



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

**BUDIMAN RAHARJA RUKMANA
0906604685**

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

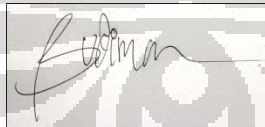
VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API DIFUSI TIPE SWIRL PADA MEDAN ALIRAN BERLAWANAN DENGAN RASIO GAP DIAMETER BESAR

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 : Budiman Raharja Rukmana

NPM : 0906604685

Tanda Tangan :



Tanggal : 13 Januari 2012





HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Budiman Raharja Rukmana
NPM : 0906604685
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API
DIFUSI TIPE SWIRL PADA MEDAN ALIRAN BERLAWANAN
DENGAN RASIO GAP DIAMETER BESAR

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 dalam pembuatan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada :

- 1) Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
- 2) Almarhum ayahanda Rukmana tercinta, hari ini ku penuhi janjiku untukmu. Terima kasih untuk segalanya. Semoga Allah memberikan kemuliaan di sisi-Nya. Amin ya Rabb.
- 3) Ibunda Kokom Komariah dan adik tersayang Rahayu Kania Rukmana yang selalu mengajarkan penulis tentang mimpi dan perjuangan. Tidak pernah penulis berhenti bersyukur atas nikmat Allah karena telah memberi keluarga terbaik yang pernah ada.
- 4) Dosen-dosen DTM FTUI, yang telah mengajarkan banyak hal kepada penulis dan memberikan banyak saran dan masukan dalam pembuatan skripsi ini.
- 5) Kris Kurnia Herlambang sebagai partner satu tim yang solid yang selalu bersemangat, kreatif dan aktif dalam mengerjakan skripsi ini.
- 6) Teman-teman Teknik Mesin PPSE 2009 yang telah membantu dan mendukung selama penyusunan skripsi ini. Terima kasih telah berbagi sepotong canda dan tawa yang menemani penulis dalam melewati masa kuliah selama di Universitas Indonesia ini.

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 : Budiman Raharja Rukmana
NPM : 0906604685
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 :

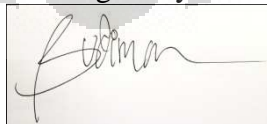
**VISUALISASI KECEPATAN TINGGI NYALA API DIFUSI TIPE SWIRL
PADA MEDAN ALIRAN BERLAWANAN DENGAN RASIO GAP
DIAMETER BESAR**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif 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,



(Budiman Raharja Rukmana)

ABSTRAK

Nama : Budiman Raharja Rukmana
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Visualisasi Kecepatan Tinggi Nyala Api Difusi Tipe Swirl
Pada Medan Aliran Berlawanan Dengan Rasio Gap
Diameter Besar

Pengaruh kecepatan sudut putar rata-rata swirl terhadap rasio debit nitrogen telah diteliti secara eksperimental. Propana sebagai bahan bakar disuplai dari nosel bagian bawah dan udara sebagai oksidator disuplai dari nosel bagian atas dengan diameter nosel yang sama, yang dilengkapi dengan honeycomb untuk membuat aliran udara yang seragam. Sementara aliran nitrogen dialirkan dari kedua nosel dimana saluran tersebut koaksial dengan nosel bahan bakar dan nosel udara. Pada penelitian ini juga digunakan vortex generator untuk meningkatkan turbulensi sehingga dapat dicapai pencampuran reaktan yang optimal. Penelitian yang dilakukan untuk mengetahui bentuk nyala api 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 (rasio gap diameter sebesar 2,7) dan dinamika fluida (rasio debit nitrogen, fluks momentum bahan bakar dan fluks momentum udara). Data mentah yang didapat adalah video bentuk nyala api difusi tipe swirl pada setiap nilai fluks momentum bahan bakar, yang selanjutnya dikonversi menjadi gambar-gambar bentuk nyala api.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk nyala api dan kecepatan putar swirl yang terjadi pada kondisi parameter geometri, dipengaruhi oleh rasio antara fluks momentum udara-bahan bakar dan debit nitrogen. Setiap penurunan rasio debit nitrogen terhadap bahan bakar meningkatkan kecepatan sudut putar swirl. 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 :

Swirl, kecepatan putar, gap diameter 2.7, rasio debit nitrogen

ABSTRACT

Name : Budiman Raharja Rukmana
Programme : Mechanical Engineering
Judul : High Speed Visualization of Swirl Type Diffusion Flame in
a Counterflow Field with High Ratio of Gap to Diameter

Effects of swirl angular velocity based on flow rate ratio of nitrogen have been investigated experimentally. Propane as a fuel gas was supplied upward through a nozzle, and air as a oxidant was supplied downward through a similar nozzle, which was filled with honeycomb to produce a uniform velocity in the issuing air. Then, the nitrogen coaxial flow was supplied from downward and upward where nitrogen's outlet is located coaxial with both sides. This experiment also used vortex generator to increases 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 this experiment were geometry parameters (ratio of gap to diameter 2.7) and fluid dynamics (flow rate of nitrogen, momentum flux of fuel and air). Raw data that had been got in this experiment were videos of swirl type diffusion flame mode at every point of momentum flux of fuel. The data were converted to the flame mode images, by using image processing software.

Experiment result showed that, the swirl flame mode and swirl angular velocity at every geometry parameters, were influenced by the ratio of momentum flux of air-fuel and the flow rate of nitrogen. Every reduction of ratio gap-nozzle diameter increases the swirl angular velocity. Nitrogen flow disturbing the air-fuel flow, causing the flame to be lifted. Angular velocity can be found with high speed video camera assist.

Keywords:

Swirl, angular velocity, ratio gap to diameter, flow rate of nitrogen

DAFTAR ISI

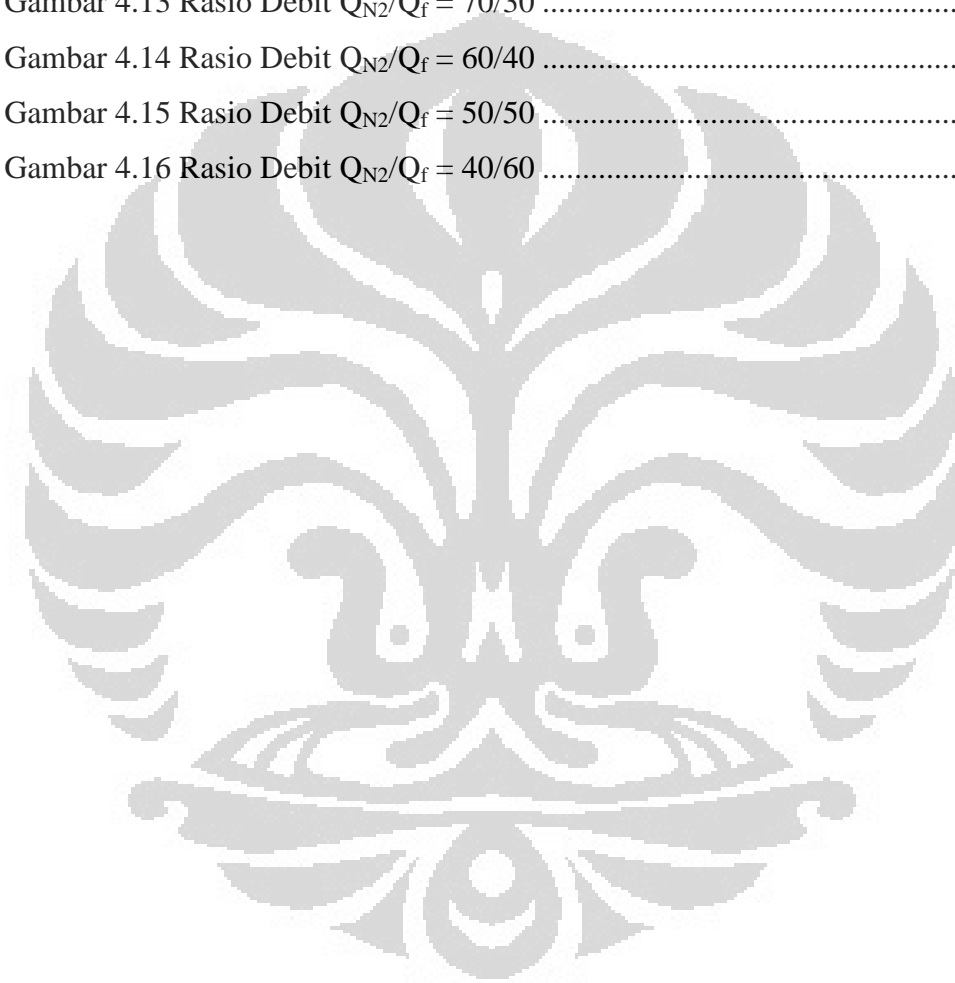
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN.....	v
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR SIMBOL	xii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Pembatasan Masalah	4
1.5. Metode Penelitian	5
1.6. Sistematika Penulisan	5
2. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Pengertian Pembakaran	7
2.2. Nyala Api	7
2.2.1. Nyala Api <i>Premixed</i>	8
2.2.1.1. Laju Nyala Api <i>Premixed</i>	10
2.2.1.2. <i>Counter Flow Premixed Flame</i>	10
2.2.2. Nyala Difusi	11
2.2.2.1. Struktur Nyala Difusi Laminar	14
2.2.2.2. Struktur Nyala Difusi Turbulen	15
2.2.2.3. <i>Counter Flow Diffusion Flame</i>	16
2.3. Karakteristik Nyala	18
2.4. Stabilitas Nyala Api	19
2.4.1. Fenomena <i>Flashback</i>	19
2.4.2. Fenomena <i>Lift Off</i>	20
2.4.3. Fenomena <i>Blow Off</i>	21
2.5. Propana (C ₃ H ₈)	21
2.6. Oksigen (O ₂)	24
2.7. Nitrogen (N ₂)	25
3. PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN.....	28
3.1. Peralatan Penelitian	28
3.1.1. Penelitian Medan Aliran Berlawanan	28
3.1.2. Penelitian Nyala Api Difusi Tipe Swirl	29
3.2. Prosedur Penelitian	31
3.2.1. Prosedur Kalibrasi Sistem Udara	31

3.2.2. Prosedur Kalibrasi Sistem Bahan Bakar	33
3.2.3. Prosedur Kalibrasi Sistem Nitrogen	35
3.2.4. Prosedur Penelitian <i>High Speed Video Camera</i>	36
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1. Hasil Visualisasi Nyala Api Tipe Swirl	39
4.1.1. Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 80/20$	39
4.1.2. Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 70/30$	40
4.1.3. Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 60/40$	40
4.1.4. Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 50/50$	41
4.1.5. Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 40/60$	42
4.2. Hasil Perhitungan Kecepatan Putar Swirl	43
4.2.1. Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 80/20$	43
4.2.2. Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 70/30$	44
4.2.3. Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 60/40$	45
4.2.4. Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 50/50$	46
4.2.5. Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 40/60$	46
4.3. Grafik Nilai Kecepatan Putar.....	47
4.4. Korelasi Swirl Terhadap Limit Stabilitas Nyala	51
5. KESIMPULAN.....	54
DAFTAR REFERENSI	55
DAFTAR PUSTAKA	56
LAMPIRAN	57

DAFTAR GAMBAR

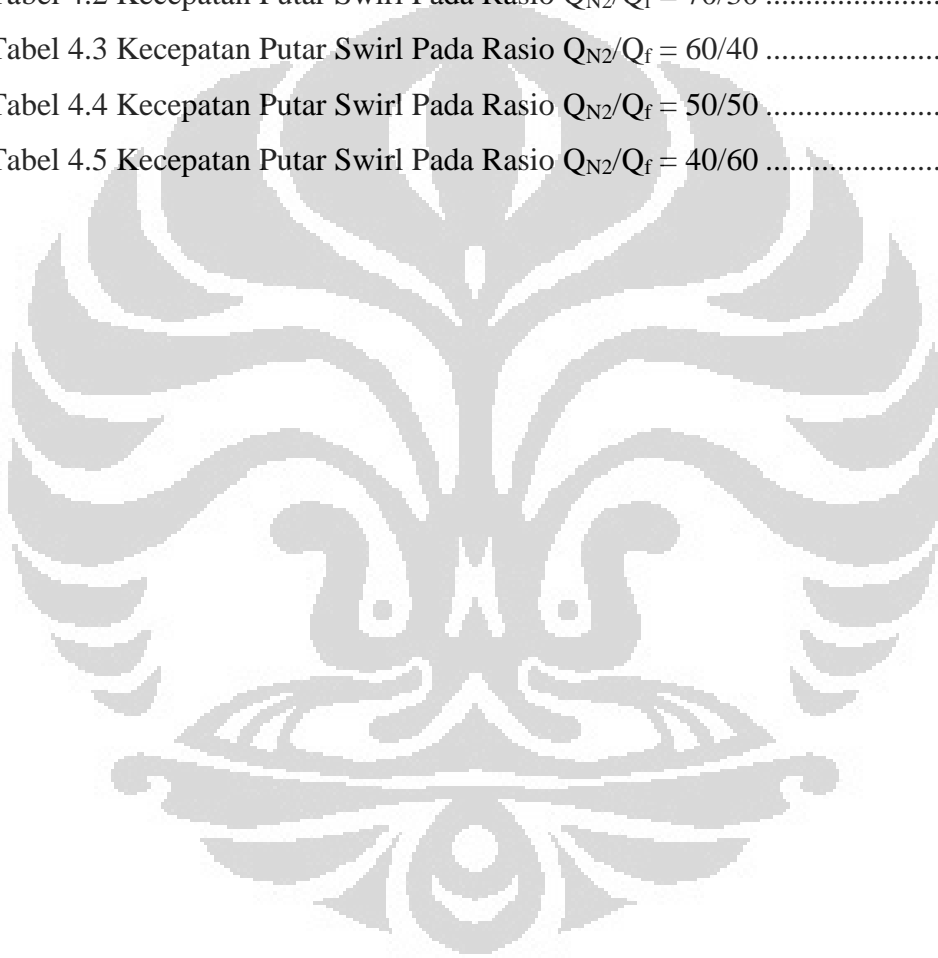
Gambar 1.1 Skema Nyala Difusi Pada Aliran Berlawanan	2
Gambar 2.1 Profil Nyala Api Laminar.....	8
Gambar 2.2 Struktur Nyala Api <i>Premixed</i>	9
Gambar 2.3 Vektor Diagram Nyala Kecepatan Laminar.....	9
Gambar 2.4 Nyala <i>Premixed</i> Pada Aliran Berlawanan.....	11
Gambar 2.5 <i>Over-ventilated</i> dan <i>under-ventilated</i> Pada Nyala Api Difusi	12
Gambar 2.6 Perubahan Bentuk Api Terhadap Kecepatan Aliran Bahan Bakar	13
Gambar 2.7 Diagram Komposisi Nyala Api Difusi Berbahan Bakar Nitrogen.....	14
Gambar.2.8 Diagram Profil Konsentrasi Pada Nyala Api Difusi Tipe Laminar	15
Gambar 2.9 Nyala Turbulen.....	16
Gambar 2.10 Skema Nyala Difusi Pada Aliran Berlawanan	17
Gambar 2.11 Diagram Stabilitas Flashback, Lift-off, dan Yellow tipping Untuk Bahan Bakar Gas Industri	20
Gambar 2.12 Struktur Molekul Propana.....	21
Gambar 3.1 Skema Nosel Udara dan Nosel Bahan Bakar.....	28
Gambar 3.2 Nosel Udara dan Nosel Bahan Bakar.....	29
Gambar 3.3 Sistem Suplai Medan Aliran Berlawanan	29
Gambar 3.4 <i>High Speed Video Camera</i> Motion Xtra HG SE.....	30
Gambar 3.5 Skema Kalibrasi Sistem Suplai Udara	32
Gambar 3.6 Grafik Persamaan Kalibrasi Kec.Udara (V_o) Untuk \varnothing 18.5 mm	33
Gambar 3.7 Skema Kalibrasi Sistem Suplai Bahan Bakar	34
Gambar 3.8 Grafik Persamaan Kalibrasi Kec.Propana (V_f) Untuk \varnothing 18.5 mm	34
Gambar 3.9 Skema Prosedur Proses Purgung.....	36
Gambar 3.10 Grafik Persamaan Kalibrasi Kec.Nitrogen (V_{N_2})Untuk \varnothing 18.5 mm	36
Gambar 3.11 Skema Penelitian Menggunakan <i>High Speed Video Camera</i>	37
Gambar 4.1 Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 80/20$	39
Gambar 4.2 Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 70/30$	40
Gambar 4.3 Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 60/40$	41
Gambar 4.4 Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 50/50$	42
Gambar 4.5 Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 40/60$	42

Gambar 4.6 Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 80/20$	48
Gambar 4.7 Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 70/30$	48
Gambar 4.8 Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 60/40$	49
Gambar 4.9 Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 50/50$	49
Gambar 4.10 Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 40/60$	50
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Kecepatan Putar	50
Gambar 4.12 Rasio Debit $Q_{N2}/Q_f = 80/20$	51
Gambar 4.13 Rasio Debit $Q_{N2}/Q_f = 70/30$	51
Gambar 4.14 Rasio Debit $Q_{N2}/Q_f = 60/40$	52
Gambar 4.15 Rasio Debit $Q_{N2}/Q_f = 50/50$	52
Gambar 4.16 Rasio Debit $Q_{N2}/Q_f = 40/60$	53



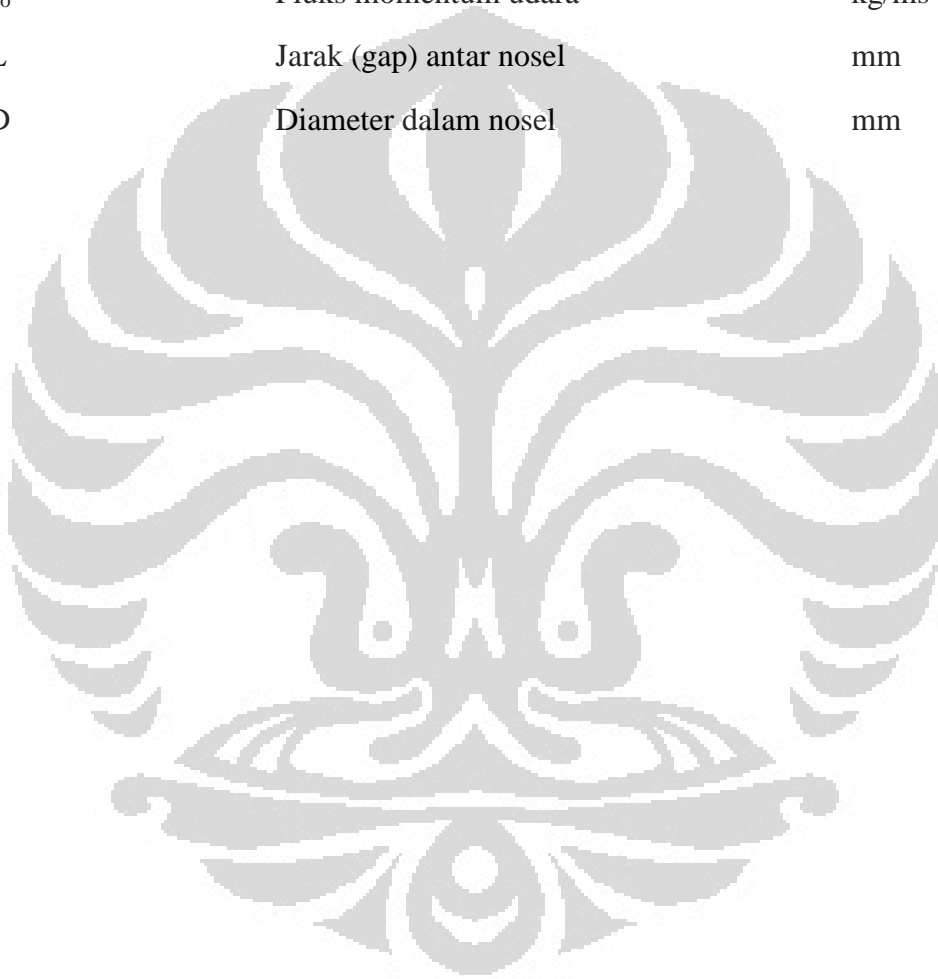
DAFTAR TABEL

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 <i>High Speed Video Camera</i> Motion Xtra HG SE.....	30
Tabel 4.1 Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 80/20$	43
Tabel 4.2 Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 70/30$	44
Tabel 4.3 Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 60/40$	45
Tabel 4.4 Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 50/50$	46
Tabel 4.5 Kecepatan Putar Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 40/60$	47



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

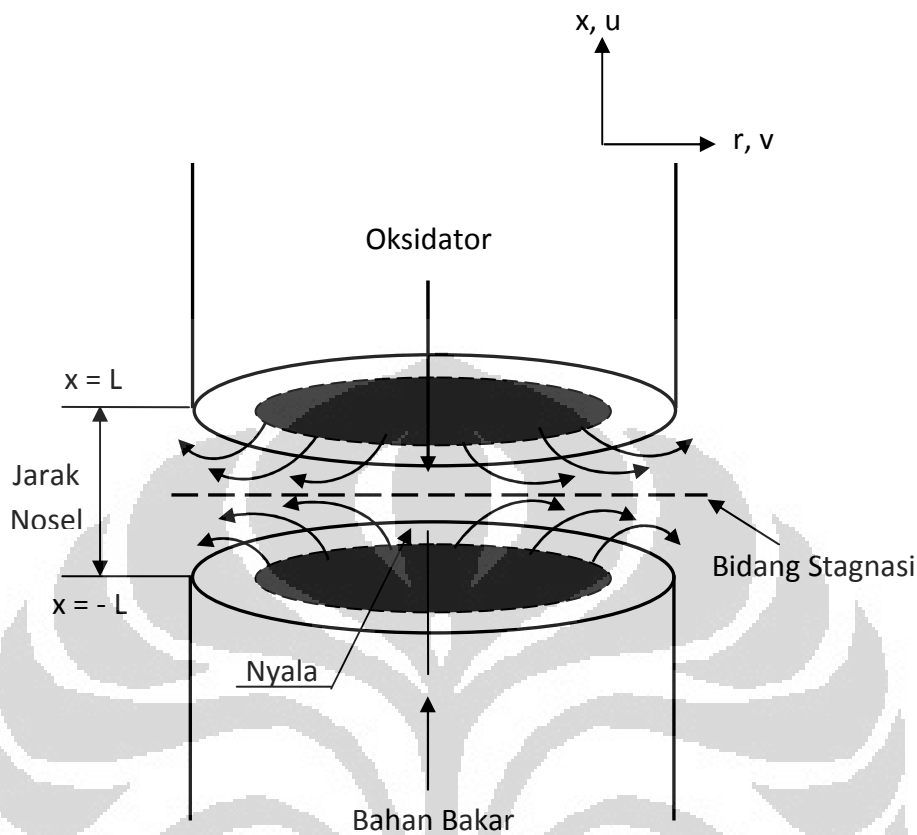
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber daya alam yang ada di muka bumi ini digolongkan menjadi 2 jenis berdasarkan kemampuan terbentuknya, yaitu sumber daya alam yang dapat diperbaharui (*renewable resources*) dan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui (*non-renewable resources*). 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.

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_0), akan menyebabkan turunnya limit stabilitas nyala. Penurunan ini ditandai dengan semakin meningkatnya kebutuhan suplai bahan bakar (fluks momentum bahan bakar, τ_f meningkat) untuk setiap kenaikan (τ_0) dalam menjaga nyala api di dalam daerah stabil. Setiap penurunan rasio gap terhadap diameter nosel (L/d), maka akan menyebabkan naiknya limit stabilitas nyala. Hal ini ditandai dengan semakin besarnya fluks momentum udara (τ_0) yang dibutuhkan untuk membuat nyala api padam (*extinct*). Hal ini ditunjukkan pada $L/d = 2,16$ (rasio gap diameter kecil), dimana pada rasio jarak nosel dan diameter tersebut, fluks momentum udara yang

dibutuhkan untuk membuat nyala api padam terlihat paling tinggi. Semakin jauh jarak *vortex generator* dari ujung *burner* maka akan menyebabkan naiknya limit stabilitas nyala. Hal itu disebabkan karena dengan semakin jauh jarak *vortex generator* dari ujung nosel maka aliran bahan bakar dan udara akan mendekati laminar, atau bisa dinyatakan bahwa pengaruh turbulensi akan semakin berkurang. Pada saat mendekati proses *extinct*, secara garis besar nyala difusi didominasi oleh nyala biru. Ini disebabkan karena mendekati *extinct*, suplai udara kedalam zona reaksi semakin besar, sehingga dominasi nyala kuning yang menunjukkan konsentrasi partikel karbon (C), semakin lama akan semakin berkurang dan akan tergantikan dengan dominasi zona nyala biru yang menunjukkan campuran kaya oksidan (*exceeds air*),

Penelitian yang dilakukan oleh Haris Munandar (2009), adanya penambahan *co-flow* nosel dimana gas nitrogen dipakai sebagai gas penyelubung. *Co-flow* nosel ini diletakkan pada sisi nosel bahan bakar, dimana debit nitrogen yang mengalir pada *co-flow* nosel ini diatur sedemikian rupa sehingga rasio antara debit nitrogen dengan debit bahan bakar sesuai nilai yang ditetapkan. Hasil yang didapatkan bahwa semakin besar rasio debit Q_{N_2}/Q_f atau semakin besar rasio fluks momentum τ_{N_2}/τ_f yang digunakan, maka limit stabilitas nyala akan menurun. Hal ini terjadi dikarenakan dengan adanya aliran nitrogen yang menyelebung daerah reaksi mencegah terjadinya difusi dengan udara sekitar sehingga suplai udara yang menunjang terjadinya pembakaran hanya berasal dari nosel udara.

Pada 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_0) dan fluks momentum bahan bakar (τ_f). Nilai rasio ini berbeda pada setiap rasio debit nitrogen – bahan bakar. Setiap penurunan rasio gap nosel – diameter nosel (L/d) dalam hal ini variasi rasio yang digunakan 2.16, 2.43, dan 2.7 maka sebagian besar bentuk nyala api yang terjadi adalah membentuk pipa api (untuk nosel 5,5 dan 8,5 mm) dan membentuk nyala api tulip dan swirl (nosel 18,5 mm).

Hal inilah yang mendorong untuk dilakukannya kajian yang lebih mendalam mengenai nyala api difusi tipe 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. Dengan adanya kajian mengenai nyala api tipe swirl ini diharapkan tercapai reaksi pembakaran yang lebih sempurna, dan dapat dilakukan pengamatan secara lebih mendalam mengenai terbentuknya fenomena nyala api tipe swirl ini.

1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini, rumusan masalah yang akan dibahas, yaitu mengenai nyala api difusi tipe swirl disertai penambahan *co-flow* berupa gas inert (nitrogen), dan parameter dinamika fluida seperti fluks momentum aliran udara (τ_0) 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 tipe swirl serta melakukan analisa pada 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: 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

1. Penelitian dilakukan di Lab. Termodinamika dan 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. Diameter dalam nosel (d) yang digunakan adalah 18.5 mm.
5. Jarak antar nosel dibandingkan diameter dalam nosel (L/d) yang digunakan adalah 2.7
6. 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.
7. *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 literatur dari referensi yang berkaitan, terutama dari penelitian yang dilakukan oleh Harinaldi dan Furjiyanto (2008), serta Haris dan 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

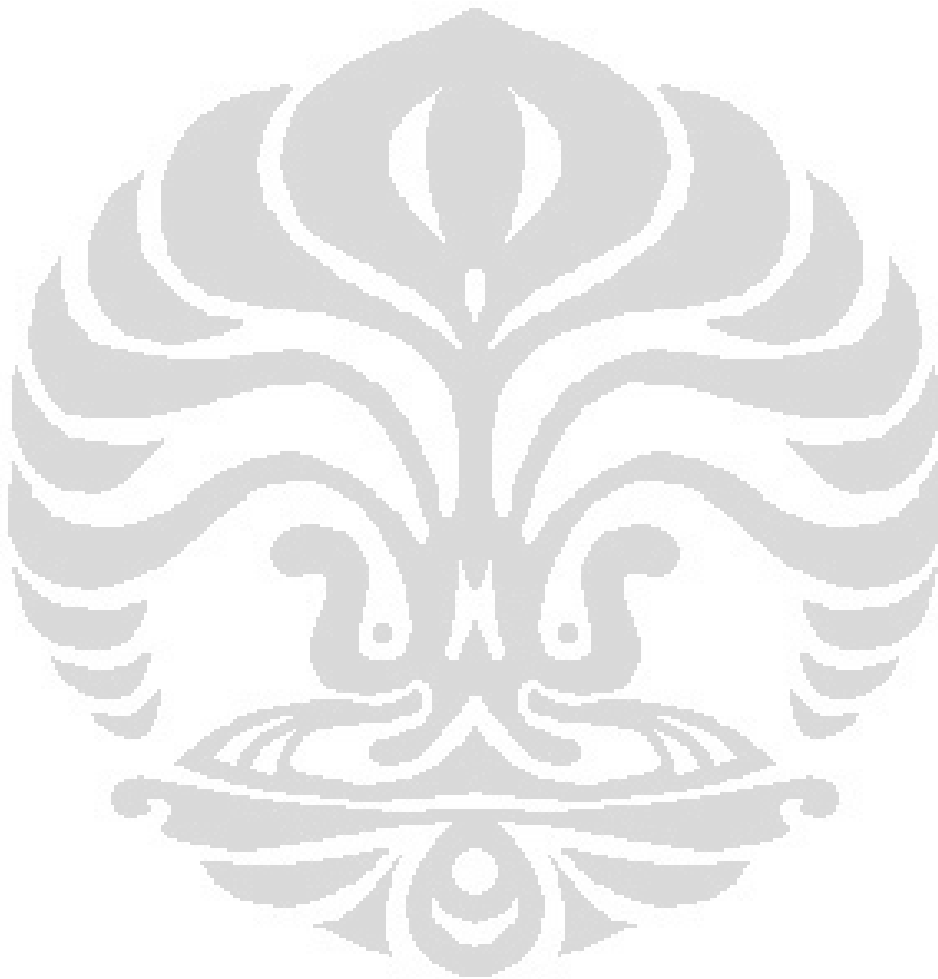
Bab ini berisi tentang rincian peralatan yang digunakan selama berlangsungnya penelitian, dan menjelaskan mengenai cara kerja alat beserta komponennya. Selain itu, dijelaskan juga mengenai prosedur pengambilan data serta metode penelitian yang dilakukan.

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.



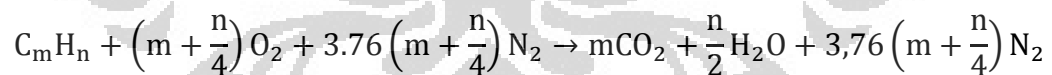
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

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 :

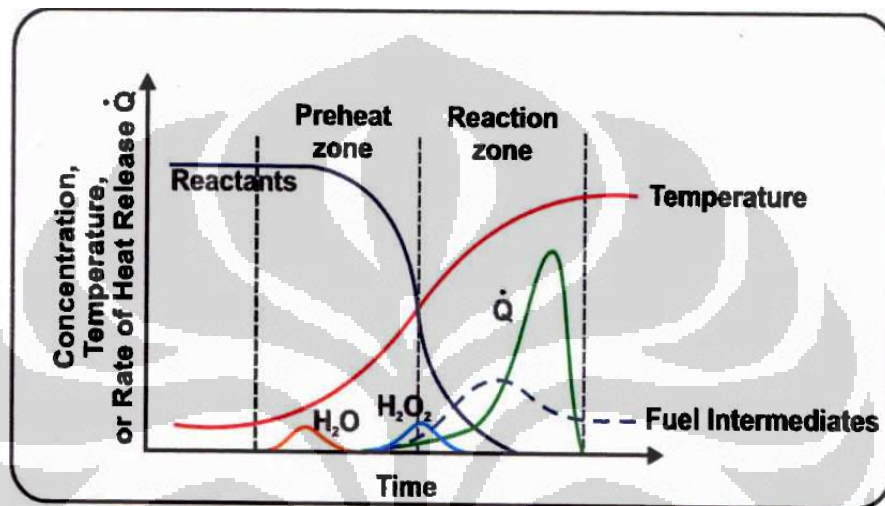


Persamaan ini merupakan hasil penyederhanaan, mengingat cukup sulit untuk memastikan proses pembakaran yang sempurna dengan rasio ekivalen yang tepat dari udara. Jika terjadi pembakaran tidak sempurna, maka hasil persamaan di atas yang hanya menghasilkan CO_2 dan H_2O tidak akan terjadi, akan tetapi 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.

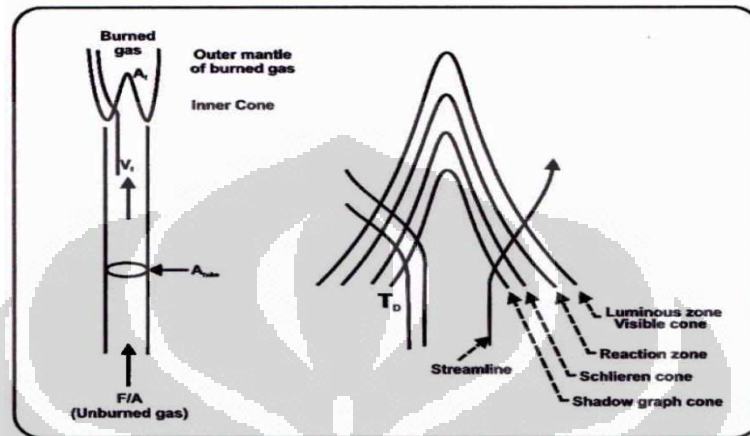
3. *Zona post-flame*

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

2.2.1 Nyala Api *Premixed (Premixed Flame)*

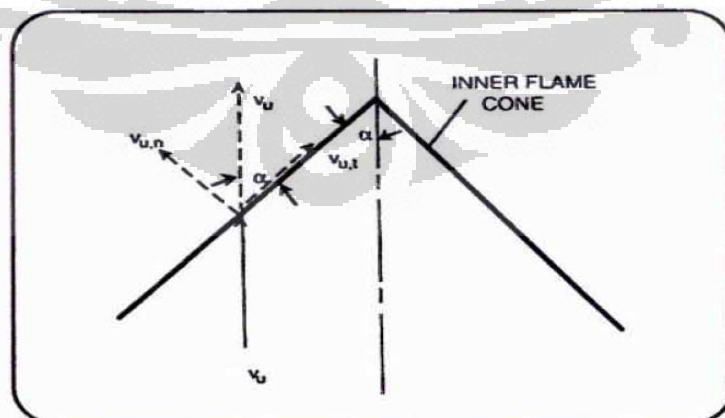
Nyala api *premixed (premixed flame)* terdiri atas daerah terang, menunjukkan tempat terjadinya reaksi dan energi panas dilepaskan daerah reaksi

(*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.

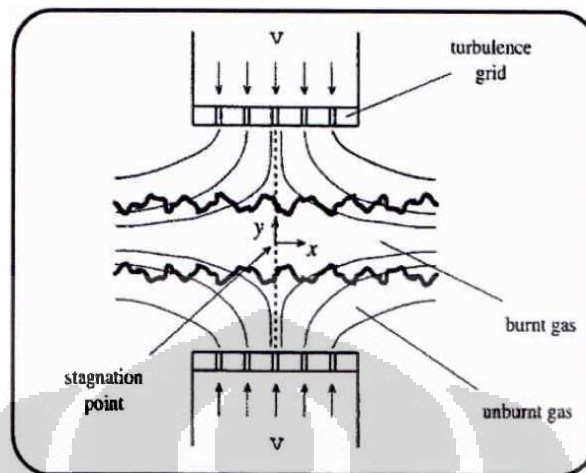
Daerah reaksi dibagi menjadi dua daerah yaitu:

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 Biones [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.

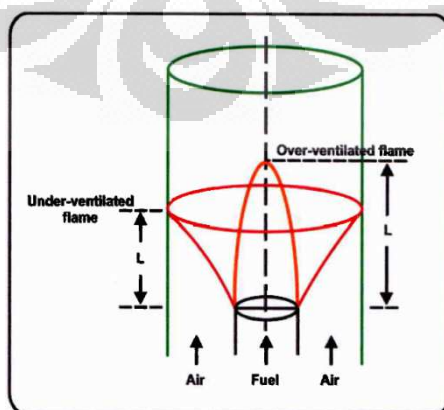
2.2.2 Nyala Difusi

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 ukurann 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.

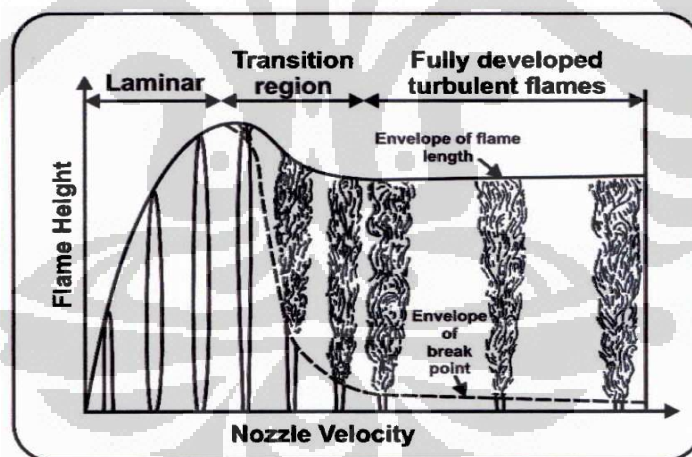
Burke dan Schumman (1928) mempelajari nyala api difusi dalam sebuah tabung dimana aliran bahan bakar dikelilingi oleh aliran udara dengan kedua aliran tersebut memiliki kecepatan yang sama. Bentuk dari *flame front* dari kondisi tersebut, yaitu seperti gambar di bawah ini.



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.

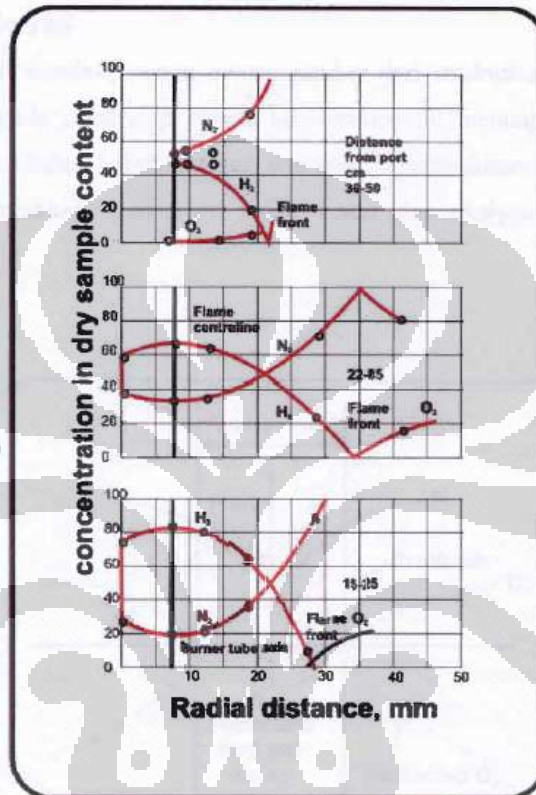


Gambar 2.6 Perubahan bentuk api terhadap kecepatan aliran bahan bakar [7]

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



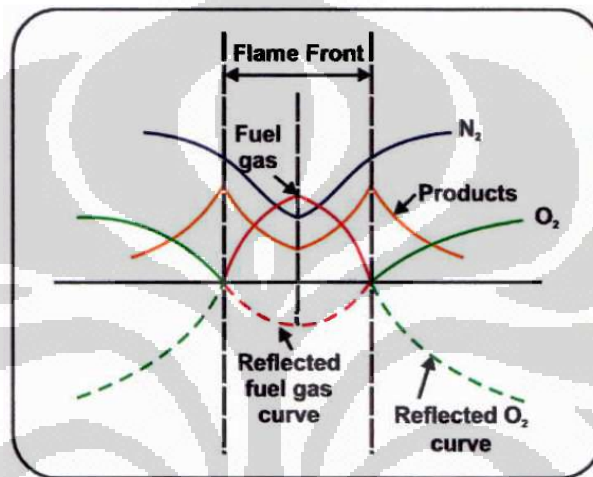
Gambar 2.7 Diagram komposisi nyala api difusi berbahan bakar nitrogen [8]

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 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 2.8 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.



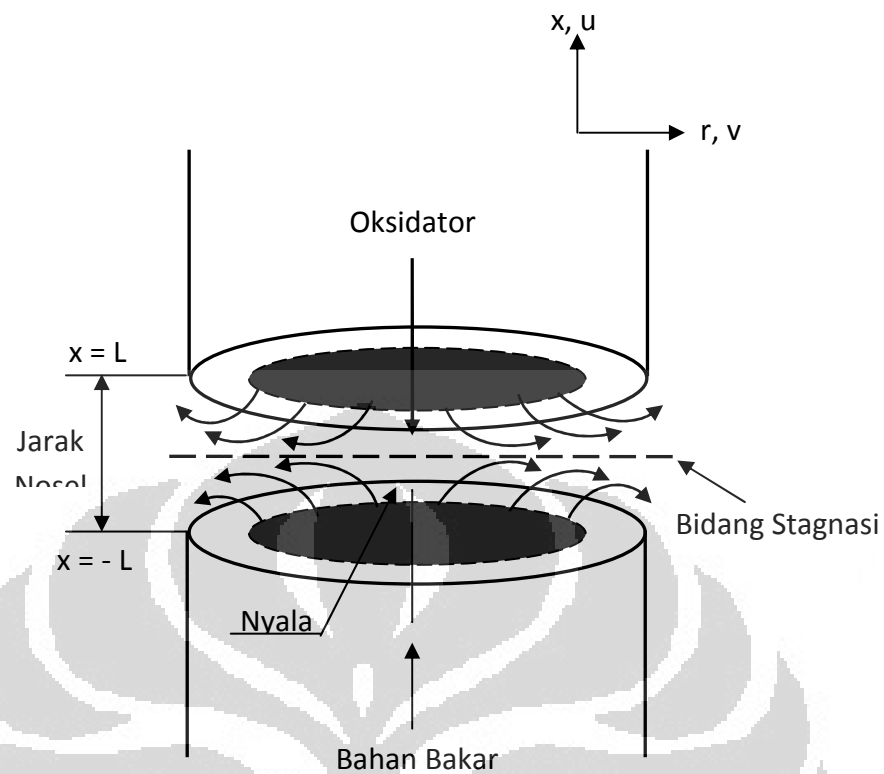
Gambar 2.9 Nyala turbulen [10]

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 menunjukkan bahwa nyala api dinamik atau tidak tunak akan berada pada *strain rates* yang lebih tinggi dari pada nyala api tunak (*steady flames*).

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 stoikiometri. 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*).

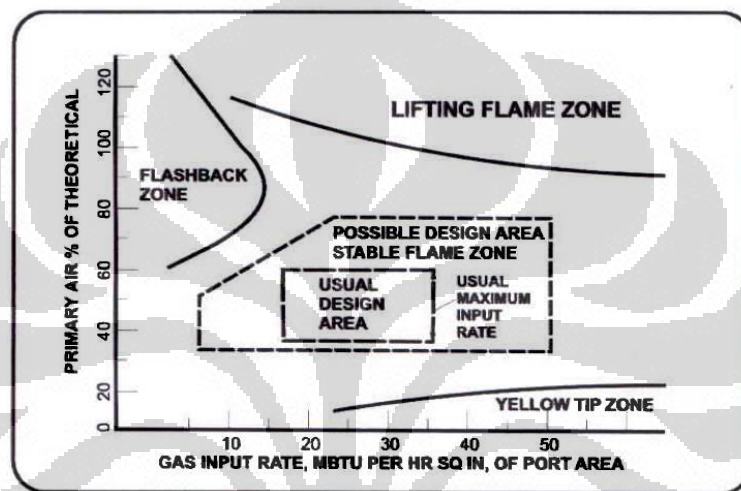
2.4.1 Fenomena *Flashback*

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 *flashback* 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 agakk 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.

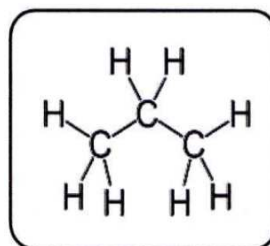
Dengan meningkatkan kecepatan aliran hingga tercapai kecepatan kritis, ujung nyala akan meloncat ke posisi jauh dari ujung (mulut) pembakar dan nyala dikatakan terangkat. Kondisi nyala terangkat inilah yang dinamakan sebagai *lift-off*, dan jika kecepatan aliran terus dinaikkan, maka nyala secara kasar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

Dalam penggunaan sehari-hari sebagai bahan bakar, propana dikenal juga sebagai LPG (*liquified petroeleum 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 (*spesific gravity*)

Berat jenis dinyatakan dalam gram per ml, dalam derajat API, dalam lb per galon, atau lb per ft^3 . 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 = $62,4\text{ lb/ft}^3$.

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.

Tabel 2.1 Properti kimia propana

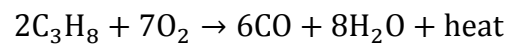
Rumus molekul	C ₃ H ₈
Wujud	Gas
Warna	Tidak berwarna
Massa molar	44.096 g/mol
Titik didih	-43.67°F (-42.04°C) pada 1 atm
Gravitasi jenis	1.5223 pada 70°F (21.1°C) pada 1 atm
Titik uap	305.84F (-187.69C) pada 1 atm
Tekanan uap	109.73 psig, (756.56 kPa) pada 70°F (21.1°C)
Densitas	1.83 g/L, gas (0.5077 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 korbaon 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	1k	10k	100k
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 (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 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					
	(-210.00 °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	(O ₂) 0.720 kJ·mol ⁻¹					
Heat of vaporization	(O 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	1k	10k	100k
at T/K	37	41	45	53	62	77

Sumber: Pocket Wikipedia for Windows, 2009

BAB 3

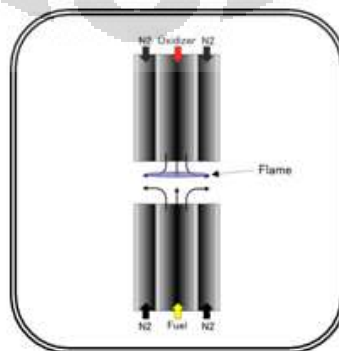
PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN

Pada penelitian kali ini, penulis 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 \varnothing 18.5 mm. Sedangkan untuk \varnothing 8.5 mm, dan \varnothing 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 Penelitian Medan Aliran Berlawanan

Dalam proses penelitian kali ini masih menggunakan peralatan yang sama dengan penelitian sebelumnya. Pada penelitian kali ini kami menggunakan nosel \varnothing 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 2.7. 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. 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 Penelitian Nyala Api Difusi Tipe Swirl

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



Gambar 3.4 High speed video camera Motion Xtra HG SE

Sumber: VITCam Manual V 1.5.9

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	<p><i>Circular buffer:</i></p> <p>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.</p> <p><i>Record on trigger:</i></p>

	Merekam dengan pemicu yang bisa 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 <i>binder</i> untuk sinyal pemicu. Sambungan IEEE 1394 6-pin.
Ukuran (dimensi)	Kepala kamera: 97x71x71 mm.
Berat	Kepala kamera: 0.8 kg.
Daya listrik yang diperlukan	Kurang lebih 12 W, pada suplai luar (8-12V)
Temperatur kerja	Operasional: -18° s/d 45°C (0° to 122°F) Non-operasional: -25° s/d 65°C (-13° to 149°F)
Kelembaban kerja	Operasional: maks.80% (tidak beruap), pada 45°C (113°F) untuk operasi selama 8 jam. Non-operasional: maks.40% (tidak beruap), pada 70°C (158°F) selama 48 jam.
Benturan	Getaran puncak sebesar 100 g dengan lebar getaran sebesar 15 ms.

3.2 Prosedur Penelitian

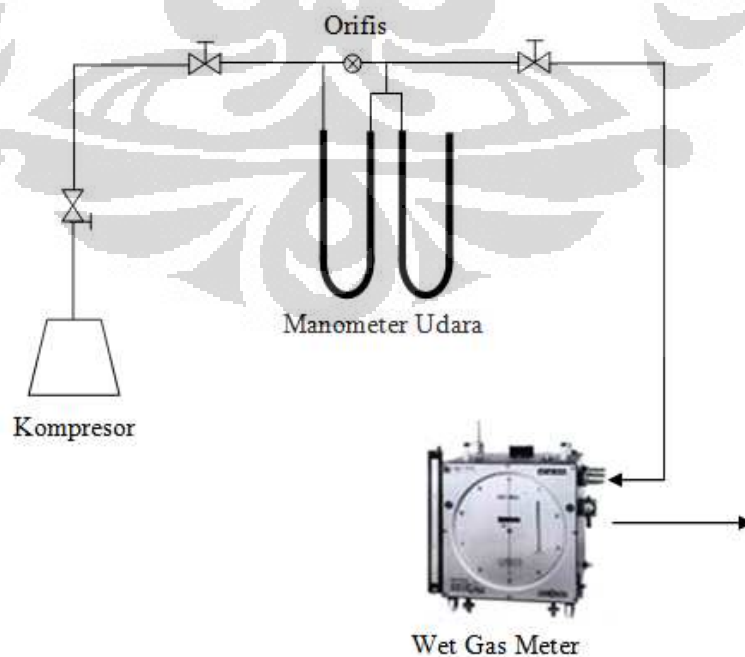
Dalam melakukan suatu pekerjaan eksperimental, prosedur mengenai hal-hal yang akan dilakukan berkaitan dengan pengaturan alat ukur, kalibrasi dan pengambilan data harus dimengerti dan dilaksanakan dengan benar. Hal itu bertujuan untuk keselamatan, menghindari kerusakan alat, dan juga pembuangan waktu karena kesalahan dalam pengambilan data.

3.2.1 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Udara

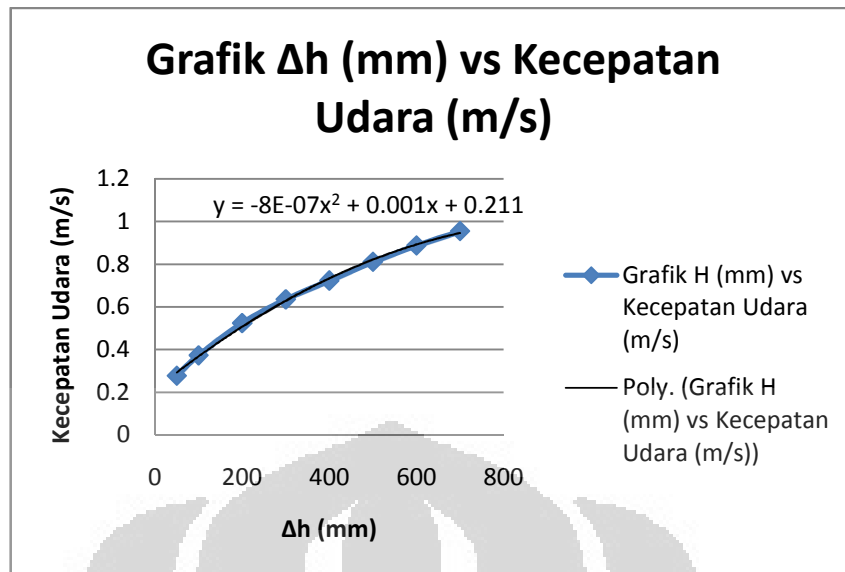
Prosedur kalibrasi sistem suplai udara yang dilakukan sebagai berikut:

1. Sistem diinstalasi dengan cara memasukkan saluran udara ke dalam kompresor yang dihubungkan melalui manometer tabung-U.

2. Manometer tabung-U diisi dengan air hingga mencapai angka 0-0 kemudian orifis dipasang sesuai ukuran yang diinginkan yaitu sebesar \varnothing 2.0 mm untuk proses pengambilan data.
3. Wet Gas Meter Shinagawa WE-2.5 A diisi dengan air hingga level yang telah ditetapkan manual book.
4. Sistem diinstalasi dengan cara memasang selang *output* dari manometer tabung-U ke *input* Wet Gas Meter Shinagawa kemudian memasang selang untuk *output* fluida dari Wet Gas Meter Shingawa.
5. Udara dari kompresor dialirkan melewati manometer tabung-U sambil menentukan nilai *back pressure* udara yang diinginkan.
6. Menentukan nilai perbedaan ketinggian permukaan Δh dengan menyetel *needle valve* udara sambil memerrthankan nilai *back pressure* udara yang diinginkan.
7. Mengambil nilai tiap *back pressure* udara, sambil mengambil data untuk setiap kenaikan 100 mm pada manometer tabung-U dengan menggunakan diameter orifis 2.0 mm.
8. Mencatat setiap data yang didapat yaitu 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).



Gambar 3.5. Skema kalibrasi sitem suplai udara



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

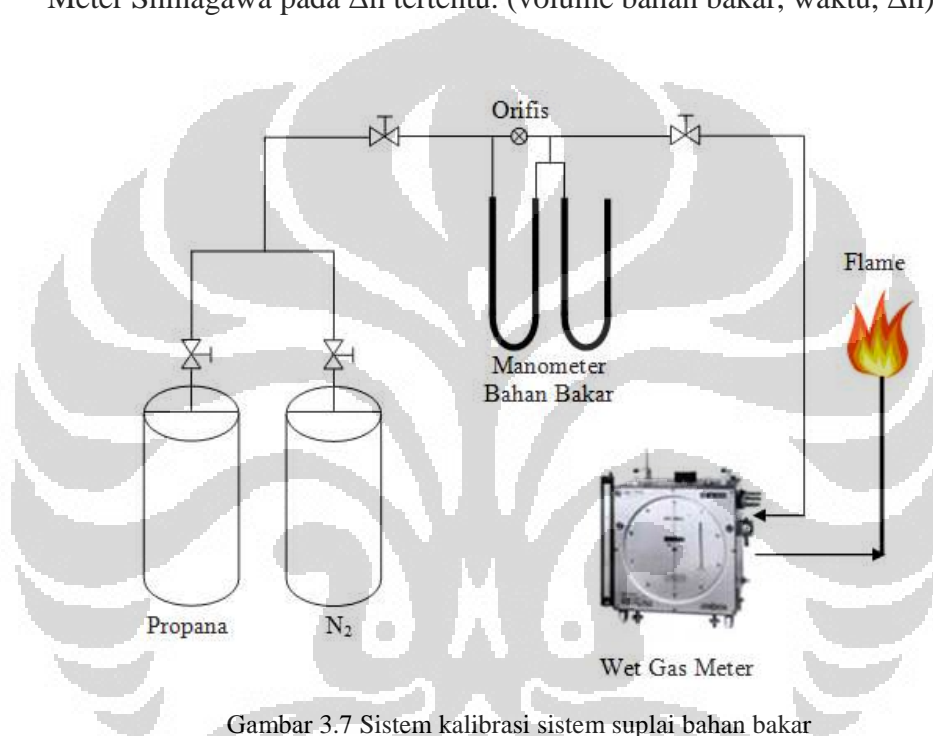
3.2.2 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Bahan Bakar

Prosedur kalibrasi sistem suplai bahan bakar yang dilakukan sebagai berikut:

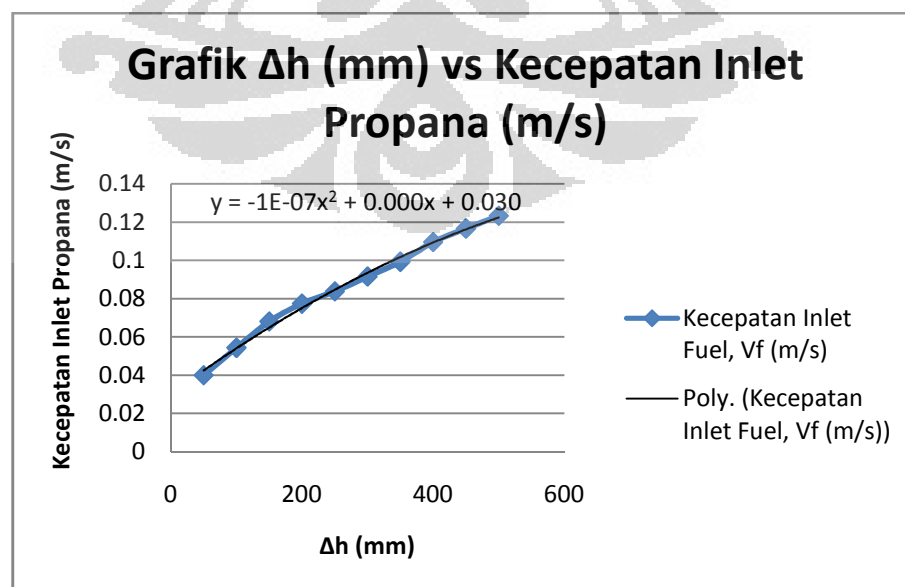
1. Sistem diinstalasi dengan cara memasukkan saluran bahan bakar pada tabung bahan bakar (propana) yang terhubung melalui manometer tabung-U.
2. Manometer tabung-U diisi dengan air hingga mencapai angka 0-0 kemudian orifis dipasang sesuai ukuran yang diinginkan yaitu sebesar \varnothing 0.8 mm untuk proses pengambilan data.
3. Wet Gas Meter Shinagawa WE-2.5 A diisi dengan air hingga level yang telah ditetapkan manual book.
4. Sistem diinstalasi dengan cara memasang selang *output* dari manometer tabung-U ke *input* Wet Gas Meter Shinagawa kemudian memasang selang untuk *output* fluida dari Wet Gas Meter Shingawa.
5. Bahan bakar dialirkan dari tabung propana dengan mengatur tekanan keluar sebesar $1-2 \text{ kg/cm}^2$ (dapat dilihat pada *pressure regulator*). Kemudian menentukan nilai *back pressure* bahan bakar yang diinginkan.
6. Menentukan nilai perbedaan ketinggian permukaan Δh dengan menyetel *needle valve* bahan bakar sambil mempertahankan nilai *back pressure* bahan bakar konstan. Membakar bahan bakar (*flare*) yang keluar dari Wet Gas Meter Shinagawa agar tidak terjadi akumulasi udara yang dapat

mengakibatkan reaksi pembakaran jika terkena api, maupun terhirup melebihi ambang batas yang diperbolehkan.

7. Mengambil nilai tiap *back pressure* bahan bakar, sambil mengambil data untuk setiap kenaikan 50 mm pada manometer tabung-U dengan menggunakan diameter orifis 0.8 mm.
8. Mencatat setiap data yang didapat yaitu volume bahan bakar yang mengalir dan waktu yang diperlukan dalam satu putaran penuh jarum jam Wet Gas Meter Shinagawa pada Δh tertentu. (volume bahan bakar, waktu, Δh).



Gambar 3.7 Sistem kalibrasi sistem suplai bahan bakar



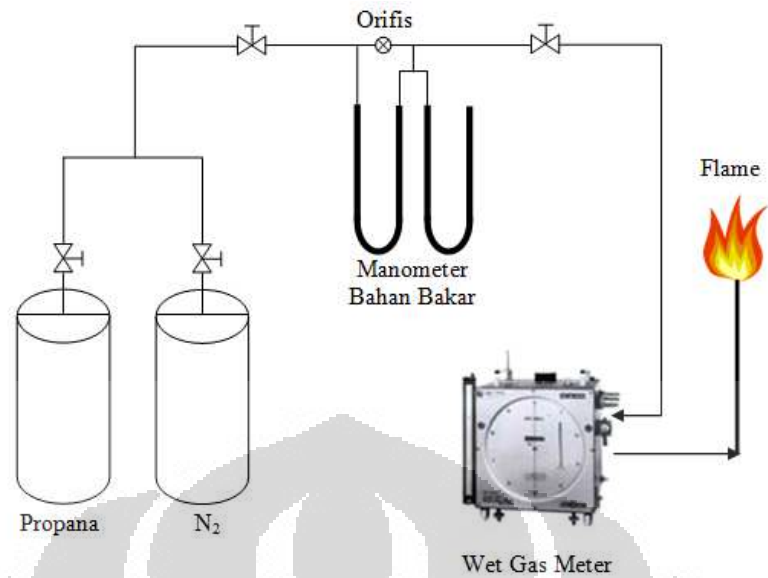
Gambar 3.8 Grafik persamaan kalibrasi kec.propana (V_f) untuk \varnothing 18.5 mm

3.2.3 Prosedur Sistem Kalibrasi Nitrogen dan Proses Purgung

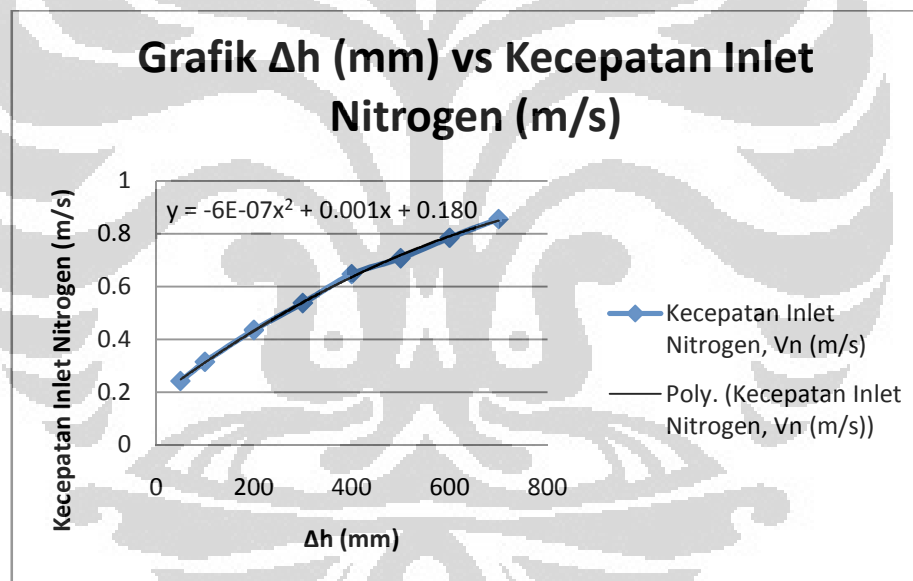
Pada proses purging merupakan proses pembersihan seluruh sistem suplai saluran bahan bakar dari udara. Proses ini dilakukan sebelum dan sesudah melakukan kalibrasi sistem saluran bahan bakar dengan mengalirkan gas nitrogen masuk kedalam sistem tersebut untuk memastikan tidak adanya udara yang dapat mengakibatkan reaksi pembakaran terjadi.

Prosedur-prosedur dalam melakukan proses purging, yaitu:

1. Menutup saluran bahan bakar yang masuk kedalam manometer tabung-U sebelum dan sesudah melakukan kalibrasi sistem saluran bahan bakar.
2. Membuka saluran nitrogen yang masuk kedalam manometer tabung-U dengan cara membuka penuh tekanan keluar pada tabung. (sebelum hal tersebut dilakukan harus memastikan terlebih dahulu kondisi *needle valve* untuk mengatur masuknya fluida pada manometer tabung-U dalam keadaan tertutup).
3. Tekanan nitrogen yang masuk kedalam manometer tabung-U diatur sebesar 1-2 kg/cm^2 . Pembacaan angka ini dapat ditunjukkan pada pressure regulator.
4. Katup jarum *back pressure* pada manometer tabung-U dibuka secara penuh dan katup jarum pada manometer tabung-U lainnya dibuka secara perlahan.
5. Proses purging dilakukan dengan cara mengalirkan nitrogen pada sistem suplai bahan bakar sebanyak 3x putaran penuh pada penunjukan jarum Wet Gas Meter Shinagawa dengan disertai membakar bahan bakar (flare) sampai padam untuk memastikan bahwa tidak adanya sisa udara yang dapat tercampur pada saat kalibrasi sistem suplai bahan bakar.
6. Menutup saluran nitrogen yang masuk kedalam manometer tabung-U pertama dengan menutup valve yang terdapat pada saluran masuk nitrogen.
7. Melepaskan seluruh instalasi yang berhubungan dengan Wet Gas Meter Shinagawa.



Gambar 3.9 Skema Prosedur Proses Purgung

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

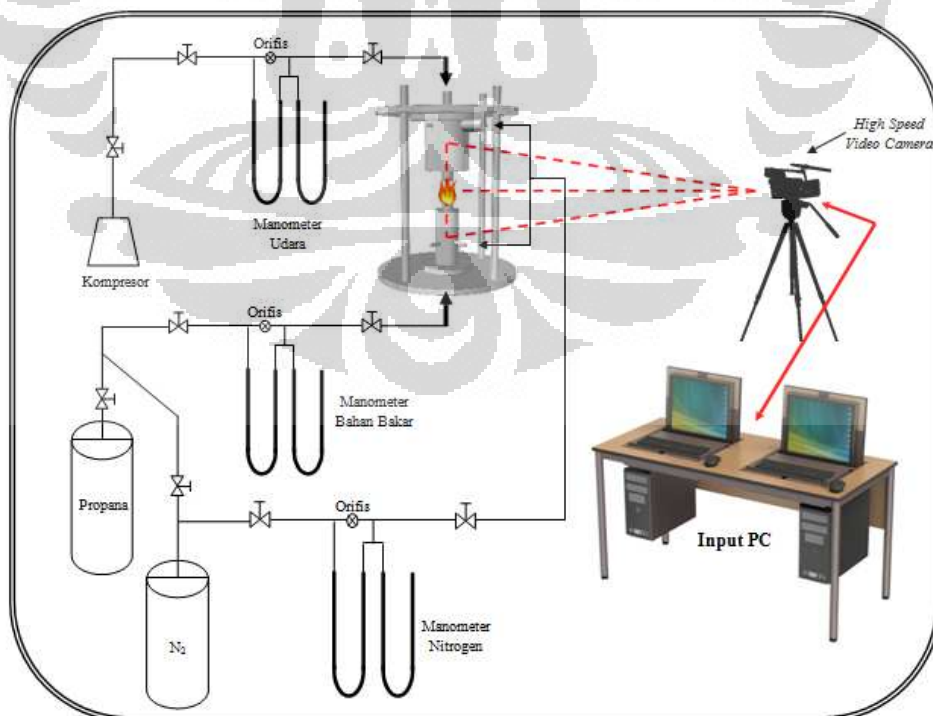
Selain melakukan kalibrasi sistem suplai bahan bakar, untuk setiap pengambilan data, sistem juga harus dibersihkan dengan cara mengalirkan nitrogen kedalamnya.

3.2.4 Prosedur Penelitian *High Speed Video Camera*

Pada penelitian dengan *high speed video camera* ini, hal yang ingin diamati adalah bentuk nyala api pada tipe swirl. Kamera yang digunakan adalah

Motin 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. Memasang tripod tepat di depan burner, atur sedemikian rupa sehingga jarak lensa kamera berjarak sekitar 40 cm dari zona reaksi pembakaran.
2. *High speed video camera* Motion Xtra HG SE dipasang pada tripod.
3. Kabel data disambungkan dari kamera ke laptop, dan 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 posisi 125 frame per detik.
7. Burner dinyalakan sesuai dengan prosedur untuk mendapatkan nyala api difusi tipe swirl.
8. Nyala api yang terjadi di rekam selama 8 detik
9. Mengolah data mentah yang didapat yakni berupa file AVI.
10. Data video yang di dapat di ekstrak menggunakan software imageJ untuk mendapatkan hasil file format JPEG.
11. Hasil yang di dapat adalah file format JPEG sekitar 1000 frame.



Gambar 3.11 Skema penelitian menggunakan *high speed video camera*

BAB IV 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 tabrakan 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)

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. Pada analisa modus nyala api swirl ini, semua data dikelompokkan berdasarkan rasio antara debit nitrogen dan bahan bakar. Hal yang dibahas di analisa modus nyala api ini yang pertama adalah pengamatan kecepatan putar yang terjadi pada kondisi

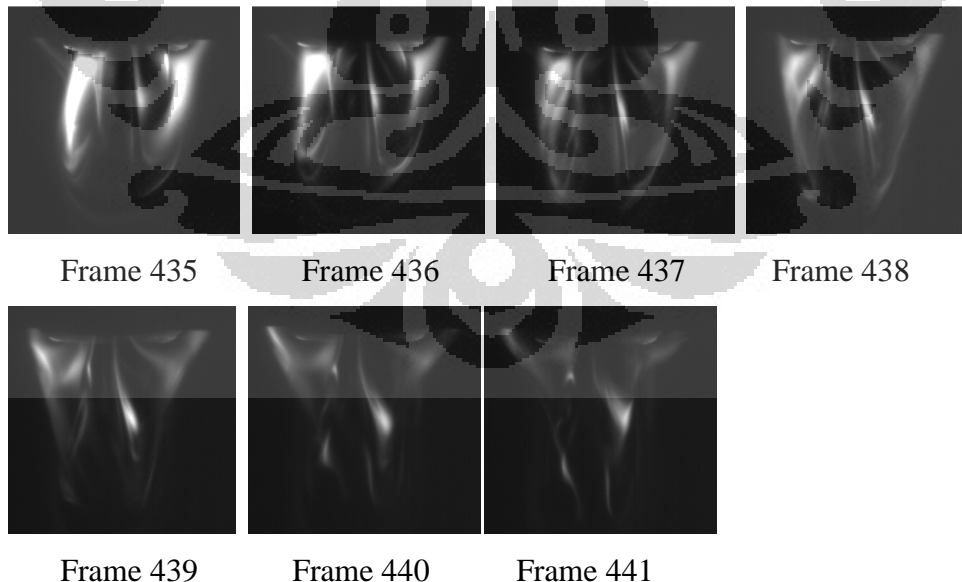
swirl dengan rasio debit berbeda, dan pengaruh pembentukan nyala api swirl terhadap limit stabilitas nyala

4.1. Hasil Visualisasi Nyala Api Tipe Swirl

Dari penelitian yang telah dilakukan, diperoleh data mentah berupa data gambar hasil visualisasi menggunakan *High Speed Video Camera*. Pengambilan gambar diklasifikasikan berdasarkan rasio debit nitrogen dan bahan bakar (Q_{N_2}/Q_f). Hasil dikelompokkan menjadi 4 kategori gambar dengan rasio yang berbeda, yaitu : $Q_{N_2}/Q_f = 80/20, 70/30, 60/40, 50/50$ dan $40/60$. Durasi yang diambil setiap titik adalah 8 detik dengan jumlah *frame* 125 frame/detik. Maka jumlah data yang didapat adalah 1000 buah gambar pada masing-masing titik. Untuk memudahkan analisa maka diambil 30 buah gambar dari setiap kategori rasio yang telah ditentukan. Hasil yang didapat disertakan pada lampiran.

4.1.1. Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 80/20$

Pada perbandingan rasio debit $Q_{N_2}/Q_f = 80/20$ swirl terjadi pada kondisi fluks momentum bahan bakar (τ_f) sebesar $0,008606392 \text{ kg/ms}^2$ dan fluks momentum udara (τ_o) stabil $0,029541836 \text{ kg/ms}^2$. Bentuk nyala api ini bisa terlihat jelas pada frame 435 s.d 441 berikut:

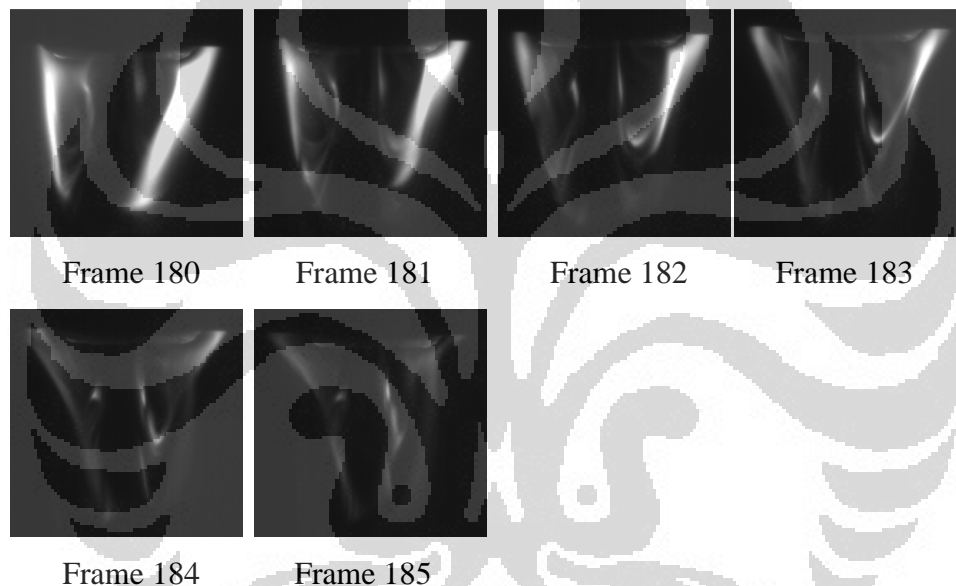


Gambar 4.1

Pada gambar di atas kita bisa lihat bahwa swirl terbentuk dengan sempurna, garis-garis pembentuk swirl terlihat jelas. Kemunculan swirl juga simetris di kedua sisinya. Pada kondisi swirl, setelah nyala api membentuk swirl, maka ia akan bergerak ke atas kemudian lepas dan menghilang.

4.1.2. Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 70/30$

Pada perbandingan rasio debit $Q_{N_2}/Q_f = 70/30$ swirl terjadi pada kondisi fluks momentum bahan bakar (τ_f) sebesar $0,008606392 \text{ kg/ms}^2$ dan fluks momentum udara (τ_o) stabil $0,034219236 \text{ kg/ms}^2$. Bentuk nyala api ini bisa terlihat jelas pada frame 180 s.d 185 berikut:

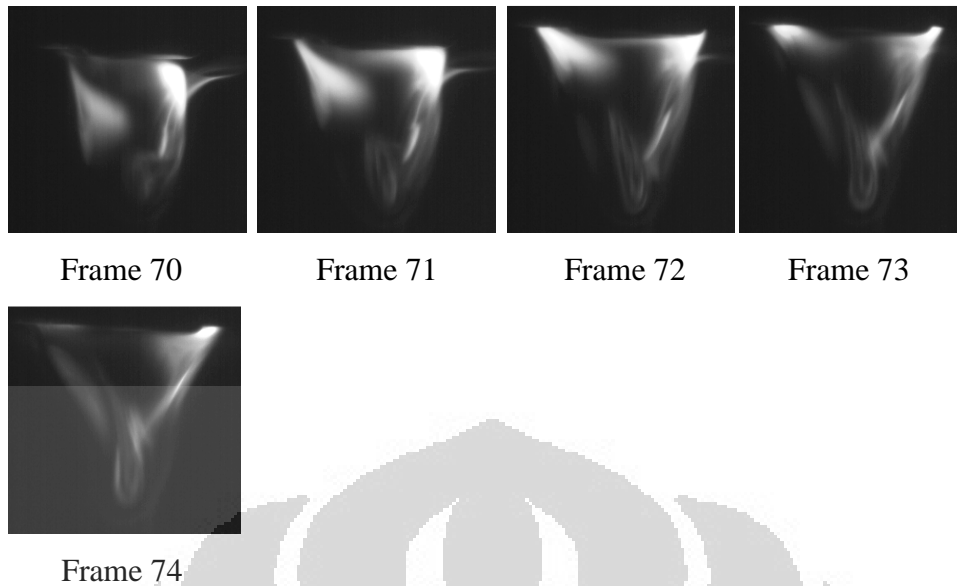


Gambar 4.2

Pada gambar diatas swirl terbentuk dengan sempurna, namun garis-garis pembentuk swirl terlihat lebih tipis daripada kondisi pada saat rasio $Q_{N_2}/Q_f = 80/20$.

4.1.3. Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 60/40$

Pada perbandingan rasio debit $Q_{N_2}/Q_f = 60/40$ swirl terjadi pada kondisi fluks momentum bahan bakar (τ_f) sebesar $0,008606392 \text{ kg/ms}^2$ dan fluks momentum udara stabil $0,027294201 \text{ kg/ms}^2$. Bentuk nyala api ini bisa terlihat jelas pada frame 70 s.d 74 berikut:

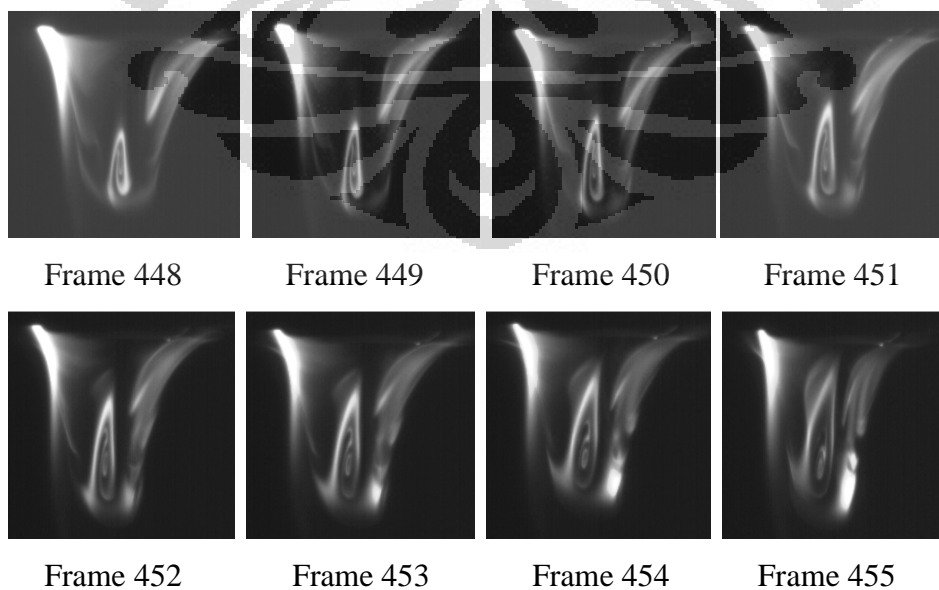


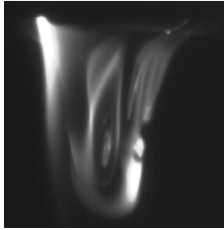
Gambar 4.3

Pada gambar di atas kita bisa melihat bahwa, dengan semakin rendah rasio Q_{N_2}/Q_f maka garis swirl yang muncul makin tipis. Kemunculan swirl juga menjadi tidak simetris, dimana swirl hanya muncul pada salah satu sisi saja.

4.1.4. Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 50/50$

Pada perbandingan rasio debit $Q_{N_2}/Q_f = 50/50$ swirl terjadi pada kondisi fluks momentum bahan bakar (τ_f) sebesar $0,008606392 \text{ kg/ms}^2$ dan fluks momentum udara (τ_o) stabil $0,031851186 \text{ kg/ms}^2$. Bentuk nyala api ini bisa terlihat jelas pada frame 448 s.d 456 berikut:





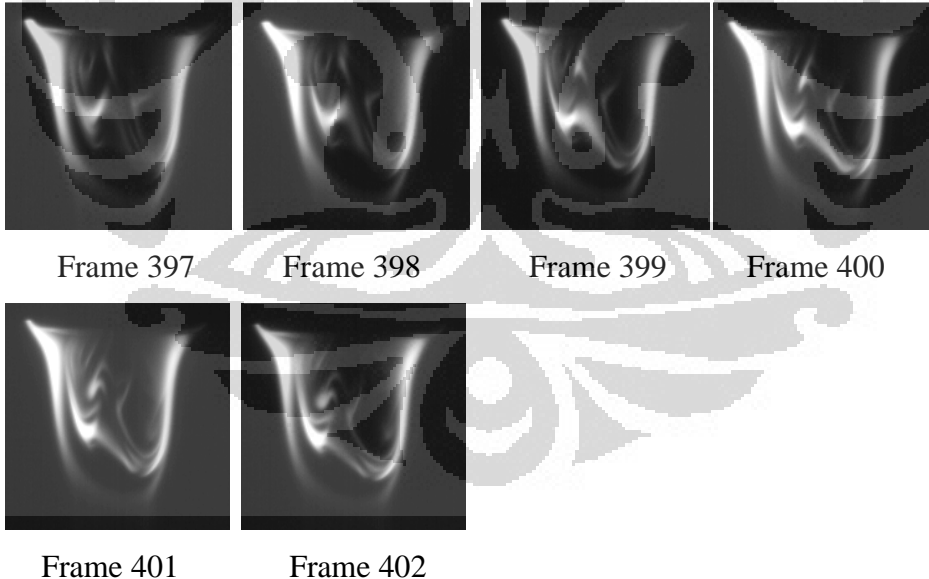
Frame 456

Gambar 4.4

Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa swirl terlihat tipis, namun swirl yang terbentuk jelas dan stabil. Hal ini dikarenakan rasio debit yang sama antara nitrogen dan udara. Kemunculan swirl hanya terjadi pada salah satu sisi saja.

4.1.5. Hasil Visualisasi Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 40/60$

Pada perbandingan rasio debit $Q_{N_2}/Q_f = 40/60$ swirl terjadi pada kondisi fluks momentum bahan bakar (τ_f) sebesar $0,008606392 \text{ kg/ms}^2$ dan fluks momentum udara (τ_o) stabil $0,031851186 \text{ kg/ms}^2$. Bentuk nyala api ini bisa terlihat jelas pada frame 397s.d 402 berikut:



Gambar 4.5

Pada gambar terlihat swirl, namun pembentukan garis swirl tidak terlihat tegas. Selain itu, di pinggir api swirl tampak garis tegas di dekat burner. Garis itu menunjukkan bahwa dengan meningkatnya τ_f maka konsentrasi karbon meningkat.

4.2. Hasil Perhitungan Kecepatan Putar Swirl

Setelah mendapatkan visualisasi nyala api berupa gambar seperti yang ditunjukkan pada sub-bab diatas, dilakukan pengolahan data yang bertujuan untuk mendapatkan kecepatan putar swirl. Metode perhitungan kecepatan ini bisa dilakukan dengan menghitung berapa banyak frame/gambar yang dibutuhkan untuk membuat satu putaran swirl. Perhitungan ini dilakukan dengan bantuan software imageJ, yang mampu untuk merubah format video menjadi gambar beserta jumlah frame yang dibutuhkan per satuan detik.

4.2.1. Kecepatan Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 80/20$

Parameter :

rasio gap diameter = 2,7

jumlah frame/sekon = 125

Tabel 4.1 Kecepatan Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 80/20$

No	frame awal	frame akhir	t putaran	Kec. Putar	ω	ω rata-rata
1	20	25	0.048	20.83333333	130.8333333	109.3392857
2	63	69	0.056	17.85714286	112.1428571	
3	127	132	0.048	20.83333333	130.8333333	
4	203	208	0.048	20.83333333	130.8333333	
5	333	339	0.056	17.85714286	112.1428571	
6	435	441	0.056	17.85714286	112.1428571	
7	449	456	0.064	15.625	98.125	
8	741	748	0.064	15.625	98.125	
9	753	759	0.056	17.85714286	112.1428571	
10	765	773	0.072	13.88888889	87.22222222	
11	805	811	0.056	17.85714286	112.1428571	
12	827	835	0.072	13.88888889	87.22222222	
13	840	847	0.064	15.625	98.125	
14	888	893	0.048	20.83333333	130.8333333	
15	901	909	0.072	13.88888889	87.22222222	

Dari hasil perhitungan di atas, didapat bahwa kecepatan putar rata-rata swirl adalah 109,339 rad/s.

4.2.2. Kecepatan Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 70/30$

Parameter :

rasio gap diameter = 2,7

jumlah frame/sekon = 125

Tabel 4.2 Kecepatan Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 70/30$

No	frame awal	frame akhir	t putaran	Kec. Putar	ω	ω rata-rata
1	25	30	0.048	20.83333333	130.8333333	124.2293651
2	50	56	0.056	17.85714286	112.1428571	
3	170	176	0.056	17.85714286	112.1428571	
4	180	185	0.048	20.83333333	130.8333333	
5	241	247	0.056	17.85714286	112.1428571	
6	248	252	0.04	25	157	
7	261	268	0.064	15.625	98.125	
8	270	274	0.04	25	157	
9	320	324	0.04	25	157	
10	550	556	0.056	17.85714286	112.1428571	
11	680	685	0.048	20.83333333	130.8333333	
12	731	737	0.056	17.85714286	112.1428571	
13	774	781	0.064	15.625	98.125	
14	821	827	0.056	17.85714286	112.1428571	
15	985	990	0.048	20.83333333	130.8333333	

Dari hasil perhitungan di atas, didapat bahwa kecepatan putar rata-rata swirl adalah 124,229 rad/s.

4.2.3. Kecepatan Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 60/40$

Parameter :

rasio gap diameter = 2,7

jumlah frame/sekon = 125

Tabel 4.3 Kecepatan Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 60/40$

No	frame awal	frame akhir	t putaran	Kec. Putar	ω	ω rata-rata
1	16	21	0.048	20.83333333	130.8333333	138.6417989
2	70	74	0.04	25	157	
3	79	84	0.048	20.83333333	130.8333333	
4	169	175	0.056	17.85714286	112.1428571	
5	212	217	0.048	20.83333333	130.8333333	
6	246	252	0.056	17.85714286	112.1428571	
7	337	340	0.032	31.25	196.25	
8	343	348	0.048	20.83333333	130.8333333	
9	354	357	0.032	31.25	196.25	
10	448	452	0.04	25	157	
11	507	513	0.056	17.85714286	112.1428571	
12	579	583	0.04	25	157	
13	716	724	0.072	13.88888889	87.22222222	
14	798	804	0.056	17.85714286	112.1428571	
15	862	866	0.04	25	157	

Dari hasil perhitungan di atas, didapat untuk kondisi swirl pada saat $Q_{N2}/Q_f = 60/40$ sebesar 138,642 rad/s. Terlihat bahwa kecepatan putar rata-rata mengalami kenaikan terhadap penurunan rasio bahan bakar. Kecepatan putar paling kecil terjadi pada frame 716 s.d 724 dengan nilai ω sebesar 87,22222222 rad/s .

4.2.4. Kecepatan Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 50/50$

Parameter :

rasio gap diameter = 2,7

jumlah frame/sekon = 125

Tabel 4.4 Kecepatan Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 50/50$

No	frame awal	frame akhir	t putaran	Kec. Putar	ω	ω rata-rata
1	29	33	0.04	25	157	146.387963
2	34	39	0.048	20.83333333	130.8333333	
3	43	47	0.04	25	157	
4	207	210	0.032	31.25	196.25	
5	211	215	0.04	25	157	
6	248	252	0.04	25	157	
7	314	317	0.032	31.25	196.25	
8	340	345	0.048	20.83333333	130.8333333	
9	422	430	0.072	13.88888889	87.22222222	
10	448	456	0.072	13.88888889	87.22222222	
11	469	472	0.032	31.25	196.25	
12	517	524	0.064	15.625	98.125	
13	556	560	0.04	25	157	
14	716	720	0.04	25	157	
15	747	752	0.048	20.83333333	130.8333333	

Dari hasil perhitungan di atas, didapat untuk kondisi $Q_{N2}/Q_f = 50/50$ kecepatan putar rata-ratanya sebesar 146,388 rad/s. Penampakan kondisi swirl dapat dilihat pada frame 448 s.d 456 berikut.

4.2.5. Kecepatan Swirl Pada Rasio $Q_{N2}/Q_f = 40/60$

Parameter :

rasio gap diameter = 2,7

jumlah frame/sekon = 125

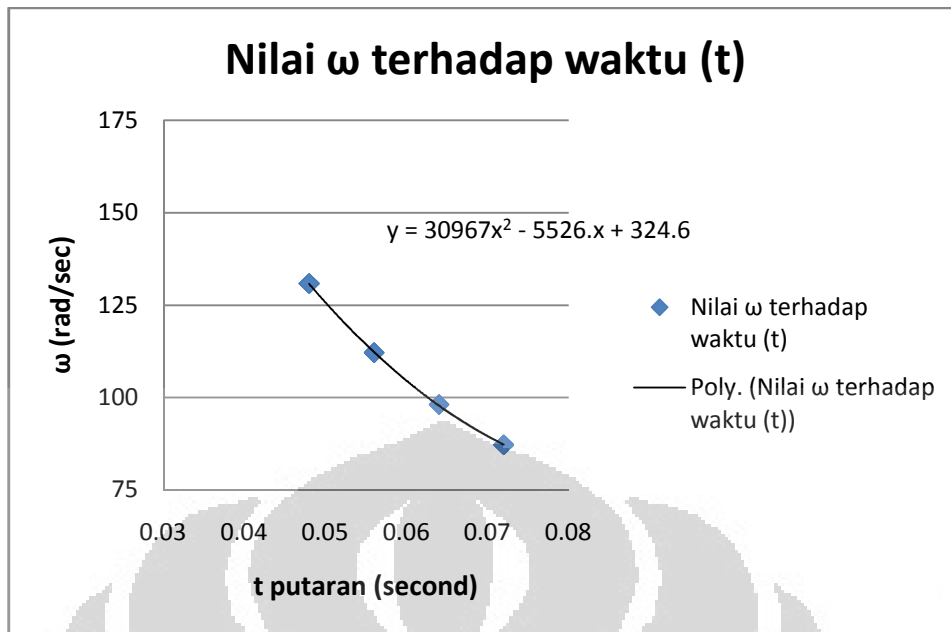
Tabel 4.5 Kecepatan Swirl Pada Rasio $Q_{N_2}/Q_f = 40/60$

No	frame awal	frame akhir	t putaran	Kec. Putar	ω	ω rata-rata
1	135	139	0.04	25	157	151.8912698
2	145	150	0.048	20.83333333	130.8333333	
3	231	236	0.048	20.83333333	130.8333333	
4	302	305	0.032	31.25	196.25	
5	337	340	0.032	31.25	196.25	
6	342	348	0.056	17.85714286	112.1428571	
7	397	402	0.048	20.83333333	130.8333333	
8	509	513	0.04	25	157	
9	549	555	0.056	17.85714286	112.1428571	
10	563	567	0.04	25	157	
11	721	725	0.04	25	157	
12	779	784	0.048	20.83333333	130.8333333	
13	790	794	0.04	25	157	
14	829	832	0.032	31.25	196.25	
15	837	841	0.04	25	157	

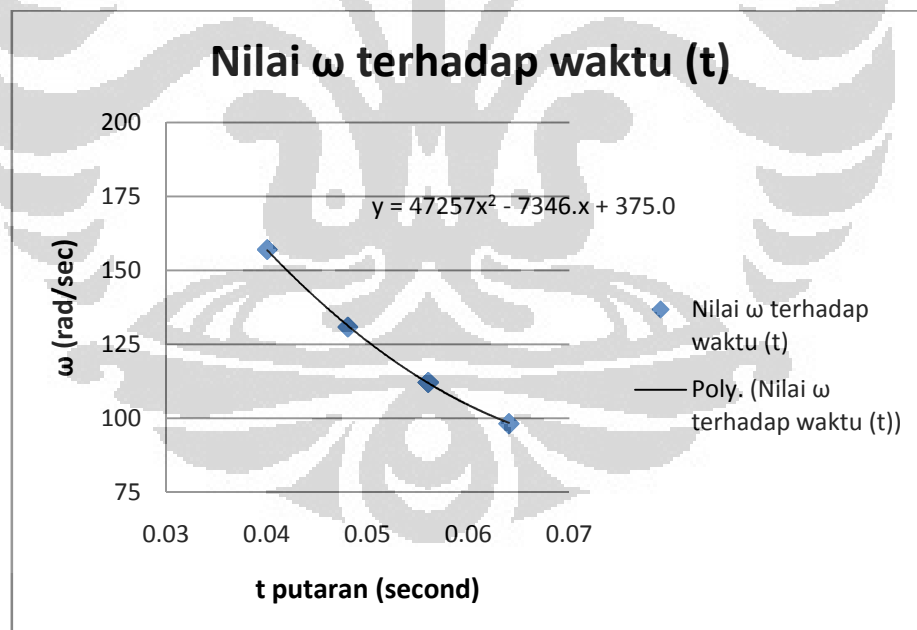
Dari hasil perhitungan di atas, didapat untuk kondisi $Q_{N_2}/Q_f = 40/60$ kecepatan putar rata-ratanya sebesar 151,891 rad/s.

4.3. Grafik Nilai Kecepatan Putar

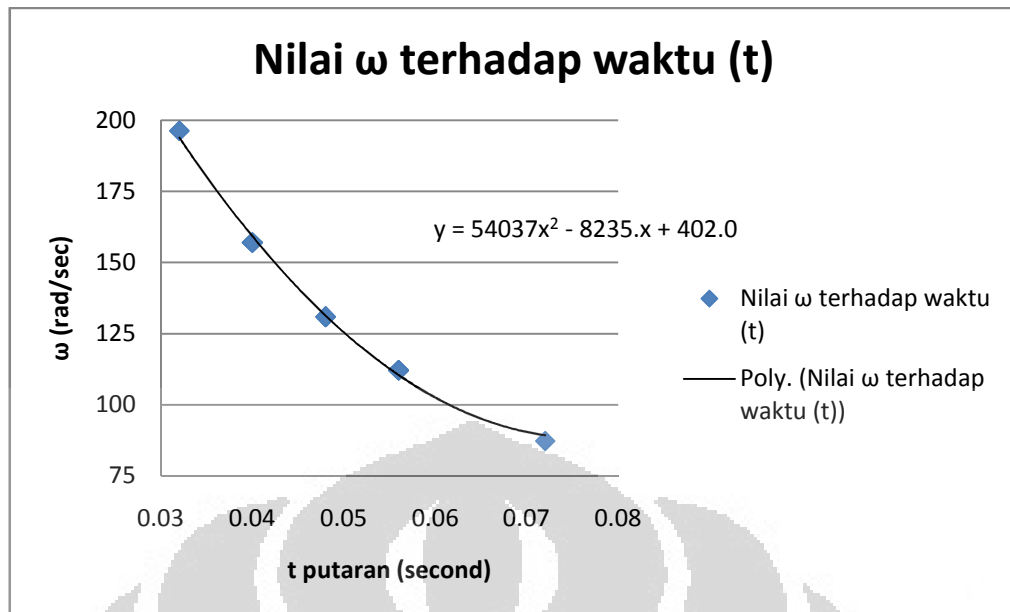
Berikut adalah grafik nilai kecepatan putar (ω) terhadap waktu putaran yang didapat dengan berbagai variasi debit nitrogen dan bahan bakar (Q_{N_2}/Q_f). Nilai kecepatan putar diambil berdasarkan perhitungan kecepatan putar yang terjadi.



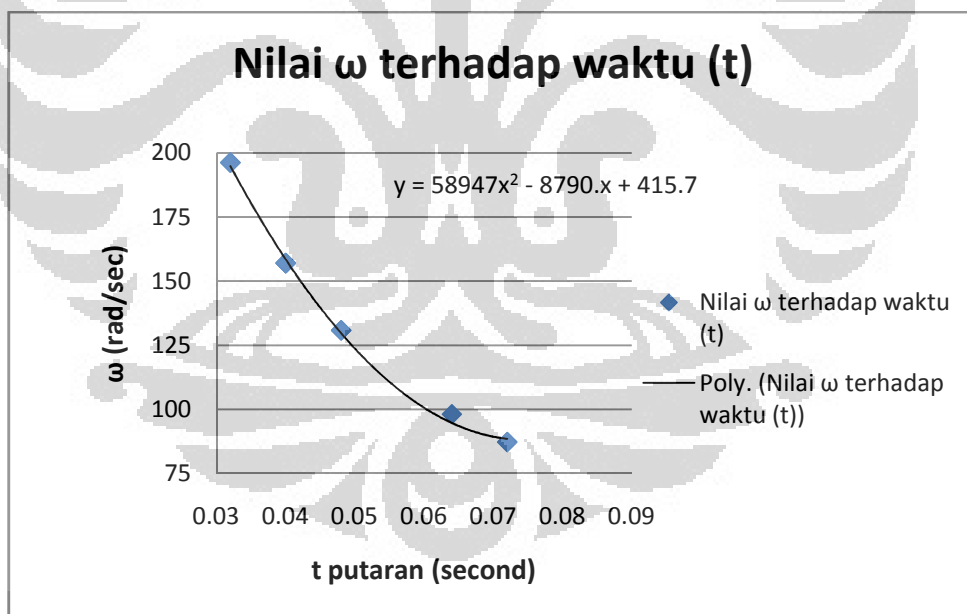
Gambar 4.6 Pengaruh Kecepatan Putar Terhadap Waktu
(kondisi swirl pada rasio $Q_{N2}/Q_f = 80/20$)



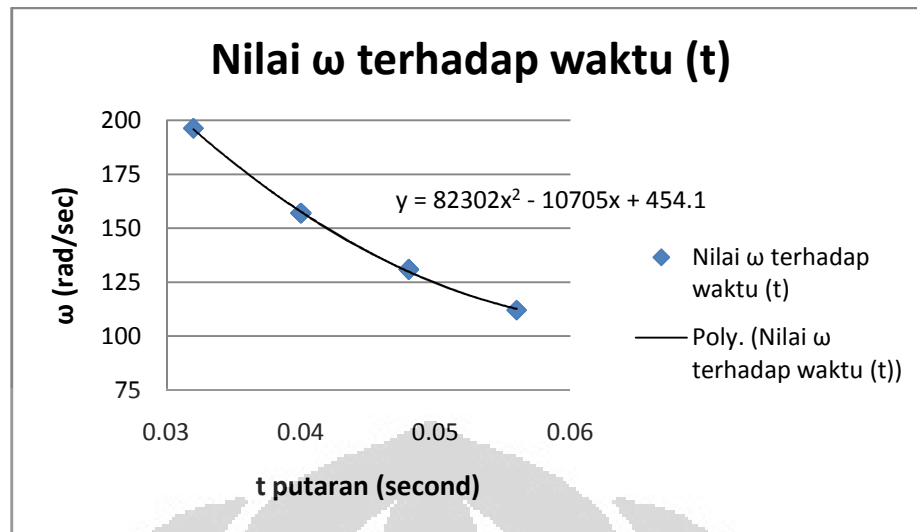
Gambar 4.7 Pengaruh Kecepatan Putar Terhadap Waktu
(kondisi swirl pada rasio $Q_{N2}/Q_f = 70/30$)



Gambar 4.8 Pengaruh Kecepatan Putar Terhadap Waktu
(kondisi swirl pada rasio $Q_{N2}/Q_f = 60/40$)

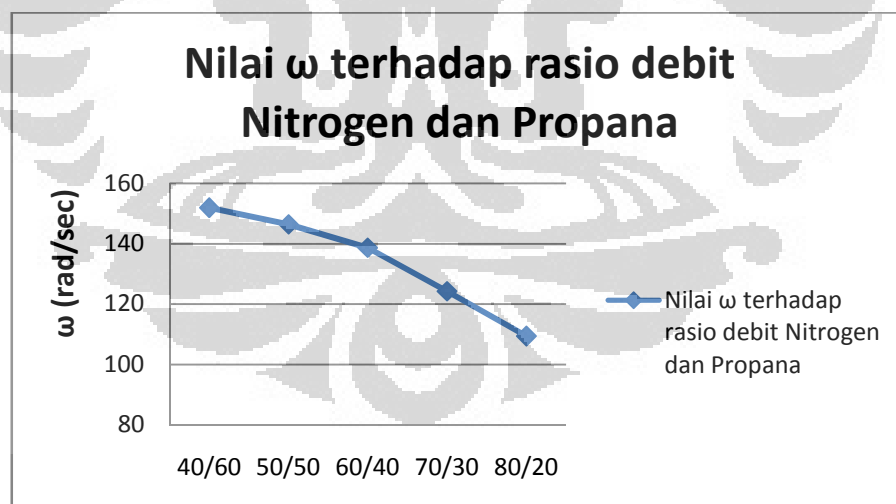


Gambar 4.9 Pengaruh Kecepatan Putar Terhadap Waktu
(kondisi swirl pada rasio $Q_{N2}/Q_f = 50/50$)



Gambar 4.10 Pengaruh Kecepatan Putar Terhadap Waktu (kondisi swirl pada rasio $Q_{N_2}/Q_f = 40/60$)

Dari grafik diatas dapat terlihat bahwa nilai kecepatan sudut putar (ω) terhadap waktu putaran berbanding terbalik. Dari lima grafik di atas menunjukkan keadaan yang sama, yakni jika waktu yang dibutuhkan untuk melakukan putaran lebih lama maka nilai kecepatan sudut akan mengalami penurunan.

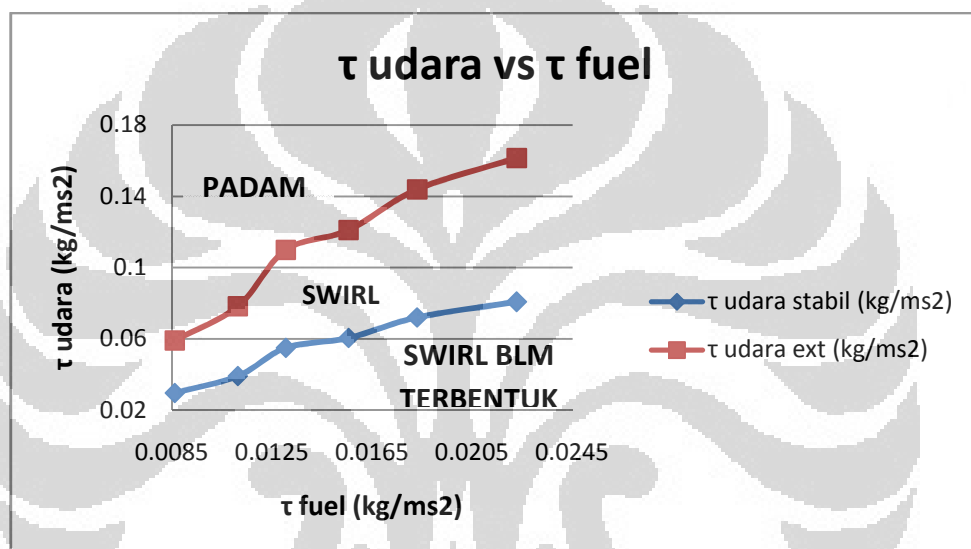


Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Kecepatan Putar Tiap Rasio Debit Q_{N_2}/Q_f

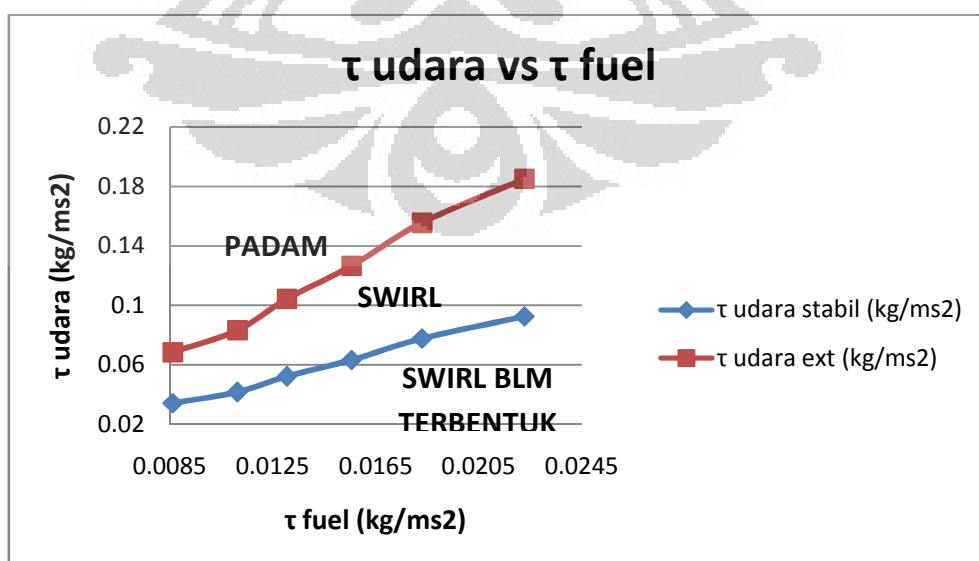
Dari grafik dapat diketahui bahwa kecepatan putar (ω) berbanding terbalik dengan debit nitrogen. Yakni semakin besar debit nitrogen akan menyebabkan penurunan nilai kecepatan putar (ω)

4.4. Korelasi Nyala Api Swirl Terhadap Limit Stabilitas Nyala

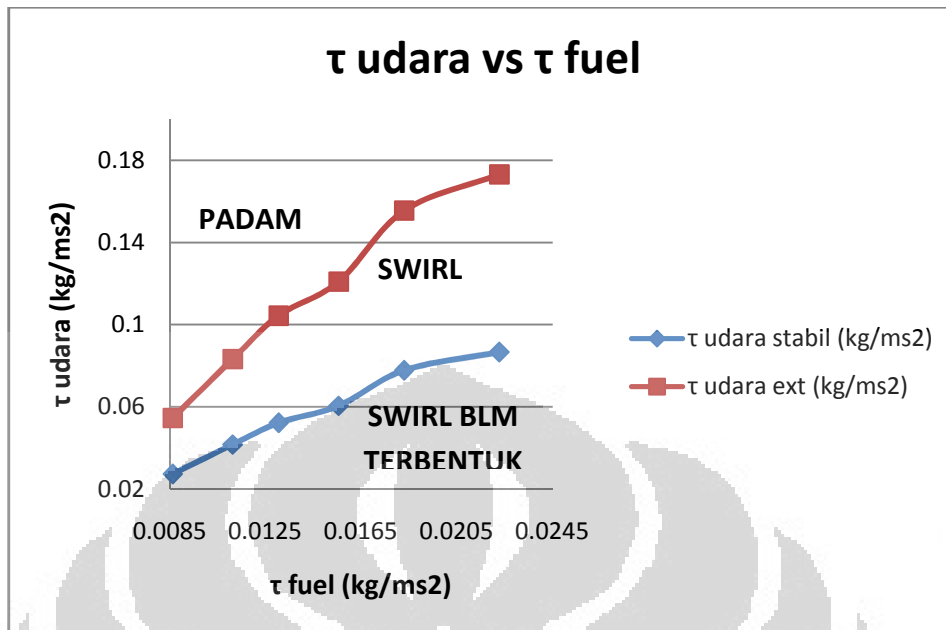
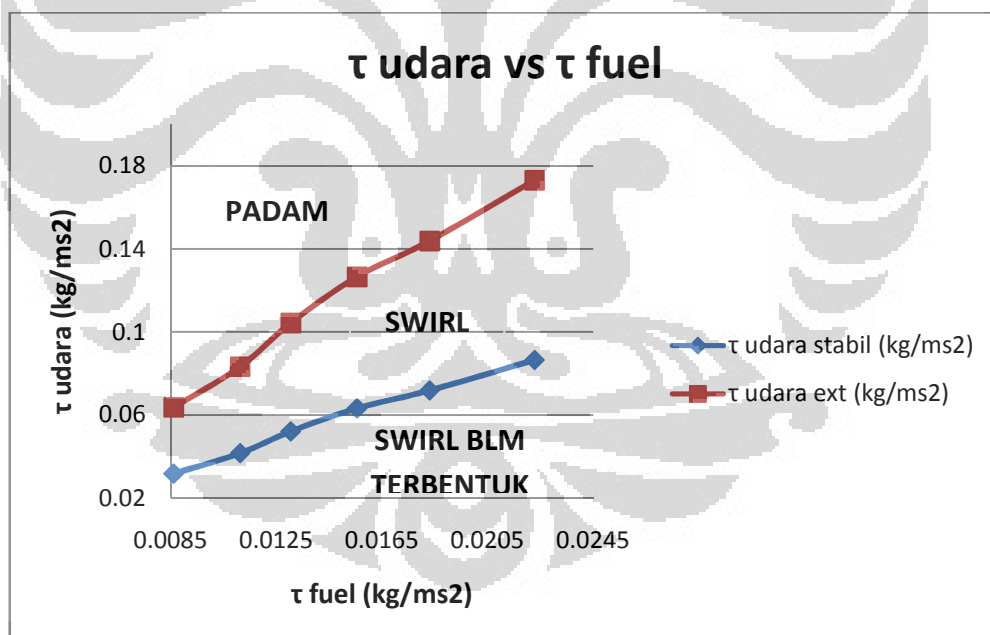
Pada nosel 18,5 mm ini, bentuk nyala api yang terjadi adalah bentuk api tipe swirl. Dimana bentuk nyala api tersebut bisa dilihat terjadi pada kondisi fluks momentum bahan bakar (τ_f) sebesar $0,008606392 \text{ kg/ms}^2$ dan fluks momentum udara (τ_o) yang variatif tergantung dengan rasio debit Q_{N_2}/Q_f . Berikut adalah fenomena kemunculan bentuk api tipe swirl terhadap nilai fluks momentum bahan bakar (τ_f) dan fluks momentum udara (τ_o).

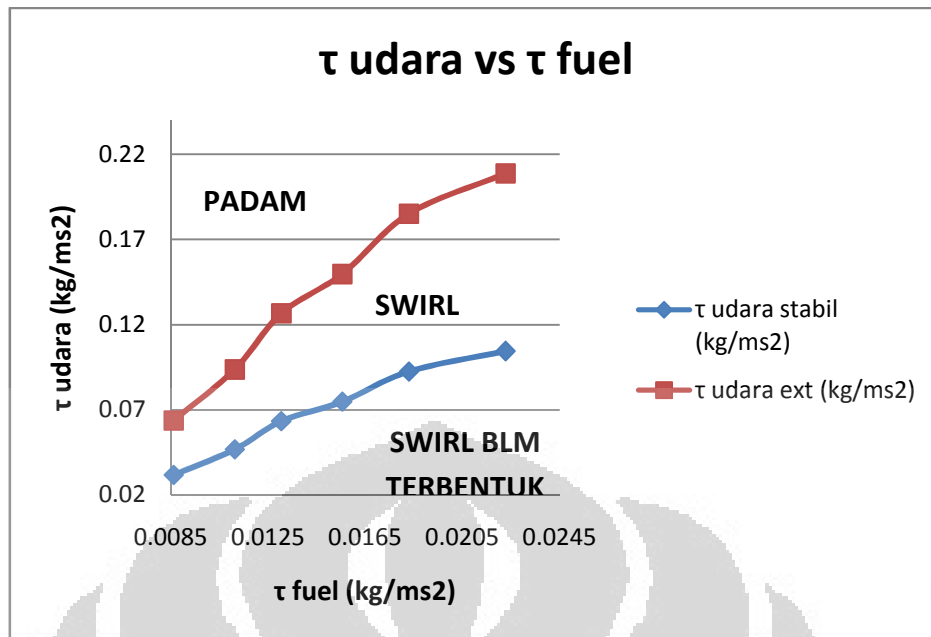


Gambar 4.12 Rasio debit $Q_{N_2}/Q_f = 80/20$



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 dapat dilihat bahwa kondisi nyala api difusi tipe swirl terjadi ketika nilai fluks momentum udara (τ_o) stabil mengalami kenaikan menuju (τ_o) pada kondisi *extinct*. Nyala api difusi tipe swirl ini terjadi diantara nilai fluks momentum udara (τ_o) stabil dan nilai fluks momentum udara (τ_o) *extinct*. 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 *extinct*. Dalam kondisi *real* ketika nyala api swirl terjadi maka warna api perlahan mulai menjadi biru. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi karbon menurun, dan efisiensi pembakaran menjadi tinggi.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan data hasil percobaan, hasil pengolahan data dan pembahasan visualisasi kecepatan tinggi nyala api difusi tipe swirl yang telah diuraikan sebelumnya terdapat beberapa kesimpulan yang menyangkut penelitian ini, antara lain:

1. Kecepatan putar swirl pada setiap rasio debit nitrogen dan bahan bakar Q_{N_2}/Q_f (80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60) berbeda. Dimana pada setiap kenaikan rasio nitrogen terhadap bahan bakar berbanding terbalik dengan nilai kecepatan putarnya.
2. Hasil visualisasi paling jelas didapat pada konsentrasi rasio nitrogen dan bahan bakar tertinggi Q_{N_2}/Q_f (80/20). Hal ini dikarenakan, pada kondisi tersebut nilai kecepatan putar swirl rendah yang disebabkan oleh sedikitnya kenaikan fluks momentum udara yang dibutuhkan.
3. Nyala api swirl didapatkan pada kondisi fluks momentum bahan bakar (τ_f) sebesar $0,008606392 \text{ kg/ms}^2$ dan fluks momentum udara (τ_o) yang variatif tergantung dengan rasio debit Q_{N_2}/Q_f .
4. Terbentuknya nyala api swirl dapat dijadikan indikator bahwa efisiensi proses pembakaran berjalan baik dan mendekati limit stabilitasnya dalam hal ini terjadi peningkatan nilai fluks momentum udara (τ_o) menuju kepada kondisi *extinct*.

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.

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] 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.
- [11] Rolon, J.C, et all. "Experiments on the Interaction between a Vortex a Strained Diffusion Flame." *Combustion and Flame*, page 422-429.
- [12] 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.
- [13] Katta, V.R., et all. "Extinction Criterion for Unsteady, Opposing Jet Diffusion Flames." *Combustion and Flame*, 137 (2004), page 198-221.
- [14] 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.
- [15] Turn, Stephen R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Application*. New York: McGraw Hill, 1996, page 246.

LAMPIRAN

