Xtra HG SE. Berikut ini adalah spesifikasi dari *high speed video camera* Motion Xtra HG SE:

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

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

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



Gambar 3.4 *High speed video camera* Motion Xtra HG SE

Sumber: VITCam Manual V 1.5.9

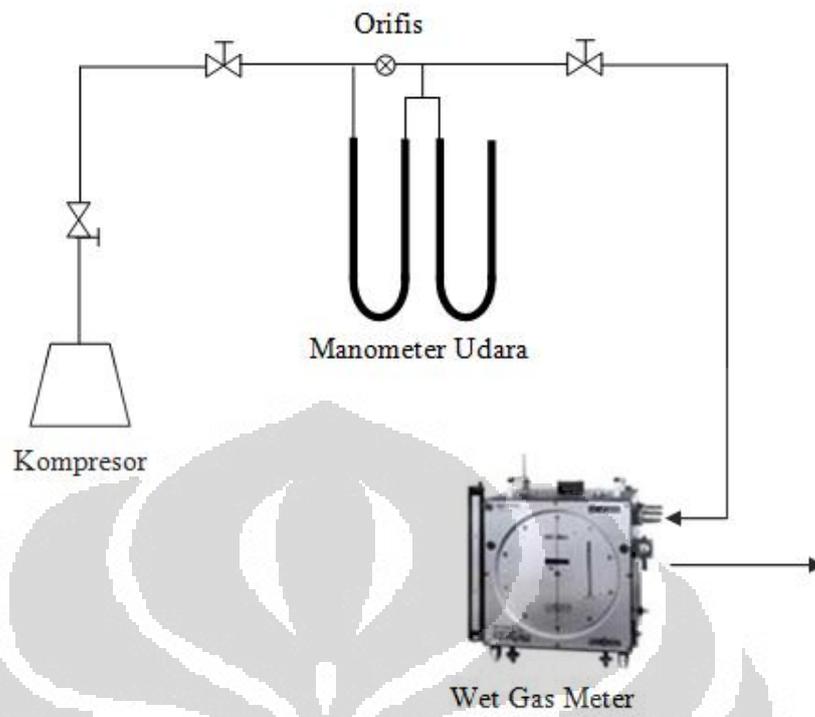
3.2 Prosedur Penelitian

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.

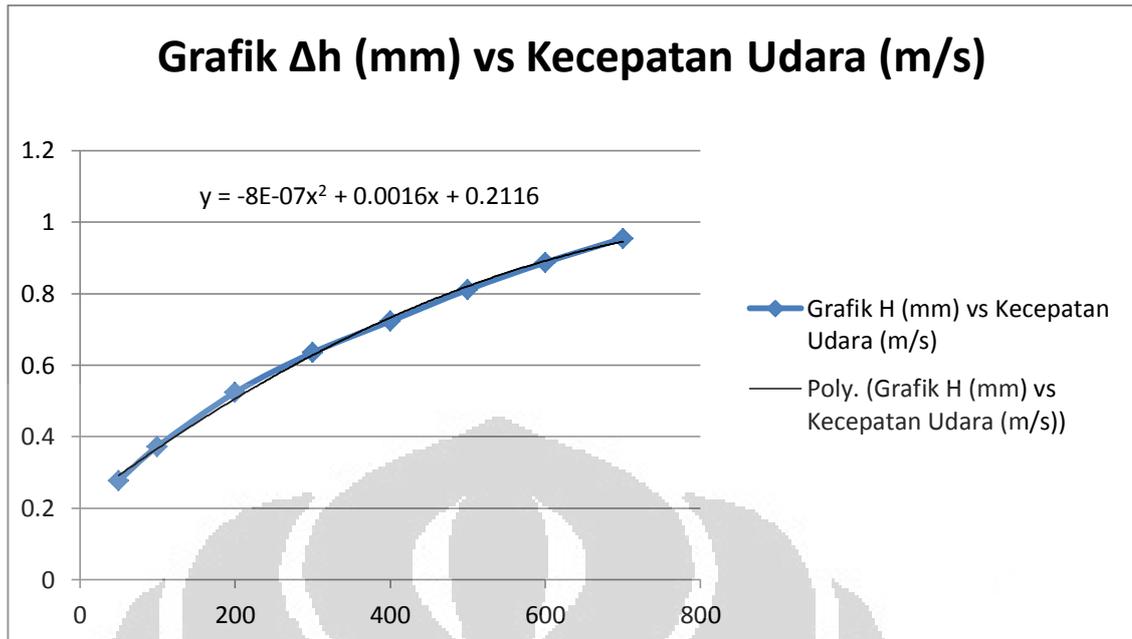
3.2.1 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Udara

1. Saluran udara yang ada pada sistem dipasang ke dalam kompresor dan dipasang ke masukan manometer tabung-U.
2. Manometer tabung-U diisi dengan air hingga mencapai angka 0-0 kemudian orifis dipasang sesuai ukuran yang diinginkan untuk pengambilan data.
3. Kemudian Wet Gas Meter Shinagawa WE-2.5 A diisi dengan air hingga level yang telah ditentukan.
4. Saluran keluaran manometer tabung-U dipasang ke masukan Wet Gas Meter Shinagawa dan pasang selang untuk keluaran fluida dari Wet Gas Meter Shingawa.
5. Setelah semua sistem udara terpasang dengan benar, lalu udara dialirkan dari kompresor melewati manometer tabung-U. Ketika udara dialirkan, tentukan nilai back pressure udara yang diinginkan.
6. Untuk menentukan perbedaan ketinggian permukaan Δh , caranya dengan menyetel needle valve udara dan nilai back pressure udara dipertahankan sesuai yang diinginkan.
7. Setiap nilai back pressure udara, diambil data setiap kenaikan Δh 100 mm pada manometer tabung-U dengan menggunakan variasi ukuran orifis mulai dari 0.8 sampai 2.0 mm.
8. Data yang diperoleh adalah volume udara yang mengalir dan waktu yang diperlukan dalam satu putaran penuh jarum jam Wet Gas Meter Shinagawa pada Δh tertentu. (volume udara, waktu, Δh).

Pada penelitian kali ini, orifis yang digunakan pada sistem suplai udara adalah \emptyset 2 mm dengan Δh back pressure = 300 mm.



Gambar 3.5 Skema kalibrasi sistem suplai udara



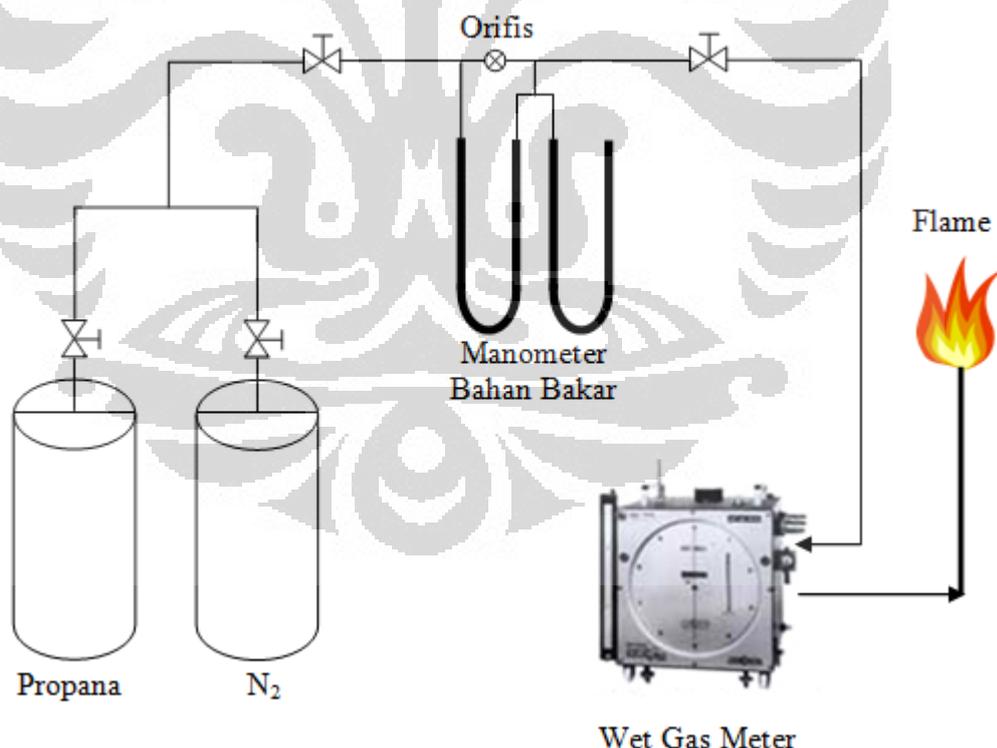
Gambar 3.6 Grafik persamaan kalibrasi kec.udara (V_o) untuk \varnothing 18.5 mm

3.2.2 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Bahan Bakar

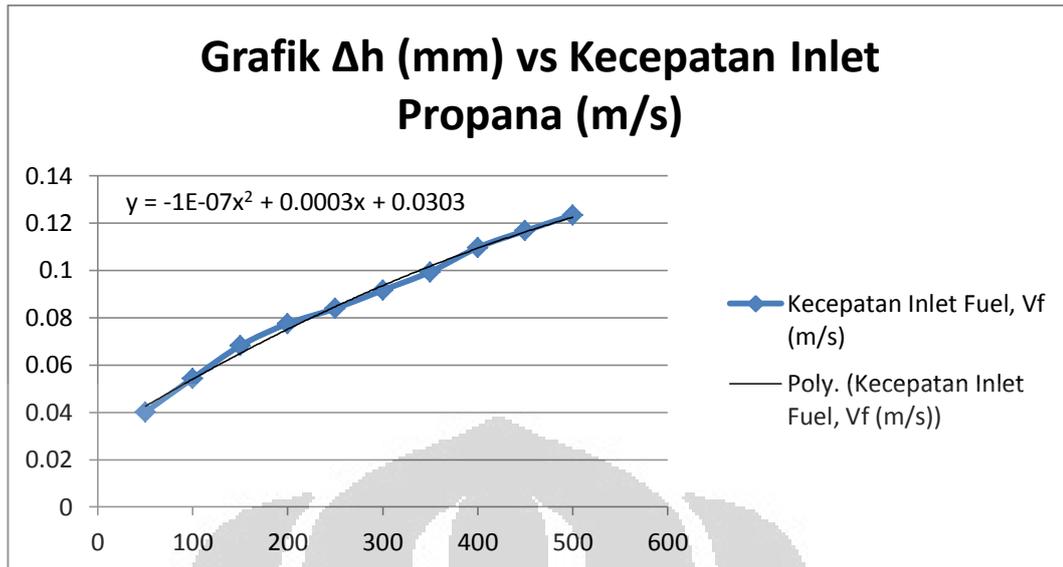
1. Saluran bahan bakar yang ada pada sistem dipasang ke dalam tabung bahan bakar dan dipasang ke masukan manometer tabung-U.
2. Manometer tabung-U diisi dengan air hingga mencapai angka 0-0 kemudian orifis dipasang sesuai ukuran yang diinginkan untuk pengambilan data.
3. Kemudian Wet Gas Meter Shinagawa WE-2.5 A diisi dengan air hingga level yang telah ditentukan.
4. Saluran keluaran manometer tabung-U dipasang ke masukan Wet Gas Meter Shinagawa dan pasang selang untuk keluaran fluida dari Wet Gas Meter Shinagawa.
5. Setelah semua sistem bahan bakar terpasang dengan benar, bahan bakar dialirkan dari tabung dengan mengatur tekanan keluar sebesar 1-2 kg/cm² (dapat dilihat pada pressure regulator). Saat bahan bakar dialirkan, tentukan nilai back pressure bahan bakar yang diinginkan.

6. Untuk menentukan perbedaan ketinggian permukaan Δh , caranya dengan menyetel needle valve bahan bakar dan nilai back pressure bahan bakar dipertahankan agar tetap konstan. (Jangan lupa untuk membakar bahan bakar 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. Setiap nilai back pressure bahan bakar, diambil data tiap kenaikan Δh 50 mm pada manometer tabung-U dengan menggunakan variasi ukuran orifis 0.8 sampai 2.0 mm.
8. Data yang diperoleh adalah volume bahan bakar yang mengalir dan waktu yang diperlukan dalam satu putaran penuh jarum Wet Gas Meter Shinagawa pada Δh tertentu. (volume bahan bakar, waktu, Δh).

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



Gambar 3.7 Skema kalibrasi sistem suplai bahan bakar



Gambar 3.8 Grafik persamaan kalibrasi kec.propana (V_f) untuk \varnothing 18.5 mm

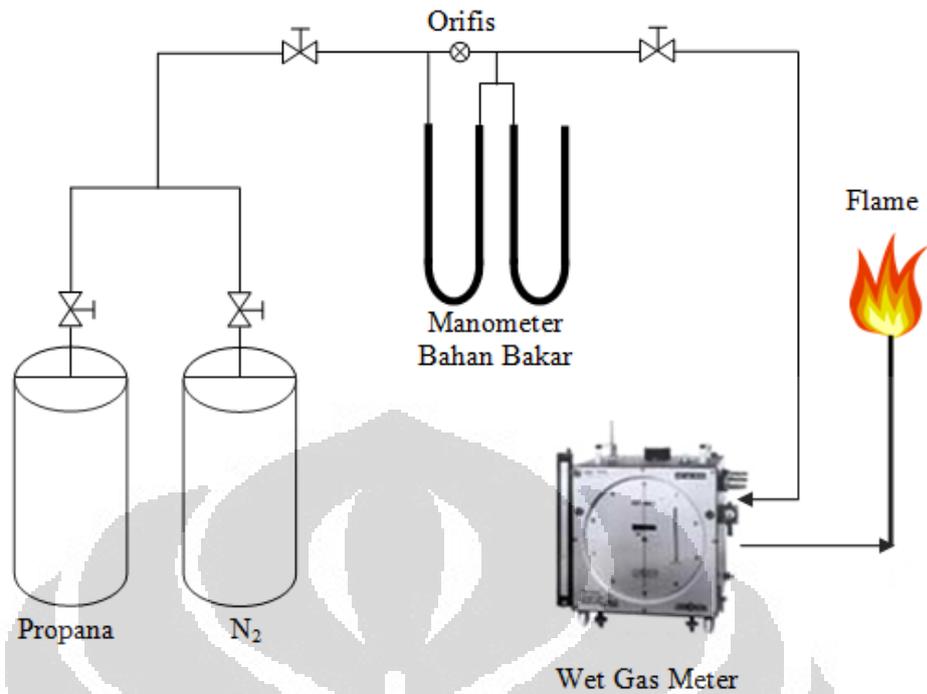
3.2.3 Prosedur Purgung

Pada proses purging 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 kedalam sistem tersebut untuk memastikan tidak adanya udara yang dapat mengakibatkan reaksi pembakaran terjadi.

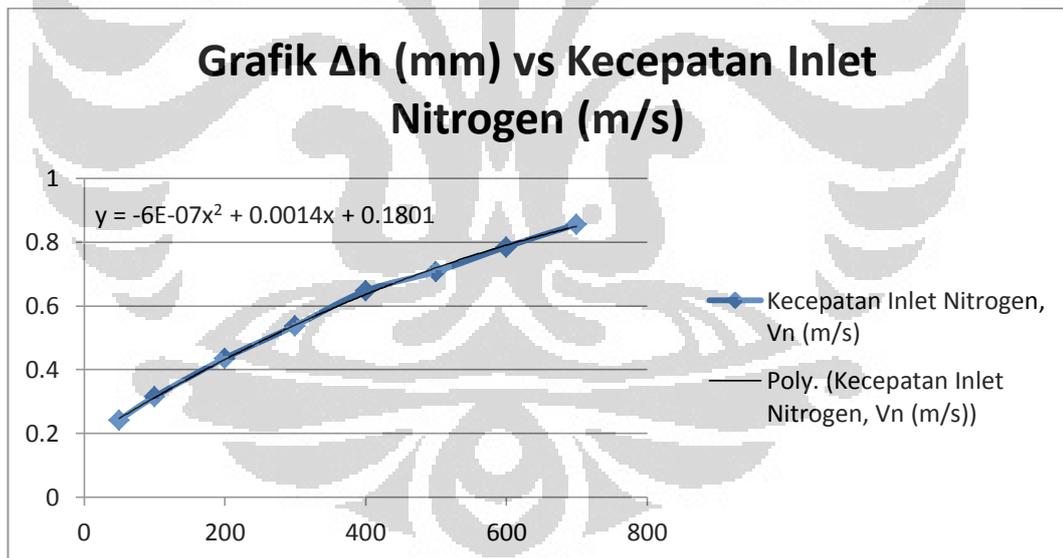
Prosedur-prosedur dalam melakukan proses purging, yaitu:

1. Seluruh saluran bahan bakar yang masuk kedalam manometer tabung-U sebelum dan sesudah melakukan kalibrasi sistem saluran bahan bakar harus dalam keadaan tertutup.
2. Saluran nitrogen yang masuk kedalam manometer tabung-U dibuka penuh, dan tekanan keluar pada tabung juga dibuka penuh. (needle valve untuk mengatur masuknya fluida pada manometer tabung-U harus dalam keadaan tertutup).

3. Setelah saluran bahan bakar tertutup dan saluran nitrogen dibuka penuh, kemudian tekanan nitrogen yang masuk kedalam manometer tabung-U diatur sebesar $1-2 \text{ kg/cm}^2$. (dapat dilihat pada pressure regulator).
 4. Katup jarum back pressure pada manometer tabung-U harus terbuka secara penuh dan katup jarum pada manometer tabung-U lainnya dibuka secara perlahan agar tidak terjadi kesalahan dalam proses purging.
 5. Proses purging dilakukan dengan mengalirkan nitrogen pada sistem suplai bahan bakar sebanyak 3x putaran penuh pada penunjukan jarum Wet Gas Meter Shinagawa. Pada proses ini harus 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. Jika bahan bakar sudah terbakar sampai habis dan sistem seluruhnya sudah berisi nitrogen, maka tutup saluran nitrogen yang masuk kedalam manometer tabung-U pertama dengan menutup valve yang terdapat pada saluran masuk nitrogen.
 7. Seluruh instalasi yang berhubungan dengan Wet Gas Meter Shinagawa dilepaskan, dan air yang berada didalam Wet Gas Meter Shinagawa harus dibuang karena berisi gas sisa hasil proses pembakaran. Selain itu untuk menghindari karat pada Wet Gas Meter Shinagawa.
- Pada penelitian kali ini, orifis yang digunakan pada sistem suplai nitrogen adalah $\varnothing 2 \text{ mm}$ dengan $\Delta h \text{ back pressure} = 300 \text{ mm}$.



Gambar 3.9 Skema proses purging

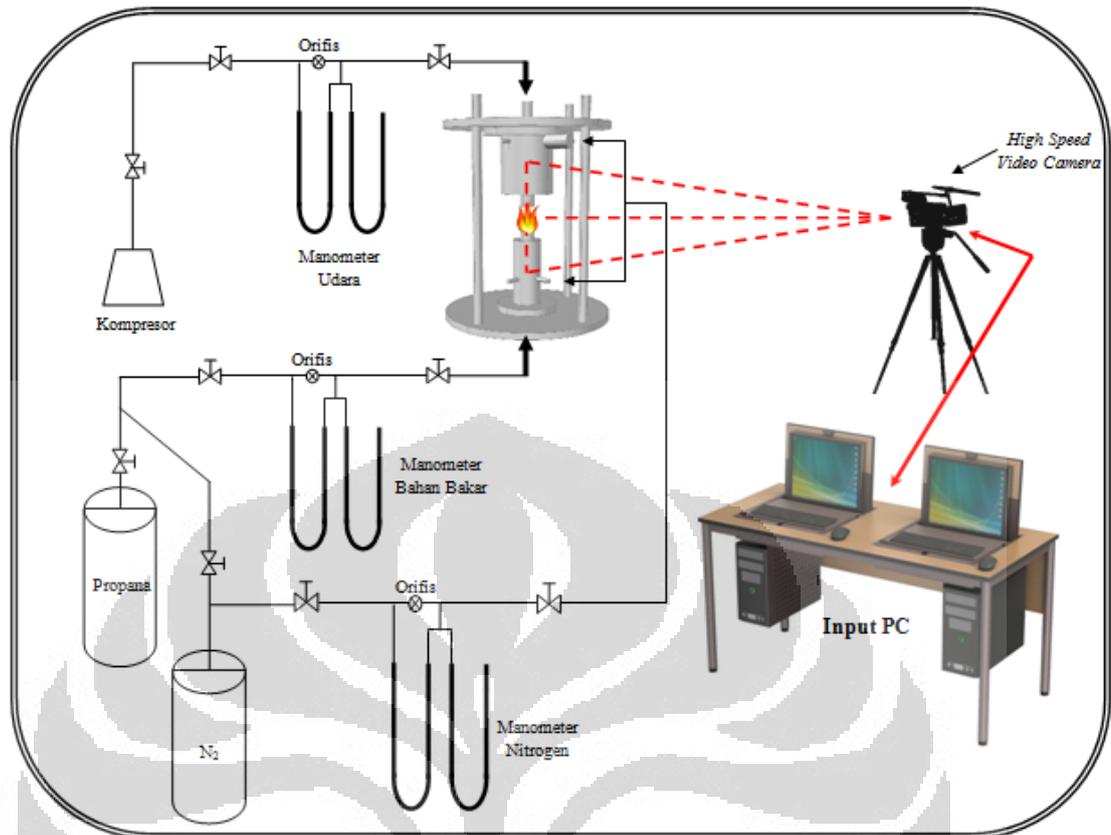
Gambar 3.10 Grafik persamaan kalibrasi kec.nitrogen (V_{N_2}) untuk \varnothing 18.5 mm

Selain melakukan kalibrasi sistem suplai bahan bakar, untuk setiap pengambilan data, sistem juga harus dibersihkan dengan mengalirkan nitrogen kedalamnya.

3.2.4 Prosedur Penelitian Dengan High Speed Camera

Pada penelitian dengan high speed video camera ini, hal yang ingin diamati adalah bentuk nyala api pada kondisi swirl. Kamera yang digunakan adalah Motion Xtra HG SE, yang dibuat oleh AOS Technologies AG, Swiss. Berikut prosedur-prosedur dalam melakukan penelitian nyala api swirl dengan high speed video camera:

1. Tripod dipasang tepat di depan burner, lalu diatur sedemikian rupa sehingga jarak lensa kamera berjarak sekitar 40 cm dari zona reaksi pembakaran.
2. Kemudian pasang high speed video camera Motion Xtra HG SE pada tripod.
3. Setelah high speed video camera terpasang, kemudian sambungkan kabel data dari kamera ke laptop, dan hubungkan kabel daya ke steker.
4. Aplikasi Vitcam 1.5.9 pada laptop dibuka.
5. Fokus lensa pada kamera diatur agar gambar terlihat jelas dan bersih.
6. Jumlah frame per detik pada aplikasi Vitcam 1.5.9 diatur, pada penelitian ini kami mensetting 125 fps.
7. Burner dinyalakan sesuai dengan prosedur untuk mendapatkan nyala api difusi tipe swirl.
8. Nyala api yang terjadi direkam selama 8 detik.
9. Mengolah data mentah yang didapat yakni berupa file AVI.
10. Data video yang didapat kemudian diekstrak menggunakan software imageJ untuk mendapatkan hasil format JPEG.
11. Hasil yang didapat adalah file format JPEG sekitar 1000 frame.



Gambar 3.11 Skema penelitian menggunakan *high speed video camera*

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam mempelajari karakteristik nyala difusi counter flow ini, penulis melakukan analisa dengan pendekatan fluks momentum (laju perubahan momentum per stuan luas). Hal ini didasarkan pada tipe aliran bahan bakar dan udara yang diuji, yaitu tipe tumbukan aliran fluida. Dimana diketahui bahwa dalam tabrakan fluida terdapat beberapa variabel yang berperan, diantaranya massa fluida sebagai kolerasi dari sifat fluida (densitas) dan juga kecepatan fluida.

$$\tau = \rho v^2 \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

τ = Fluks momentum, (kg/ms²)

ρ = Kecepatan fluida, (kg/m³)

v^2 = 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).

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

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

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

(Sumber: An Introduction to Combustion: Concept and Application)

4.1 Analisa Visualisasi *High Speed Video Camera*

Dari hasil pengamatan menggunakan *high speed video camera*, didapat sekitar 1000 frame nyala api difusi tipe swirl. Durasi waktu yang diambil selama 8 detik, dengan jumlah farme 125 frame/detik. Dari frame tersebut, kita bisa menghitung kecepatan swirl/pusaran yang terjadi pada api. Pusaran atau swirl ini adalah

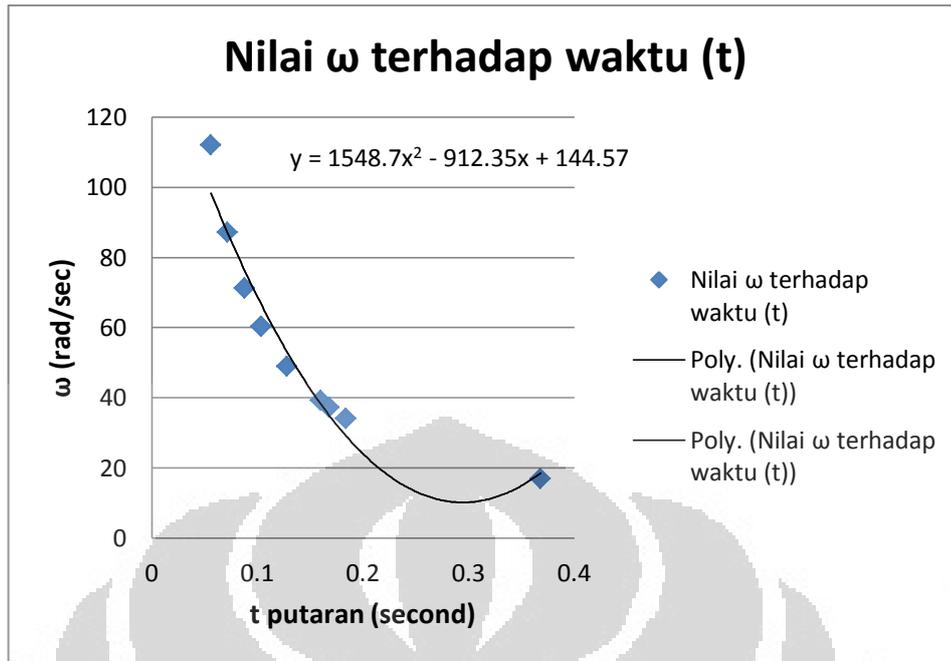
medan aliran dengan garis arus berupa lingkaran-lingkaran sepusat. Penelitian modus nyala api swirl ini dilakukan pada kondisi Δh udara stabil, yang ditentukan dimana kondisi stabil pada saat fluks momentum udara stabil adalah setengah kali fluks momentum udara pada kondisi extinct.

4.1.1 Kondisi Swirl Pada Saat $Q_{N2}/Q_f = 80/20$

Tabel 4.1 Perhitungan kecepatan swirl $Q_{N2}/Q_f = 80/20$

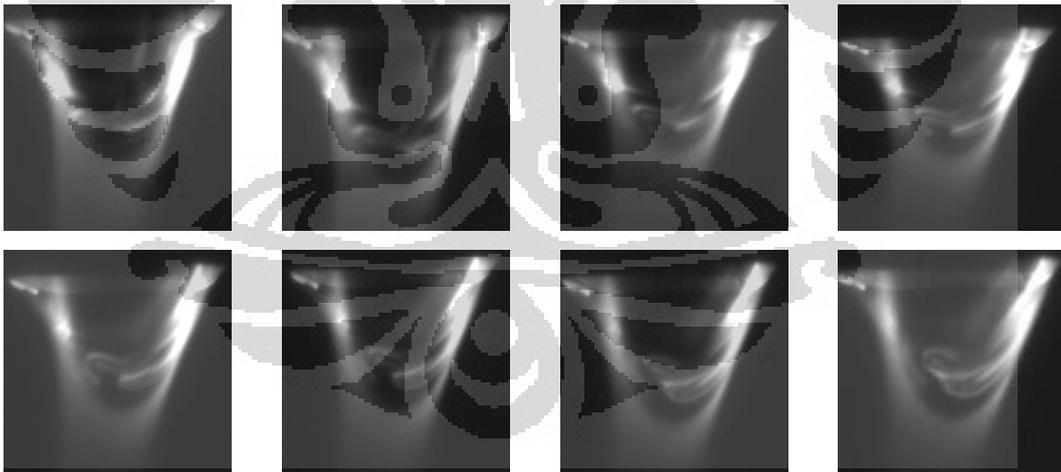
No	frame awal	frame akhir	t putaran	kec. Putar	ω	ω rata-rata
1	162	172	0.088	11.36363636	71.36363636	56.15676
2	174	186	0.104	9.615384615	60.38461538	
3	187	193	0.056	17.85714286	112.1428571	
4	331	350	0.16	6.25	39.25	
5	605	613	0.072	13.88888889	87.22222222	
6	614	626	0.104	9.615384615	60.38461538	
7	716	731	0.128	7.8125	49.0625	
8	738	760	0.184	5.434782609	34.13043478	
9	744	766	0.184	5.434782609	34.13043478	
10	799	809	0.088	11.36363636	71.36363636	
11	814	834	0.168	5.952380952	37.38095238	
12	862	907	0.368	2.717391304	17.06521739	

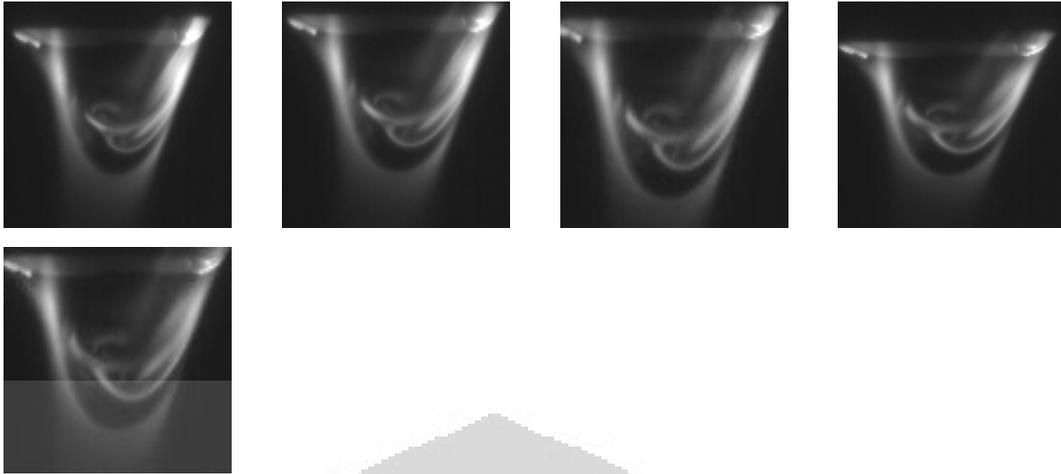
Perhitungan kecepatan swirl ini diambil kedalam dua belas kelompok gambar, dimana api swirl terlihat jelas. Dari hasil perhitungan diatas didapat bahwa kecepatan putar rata-rata swirl adalah 56.1567 rad/s.



Gambar 4.1 Grafik nilai ω (kecepatan sudut) terhadap (t) waktu $Q_{N2}/Q_f = 80/20$

Berikut ini adalah penampakan swirl dengan menggunakan *high speed video camera* pada frame 614 s/d 626.





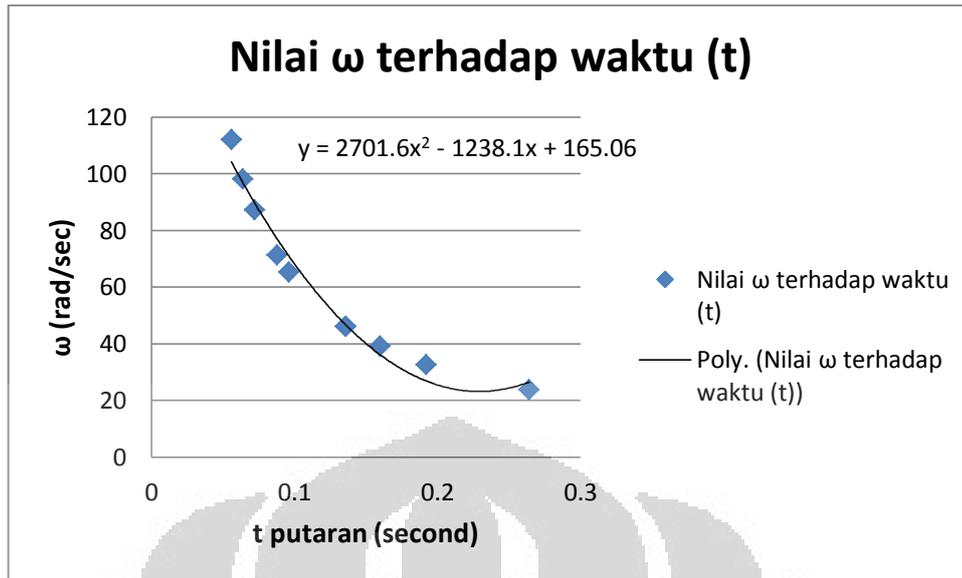
Gambar 4.2 Penampakan swirl pada frame 614 s/d 626

4.1.2 Kondisi Swirl Pada Saat $Q_{N2}/Q_f = 70/30$

Tabel 4.2 Perhitungan kecepatan swirl $Q_{N2}/Q_f = 70/30$

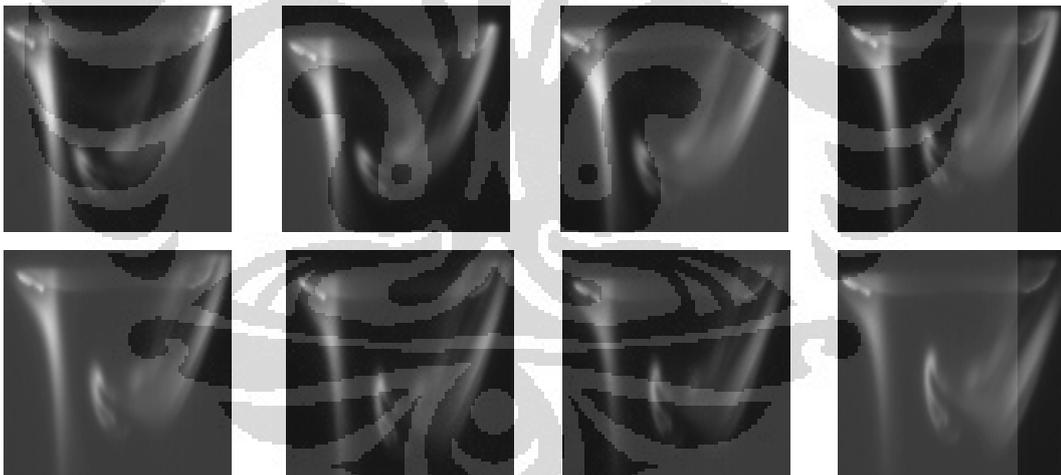
No	frame awal	frame akhir	t putaran	kec. Putar	ω	ω rata-rata
1	505	528	0.192	5.208333333	32.70833333	60.77691
2	606	638	0.264	3.787878788	23.78787879	
3	646	662	0.136	7.352941176	46.17647059	
4	669	680	0.096	10.41666667	65.41666667	
5	685	693	0.072	13.88888889	87.22222222	
6	727	737	0.088	11.36363636	71.36363636	
7	738	745	0.064	15.625	98.125	
8	754	760	0.056	17.85714286	112.1428571	
9	865	881	0.136	7.352941176	46.17647059	
10	967	983	0.136	7.352941176	46.17647059	
11	991	1010	0.16	6.25	39.25	

Perhitungan kecepatan swirl ini diambil kedalam sebelas kelompok gambar, dimana api swirl terlihat jelas. Dari hasil perhitungan diatas didapat bahwa kecepatan putar rata-rata swirl adalah 60.776 rad/s.



Gambar 4.3 Grafik nilai ω (kecepatan sudut) terhadap (t) waktu $Q_{N2}/Q_f = 70/30$

Berikut ini adalah penampakan swirl dengan menggunakan *high speed video camera* pada frame 738 s/d 745.



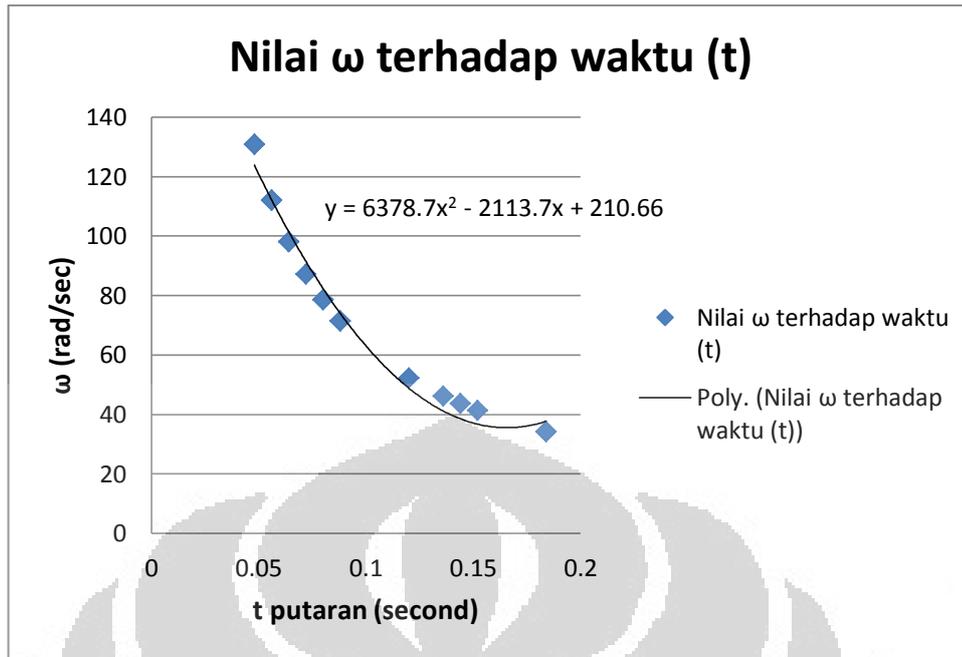
Gambar 4.4 Penampakan swirl pada frame 738 s/d 745

4.1.3 Kondisi Swirl Pada Saat $Q_{N2}/Q_f = 60/40$

Tabel 4.3 Perhitungan kecepatan swirl $Q_{N2}/Q_f = 60/40$

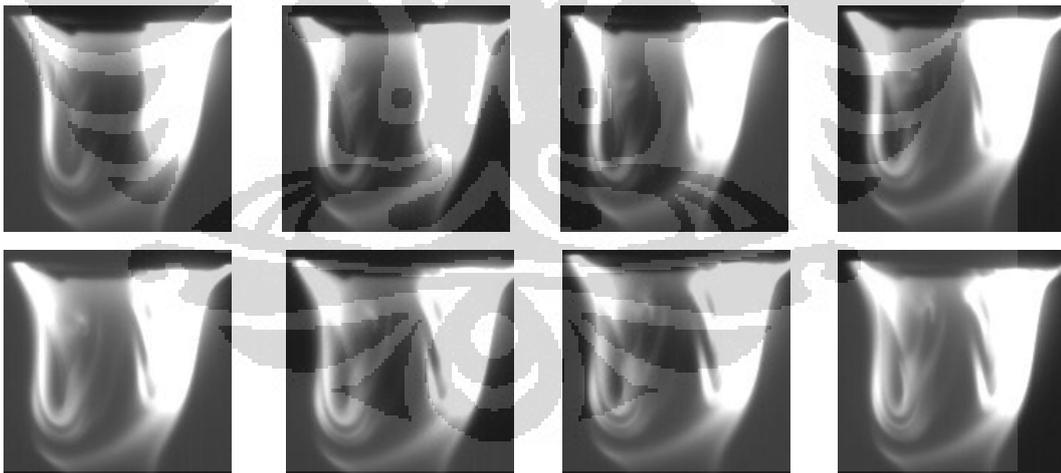
No	frame awal	frame akhir	t putaran	kec. Putar	ω	ω rata-rata
1	13	29	0.136	7.352941176	46.17647059	81.322903
2	50	72	0.184	5.434782609	34.13043478	
3	82	92	0.088	11.36363636	71.36363636	
4	102	112	0.088	11.36363636	71.36363636	
5	148	157	0.08	12.5	78.5	
6	176	194	0.152	6.578947368	41.31578947	
7	196	213	0.144	6.944444444	43.61111111	
8	219	241	0.184	5.434782609	34.13043478	
9	256	270	0.12	8.333333333	52.33333333	
10	437	443	0.056	17.85714286	112.1428571	
11	451	456	0.048	20.83333333	130.8333333	
12	465	471	0.056	17.85714286	112.1428571	
13	480	486	0.056	17.85714286	112.1428571	
14	628	635	0.064	15.625	98.125	
15	748	755	0.064	15.625	98.125	
16	784	790	0.056	17.85714286	112.1428571	
17	800	808	0.072	13.88888889	87.22222222	
18	811	816	0.048	20.83333333	130.8333333	
19	971	980	0.08	12.5	78.5	

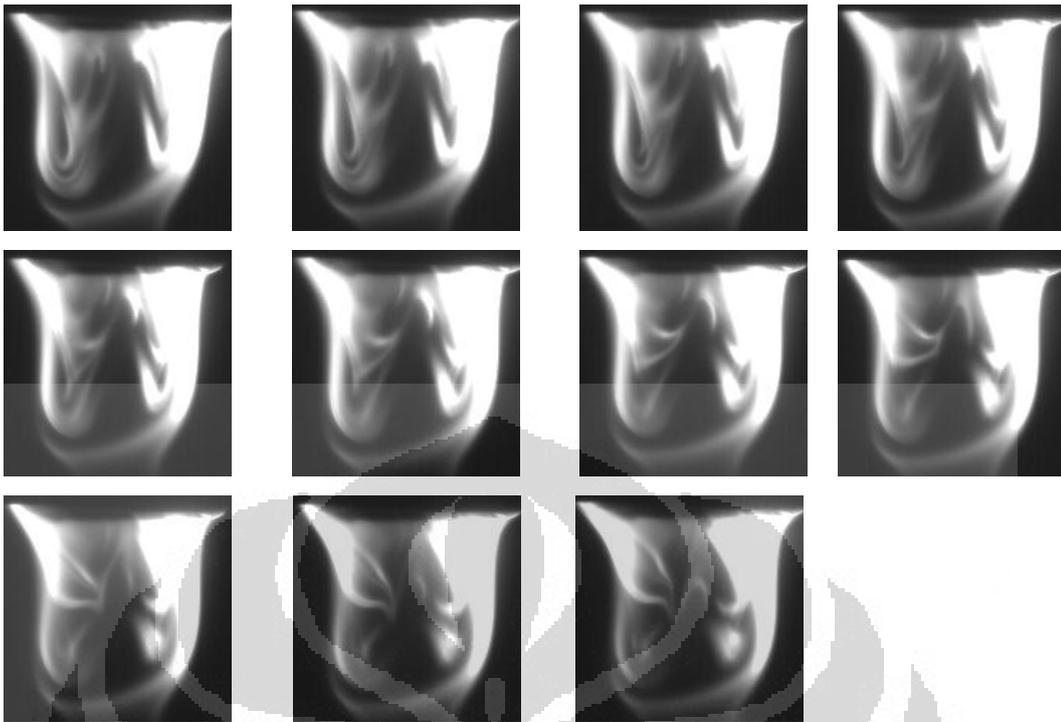
Perhitungan kecepatan swirl ini diambil kedalam sembilan belas kelompok gambar, dimana api swirl terlihat jelas. Dari hasil perhitungan diatas didapat bahwa kecepatan putar rata-rata swirl adalah 81.322 rad/s.



Gambar 4.5 Grafik nilai ω (kecepatan sudut) terhadap (t) waktu $Q_{N2}/Q_f = 60/40$

Berikut ini adalah penampakan swirl dengan menggunakan *high speed video camera* pada frame 176 s/d 194.





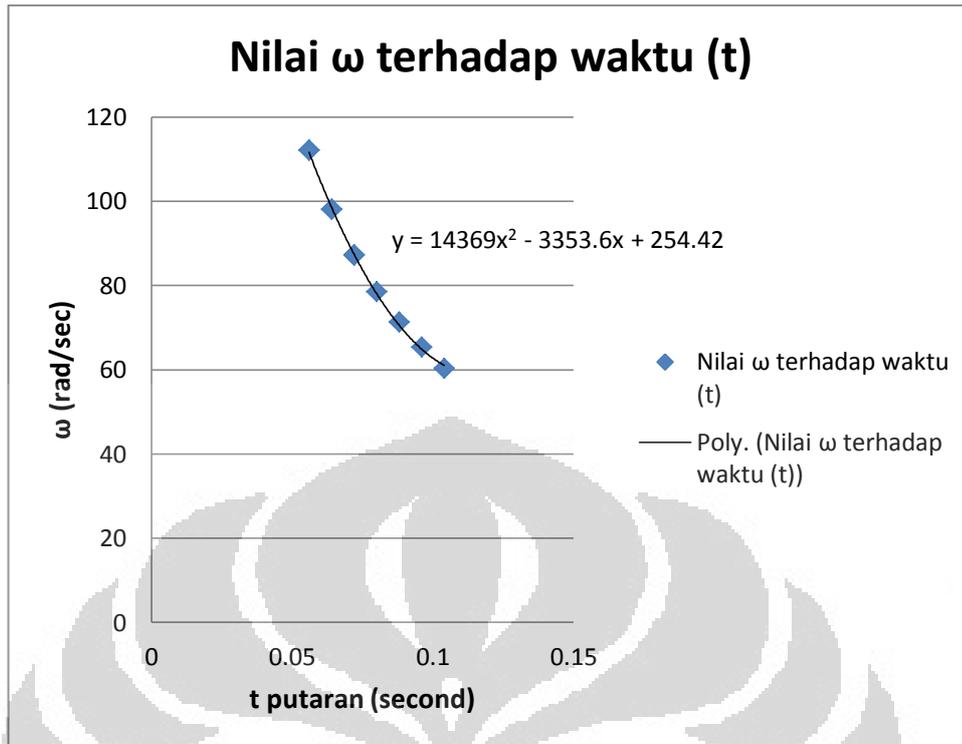
Gambar 4.6 Penampakan swirl pada frame 176 s/d 194

4.1.4 Kondisi Swirl Pada Saat $Q_{N2}/Q_f = 50/50$

Tabel 4.4 Perhitungan kecepatan swirl $Q_{N2}/Q_f = 50/50$

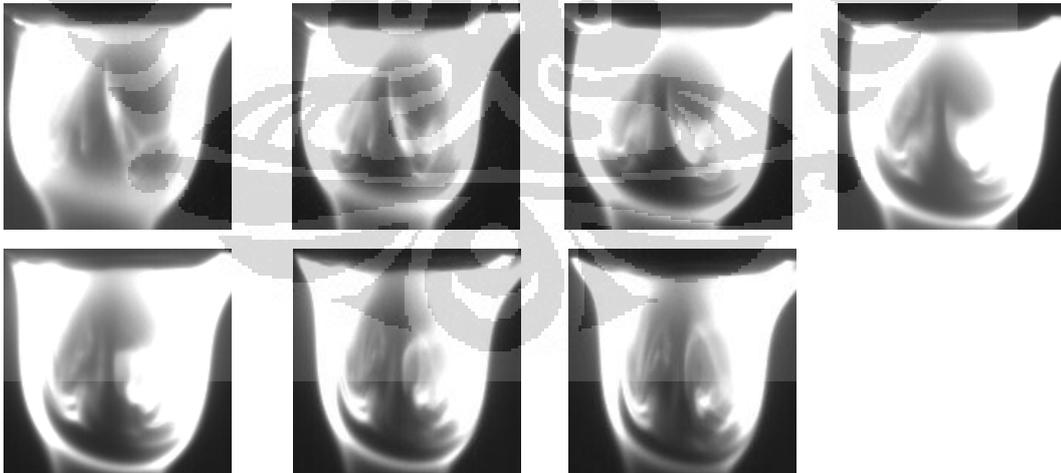
No	frame awal	frame akhir	t putaran	kec. Putar	ω	ω rata-rata
1	0	10	0.088	11.36363636	71.36363636	82.278521
2	300	308	0.072	13.88888889	87.22222222	
3	309	315	0.056	17.85714286	112.1428571	
4	337	345	0.072	13.88888889	87.22222222	
5	397	406	0.08	12.5	78.5	
6	418	425	0.064	15.625	98.125	
7	533	544	0.096	10.41666667	65.41666667	
8	618	625	0.064	15.625	98.125	
9	892	900	0.072	13.88888889	87.22222222	
10	911	917	0.056	17.85714286	112.1428571	
11	918	930	0.104	9.615384615	60.38461538	
12	933	941	0.072	13.88888889	87.22222222	
13	971	1002	0.256	3.90625	24.53125	

Perhitungan kecepatan swirl ini diambil kedalam tiga belas kelompok gambar, dimana api swirl terlihat jelas. Dari hasil perhitungan diatas didapat bahwa kecepatan putar rata-rata swirl adalah 82.278 rad/s.



Gambar 4.7 Grafik nilai ω (kecepatan sudut) terhadap (t) waktu $Q_{N2}/Q_f = 50/50$

Berikut ini adalah penampakan swirl dengan menggunakan *high speed video camera* pada frame 911 s/d 917.



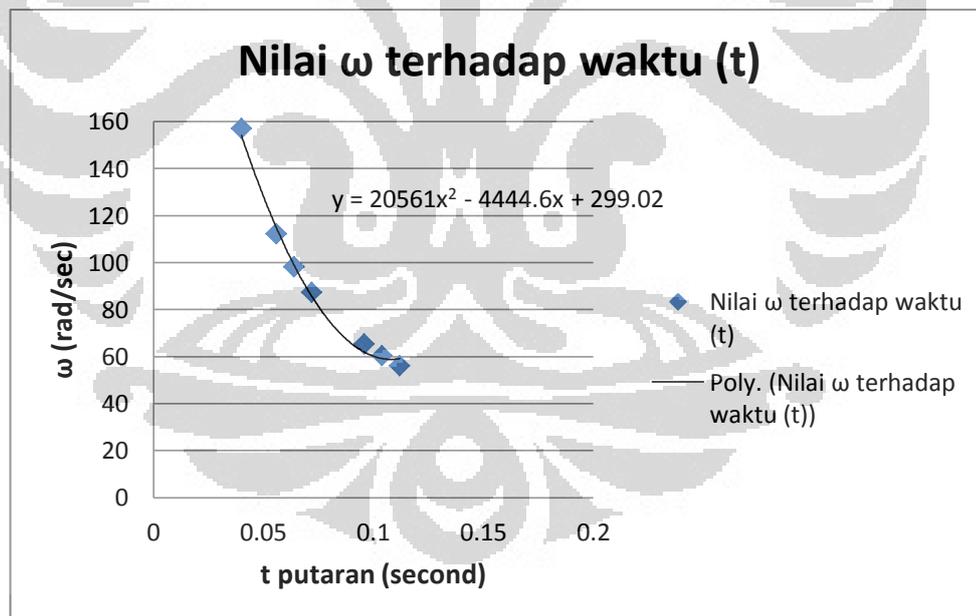
Gambar 4.8 Penampakan swirl pada frame 911 s/d 917

4.1.5 Kondisi Swirl Pada Saat $Q_{N2}/Q_f = 40/60$

Tabel 4.5 Perhitungan kecepatan swirl $Q_{N2}/Q_f = 40/60$

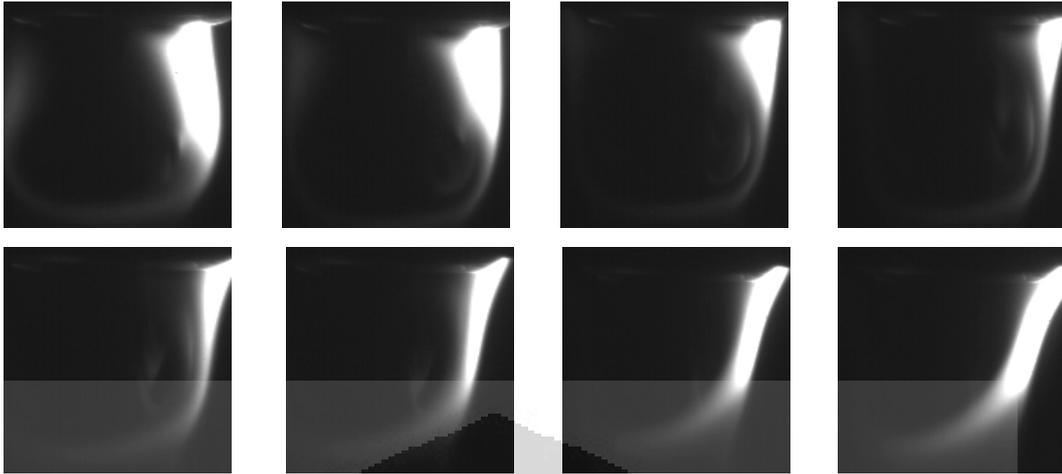
No	frame awal	frame akhir	t putaran	kec. Putar	ω	ω rata-rata
1	47	51	0.04	25	157	94.070072
2	182	188	0.056	17.85714286	112.1428571	
3	274	280	0.056	17.85714286	112.1428571	
4	291	298	0.064	15.625	98.125	
5	341	352	0.096	10.41666667	65.41666667	
6	651	663	0.104	9.615384615	60.38461538	
7	664	672	0.072	13.88888889	87.22222222	
8	697	710	0.112	8.928571429	56.07142857	
9	952	959	0.064	15.625	98.125	

Perhitungan kecepatan swirl ini diambil kedalam sembilan kelompok gambar, dimana api swirl terlihat jelas. Dari hasil perhitungan diatas didapat bahwa kecepatan putar rata-rata swirl adalah 94.070 rad/s.



Gambar 4.9 Grafik nilai ω (kecepatan sudut) terhadap (t) waktu $Q_{N2}/Q_f = 40/60$

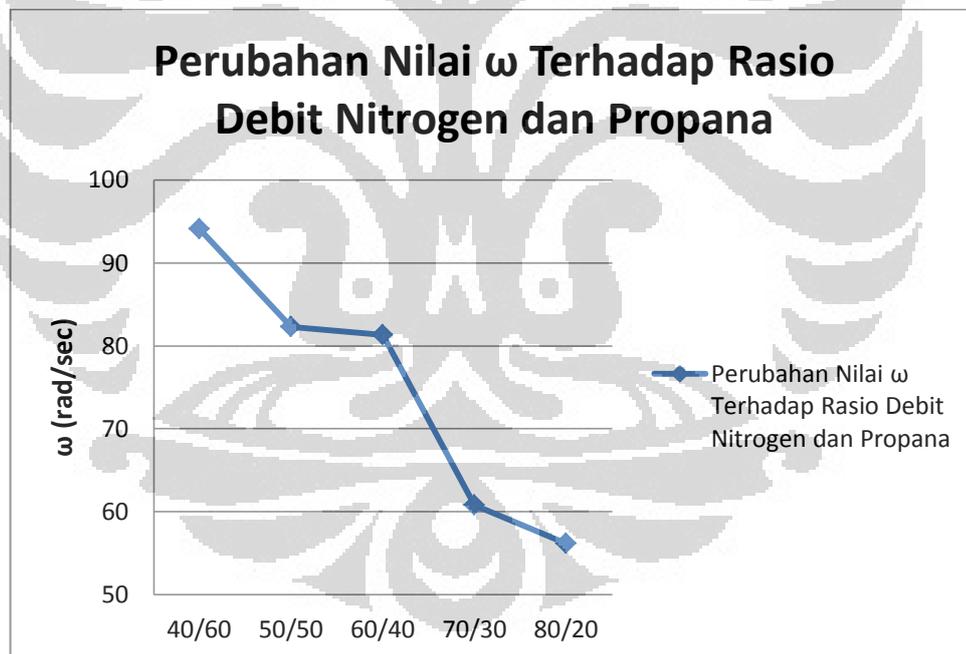
Berikut ini adalah penampakan swirl dengan menggunakan *high speed video camera* pada frame 952 s/d 959.



Gambar 4.10 Penampakan swirl pada frame 952 s/d 959

4.2 Pembahasan

4.2.1 Perbandingan kecepatan putar terhadap rasio debit, yaitu:



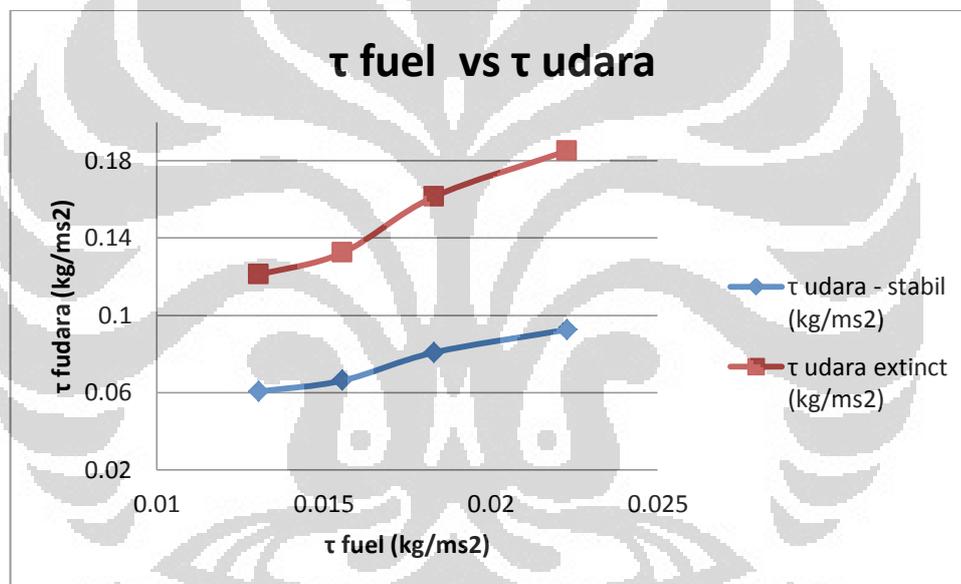
Gambar 4.11 Perbandingan kecepatan putar terhadap rasio debit

Dari grafik diatas dapat diketahui jika semakin tinggi rasio debit yang terjadi, maka kecepatan putarnya semakin menurun. Akan tetapi, fenomena swirl yang terjadi pada rasio debit paling kecil tidak nampak jelas. Hal ini disebabkan

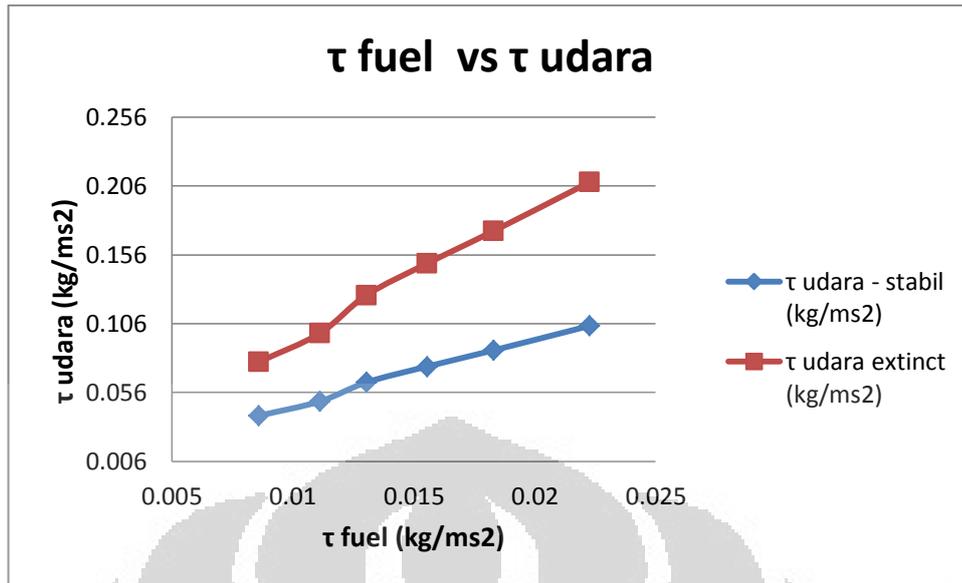
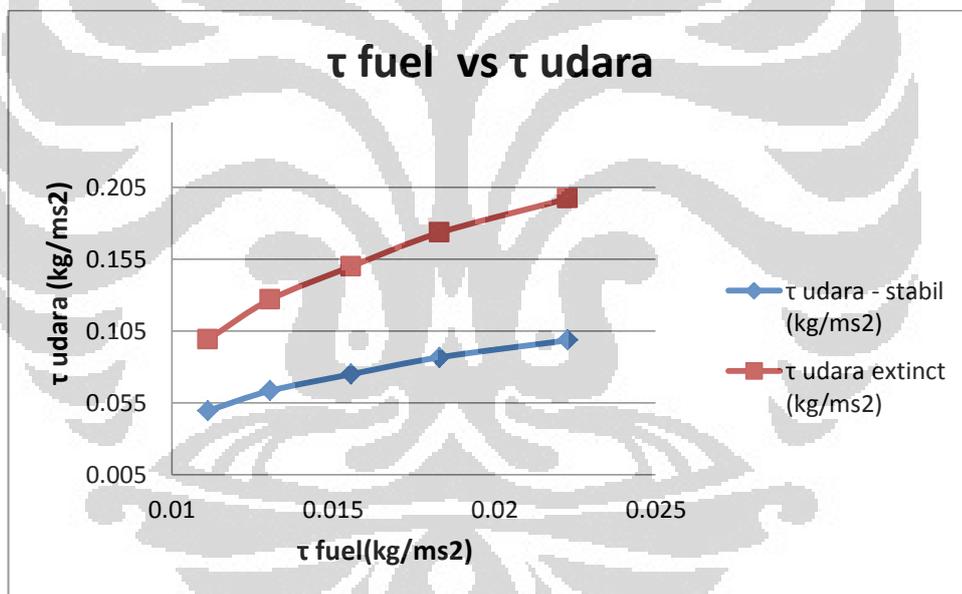
karena kecepatan putarnya, berbeda saat rasio debitnya besar, fenomena swirlnya nampak jelas.

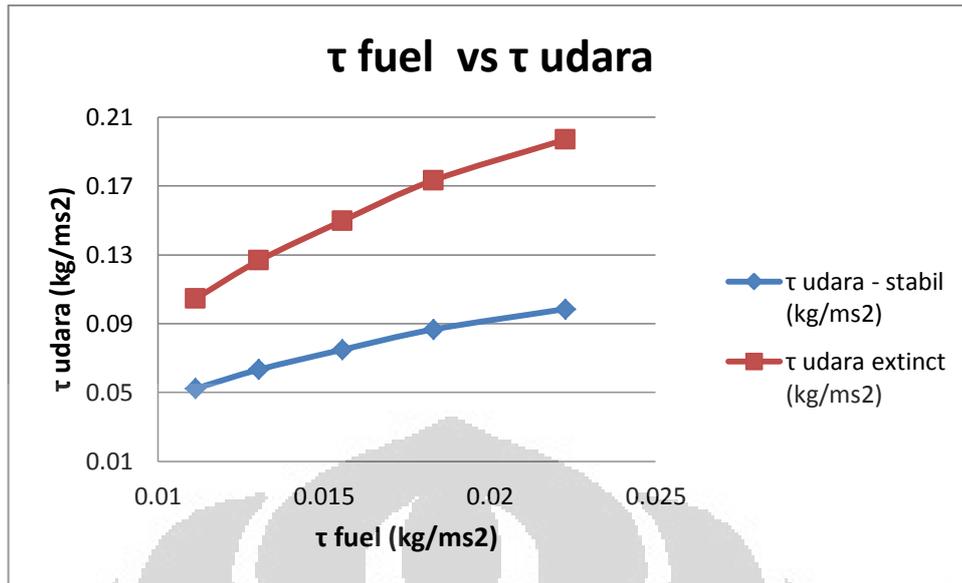
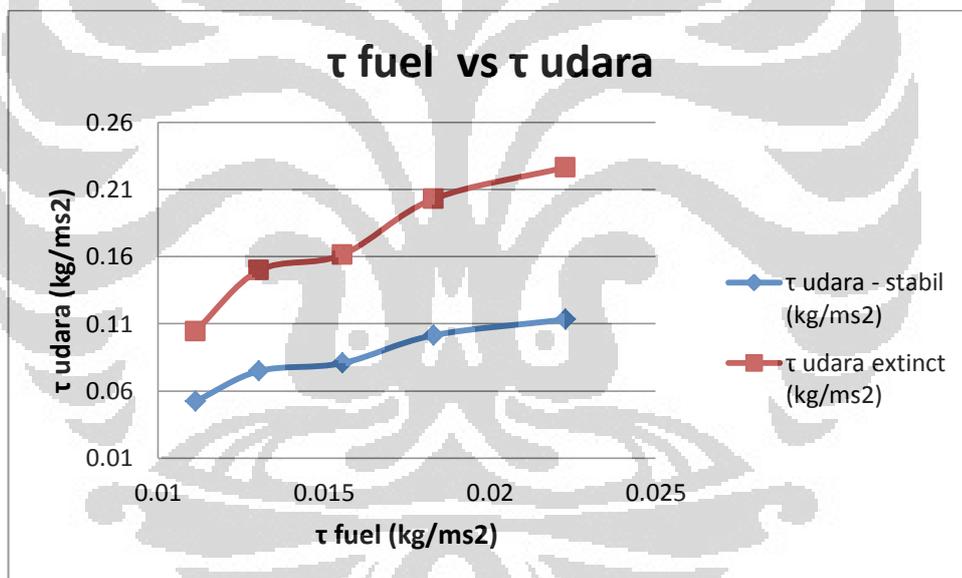
4.2.2 Hubungan antara nyala api tipe swirl dengan limit stabilitas nyala

Pada nosel 18,5 mm ini, bentuk nyala api yang terjadi adalah bentuk api tipe swirl. Dimana bentuk nyala api tersebut bisa dilihat terjadi pada kondisi fluks momentum bahan bakar (τ_f) sebesar 0,011120286 kg/ms² dan fluks momentum udara (τ_o) yang berbeda, tergantung dengan rasio debit Q_{N_2}/Q_f . Berikut adalah fenomena kemunculan bentuk api tipe swirl terhadap nilai fluks momentum bahan bakar (τ_f) dan fluks momentum udara (τ_o).



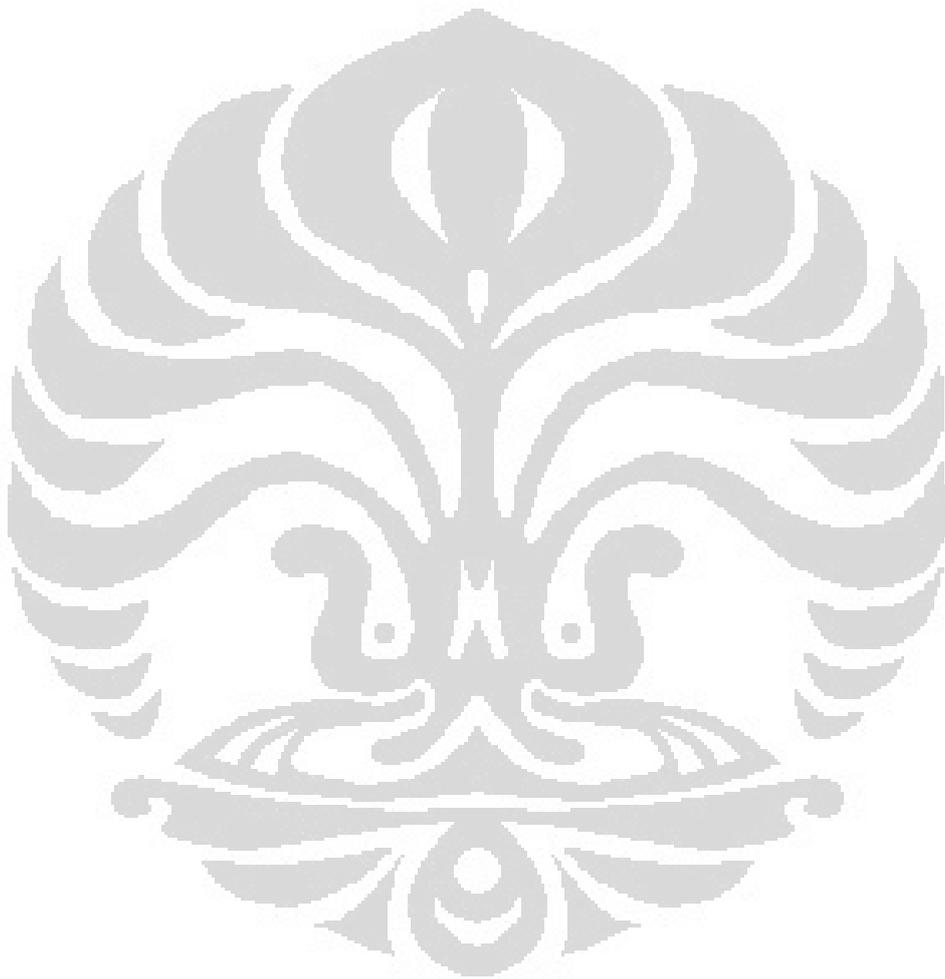
Gambar 4.12 Rasio debit $Q_{N_2}/Q_f = 80/20$

Gambar 4.13 Rasio debit $Q_{N_2}/Q_f = 70/30$ Gambar 4.14 Rasio debit $Q_{N_2}/Q_f = 60/40$

Gambar 4.15 Rasio debit $Q_{N_2}/Q_f = 50/50$ Gambar 4.16 Rasio debit $Q_{N_2}/Q_f = 40/60$

Dari grafik diatas dijelaskan bahwa kondisi nyala api difusi tipe swirl terjadi ketika nilai fluks momentum udara (τ_o) stabil mengalami kenaikan menuju kondisi padam. Kaitannya dengan limit stabilisasi nyala api adalah ketika terbentuknya nyala api swirl dapat dijadikan indikator bahwa efisiensi proses pembakaran meningkat dan mendekati limit stabilitasnya dalam hal ini (τ_o) pada kondisi padam. Dalam keadaan sebenarnya ketika nyala api swirl terjadi maka

warna api perlahan mulai menjadi biru. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi karbon menurun, dan efisiensi pembakaran menjadi tinggi dan sempurna



BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan data hasil percobaan, dan pengolahan data mengenai nyala api difusi tipe swirl, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Kecepatan putar pada masing-masing rasio debit berbeda. Untuk rasio debit yang paling kecil memiliki kecepatan putar sangat tinggi. Sedangkan pada rasio debit paling besar mempunyai kecepatan putar yang rendah.
2. Nyala api difusi tipe swirl pada rasio debit paling kecil tidak terlihat sangat jelas. Hal ini disebabkan karena kecepatan putarnya yang tinggi.
3. Nyala api difusi tipe swirl berada pada kondisi fluks momentum bahan bakar (τ_f) sebesar $0,011120286 \text{ kg/ms}^2$ dan fluks momentum udara (τ_o) yang berbeda-beda tergantung dengan rasio debit Q_{N2}/Q_f .

DAFTAR REFERENSI

- [1] Turn, Stephen R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Application*. New York: McGraw Hill, 1996, page 210.
- [2] Kuo, Kenneth K. *Principle of Combustion*. Canada: John Willey and Sons, 1986.
- [3] Peters, Norbert. *Turbulent Combustion*. New York: McGraw Hill, 2000.
- [4] Briones, Alejandro, et all. "Effect of Pressure on Counterflow H-2 Air Partially Premixed Flames." *Combustion and Flame*, 140 (2005), page 46-59.
- [5] Sharma, SP and Chander Mohan. *Fuels and Combustion*. Bombay: Tata McGraw-Hill, 1984, page 301.
- [6] Sharma, SP and Chander Mohan. *Fuels and Combustion*. Bombay: Tata McGraw-Hill, 1984, page 300.
- [7] Sharma, SP and Chander Mohan. *Fuels and Combustion*. Bombay: Tata McGraw-Hill, 1984, page 303.
- [8] Sharma, SP and Chander Mohan. *Fuels and Combustion*. Bombay: Tata McGraw-Hill, 1984, page 304.
- [9] Sharma, SP and Chander Mohan. *Fuels and Combustion*. Bombay: Tata McGraw-Hill, 1984, page 305.
- [10] *Diffusion Flame*. 23 Desember 2011. Wikipedia.
http://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion_Flame
- [11] Tsuji H., Yamaoka I. "Structure Analysis of Counterflow Diffusion Flame in The Forward Stagnation region of a Porous Cylinder." *Combustion and Flame*, 13 (1971), page 723-731.
- [12] Rolon, J.C, et all. "Experiments on the Interaction between a Vortex a Strained Diffusion Flame." *Combustion and Flame*, 100 (1995) page 422-429.
- [13] Eun Do Lee, et all. "Extinction Limit Extension of Unsteady Counterflow Diffusion Flame Affected by Velocity Change." *Combustion and Flame*, 144 (2006), page 792-808.
- [14] Katta, V.R., et all. "Extinction Criterion for Unsteady, Opposing Jet Diffusion Flames." *Combustion and Flame*, 137 (2004), page 198-221.
- [15] Jongmook Lim, et all. "A study of the Effect of Air Preheat on the Structure of Methane/Air Counterflow Diffusion Flames." *Combustion and Flame*, 121 (2000), page 262-274.
- [16] Turn, Stephen R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Application*. New York: McGraw Hill, 1996, page 246.

DAFTAR PUSTAKA

Furjiyanto. Pengaruh Rasio Gap-Diameter Nosel (L/d) Terhadap Karakteristik Nyala Difusi Pada Medan Aliran Berlawanan (*Counter-Flow*). Depok: Universitas Indonesia, 2008.

Munajat, Fahrul. Modus Nyala Api Difusi Pada Medan Aliran Berlawanan Dengan Penambahan *Co-Flow* Gas Inert (N_2). Depok: Universitas Indonesia, 2009.

Shaha, A.K. Combustion Engineering & Fuel Technology. New Delhi: Oxford & IBH Publishing Co., 1974.

Sasongko, Mega Nur., & Mikami, Masamoto. Extinction Condition of Counterflow Diffusion Flame With Polydisperse Water Spray. Japan: Yamaguchi University. 2010.

Joo, H.I., Gulder, O.L. Experimental Study of Soot and Temperature Field Structure of Laminar Co-Flow Ethylene-Air Diffusion Flames With Nitrogen Dilution At Elevated Pressures. Canada: University of Toronto. 2010.

Diffusion Flame. 23 Desember 2011. Wikipedia.
http://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion_Flame

LAMPIRAN PENGOLAHAN DATA

