



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK STABILITAS NYALA DIFUSI PROPANA
PADA MEDAN ALIRAN BERLAWANAN**

SKRIPSI

**R. ACHMAD FAKHRI H
0606073436**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK STABILITAS NYALA DIFUSI PROPANA
PADA MEDAN ALIRAN BERLAWANAN**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**R. ACHMAD FAKHRI H
0606073436**

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : R. Achmad Fakhri H

NPM : 0606073436

Tanda tangan :

Tanggal : 12 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : R. Achmad Fakhri H
NPM : 0606073436
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Karakteristik Stabilitas Nyala Difusi Propana
Pada Medan Aliran Berlawanan

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

DEWAN PENGUJI

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

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 12 Juli 2010

UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamu 'alaikum Wr. Wb.

Tiada daya dan upaya melainkan dari hadirat-Mu yang Maha Tinggi lagi Maha Besar. Dan tiada ilmu bagiku melainkan apa yang Engkau ajarkan padaku. Segala puji bagi-Mu, Tuhan seru sekalian alam, atas berkat, rahmat dan bimbingan-Mu, saya dapat menyelesaikan skripsi ini.

Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, tentunya sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Untuk itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak, antara lain:

1. Bapak Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng. selaku pembimbing skripsi dan ketua Departemen Teknik Mesin yang telah banyak meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Boediarso, M.Eng. selaku Pembimbing Akademis penulis dan dosen-dosen Departemen Teknik Mesin yang telah mengajarkan kami berbagai pengetahuan di bidang ini.
3. Seluruh karyawan DTM FTUI, antara lain: Mas Syarif, Mas Yasin, Mas Udiyono, Mas Awang, Mba Yani, Mba Indah, dan lainnya yang telah banyak membantu penulis.
4. Danal Arfad selaku rekan satu bimbingan skripsi, yang telah bersama-sama penulis melakukan pengambilan data di laboratorium dan memberikan bantuan serta dukungannya selama penulis mengerjakan skripsi.
5. Haris Munandar (M'04), sebagai pendahulu kami dalam penelitian ini, yang telah dengan rela direpotkan dan di telepon berkali-kali guna memberitahu informasi mengenai alat.
6. Kedua orangtua tercinta beserta keluarga besar yang telah memberikan kasih sayang, doa, dan dukungan yang tidak terhingga baik moril dan materiil kepada penulis.

7. Elvina Diah Siregar (FKM '06) sebagai seseorang yang selalu memberikan dukungannya agar penulis tetap semangat menyelesaikan skripsi ini.
8. Anak-anak Mesin 2006, rekan-rekan Initial D (Priya, Farid, Dipo, Danang, Anggar, Danal, Edwin, Penyus) terutama Priya yang telah banyak membantu penulis dalam skripsi maupun keseluruhan proses studi.
9. Teman-teman seperjuangan penulis antara lain : Nindy (Far '06), Mekey (TL '06), Dedi (M'06), Dhana (M'06), Nico (M '06), (Oki M'06), (Santi M'06), (Indah M'06), (Angga PP M'06), (Adam M'06), (Prima M'06) yang telah mendukung dan senantiasa bertanya “gimana skripsi?”
10. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan di sini, terima kasih atas bantuan dan dukungannya.

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

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Depok, Juli 2010

R. Achmad Fakhri H
0606073436

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

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

Nama : R. Achmad Fakhri H
NPM : 0606073436
Program studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

**Karakteristik Stabilitas Nyala Difusi Propana Pada Medan Aliran
Berlawanan**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 12 Juli 2010

Yang menyatakan

(R. Achmad Fakhri H)

ABSTRAK

Nama : R. Achmad Fakhri H
Program Studi: Teknik Mesin
Judul : Karakteristik Stabilitas Nyala Difusi Propana Pada Medan Aliran Berlawanan

Pengaruh dari penambahan *co-flow* nitrogen (N_2) terhadap nyala difusi pada medan aliran berlawanan telah diteliti secara eksperimental. Pada penelitian pertama sebelumnya propana sebagai bahan bakar disuplai dari nosel bagian bawah dan udara sebagai oksidator disuplai dari nosel atas yang koaksial dengan diameter nosel yang sama. Pada penelitian kedua, nosel bahan bakar dilengkapi anulus yang digunakan untuk mengalirkan *co-flow* nitrogen. Pada penelitian kali ini anulus diletakan di kedua nosel baik bahan bakar maupun oksidator.

Parameter - parameter yang diatur dalam penelitian ini adalah parameter geometri (diameter dalam nosel, rasio gap-diameter nosel) dan dinamika fluida dimana debit N_2 nosel sisi bahan bakar menggunakan rasio Q_{N_2}/Q_f penelitian sebelumnya, sedangkan debit N_2 nosel sisi oksidator diatur sama dengan debit oksidator ($Q_{N_2}=Q_{udara}$).

Hasil eksperimen mendukung penelitian sebelumnya bahwa semakin besar rasio debit Q_{N_2}/Q_f atau rasio fluks momentum τ_{N_2}/τ_f yang digunakan, maka limit stabilitas nyalanya akan menurun. Lalu dapat juga disimpulkan bahwa penggunaan nosel *co-flow* di kedua sisi menyebabkan stabilitas nyala api lebih tinggi dibanding tanpa *co-flow* atau penggunaan *co-flow* hanya disisi oksidator. Hal ini diketahui dengan membandingkan Q_{fuel}/Q_{mix} dari kondisi *extinct*, dimana penggunaan *co-flow* di kedua sisi menyebabkan Q_{fuel}/Q_{mix} turun rata-rata 46,33% dari hasil tanpa *co-flow* dan 35,22% dari hasil penggunaan *co-flow* hanya disisi oksidator.

Kata kunci:
co-flow, stabilitas nyala, rasio *fuel*-nitrogen, rasio debit

ABSTRACT

Name : R. Achmad Fakhri H
Study Program: Mechanical Engineering
Title : Stabiliy Characteristics of Propane Diffusion Flame in a Counter Flow Field

Effects of nitrogen co-flow on stability limit of diffusion flames formed in a counter flow field have been investigated experimentally. In the first study propane as a fuel gas was supplied upward through a nozzle, and air as oxidator was supplied downward through a similar and co-axial nozzle. In second study, fuel nozzle has equiped with with anulus used for channel nitrogen co-flow.

Parameters that had been set up in this experiment were geometry parameters (inner diameter of nozzle, ratio of gap-nozzle diameter) and fluid dynamics parameters which are nitrogen/fuel flow rates at fuel's side *co-flow* use the same ratio based on previous study, and nitrogen/oxidator flow rates at oxidator's side *co-flow* is maintained same as oxidators flow rate.

Experiment result strengthen previous study that stability limit decreases with increasing rate of flow rate ratio Q_{N_2}/Q_f or increasing rate of momentum-flux ratio τ_{N_2}/τ_f . Comparing Q_{fuel}/Q_{mix} at extinct condition it can be explained, that both sides co-flow used has improve flame stability by 46,33% from without co-flow, and 35,22% from one side co-flow.

Key words :
co-flow, flame stability, nitrogen-fuel ratio, flow rates ratio

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL	xvi
BAB 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
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Dasar Teori.....	6
2.1.1 Prinsip – Prinsip Pembakaran	6
2.1.2 Nyala Api.....	7
2.1.2.1 Stabilitas Nyala api.....	8
2.1.2.2 Fenomena <i>Flashback</i>	10
2.1.2.3 Fenomena <i>Lift-off</i>	11
2.1.2.3 Fenomena <i>blow-off</i>	11
2.1.3 Propana	12
2.1.4 Oksigen	15
2.1.3 Nitrogen	17

2.2 Penelitian Nyala.....	18
2.2.1 Nyala Api Difusi.....	18
2.2.1.1 Struktur Nyala Difusi Laminar	21
2.2.1.2 Struktur Nyala Difusi Turbulen	23
2.2.1.3 <i>Counter Flow Diffusion Flame</i>	24
2.2.1.4 Aplikasi <i>Counter Flow Diffusion Flame</i>	27
BAB 3 PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN	30
3.1 Peralatan Penelitian	30
3.1.1 Konfigurasi Detail Alat Pembakar	33
3.1.2 Sistem Suplai Bahan Bakar, Udara dan Gas Nitrogen	36
3.2 Prosedur Penelitian	38
3.2.1 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Udara	38
3.2.2 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Bahan Bakar	40
3.2.3 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Nitrogen	41
3.2.4 Prosedur <i>Purging</i>	42
3.2.5 Prosedur Pengambilan Data	44
3.2.5.1 Pengukuran Limit Stabilitas Nyala	44
3.2.5.2 Metode Penelitian Limit Stabilitas	46
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	53
4.1 Hasil Penelitian	53
4.1.1 Limit Stabilitas Nyala untuk Diameter Nosel, $d = \text{Ø}5.5 \text{ mm}$	55
4.1.2 Limit Stabilitas Nyala untuk Diameter Nosel, $d = \text{Ø}8.5 \text{ mm}$	57
4.1.3 Limit Stabilitas Nyala untuk Diameter Nosel, $d = \text{Ø}18.5 \text{ mm}$	59
4.2 Pembahasan Pengaruh Penambahan <i>Co-flow</i>	61
4.2.1 Nosel 5.5 mm	61
4.2.2 Nosel 8.5 mm	64
4.2.3 Nosel 18.5 mm	68
BAB 5 KESIMPULAN	71
DAFTAR REFERENSI	72
LAMPIRAN	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Skema nyala difusi pada aliran berlawanan	2
Gambar 1. 2. Skema nosel aliran berlawanan dengan <i>co-flow</i>	3
Gambar 2. 1. Profil nyala api [2]	8
Gambar 2. 2. Bunsen burner dengan garis aliran laminar [3]	9
Gambar 2. 3. Diagram stabilitas <i>flashback</i> , <i>lift-off</i> , dan <i>yellow tipping</i> untuk bahan bakar gas industri [4]	10
Gambar 2. 4. Struktur molekul propana.....	12
Gambar 2. 5. <i>Over-ventilated</i> dan <i>under-ventilated</i> pada nyala api difusi [2]	20
Gambar 2. 6. Perubahan bentuk api terhadap kecepatan aliran bahan bakar [5]	21
Gambar 2. 7. Diagram komposisi nyala api difusi berbahan bakar hidrogen [9]	22
Gambar 2. 8. Diagram profil konsentrasi pada nyala api difusi tipe laminar [7]	23
Gambar 2. 9. Nyala difusi turbulen	24
Gambar 2. 10. Skema nyala difusi pada aliran berlawanan [9]	25
Gambar 2. 11. Modus nyala api stagnasi	28
Gambar 2. 12. Ilustrasi <i>water tube boiler</i>	28
Gambar 3. 1. Skematik nosel yang digunakan	31
Gambar 3. 2. Peralatan eksperimen nyala api difusi pada aliran berlawanan	32
Gambar 3. 3. Konfigurasi alat pembakar	33

Gambar 3. 4. Nosel	34
Gambar 3. 5. <i>Vortex generator</i> untuk (a) $d = \varnothing 18.5$ mm, (b) $d = \varnothing 8.5$ mm, (c) $d = \varnothing 5.5$ mm	34
Gambar 3. 6. Ulir penggerak	35
Gambar 3. 7. Skematik peralatan eksperimen nyala api difusi pada aliran berlawanan dengan penambahan <i>co-flow</i>	37
Gambar 3. 8. Skema kalibrasi sistem suplai udara	38
Gambar 3. 9. Level air pada <i>Wet Gas Meter</i> Shinagawa WE-2.5A.....	39
Gambar 3. 10. Skema kalibrasi sistem suplai bahan bakar.....	40
Gambar 3. 11. Skema kalibrasi sistem suplai nitrogen	41
Gambar 3. 12. Skema proses <i>purging</i>	43
Gambar 3. 13. Persamaan kalibrasi kecepatan udara (V_{udara}) untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm	47
Gambar 3.14. Persamaan kalibrasi kecepatan propana ($V_{propana}$) untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm	47
Gambar 3. 15. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N2}) arah propana untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm	48
Gambar 3. 16. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N2}) arah udara untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm	48
Gambar 3. 17. Persamaan kalibrasi kecepatan udara (V_{udara}) untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm	49
Gambar 3. 18. Persamaan kalibrasi kecepatan propana ($V_{propana}$) untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm	49
Gambar 3. 19. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N2}) arah propana untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm	50
Gambar 3. 20. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N2}) arah udara untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm	50
Gambar 3. 21. Persamaan kalibrasi kecepatan udara (V_{udara}) untuk diameter nosel = $\varnothing 5.5$ mm	51
Gambar 3. 22. Persamaan kalibrasi kecepatan propana ($V_{propana}$) untuk	

diameter nosel = $\emptyset 5.5$ mm	51
Gambar 3. 23. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N2}) arah propana untuk diameter nosel = $\emptyset 5.5$ mm	52
Gambar 3. 24. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N2}) arah udara untuk diameter nosel = $\emptyset 5.5$ mm	52
Gambar 4. 1. Ilustrasi grafik stabilitas nyala <i>both side co-flow</i> dan <i>fuel side co-flow</i> rasio 40/60.....	55
Gambar 4. 2. Grafik stabilitas nyala <i>both side co-flow</i> dan <i>fuel side co-flow</i> pada nosel 5,5mm rasio 40/60.....	56
Gambar 4. 3. Grafik stabilitas nyala <i>both side co-flow</i> dan <i>fuel side co-flow</i> pada nosel 5,5mm rasio 60/40.....	56
Gambar 4. 4. Grafik stabilitas nyala <i>both side co-flow</i> dan <i>fuel side co-flow</i> pada nosel 5,5mm rasio 80/20.....	57
Gambar 4. 5. Grafik stabilitas nyala <i>both side co-flow</i> dan <i>fuel side co-flow</i> pada nosel 8,5mm rasio 40/60.....	57
Gambar 4. 6. Grafik stabilitas nyala <i>both side co-flow</i> dan <i>fuel side co-flow</i> pada nosel 8,5mm rasio 60/40.....	58
Gambar 4. 7. Grafik stabilitas nyala <i>both side co-flow</i> dan <i>fuel side co-flow</i> pada nosel 8,5mm rasio 80/20.....	58
Gambar 4. 8. Grafik stabilitas nyala <i>both side co-flow</i> dan <i>fuel side co-flow</i> pada nosel 18,5mm rasio 40/60.....	59
Gambar 4. 9. Grafik stabilitas nyala <i>both side co-flow</i> dan <i>fuel side co-flow</i> pada nosel 18,5mm rasio 60/40.....	59
Gambar 4. 10. Grafik stabilitas nyala <i>both side co-flow</i> dan <i>fuel side co-flow</i> pada nosel 18,5mm rasio 80/20.....	60
Gambar 4. 11. Rangkuman $d_{udara}/d_{propana}$ grafik limit stabilitas nyala ...	60
Gambar 4. 12. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N2}/Q_f pada nosel 5.5 mm, untuk $L/d = 2.7$	61
Gambar 4. 13. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N2}/Q_f pada nosel 5.5 mm, untuk $L/d = 2.43$	62
Gambar 4. 14. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N2}/Q_f pada nosel 5.5 mm, untuk $L/d = 2.16$	62

Gambar 4. 15. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio QN_2/Q_f pada nosel 8.5 mm, untuk $L/d = 2.7$	64
Gambar 4. 16. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio QN_2/Q_f pada nosel 8.5 mm, untuk $L/d = 2.43$	65
Gambar 4. 17. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio QN_2/Q_f pada nosel 8.5 mm, untuk $L/d = 2.16$	65
Gambar 4. 18. Kondisi perubahan api dari awal hingga <i>extinct</i> nosel <i>both side</i> <i>co - flow</i>	66
Gambar 4. 19. Kondisi perubahan api dari awal hingga <i>extinct</i> nosel <i>fuel side</i> <i>co - flow</i>	66
Gambar 4. 20. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio QN_2/Q_f pada nosel 18.5 mm, untuk $L/d = 2.7$	68
Gambar 4. 21. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio QN_2/Q_f pada nosel 18.5 mm, untuk $L/d = 2.43$	68
Gambar 4. 22. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio QN_2/Q_f pada nosel 18.5 mm, untuk $L/d = 2.16$	69

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Properti Kimia Propana	14
Tabel 2. 2. Properti Fisik Oksigen	16
Tabel 2. 3. Properti Fisik Nitrogen	18
Tabel 4. 1. Hubungan antara Rasio Debit Q_{N2}/Q_f dan Rasio Fluks Momentum τ_{N2}/τ_f	63
Tabel 4. 2. Perbandingan Fluks Momentum Udara Limit Stabilitas Nyala dari <i>Non Co-Flow</i> ke Rasio 40/60 untuk Nosel 5.5 mm	63
Tabel 4. 3. Perbandingan Q_{fuel}/Q_{mix} stabilitas nyala dari <i>Non Co-Flow</i> ke rasio 40/60 untuk nosel 5,5	64
Tabel 4. 4. Perbandingan Fluks Momentum Udara Limit Stabilitas Nyala dari <i>Non Co-Flow</i> ke Rasio 40/60 untuk Nosel 8.5 mm	67
Tabel 4. 5. Perbandingan Q_{fuel}/Q_{mix} stabilitas nyala dari <i>Non Co-flow</i> ke Rasio 40/60 untuk Nosel 8.5 mm	67
Tabel 4. 6. Perbandingan Fluks Momentum Udara Limit Stabilitas Nyala dari <i>Non Co-Flow</i> ke Rasio 40/60 untuk Nosel 18.5 mm	69
Tabel 4. 7. Perbandingan Q_{fuel}/Q_{mix} stabilitas nyala dari <i>Non Co-flow</i> ke Rasio 40/60 untuk Nosel 18.5 mm	69

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Dimensi
τ_{udara}	fluks momentum udara	kg/ms^2
$\tau_{propana}$	fluks momentum propana (bahan bakar)	kg/ms^2
L	jarak (<i>gap</i>) antar nosel	mm
d	diameter dalam nosel	mm
Q_{N_2}/Q_f	rasio debit N_2 per debit propana	----
Q_{fuel}/Q_{mix}	rasio debit propana per debit campuran	----
τ_{N_2}/τ_f	rasio fluks momentum N_2 per propana	----
L/d	rasio gap nosel	----
Re	bilangan Reynolds	----

BAB 1 PENDAHULUAN

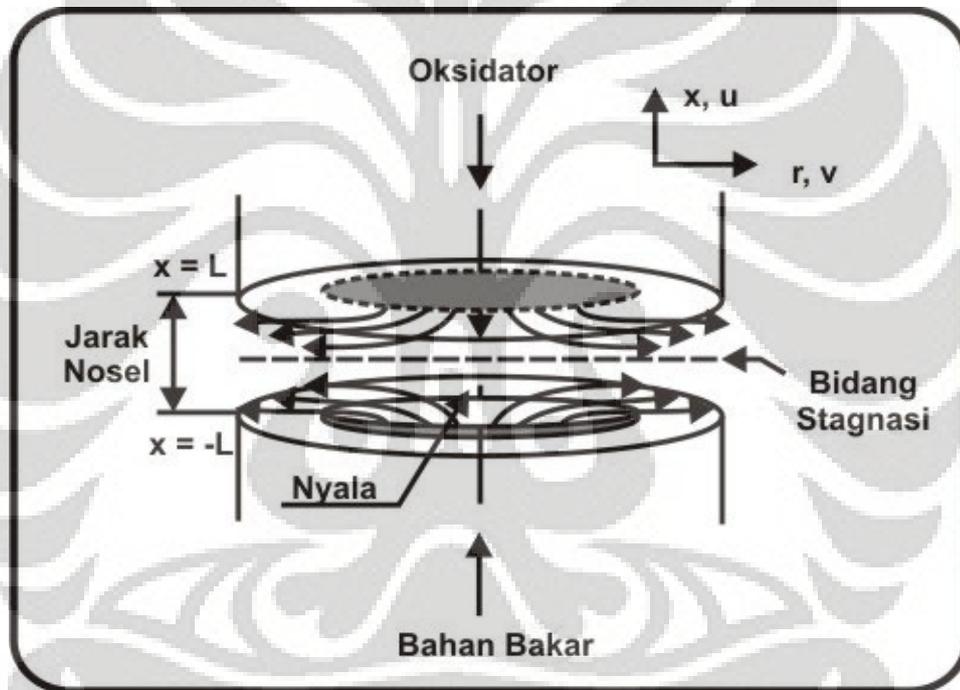
1.1 Latar Belakang

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

Pemanfaatan energi yang paling banyak digunakan adalah pemanfaatan energi mekanik dari energi kimia. Konversi dari energi kimia menjadi energi mekanik saat ini sangat luas digunakan. Salah satunya adalah melalui proses pembakaran. Proses pembakaran ini baik berupa pembakaran dalam (*internal combustion*) maupun pembakaran luar (*external combustion*) menjadi metode pembangkitan energi yang digunakan di berbagai bidang, seperti industri, rumah tangga, dan transportasi. Karena penggunaannya yang sangat luas, sangat penting untuk memastikan pembakaran dilakukan dengan cara yang paling efisien. Hal ini berkaitan dengan meminimalisasi energi yang terbuang, menghindari emisi karbon yang berlebihan yang menyebabkan efek rumah kaca, meminimalisasi dampak yang mungkin muncul terhadap lingkungan yang disebabkan oleh polusi yang diakibatkan pembakaran itu sendiri.

Maka untuk menunjang hal tersebut, telah dilakukan berbagai eksperimen untuk mencapai efisiensi pembakaran yang relatif tinggi dengan melakukan perancangan sistem pembakaran yang dapat menjamin bahwa bahan bakar dapat terbakar sempurna. Salah satu rancangan sistem pembakaran yang diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pembakaran yang tinggi adalah dengan

menggunakan nyala difusi pada aliran berlawanan (*counter flow diffusion flame*), dimana aliran bahan bakar dan udara sebagai oksidator dalam arah yang berlawanan. Dalam proses pembakaran ini, nyala terbentuk dari bahan bakar dan udara yang sebelumnya terpisah, lalu terbakar bersamaan dengan bercampurnya kedua zat tersebut dengan tingkat energi yang dilepaskan terbatas pada pusat pencampuran. Untuk lebih jelas mengenai skema aliran reaktan pada nyala difusi dalam medan aliran berlawanan, lihat gambar 1.1.

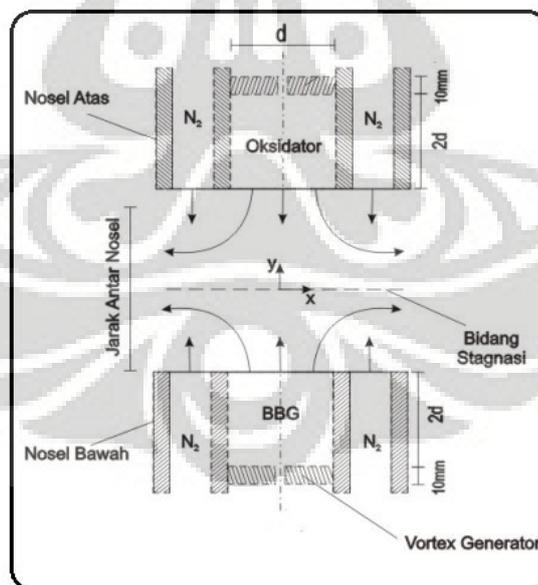


Gambar 1. 1. Skema nyala difusi pada aliran berlawanan

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

Pada penelitian sebelumnya, yang dilakukan oleh Harinaldi & Harris Munandar (2009), dengan menggunakan *Co-Flow* nitrogen yang terletak di sisi bahan bakar, disimpulkan bahwa bahwa dengan adanya aliran nitrogen yang menyelubungi daerah reaksi mencegah terjadinya difusi dengan udara sekitar sehingga suplai udara yang menunjang terjadinya pembakaran hanya berasal dari nosel udara. Dan penggunaan rasio rasio terbesar dalam eksperimen ($Q_{N_2}/Q_f = 80/20$; $\tau_{N_2}/\tau_f = 16/1$) menyebabkan limit stabilitas nyala menurun rata-rata sekitar 27% dari kondisi non *Co-Flow*.

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



Gambar 1. 2. Skema nosel aliran berlawanan dengan *both side co-flow*

1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini, rumusan masalah yang akan dibahas, yaitu mengenai pengaruh penambahan *Co-Flow* berupa gas *inert* (nitrogen) terhadap stabilitas

nyala api, serta parameter dinamika fluida seperti fluks momentum aliran udara (τ_{udara}), fluks momentum aliran bahan bakar ($\tau_{propana}$), dan perbandingan rasio bahan bakar dibanding rasio campuran (Q_{fuel}/Q_{mix}) terhadap karakteristik nyala difusi pada medan aliran berlawanan dengan menggunakan propana (C_3H_8) sebagai bahan bakar, udara dari kompresor sebagai oksidator dan gas nitrogen sebagai gas penyelubung (*Co-Flow*) yang dialirkan pada dua nosel yang diletakkan secara berlawanan.

1.3 Tujuan Penelitian

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

1.4 Pembatasan Masalah

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

8. *Co-Flow* (aliran selubung) terdapat pada sisi bahan bakar maupun sisi oksidator.
9. *Vortex generator* terletak 2d dari ujung nosel.

1.5 Metode Penelitian

Pada penelitian ini, metode yang penulis lakukan yaitu dengan melakukan percobaan dan pengambilan data dengan menggunakan *counter flow diffusion flame apparatus with both side co-flow*. Parameter yang didapat diolah dan hasilnya dibandingkan dengan literatur dari referensi yang berkaitan, terutama dari penelitian yang dilakukan oleh Harinaldi & Furjianto (2008) dan Harinaldi & Harris Munandar (2009).

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian, disusun berdasarkan format berikut:

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II DASAR TEORI

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

BAB III PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN

Berisi tentang rincian peralatan yang digunakan selama berlangsungnya penelitian. Di samping itu, dikemukakan juga mengenai prosedur pengambilan data serta metode penelitian yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

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

BAB V KESIMPULAN

Merupakan kesimpulan dari seluruh rangkaian proses penelitian yang dilakukan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

2.1.1 Prinsip-Prinsip Pembakaran

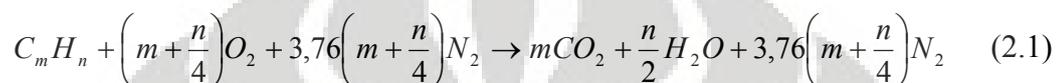
Pembakaran bermula pada senyawa yang memiliki energi potensial panas yang tinggi yang disebut bahan bakar. Bahan bakar (*fuel*) merupakan segala substansi yang melepaskan panas ketika dioksidasi dan secara umum mengandung unsur-unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S).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

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

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

Dari beberapa pengertian di atas, dapat diambil kesimpulan secara umum, bahwa pembakaran merupakan proses reaksi kimia antara bahan bakar (*fuel*) dan oksidator dengan melibatkan pelepasan energi yang tersimpan menjadi energi termal atau panas.

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

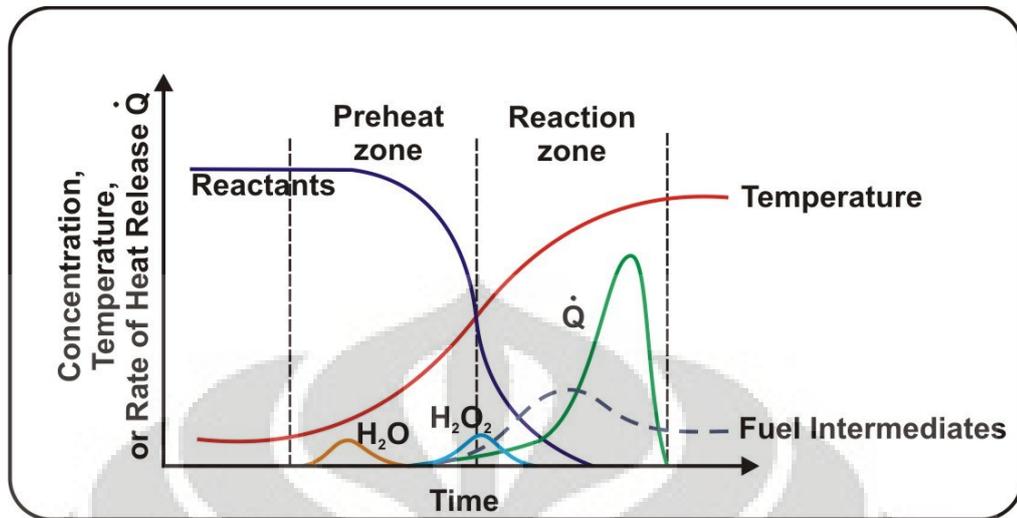


Persamaan ini merupakan hasil penyederhanaan, mengingat cukup sulit untuk memastikan proses pembakaran yang sempurna dengan rasio ekivalen yang tepat dari udara. Jika terjadi pembakaran tidak sempurna, maka hasil persamaan di atas yang hanya menghasilkan CO_2 dan H_2O tidak akan terjadi, akan tetapi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

2.1.2 Nyala Api

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

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



Gambar 2.1 Profil nyala api [2]

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

1. Zona pra pemanasan (*preheat zone*)

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

2. Zona pemanasan (*reaction zone*)

Daerah di mana sebagian besar energi kimia dilepaskan.

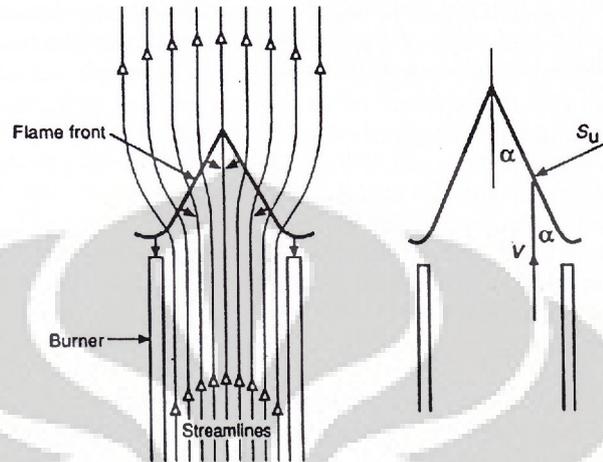
2.1.2.1 Stabilitas Nyala Api (*Flame Stability*)

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

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

1. Memungkinkan pencampuran bahan bakar dan oksidator dalam komposisi yang benar.
2. Menyediakan bagian yang tepat untuk mendapatkan api laminar.

3. Berlaku seperti *heat sink* dimana hal tersebut akan membatasi gerakan api.



Gambar 2. 2. Bunsen burner dengan garis aliran laminar[3]

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 *buoyancy* tetapi hanya meliputi penurunan kerapatan yang dihasilkan oleh pembakaran aliran tak mampu mampat (*incompressible*).
5. Ketidakstabilan diffusivitas termal, meliputi hubungan reaksi difusi dan kalor dengan nyala primer.

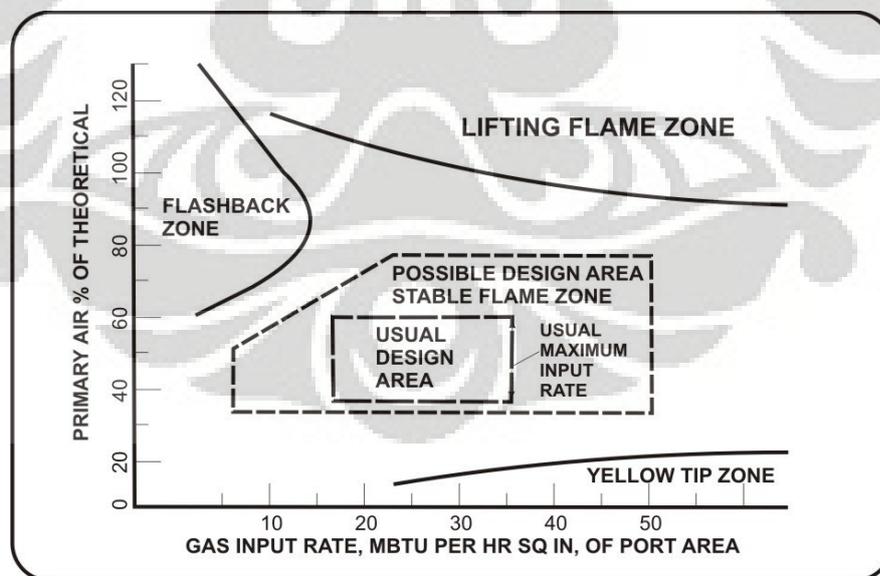
Suatu hal yang sangat penting dalam perencanaan pembakaran gas adalah mencegah terjadinya *flashback* dan *lift-off*. Batas kestabilan nyala berhubungan erat dengan fenomena *flashback*, *lift-off*, *blow-off*, dan warna nyala pada tabung pembakar (*burner*).

2.1.2.2 Fenomena *Flashback*

Flashback terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih cepat daripada kecepatan campuran udara-bahan bakar sehingga nyala api masuk balik dan merambat kembali ke dalam tabung pembakar, dapat disebut juga sebagai *back fire* atau *light back*.

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

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



Gambar 2. 3 Diagram stabilitas *flashback*, *lift-off*, dan *yellow tipping* untuk bahan bakar gas industri [4]

2.1.2.3 Fenomena *Lift-Off*

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

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

Munis dan Mungal [5] mempelajari fenomena *lift-off* menggunakan metana dan ethylene sebagai bahan bakar dan udara dengan *co-flow*. Penelitian mereka menghasilkan ketinggian *lift-off* dari api meningkat ketika kecepatan jet *outlet* dan *co-flow* meningkat, dan api akan stabil ketika kecepatan *fuel* mendekati kecepatan api laminar *premixed*, dan tidak sampai melebihinya. Penelitian mereka menggunakan *particle image velocimetry* menunjukkan api turbulen akan terangkat (*lift-off*) ketika reynolds numbernya 7000 sampai 19.500.

2.1.2.4 Fenomena *Blow-Off*

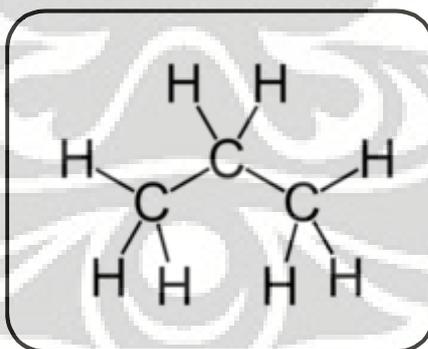
Blow-off merupakan suatu keadaan di mana nyala api padam akibat dari batas kecepatan aliran lebih besar dari laju nyala atau kecepatan pembakaran. Kondisi seperti ini harus dihindari karena selain boros bahan bakar, terjadinya *blow-off* secara terus menerus dapat merusak nosel pembakar dan dapat mengganggu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

Penelitian terhadap fenomena *Blow-off* salah satunya dilakukan Hiroki Ishida [6] yang meneliti tentang pengaruh fisik dan kimiawi gas inert pada fenomena *blow-off*, *lift-off* pada api jet laminar. Pada penelelitian ini gas inert yang digunakan adalah Helium, Argon, Karbon Dioksida dan Nitrogen.

Pada penelitian ini gas inert dialirkan bersama metana dan oksigen dengan rasio 2,1 - 2,4 dan kecepatan *flow* keluar nosel 120 cm/s. Hasil dari penelitiannya menunjukkan bahwa semakin tinggi densitas gas *inert* yang digunakan, maka fenomena *lift-off* yang terjadi akan sangat tidak stabil dan dengan cepat berubah menjadi fenomena *blow-off*, sedangkan untuk penggunaan gas *inert* dengan densitas yang rendah (Helium) fenomena *lift-off* bisa sangat stabil.

2.1.3 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 2.4 Struktur molekul propana

Dalam penggunaan sehari-hari sebagai bahan bakar, propana dikenal juga sebagai LPG (*liquified petroleum gas*) yang dapat berupa campuran dengan sejumlah kecil propena, butana, dan butena. Kadang ditambahkan juga etanetiol sebagai bahan pemberi bau agar dapat digunakan sebagai deteksi jika terjadi kebocoran. Pada umumnya dalam proses pembakaran, pemilihan bahan bakar

yang akan digunakan didasarkan pada properti fisik dan kimia yang terkandung dalam bahan bakar itu sendiri, seperti:

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

Nilai kalor adalah kalor yang dihasilkan oleh pembakaran sempurna 1 kg atau satu satuan berat bahan bakar padat atau cair atau 1 m³ 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 600°F, yang pada suhu tersebut berat air = 62.4 lb/ft³.

4. Viskositas atau kekentalan

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

5. *Flash point*

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

6. Titik bakar atau "*ignition point*"

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

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

Tabel 2.1 Properti Kimia Propana

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

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



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



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

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

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

2.1.4 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 volum, atau 23.15% oksigen dan 76.85%

gas inert untuk basis massa. Selain itu, oksigen juga didapat dari proses pencairan (*liquification*) dan distilasi fraksi dari udara.

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

Tabel 2.2 Properti Fisik Oksigen

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

2.1.5 Nitrogen (N₂)

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

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

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

Nitrogen ditemukan oleh kimiawan dan fisikawan Daniel Rutherford di tahun 1772. Dia memisahkan oksigen dan karbon dioksida dari udara dan menunjukkan gas yang tersisa tidak menunjang pembakaran atau makhluk hidup. Gas nitrogen (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 lebih dari 3 atm, nitrogen akan bersifat sebagai zat anestetik, sehingga akan dapat menyebabkan nitrogen narcosis, yaitu kondisi tak dapat merasakan bagian tubuh sebagian. Nitrogen juga dapat melarut di aliran darah, sehingga mengakibatkan dekompresi ketika gelembung nitrogen terbentuk di aliran darah, hal ini seperti fenomena

yang dialami penyelam ketika terlalu cepat muncul ke permukaan atau astronot yang terlalu cepat masuk ke ruang dalam pesawat ulang alik setelah berada di kabin pressure.

Tabel 2.3 **Properti Fisik Nitrogen**

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

2.2 Penelitian Nyala

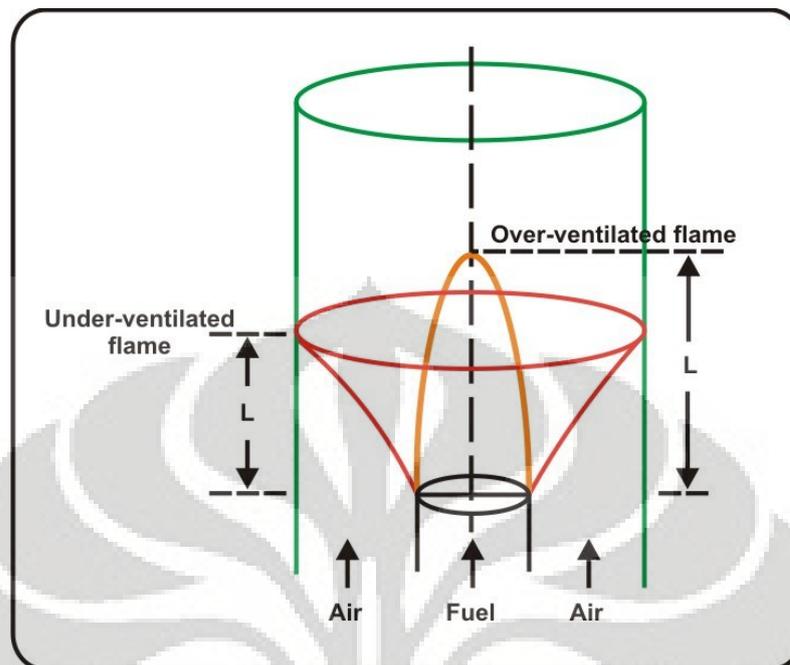
2.2.1 Nyala Api Difusi

Pada pembakaran *diffusion flame*, bahan bakar dan oksidator (udara) pada awalnya terpisah. Pembakaran akan berlangsung pada daerah dimana bahan bakar dan udara kemudian bercampur. Aliran bahan bakar yang keluar dari ujung nosel akan bercampur dengan udara secara difusi. Jika diberi pengapian campuran ini akan terbakar bila konsentrasi bahan bakar dan udara terdapat dalam jangkauan batas nyalanya. Pemunculan dari nyala akan bergantung pada sifat dari bahan bakar dan kecepatan pancaran bahan bakar terhadap udara di sekitarnya. Laju pencampuran bahan bakar dengan udara lebih rendah dari laju reaksi kimia. Nyala

difusi pada suatu pembakaran cenderung mengalami pergerakan nyala lebih lama dan menghasilkan asap lebih banyak daripada nyala *premixed*. Nyala difusi dapat berupa nyala laminar (*laminar flame*) atau nyala turbulen (*turbulent flame*).

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

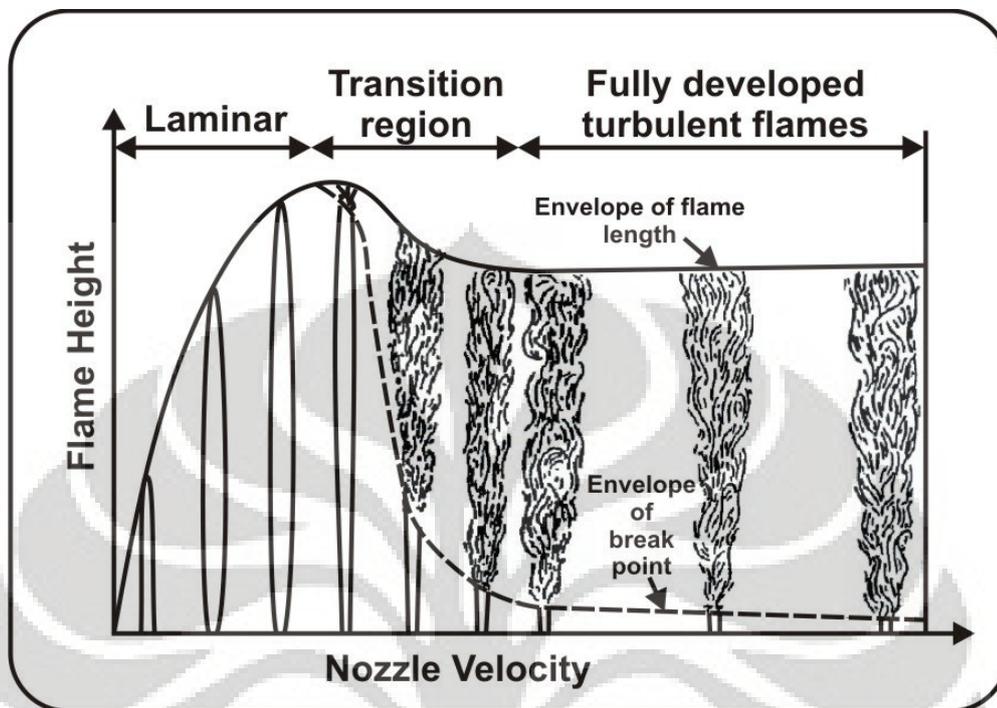
Burke dan Schumman (1928) mempelajari nyala api difusi di dalam sebuah tabung dimana aliran bahan bakar dikelilingi oleh aliran udara dengan kedua aliran tersebut memiliki kecepatan yang sama. Bentuk api yang terbentuk tergantung dari apakah aliran udara tersebut memiliki lebih banyak oksigen (*over-ventilated*)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



Gambar 2.5 *Over-ventilated* dan *under-ventilated* pada nyala api difusi [2]

Di dalam nyala api *over-ventilated*, batas api menuju ke sumbu *axis* silinder, sedangkan pada nyala api *under-ventilated* batas api bergerak menuju ke dinding luar silinder. Beberapa bentuk nyala api dapat terjadi di antara dua batas tersebut, yaitu dengan mengubah rasio bahan bakar dan udara, biasanya dengan menambah atau mengurangi jumlah aliran bahan bakar atau udara pada flowmeter. Untuk nyala api difusi, batas nyala api didefinisikan sebagai permukaan (*surface*) ketika reaksi pembakaran telah sempurna, yaitu terjadi pada keadaan rasio stoikiometri [8].

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

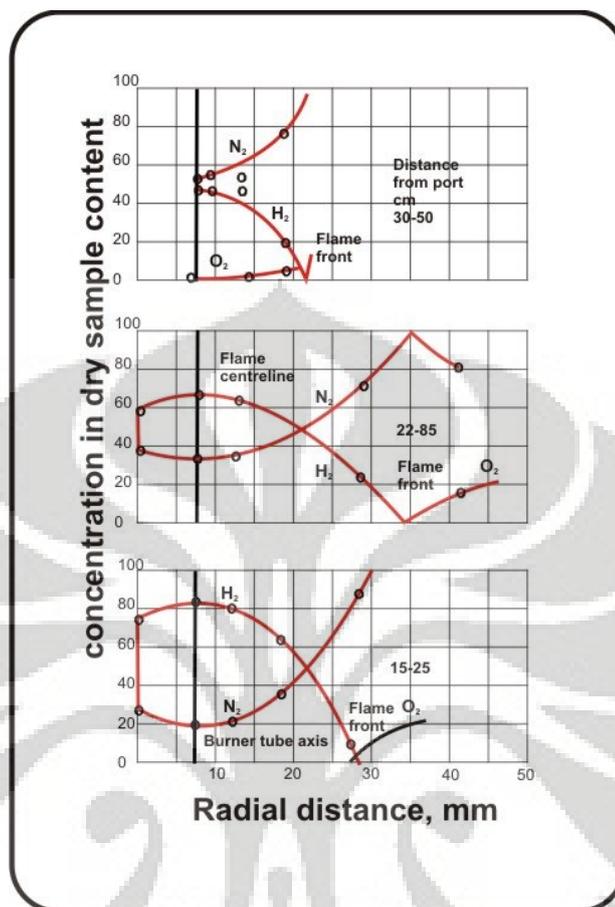


Gambar 2.6 Perubahan bentuk api terhadap kecepatan aliran bahan bakar [5]

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

2.2.1.1 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.

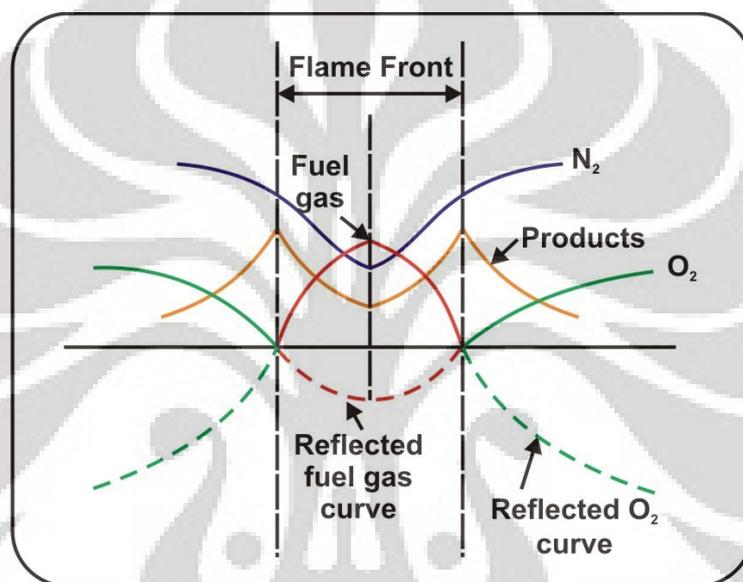


Gambar 2.7 Diagram komposisi nyala api difusi berbahan bakar hidrogen [7]

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

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

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



Gambar 2.8 Diagram profil konsentrasi pada nyala api difusi tipe laminar [7]

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

2.2.1.2 Struktur Nyala Difusi Turbulen

Jika laju pancaran bahan bakar pada nyala laminar dipercepat, maka mulai muncul aliran turbulen. Munculnya turbulen pada ujung nyala (*flame tip*), akan menyebabkan tinggi nyala berkurang dengan meningkatnya laju aliran dan mencapai nilai konstan pada nyala yang turbulen sepenuhnya. Bentuk transisi dari laminar menjadi turbulen terjadi pada saat bilangan Reynolds aliran (Re) lebih dari 4000. Hubungan antara tinggi momentum nyala nosel sebagai fungsi kecepatan nosel ditunjukkan sebagai perubahan nyala turbulen. Bentuk nyala turbulen dapat ditunjukkan pada gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2.9 Nyala difusi turbulen

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

2.2.1.3 Counter Flow Diffusion Flame

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

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



Gambar 2. 10 Skema nyala difusi pada aliran berlawanan [9]

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

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

Penelitian ini diawali oleh Tsuji dan Yamaoka [10], dimana mereka meneliti tentang pengaruh parameter aerodinamik dan parameter kimia seperti kecepatan aliran udara, kecepatan injeksi bahan bakar, diameter nosel, komposisi bahan bakar terhadap lokasi nyala, *blow-off* limit, dan distribusi temperatur nyala.

Penelitian mereka menghasilkan bahwa ada beberapa kondisi campuran komposisi bahan bakar yang tidak akan mampu mencapai *stagnation flame*, tidak peduli seberapa besar injeksi bahan bakarnya. Penelitian ini berhasil mendapatkan api stagnasi dimana jarak api stagnasi dengan nosel diukur dengan parameter *non dimensional* dan sangat berhubungan dengan parameter *non dimensional* keluaran setiap kombinasi bahan bakar yang diberikan.

J.C Rolon [11] 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 [12] yang melakukan penelitian mengenai pengaruh perubahan kecepatan aliran terhadap batas nyala api padam (*extinct*) pada nyala difusi *counter flow*, selanjutnya V.R Katta [13] juga mempelajari kriteria *extinction* pada nyala difusi dalam medan aliran berlawanan. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa nyala api dinamik atau tidak tunak akan berada pada *strain rates* yang lebih tinggi dari pada nyala api tunak (*steady flames*).

Jongmook Lim dan Raymond Viskanta [14] juga mempelajari mengenai pengaruh pemanasan awal udara (*air preheat*) terhadap struktur nyala difusi pada medan aliran berlawanan dengan menggunakan bahan bakar metana. Dalam hal ini, udara diatur pada cakupan 300 sampai dengan 560 K. Hasil dari penelitian mereka menunjukkan bahwa dengan kenaikan pemanasan awal udara akan menyebabkan kenaikan puncak konsentrasi dari CO dan H₂ yang dihasilkan.

Dawn A Santoianni dan Michelle Dercoix [15] meneliti tentang sebaran temperatur pada *counterflow* propana-udara dengan *co-flow*. Penelitian ini menggunakan paparan sinar laser untuk mengambil data temperatur reaksi dengan frekuensi paparan sinar laser 25Hz. Hasil penelitian ini adalah bahwa besar kecilnya zona reaksi dari propana-udara tidak berpengaruh signifikan terhadap temperaturnya.

W.F. Carnell Jr., M.W. Renfro [16] mencoba membentuk garis nyala api stabil pada *counterflow* metana dan berhasil mendapatkannya, dengan menggunakan nosel *co-annular* dengan nitrogen sebagai gas *co-flow*, pada penelitiannya diterangkan bahwa penggunaan gas *co-flow* dengan rasio yang cukup tinggi akan menyebabkan gas tersebut melindungi bagian inti dari reaksi serta menghilangkan sisa-sisa api di sekitarnya.

I.E.S Kim dan Mastorakos [17] mencoba menyimulasikan *counterflow flames* dari metana-udara dengan analisis komputasi orde pertama. Pada percobaan simulasi ini digunakan CFD dengan menggunakan software

FLUENT untuk memperhitungkan difusi turbulen, energi kinetik turbulen, dan variabel dinamika fluida lain yang akan digunakan untuk memperkirakan struktur dari api dan batas *extinction*nya. Hasil yang di dapat dari simulasi tersebut berupa data kecepatan *extinction* yang ternyata berbeda dengan hasil eksperimental.

June Sung Park, Dong Jin Hwang, dkk [18] meneliti tentang *flame extinction behavior* dan bentuk osilasi nyala, untuk nyala api yang lebih kecil dibanding diameter burnernya. Eksperimen ini menggunakan *counterflow combustion device* dengan metana sebagai bahan bakar, dan nitrogen sebagai gas campuran dari bahan bakar. Hasil yang di dapat dari penelitian ini adalah bahwa lebar dari nyala api sangat berhubungan dengan *lateral heat loss* yang terjadi, dan lateral heat loss ini diperhitungkan sangat mempengaruhi *extinction* dari api dan juga mempengaruhi osilasi dari api. Pada penelitian ini juga di dapatkan tiga jenis osilasi api yaitu, berkembang, *decaying*, harmonis.

C.H. Sohn, S.H. Chung, dkk [19] meneliti tentang fenomena heat transfer dalam diffusion flame dan pengaruhnya terhadap stabilitas nyala. Penelitian menyimpulkan bahwa peningkatan kecepatan konveksi dari nyala, berperan dalam stabilitas nyala.

Penelitian tentang counterflow diffusion flame di universitas Indonesia dilakukan oleh Furjianto [20] tentang pengaruh gap antar nosel terhadap karakteristik nyala. Dari eksperimennya diketahui bahwa seiring dengan turun nya rasio gap-diameter nosel, maka stabilitas nyala akan semakin meningkat.

Selain itu penelitian juga dilakukan oleh Haris Munandar [21] tentang pengaruh penambahan nitrogen *co-flow* terhadap stabilitas nyala. Penelitian ini menyimpulkan bahwa semakin besar rasio perbandingan nitrogen-bahan bakar, maka limit stabilitas nyalanya akan menurun.

2.2.1.4 Aplikasi Counter Flow Diffusion Flame

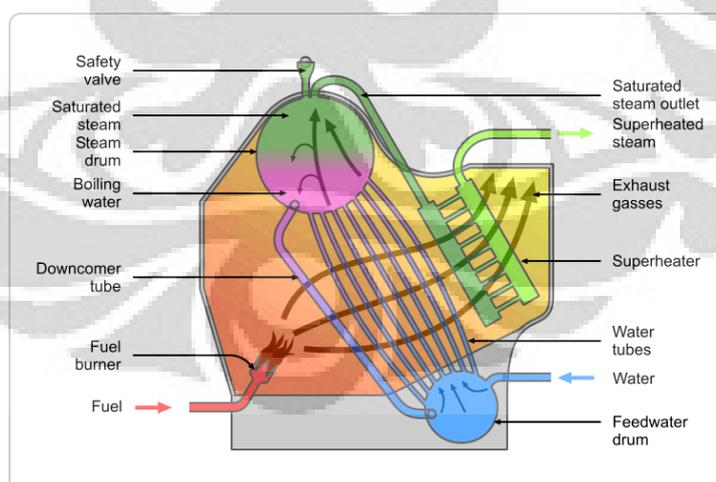
Metode pembakaran dengan *counter flow diffusion flame* terus-menerus dikembangkan dikarenakan metode ini dapat menghasilkan pembakaran dengan emisi yang rendah, efisiensi yang tinggi, serta api yang mempunyai temperatur stabil dan tahan lama, yang merupakan bentuk korelasi nyata dari pembakaran

yang efektif dan efisien. Selain itu *counter flow diffusion flame* juga dapat menghasilkan modus api stagnasi (Lihat gambar 2.11) yang merupakan perwujudan dari api yang stabil, dan mampu meminimalisasi tingkat kerusakan nosel.



Gambar 2. 11 Modus nyala api stagnasi

Pada kenyataannya fenomena api stagnasi seperti gambar 2.11 yang dapat muncul pada *counter flow diffusion flame* dapat digunakan untuk keperluan industri seperti *burner* atau *boiler*, karena pada dasarnya yang diperlukan oleh kedua macam alat tersebut adalah heat yang dihasilkan oleh api.



Gambar 2. 12 ilustrasi *water tube boiler*

Seperti yang ditunjukkan gambar 2.12 penggunaan *heat* pada *boiler* pada umumnya mempunyai kendala *heat loss* dikarenakan api masih menempel pada *burner*, sehingga *heat loss* bisa terjadi secara konduksi. Dengan adanya api

stagnasi yang secara harfiah, melayang, faktor *heat loss* secara konduksi bisa di minimalisasi.

Bentuk api stagnasi yang cenderung melebar, akan mempercepat proses *heat transfer* dengan cara konveksi maupun radiasi dikarenakan,

$$\begin{aligned} dQ/dt &= h \cdot A \cdot \Delta T && \text{..... untuk konveksi} \\ P &= \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 && \text{..... untuk radiasi [22]} \end{aligned}$$

Dimana :

Q	= Heat yang dipindahkan	(Joule)
h	= Koefisien konveksi	(W/m ² .K)
A	= Luas penampang	(m ²)
T	= Temperatur	(K)
P	= Daya	(W)
ϵ	= emisifitas benda	(----)
σ	= konstanta boltzmann	(W/m ² .K ⁴) [22]

Seperti terlihat dari rumus diatas, A (luas penampang) dari suatu sumber panas akan berpengaruh besar terhadap seberapa panas yang di pancarkan secara radiasi maupun konveksi, oleh karena itu, semakin lebar api yang digunakan, semakin efektif juga suatu pembakaran.

Selain itu, api stagnasi juga merupakan suatu api yang sangat stabil, sehingga tingkat osilasi dari api cenderung kecil, dan ini merupakan hal penting, mengingat, pada *counter flow diffusion* dengan propana sebagai bahan bakar, semakin besar osilasi yang terjadi, maka akan semakin besar pula pengaruhnya terhadap temperatur dari api yang dihasilkan [23].

BAB 3

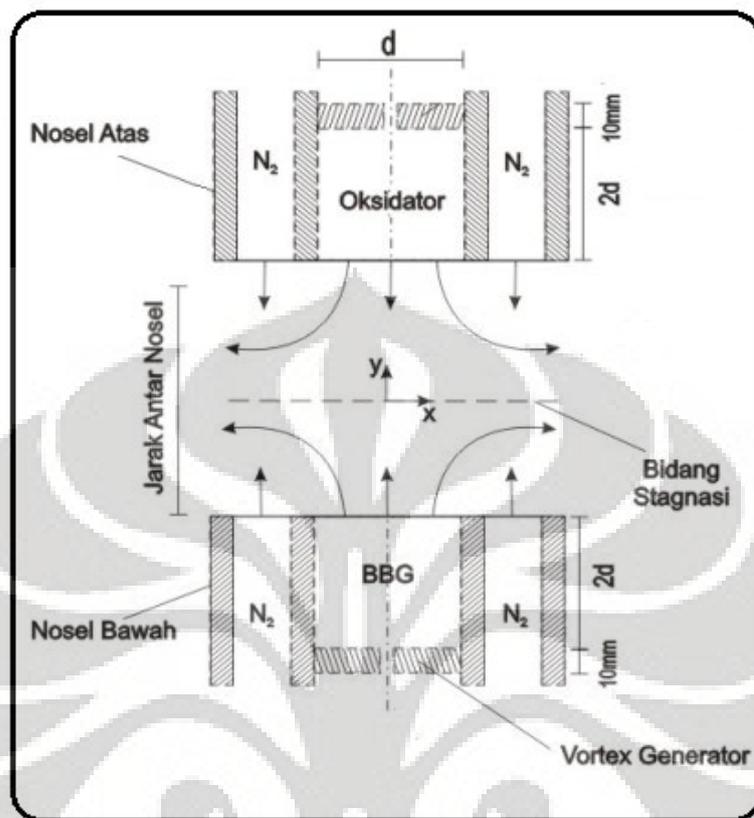
PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN

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

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

3.1 Peralatan Penelitian

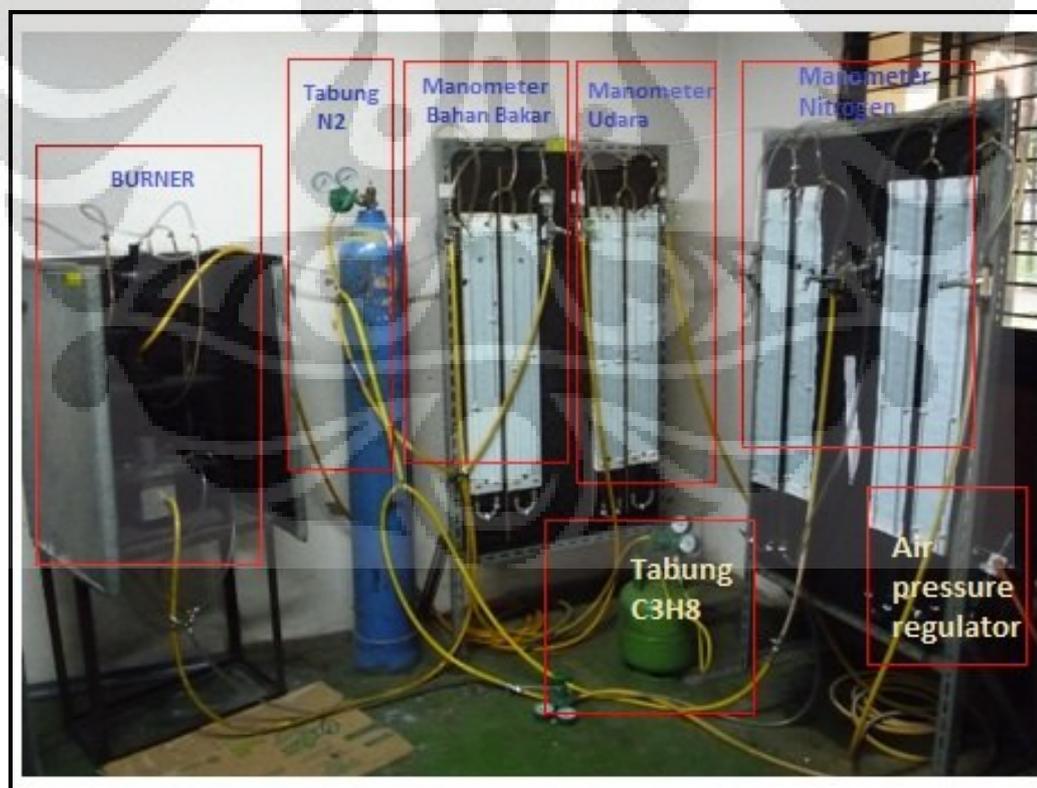
Proses pengamatan karakteristik nyala ini dilakukan dengan memasang *vortex generator* sejauh 2 kali diameter nosel dan diletakkan di tiap masing-masing pasangan nosel tersebut.



Gambar 3. 1. Skematik nosel yang digunakan

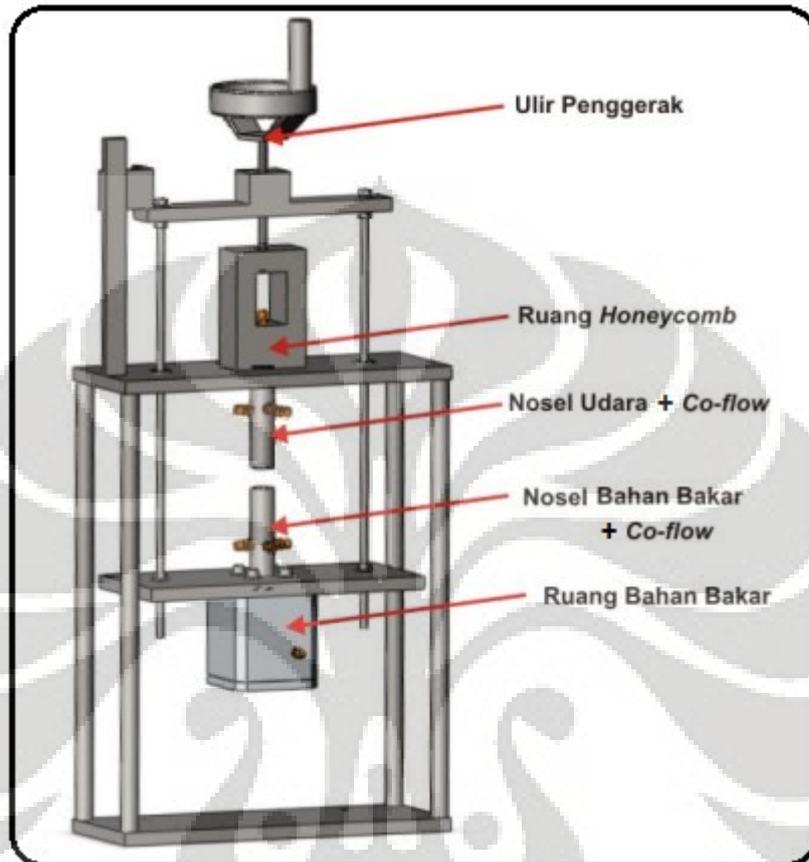
Pada penelitian ini, pengamatan dilakukan terhadap pola nyala yang terjadi dengan adanya *vortex generator* pada kedua nosel yang terletak simetris sehingga didapat titik tertentu dimana kestabilan nyala terjadi. Pada nosel sisi atas, digunakan udara kompresor yang berfungsi sebagai oksidator dan nitrogen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

Sedangkan, pada nosel sisi bawah, jenis noselnya adalah nosel *co-flow* dengan aliran dalam digunakan sebagai suplai bahan bakar, dan aliran luar (*annulus*) digunakan sebagai aliran gas nitrogen (N_2). Dalam hal ini, propana sebagai bahan bakar mengalir melewati manometer tabung-U dan *mixing chamber* sebelum masuk ke dalam nosel besar. Tapi pada penelitian ini *mixing chamber* tersebut tidak difungsikan sebagai tempat pencampuran bahan bakar dan udara, ataupun nitrogen, karena penelitian yang dilakukan adalah mengenai nyala difusi. Gas nitrogen, sebagai gas penyelubung, juga dialirkan terlebih dahulu melalui manometer tabung-U sebelum masuk ke dalam nosel *co-flow*. Peralatan yang dipakai untuk mempelajari nyala difusi pada medan aliran berlawanan secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.2 di bawah ini. Secara garis besar peralatan penelitian ini terdiri dari sistem suplai udara-bahan bakar, sistem suplai nitrogen untuk nosel *co-flow* dan *counterflow burner* yang terdiri dari 2 nosel yang diletakkan berlawanan secara vertikal dan simetris.



Gambar 3. 2. Peralatan eksperimen nyala api difusi pada aliran berlawanan

3.1.1 Konfigurasi Detail Alat Pembakar



Gambar 3. 3. Konfigurasi alat pembakar

a. Nosel udara & nosel *co-flow*

Bahan : Baja karbon tinggi (S50C)

Panjang : 115 mm

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

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



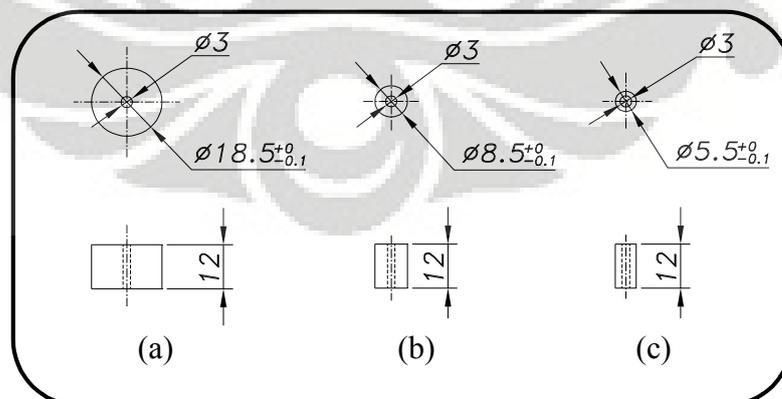
Gambar 3. 4. Nosel

b. *Vortex generator*

Bahan : Baja karbon tinggi (S50C)

Panjang : 12 mm

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



Gambar 3. 5. *Vortex generator* untuk (a) $d = \phi 18.5$ mm, (b) $d = \phi 8.5$ mm, (c) $d = \phi 5.5$ mm

c. Ruang bahan bakar

Bahan : Aluminium

Fungsi : Sebagai tempat penampungan bahan bakar sebelum masuk nosel

d. Ruang *honeycomb*

Bahan : Baja karbon tinggi (S50C)

Ukuran : 84 x 51 x 23

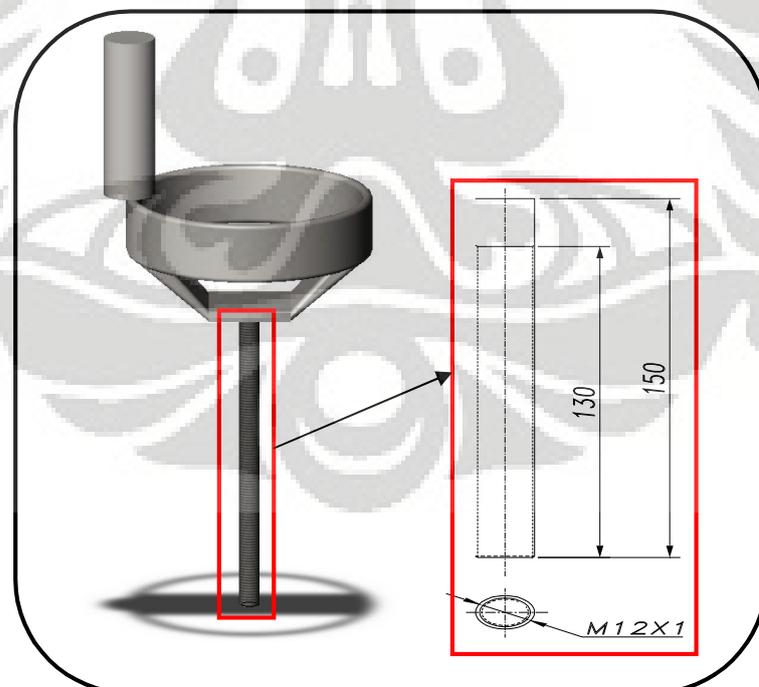
Fungsi : Untuk membuat aliran udara menjadi seragam sebelum akhirnya masuk ke dalam nosel besar. Di dalamnya berisi bola-bola baja (*honeycomb*) dengan diameter 4 mm.

e. Ulir penggerak

Bahan : Baja karbon tinggi (S50C)

Ukuran : M12x1, dan panjang = 150 mm

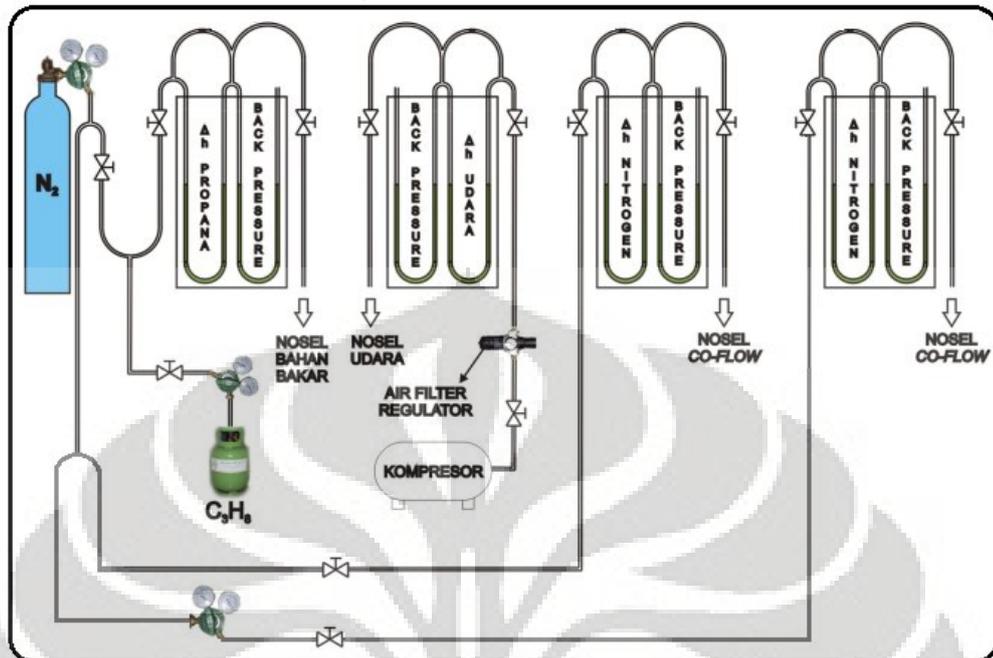
Fungsi : Sebagai penggerak, yang digunakan untuk mengatur jarak (L) antara nosel bahan bakar dan udara.



Gambar 3. 6. Ulir penggerak

3.1.2 Sistem Suplai Bahan Bakar, Udara dan Gas Nitrogen

Sistem ini berfungsi untuk mengatur besarnya debit/aliran bahan bakar, udara dan gas nitrogen yang akan dialirkan menuju *burner*. Sistem suplai bahan bakar, udara, dan nitrogen ini terdiri dari 4 pasang manometer tabung U yang masing-masing dilengkapi dengan sepasang katup jarum (*needle valve*) untuk bahan bakar dan nitrogen, sedangkan untuk suplai udara menggunakan *gate valve*. Untuk sepasang manometer yang digunakan sebagai pengatur debit aliran bahan bakar dan pengatur *back pressure*, mempunyai ukuran panjang 1000 mm, terbuat dari pipa *acrylic* diameter 11 mm. Sepasang manometer yang kedua digunakan sebagai pengatur debit aliran udara dan pengatur *back pressure*, mempunyai panjang 1000 mm, juga terbuat dari pipa *acrylic* dengan diameter 11 mm. Sedangkan dua pasang manometer yang terakhir digunakan sebagai pengatur debit aliran gas nitrogen yang akan menuju nosel *co-flow*, mempunyai panjang 1000 mm dengan diameter 8 mm. Alat ini juga dilengkapi dengan orifis dengan berbagai ukuran diameter mulai dari 0.8 mm sampai 2.0 mm, yang pemakaiannya disesuaikan dengan kebutuhan penelitian. Gambar skematik sistem suplai udara, bahan bakar dan nitrogen pada manometer tabung-U ditunjukkan pada gambar 3.7.

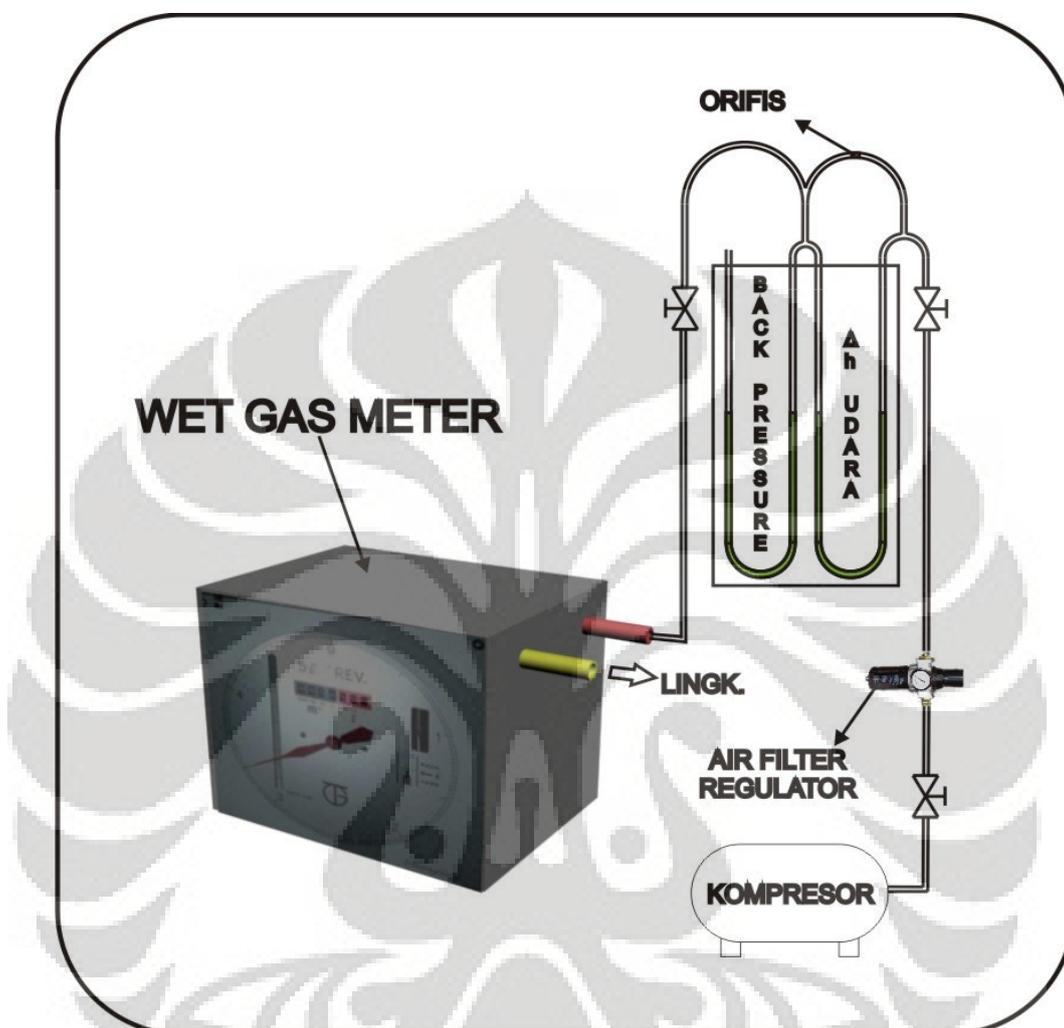


Gambar 3. 7. Skematik peralatan eksperimen nyala api difusi pada aliran berlawanan dengan penambahan *co-flow*

3.2 Prosedur Penelitian

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

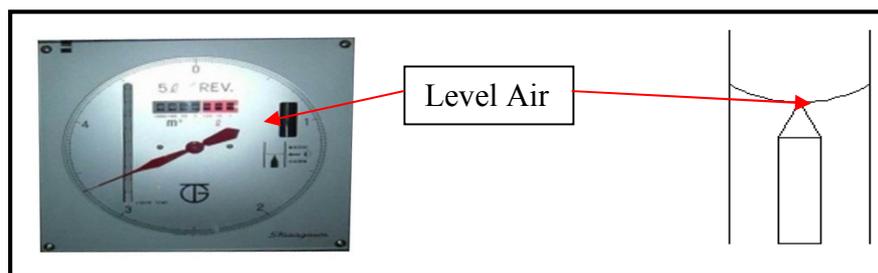
3.2.1 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Udara



Gambar 3. 8. Skema kalibrasi sistem suplai udara

Prosedur kalibrasi sistem suplai udara, yaitu:

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

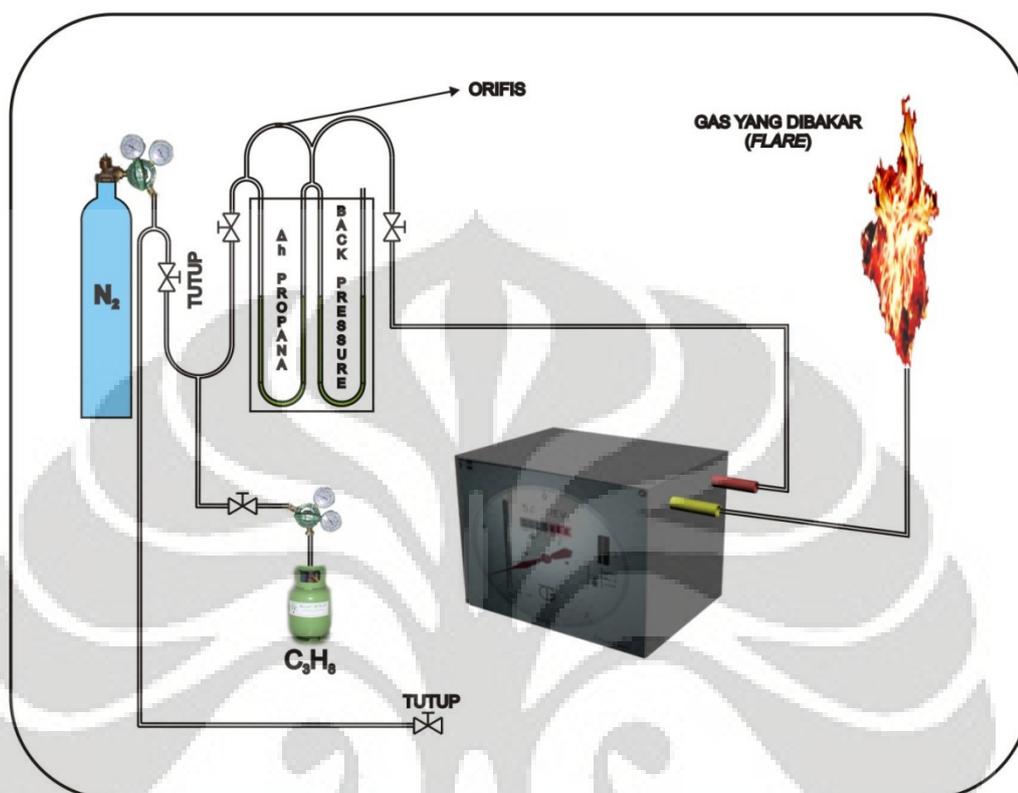


Gambar 3. 9. Level air pada *Wet Gas Meter* Shinagawa WE-2.5A

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

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

3.2.2 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Bahan Bakar



Gambar 3. 10. Skema kalibrasi sistem suplai bahan bakar

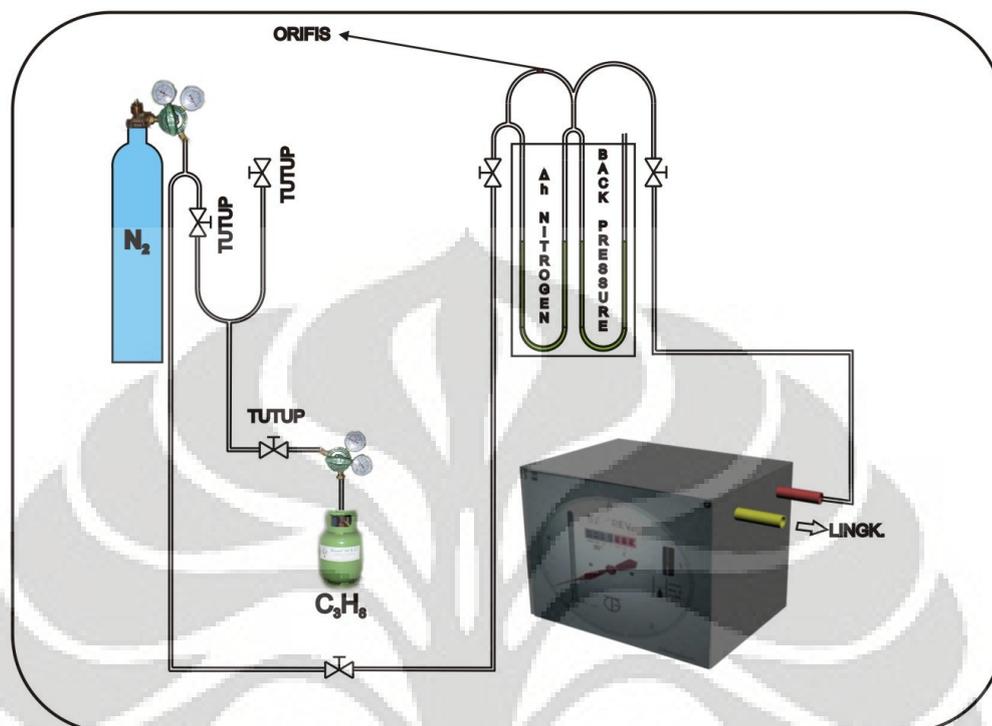
Adapun prosedur kalibrasi sistem suplai bahan bakar, yaitu:

1. Instalasi sistem dengan memasukkan saluran bahan bakar pada tabung bahan bakar dan masukan manometer tabung-U.
2. Isi manometer tabung-U dengan air hingga mencapai angka 0-0 dan pasang orifis sesuai ukuran yang diinginkan untuk pengambilan data.
3. Isi *Wet Gas Meter* Shinagawa WE-2.5 A dengan air hingga level yang ditetapkan *manual book*.
4. Instalasi sistem dengan memasang keluaran manometer tabung-U ke masukan *Wet Gas Meter* Shinagawa dan pasang selang untuk keluaran fluida dari *Wet Gas Meter* Shinagawa.

5. Alirkan bahan bakar keluar dari tabung dengan mengatur tekanan keluar 1-2 kg/cm² (dapat dilihat pada *pressure regulator*) dan tentukan nilai *back pressure* bahan bakar yang diinginkan.
6. Tentukan perbedaan ketinggian permukaan Δh dengan menyetel *needle valve* bahan bakar dan pertahankan nilai *back pressure* bahan bakar tetap konstan (Jangan lupa untuk membakar bahan bakar (*flare*) yang keluar dari *Wet Gas Meter* Shinagawa agar tidak terjadi akumulasi udara yang dapat mengakibatkan reaksi pembakaran jika terkena api atau terhirup karena melebihi ambang batas yang diperbolehkan).
7. Tiap nilai *back pressure* bahan bakar, diambil data tiap kenaikan Δh 50 mm pada manometer tabung-U dengan menggunakan variasi ukuran orifis 0.8-2.0 mm.
8. Data yang didapat adalah volume bahan bakar yang mengalir dan waktu yang diperlukan dalam satu putaran penuh jarum *Wet Gas Meter* Shinagawa pada 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.

3.2.3 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Nitrogen



Gambar 3. 11. Skema kalibrasi sistem suplai nitrogen

Prosedur kalibrasi sistem suplai nitrogen adalah sebagai berikut.

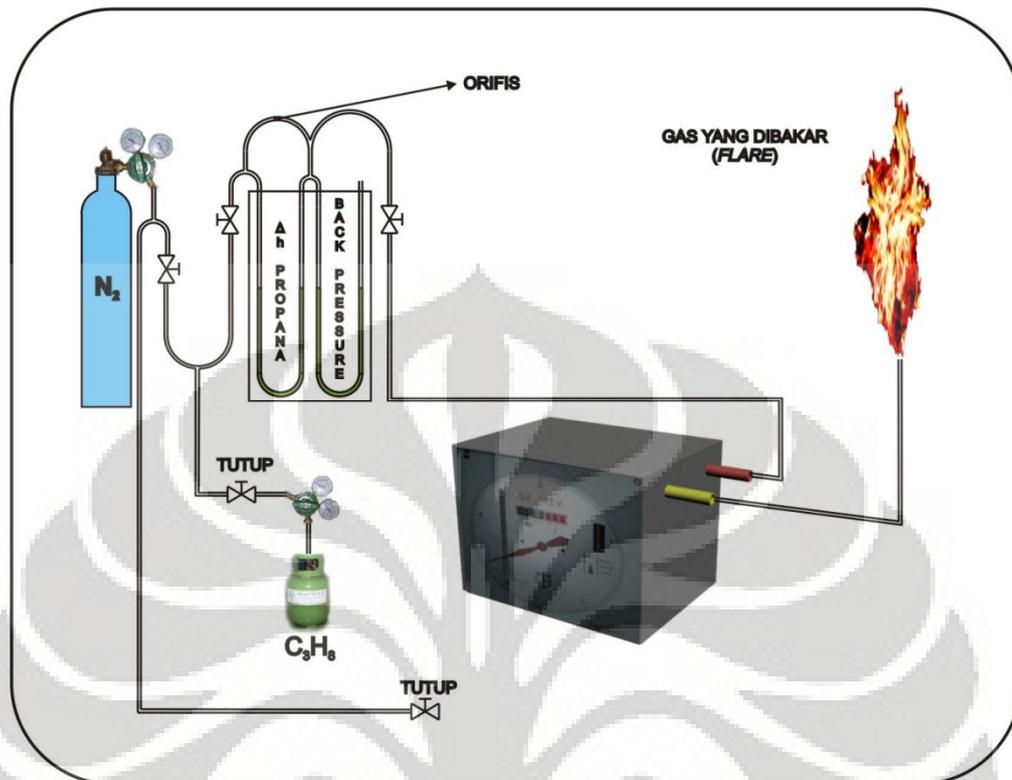
1. Instalasi sistem dengan memasukkan saluran nitrogen ke tabung nitrogen dan masukan manometer tabung-U.
2. Isi manometer tabung-U dengan air hingga mencapai angka 0-0 dan pasang orifis sesuai ukuran yang diinginkan untuk pengambilan data.
3. Isi *Wet Gas Meter* Shinagawa WE-2.5 A dengan air hingga level yang ditetapkan *manual book*.
4. Instalasi sistem dengan memasang keluaran manometer tabung-U ke masukan *Wet Gas Meter* Shinagawa dan pasang selang untuk keluaran fluida dari *Wet Gas Meter* Shinagawa.
5. Alirkan nitrogen dari tabung dengan mengatur tekanan keluar 1-2 kg/cm² untuk kemudian melewati manometer tabung-U lalu tentukan nilai *back pressure* nitrogen yang diinginkan.
6. Tentukan perbedaan ketinggian permukaan Δh dengan menyetel *needle valve* nitrogen dan pertahankan nilai *back pressure* nitrogen tetap konstan.

7. Tiap nilai *back pressure* nitrogen, diambil data setiap kenaikan 100 mm pada manometer tabung-U dengan menggunakan variasi ukuran orifis mulai dari 0.8-2.00 mm. Pada penelitian ini, digunakan 2 buah orifis yang berbeda ukurannya agar rasio yang diinginkan tercapai.
8. Data yang didapat adalah volume nitrogen yang mengalir dan waktu yang diperlukan dalam satu putaran penuh jarum *Wet Gas Meter* Shinagawa pada Δh tertentu. (volume nitrogen, waktu, Δh).

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

3.2.4 Prosedur *Purging*

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



Gambar 3. 12. Skema proses *purging*

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

1. Tutup saluran bahan bakar yang masuk ke dalam manometer tabung-U sebelum dan sesudah melakukan kalibrasi sistem saluran bahan bakar.
2. Buka saluran nitrogen yang masuk ke dalam manometer tabung-U dengan cara membuka penuh tekanan keluar pada tabung. (Pastikan terlebih dahulu bahwa *needle valve* untuk mengatur masuknya fluida pada manometer tabung-U bahan bakar dalam keadaan tertutup).
3. Atur tekanan nitrogen yang masuk ke dalam manometer tabung-U sebesar 1-2 kg/cm². Pembacaan angka ini dapat ditunjukkan pada *pressure regulator*.
4. Buka *needle valve back pressure* pada manometer tabung-U secara penuh dan *needle valve*-nya secara perlahan.

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

3.2.5 Prosedur Pengambilan Data

3.2.5.1 Pengukuran Limit Stabilitas Nyala

Stabilitas nyala merupakan kemampuan nyala untuk dapat menjaga dari fenomena *flashback*, *lift-off* hingga ditandai dengan padamnya nyala (*extinct*). Tingkat kemampuan untuk menjaga nyala dari ketiga fenomena di atas inilah yang nantinya digunakan sebagai batas antara nyala stabil dan padam.

Adapun prosedur-prosedur dalam melakukan pengukuran limit stabilitas nyala difusi pada medan aliran berlawanan ini adalah sebagai berikut:

1. Pastikan seluruh sistem saluran bahan bakar, udara, dan nitrogen (*co-flow*) sudah terpasang dengan benar.
2. Lakukan pengaturan untuk parameter-parameter geometri terlebih dahulu, seperti diameter dalam nosel, *vortex generator*, rasio jarak nosel terhadap diameter dalam nosel.
3. Pastikan bahwa kedua nosel yang saling berlawanan tersebut sudah konsentrik.
4. Alirkan bahan bakar keluar dari tabung dengan mengatur tekanan keluar antara 1 sampai 2 kg/cm^2 (dapat dilihat pada *pressure regulator*).

5. Pastikan bahwa *needle valve* bahan bakar dalam kondisi sepenuhnya tertutup (*fully closed*) dan *needle valve back pressure*-nya dalam kondisi sepenuhnya terbuka (*fully opened*).
6. Buka *needle valve* bahan bakar secara perlahan untuk mengalirkan bahan bakar masuk ke dalam sistem. Dan tentukan perbedaan ketinggian permukaan Δh bahan bakar yang akan digunakan.
7. Nyalakan pemantik api pada keluaran nosel bahan bakar.
8. Putar *needle valve back pressure* bahan bakar secara perlahan untuk mengatur Δh *back pressure* yang akan digunakan.
9. Kemudian alirkan nitrogen dari tabung dengan mengatur tekanan keluar sebesar $2,5 \text{ kg/cm}^2$.
10. Atur keluaran menuju *needle valve* nitrogen arah bahan bakar sebesar $1 - 2 \text{ kg/cm}^2$
11. Dalam kondisi *needle valve* nitrogen tertutup, dan *needle valve back pressure*-nya terbuka, buka *needle valve* nitrogen arah bahan bakar secara perlahan, dan tentukan perbedaan ketinggian permukaan Δh yang akan digunakan. Atur juga *needle valve back pressure* yang akan digunakan. (Besar aliran nitrogen ditentukan oleh rasio debit antara nitrogen dengan bahan bakar).
12. Lalu, alirkan udara dari kompresor ke sistem dengan mengatur tekanan keluar $1-2 \text{ kg/cm}^2$.
13. Buka *gate valve* udara dan tutup *gate valve back pressure*-nya secara perlahan untuk mengalirkan udara ke nosel.
14. Buka *needle valve co-flow* arah udara secara perlahan, atur debit keluaran sehingga menyamai debit keluaran udara, dengan tetap menjaga Δh *back pressure* tetap konstan.
15. Ubah debit keluaran udara dan nitrogen secara bertahap sampai terjadi *extinct*.
16. Data mentah yang didapat adalah Δh udara dan Δh nitrogen dari arah udara saat terjadi *extinct* pada Δh bahan bakar dan Δh nitrogen ter-*setting*.

17. Lakukan proses *purging* untuk membersihkan bahan bakar dalam sistem, sehingga yang tersisa dalam sistem adalah nitrogen.

3.2.5.2 Metode Penelitian Limit Stabilitas Nyala

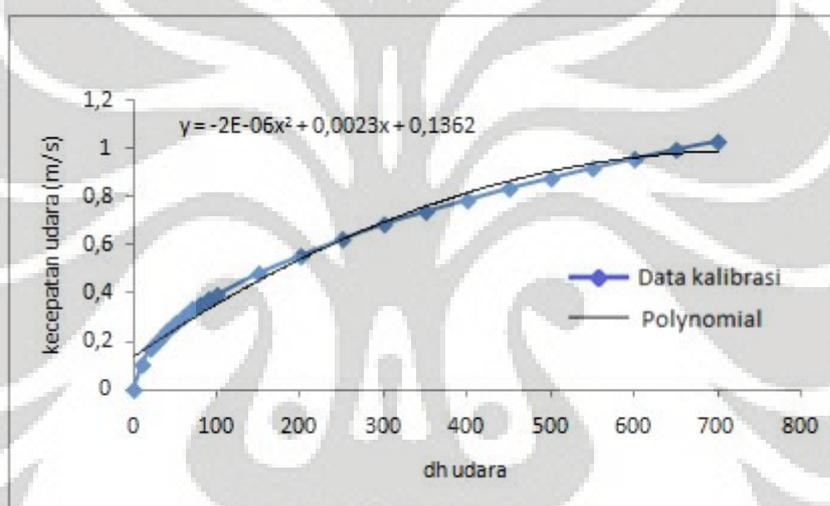
Dalam penelitian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik limit stabilitas nyala dan juga untuk mengamati visualisasi yang terjadi ini, beberapa parameter yang diatur diantaranya:

1. Kecepatan injeksi bahan bakar ($V_{propana}$) diperoleh dari data mentah Δh bahan bakar pada manometer kemudian dimasukkan pada persamaan kalibrasi-nya. Dalam hal ini, Δh bahan bakar diatur setiap kenaikan 50 mm, dengan dimulai dari $\Delta h = 50$ mm sampai dengan $\Delta h = 400$ mm.
2. Kecepatan *co-flow* injeksi nitrogen dari arah bahan bakar (V_{N_2}) diperoleh dari data mentah Δh nitrogen pada manometer kemudian dimasukkan pada persamaan kalibrasi-nya. Dalam hal ini, Δh nitrogen diatur pada kondisi beberapa nilai rasio antara debit nitrogen dengan debit bahan bakar. Variasi Δh nitrogen ini didapat dari hasil kalibrasi nitrogen yang sudah dilakukan, yaitu 40/60, 50/50, 60/40, 70/30 dan 80/20.
3. Kecepatan *co-flow* injeksi nitrogen dari arah udara (V_{N_2}) diperoleh dari data mentah Δh nitrogen pada manometer kemudian dimasukkan pada persamaan kalibrasi-nya. Dalam hal ini, Δh nitrogen diatur sehingga debit nitrogen menyamai debit udara. Data mentah Δh yang didapat adalah Δh nitrogen pada saat kondisi *extinct*.
4. Kecepatan injeksi udara (V_{udara}) diperoleh dari data mentah Δh udara pada manometer kemudian dimasukkan pada persamaan kalibrasi-nya. Data mentah berupa Δh udara yang dicatat dalam hal ini adalah Δh udara pada saat terjadi *extinct* (nyala api padam) setiap kenaikan Δh bahan bakar pada rasio debit nitrogen-bahan bakar yang telah ditentukan.
5. Letak *vortex generator* pada nosel ditentukan pada posisi $2d$ dari ujung nosel.
6. Rasio jarak antar nosel bahan bakar dan udara dengan diameter dalam nosel (L/d) diatur dalam 3 variasi yaitu: 2.7, 2.43, 2.16.

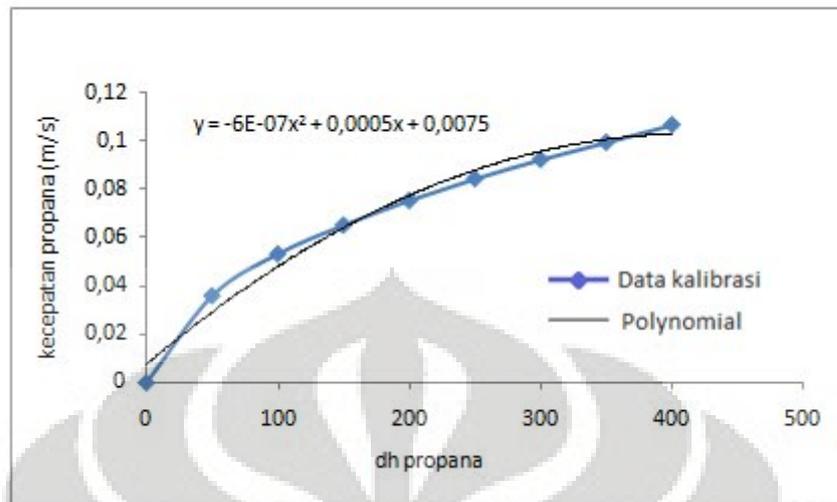
7. Diameter dalam nosel yang digunakan, yaitu dengan 3 variasi ukuran $\varnothing 18.5$, $\varnothing 8.5$, $\varnothing 5.5$.
8. Untuk semua sistem manometer tabung-U, Δh *back pressure*-nya di-*setting* sebesar 300 mm.

Berikut ini adalah persamaan yang dipakai untuk mengkonversikan data mentah stabilitas nyala yang berupa Δh menjadi data kecepatan, baik kecepatan udara (V_{udara}), kecepatan bahan bakar ($V_{propana}$), maupun kecepatan nitrogen (V_{N_2}).

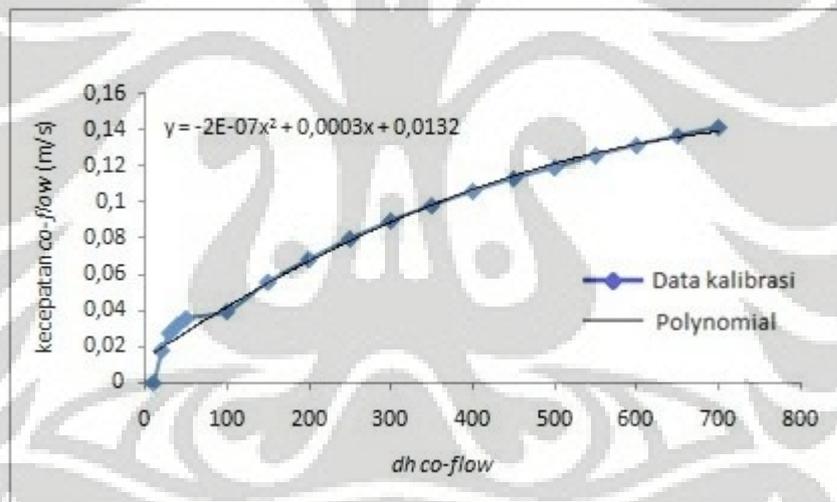
a. untuk nosel $\varnothing 18.5$ mm



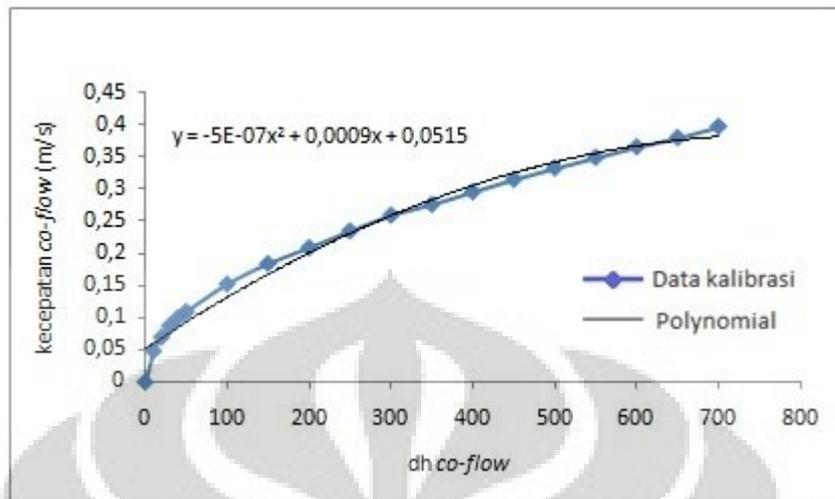
Gambar 3. 13. Persamaan kalibrasi kecepatan udara (V_{udara}) untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm



Gambar 3. 14. Persamaan kalibrasi kecepatan propana ($V_{propana}$) untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm

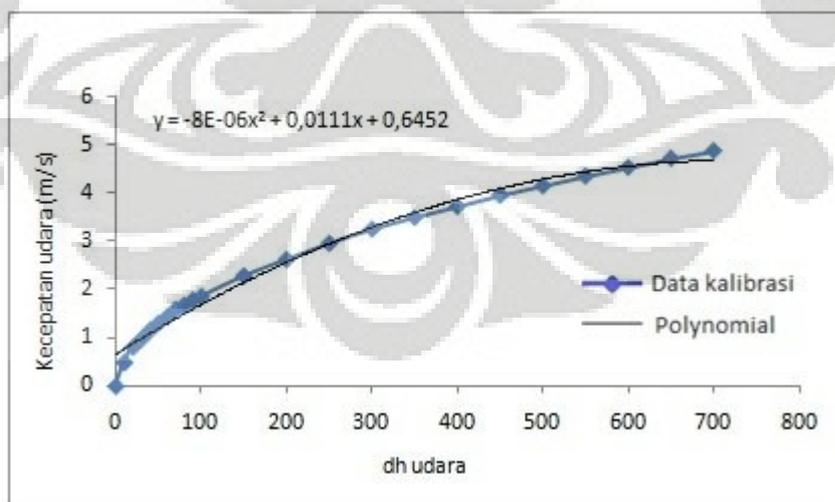


Gambar 3. 15. Persamaan kalibrasi kecepatan *co-flow* nitrogen arah propana (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm

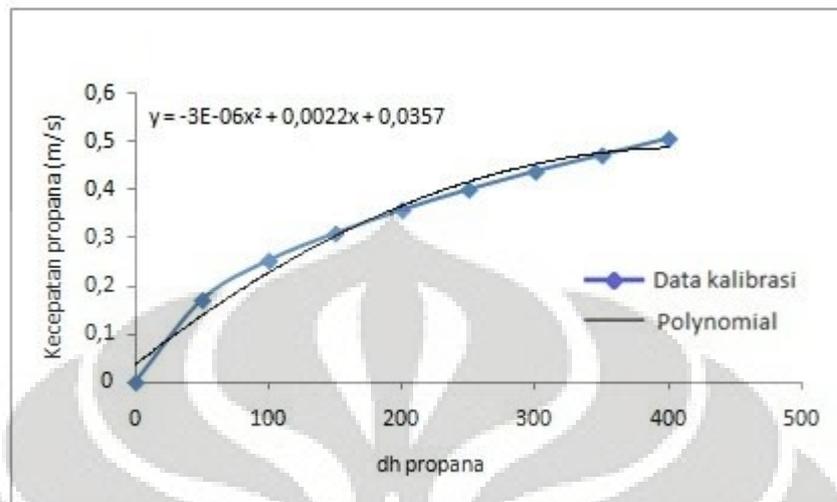


Gambar 3. 16. Persamaan kalibrasi kecepatan *co-flow* nitrogen arah udara (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm

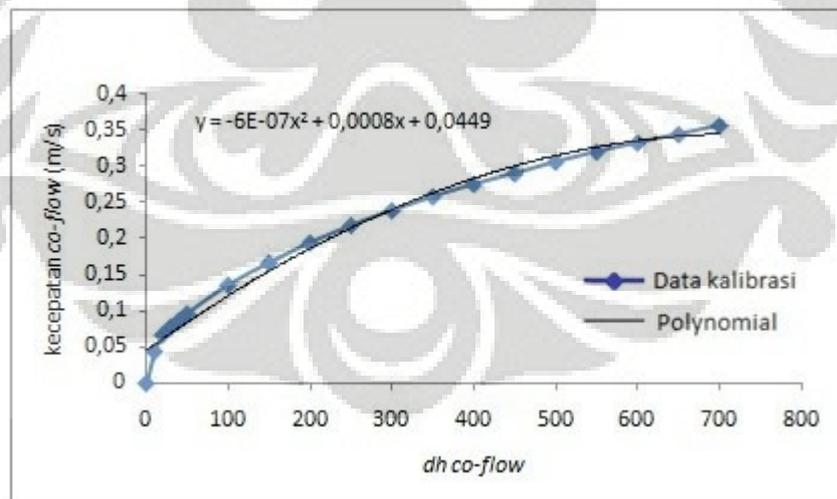
b. untuk nosel $\varnothing 8.5$ mm



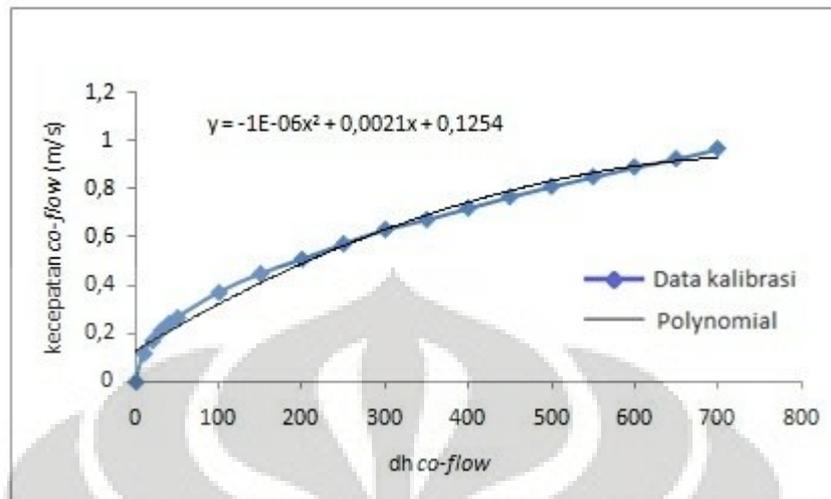
Gambar 3. 17. Persamaan kalibrasi kecepatan udara (V_{udara}) untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm



Gambar 3. 18. Persamaan kalibrasi kecepatan propana ($V_{propana}$) untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm

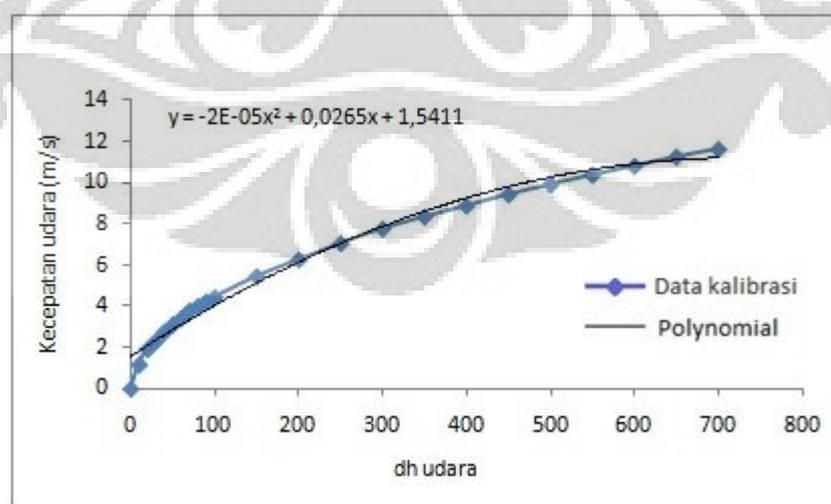


Gambar 3. 19. Persamaan kalibrasi kecepatan *co-flow* nitrogen arah propana (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm

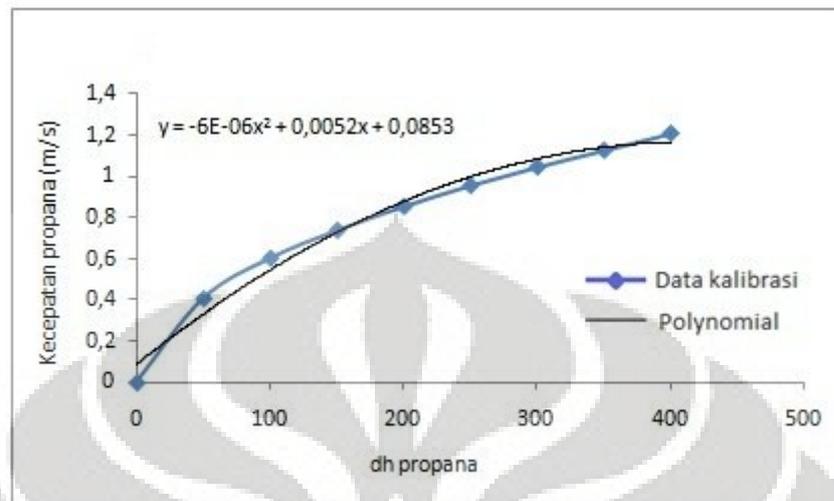


Gambar 3. 20. Persamaan kalibrasi kecepatan *co-flow* nitrogen arah udara (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm

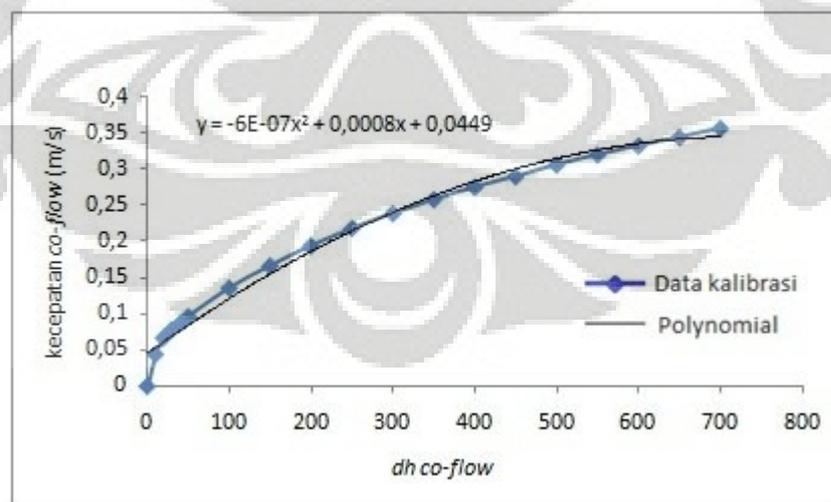
c. untuk nosel $\varnothing 5.5$ mm



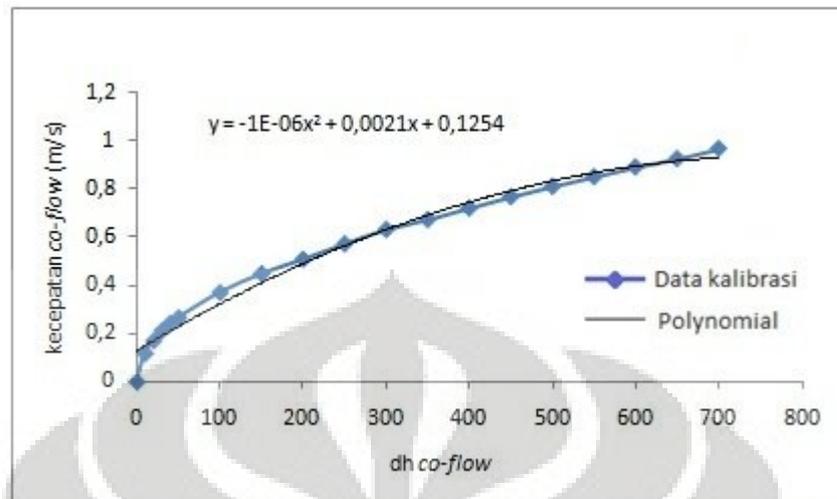
Gambar 3. 21. Persamaan kalibrasi kecepatan udara (V_{udara}) untuk diameter nosel = $\varnothing 5.5$ mm



Gambar 3. 22. Persamaan kalibrasi kecepatan propana ($V_{propana}$) untuk diameter nosel = $\varnothing 5.5$ mm



Gambar 3. 23 Persamaan kalibrasi kecepatan *co-flow* nitrogen arah propana (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 5.5$ mm



Gambar 3. 24. Persamaan kalibrasi kecepatan *co-flow* nitrogen arah udara (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 5.5$ mm

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Dari penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui limit stabilitas nyala, dengan mula-mula menetapkan level Δh manometer bahan bakar dan nitrogen sesuai dengan rasio debit Q_{N_2}/Q_f yang dipakai, diperoleh data mentah berupa data Δh manometer udara dan Δh manometer *co-flow* nitrogen sisi udara pada saat nyala api mulai *extinct*.

Data tersebut yaitu data Δh manometer udara dan Δh manometer bahan bakar kemudian dikonversi menjadi data kecepatan rata-rata aliran udara (V_{udara}) dan data kecepatan rata-rata aliran bahan bakar ($V_{propana}$). Pengkonversian ini menggunakan persamaan kalibrasi yang telah diperoleh dan dijelaskan sebelumnya pada Bab 3.

Sementara itu, data Δh manometer nitrogen tidak perlu dikonversikan menjadi data kecepatan karena dalam penelitian ini yang perlu diketahui hanya debit nitrogen saja sebagai indikator rasio debit Q_{N_2}/Q_f dan $Q_{N_2} = Q_{air}$ yang dipakai dalam pengambilan data. Hal ini dilakukan karena hasil dari penelitian ini akan di bandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya.

Dalam mempelajari karakteristik nyala difusi *counter flow* dengan *Both Side Co-Flow* ini, penulis melakukan analisa dengan pendekatan fluks momentum (laju perubahan momentum per satuan waktu) dan analisa debit bahan bakar-debit campuran (Q_{fuel}/Q_{mix}). Pendekatan dengan fluks momentum dikarenakan 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 korelasi dari sifat fluida (densitas) dan juga kecepatan fluida. Selain itu, diketahui juga bahwa dalam aliran turbulen, fluks

momentum merupakan korelasi dari tegangan geser turbulen atau tegangan Reynolds yang bersangkutan dengan fluktuasi turbulen. Untuk lebih jelasnya mengenai perhitungan fluks momentum yang digunakan, maka dapat dilihat dalam rumus berikut ini.

$$\tau = \rho v^2$$

dimana:

τ = fluks momentum, (kg/ms²)

ρ = kerapatan fluida, (kg/m³)

v = kecepatan aliran fluida, (m/s)

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

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

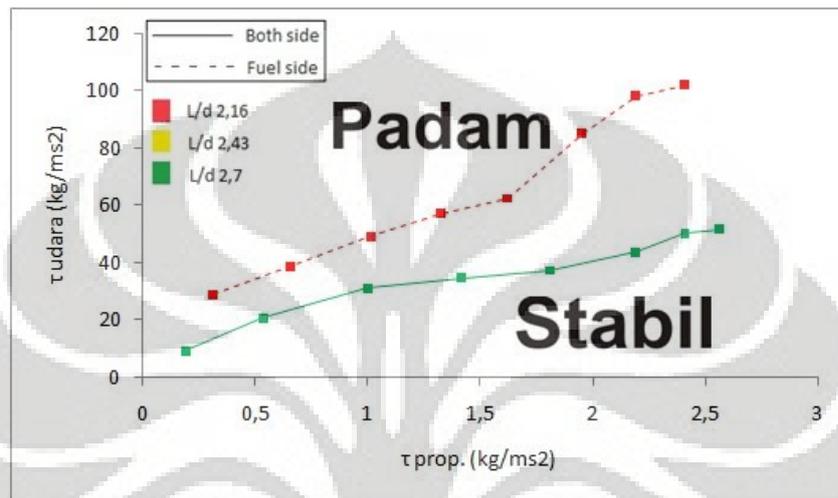
$$\rho_{\text{propana}} = 1.854 \text{ kg/m}^3$$

Oleh karena itu, data kecepatan rata-rata aliran udara (V_{udara}) dan data kecepatan rata-rata aliran bahan bakar (V_{propana}) yang tadi sudah dikonversikan dari data Δh manometer, akan dikuadratkan lalu dikalikan dengan masing-masing densitasnya untuk mendapatkan fluks momentumnya (τ). Sedangkan pendekatan dengan analisa debit bahan bakar-debit campuran ($Q_{\text{fuel}}/Q_{\text{mix}}$) digunakan karena bahan bakar (propana) memiliki batas bawah mampu nyala dimana ketika hal itu tercapai maka api tidak mungkin terbentuk (lihat tabel 2.1), sehingga kita dapat mengorelasikannya dengan kejadian *extinction*. Batas bawah mampu nyala propana menggunakan prosentase volume bahan bakar. Karena debit adalah volume persatuan waktu maka, perbandingan debit akan sangat baik untuk mewakili perbandingan volume.

Berikut adalah grafik limit stabilitas nyala yang disajikan berupa data τ_{propana} versus τ_{udara} tiap rasio debit $Q_{\text{N}_2}/Q_{\text{f}}$ dibandingkan dengan data *Oksidator side Co-Flow* hasil penelitian Harinaldi & Haris Munandar (2009).

4.1.1 Limit Stabilitas Nyala untuk Diameter Nosel, $d = \text{Ø}5.5 \text{ mm}$

Ilustrasi dan contoh pembacaan grafik

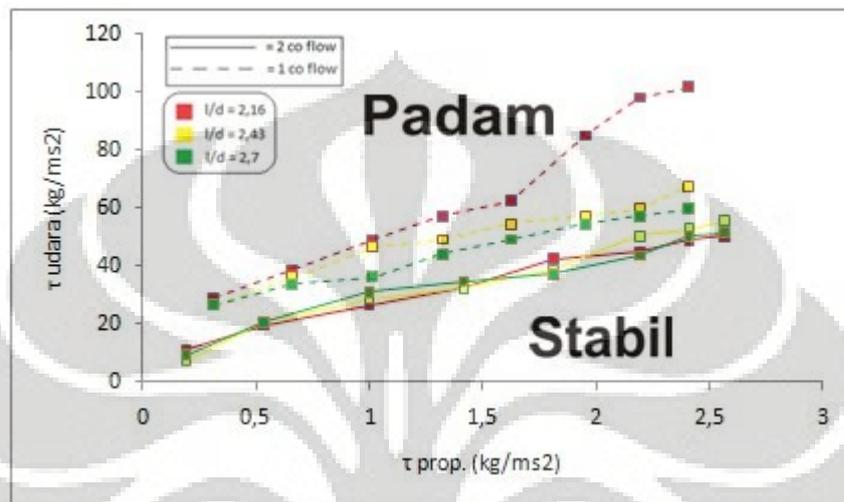


Gambar 4.1. Ilustrasi grafik stabilitas nyala *both side co-flow* dan *fuel side co-flow* rasio 40/60

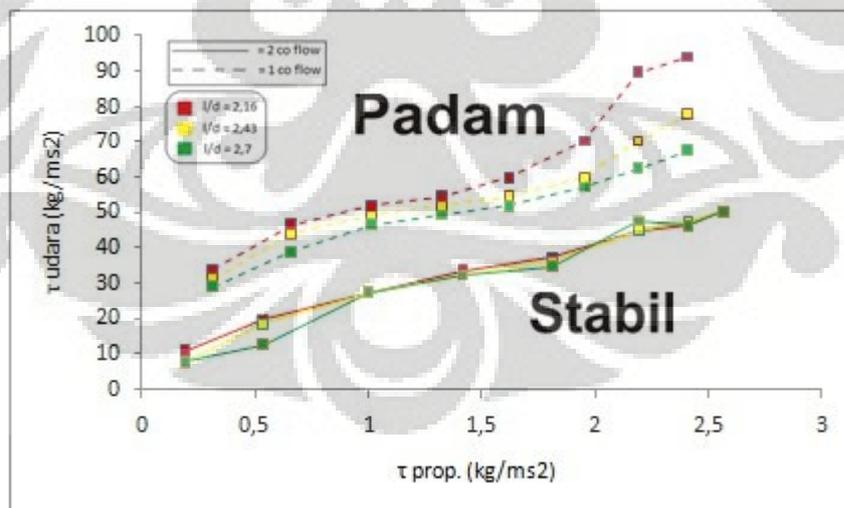
Grafik diatas menunjukkan:

- Stabilitas nyala untuk nosel *both side co-flow* dan *fuel side co-flow*, untuk rasio $Q_{N_2}/Q_{fuel} = 40/60$
- Semua daerah **dibawah** grafik berwarna hijau adalah daerah **stabil** untuk variabel yang diwakili grafik hijau.
- Semua daerah **diatas** grafik berwarna hijau adalah daerah **padam** untuk variabel yang diwakili grafik hijau.
- Semua daerah **dibawah** grafik berwarna merah adalah daerah **stabil** untuk variabel yang diwakili grafik merah.
- Semua daerah **diatas** grafik berwarna merah adalah daerah **padam** untuk variabel yang diwakili grafik merah.

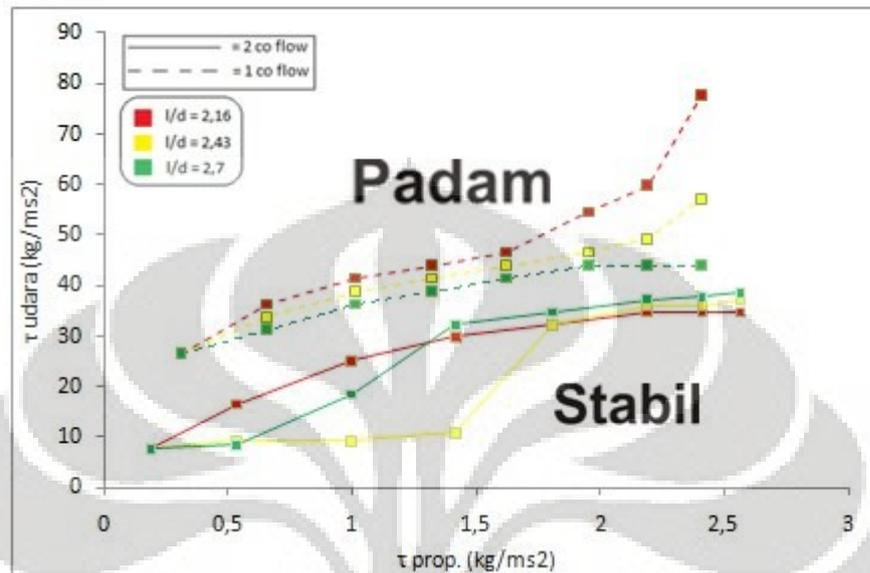
Grafik Hasil



Gambar 4. 2. Grafik stabilitas nyala *both side co-flow* dan *fuel side co-flow* nosel 5,5 mm rasio 40/60



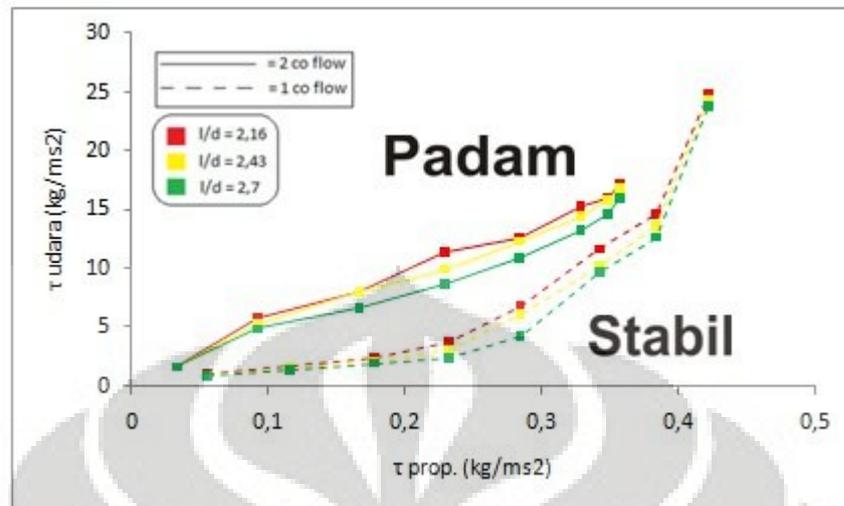
Gambar 4. 1. Grafik stabilitas nyala *both side co-flow* dan *fuel side co-flow* nosel 5,5 mm rasio 60/40



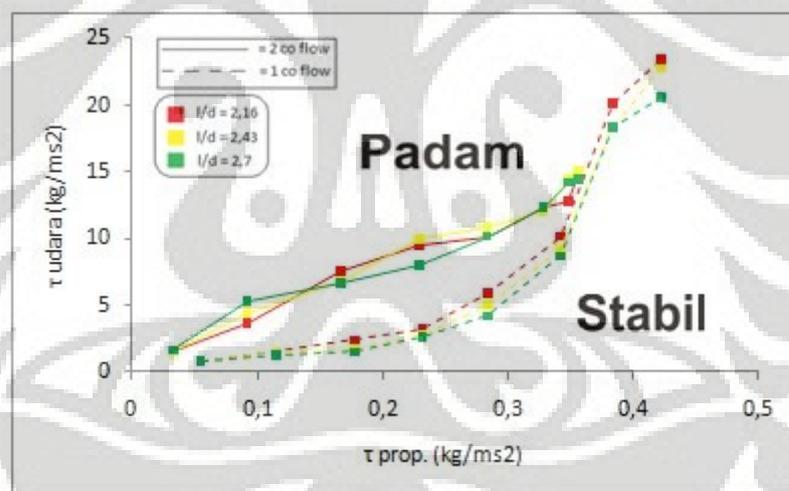
Gambar 4. 4. Grafik stabilitas nyala *both side co-flow* dan *fuel side co-flow* nosel 5,5 mm rasio 80/20

Secara umum untuk nosel 5.5 mm, terlihat hampir semua titik data *Both side Co-Flow* ada di bawah data *fuel side Co-Flow* baik tiap rasio maupun tiap L/d -nya. Yang berbeda adalah, pada hampir semua data *Both side Co-Flow* stabilitas nyala pada L/d 2,16 selalu terjadi *shifting* dari berada paling atas saat $\tau_{propana}$ kecil, dan menjadi paling bawah saat $\tau_{propana}$ semakin besar.

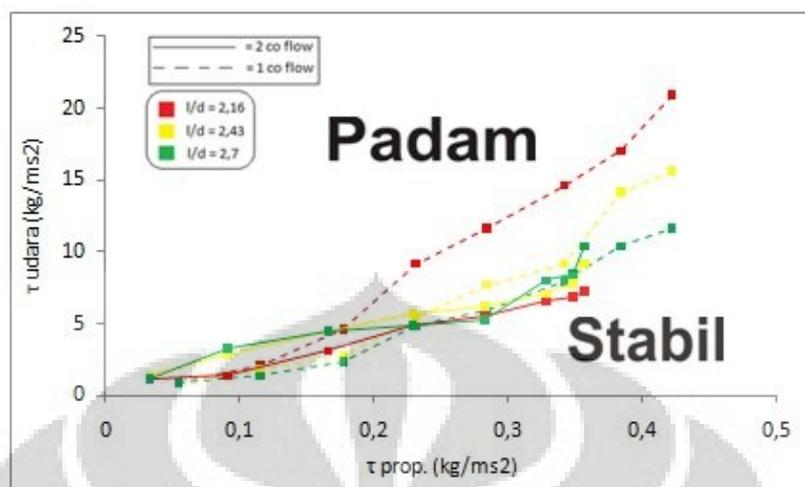
4.1.2 Limit Stabilitas Nyala untuk Diameter Nosel, $d = \text{Ø}8.5$ mm



Gambar 4. 5. Grafik stabilitas nyala *both side co-flow* dan *fuel side co-flow* nosel 8,5 mm rasio 40/60



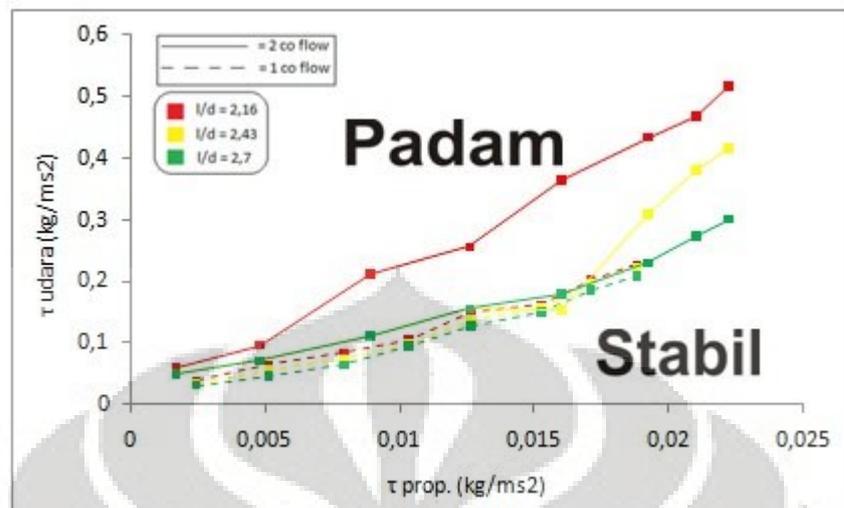
Gambar 4.6. Grafik stabilitas nyala *both side co-flow* dan *fuel side co-flow* nosel 8,5 mm rasio 60/40



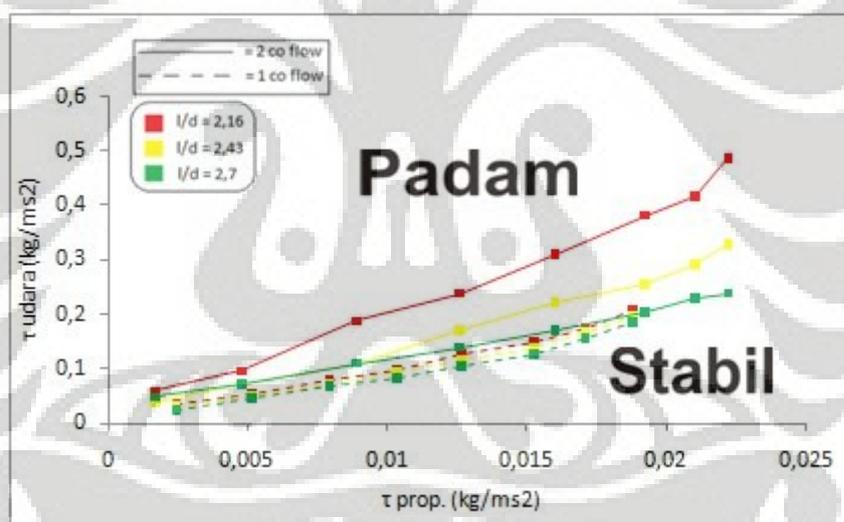
Gambar 4.7. Grafik stabilitas nyala *both side co-flow* dan *fuel side co-flow* nosel 8,5 mm rasio 80/20

Sedangkan untuk nosel 8.5 mm, secara umum kecenderungannya hampir sama dengan nosel 5.5 mm, dimana terjadi ketidakstabilan limit stabilitas nyalanya, hanya pada $Q_{N_2}/Q_f = 40/60$ yang terjadi kestabilan stabilitas nyala. Hal lain yang perlu diperhatikan adalah, pada nosel ini nyala dari *Both side Co-Flow* cenderung lebih stabil, sehingga dibutuhkan τ_{udara} yang lebih besar untuk mencapai kondisi *extinct*. Namun untuk nosel *Both side Co-Flow* $\tau_{propana}$ tidak pernah melebihi 0,4 kg/ms², sehingga grafik nosel *Both side Co-Flow* lebih pendek dan tidak pernah mencapai τ_{udara} 20 kg/ms².

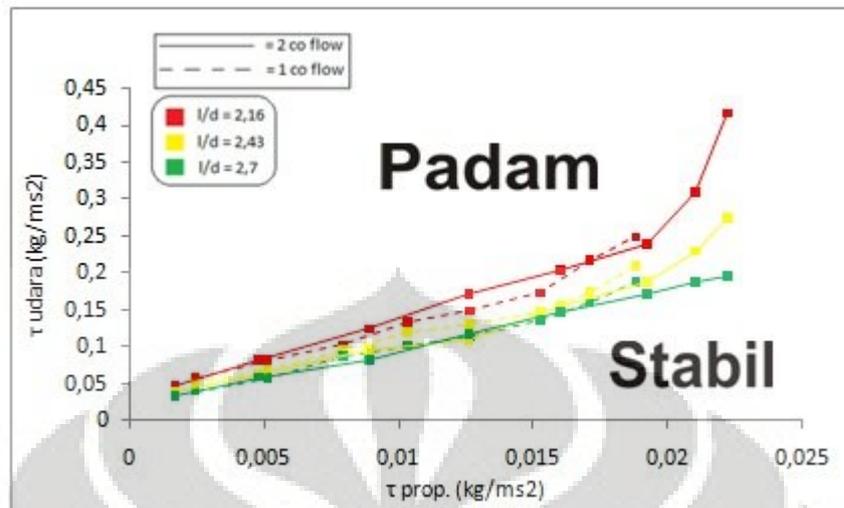
4.1.3 Limit Stabilitas Nyala untuk Diameter Nosel, $d = \text{Ø}18.5 \text{ mm}$



Gambar 4. 8. Grafik stabilitas nyala *both side co-flow* dan *fuel side co-flow* nosel 18,5 mm rasio 40/60

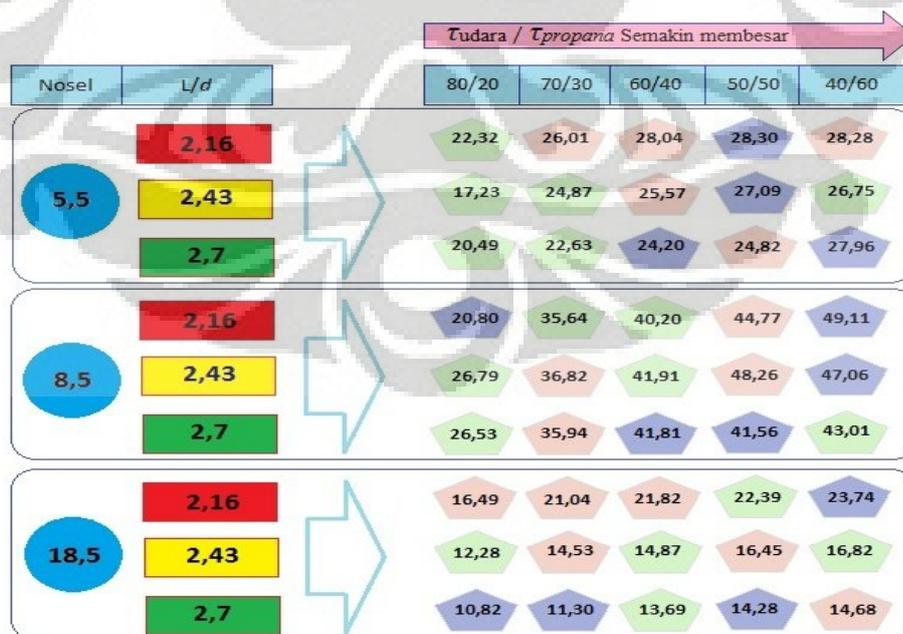


Gambar 4. 9. Grafik stabilitas nyala *both side co-flow* dan *fuel side co-flow* nosel 18,5 mm rasio 60/40



Gambar 4. 10. Grafik stabilitas nyala *both side co-flow* dan *fuel side co-flow* nosel 18,5 mm rasio 80/20

Sementara untuk nosel 18.5 mm terlihat bahwa stabilitas nyala untuk nosel *Both side Co-Flow*, lebih stabil dibanding *fuel side Co-Flow*, sehingga membutuhkan τ_{udara} yang lebih tinggi. Hal lain yang perlu diperhatikan adalah, $\tau_{propana}$ untuk nosel *fuel side Co-Flow* tidak pernah melebihi 0,02 kg/ms², sehingga grafiknya lebih pendek, hal ini bekebalikan dengan stabilitas nyala di nosel 8,5mm.



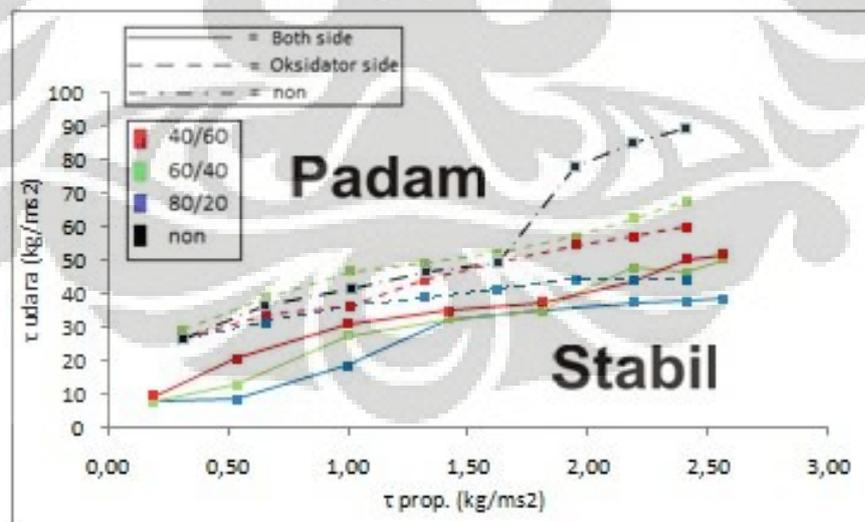
Gambar 4. 11. Rangkuman $\tau_{udara}/\tau_{propana}$ rata - rata limit stabilitas nyala

Hasil yang ditunjukkan sejumlah grafik dan gambar di atas memperkuat hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Harinaldi dan Furjianto (2008) mengenai “Pengaruh Rasio Gap-Diameter Nosel (L/d) terhadap Karakteristik Nyala Difusi pada Medan Aliran Berlawanan (*Counter-Flow*)” dan Harinaldi & Haris Munandar (2009) mengenai “Pengaruh Penambahan Co-Flow Gas Inert (N_2) Terhadap Limit Stabilitas Nyala Pada Medan Aliran Berlawanan” bahwa:

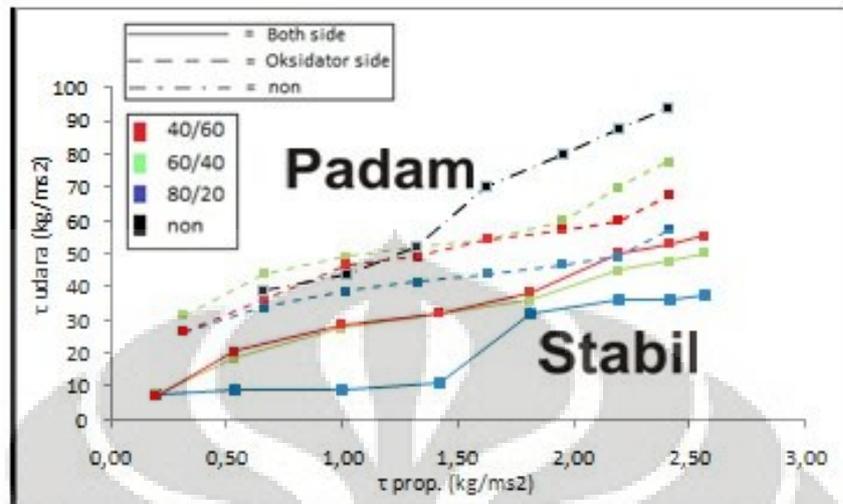
1. Untuk menjaga nyala tetap di dalam daerah stabil, maka kebutuhan suplai propana untuk setiap kenaikan fluks momentum udara (τ_{udara}) harus juga ditingkatkan.
2. Bila dibandingkan antara nosel $\varnothing 18.5$ mm, $\varnothing 8.5$ mm, dan $\varnothing 5.5$ mm. Nilai limit stabilitas yang paling tinggi didapatkan pada diameter nosel $\varnothing 8.5$ mm, nilai ini dapat dilihat dari gradien rata-rata nosel $\varnothing 8.5$ mm yang paling tinggi yaitu mendekati angka 50 (lihat gambar 4.11)

4.2 Pembahasan Pengaruh Penambahan *Co-flow*

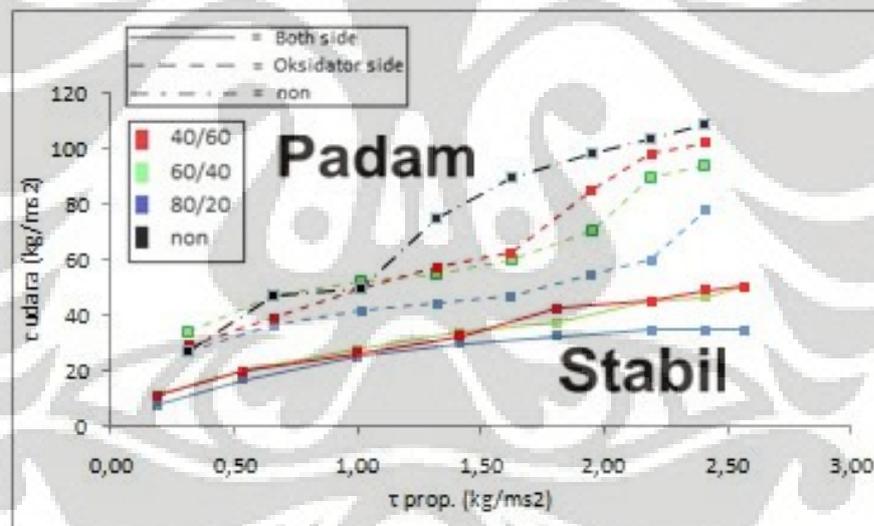
4.2.1 Nosel 5.5 mm



Gambar 4. 12. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_F pada nosel 5.5 mm, untuk $L/d = 2.7$



Gambar 4. 13. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_F pada nosel 5.5 mm, untuk $L/d = 2.43$



Gambar 4. 14. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_F pada nosel 5.5 mm, untuk $L/d = 2.16$

Pada nosel 5.5 mm, dapat dikatakan bahwa adanya penambahan *Co-Flow* menyebabkan turunnya limit stabilitas nyala dan itu sangat terlihat jika kita membandingkan grafiknya pada setiap rasio Q_{N_2}/Q_F . Dengan adanya *Co-Flow*, mengakibatkan campuran bahan bakar dan udara, tidak bisa berdifusi dengan udara luar, maka satu-satunya sumber oksigen untuk nyala api berasal dari suplai udara.

Jika kita lihat grafik *fuel side Co-Flow* maka jelaslah bahwa semakin besar volume nitrogen yang digunakan dibandingkan volume bahan bakarnya, akan menyebabkan turunnya stabilitas nyala, dan hal itu diperkuat oleh grafik *Both side Co-Flow* dimana jarang sekali terjadi *shifting* antara Q_{N_2}/Q_f tinggi dan Q_{N_2}/Q_f rendah.

Perlu diketahui bahwa dengan mengkuadratkan rasio debit Q_{N_2}/Q_f , maka akan didapat rasio fluks momentum τ_{N_2}/τ_f (fluks momentum nitrogen terhadap fluks momentum propana).

Q_{N_2}/Q_f	40/60	50/50	60/40	70/30	80/20
τ_{N_2}/τ_f	4/9	1/1	9/4	49/9	16/1

Tabel 4. 1. Hubungan antara Rasio Debit Q_{N_2}/Q_f dan Rasio Fluks Momentum τ_{N_2}/τ_f

Jika kita ingin mengambil salah satu rasio debit Q_{N_2}/Q_f dan membandingkannya dengan hasil *Non Co-Flow*, maka yang patut diambil adalah rasio debit 40/60, mengingat rasio ini adalah yang paling mendekati keadaan *Non Co-Flow*

L/d	τ udara (kg/ms ²)			$\Delta\tau$ udara (kg/ms ²)		
	non	Fuel side	both side	non-Fuel	non-both	Fuel-both
2,16	74,76	48,37	34,42	↓ 35,30 %	↓ 53,96 %	↓ 28,83 %
2,43	61,62	42,20	35,69	↓ 31,52 %	↓ 42,08 %	↓ 15,42 %
2,7	56,56	38,31	34,78	↓ 32,27 %	↓ 38,51 %	↓ 9,20 %

Tabel 4. 2. Perbandingan Fluks Momentum Udara Limit Stabilitas Nyala dari *Non Co-Flow* ke Rasio 40/60 untuk Nosel 5.5 mm

Kemudian kami juga melihat faktor kondisi mampu nyala suatu campuran karena propana memiliki batas bawah mampu nyala yaitu sebesar 2,2 % (0,022)

seperti yang telah dijelaskan di BAB 2. Berikut adalah tabel perubahan perbandingan $Q_{\text{fuel}}/Q_{\text{mix}}$ untuk ketiga jenis nosel.

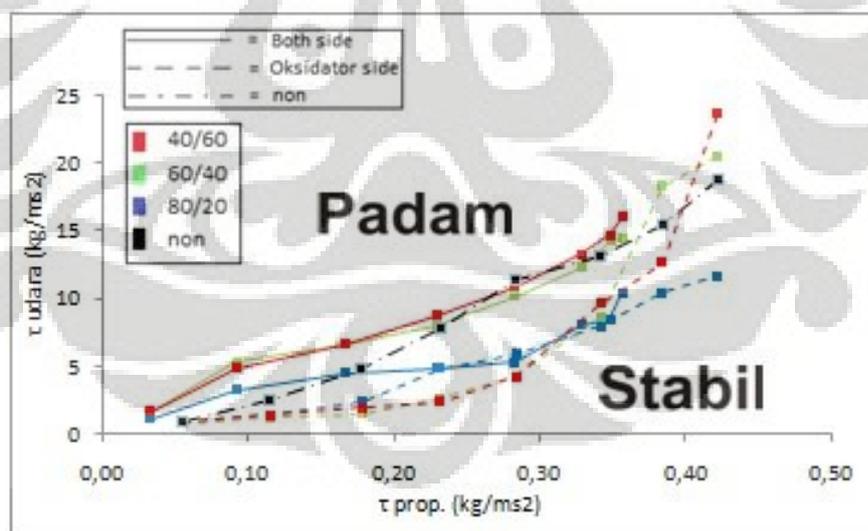


L/d	Q fuel / Q mix			Δ Q fuel / Q mix		
	non	Fuel side	both side	non-Fuel	non-both	Fuel-both
2,16	0,0974	0,0975	0,0706	↑ 0,03 %	↓ 27,51 %	↓ 27,53 %
2,43	0,1060	0,1081	0,0709	↑ 1,98 %	↓ 33,08 %	↓ 34,38 %
2,7	0,1102	0,1124	0,0705	↑ 2,01 %	↓ 36,04 %	↓ 37,30 %

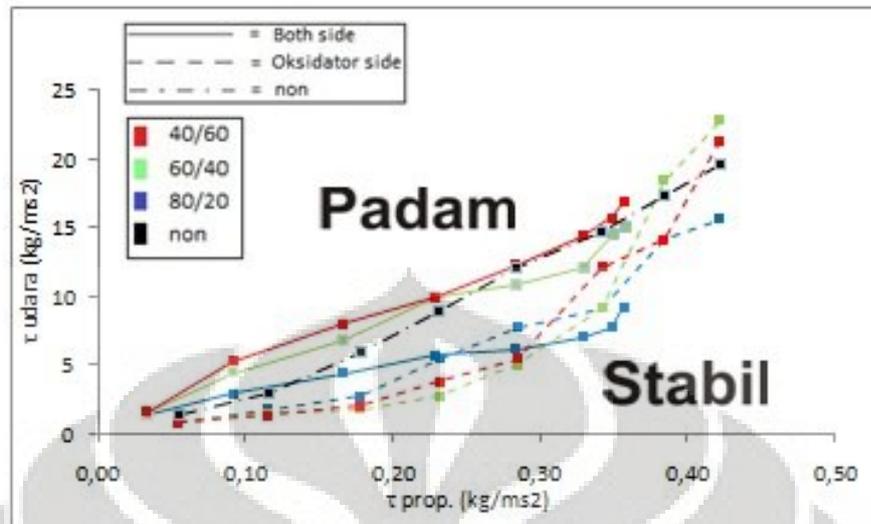
Tabel 4. 3. Perbandingan Q_{fuel}/Q_{mix} Limit Stabilitas Nyala dari *Non Co-Flow* ke Rasio 40/60 untuk Nosel 5.5 mm

Dari kedua tabel diatas, dapat kita simpulkan bahwa penambahan *Co-Flow* berpengaruh baik pada penurunan fluks momentum udara yang dibutuhkan, maupun penurunan volume rasio debit bahan bakar-debit campuran sehingga mendekati batas bawah mampu nyalanya. Kenaikan Q_{fuel}/Q_{mix} yang terjadi pada *fuel side Co-flow* masih sangat kecil, sehingga tidak berpengaruh signifikan.

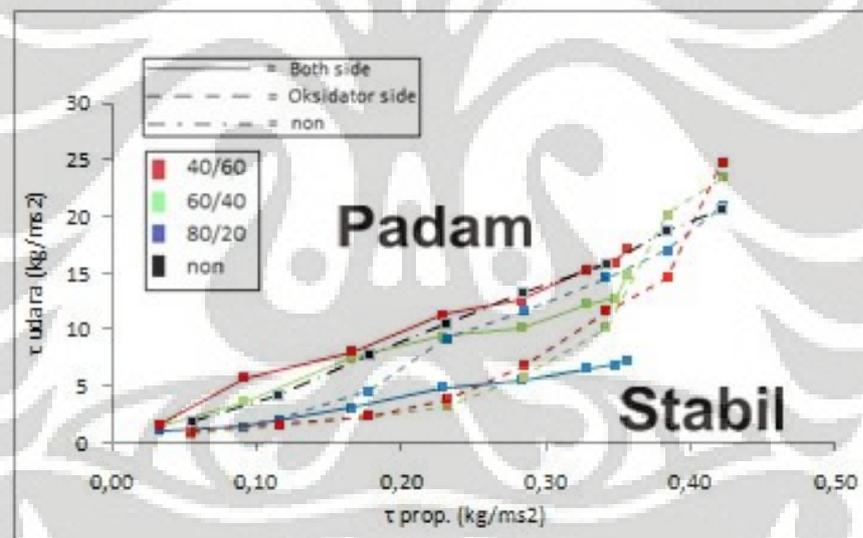
4.2.2 Nosel 8.5 mm



Gambar 4. 15. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_f pada nosel 8.5 mm, untuk $L/d = 2.7$



Gambar 4. 16. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_F pada nosel 8.5 mm, untuk $L/d = 2.43$

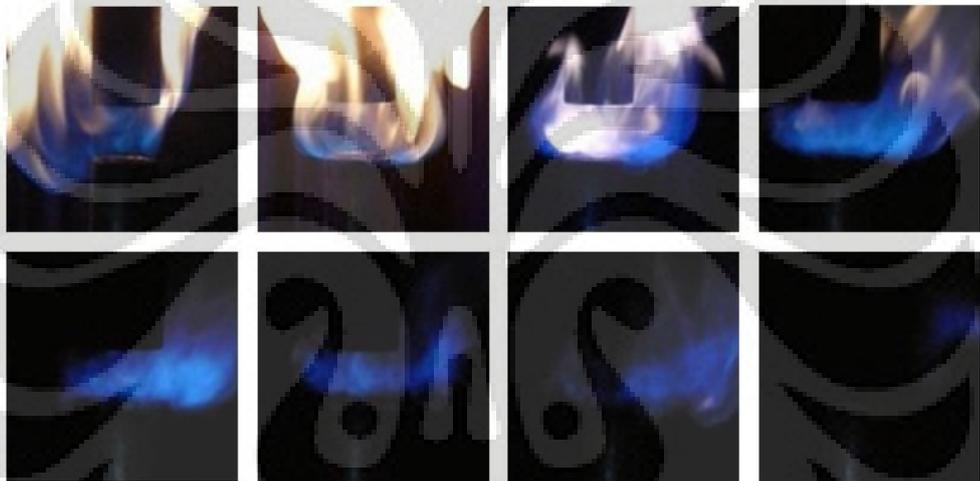


Gambar 4. 17. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_F pada nosel 8.5 mm, untuk $L/d = 2.16$

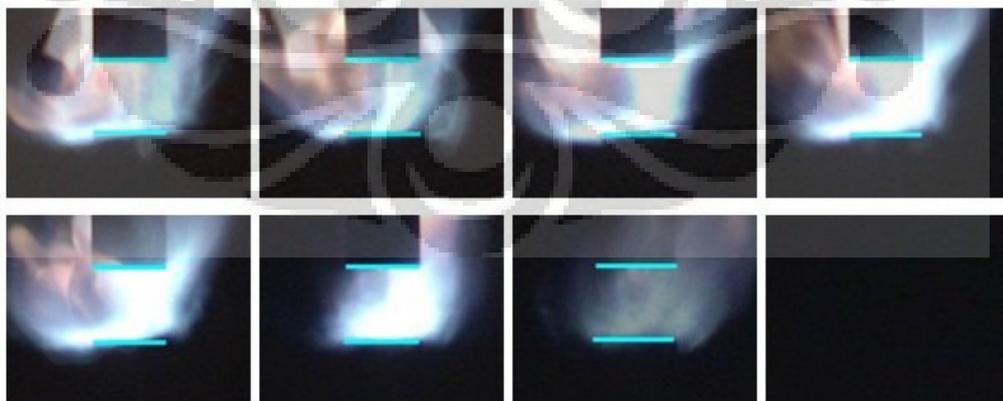
Jika kita perhatikan, hal yang berbeda terjadi di nosel 8,5 mm dimana grafik *Both side Co-Flow* berada di atas *fuel side Co-Flow*, sedangkan *Non Co-Flow* berada di tengah-tengah. Dengan demikian adanya penambahan *Co-Flow* bisa disimpulkan bahwa letak dari *Co-Flow* memberikan pengaruh yang berbeda pada stabilitas nyala. Kondisi ketidaksimetrisan *Co-Flow* yang terjadi pada nosel dengan *fuel side Co flow* menyebabkan nitrogen yang keluar, bukan hanya

bertindak sebagai selubung, tetapi sekaligus mengganggu kestabilan nyala, sehingga menurunkan fluks ketabilan nyala. Dari grafik juga dapat dilihat, hanya rasio 80/20 saja yang berada dibawah *fuel side Co-Flow* nya.

Pada nosel 8,5 mm secara umum, kondisi *Both side Co-Flow* berada diatas *fuel side Co-Flow*nya, hal ini paling terlihat jelas untuk L/d 2,7. Berdasarkan penampakan api yang penulis ambil untuk rasio 40/60 pada L/d 2,7 (Lihat gambar 4.23.) nyala api terlihat sangat berubah dari turbulen dan berwarna *orange* ketika debit udara dan nitrogen *Co-Flow* arah oksidator masih kecil, menjadi sangat turbulen dan berwarna biru sempurna ketika mendekati kondisi *extinct*.



Gambar 4. 18. Kondisi penampakan api dari awal hingga *extinct* nosel *Both side Co-Flow*



Gambar 4. 19. Kondisi penampakan api dari awal hingga *extinct* nosel *fuel side Co-Flow*

Dari gambar 4.18 dan 4.19 terlihat jelas bahwa *extinction* pada nosel *Both side Co-Flow* terjadi tidak jauh dari saat reaksi sempurna, dimana api berwarna biru dan stabil, hal ini mengindikasikan nitrogen yang digunakan berhasil menyelubungi api, sehingga pembakaran yang baik dapat tercapai. Sedangkan pada nosel *fuel side*, api masih berwarna *orange* ketika menjelang *extinction* yang menunjukkan tingginya emisi dimana ketika pembakaran sempurna belum tercapai, api sudah padam karena adanya gangguan dari nitrogen.

L/d	τ udara (kg/ms ²)			$\Delta\tau$ udara (kg/ms ²)		
	non	Fuel side	both side	non-Fuel	non-both	Fuel-both
2,16	11,5754	8,33	10,96	↓ 28,05 %	↓ 5,31 %	↑ 31,60 %
2,43	10,3633	7,70	10,51	↓ 25,65 %	↑ 1,37 %	↑ 36,34 %
2,7	9,3417	7,09	9,56	↓ 24,13 %	↑ 2,32 %	↑ 34,87 %

Tabel 4. 4. Perbandingan Fluks Momentum Udara Limit Stabilitas Nyala dari *Non Co-Flow* ke Rasio 40/60 untuk Nosel 8.5 mm

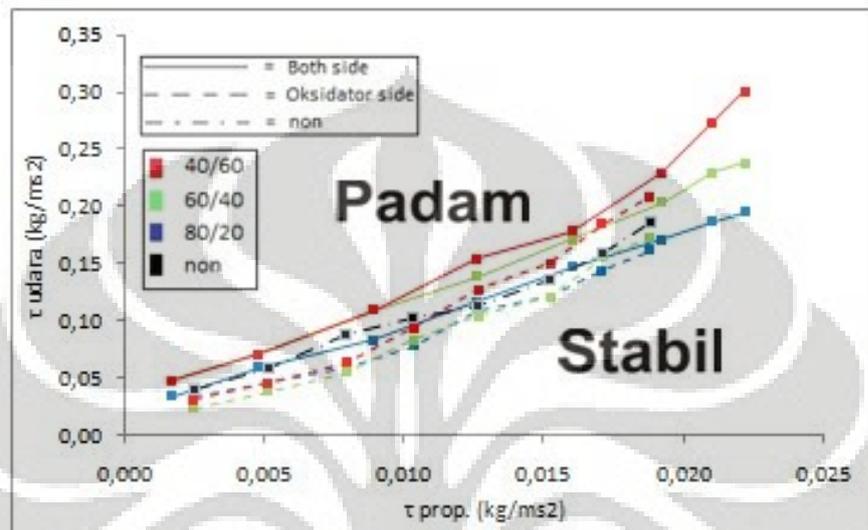
L/d	Q fuel / Q mix			Δ Q fuel / Q mix		
	non	Fuel side	both side	non-Fuel	non-both	Fuel-both
2,16	0,1056	0,1202	0,0563	↑ 13,78 %	↓ 46,75 %	↓ 53,20 %
2,43	0,1121	0,1249	0,0573	↑ 11,45 %	↓ 48,86 %	↓ 54,12 %
2,7	0,1184	0,1303	0,0598	↑ 10,08 %	↓ 49,51 %	↓ 54,14 %

Tabel 4. 5. Penurunan Rasio $Q_{\text{Fuel}} / Q_{\text{mix}}$ Limit Stabilitas Nyala dari *Non Co-Flow* ke Rasio 40/60 untuk Nosel 8.5 mm

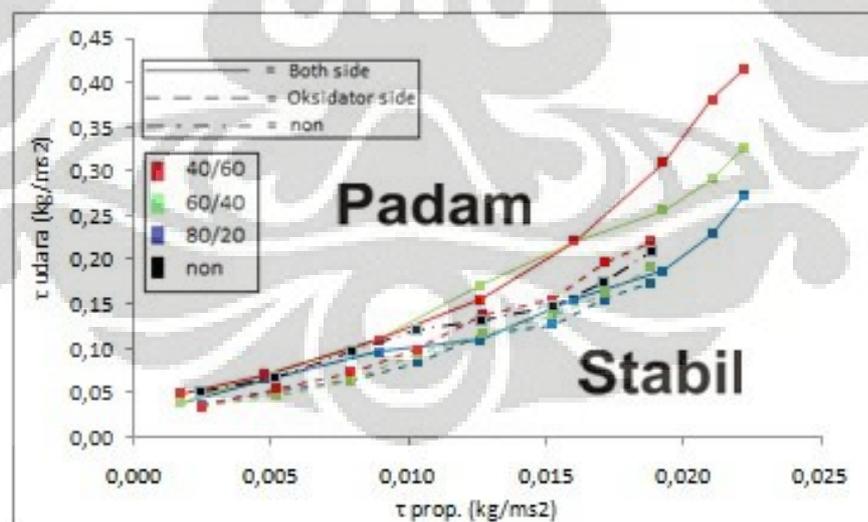
Dari tabel 4.4 diatas dapat dilihat bahwa kondisi *Both side Co-Flow* menyebabkan rasio $Q_{\text{fuel}} / Q_{\text{mix}}$ turun sehingga lebih mendekati batas mampu nyalanya sebuah campuran, dan fluks momentum udara secara umum naik dari *Non Co-Flow* dan *fuel Side Co-Flow*, mengindikasikan api yang lebih sulit untuk

padam. Namun untuk lebih detailnya fenomena fluktuasi naik-turunnya fluks momentum udara ini belum dapat kami jelaskan.

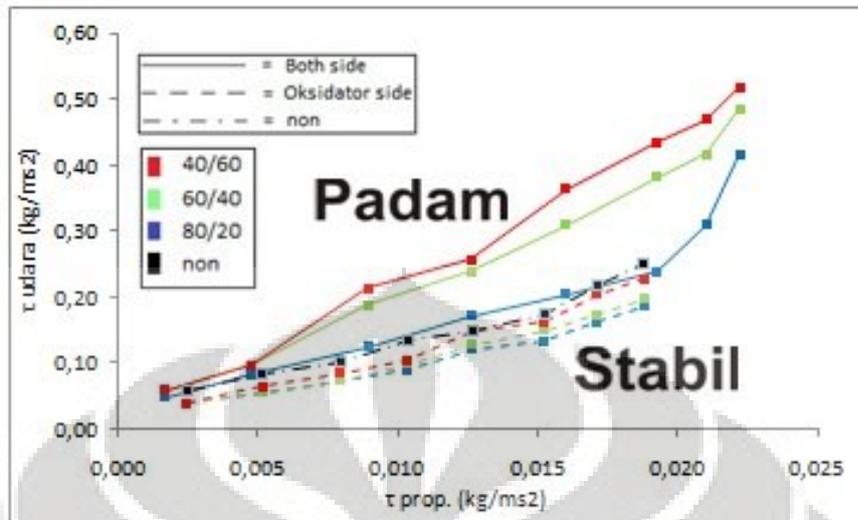
4.2.3 Nosel 18.5 mm



Gambar 4.20. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_f pada nosel 18.5 mm, untuk $L/d = 2.7$



Gambar 4. 21. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_f pada nosel 18.5 mm, untuk $L/d = 2.43$



Gambar 4. 22. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_F pada nosel 18.5 mm, untuk $L/d = 2.16$

Sementara itu, untuk nosel 18,5 mm hasilnya tidak jauh berbeda dibanding nosel 8,5 mm hanya saja pada nosel 18,5 grafiknya lebih berhimpit untuk untuk L/d 2,7 dan 2,43 dan lebih diatas pada L/d 2,16.

L/d	τ udara (kg/ms ²)			$\Delta\tau$ udara (kg/ms ²)		
	non	Fuel side	both side	non-Fuel	non-both	Fuel-both
2,16	0,1453	0,1287	0,3007	↓ 11,38 %	↑ 107,00 %	↑ 133,59 %
2,43	0,1249	0,1215	0,2139	↓ 2,71 %	↑ 71,21 %	↑ 75,98 %
2,7	0,1105	0,1130	0,1706	↑ 2,25 %	↑ 54,38 %	↑ 50,99 %

Tabel 4. 6. Perbandingan Fluks Momentum Udara Limit Stabilitas Nyala *Non Co-Flow* ke Rasio 40/60 untuk Nosel 18.5 mm.

L/d	Q fuel / Q mix			ΔQ fuel / Q mix		
	non	Fuel side	both side	non-Fuel	non-both	Fuel-both
2,16	0,1782	0,1484	0,0684	↓ 16,77 %	↓ 61,63 %	↓ 53,90 %
2,43	0,1892	0,1740	0,0812	↓ 8,06 %	↓ 57,11 %	↓ 53,35 %
2,7	0,1992	0,1791	0,0866	↓ 10,12 %	↓ 56,53 %	↓ 51,64 %

Tabel 4. 7. Perbandingan Rasio Q_{Fuel}/Q_{mix} Limit Stabilitas Nyala dari *Non Co-Flow* ke Rasio 40/60 untuk Nosel 18.5 mm.

Pada nosel 18,5 mm terlihat bahwa Penggunaan *Both side Co-Flow* akan mengakibatkan kestabilan nyala berada jauh diatas *Non Co-Flow* ataupun *fuel side Co-Flow*. Hal ini diperkuat dengan perubahan yang semakin signifikan pada L/d yang lebih kecil.

Secara keseluruhan nosel *Both side Co-Flow*, dalam penelitian ini, merupakan nosel yang berhasil membuat api paling stabil, ini terbukti dengan naiknya fluks momentum udara (τ_{udara}), dan menurunnya rasio Q_{Fuel} / Q_{mix} sampai mendekati titik kritis dimana bahan bakar (propana) tidak mungkin terbakar. Namun untuk detail *shifting* kenaikan fluks momentum udara belum dapat kami jelaskan.

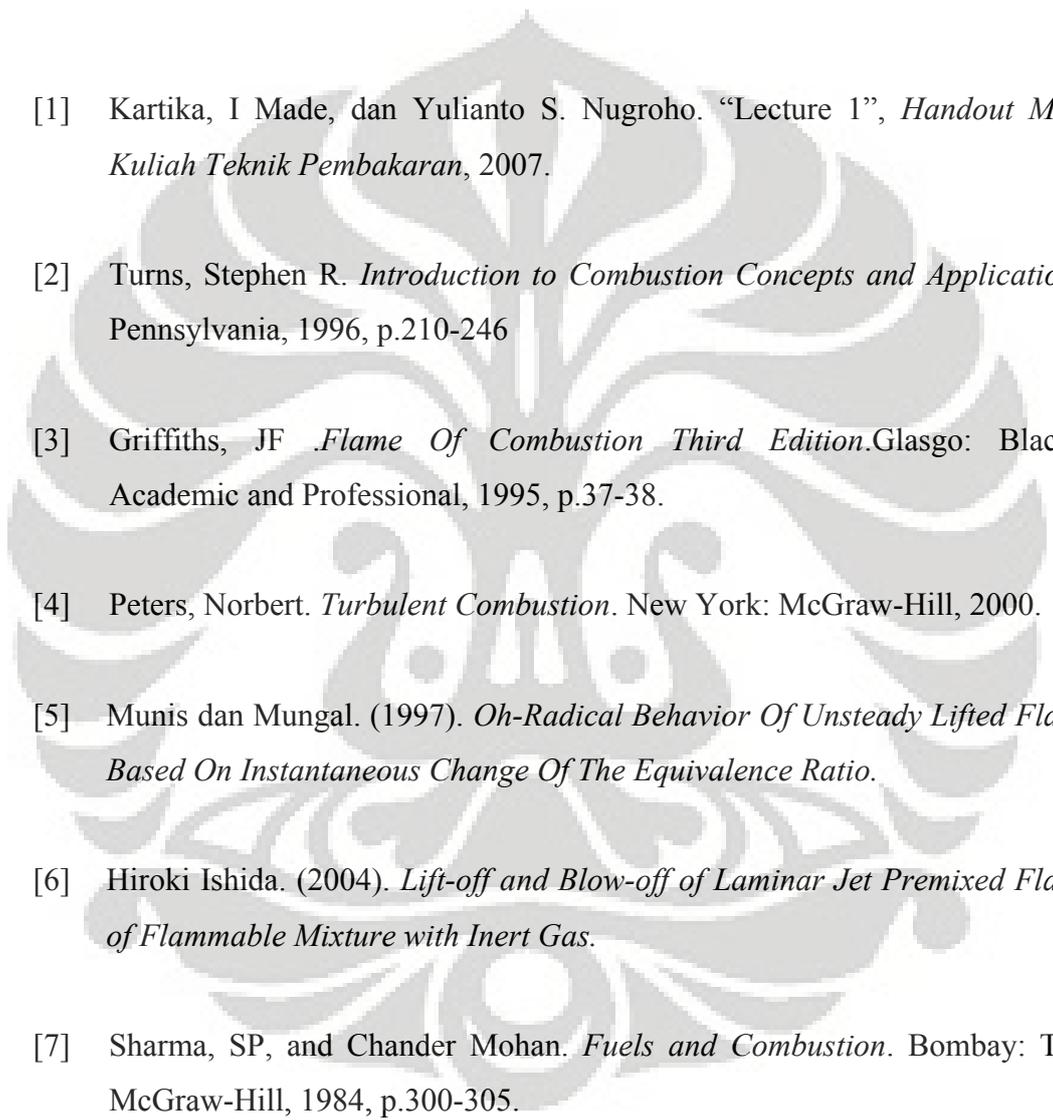


BAB 5 KESIMPULAN

Berdasarkan data, hasil pengolahan data, dan pembahasan mengenai limit stabilitas nyala yang penulis uraikan sebelumnya, maka terdapat beberapa kesimpulan berdasarkan penelitian ini, terutama yang berhubungan dengan pengaruh penambahan *Co-Flow* dan dinamika fluidanya, yakni:

1. Secara umum, dapat disimpulkan 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 nyalanya akan menurun. Hal ini dapat dijelaskan bahwa dengan adanya aliran nitrogen yang menyelubungi daerah reaksi mencegah terjadinya difusi dengan udara sekitar sehingga suplai udara yang menunjang terjadinya pembakaran hanya berasal dari nosel udara.
2. Penggunaan *Both side Co-Flow* gas inert menyebabkan nyala api bertahan hingga mendekati titik kritis mampu nyala bahan bakarnya.
3. Penggunaan *Both side Co-Flow* berpengaruh menurunkan rasio Q_{fuel}/Q_{mix} sejauh 46,33 % dari hasil tanpa *Co-Flow* dan 35,22 % dari hasil *Co-Flow* hanya di sisi bahan bakar.

DAFTAR REFERENSI

- 
- [1] Kartika, I Made, dan Yulianto S. Nugroho. "Lecture 1", *Handout Mata Kuliah Teknik Pembakaran*, 2007.
- [2] Turns, Stephen R. *Introduction to Combustion Concepts and Applications*. Pennsylvania, 1996, p.210-246
- [3] Griffiths, JF *Flame Of Combustion Third Edition*. Glasgo: Blackie Academic and Professional, 1995, p.37-38.
- [4] Peters, Norbert. *Turbulent Combustion*. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [5] Munis dan Mungal. (1997). *Oh-Radical Behavior Of Unsteady Lifted Flame Based On Instantaneous Change Of The Equivalence Ratio*.
- [6] Hiroki Ishida. (2004). *Lift-off and Blow-off of Laminar Jet Premixed Flame of Flammable Mixture with Inert Gas*.
- [7] Sharma, SP, and Chander Mohan. *Fuels and Combustion*. Bombay: Tata McGraw-Hill, 1984, p.300-305.
- [8] Peters, Norbert. *Turbulent Combustion*. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [9] F. Lacas (EM2C Lab. – CNRS France).

- [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).
- [11] Rolon, J. C, et all. "Experiments on the Interaction between a Vortex and a Strained Diffusion Flame." *Combustion and Flame*, 100 (1995), p.422-429.
- [12] Eun Do Lee, et all. "Extinction Limit Extension of Unsteady Counterflow Diffusion Flames Affected by Velocity Change." *Combustion and Flame*, 144 (2006), p.792-808.
- [13] Katta, V. R., et all. "Extinction Criterion for Unsteady, Opposing Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, 137 (2004), p.198-221.
- [14] Jongmook Lim, et all. "A Study of the Effects of Air Preheat on the Structure of Methane/Air Counterflow Diffusion Flames." *Combustion and Flame*, 121 (2000), p.262-274.
- [15] Santoianni, Dawn A, and Michelle Dercoix. (2000). *Temperature Imaging Unsteady Propane Air*.
- [16] Carnell Jr., W.F. and M.W. Renfro, *Combustion Flame*, 141 (2005), p.350 – 359.
- [17] Kim, I.E.S and Mastorakos. (2006). *Simulations of Turbulent Non-Premixed Counterflow Flames with First-Order Conditional Moment Closure*.
- [18] Park, June Sung, et. all. (2006). *Edge flame instability in low-strain-rate counterflow diffusion flames*.
- [19] C.H. Sohn, S.H. Chung, J.S. Kim, *Combust. Flame* 117 (1999) 404–412.

- [20] Furjianto. *Pengaruh Rasio Gap-Diameter Nosel (L/d) terhadap Karakteristik Nyala Difusi pada Medan Aliran Berlawanan (Counter-Flow)*, Skripsi. 2008. Depok: Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.
- [21] Munandar, Haris. *Pengaruh Penambahan Co-Flow Gas Inert (N₂) Terhadap Stabilitas Nyala Pada Medan Aliran Berlawanan*, Skripsi. 2009. Depok: Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.
- [22] Incropera, Frank P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer Fifth Edition*. 2002. Singapore: John Willey & Sons (Asia).
- [23] Santoianni, Dawn A, et. all. (2000). *Temperature Imaging in an Unsteady Propane-Air Counterflow Diffusion Flame Subjected to Low Frequency Oscillations*.



Lampiran

Tabel pengolahan data nosel *both co-flow*



Data Nosel 5,5 mm

Parameter:

L/d	2,16
d. Nosel (mm)	5,5
h. BP (mm)	300
V.G	26
QN2/Quara	50/50

ρ propana	1,854 kg/m ³
ρ udara	1,161 kg/m ³

QN2/Qf 80/20

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	77	0,1029	40	1,5676	26	0,1793	0,1911	7,6629
2	98	0,5373	168	0,1624	90	1,5940	58	0,2438	0,5352	16,4496
3	151	0,7337	263	0,2138	130	1,6204	89	0,3044	0,9980	25,0832
4	196	0,8740	346	0,2499	150	1,6468	107	0,3387	1,4162	29,7975
5	240	0,9877	427	0,2771	160	1,6731	115	0,3537	1,8087	32,2333
6	289	1,0870	517	0,2981	170	1,6994	125	0,3723	2,1905	34,7140
7	324	1,1402	582	0,3073	170	1,7256	125	0,3723	2,4105	34,7140
8	356	1,1761	642	0,3112	170	1,7518	125	0,3723	2,5644	34,7140

QN2/Qf 70/30

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	26	0,0690	40	2,5691	26	0,2033	0,1911	7,6629
2	98	0,5373	55	0,0869	90	3,7641	58	0,2662	0,5352	16,4496
3	151	0,7337	86	0,1090	165	5,3691	120	0,3214	0,9980	33,4684
4	196	0,8740	113	0,1276	180	5,6631	134	0,3630	1,4162	37,2341
5	240	0,9877	140	0,1450	182	5,7016	136	0,3885	1,8087	37,7423
6	289	1,0870	169	0,1632	200	6,0411	153	0,4400	2,1905	42,3706
7	324	1,1402	191	0,1758	210	6,2241	162	0,4486	2,4105	44,9765
8	356	1,1761	211	0,1869	220	6,4031	172	0,4744	2,5644	47,6006

QN2/Qf 60/40

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	11	0,0539	60	3,0591	38	0,2033	0,1911	10,8647
2	98	0,5373	22	0,0622	105	4,1031	69	0,2662	0,5352	19,5459
3	151	0,7337	34	0,0714	140	4,8591	98	0,3214	0,9980	27,4122
4	196	0,8740	45	0,0797	165	5,3691	120	0,3630	1,4162	33,4684
5	240	0,9877	56	0,0878	180	5,6631	134	0,3885	1,8087	37,2341
6	289	1,0870	68	0,0965	210	6,2241	162	0,4400	2,1905	44,9765
7	324	1,1402	76	0,1022	215	6,3141	167	0,4486	2,4105	46,2866
8	356	1,1761	84	0,1079	230	6,5781	182	0,4744	2,5644	50,2381

QN2/Qf 50/50

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	6	0,0501	60	3,0591	38	0,2033	0,1911	10,8647
2	98	0,5373	11	0,0536	90	3,7641	58	0,2440	0,5352	16,4496
3	151	0,7337	16	0,0575	145	4,9631	102	0,3296	0,9980	28,5982
4	196	0,8740	20	0,0607	180	5,6631	134	0,3885	1,4162	37,2341
5	240	0,9877	24	0,0635	200	6,0411	153	0,4228	1,8087	42,3706
6	289	1,0870	29	0,0676	215	6,3141	167	0,4486	2,1905	46,2866
7	324	1,1402	33	0,0706	220	6,4031	172	0,4572	2,4105	47,6006
8	356	1,1761	36	0,0729	230	6,5781	182	0,4744	2,5644	50,2381

QN2/Qf 60/40

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	6	0,0501	60	3,0591	38	0,2033	0,1911	10,8647
2	98	0,5373	11	0,0536	90	3,7641	58	0,2440	0,5352	16,4496
3	151	0,7337	16	0,0575	145	4,9631	102	0,3296	0,9980	28,5982
4	196	0,8740	20	0,0607	180	5,6631	134	0,3885	1,4162	37,2341
5	240	0,9877	24	0,0638	200	6,0411	153	0,4228	1,8087	42,3706
6	289	1,0870	29	0,0676	215	6,3141	167	0,4486	2,1905	46,2866
7	324	1,1402	33	0,0706	220	6,4031	172	0,4572	2,4105	47,6006
8	356	1,1761	36	0,0729	230	6,5781	182	0,4744	2,5644	50,2381

Data Nosel 5,5 mm (lanjutan)

Parameter:

L/d	2,43
d. Nosel (mm)	5,5
h. BP (mm)	300
V.G	2d
QN2:Qudara	50/50

p propana	1,854 kg/m ³
p udara	1,161 kg/m ³

QN2/Qf 80/20

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	77	0,1029	40	2,5691	26	0,1794	0,1911	7,6629
2	98	0,5373	168	0,1624	50	2,8161	32	0,1910	0,5352	9,2072
3	151	0,7337	263	0,2138	50	2,8161	32	0,1910	0,9980	9,2072
4	196	0,8740	346	0,2499	60	3,0591	38	0,2033	1,4162	10,8647
5	240	0,9877	427	0,2771	160	5,2691	115	0,3546	1,8087	32,2333
6	289	1,0870	517	0,2981	175	5,5661	129	0,3800	2,1905	35,9695
7	324	1,1402	582	0,3073	175	5,5661	129	0,3800	2,4105	35,9695
8	356	1,1761	642	0,3112	180	5,6631	134	0,3885	2,5644	37,2341

QN2/Qf 70/30

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	26	0,0650	60	3,0591	38	0,2033	0,1911	10,8647
2	98	0,5373	55	0,0869	60	3,0591	38	0,2033	0,5352	10,8647
3	151	0,7337	86	0,1090	140	4,8591	98	0,3214	0,9980	27,4122
4	196	0,8740	113	0,1276	160	5,2691	115	0,3546	1,4162	32,2333
5	240	0,9877	140	0,1450	165	5,3691	120	0,3630	1,8087	33,4684
6	289	1,0870	169	0,1632	180	5,6631	134	0,3885	2,1905	37,2341
7	324	1,1402	191	0,1758	200	6,0411	153	0,4228	2,4105	42,3706
8	356	1,1761	211	0,1869	220	6,4031	172	0,4572	2,5644	47,6006

QN2/Qf 60/40

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	11	0,0539	40	2,5691	26	0,1794	0,1911	7,6629
2	98	0,5373	22	0,0625	100	3,9911	66	0,2587	0,5352	18,4934
3	151	0,7337	34	0,0717	140	4,8591	98	0,3214	0,9980	27,4122
4	196	0,8740	45	0,0798	160	5,2691	115	0,3546	1,4162	32,2333
5	240	0,9877	56	0,0876	175	5,5661	129	0,3800	1,8087	35,9695
6	289	1,0870	68	0,0962	210	6,2241	162	0,4400	2,1905	44,9765
7	324	1,1402	76	0,1023	220	6,4031	172	0,4572	2,4105	47,6006
8	356	1,1761	84	0,1079	230	6,5781	182	0,4744	2,5644	50,2381

QN2/Qf 50/50

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 bwf	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	6	0,0501	40	2,5691	26	0,1794	0,1911	7,6629
2	98	0,5373	11	0,0534	115	4,3241	77	0,2815	0,5352	21,7082
3	151	0,7337	16	0,0573	145	4,9631	102	0,3296	0,9980	28,5982
4	196	0,8740	20	0,0607	160	5,2691	115	0,3546	1,4162	32,2333
5	240	0,9877	24	0,0641	205	6,1331	158	0,4314	1,8087	43,6709
6	289	1,0870	29	0,0679	210	6,2241	162	0,4400	2,1905	44,9765
7	324	1,1402	33	0,0707	225	6,4911	177	0,4658	2,4105	48,9180
8	356	1,1761	36	0,0732	240	6,7491	192	0,4914	2,5644	52,8840

QN2/Qf 40/60

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	5	0,0487	35	2,4441	23	0,1739	0,1911	6,9354
2	98	0,5373	6	0,0499	110	4,2141	73	0,2738	0,5352	20,6178
3	151	0,7337	8	0,0513	145	4,9631	102	0,3296	0,9980	28,5982
4	196	0,8740	10	0,0527	160	5,2691	115	0,3546	1,4162	32,2333
5	240	0,9877	12	0,0541	185	5,7591	138	0,3970	1,8087	38,5072
6	289	1,0870	14	0,0557	230	6,5781	162	0,4744	2,1905	50,2381
7	324	1,1402	15	0,0568	240	6,7491	192	0,4914	2,4105	52,8840
8	356	1,1761	16	0,0579	250	6,9161	202	0,5084	2,5644	55,5335

Data Nosel 5,5 mm (lanjutan)

Parameter:

L'd	2,7
d. Nosel (mm)	5,5
h. BP (mm)	300
V.G	2d
QN2/Qudara	50/50

p propana	1,8540
p udara	1,1614

QN2/Qf 80/20

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	77	0,1029	40	2,5691	26	0,1794	0,1911	7,6629
2	98	0,5373	168	0,1624	45	2,6931	29	0,1851	0,5352	8,4205
3	151	0,7337	263	0,2138	100	3,9911	66	0,2587	0,9980	18,4934
4	196	0,8740	346	0,2499	160	5,2691	115	0,3546	1,4162	32,2333
5	240	0,9877	427	0,2771	170	5,4681	125	0,3715	1,8087	34,7140
6	289	1,0870	517	0,2981	180	5,6631	134	0,3885	2,1905	37,2341
7	324	1,1402	582	0,3073	182	5,70162	136	0,3919	2,4105	37,7423
8	356	1,1761	642	0,3112	185	5,7591	138	0,3970	2,5644	38,5072

QN2/Qf 70/30

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	26	0,0650	40	2,5691	26	0,1794	0,1911	7,6629
2	98	0,5373	55	0,0869	60	3,0591	38	0,2033	0,5352	10,8647
3	151	0,7337	86	0,1090	150	5,0661	107	0,3379	0,9980	29,7975
4	196	0,8740	113	0,1276	160	5,2691	115	0,3546	1,4162	32,2333
5	240	0,9877	140	0,1450	170	5,4681	125	0,3715	1,8087	34,7140
6	289	1,0870	169	0,1632	170	5,4681	125	0,3715	2,1905	34,7140
7	324	1,1402	191	0,1758	195	5,9481	148	0,4142	2,4105	41,0761
8	356	1,1761	211	0,1869	195	5,9481	148	0,4142	2,5644	41,0761

QN2/Qf 60/40

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	11	0,0539	40	2,5691	26	0,1794	0,1911	7,6629
2	98	0,5373	22	0,0625	70	3,2981	44	0,2163	0,5352	12,6287
3	151	0,7337	34	0,0717	140	4,8591	98	0,3214	0,9980	27,4122
4	196	0,8740	45	0,0798	160	5,2691	115	0,3546	1,4162	32,2333
5	240	0,9877	56	0,0876	170	5,4681	125	0,3715	1,8087	34,7140
6	289	1,0870	68	0,0962	220	6,4031	172	0,4572	2,1905	47,6006
7	324	1,1402	76	0,1023	215	6,3141	167	0,4486	2,4105	46,2866
8	356	1,1761	84	0,1079	230	6,5781	182	0,4744	2,5644	50,2381

QN2/Qf 50/50

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	6	0,0501	40	2,5691	26	0,1794	0,1911	7,6629
2	98	0,5373	11	0,0584	65	3,1791	41	0,2097	0,5352	11,7339
3	151	0,7337	16	0,0573	150	5,0661	107	0,3379	0,9980	29,7975
4	196	0,8740	20	0,0607	180	5,6631	134	0,3885	1,4162	37,2341
5	240	0,9877	24	0,0641	190	5,8541	143	0,4056	1,8087	39,7880
6	289	1,0870	29	0,0679	180	5,6631	134	0,3885	2,1905	37,2341
7	324	1,1402	33	0,0707	230	6,5781	182	0,4744	2,4105	50,2381
8	356	1,1761	36	0,0732	240	6,7491	192	0,4914	2,5644	52,8840

QN2/Qf 40/60

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,3211	5	0,04867996	50	2,8161	32	0,1910	0,1911	9,2072
2	98	0,5373	6	0,04987191	110	4,2141	73	0,2738	0,5352	20,6178
3	151	0,7337	8	0,05134172	155	5,1681	111	0,3462	0,9980	31,0094
4	196	0,8740	10	0,05271103	170	5,4681	125	0,3715	1,4162	34,7140
5	240	0,9877	12	0,05409957	180	5,6631	134	0,3885	1,8087	37,2341
6	289	1,0870	14	0,05566664	205	6,1331	158	0,4314	2,1905	43,6709
7	324	1,1402	15	0,05682226	230	6,5781	182	0,4744	2,4105	50,2381
8	356	1,1761	16	0,05789364	235	6,6641	187	0,4829	2,5644	51,5603

Data Nosel 8,5 mm

Parameter:

L/d	2,16
d. Nozel (mm)	8,5
h. BP (mm)	300
V.G	2d
QN2:Qudara	50/50

p propena	1,8540
p udara	1,1614

QN2/Qf 80/20

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,1344	77	0,1029	30	0,9710	21	0,1686	0,0335	1,0946
2	98	0,2225	168	0,1624	40	1,0764	26	0,1794	0,0918	1,3452
3	151	0,2995	263	0,2138	95	1,6275	62	0,2513	0,1663	3,0752
4	196	0,3517	346	0,2499	140	2,0424	98	0,3214	0,2293	4,8430
5	240	0,3909	427	0,2771	155	2,1735	111	0,3462	0,2833	5,4847
6	289	0,4209	517	0,2981	180	2,3840	134	0,3885	0,3285	6,5985
7	324	0,4336	582	0,3073	185	2,4249	138	0,3970	0,3485	6,8268
8	356	0,4387	642	0,3112	195	2,5055	148	0,4142	0,3568	7,2882

QN2/Qf 70/30

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,1344	26	0,0650	50	1,1802	32	0,1910	0,0335	1,6171
2	98	0,2225	55	0,0869	115	1,6159	77	0,2815	0,0918	3,8284
3	151	0,2995	86	0,1090	160	2,2164	115	0,3546	0,1663	5,7033
4	196	0,3517	113	0,1276	200	2,5452	153	0,4228	0,2293	7,5210
5	240	0,3909	140	0,1450	230	2,7750	182	0,4744	0,2833	8,9404
6	289	0,4209	169	0,1632	250	2,9202	202	0,5084	0,3285	9,9005
7	324	0,4336	191	0,1758	280	3,1260	232	0,5585	0,3485	11,3451
8	356	0,4387	211	0,1869	295	3,2235	247	0,5829	0,3568	12,0639

QN2/Qf 60/40

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,1344	11	0,0539	45	1,1285	29	0,1851	0,0335	1,4785
2	98	0,2225	22	0,0625	110	1,7694	73	0,2738	0,0918	3,6348
3	151	0,2995	34	0,0717	200	2,5452	153	0,4228	0,1663	7,5210
4	196	0,3517	45	0,0798	240	2,8484	192	0,4914	0,2293	9,4196
5	240	0,3909	56	0,0876	255	2,9555	207	0,5169	0,2833	10,1413
6	289	0,4209	68	0,0962	300	3,2552	252	0,5909	0,3285	12,3023
7	324	0,4336	76	0,1023	310	3,3174	262	0,6068	0,3485	12,7770
8	356	0,4387	84	0,1079	355	3,5775	306	0,6746	0,3568	14,8591

QN2/Qf 50/50

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,1344	5	0,0501	50	1,1802	32	0,1910	0,0335	1,6171
2	98	0,2225	11	0,0534	150	2,1302	107	0,3379	0,0918	5,2683
3	151	0,2995	16	0,0573	180	2,3840	134	0,3885	0,1663	6,5985
4	196	0,3517	20	0,0607	245	2,8845	197	0,4999	0,2293	9,6599
5	240	0,3909	24	0,0641	290	3,1914	242	0,5748	0,2833	11,8248
6	289	0,4209	29	0,0679	320	3,3780	272	0,6224	0,3285	13,2480
7	324	0,4336	33	0,0707	360	3,6044	311	0,6818	0,3485	15,0834
8	356	0,4387	36	0,0732	385	3,7329	335	0,7163	0,3568	16,1780

QN2/Qf 40/60

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,1344	5	0,0487	50	1,1802	32	0,1910	0,0335	1,6171
2	98	0,2225	6	0,0499	160	2,2164	115	0,3546	0,0918	5,7033
3	151	0,2995	8	0,0513	210	2,6234	162	0,4400	0,1663	7,9903
4	196	0,3517	10	0,0527	280	3,1260	232	0,5585	0,2293	11,3451
5	240	0,3909	12	0,0541	305	3,2865	257	0,5989	0,2833	12,5401
6	289	0,4209	14	0,0557	365	3,6309	316	0,6889	0,3285	15,3060
7	324	0,4336	15	0,0568	380	3,7080	330	0,7095	0,3485	15,9629
8	356	0,4387	16	0,0579	410	3,8514	358	0,7485	0,3568	17,2214

Data Nosel 8,5 mm (lanjutan)

Parameter:

L/d	2,43
d. Nosel (mm)	8,5
h. BP (mm)	300
V.G	2d
QN2/Quara	50/50

p propana	1,8540
p udara	1,1614

QN2/Qf 80/20

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,1344	77	0,1029	40	1,0764	26	0,1794	0,0335	1,3452
2	98	0,2225	168	0,1624	90	1,5794	58	0,2440	0,0918	2,8961
3	151	0,2995	263	0,2138	130	1,9530	89	0,3052	0,1663	4,4283
4	196	0,3517	346	0,2499	160	2,2164	115	0,3546	0,2293	5,7033
5	240	0,3909	427	0,2774	170	2,3010	125	0,3715	0,2833	6,1470
6	289	0,4209	517	0,2981	190	2,4654	143	0,4056	0,3285	7,0568
7	324	0,4336	582	0,3073	205	2,5845	158	0,4314	0,3485	7,7551
8	356	0,4387	642	0,3112	235	2,8119	187	0,4829	0,3568	9,1798

QN2/Qf 70/30

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,1344	26	0,0650	40	1,0764	26	0,1794	0,0335	1,3452
2	98	0,2225	55	0,0869	110	1,7694	73	0,2738	0,0918	3,6348
3	151	0,2995	86	0,1090	160	2,2164	115	0,3546	0,1663	5,7033
4	196	0,3517	113	0,1276	200	2,5452	153	0,4228	0,2293	7,5210
5	240	0,3909	140	0,1450	245	2,8845	197	0,4999	0,2833	9,6599
6	289	0,4209	169	0,1632	280	3,1260	232	0,5585	0,3285	11,3451
7	324	0,4336	191	0,1758	290	3,1914	242	0,5748	0,3485	11,8248
8	356	0,4387	211	0,1869	320	3,3780	272	0,6224	0,3568	13,2480

QN2/Qf 60/40

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,1344	11	0,0539	45	1,1285	29	0,1851	0,0335	1,4785
2	98	0,2225	22	0,0625	130	1,9530	89	0,3052	0,0918	4,4283
3	151	0,2995	34	0,0717	185	2,4249	138	0,3970	0,1663	6,8268
4	196	0,3517	45	0,0798	250	2,9202	202	0,5084	0,2293	9,9005
5	240	0,3909	56	0,0876	270	3,0590	222	0,5420	0,2833	10,8640
6	289	0,4209	68	0,0962	295	3,2295	247	0,5829	0,3285	12,0639
7	324	0,4336	78	0,1025	345	3,5225	296	0,6601	0,3485	14,4057
8	356	0,4387	84	0,1079	360	3,6044	311	0,6818	0,3568	15,0834

QN2/Qf 50/50

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,1344	6	0,0501	55	1,2315	35	0,1971	0,0335	1,7608
2	98	0,2225	11	0,0534	145	2,0865	102	0,3296	0,0918	5,0544
3	151	0,2995	16	0,0573	205	2,5845	158	0,4314	0,1663	7,7551
4	196	0,3517	20	0,0607	250	2,9202	202	0,5084	0,2293	9,9005
5	240	0,3909	24	0,0641	290	3,1914	242	0,5748	0,2833	11,8248
6	289	0,4209	29	0,0679	345	3,5225	296	0,6601	0,3285	14,4057
7	324	0,4336	33	0,0707	350	3,5502	301	0,6674	0,3485	14,6332
8	356	0,4387	36	0,0732	410	3,8514	358	0,7485	0,3568	17,2214

QN2/Qf 40/60

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,1344	5	0,0487	50	1,1802	32	0,1910	0,0335	1,6171
2	98	0,2225	6	0,0499	150	2,1302	107	0,3379	0,0918	5,2683
3	151	0,2995	8	0,0513	210	2,6234	162	0,4400	0,1663	7,9903
4	196	0,3517	10	0,0527	250	2,9202	202	0,5084	0,2293	9,9005
5	240	0,3909	12	0,0541	300	3,2552	252	0,5909	0,2833	12,3023
6	289	0,4209	14	0,0557	345	3,5225	296	0,6601	0,3285	14,4057
7	324	0,4336	15	0,0568	375	3,6827	325	0,7027	0,3485	15,7458
8	356	0,4387	16	0,0579	400	3,8052	349	0,7359	0,3568	16,8108

Data Nosel 8,5 mm (lanjutan)

Parameter:

L/d	2,7
d. Nosel (mm)	8,5
h. BP (mm)	300
V.G	2d
QN2/Qudara	50/50

p propana	1,8540
p udara	1,1614

QN2/Qf 80/20

No satuan	h Prop (mm)	v prop (m/s)	h N2 prop (mm)	v N2 prop (m/s)	h udara (mm)	v udara (m/s)	h N2 udr (mm)	v n2 udr (m/s)	τ prop (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	48	0,1344	77	0,1029	30	0,9710	21	0,1686	0,0335	1,0946
2	98	0,2225	168	0,1624	100	1,6752	66	0,2587	0,0918	3,2581
3	151	0,2995	263	0,2138	130	1,9530	89	0,3052	0,1663	4,4283
4	196	0,3517	346	0,2499	140	2,0424	98	0,3214	0,2293	4,8430
5	240	0,3909	427	0,2774	150	2,1302	107	0,3379	0,2833	5,2683
6	289	0,4209	517	0,2981	210	2,6234	162	0,4400	0,3285	7,9903
7	324	0,4336	582	0,3073	220	2,7000	172	0,4572	0,3485	8,4637
8	356	0,4387	642	0,3112	260	2,9904	212	0,5253	0,3568	10,3822

QN2/Qf 70/30

No satuan	h Prop (mm)	v prop (m/s)	h N2 prop (mm)	v N2 prop (m/s)	h udara (mm)	v udara (m/s)	h N2 udr (mm)	v n2 udr (m/s)	τ prop (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	48	0,1344	26	0,0650	50	1,1802	32	0,1910	0,0335	1,6171
2	98	0,2225	55	0,0869	120	1,8620	81	0,2894	0,0918	4,0252
3	151	0,2995	86	0,1090	155	2,1735	111	0,3462	0,1663	5,4847
4	196	0,3517	113	0,1276	195	2,5055	148	0,4142	0,2293	7,2882
5	240	0,3909	140	0,1450	225	2,7377	177	0,4658	0,2833	8,7017
6	289	0,4209	169	0,1632	255	2,9555	207	0,5169	0,3285	10,1413
7	324	0,4336	191	0,1758	285	3,1589	237	0,5667	0,3485	11,5852
8	356	0,4387	211	0,1869	310	3,3174	262	0,6068	0,3568	12,7770

QN2/Qf 60/40

No satuan	h Prop (mm)	v prop (m/s)	h N2 prop (mm)	v N2 prop (m/s)	h udara (mm)	v udara (m/s)	h N2 udr (mm)	v n2 udr (m/s)	τ prop (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	48	0,1344	11	0,0539	50	1,1802	32	0,1910	0,0335	1,6171
2	98	0,2225	22	0,0625	150	2,1302	107	0,3379	0,0918	5,2683
3	151	0,2995	34	0,0717	180	2,3840	134	0,3885	0,1663	6,5985
4	196	0,3517	45	0,0798	210	2,6234	162	0,4400	0,2293	7,9903
5	240	0,3909	56	0,0876	255	2,9555	207	0,5169	0,2833	10,1413
6	289	0,4209	68	0,0962	300	3,2552	252	0,5909	0,3285	12,3023
7	324	0,4336	76	0,1023	340	3,4944	292	0,6527	0,3485	14,1768
8	356	0,4387	84	0,1079	345	3,5225	296	0,6601	0,3568	14,4057

QN2/Qf 50/50

No satuan	h Prop (mm)	v prop (m/s)	h N2 prop (mm)	v N2 prop (m/s)	h udara (mm)	v udara (m/s)	h N2 udr (mm)	v n2 udr (m/s)	τ prop (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	48	0,1344	6	0,0504	50	1,1802	32	0,1910	0,0335	1,6171
2	98	0,2225	11	0,0534	130	1,9530	89	0,3052	0,0918	4,4283
3	151	0,2995	16	0,0573	190	2,4654	143	0,4056	0,1663	7,0568
4	196	0,3517	20	0,0607	220	2,7000	172	0,4572	0,2293	8,4637
5	240	0,3909	24	0,0641	250	2,9202	202	0,5084	0,2833	9,9005
6	289	0,4209	29	0,0679	300	3,2552	252	0,5909	0,3285	12,3023
7	324	0,4336	33	0,0707	350	3,5502	301	0,6674	0,3485	14,6332
8	356	0,4387	36	0,0732	360	3,6044	311	0,6818	0,3568	15,0834

QN2/Qf 40/60

No satuan	h Prop (mm)	v prop (m/s)	h N2 prop (mm)	v N2 prop (m/s)	h udara (mm)	v udara (m/s)	h N2 udr (mm)	v n2 udr (m/s)	τ prop (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	48	0,1344	5	0,0487	50	1,1802	32	0,1910	0,0335	1,6171
2	98	0,2225	6	0,0499	140	2,0424	98	0,3214	0,0918	4,8430
3	151	0,2995	8	0,0513	180	2,3840	134	0,3885	0,1663	6,5985
4	196	0,3517	10	0,0527	225	2,7377	177	0,4658	0,2293	8,7017
5	240	0,3909	12	0,0541	270	3,0590	222	0,5420	0,2833	10,8640
6	289	0,4209	14	0,0557	320	3,3780	272	0,6224	0,3285	13,2480
7	324	0,4336	15	0,0568	350	3,5502	301	0,6674	0,3485	14,6332
8	356	0,4387	16	0,0579	380	3,7080	330	0,7095	0,3568	15,9629

Data Nosel 18,5 mm

Parameter:

L.d	2,16
d. Nosel (mm)	18,5
h. BP (mm)	300
V.G	2d
QN2/Qudera	50/50

p propana	1,8540
p udara	1,1614

QN2/Qf 80/20

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	77	0,0351	30	0,2034	21	0,0704	0,0017	0,0480
2	98	0,0507	168	0,0580	60	0,2670	38	0,0862	0,0048	0,0828
3	151	0,0693	263	0,0783	90	0,3270	58	0,1055	0,0089	0,1241
4	196	0,0825	346	0,0931	120	0,3834	81	0,1279	0,0126	0,1707
5	240	0,0929	427	0,1048	140	0,4190	98	0,1444	0,0160	0,2038
6	289	0,1019	517	0,1148	160	0,4530	115	0,1621	0,0192	0,2382
7	324	0,1065	582	0,1201	200	0,5162	153	0,2006	0,0210	0,3094
8	356	0,1095	642	0,1234	260	0,5990	212	0,2645	0,0222	0,4166

QN2/Qf 70/30

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	26	0,0208	40	0,2250	26	0,0753	0,0017	0,0588
2	98	0,0507	55	0,0290	70	0,2874	44	0,0923	0,0048	0,0959
3	151	0,0693	86	0,0374	110	0,3650	73	0,1201	0,0089	0,1547
4	196	0,0825	113	0,0445	150	0,4362	107	0,1531	0,0126	0,2209
5	240	0,0929	140	0,0512	200	0,5162	153	0,2006	0,0160	0,3094
6	289	0,1019	169	0,0583	240	0,5730	192	0,2425	0,0192	0,3812
7	324	0,1065	191	0,0632	290	0,5862	202	0,2535	0,0210	0,3990
8	356	0,1095	211	0,0676	280	0,6234	232	0,2870	0,0222	0,4512

QN2/Qf 60/40

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	11	0,0166	40	0,2250	26	0,0753	0,0017	0,0588
2	98	0,0507	22	0,0198	70	0,2874	44	0,0923	0,0048	0,0959
3	151	0,0693	34	0,0233	130	0,4014	89	0,1360	0,0089	0,1671
4	196	0,0825	45	0,0263	160	0,4530	115	0,1621	0,0126	0,2382
5	240	0,0929	56	0,0293	200	0,5162	153	0,2006	0,0160	0,3094
6	289	0,1019	68	0,0325	240	0,5730	192	0,2425	0,0192	0,3812
7	324	0,1065	76	0,0349	260	0,5990	212	0,2645	0,0210	0,4166
8	356	0,1095	84	0,0370	300	0,6462	252	0,3099	0,0222	0,4848

QN2/Qf 50/50

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	6	0,0151	30	0,2034	21	0,0704	0,0017	0,0480
2	98	0,0507	11	0,0164	70	0,2874	44	0,0923	0,0048	0,0959
3	151	0,0693	16	0,0178	140	0,4190	98	0,1444	0,0089	0,2038
4	196	0,0825	20	0,0191	170	0,4694	125	0,1714	0,0126	0,2558
5	240	0,0929	24	0,0204	220	0,5454	172	0,2212	0,0160	0,3454
6	289	0,1019	29	0,0219	260	0,5990	212	0,2645	0,0192	0,4166
7	324	0,1065	33	0,0229	290	0,6350	242	0,2984	0,0210	0,4681
8	356	0,1095	36	0,0239	300	0,6462	252	0,3099	0,0222	0,4848

QN2/Qf 40/60

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	5	0,0146	40	0,2250	26	0,0753	0,0017	0,0588
2	98	0,0507	6	0,0151	70	0,2874	44	0,0923	0,0048	0,0959
3	151	0,0693	8	0,0156	145	0,4277	102	0,1487	0,0089	0,2123
4	196	0,0825	10	0,0161	170	0,4694	125	0,1714	0,0126	0,2558
5	240	0,0929	12	0,0167	230	0,5594	162	0,2318	0,0160	0,3633
6	289	0,1019	14	0,0172	270	0,6114	222	0,2757	0,0192	0,4340
7	324	0,1065	15	0,0177	290	0,6350	242	0,2984	0,0210	0,4681
8	356	0,1095	16	0,0181	320	0,6674	272	0,3331	0,0222	0,5171

Data Nosel 18,5 (lanjutan)

Parameter:

L/d	2,43
d. Nosel (mm)	18,5
h. BP (mm)	300
V.G	2d
QN2/Quudara	50/50

ρ propana	1,8540
ρ udara	1,1614

QN2/Qf		80/20								
No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	77	0,0351	20	0,1814	16	0,0660	0,0017	0,0382
2	98	0,0507	168	0,0580	45	0,2357	29	0,0779	0,0048	0,0645
3	151	0,0693	263	0,0783	70	0,2874	44	0,0923	0,0089	0,0959
4	196	0,0825	346	0,0931	80	0,3074	51	0,0987	0,0126	0,1097
5	240	0,0929	427	0,1048	110	0,3650	73	0,1201	0,0160	0,1547
6	289	0,1019	517	0,1148	130	0,4014	89	0,1360	0,0192	0,1871
7	324	0,1065	582	0,1201	155	0,4447	111	0,1576	0,0210	0,2295
8	356	0,1095	642	0,1234	180	0,4854	134	0,1809	0,0222	0,2735

QN2/Qf		70/30								
No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	48	0,0208	30	0,2034	21	0,0704	0,0017	0,0480
2	98	0,0507	98	0,0290	40	0,2250	26	0,0753	0,0048	0,0588
3	151	0,0693	151	0,0374	80	0,3074	51	0,0987	0,0089	0,1097
4	196	0,0825	196	0,0445	100	0,3462	66	0,1126	0,0126	0,1392
5	240	0,0929	240	0,0512	140	0,4190	98	0,1444	0,0160	0,2038
6	289	0,1019	289	0,0583	160	0,4530	115	0,1621	0,0192	0,2382
7	324	0,1065	324	0,0632	185	0,4933	138	0,1857	0,0210	0,2825
8	356	0,1095	356	0,0676	195	0,5087	148	0,1956	0,0222	0,3004

QN2/Qf		60/40								
No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	11	0,0166	20	0,1814	16	0,0660	0,0017	0,0382
2	98	0,0507	22	0,0198	50	0,2462	32	0,0805	0,0048	0,0704
3	151	0,0693	34	0,0233	80	0,3074	51	0,0987	0,0089	0,1097
4	196	0,0825	45	0,0263	120	0,3834	81	0,1279	0,0126	0,1707
5	240	0,0929	56	0,0293	150	0,4362	107	0,1531	0,0160	0,2209
6	289	0,1019	68	0,0325	170	0,4694	125	0,1714	0,0192	0,2558
7	324	0,1065	76	0,0349	190	0,5010	143	0,1906	0,0210	0,2914
8	356	0,1095	84	0,0370	210	0,5310	162	0,2108	0,0222	0,3274

QN2/Qf		50/50								
No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	5	0,0151	30	0,2034	21	0,0704	0,0017	0,0480
2	98	0,0507	11	0,0164	50	0,2462	32	0,0805	0,0048	0,0704
3	151	0,0693	16	0,0178	80	0,3074	51	0,0987	0,0089	0,1097
4	196	0,0825	20	0,0191	120	0,3834	81	0,1279	0,0126	0,1707
5	240	0,0929	24	0,0204	150	0,4362	107	0,1531	0,0160	0,2209
6	289	0,1019	29	0,0219	190	0,5010	143	0,1906	0,0192	0,2914
7	324	0,1065	33	0,0229	220	0,5454	172	0,2212	0,0210	0,3454
8	356	0,1095	36	0,0239	240	0,5730	192	0,2425	0,0222	0,3812

QN2/Qf		40/60								
No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	5	0,0146	30	0,2034	21	0,0704	0,0017	0,0480
2	98	0,0507	6	0,0151	50	0,2462	32	0,0805	0,0048	0,0704
3	151	0,0693	8	0,0156	80	0,3074	51	0,0987	0,0089	0,1097
4	196	0,0825	10	0,0161	110	0,3650	73	0,1201	0,0126	0,1547
5	240	0,0929	12	0,0167	150	0,4362	107	0,1531	0,0160	0,2209
6	289	0,1019	14	0,0172	200	0,5162	153	0,2006	0,0192	0,3094
7	324	0,1065	15	0,0177	240	0,5730	192	0,2425	0,0210	0,3812
8	356	0,1095	16	0,0181	260	0,5990	212	0,2645	0,0222	0,4166

Data Nosel 18,5 (lanjutan)

Parameter:

L/d	2,7
d. Nosel (mm)	18,5
h. BP (mm)	300,0
V.G	2d
QN2/Qudara	50/50

p propana	1,8540
p udara	1,1614

QN2/Qf 80/20

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	77	0,0351	15	0,1703	14	0,0639	0,0017	0,0337
2	98	0,0507	168	0,0580	40	0,2250	26	0,0753	0,0048	0,0588
3	151	0,0693	263	0,0783	60	0,2670	38	0,0862	0,0089	0,0828
4	196	0,0825	346	0,0931	85	0,3173	55	0,1020	0,0126	0,1169
5	240	0,0929	427	0,1048	105	0,3557	69	0,1163	0,0160	0,1469
6	289	0,1019	517	0,1148	120	0,3834	81	0,1279	0,0192	0,1707
7	324	0,1065	582	0,1201	130	0,4014	89	0,1360	0,0210	0,1871
8	356	0,1095	642	0,1234	135	0,4103	94	0,1402	0,0222	0,1954

QN2/Qf 70/30

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	26	0,0208	20	0,1814	16	0,0660	0,0017	0,0382
2	98	0,0507	55	0,0290	20	0,1814	16	0,0660	0,0048	0,0382
3	151	0,0693	86	0,0374	75	0,2975	48	0,0954	0,0089	0,1027
4	196	0,0825	113	0,0445	90	0,3270	58	0,1055	0,0126	0,1241
5	240	0,0929	140	0,0512	100	0,3462	66	0,1126	0,0160	0,1392
6	289	0,1019	169	0,0583	115	0,3743	77	0,1239	0,0192	0,1626
7	324	0,1065	191	0,0632	140	0,4190	98	0,1444	0,0210	0,2038
8	356	0,1095	211	0,0676	170	0,4694	125	0,1714	0,0222	0,2558

QN2/Qf 60/40

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	11	0,0166	30	0,2034	21	0,0704	0,0017	0,0480
2	98	0,0507	22	0,0198	50	0,2462	32	0,0805	0,0048	0,0704
3	151	0,0693	34	0,0233	80	0,3074	51	0,0987	0,0089	0,1097
4	196	0,0825	45	0,0263	100	0,3462	66	0,1126	0,0126	0,1392
5	240	0,0929	56	0,0293	120	0,3834	81	0,1279	0,0160	0,1707
6	289	0,1019	68	0,0325	140	0,4190	98	0,1444	0,0192	0,2038
7	324	0,1065	76	0,0349	155	0,4447	111	0,1576	0,0210	0,2295
8	356	0,1095	84	0,0370	160	0,4530	115	0,1621	0,0222	0,2382

QN2/Qf 50/50

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48	0,0301	6	0,0151	20	0,1814	16	0,0660	0,0017	0,0382
2	98	0,0507	11	0,0164	50	0,2462	32	0,0805	0,0048	0,0704
3	151	0,0693	16	0,0178	90	0,3270	58	0,1055	0,0089	0,1241
4	196	0,0825	20	0,0191	120	0,3834	81	0,1279	0,0126	0,1707
5	240	0,0929	24	0,0204	130	0,4014	89	0,1360	0,0160	0,1871
6	289	0,1019	29	0,0219	155	0,4447	111	0,1576	0,0192	0,2295
7	324	0,1065	33	0,0229	175	0,4775	129	0,1761	0,0210	0,2647
8	356	0,1095	36	0,0239	190	0,5010	143	0,1906	0,0222	0,2914

QN2/Qf 40/60

No	h Prop	v prop	h N2 prop	v N2 prop	h udara	v udara	h N2 udr	v n2 udr	τ prop	τ udara
satuan	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m/s)	(kg/ms ²)	(kg/ms ²)
1	48,0	0,0301	5	0,0146	30	0,2034	21	0,0704	0,0017	0,0480
2	98,0	0,0507	6	0,0151	50	0,2462	32	0,0805	0,0048	0,0704
3	151,0	0,0693	8	0,0156	80	0,3074	51	0,0987	0,0089	0,1097
4	196,0	0,0825	10	0,0161	110	0,3650	73	0,1201	0,0126	0,1547
5	240,0	0,0929	12	0,0167	125	0,3925	85	0,1319	0,0160	0,1788
6	289,0	0,1019	14	0,0172	155	0,4447	111	0,1576	0,0192	0,2295
7	324,0	0,1065	15	0,0177	180	0,4854	134	0,1809	0,0210	0,2735
8	356,0	0,1095	16	0,0181	195	0,5087	148	0,1956	0,0222	0,3004