



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN *CO-FLOW* GAS *INERT* (N₂)
TERHADAP LIMIT STABILITAS NYALA DIFUSI
PADA MEDAN ALIRAN BERLAWANAN**

SKRIPSI

**HARIS MUNANDAR
0404020363**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN *CO-FLOW* GAS *INERT* (N_2)
TERHADAP LIMIT STABILITAS NYALA DIFUSI
PADA MEDAN ALIRAN BERLAWANAN**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**HARIS MUNANDAR
0404020363**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Haris Munandar

NPM : 0404020363

Tanda tangan :

Tanggal : 6 Juli 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Haris Munandar
NPM : 0404020363
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Pengaruh Penambahan *Co-Flow Gas Inert* (N₂)
terhadap Limit Stabilitas Nyala Difusi pada
Medan Aliran Berlawanan

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.Ir. Harinaldi, M.Eng ()
Penguji : Dr. Ir. Warjito, M.Eng ()
Penguji : Dr. Ir. Adi Suryosatyo, M.Eng ()
Penguji : Dr. Ir. Yulianto S. Nugroho, M.Sc ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Juli 2009

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 Ir. Henky S. Nugroho, MT. 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. Fahrul Munajat 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. Furjiyanto (ExtM'05), sebagai pendahulu kami dalam penelitian ini, yang telah dengan rela datang jauh-jauh dari tanah Papua untuk melatih kami menggunakan alat-alat eksperimen dengan *safety* dan terampil.
6. Kedua orangtua tercinta (Sanudin dan Maimunah) beserta keluarga besar yang telah memberikan kasih sayang, doa, dan dukungan yang tidak terhingga baik moril dan materiil kepada penulis.

7. Huda Kurniawati, Bu Basyir, Mba Ida, Kang Jono, Kang Charles, Ibnu (Mt'04), Yudi (Ars'06), Ading (PoltekUI'07) yang telah memberikan dukungannya agar penulis tetap semangat menyelesaikan skripsi ini.
8. Anak-anak Mesin 2004 terutama rekan-rekan MTF (Aye, Taufiq, Ismud, Agung, Hendras, Reza, Koko, Adam, Imam, dll) yang senantiasa mengisi kekosongan waktu penulis di kampus dengan lawakan-lawakan khas Mesin 2004.
9. Teman-teman seperjalanan di Kamuka Parwata FTUI, antara lain: Agung (GP'05), Garda (Mt'05), Dayat (E'05), Wahyu (GP'05), Wulan (GP'05), Riris (GP'04), Burhan (S'04), Nia (S'03), Yasin W. (S'03), Fauzan (E'03), Desmond (K'03), Orvell (Mt'03), Zaidun (GP'02), Emil (GP'02), Satria (S'02), *guyz...* kita telah membuktikan bahwa tidak cukup hanya dengan mendengarkan cerita tentang sebuah lembah yang indah di balik bukit, kita harus mendakinya.
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 2009

Haris Munandar

0404020363

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Haris Munandar
NPM : 0404020363
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:

Pengaruh Penambahan *Co-Flow* Gas *Inert* (N_2) terhadap Limit Stabilitas Nyala Difusi 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 : 6 Juli 2009
Yang menyatakan

(Haris Munandar)

ABSTRAK

Nama : Haris Munandar
Program Studi: Teknik Mesin
Judul : Pengaruh Penambahan *Co-Flow* Gas *Inert* (N_2) terhadap Limit Stabilitas Nyala Difusi pada Medan Aliran Berlawanan

Pengaruh dari penambahan *co-flow* nitrogen (N_2) terhadap nyala difusi pada medan aliran berlawanan telah diteliti secara eksperimental. Propana sebagai bahan bakar disuplai dari nosel bagian bawah dan udara sebagai oksidator disuplai dari nosel atas dengan diameter nosel yang sama, yang dilengkapi dengan *honeycomb* untuk membuat aliran udara yang seragam. Sementara itu, aliran *co-flow* nitrogen juga dialirkan dari sisi nosel bawah, dimana saluran nitrogen tersebut terletak koaksial dengan saluran bahan bakar (nosel bawah merupakan nosel koaksial). Pada penelitian ini digunakan juga *vortex generator* yang diletakkan pada jarak $2d$ dari ujung nosel untuk meningkatkan turbulensi sehingga dapat dicapai pencampuran reaktan yang optimal.

Dua parameter utama yang diatur dalam penelitian ini adalah parameter geometri (diameter dalam nosel, rasio gap-diameter nosel) dan dinamika fluida (rasio debit Q_{N_2}/Q_f).

Hasil eksperimen menunjukkan 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. 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. Lalu dapat disimpulkan juga bahwa penurunan dari kondisi *non co-flow* ke kondisi rasio 80/20 menyebabkan limit stabilitas nyala menurun rata-rata sekitar 27% dari kondisi *non co-flow*.

Kata kunci:
nyala difusi, *co-flow*, stabilitas nyala, gap nosel

ABSTRACT

Name : Haris Munandar
Study Program: Mechanical Engineering
Title : Effects of Nitrogen Co-Flow on Stability Limit of Diffusion
Flames Formed 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. Propane as a fuel gas was supplied upward through a nozzle, and air as oxidator was supplied downward through a similar nozzle, which was equipped with honeycomb to produce a uniform velocity in the issuing air. Then, nitrogen co-flow was supplied upward through a bottom nozzle, where nitrogen's outlet is located coaxially with fuel's outlet (bottom nozzle is coaxial nozzle). In this experiment, also used vortex generator which located in 2d gap near nozzle outlet, to increases turbulence, so that optimal mixing of reactants can be achieved.

Two main parameters that had been set up in this experiment were fluid dynamics (momentum flux of air and fuel based on flow rate ratio Q_{N_2}/Q_f) and geometry parameters (inner diameter of nozzle, ratio of gap-nozzle diameter).

Experiment result showed 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 . It can be explained that nitrogen coaxial flow will covers coaxially the reaction zone so it prevent from the diffusion with surrounding air. The need of air for combustion was only provided by upper nozzle. We also concluded that stability limit decreases 27% from non co-flow condition if we applied $Q_{N_2}/Q_f = 80/20$ ratio experiment.

Key words :
diffusion flame, co-flow, flame stability, nozzle gap

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 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 DASAR TEORI.....	6
2.1 Prinsip-Prinsip Pembakaran	6
2.2 Nyala Api	7
2.2.1 Nyala Api <i>Premixed (Premixed Flame)</i>	8
2.2.1.1 Laju Nyala Api <i>Premixed Laminar</i>	10
2.2.1.2 <i>Counter Flow Premixed Flame</i>	11
2.2.2 Nyala Api Difusi	12
2.2.2.1 Struktur Nyala Difusi Laminar	15
2.2.2.2 Struktur Nyala Difusi Turbulen	17
2.2.2.3 <i>Counter Flow Diffusion Flame</i>	18
2.3 Karakteristik Nyala	20
2.4 Stabilitas Nyala Api (<i>Flame Stability</i>).....	20

2.4.1 Fenomena <i>Flashback</i>	21
2.4.2 Fenomena <i>Lift-Off</i>	22
2.4.3 Fenomena <i>Blow-Off</i>	23
2.5 Propana (C ₃ H ₈).....	23
2.6 Oksigen (O ₂)	26
2.7 Nitrogen (N ₂).....	28
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.....	37
3.2.1 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Udara	37
3.2.2 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Bahan Bakar	39
3.2.3 Prosedur Kalibrasi Sistem Suplai Nitrogen.....	40
3.2.4 Prosedur <i>Purging</i>	41
3.2.5 Prosedur Pengambilan Data	43
3.2.5.1 Pengukuran Limit Stabilitas Nyala	43
3.2.5.2 Metode Penelitian Limit Stabilitas Nyala	44
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	52
4.1 Hasil Penelitian	52
4.1.1 Limit Stabilitas Nyala untuk Diameter Nosel, d = Ø18.5 mm.....	53
4.1.2 Limit Stabilitas Nyala untuk Diameter Nosel, d = Ø8.5 mm	56
4.1.3 Limit Stabilitas Nyala untuk Diameter Nosel, d = Ø5.5 mm.....	58
4.2 Pembahasan Pengaruh Penambahan <i>Co-flow</i>	62
4.2.1 Nosel 18.5 mm	62
4.2.2 Nosel 8.5 mm	64
4.2.3 Nosel 5.5 mm	67
BAB 5 KESIMPULAN	70
DAFTAR REFERENSI	71
DAFTAR PUSTAKA	73
Lampiran Pengolahan Data	74

DAFTAR GAMBAR

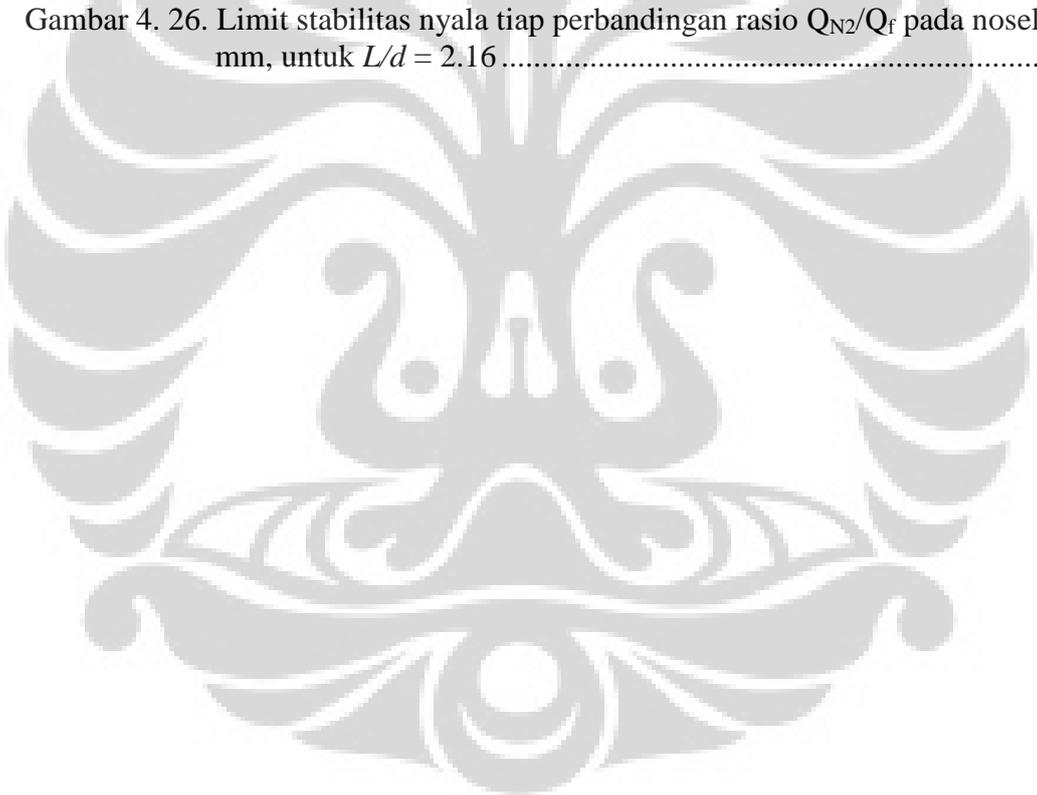
Gambar 1. 1. Skema nyala difusi pada aliran berlawanan	2
Gambar 1. 2. Skema nyala difusi pada aliran berlawanan dengan <i>co-flow</i>	3
Gambar 2. 1. Profil nyala api [2].....	8
Gambar 2. 2. Struktur nyala api <i>premixed</i> [3].....	9
Gambar 2. 3. Vektor diagram kecepatan nyala laminar [2]	9
Gambar 2. 4. Nyala <i>premixed</i> pada aliran berlawanan [4].....	11
Gambar 2. 5. <i>Over-ventilated</i> dan <i>under-ventilated</i> pada nyala api difusi [6].....	13
Gambar 2. 6. Perubahan bentuk api terhadap kecepatan aliran bahan bakar [8] ..	14
Gambar 2. 7. Diagram komposisi nyala api difusi berbahan bakar hidrogen [9] .	15
Gambar 2. 8. Diagram profil konsentrasi pada nyala api difusi tipe laminar [10]	16
Gambar 2. 9. Nyala difusi turbulen.....	17
Gambar 2. 10. Skema nyala difusi pada aliran berlawanan [4]	18
Gambar 2. 11. Diagram stabilitas <i>flashback</i> , <i>lift-off</i> , dan <i>yellow tipping</i> untuk bahan bakar gas industri [16]	22
Gambar 2. 12. Struktur molekul propana.....	23
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) $d = \text{Ø}18.5 \text{ mm}$, (b) $d = \text{Ø}8.5 \text{ mm}$, (c) $d = \text{Ø}5.5 \text{ mm}$	34
Gambar 3. 6. Ulir penggerak.....	35

Universitas Indonesia

Gambar 3. 7. Skematik peralatan eksperimen nyala api difusi pada aliran berlawanan dengan penambahan <i>co-flow</i>	36
Gambar 3. 8. Skema kalibrasi sistem suplai udara.....	37
Gambar 3. 9. Level air pada <i>Wet Gas Meter</i> Shinagawa WE-2.5A.....	38
Gambar 3. 10. Skema kalibrasi sistem suplai bahan bakar	39
Gambar 3. 11. Skema kalibrasi sistem suplai nitrogen	40
Gambar 3. 12. Skema proses <i>purging</i>	42
Gambar 3. 13. Persamaan kalibrasi kecepatan udara (V_{udara}) untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm	46
Gambar 3. 14. Persamaan kalibrasi kecepatan propana ($V_{propana}$) untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm.....	46
Gambar 3. 15. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm (orifis 1)	47
Gambar 3. 16. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm (orifis 2)	47
Gambar 3. 17. Persamaan kalibrasi kecepatan udara (V_{udara}) untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm	48
Gambar 3. 18. Persamaan kalibrasi kecepatan propana ($V_{propana}$) untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm.....	48
Gambar 3. 19. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm (orifis 1)	49
Gambar 3. 20. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm (orifis 2)	49
Gambar 3. 21. Persamaan kalibrasi kecepatan udara (V_{udara}) untuk diameter nosel = $\varnothing 5.5$ mm	50
Gambar 3. 22. Persamaan kalibrasi kecepatan propana ($V_{propana}$) untuk diameter nosel = $\varnothing 5.5$ mm.....	50
Gambar 3. 23. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 5.5$ mm (orifis 1)	51
Gambar 3. 24. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 5.5$ mm (orifis 2)	51

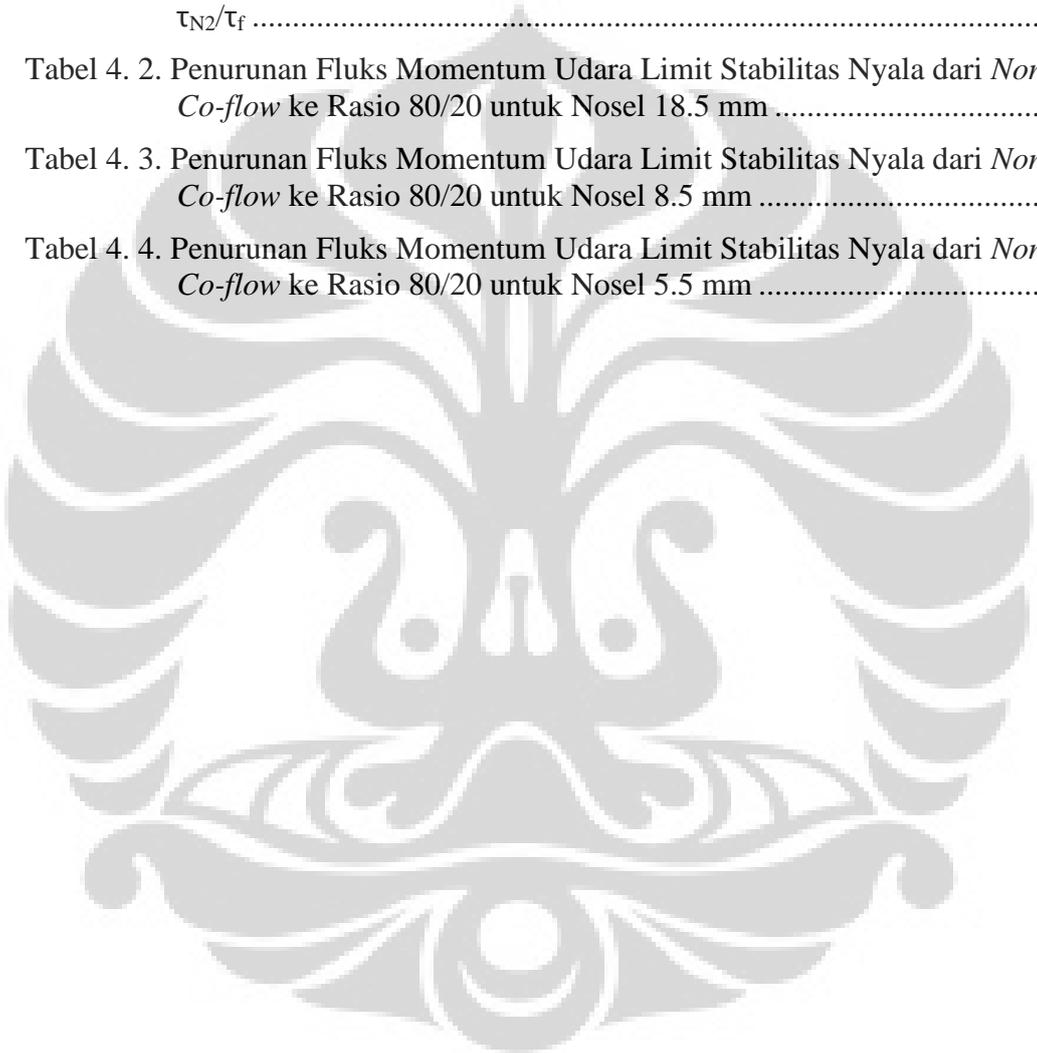
Gambar 4. 1. Limit stabilitas nyala data 40/60 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 18.5 mm	53
Gambar 4. 2. Limit stabilitas nyala data 50/50 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 18.5 mm	54
Gambar 4. 3. Limit stabilitas nyala data 60/40 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 18.5 mm	54
Gambar 4. 4. Limit stabilitas nyala data 70/30 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 18.5 mm	55
Gambar 4. 5. Limit stabilitas nyala data 80/20 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 18.5 mm	55
Gambar 4. 6. Limit stabilitas nyala data 40/60 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 8.5 mm	56
Gambar 4. 7. Limit stabilitas nyala data 50/50 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 8.5 mm	56
Gambar 4. 8. Limit stabilitas nyala data 60/40 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 8.5 mm	57
Gambar 4. 9. Limit stabilitas nyala data 70/30 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 8.5 mm	57
Gambar 4. 10. Limit stabilitas nyala data 80/20 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 8.5 mm	58
Gambar 4. 11. Limit stabilitas nyala data 40/60 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 5.5 mm	58
Gambar 4. 12. Limit stabilitas nyala data 50/50 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 5.5 mm	59
Gambar 4. 13. Limit stabilitas nyala data 60/40 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 5.5 mm	59
Gambar 4. 14. Limit stabilitas nyala data 70/30 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 5.5 mm	60
Gambar 4. 15. Limit stabilitas nyala data 80/20 dibandingkan data <i>non co-flow</i> untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 5.5 mm	60
Gambar 4. 16. Rangkuman $d\tau_{udara}/d\tau_{propana}$ grafik limit stabilitas nyala	61
Gambar 4. 17. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_f pada nosel 18.5 mm, untuk $L/d = 2.7$	62
Gambar 4. 18. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_f pada nosel 18.5 mm, untuk $L/d = 2.43$	62

Gambar 4. 19. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N2}/Q_f pada nosel 18.5 mm, untuk $L/d = 2.16$	63
Gambar 4. 20. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N2}/Q_f pada nosel 8.5 mm, untuk $L/d = 2.7$	64
Gambar 4. 21. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N2}/Q_f pada nosel 8.5 mm, untuk $L/d = 2.43$	65
Gambar 4. 22. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N2}/Q_f pada nosel 8.5 mm, untuk $L/d = 2.16$	65
Gambar 4. 23. Kondisi mulai terjadi <i>extinct</i> dimana nyala api seperti aliran air yang keluar dari <i>sprinkle</i>	67
Gambar 4. 24. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N2}/Q_f pada nosel 5.5 mm, untuk $L/d = 2.7$	67
Gambar 4. 25. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N2}/Q_f pada nosel 5.5 mm, untuk $L/d = 2.43$	68
Gambar 4. 26. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N2}/Q_f pada nosel 5.5 mm, untuk $L/d = 2.16$	68



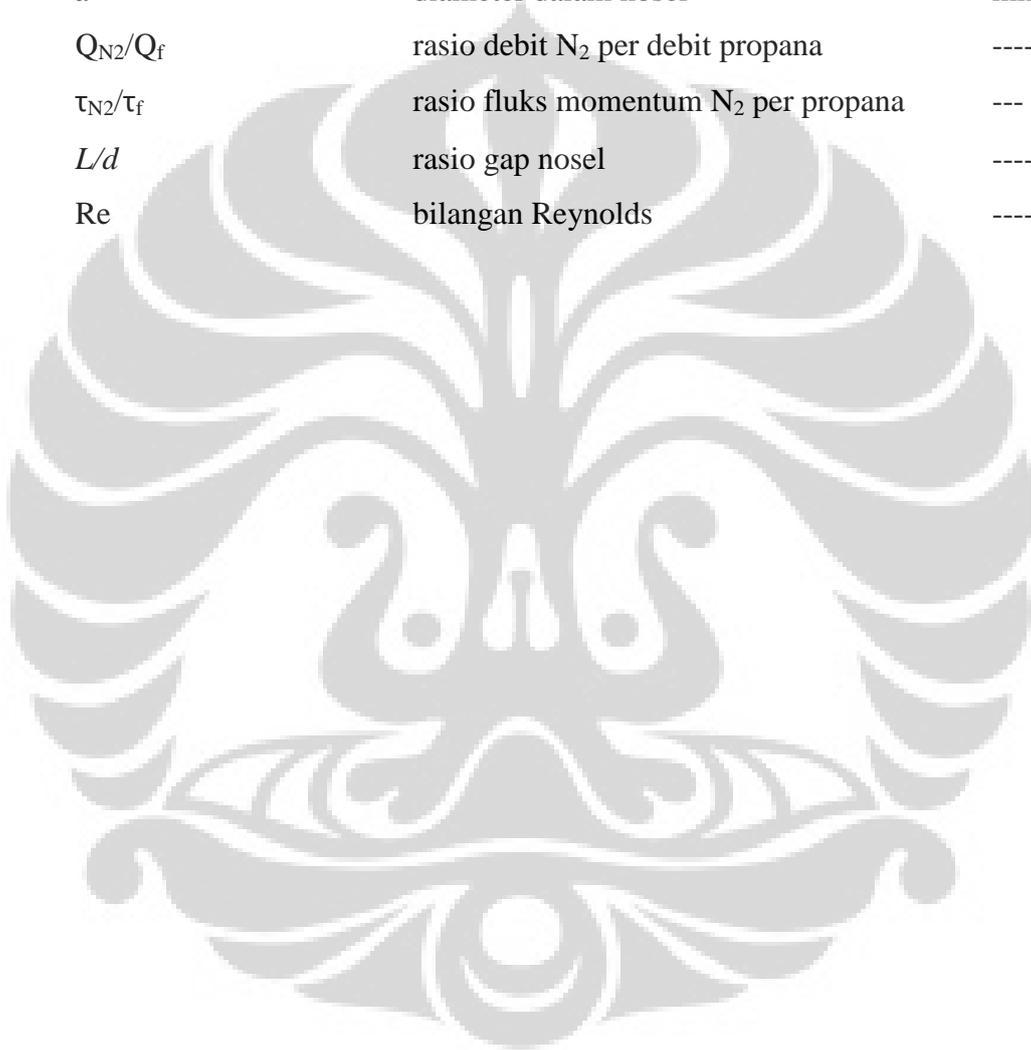
DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Properti Kimia Propana.....	25
Tabel 2. 2. Properti Fisik Oksigen	27
Tabel 2. 3. Properti Fisik Nitrogen.....	29
Tabel 4. 1. Hubungan antara Rasio Debit Q_{N_2}/Q_f dan Rasio Fluks Momentum τ_{N_2}/τ_f	63
Tabel 4. 2. Penurunan Fluks Momentum Udara Limit Stabilitas Nyala dari <i>Non Co-flow</i> ke Rasio 80/20 untuk Nosel 18.5 mm	64
Tabel 4. 3. Penurunan Fluks Momentum Udara Limit Stabilitas Nyala dari <i>Non Co-flow</i> ke Rasio 80/20 untuk Nosel 8.5 mm	66
Tabel 4. 4. Penurunan Fluks Momentum Udara Limit Stabilitas Nyala dari <i>Non Co-flow</i> ke Rasio 80/20 untuk Nosel 5.5 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	----
τ_{N_2}/τ_f	rasio fluks momentum N_2 per propana	---
L/d	rasio <i>gap</i> nosel	----
Re	bilangan Reynolds	----



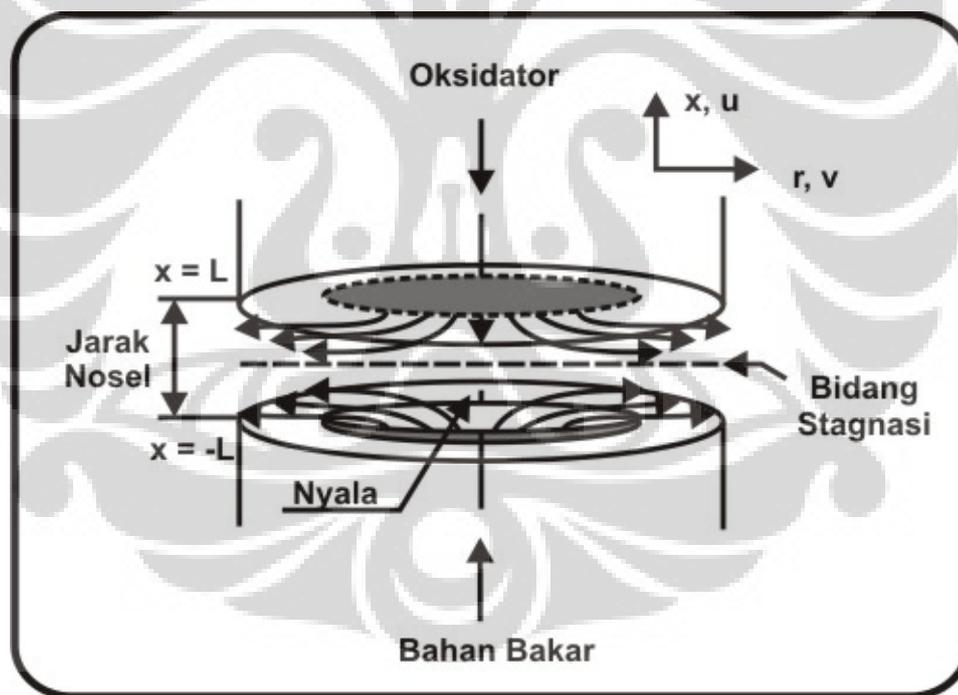
BAB 1 PENDAHULUAN

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 luas dan sangat vital, teknik pembakaran ini terus dikembangkan untuk mendapatkan hasil yang maksimal dan efisien. Berbagai penelitian pun telah dilakukan dengan maksud untuk lebih memahami tentang fenomena-fenomena yang terjadi dalam proses pembakaran. Pengujian-pengujian dilakukan untuk mendapatkan metode pembakaran yang lebih efisien, bersih, dan stabil.

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.

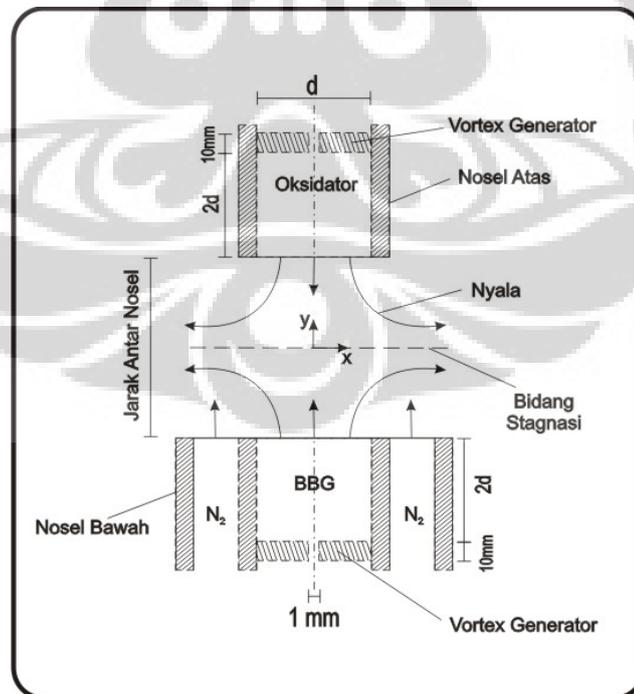


Gambar 1. 1. Skema nyala difusi pada aliran berlawanan

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 & Furjiyanto (2008), diketahui bahwa untuk menjaga nyala tetap di dalam daerah stabil, maka kebutuhan suplai propana untuk setiap kenaikan fluks momentum udara (τ_{udara}) harus juga ditingkatkan. Dan setiap penurunan rasio gap terhadap diameter nosel (L/d), maka akan menyebabkan naiknya limit stabilitas nyala.

Kemudian dalam penelitian kali ini, dilakukan kajian yang lebih mendalam mengenai karakteristik stabilitas nyala difusi pada medan aliran berlawanan dengan penambahan *co-flow* nosel dimana gas nitrogen dipakai sebagai gas penyelubung. *Co-flow* nosel ini diletakkan pada sisi nosel bahan bakar, dimana debit nitrogen yang mengalir pada *co-flow* nosel ini diatur sedemikian rupa, sehingga rasio antara debit nitrogen dengan debit bahan bakar sesuai nilai yang ditetapkan.



Gambar 1. 2. Skema nyala difusi pada aliran berlawanan dengan *co-flow*

1.2 Perumusan Masalah

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

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk memperkaya basis data eksperimental mengenai 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. *Co-flow* (aliran selubung) hanya pada sisi bahan bakar.
8. *Vortex generator* terletak 2d dari ujung nosel.

Universitas Indonesia

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 co-flow*. Parameter-parameter yang berpengaruh pada percobaan kemudian dicatat dan diolah. Parameter-parameter tersebut didasarkan pada studi literatur dari referensi yang berkaitan, terutama dari penelitian yang dilakukan oleh Harinaldi & Furjiyanto (2008).

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian, disusun berdasarkan format berikut:

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II DASAR TEORI

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

BAB III PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN

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

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

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

BAB V KESIMPULAN

Merupakan kesimpulan dari seluruh rangkaian proses penelitian yang dilakukan.

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Prinsip-Prinsip Pembakaran

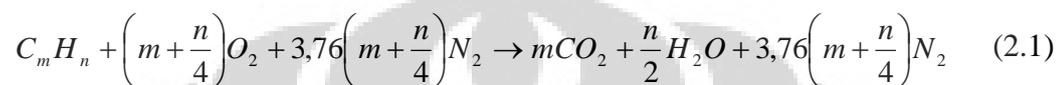
Bahan bakar (*fuel*) merupakan segala substansi yang melepaskan panas ketika dioksidasi dan secara umum mengandung unsur-unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Sementara oksidator adalah segala substansi yang mengandung oksigen (misalnya udara) yang akan bereaksi dengan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

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

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

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

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

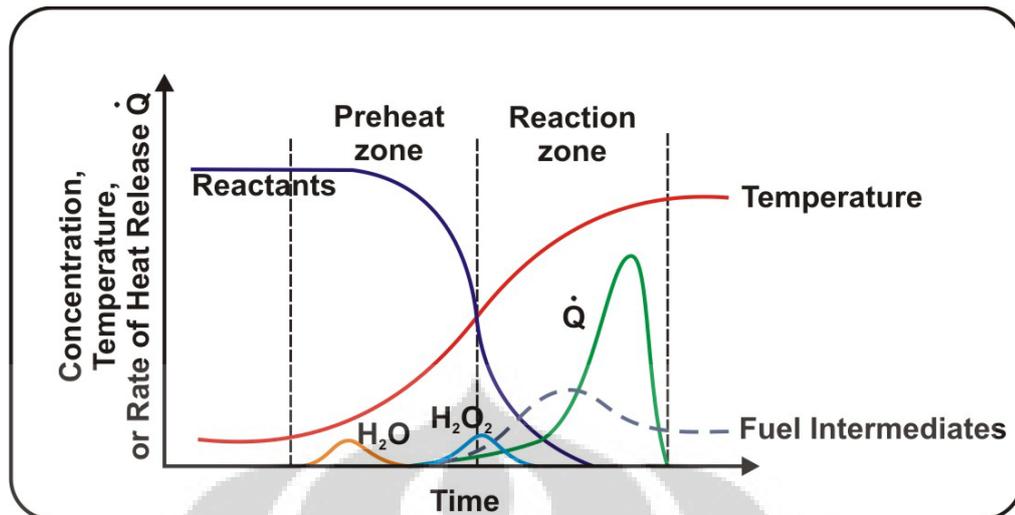


Persamaan ini merupakan hasil penyederhanaan, mengingat cukup sulit untuk memastikan proses pembakaran yang sempurna dengan rasio ekivalen yang tepat dari udara. Jika terjadi pembakaran tidak sempurna, maka hasil persamaan di atas yang hanya menghasilkan CO_2 dan H_2O tidak akan terjadi, akan tetapi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

2.2 Nyala Api

Suata nyala api adalah penyebaran sendiri secara terus menerus yang dibatasi oleh daerah pembakaran dengan kecepatan *subsonic* (di bawah kecepatan suara), atau dengan kata lain nyala api (*flame*) merupakan gelombang panas yang terjadi akibat reaksi kimia eksotermis yang cepat.

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



Gambar 2. 1. Profil nyala api [2]

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

1. Zona pra pemanasan (*preheat zone*)

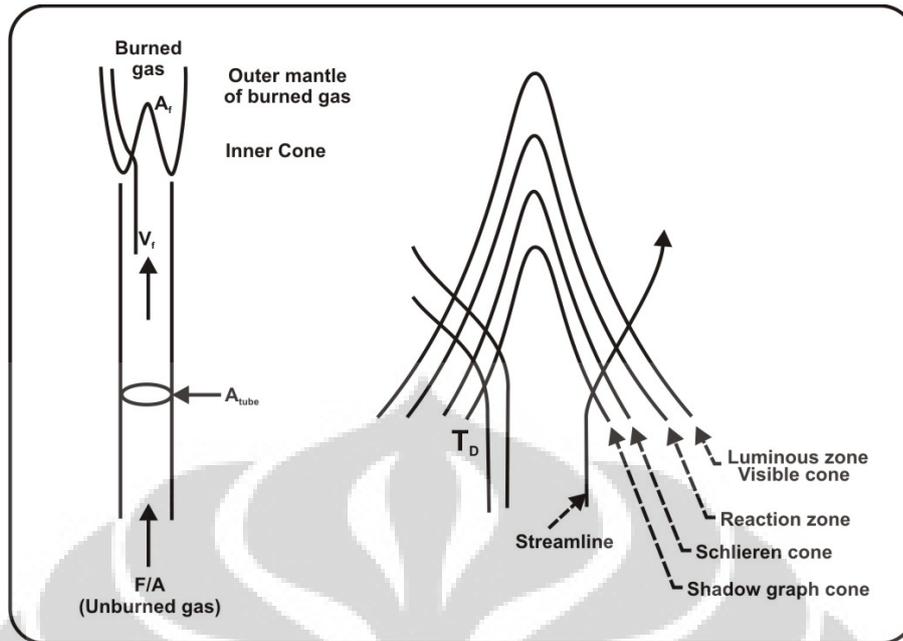
Daerah di mana sedikit panas yang dilepaskan dan masih banyak bahan bakar yang belum terbakar (*unburned fuel*).

2. Zona pemanasan (*reaction zone*)

Daerah di mana sebagian besar energi kimia dilepaskan.

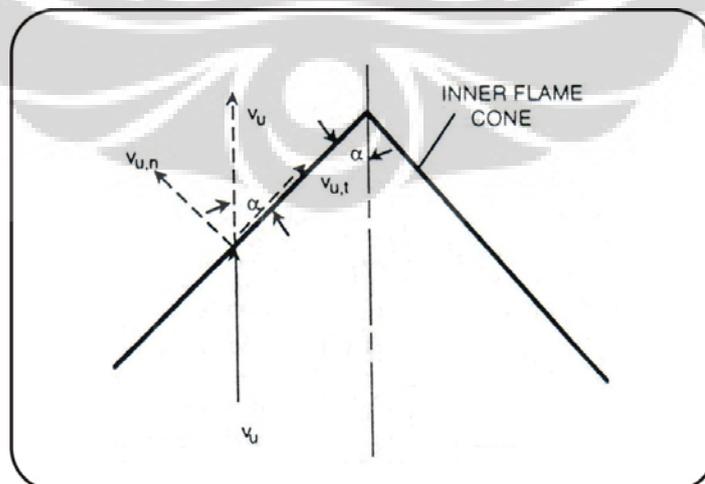
2.2.1 Nyala Api *Premixed* (*Premixed Flame*)

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



Gambar 2. 2. Struktur nyala api *premixed* [3]

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



Gambar 2. 3. Vektor diagram kecepatan nyala laminar [2]

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

$$S_L = V_u \sin \alpha \quad (2.2)$$

2.2.1.1 Laju Nyala Api *Premixed* Laminar

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

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

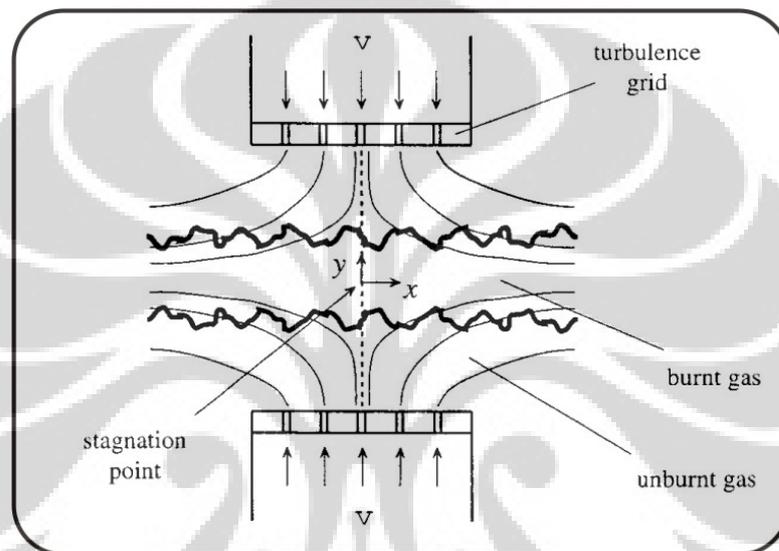
Gas *premixed* yang akan berubah menjadi nyala *premixed* memiliki kesamaan pada kecepatan, temperatur, dan konsentrasi dengan bentuk fisik yang tetap dalam daerah gas yang belum terbakar (*unburned gas zone*). Dalam daerah *preheating*, temperatur naik akibat konduksi energi panas dan pada daerah ini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

Daerah reaksi dibagi menjadi dua daerah yaitu:

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

2.2.1.2 Counter Flow Premixed Flame

Modifikasi geometri aliran stagnasi yang ditunjukkan pada gambar 2.4 di bawah ini merupakan salah satu konfigurasi aliran berlawanan, dimana dua bentuk nyala api distabilkan oleh aliran simetris dari dua nosel. Pada kondisi ini terjadi pencampuran bahan bakar dan udara sebelum memasuki zona reaksi sehingga nyala yang terjadi dikenal dengan *counter flow premixed flames*.



Gambar 2. 4. Nyala *premixed* pada aliran berlawanan [4]

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

Terdapat sejumlah penelitian yang telah menggunakan konfigurasi ini untuk mempelajari struktur dari *turbulent premixed flames*, diantaranya Alejandro Biones [5] yang mempelajari mengenai pengaruh tekanan terhadap nyala api *premixed* sebagian pada medan aliran berlawanan dengan reaktan H₂-udara. Dari hasil penelitiannya, menunjukkan bahwa dengan kenaikan tekanan, ketebalan masing-masing zona reaksi (*reaction zone*) akan semakin turun, dan yang paling penting jarak antara masing-masing zona reaksi akan semakin turun juga.

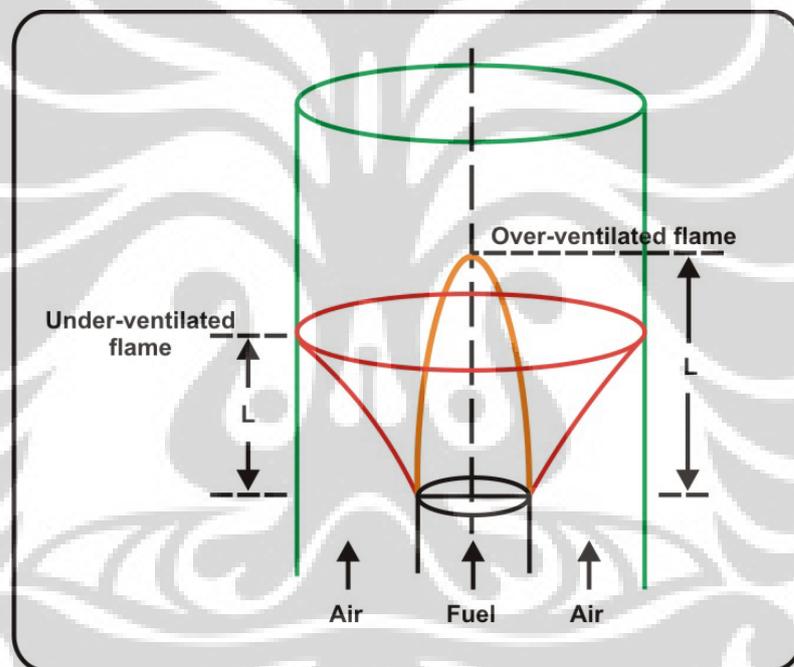
2.2.2 Nyala Api Difusi

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.

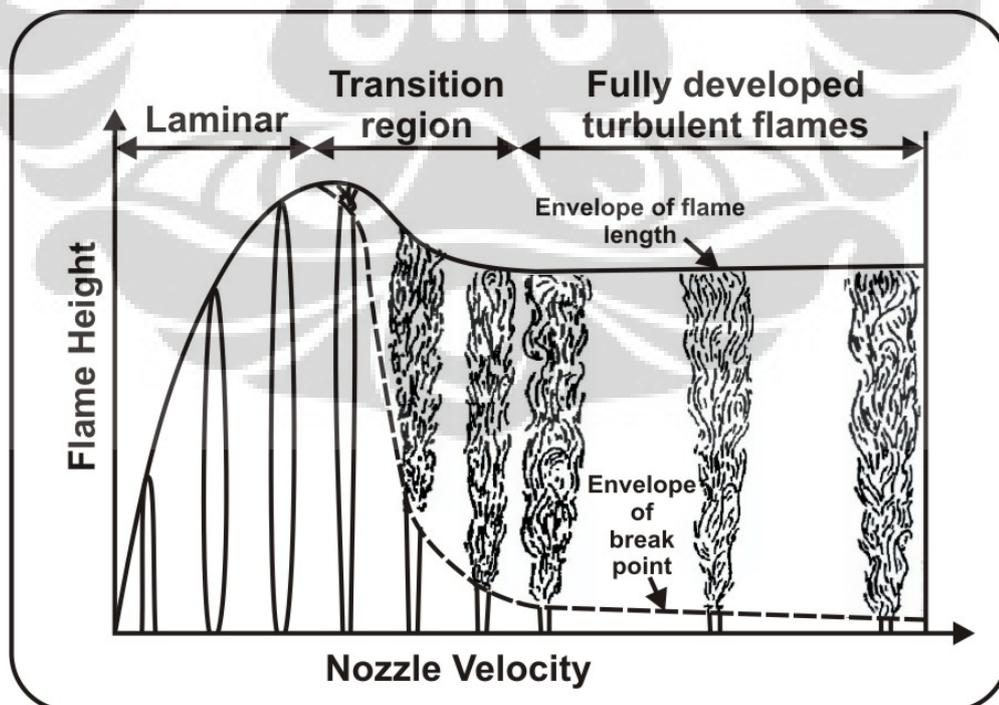
Burke dan Schumman (1928) mempelajari nyala api difusi di dalam sebuah tabung dimana aliran bahan bakar dikelilingi oleh aliran udara dengan kedua aliran tersebut memiliki kecepatan yang sama. Bentuk api yang terbentuk tergantung dari apakah aliran udara tersebut memiliki lebih banyak oksigen (*over-ventilated*) 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 [6]

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 [7].

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.

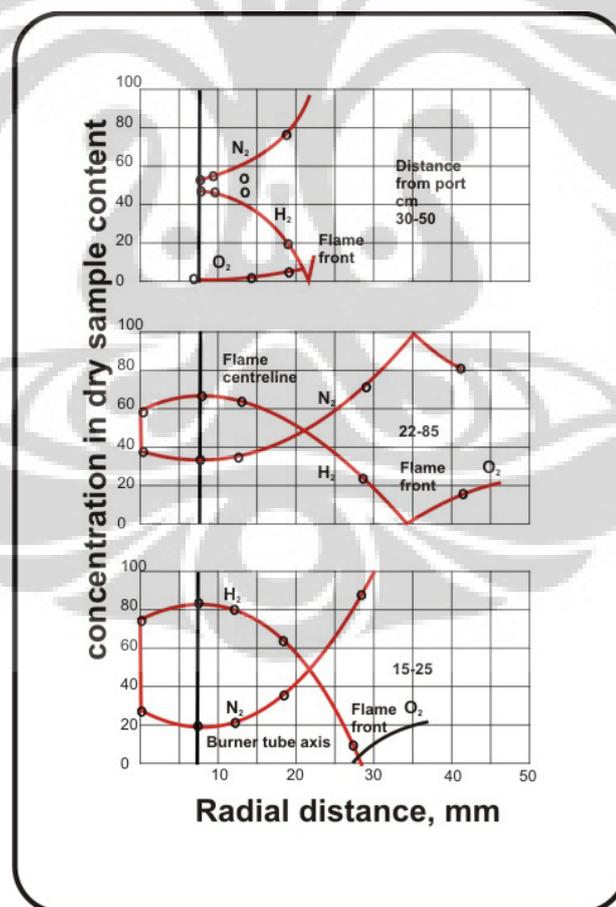


Gambar 2. 6. Perubahan bentuk api terhadap kecepatan aliran bahan bakar [8]

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

2.2.2.1 Struktur Nyala Difusi Laminar

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

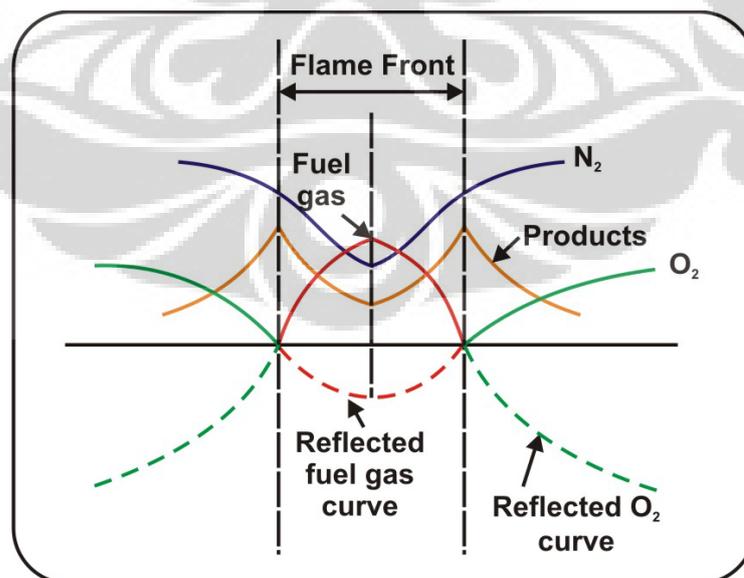


Gambar 2. 7. Diagram komposisi nyala api difusi berbahan bakar hidrogen [9]

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 [10]

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

2.2.2.2 Struktur Nyala Difusi Turbulen

Jika laju pancaran bahan bakar pada nyala laminar dipercepat, maka mulai muncul aliran turbulen. Munculnya turbulen pada ujung nyala (*flame tip*), akan menyebabkan tinggi nyala berkurang dengan meningkatnya laju aliran dan mencapai nilai konstan pada nyala yang turbulen sepenuhnya. Bentuk transisi dari laminar menjadi turbulen terjadi pada saat bilangan Reynolds aliran (Re) lebih dari 4000. Hubungan antara tinggi momentum nyala nosel sebagai fungsi kecepatan nosel ditunjukkan sebagai perubahan nyala turbulen. Bentuk nyala turbulen dapat ditunjukkan pada gambar 2.9 dibawah ini.



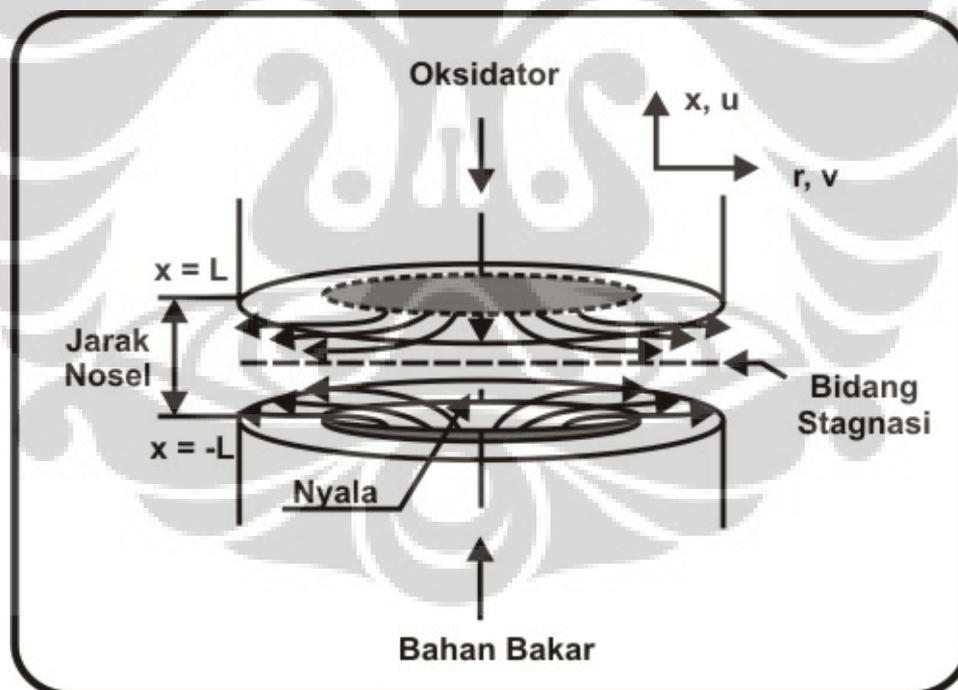
Gambar 2. 9. Nyala difusi turbulen

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*).

2.2.2.3 Counter Flow Diffusion Flame

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

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



Gambar 2. 10. Skema nyala difusi pada aliran berlawanan [4]

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 [11], dimana hasil dari penelitian mereka menunjukkan bahwa debit aliran bahan bakar memiliki pengaruh yang sangat kecil terhadap temperatur nyala dan juga pembentukan jelaga (*soot*) juga kurang begitu dipengaruhi oleh debit aliran bahan bakar. Pengukuran temperatur pada *counter flow diffusion flame* ini menunjukkan bahwa pada kecepatan aliran yang sangat rendah, temperatur akan turun dan *extinction* pada aliran yang sangat rendah terkait dengan rugi kalor pada *burner*.

J.C Rolon [12] meneliti pengaruh *vortex ring* pada nyala api difusi *counter flow*. Pada penelitian tersebut, *vortex ring* diletakan pada salah satu nosel saja yaitu pada nosel udara. Dari penelitian tersebut, diketahui bahwa *vortex ring* berpengaruh besar pada mekanisme *extinction/blow-out*.

Uen Do Lee [13] yang melakukan penelitian mengenai pengaruh perubahan kecepatan aliran terhadap batas nyala api padam (*extinct*) pada nyala difusi *counter flow*, selanjunya V.R Katta [14] juga mempelajari kriteria *extinction* pada nyala difusi dalam medan aliran berlawanan. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa nyala api dinamik atau tidak tunak akan berada pada *strain rates* yang lebih tinggi dari pada nyala api tunak (*steady flames*).

Jongmook Lim dan Raymond Viskanta [15] 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.

2.3 Karakteristik Nyala

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

Pengaruh komposisi campuran sangat penting bagi kecepatan pembakaran, nyala hanya akan merambat pada konsentrasi campuran tertentu. Konsentrasi bahan bakar minimum dalam campuran yang sudah dapat menyala dinamakan batas nyala terbawah, dan biasanya konsentrasi bahan bakar dan udara dikondisikan pada keadaan standar yaitu campuran stoikiometri. Dengan penambahan konsentrasi bahan bakar pada campuran, maka campuran akan kaya dan oksigen berkurang, kecepatan pembakaran turun dan api akan padam, hal ini juga berkaitan dengan batas nyala yang dinamakan batas nyala atas.

2.4 Stabilitas Nyala Api (*Flame Stability*)

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

Ada beberapa ketidakstabilan dalam *Bunsen burner* yaitu:

1. Ketidakstabilan sistem, meliputi interaksi aliran pada komposisi reaksi sistem yang berbeda.
2. Ketidakstabilan akustik, meliputi interaksi gelombang suara dengan proses pembakaran.

3. Ketidakstabilan Taylor, meliputi efek gaya apung atau percepatan pada fluida dengan perubahan densitas.
4. Ketidakstabilan Landau, ketidakstabilan hidrodinamika dari bentuk pembakaran yang diasosiasikan tidak meliputi akustik ataupun *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.

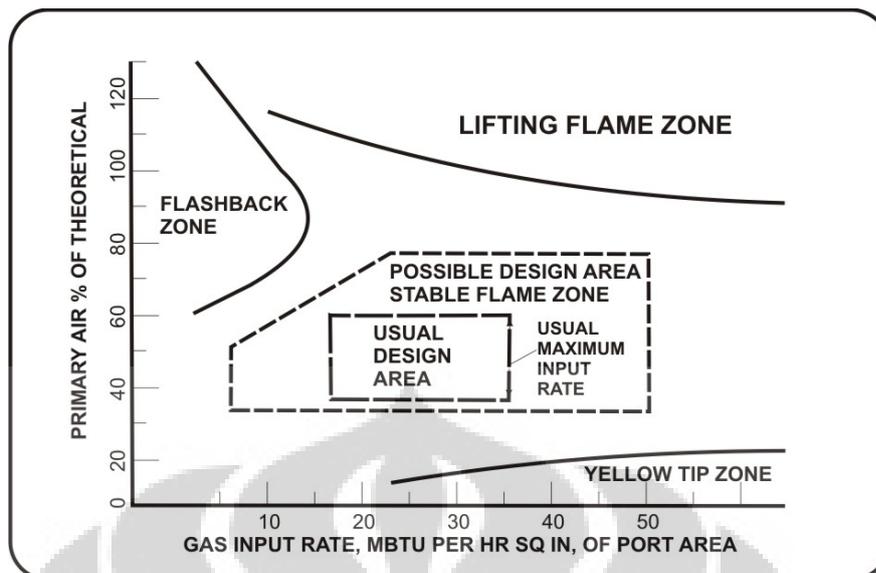
Suatu hal yang sangat penting dalam perencanaan pembakaran gas adalah mencegah terjadinya *flashback* dan *lift-off*. Batas kestabilan nyala berhubungan erat dengan fenomena *flashback*, *lift-off*, *blow-off*, dan warna nyala pada tabung pembakar (*burner*).

2.4.1 Fenomena *Flashback*

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

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

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



Gambar 2. 11. Diagram stabilitas *flashback*, *lift-off*, dan *yellow tipping* untuk bahan bakar gas industri [16]

2.4.2 Fenomena *Lift-Off*

Lift-off adalah kondisi 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.

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

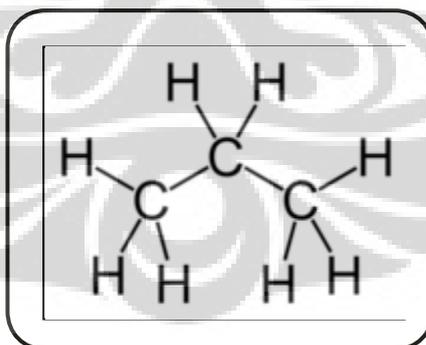
Dengan meningkatkan kecepatan aliran hingga tercapai kecepatan kritis, ujung nyala akan meloncat ke posisi jauh dari ujung (mulut) pembakar dan nyala dikatakan terangkat. Kondisi nyala terangkat inilah yang dinamakan sebagai *lift-off*, dan jika kecepatan aliran terus dinaikkan, maka nyala secara kasar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

2.4.3 Fenomena *Blow-Off*

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

2.5 Propana (C₃H₈)

Propana adalah senyawa alkana tiga karbon (C₃H₈) yang berwujud gas dalam keadaan normal, tapi dapat dikompresi menjadi cairan yang mudah dipindahkan dalam kontainer yang tidak mahal. Senyawa ini diturunkan dari produk petroleum lain pada pemrosesan minyak bumi atau gas alam. Propana umumnya digunakan sebagai bahan bakar untuk mesin, pemanggang, dan di rumah-rumah.



Gambar 2. 12. Struktur molekul propana

Dalam penggunaan sehari-hari sebagai bahan bakar, propana dikenal juga sebagai LPG (*liquified 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 <i>liquid</i>)
<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.

2.6 Oksigen (O₂)

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

2.7 Nitrogen (N₂)

Gas *inert* merupakan suatu gas yang tidak mudah terbakar, tidak reaktif, tidak mencemari dan tidak beracun. Gas *inert* mempunyai manfaat yang cukup potensial dalam berbagai sektor kehidupan. Manfaat-manfaat itu antara lain:

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

Pada proses pembakaran, gas *inert* yang banyak digunakan adalah nitrogen dan karbondioksida, karena kedua jenis gas ini mempunyai nilai panas jenis (C_p) yang tinggi ($C_p \cdot \text{CO}_2 = 37,564 \text{ J/mol K}$ dan $C_p \cdot \text{N}_2 = 28,98 \text{ J/mol K}$) sehingga lebih mudah menyerap panas dibandingkan dengan gas *inert* lain. Dalam penelitian ini, gas *inert* yang digunakan adalah gas nitrogen.

Nitrogen ditemukan oleh kimiawan dan fisikawan Daniel Rutherford di tahun 1772. Dia memisahkan oksigen dan karbon dioksida dari udara dan menunjukkan gas yang tersisa tidak menunjang pembakaran atau mahluk 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 mahluk 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

Physical properties	
Phase	gas
Density	(0 °C, 101.325 kPa) 1.251 g/L
Melting point	63.15 K (-210.00 °C, -346.00 °F)
Boiling point	77.36 K (-195.79 °C, -320.42 °F)
Critical point	126.21 K, 3.39 MPa
Heat of fusion	(N ₂) 0.720 kJ·mol ⁻¹
Heat of vaporization	(N ₂) 5.57 kJ·mol ⁻¹
Heat capacity	(25 °C) (N ₂) 29.124 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
Vapor pressure	
<i>P</i> /Pa	1 10 100 1 k 10 k 100 k
at <i>T</i> /K	37 41 46 53 62 77

Sumber: *Pocket Wikipedia for Windows*, 2009

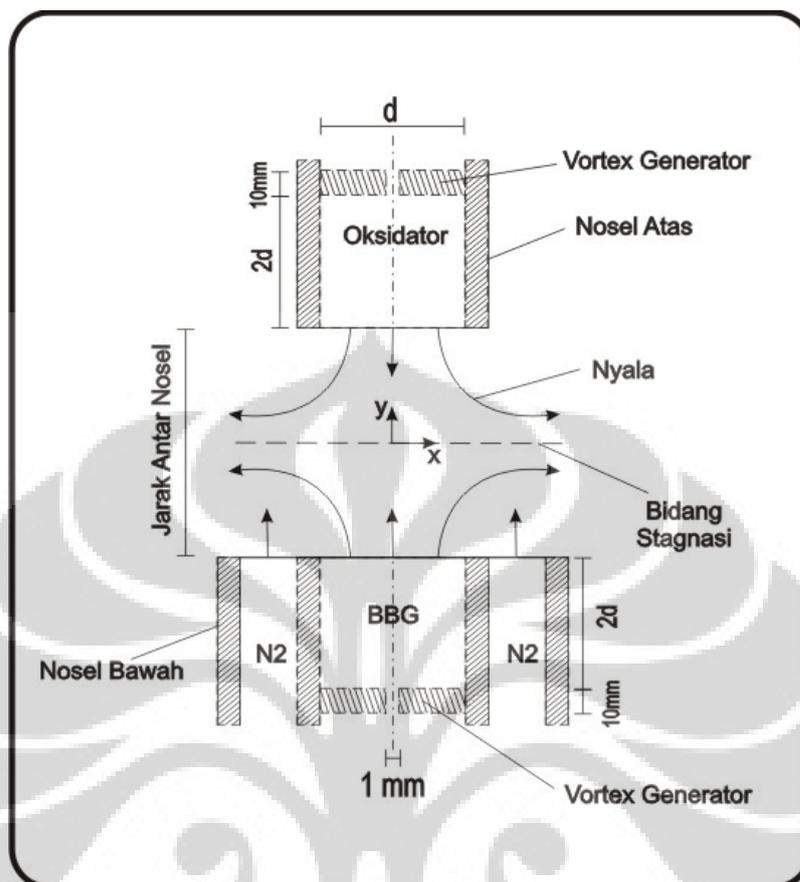
BAB 3 PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN

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 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 terhadap karakteristik nyala tersebut, dimana gas yang dialirkan pada *co-flow*-nya adalah gas nitrogen (N_2). Agar pengaruh *co-flow* pada karakteristik nyala tersebut dapat diidentifikasi dengan tepat, maka rasio antara debit nitrogen (N_2) dan bahan bakarnya (C_3H_8) atau Q_{N_2}/Q_f ditetapkan pada rasio 40/60, 50/50, 60/40, 70/30, dan 80/20. Sementara, pada rasio 10/90, 20/80, 30/70, 90/10 secara alat yang ada pada laboratorium DTM FTUI tidak dapat dilakukan.

3.1 Peralatan Penelitian

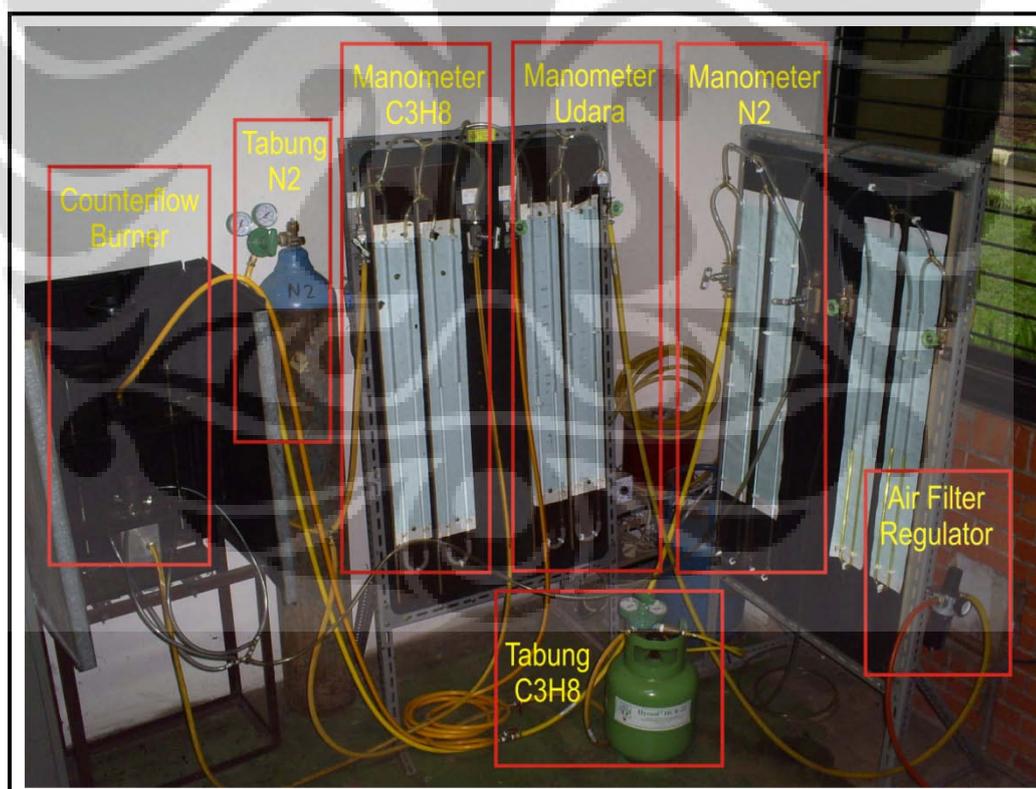
Proses pengamatan karakteristik nyala ini dilakukan dengan memasang *vortex generator* sejauh 2 kali diameter nosel dan diletakkan di tiap masing-masing pasangan nosel tersebut.



Gambar 3. 1. Skematik nosel yang digunakan

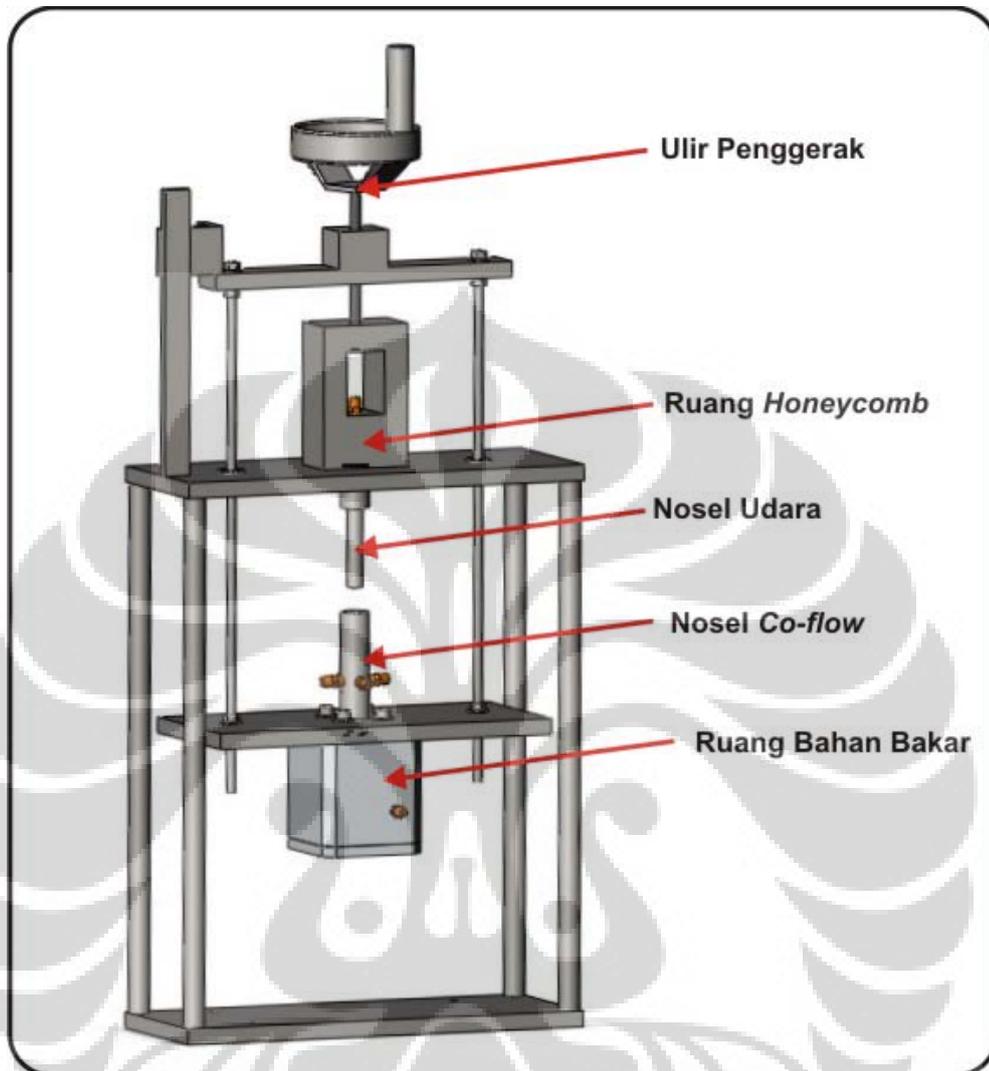
Pada penelitian ini, pengamatan dilakukan terhadap pola nyala yang terjadi dengan adanya *vortex generator* pada kedua nosel yang terletak simetris sehingga didapat titik tertentu dimana kestabilan nyala terjadi. Pada nosel sisi atas, digunakan udara kompresor yang berfungsi sebagai oksidator. Dalam hal ini, udara dari kompresor 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, 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.



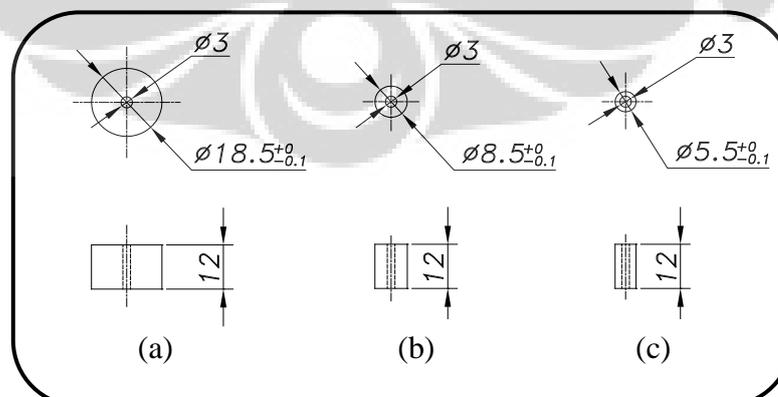
Gambar 3. 4. Nosen

b. *Vortex generator*

Bahan : Baja karbon tinggi (S50C)

Panjang : 12 mm

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



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

c. Ruang bahan bakar

Bahan : Aluminium

Fungsi : Sebagai tempat penampungan bahan bakar sebelum masuk nosel

d. Ruang *honeycomb*

Bahan : Baja karbon tinggi (S50C)

Ukuran : 84 x 51 x 23

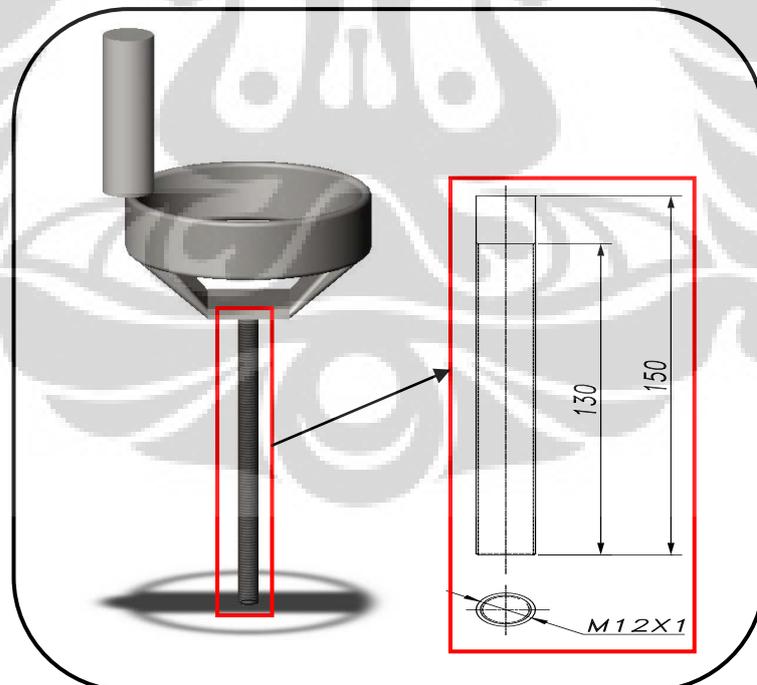
Fungsi : Untuk membuat aliran udara menjadi seragam sebelum akhirnya masuk ke dalam nosel besar. Di dalamnya berisi bola-bola baja (*honeycomb*) dengan diameter 4 mm.

e. Ulir penggerak

Bahan : Baja karbon tinggi (S50C)

Ukuran : M12x1, dan panjang = 150 mm

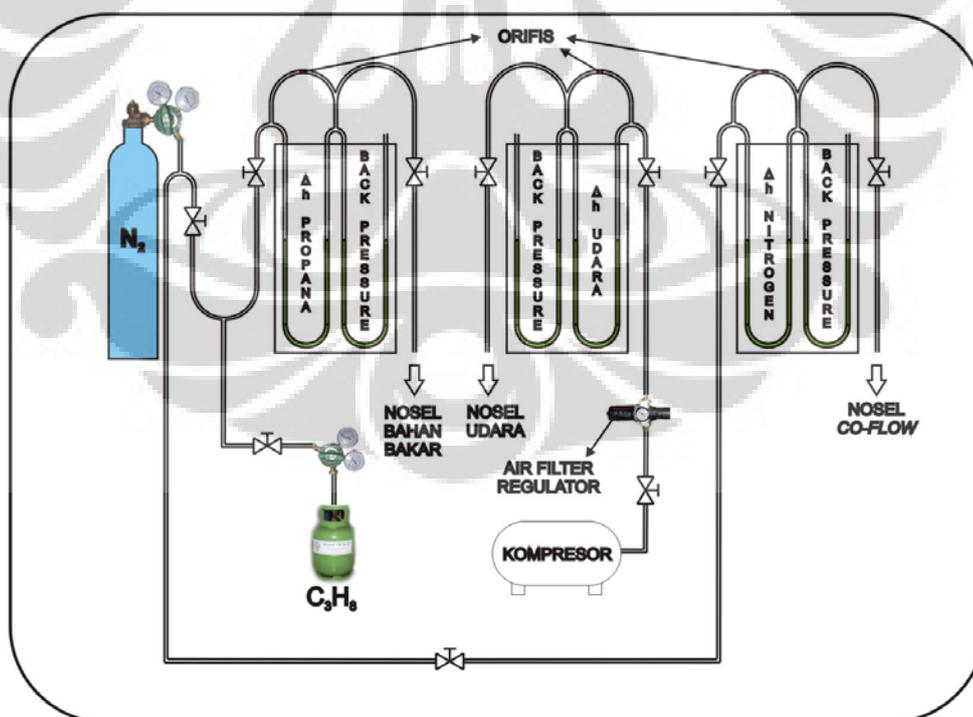
Fungsi : Sebagai penggerak, yang digunakan untuk mengatur jarak (L) antara nosel bahan bakar dan udara.



Gambar 3. 6. Ulir penggerak

3.1.2 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 3 pasang manometer tabung U yang masing-masing dilengkapi dengan sepasang katup jarum (*needle 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 sepasang 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.



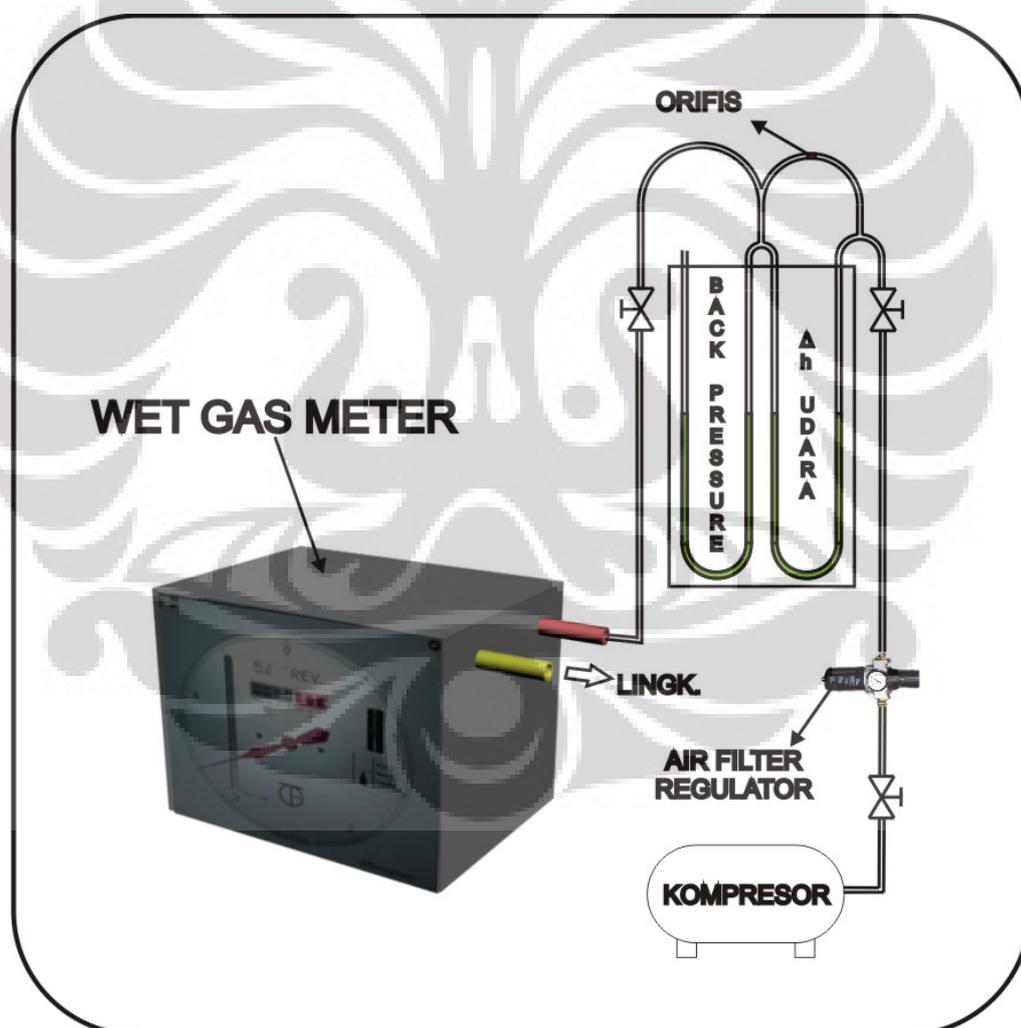
Gambar 3. 7. Skematik peralatan eksperimen nyala api difusi pada aliran berlawanan dengan penambahan *co-flow*

Universitas Indonesia

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 co-flow*.

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

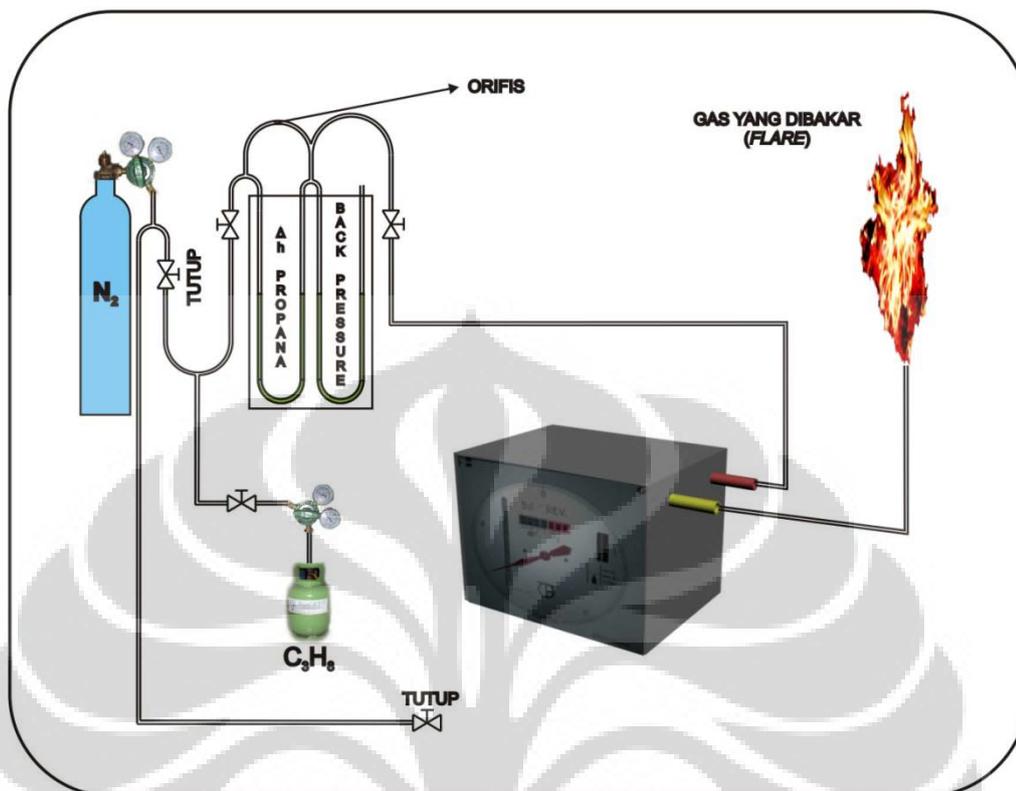


Gambar 3. 9. Level air pada *Wet Gas Meter* Shinagawa WE-2.5A

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

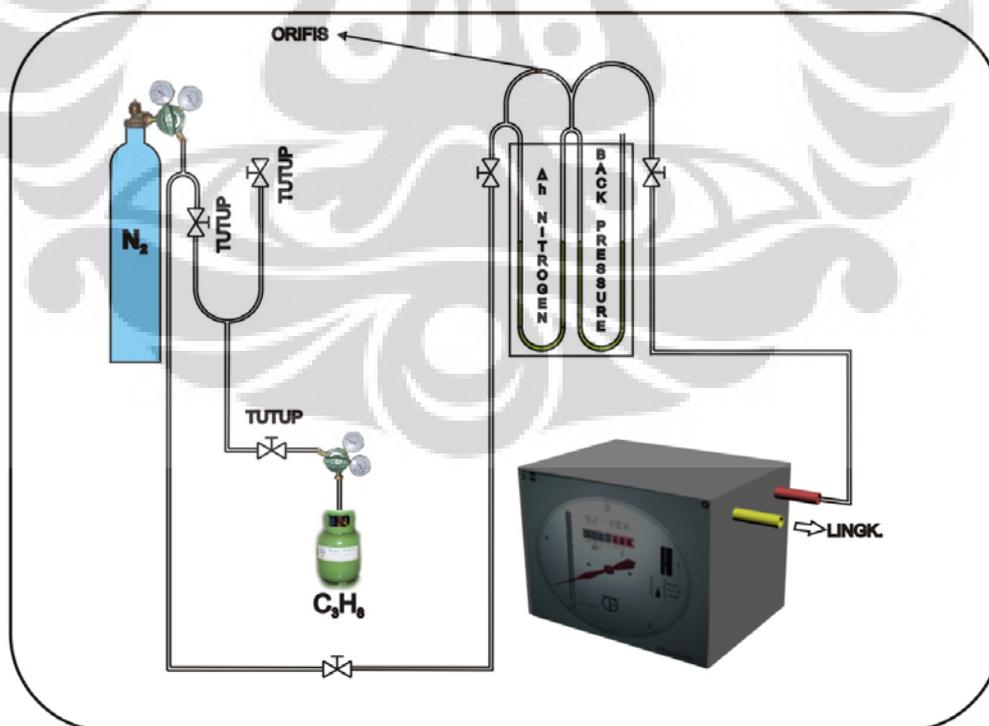
Adapun prosedur kalibrasi sistem suplai bahan bakar, yaitu:

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/cm^2 (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

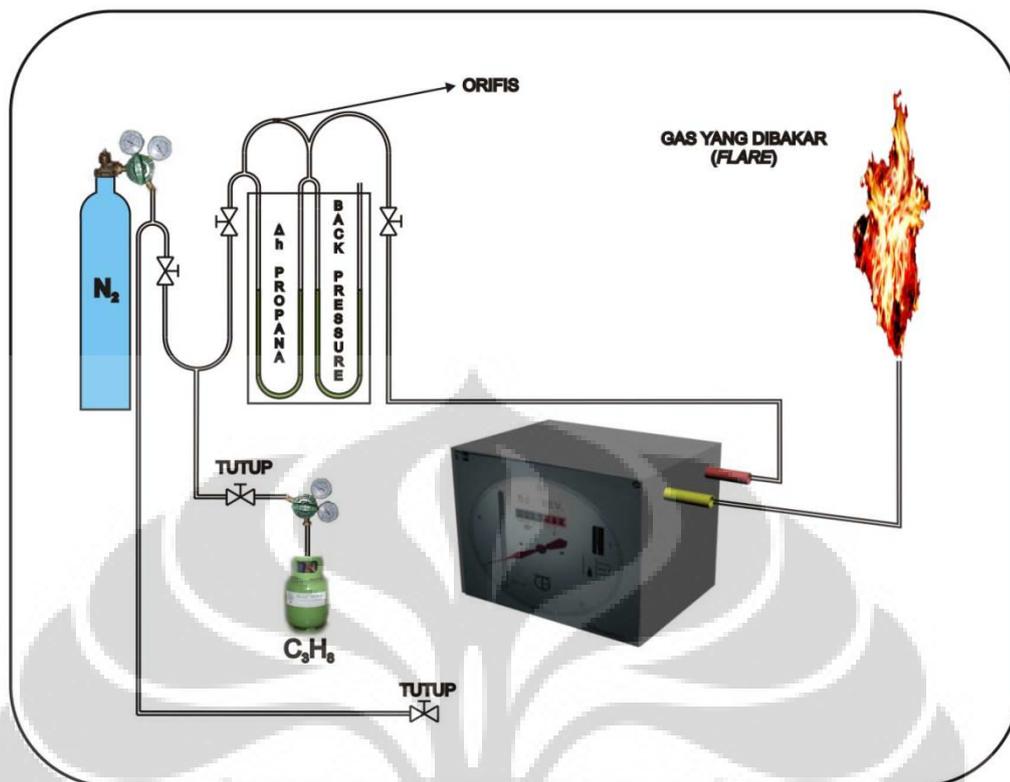
Universitas Indonesia

Prosedur kalibrasi sistem suplai nitrogen adalah sebagai berikut.

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

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 1-2 kg/cm².
10. Dalam kondisi *needle valve* nitrogen tertutup, dan *needle valve back pressure*-nya terbuka, buka *needle valve* 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).
11. Lalu, alirkan udara dari kompresor ke sistem dengan mengatur tekanan keluar 1-2 kg/cm².
12. Buka *needle valve* udara dan tutup *needle valve back pressure*-nya secara perlahan untuk mengalirkan udara ke nosel.
13. Jaga nilai Δh *back pressure* tetap konstan, dan alirkan udara secara perlahan sampai terjadi *extinct*.
14. Data mentah yang didapat adalah Δh udara saat terjadi *extinct* pada Δh bahan bakar dan Δh nitrogen ter-*setting*.
15. 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

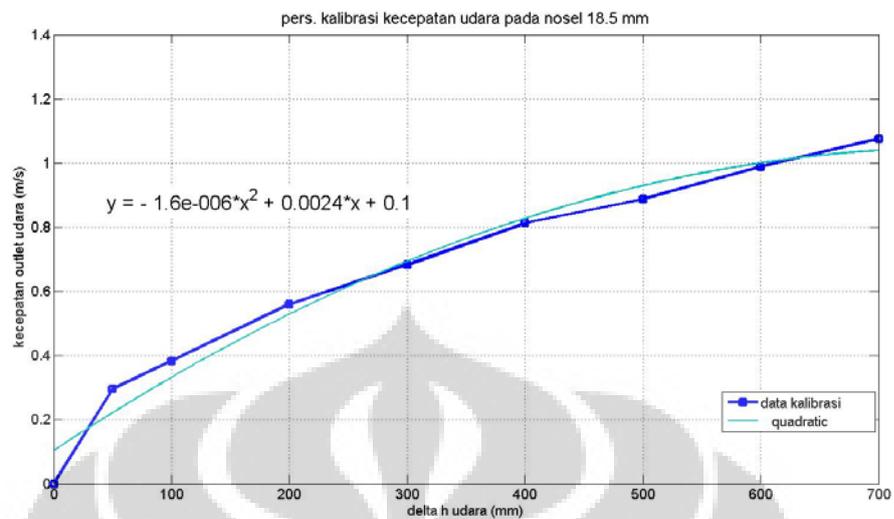
Dalam penelitian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik limit stabilitas nyala dan juga untuk mengamati visualisasi yang terjadi ini, beberapa parameter yang diatur diantaranya:

Universitas Indonesia

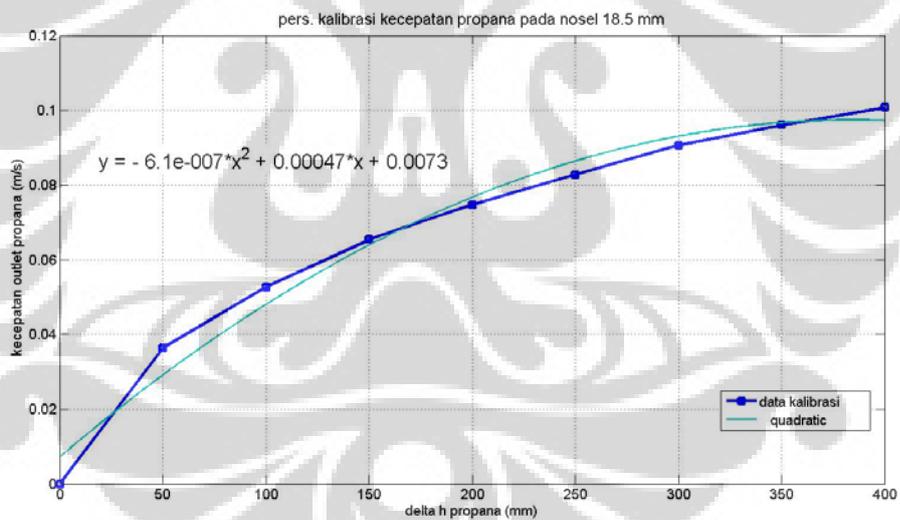
1. Kecepatan injeksi bahan bakar ($V_{propana}$) diperoleh dari data mentah Δh bahan bakar pada manometer kemudian dimasukkan pada persamaan kalibrasi-nya. Dalam hal ini, Δh bahan bakar diatur setiap kenaikan 50 mm, dengan dimulai dari $\Delta h = 50$ mm sampai dengan $\Delta h = 400$ mm.
2. Kecepatan *co-flow* injeksi nitrogen (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 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.
4. Letak *vortex generator* pada nosel ditentukan pada posisi $2d$ dari ujung nosel.
5. 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.
6. Diameter dalam nosel yang digunakan, yaitu dengan 3 variasi ukuran $\varnothing 18.5$, $\varnothing 8.5$, $\varnothing 5.5$.
7. 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}).

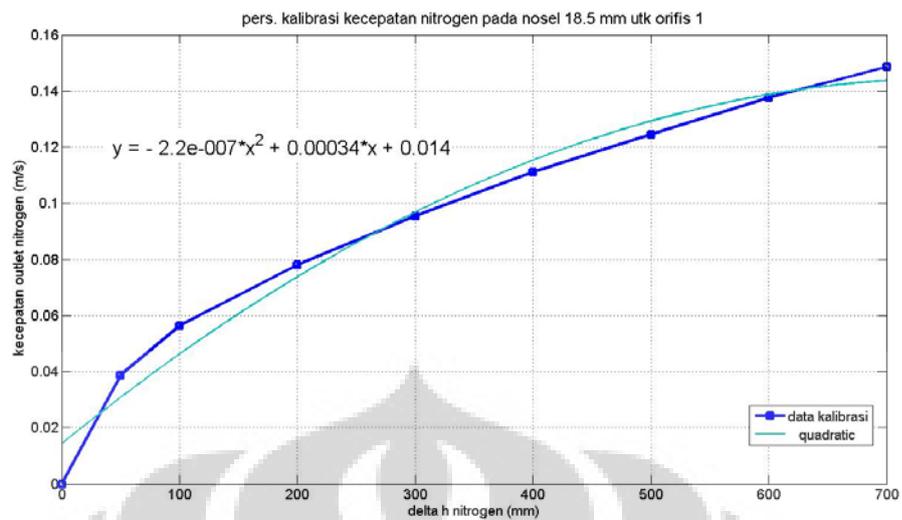
a. untuk nosel $\varnothing 18.5$ mm



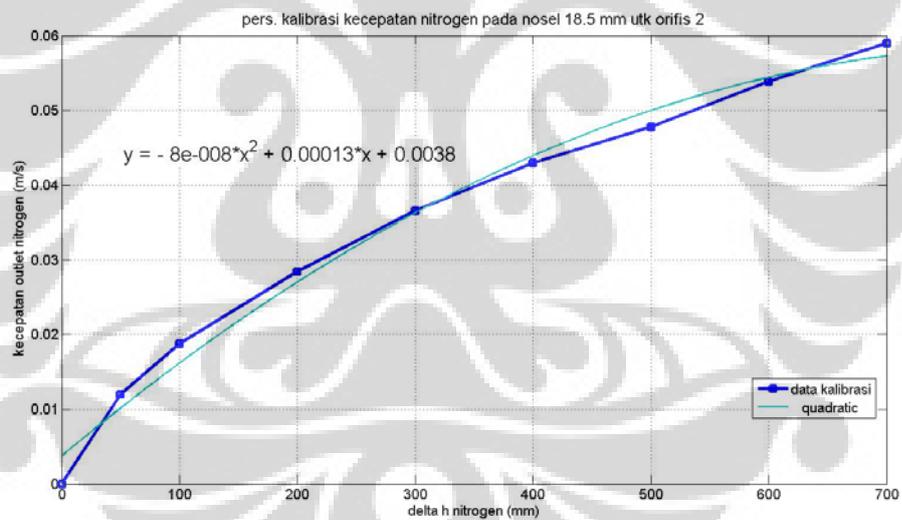
Gambar 3. 13. Persamaan kalibrasi kecepatan udara (V_{udara}) untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm



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

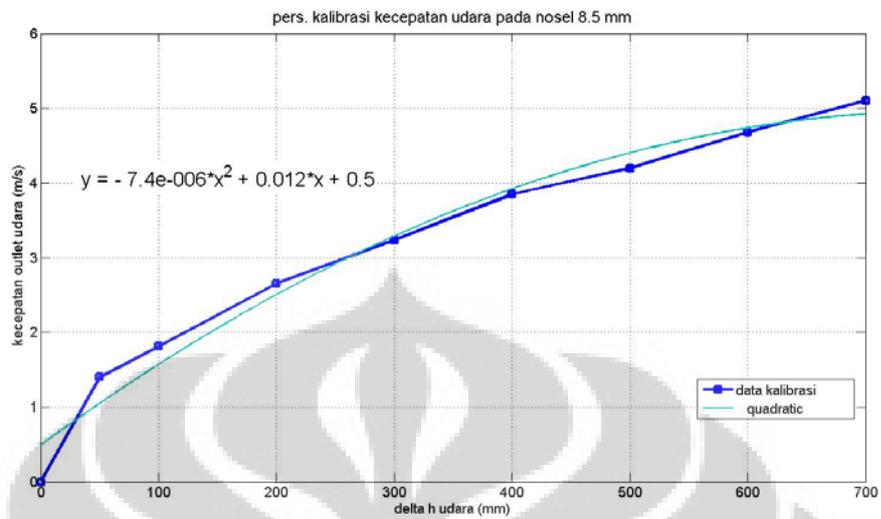


Gambar 3. 15. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm (orifis 1)

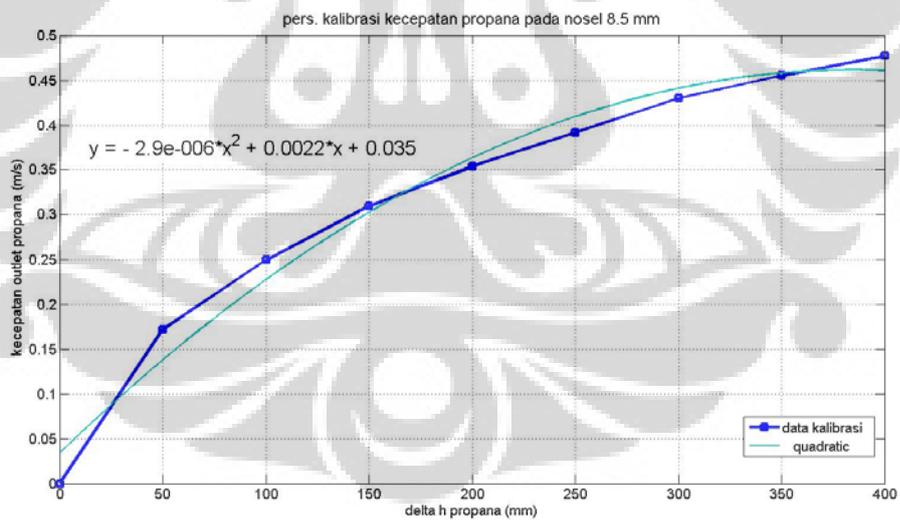


Gambar 3. 16. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 18.5$ mm (orifis 2)

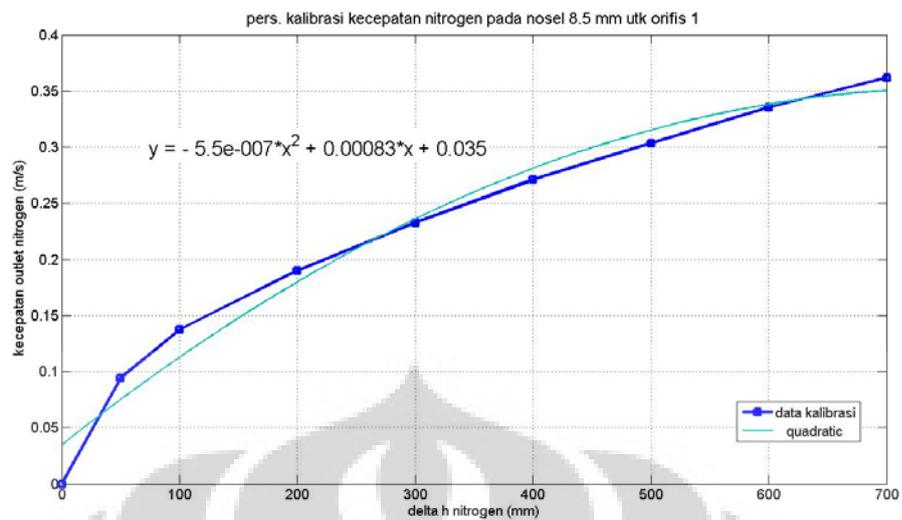
b. untuk nosel $\varnothing 8.5$ mm



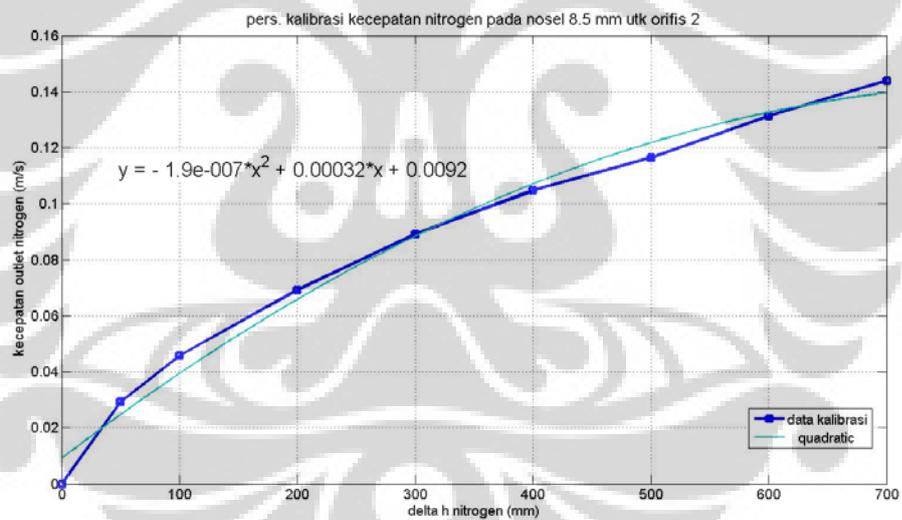
Gambar 3. 17. Persamaan kalibrasi kecepatan udara (V_{udara}) untuk diameter nosel $= \varnothing 8.5$ mm



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

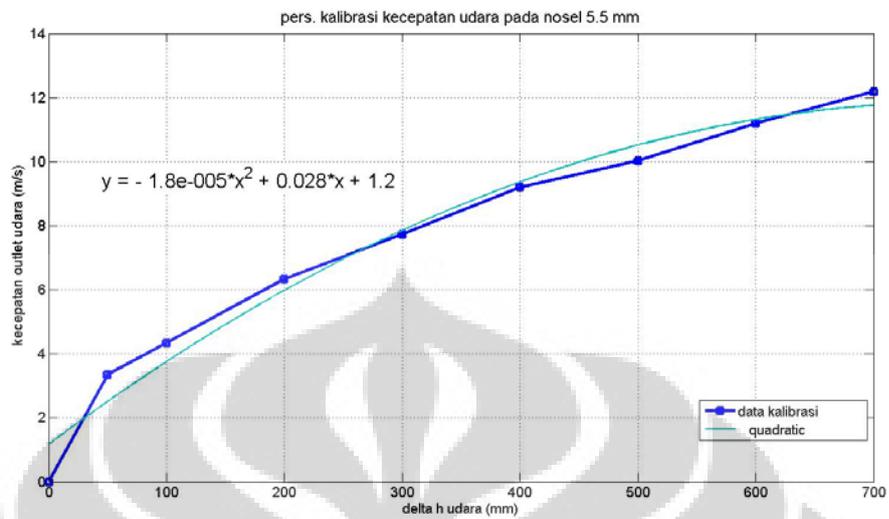


Gambar 3. 19. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm (orifis 1)

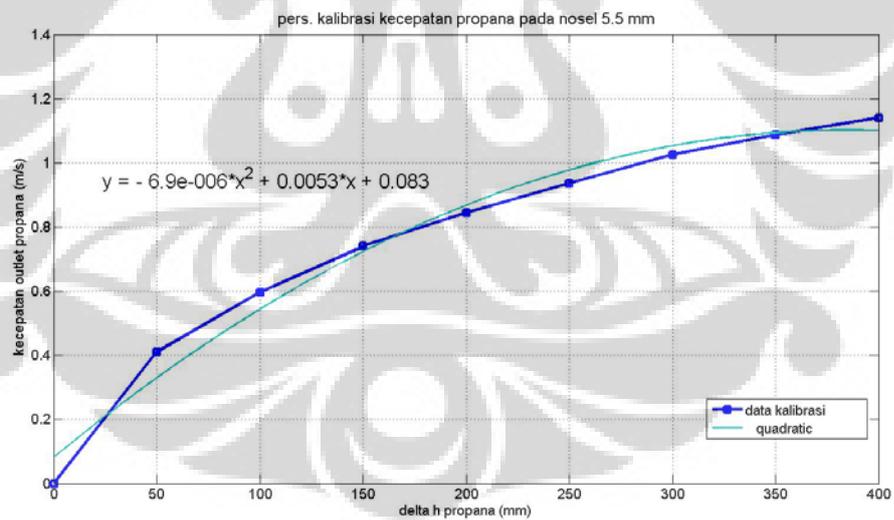


Gambar 3. 20. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 8.5$ mm (orifis 2)

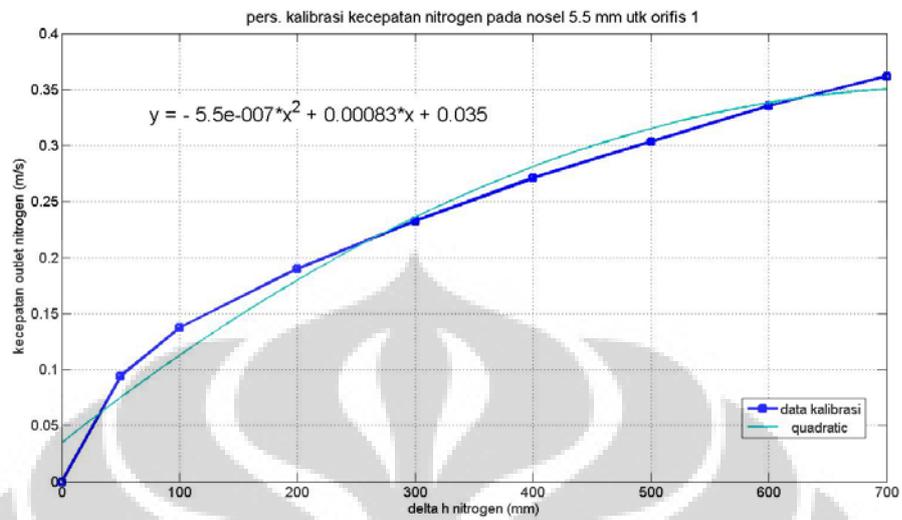
c. untuk nosel $\varnothing 5.5$ mm



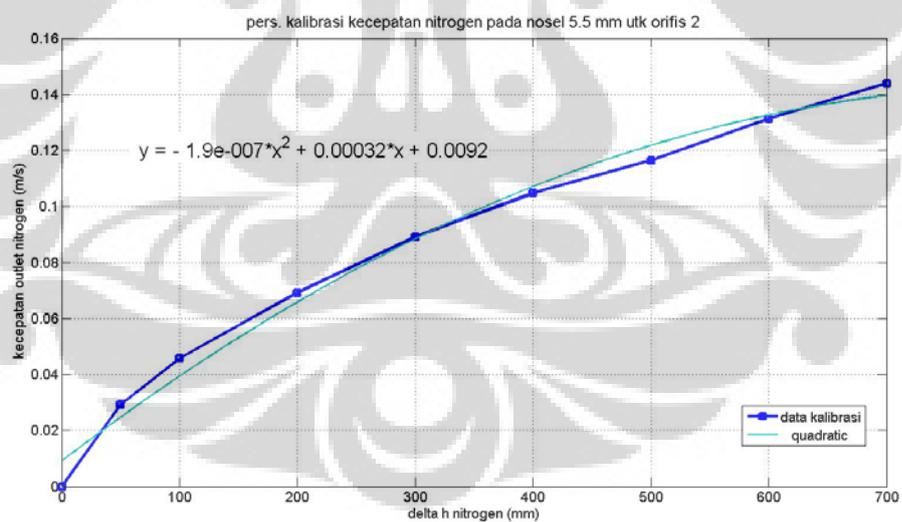
Gambar 3. 21. Persamaan kalibrasi kecepatan udara (V_{udara}) untuk diameter nosel $= \varnothing 5.5$ mm



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



Gambar 3. 23. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 5.5$ mm (orifis 1)



Gambar 3. 24. Persamaan kalibrasi kecepatan nitrogen (V_{N_2}) untuk diameter nosel = $\varnothing 5.5$ mm (orifis 2)

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 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 (lihat gambar 3.13, 3.14, 3.17, 3.18, 3.21, dan 3.22). 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 yang dipakai dalam pengambilan data.

Dalam mempelajari karakteristik nyala difusi *counter flow* dengan penambahan *co-flow* ini, penulis melakukan analisa dengan pendekatan fluks momentum (laju perubahan momentum per satuan waktu). Hal ini didasarkan pada tipe aliran bahan bakar dan udara yang diuji yaitu tipe tabrakan aliran fluida dimana diketahui bahwa dalam tabrakan fluida terdapat beberapa variabel yang berperan diantaranya massa fluida sebagai 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.

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

dimana:

τ = fluks momentum, (kg/ms²)

ρ = kerapatan fluida, (kg/m³)

v = kecepatan aliran fluida, (m/s)

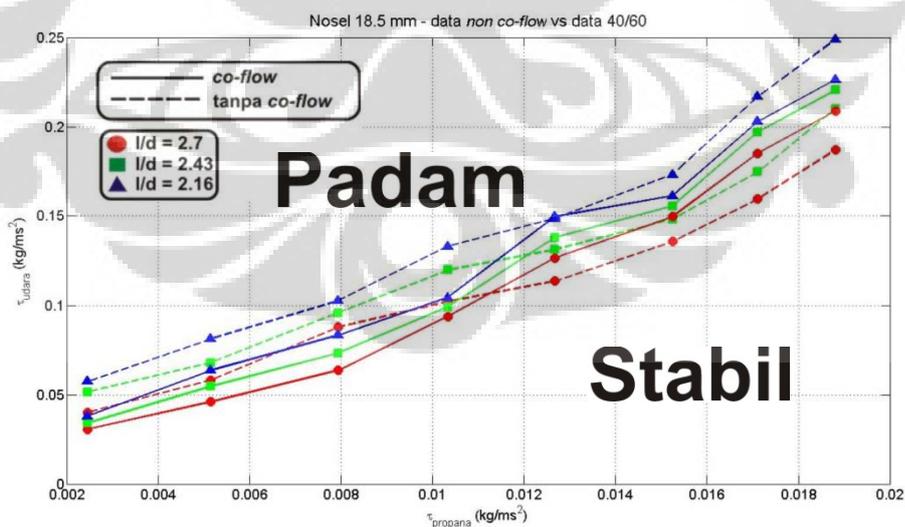
Pada perhitungan fluks momentum ini, kerapatan (*density*) udara dan bahan bakar dianggap konstan, pada kondisi $T_{\infty} = 300$ K dan $P = 1$ atm = 101.325 Pa.

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

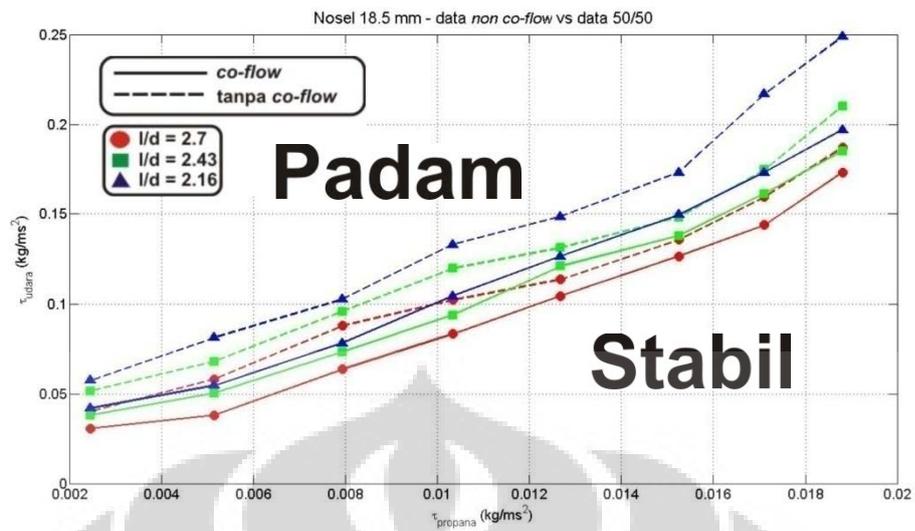
$$\rho_{\text{propana}} = 1.854 \text{ kg/m}^3$$

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). Berikut adalah grafik limit stabilitas nyala yang disajikan berupa data τ_{propana} versus τ_{udara} tiap rasio debit Q_{N_2}/Q_f dibandingkan dengan data *non co-flow* hasil penelitian Harinaldi & Furjiyanto (2008).

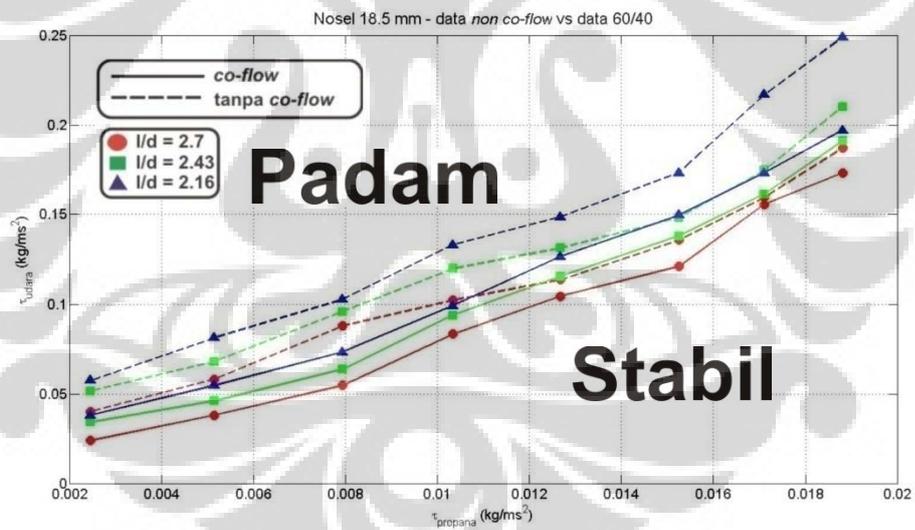
4.1.1 Limit Stabilitas Nyala untuk Diameter Nosel, $d = \text{Ø}18.5$ mm



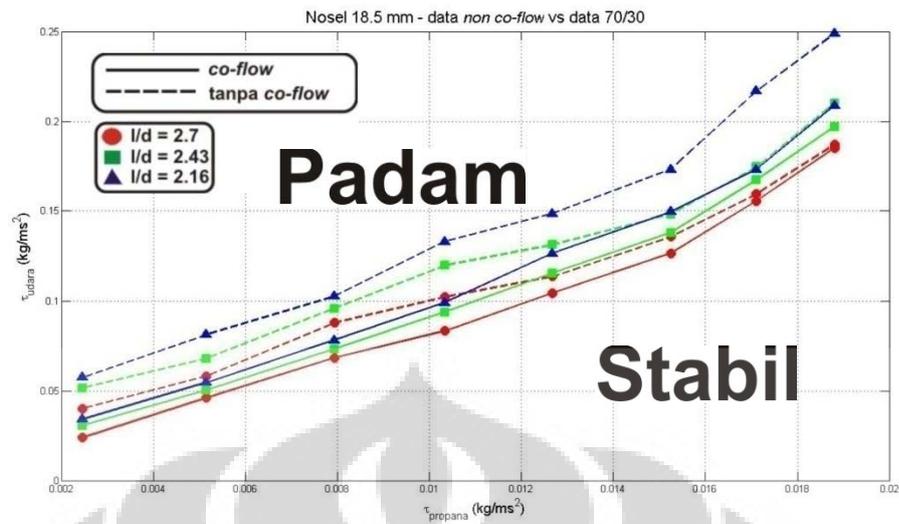
Gambar 4. 1. Limit stabilitas nyala data 40/60 dibandingkan data *non co-flow* untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 18.5 mm



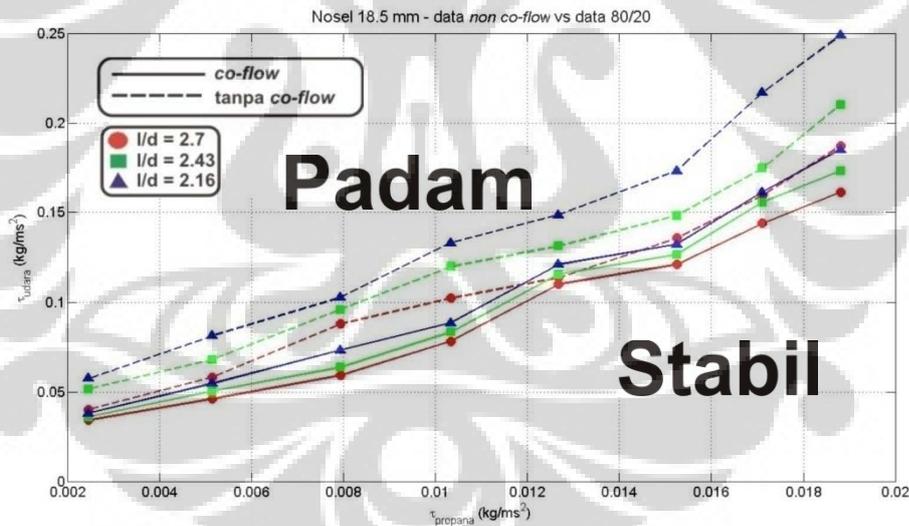
Gambar 4. 2. Limit stabilitas nyala data 50/50 dibandingkan data *non co-flow* untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 18.5 mm



Gambar 4. 3. Limit stabilitas nyala data 60/40 dibandingkan data *non co-flow* untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 18.5 mm



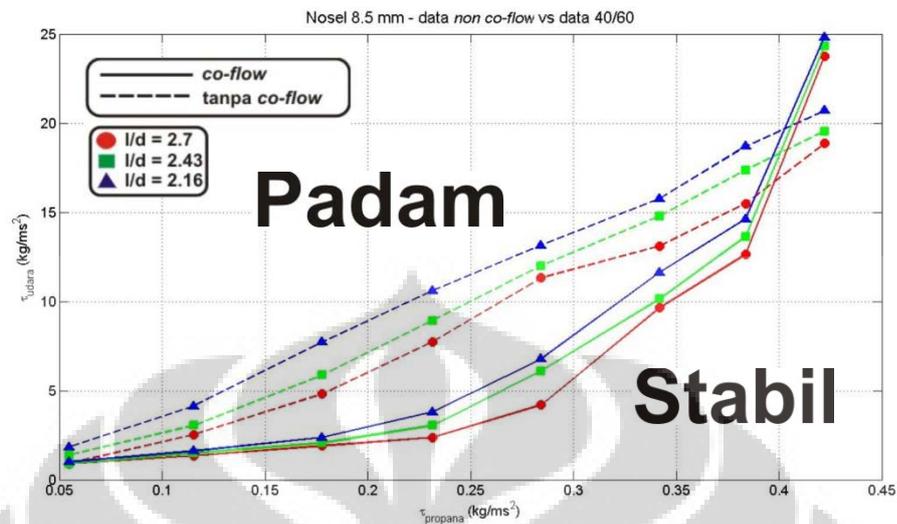
Gambar 4. 4. Limit stabilitas nyala data 70/30 dibandingkan data *non co-flow* untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 18.5 mm



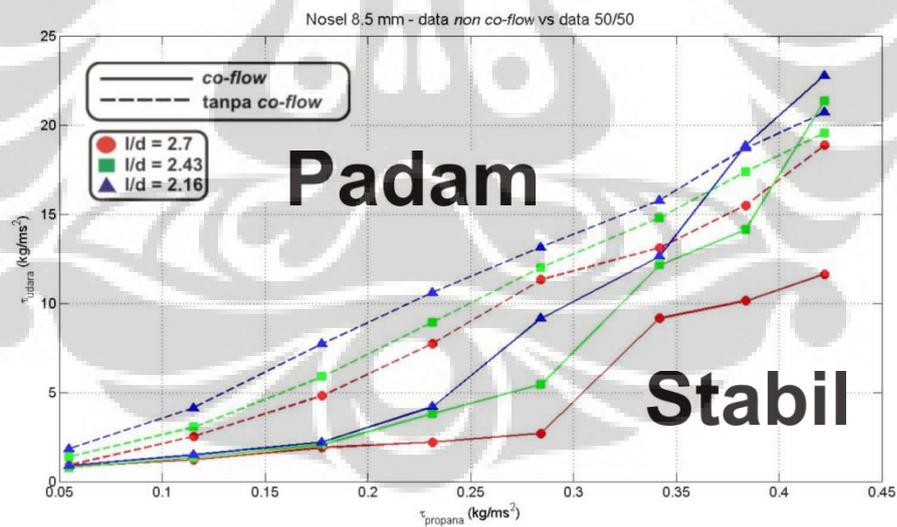
Gambar 4. 5. Limit stabilitas nyala data 80/20 dibandingkan data *non co-flow* untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 18.5 mm

Secara umum untuk nosel 18.5 mm, terlihat hampir semua titik data *co-flow* ada di bawah data *non co-flow* baik tiap rasio maupun tiap L/d -nya. Hanya pada gambar 4.1, terlihat ada titik data *co-flow* untuk $L/d = 2.43$ dan $L/d = 2.7$ berada di atas titik data *non co-flow*-nya.

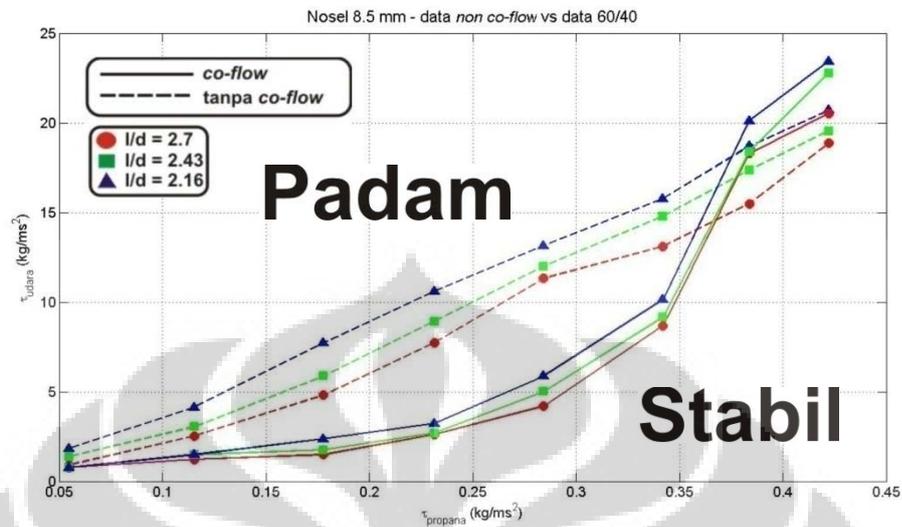
4.1.2 Limit Stabilitas Nyala untuk Diameter Nosel, $d = \text{Ø}8.5 \text{ mm}$



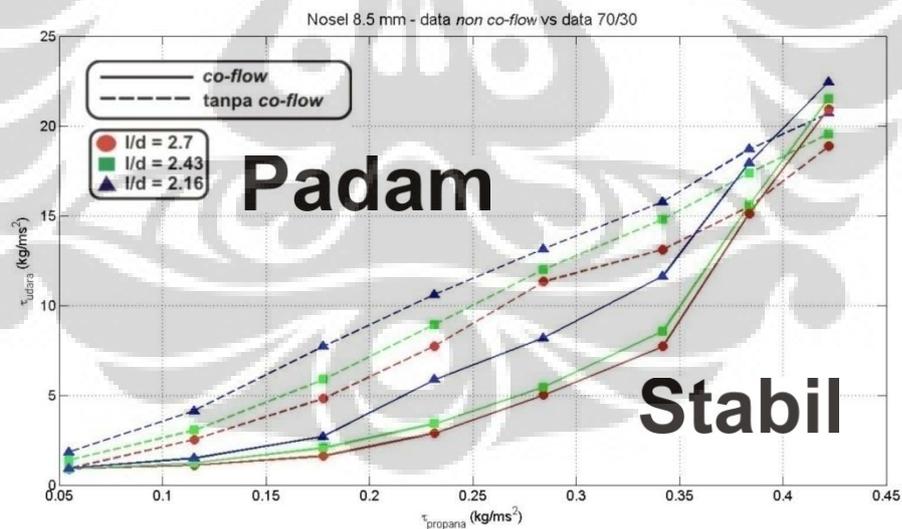
Gambar 4. 6. Limit stabilitas nyala data 40/60 dibandingkan data non co-flow untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 8.5 mm



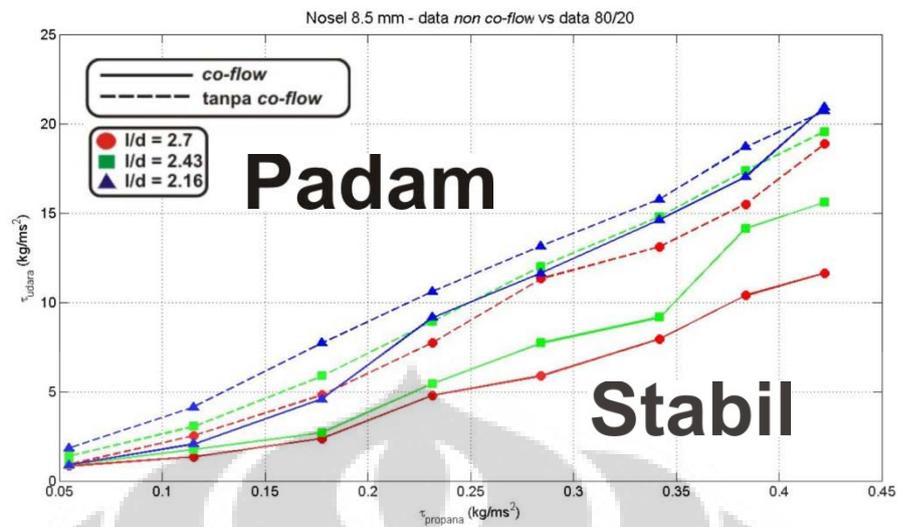
Gambar 4. 7. Limit stabilitas nyala data 50/50 dibandingkan data non co-flow untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 8.5 mm



Gambar 4. 8. Limit stabilitas nyala data 60/40 dibandingkan data non co-flow untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 8.5 mm



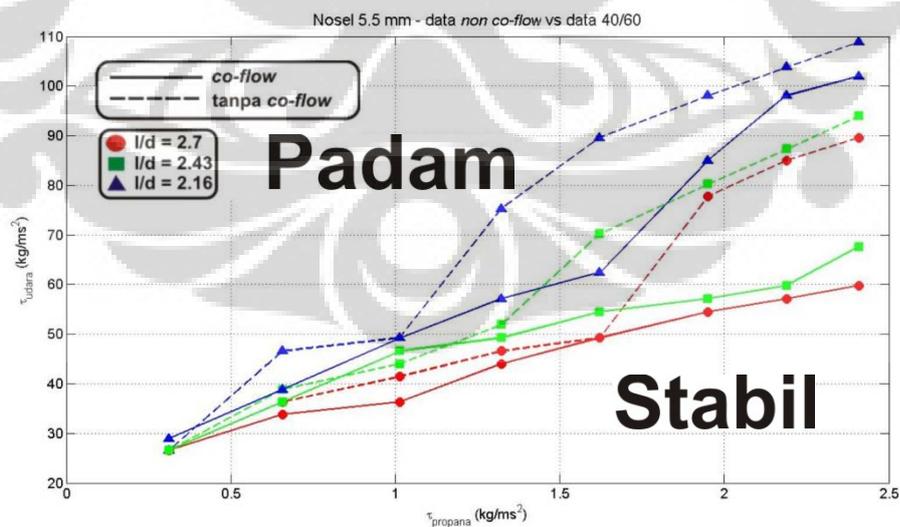
Gambar 4. 9. Limit stabilitas nyala data 70/30 dibandingkan data non co-flow untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 8.5 mm



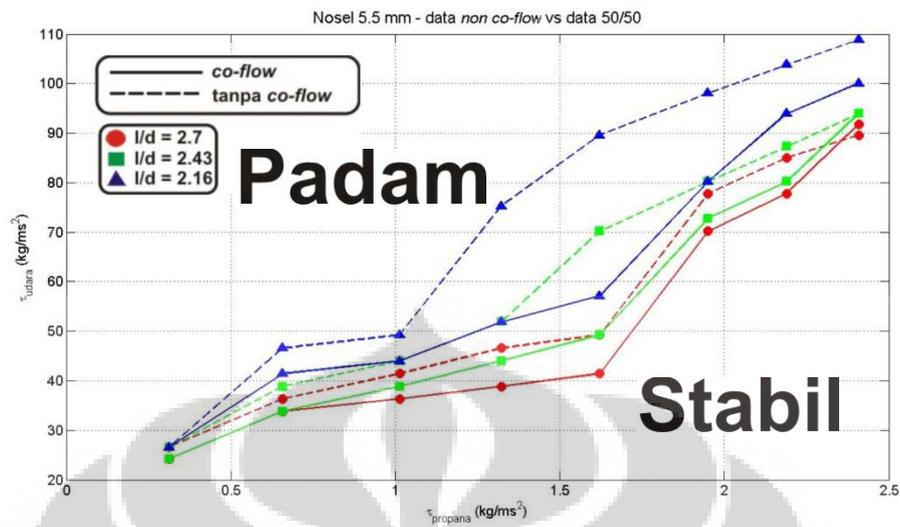
Gambar 4. 10. Limit stabilitas nyala data 80/20 dibandingkan data *non co-flow* untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 8.5 mm

Sedangkan untuk nosel 8.5 mm, secara umum kecenderungannya hampir sama dengan nosel 18.5 mm, namun mulai $\tau_{propana} = 0.34-0.35$ kg/ms² terjadi *shifting* kecenderungan, dimana titik data *co-flow* berada di atas titik data *non co-flow*-nya. Kecenderungan ini ditandai bentuk nyala yang sangat turbulen dan menyebar ke samping (lihat gambar 4.23).

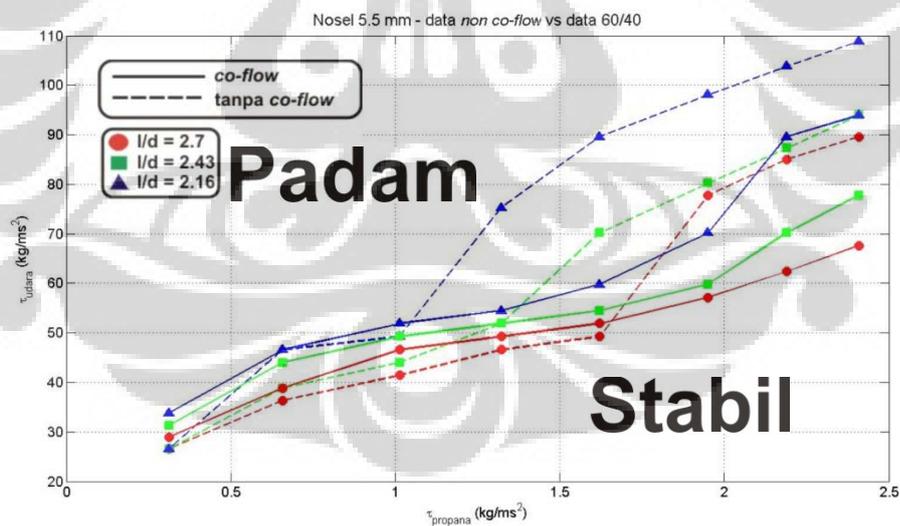
4.1.3 Limit Stabilitas Nyala untuk Diameter Nosel, $d = \varnothing 5.5$ mm



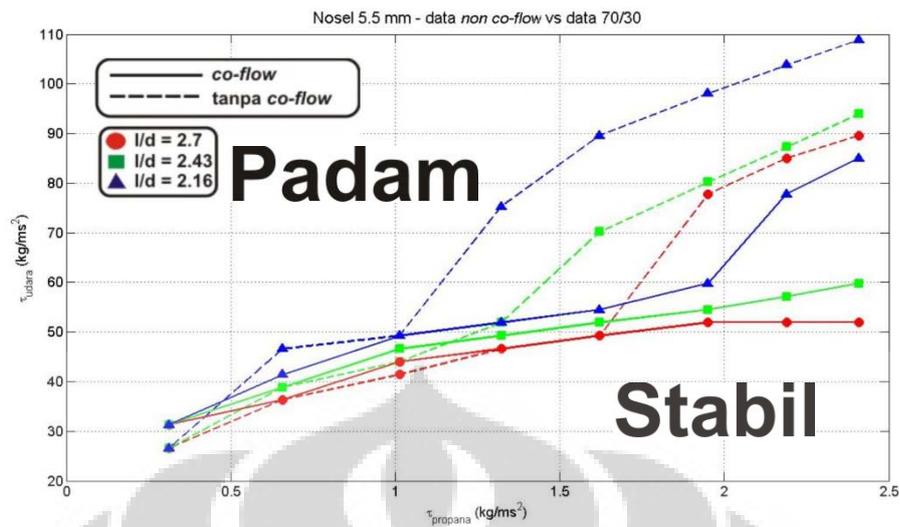
Gambar 4. 11. Limit stabilitas nyala data 40/60 dibandingkan data *non co-flow* untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 5.5 mm



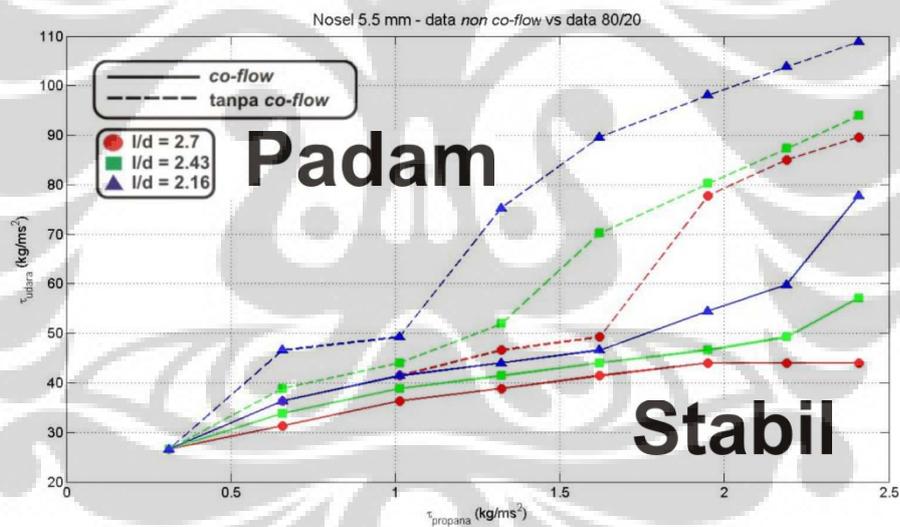
Gambar 4. 12. Limit stabilitas nyala data 50/50 dibandingkan data *non co-flow* untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 5.5 mm



Gambar 4. 13. Limit stabilitas nyala data 60/40 dibandingkan data *non co-flow* untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 5.5 mm



Gambar 4. 14. Limit stabilitas nyala data 70/30 dibandingkan data *non co-flow* untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 5.5 mm

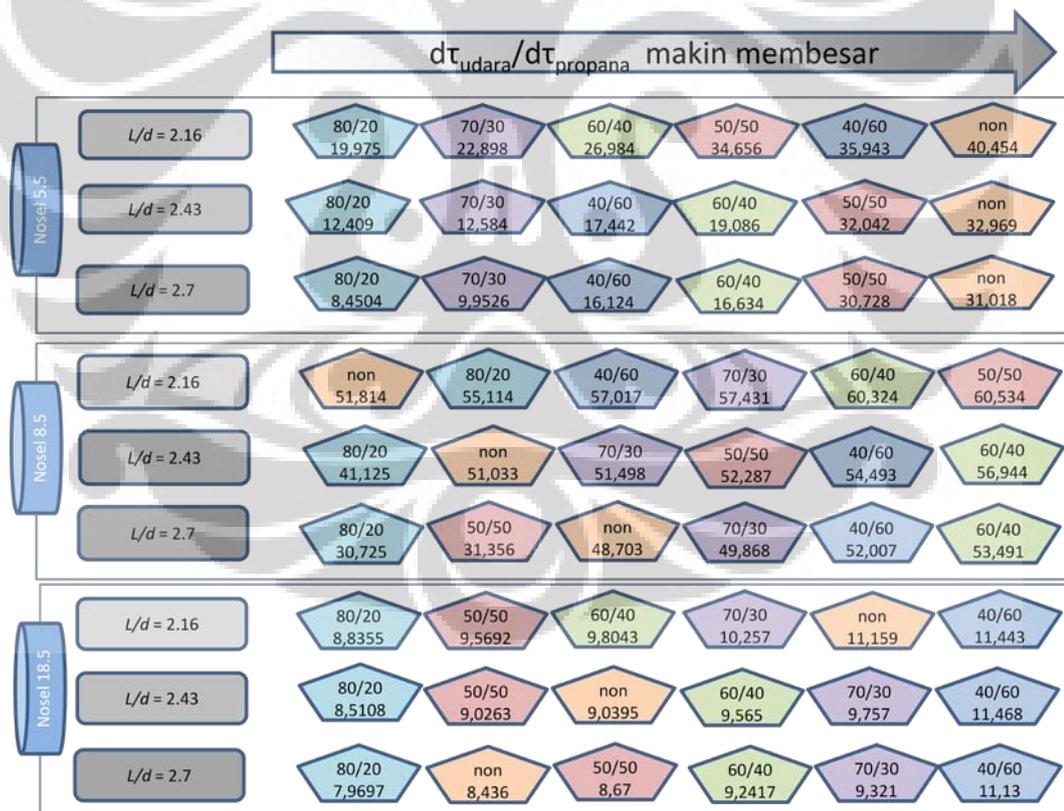


Gambar 4. 15. Limit stabilitas nyala data 80/20 dibandingkan data non co-flow untuk $L/d = 2.7; 2.43; 2.16$ pada nosel 5.5 mm

Sementara untuk nosel 5.5 mm ketika $\tau_{propana} = 0.35-1.25$ kg/ms² titik data *co-flow* dengan titik data *non co-flow*-nya cenderung berhimpitan. Beberapa titik data *co-flow* juga kadang berada di atas titik data *non co-flow*, tetapi jumlahnya tidak terlalu signifikan.

Hasil yang ditunjukkan sejumlah grafik di atas memperkuat hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Harinaldi & Furjiyanto (2008) mengenai “Pengaruh Rasio Gap-Diameter Nosel (L/d) terhadap Karakteristik Nyala Difusi pada Medan Aliran Berlawanan (*Counter-Flow*)” bahwa:

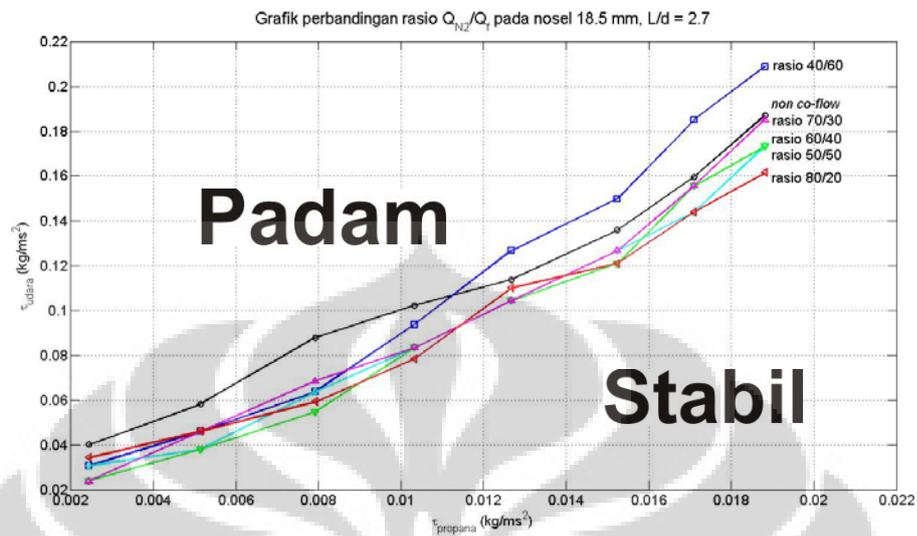
1. Untuk menjaga nyala tetap di dalam daerah stabil, maka kebutuhan suplai propana untuk setiap kenaikan fluks momentum udara (τ_{udara}) harus juga ditingkatkan.
2. Setiap penurunan rasio gap terhadap diameter nosel (L/d), maka akan menyebabkan naiknya limit stabilitas nyala.
3. Bila dibandingkan antara 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 sekitar 40-an (lihat gambar 4.16).



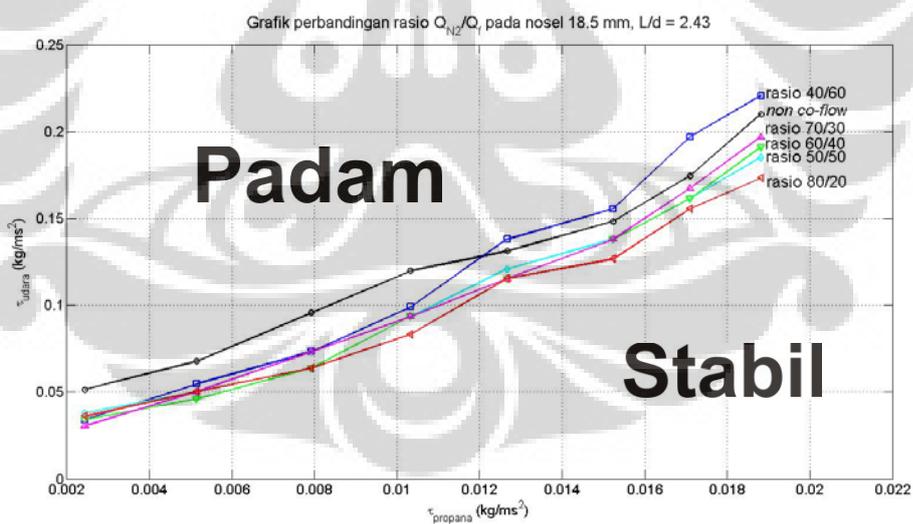
Gambar 4. 16. Rangkuman $d\tau_{udara}/d\tau_{propana}$ grafik limit stabilitas nyala

4.2 Pembahasan Pengaruh Penambahan *Co-flow*

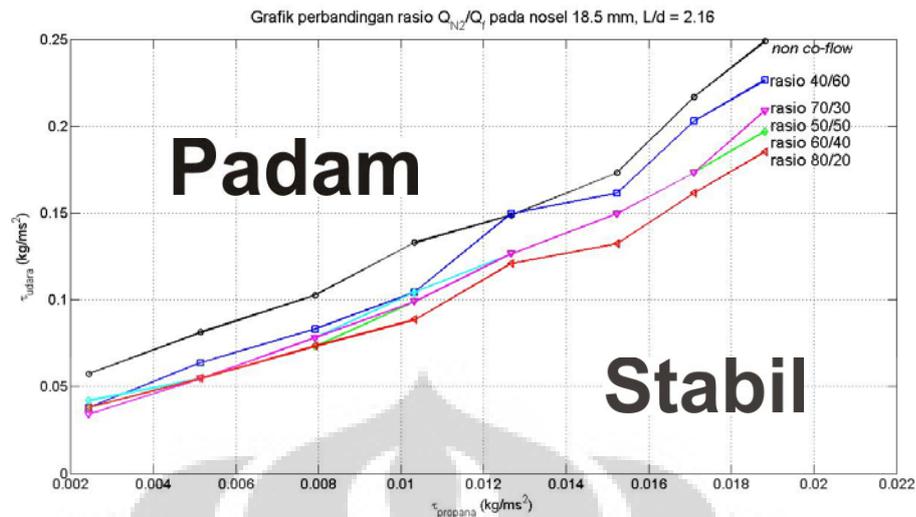
4.2.1 Nosel 18.5 mm



Gambar 4. 17. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_f pada nosel 18.5 mm, untuk $L/d = 2.7$



Gambar 4. 18. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_f pada nosel 18.5 mm, untuk $L/d = 2.43$



Gambar 4. 19. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_f pada nosel 18.5 mm, untuk $L/d = 2.16$

Pada nosel 18.5 mm, dapat dikatakan bahwa adanya penambahan *co-flow* menyebabkan turunnya limit stabilitas nyala dan itu sangat terlihat sekali jika kita menerapkan rasio debit $Q_{N_2}/Q_f = 80/20$ pada pengambilan datanya.

Jika memang aliran *co-flow* benar-benar dapat menyelubungi daerah reaksi dan mencegah difusi dengan udara sekitar, artinya suplai udara hanya berasal dari nosel udara, maka seharusnya semakin besar rasio debit Q_{N_2}/Q_f , maka semakin turun limit stabilitas nyalanya, artinya garis grafik untuk *non co-flow* akan ada di atas garis grafik 40/60, dan garis grafik 40/60 akan ada di atas grafik 50/50, begitu seterusnya hingga yang paling bawah adalah garis grafik 80/20. Namun pada grafik di atas, untuk rasio kurang dari 80/20, kadang kala terjadi *shifting* posisi.

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).

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

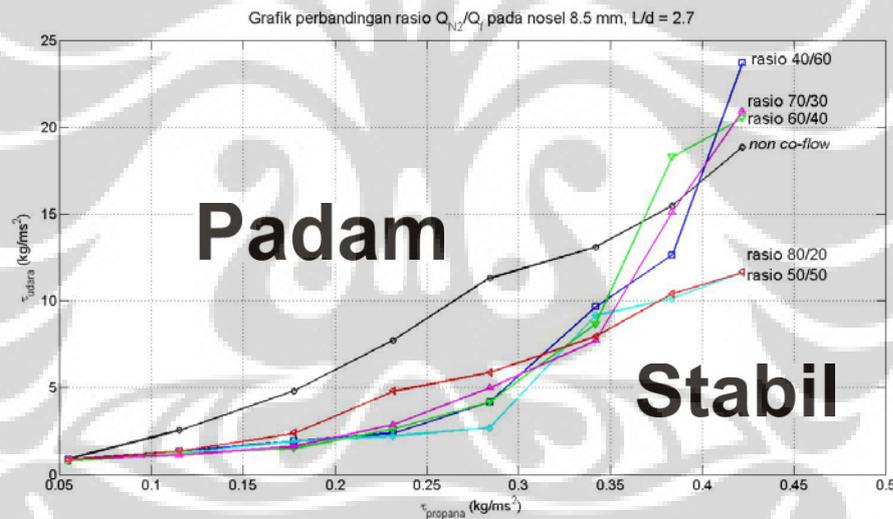
Q_{N_2}/Q_f	40/60	50/50	60/40	70/30	80/20
τ_{N_2}/τ_f	4/9	1/1	9/4	49/9	16/1

Tabel 4. 2. Penurunan Fluks Momentum Udara Limit Stabilitas Nyala dari *Non Co-flow* ke Rasio 80/20 untuk Nosel 18.5 mm

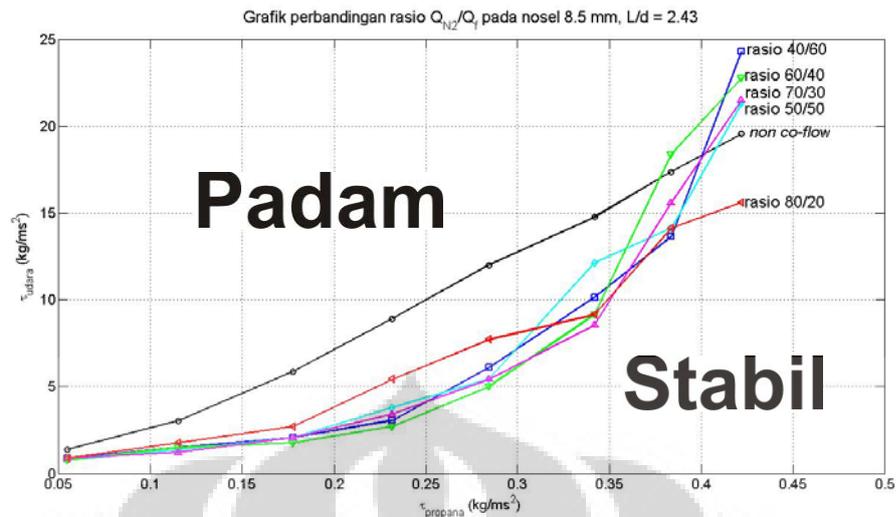
L/d	$\overline{\Delta\tau}_{\text{udara}} \text{ (kg/ms}^2\text{)}$	Persentase penurunan rata-rata
2.7	0,016331482	↓ 16.21%
2.43	0,024403006	↓ 21.89%
2.16	0,038494846	↓ 27.97%

Dari tabel 4.2, dapat kita simpulkan bahwa bila kita menerapkan suatu kondisi dari *non co-flow* ke rasio 80/20, maka penurunan fluks momentum udara yang terjadi akan semakin besar seiring L/d yang semakin kecil (*gap* semakin dekat).

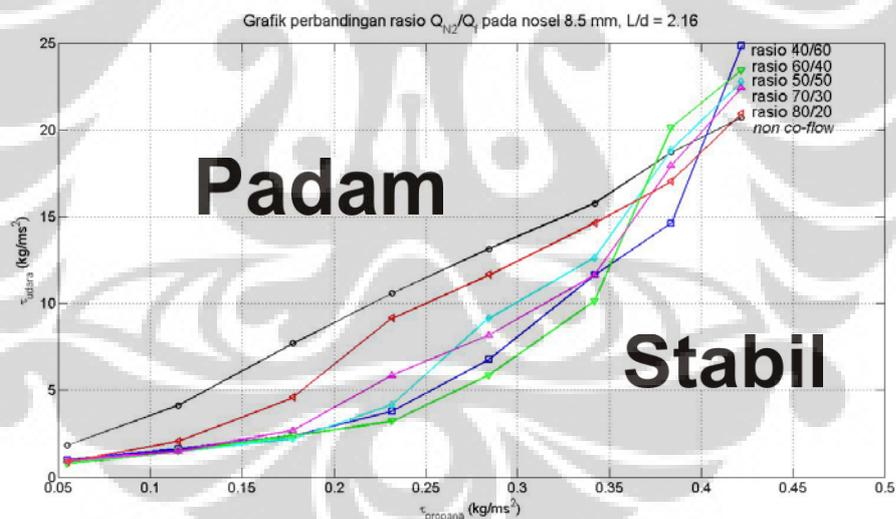
4.2.2 Nosel 8.5 mm



Gambar 4. 20. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N2}/Q_f pada nosel 8.5 mm, untuk $L/d = 2.7$



Gambar 4. 21. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_f pada nosel 8.5 mm, untuk $L/d = 2.43$



Gambar 4. 22. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_f pada nosel 8.5 mm, untuk $L/d = 2.16$

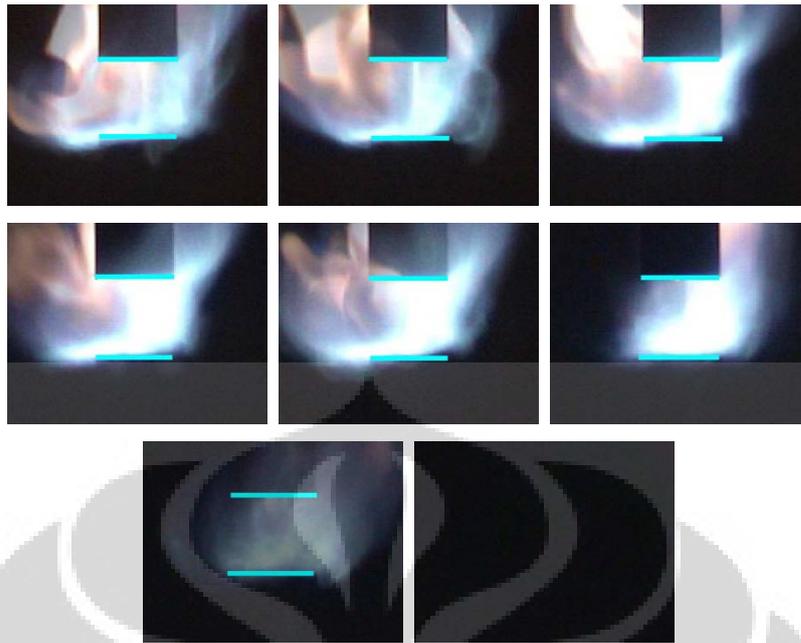
Terlihat juga di nosel 8.5 mm, adanya penambahan *co-flow* menyebabkan turunnya limit stabilitas nyala, namun kondisi berbeda terlihat pada rasio 80/20 dimana secara teori seharusnya garis grafiknya ada di paling bawah. Penyebab hal ini belum dapat kami jelaskan.

Sementara dalam nosel 8.5 mm untuk rasio *non* 80/20, mulai data ke-6 ($\tau_{\text{propana}} = 0.342 \text{ kg/ms}^2$) terjadi peningkatan limit stabilitas nyala melewati atau memotong garis grafik 80/20. Jika dilihat dari bentuk apinya pada kondisi sesaat sebelum *extinct*, maka nyala apinya seperti aliran air yang keluar dari *sprinkle*, sangat turbulen sekali (lihat gambar 4.22), mekanisme *co-flow* pun sudah tidak terjadi, terkalahkan oleh aliran udara dari atas yang terus diperbesar, nyala api yang terjadi juga berwarna biru yang menunjukkan campuran kaya oksidator (*excess air*). Namun, kondisi utama penyebab meningkatnya fluks momentum belum dapat kami jelaskan.

Tabel 4. 3. Penurunan Fluks Momentum Udara Limit Stabilitas Nyala dari *Non Co-flow* ke Rasio 80/20 untuk Nosel 8.5 mm

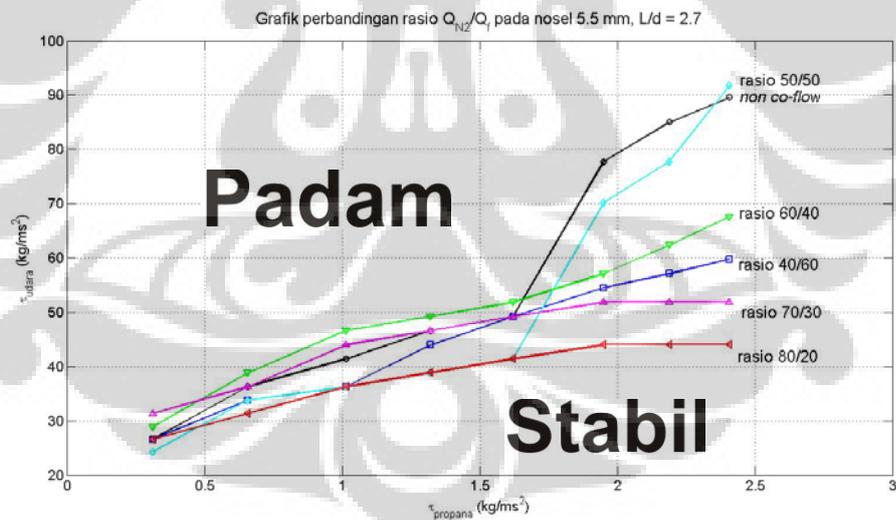
L/d	$\overline{\Delta\tau}_{\text{udara}} \text{ (kg/ms}^2\text{)}$	Persentase penurunan rata-rata
2.7	3,693897763	↓ 37.79%
2.43	3,193825125	↓ 35.54%
2.16	1,465234784	↓ 22.90%

Berbeda dengan nosel 18.5 mm, untuk nosel 8.5 mm dapat disimpulkan bahwa bila kita menerapkan suatu kondisi dari *non co-flow* ke rasio 80/20, maka penurunan fluks momentum udara yang terjadi akan semakin kecil seiring L/d yang semakin kecil (*gap* semakin dekat).

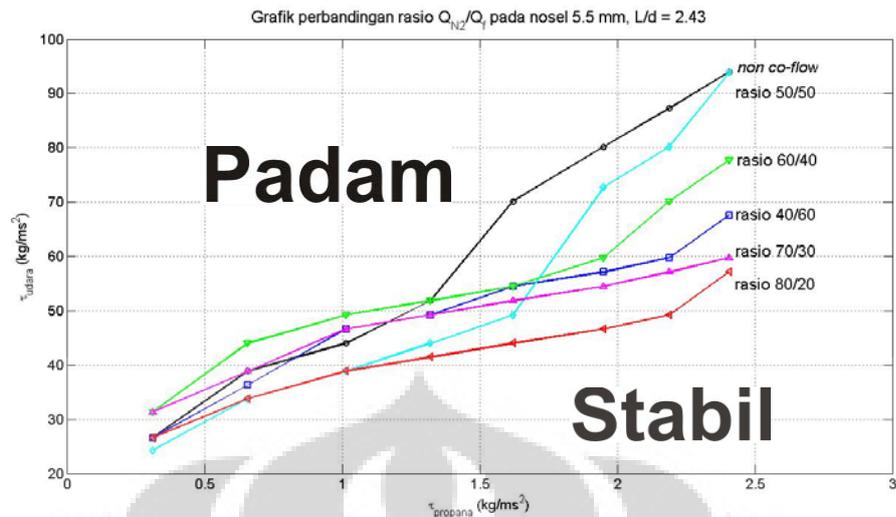


Gambar 4. 23. Kondisi mulai terjadi *extinct* dimana nyala api seperti aliran air yang keluar dari *sprinkle*

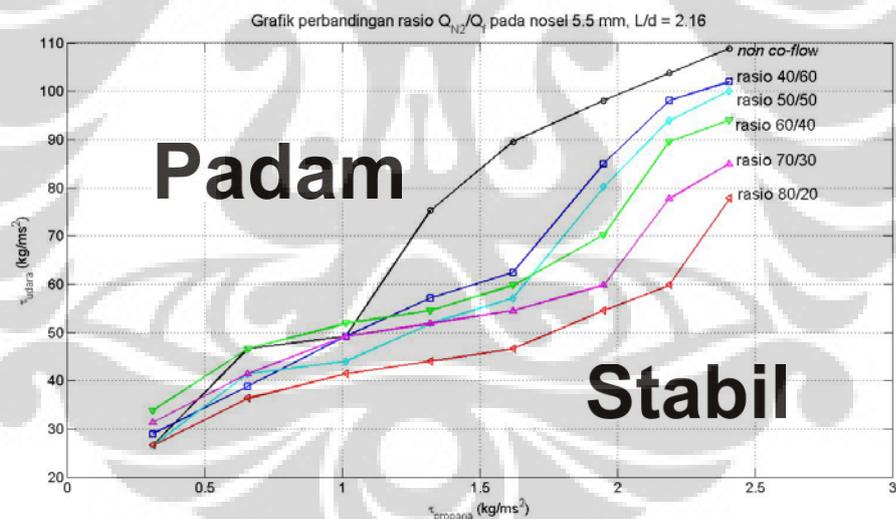
4.2.3 Nosel 5.5 mm



Gambar 4. 24. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_f pada nosel 5.5 mm, untuk $L/d = 2.7$



Gambar 4. 25. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_f pada nosel 5.5 mm, untuk $L/d = 2.43$



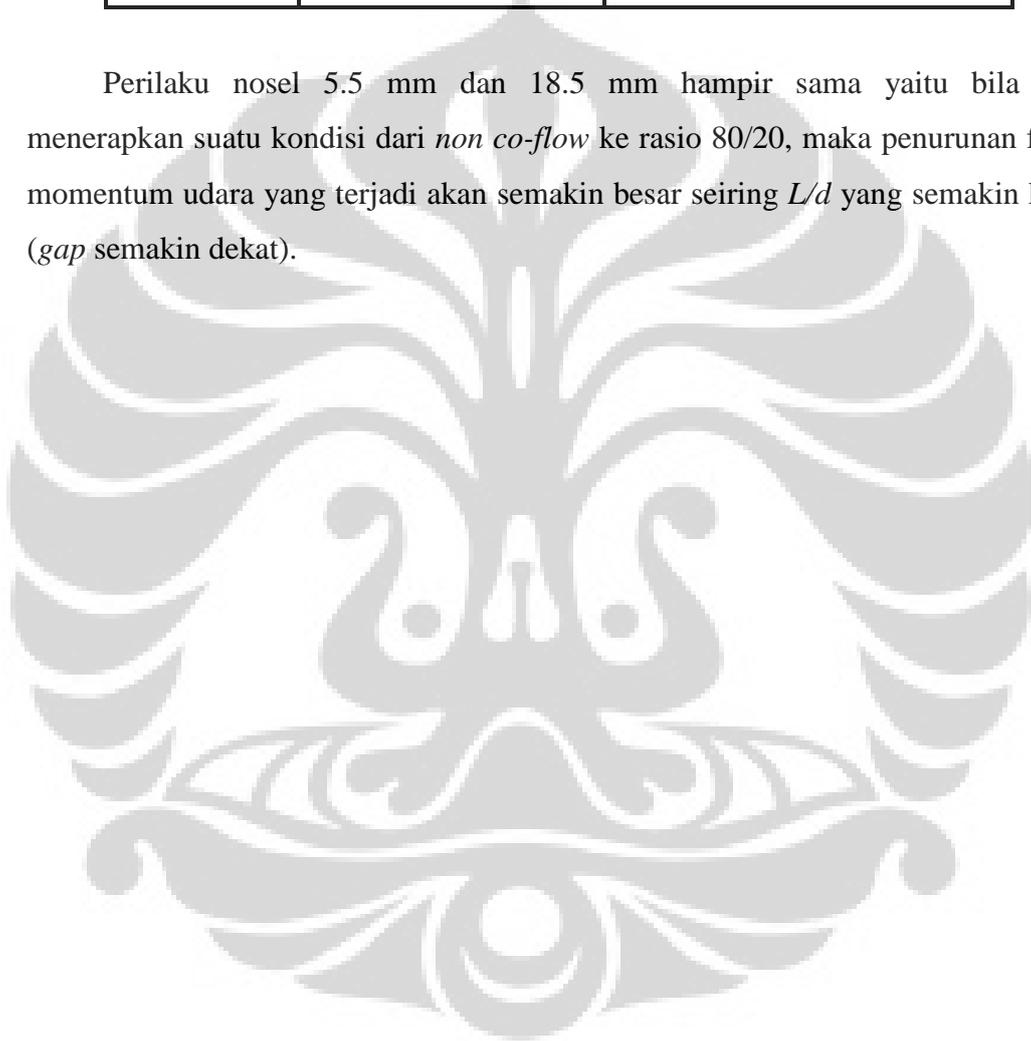
Gambar 4. 26. Limit stabilitas nyala tiap perbandingan rasio Q_{N_2}/Q_f pada nosel 5.5 mm, untuk $L/d = 2.16$

Sementara itu, untuk nosel 5.5 mm juga menunjukkan bahwa adanya penambahan *co-flow* menyebabkan turunnya limit stabilitas nyala dan itu sangat terlihat sekali jika kita menerapkan rasio debit $Q_{N_2}/Q_f = 80/20$ pada pengambilan datanya.

Tabel 4. 4. Penurunan Fluks Momentum Udara Limit Stabilitas Nyala dari *Non Co-flow* ke Rasio 80/20 untuk Nosel 5.5 mm

L/d	$\overline{\Delta\tau}_{\text{udara}}$ (kg/ms ²)	Persentase penurunan rata-rata
2.7	18,25325343	↓ 25.14%
2.43	19,42262412	↓ 25.86%
2.16	26,39431669	↓ 30.37%

Perilaku nosel 5.5 mm dan 18.5 mm hampir sama yaitu bila kita menerapkan suatu kondisi dari *non co-flow* ke rasio 80/20, maka penurunan fluks momentum udara yang terjadi akan semakin besar seiring L/d yang semakin kecil (*gap* semakin dekat).



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. Kemudian kami dapat simpulkan bahwa penurunan dari kondisi *non co-flow* ke kondisi 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*.

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.
- [3] Kuo, Kenneth K. *Principle of Combustion*. Canada: John Willey and Sons, 1986.
- [4] Peters, Norbert. *Turbulent Combustion*. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [5] Briones, Alejandro, et all. "Effect of Pressure on Counterflow H₂-Air Partially Premixed Flames." *Combustion and Flame*, 140 (2005), p.46-59.
- [6] Sharma, SP, and Chander Mohan. *Fuels and Combustion*. Bombay: Tata McGraw-Hill, 1984, p.301.
- [7] Sharma, SP, and Chander Mohan. *Fuels and Combustion*. Bombay: Tata McGraw-Hill, 1984), p.300.
- [8] Sharma, SP, and Chander Mohan. *Fuels and Combustion*. Bombay: Tata McGraw-Hill, 1984, p.303.
- [9] Sharma, SP, and Chander Mohan. *Fuels and Combustion*. Bombay: Tata McGraw-Hill, 1984, p.304.

- [10] Sharma, SP, and Chander Mohan. *Fuels and Combustion*. Bombay: Tata McGraw-Hill, 1984, p.305.
- [11] Tsuji H., Yamaoka I. "Structure Analysis of Counterflow Diffusion Flame in The Forward Stagnation region of a Porous Cylinder" *Combustion and Flame*, 13 (1971), p.723-731.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Katta, V. R., et all. "Extinction Criterion for Unsteady, Opposing Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, 137 (2004), p.198-221.
- [15] 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.
- [16] Turns, Stephen R. *An Introduction to Combustion Concepts and Applications*. Pennsylvania, 1996, p.246.

DAFTAR PUSTAKA

“Chapter 18 Combustion and Fuels.” *2001 ASHRAE HANDBOOK*. CD-ROM. ASHRAE. 2001.

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

Lewis, Bernard, and Guenther von Elbe. *Combustion, Flames, and Explosions of Gases*. London: Academic Press, 1961.

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

Williams, Forman A. *Combustion Theory, 2nd Edition*. California: The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1985.

Lampiran Pengolahan Data



Universitas Indonesia

Data Nosel 8.5 mm

Parameter:

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

ρ prop.	1,854 kg/m ³
ρ udara	1,161 kg/m ³

Non Co-Flow

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044			36	0,881928	0,054805404	0,903333433
2	100	0,249386579			95,2	1,47875872	0,115307057	2,539665147
3	150	0,30959844			155,2	2,03359072	0,177708114	4,802959499
4	200	0,353516414			220,4	2,57936688	0,231701527	7,726949249
5	250	0,391596472			293,6	3,12119328	0,284306815	11,31418168
6	300	0,429515984			329,6	3,36014688	0,3420333	13,11288781
7	350	0,455009836			377,6	3,65052768	0,383840945	15,47722561
8	400	0,477175403			450,4	4,02937888	0,422149061	18,85636748

QN2/Qf 80/20

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	87,6	0,103994504	32,5	0,84510625	0,054805404	0,829477192
2	100	0,249386579	180	0,167564376	55	1,078825	0,115307057	1,35171093
3	150	0,30959844	274	0,222628632	90	1,4283	0,177708114	2,36930349
4	200	0,353516414	355	0,262306034	155	2,031825	0,231701527	4,794622521
5	250	0,391596472	433	0,293714381	180	2,2482	0,284306815	5,870183923
6	300	0,429515984	519	0,320611438	225	2,615625	0,3420333	7,945711295
7	350	0,455009836	581	0,334971506	275	2,990625	0,383840945	10,38737333
8	400	0,477175403	638	0,344454657	300	3,165	0,422149061	11,63400512

Data Nosel 18.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

QN2/Qf 70/30

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	30,9	0,024759631	20	0,1432	0,002442374	0,023815947
2	100	0,052646254	63,4	0,035199576	50	0,199	0,005138598	0,045992601
3	150	0,065357158	96,3	0,045284041	75	0,24275	0,007919469	0,068438471
4	200	0,074628374	124	0,053397036	90	0,2678	0,010325657	0,083291938
5	250	0,082667188	152	0,061247097	110	0,2998	0,012669984	0,104386678
6	300	0,090672111	182	0,069266499	130	0,3302	0,015242534	0,126629811
7	350	0,096053939	203	0,07463918	155	0,36595	0,01710567	0,155533994
8	400	0,100733157	223	0,079571576	180	0,3992	0,018812851	0,185081447

QN2/Qf 60/40

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	12,8	0,018739379	20	0,1432	0,002442374	0,023815947
2	100	0,052646254	26,9	0,023441874	40	0,1808	0,005138598	0,037964586
3	150	0,065357158	41	0,028054933	60	0,2168	0,007919469	0,054588402
4	200	0,074628374	53	0,031910492	90	0,2678	0,010325657	0,083291938
5	250	0,082667188	64,6	0,035575955	110	0,2998	0,012669984	0,104386678
6	300	0,090672111	77,2	0,039488821	125	0,32275	0,015242534	0,120980207
7	350	0,096053939	86,3	0,042270363	155	0,36595	0,01710567	0,155533994
8	400	0,100733157	94,6	0,044774889	170	0,3862	0,018812851	0,173223321

Data Nosel 18.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

QN2/Qf 50/50

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	56	0,010946935	30	0,1622	0,002442374	0,030555087
2	100	0,052646254	99,6	0,016174246	40	0,1808	0,005138598	0,037964586
3	150	0,065357158	140	0,020747296	70	0,2342	0,007919469	0,063702372
4	200	0,074628374	170	0,023974714	90	0,2678	0,010325657	0,083291938
5	250	0,082667188	207	0,027757521	110	0,2998	0,012669984	0,104386678
6	300	0,090672111	241	0,031041121	130	0,3302	0,015242534	0,126629811
7	350	0,096053939	266	0,033337917	145	0,35195	0,01710567	0,143861227
8	400	0,100733157	288	0,035276645	170	0,3862	0,018812851	0,173223321

QN2/Qf 40/60

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	31,1	0,007825605	30	0,1622	0,002442374	0,030555087
2	100	0,052646254	53,5	0,010638014	50	0,199	0,005138598	0,045992601
3	150	0,065357158	74,2	0,01316584	70	0,2342	0,007919469	0,063702372
4	200	0,074628374	91,1	0,015178951	100	0,284	0,010325657	0,093673878
5	250	0,082667188	107	0,017031357	130	0,3302	0,012669984	0,126629811
6	300	0,090672111	124	0,018967318	150	0,359	0,015242534	0,149823393
7	350	0,096053939	136	0,020306129	180	0,3992	0,01710567	0,185081447
8	400	0,100733157	147	0,021513198	200	0,424	0,018812851	0,208791846

Data Nosel 18.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

Non Co-Flow

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369			56,4	0,21043808	0,002442374	0,051431653
2	100	0,052646254			74,4	0,24172928	0,005138598	0,067864138
3	150	0,065357158			102	0,287192	0,007919469	0,095791395
4	200	0,074628374			124	0,321248	0,010325657	0,119856802
5	250	0,082667188			134	0,336088	0,012669984	0,131186104
6	300	0,090672111			148,8	0,35731712	0,015242534	0,148282354
7	350	0,096053939			171,2	0,38778112	0,01710567	0,174644592
8	400	0,100733157			201,2	0,42543712	0,018812851	0,210209617

QN2/Qf 80/20

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	87,6	0,042664685	37,5	0,1761875	0,002442374	0,03605222
2	100	0,052646254	180	0,068744468	55	0,20795	0,005138598	0,050222655
3	150	0,065357158	274	0,091334715	70	0,2342	0,007919469	0,063702372
4	200	0,074628374	355	0,107612397	90	0,2678	0,010325657	0,083291938
5	250	0,082667188	433	0,120497619	120	0,3152	0,012669984	0,115386298
6	300	0,090672111	519	0,13153199	130	0,3302	0,015242534	0,126629811
7	350	0,096053939	581	0,137423044	155	0,36595	0,01710567	0,155533994
8	400	0,100733157	638	0,141313313	170	0,3862	0,018812851	0,173223321

**Data Nosel 18.5 mm
(lanjutan)**

Parameter:

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

QN2/Qf 70/30

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	30,9	0,024759631	30	0,1622	0,002442374	0,030555087
2	100	0,052646254	63,4	0,035199576	55	0,20795	0,005138598	0,050222655
3	150	0,065357158	96,3	0,045284041	80	0,2512	0,007919469	0,073286012
4	200	0,074628374	124	0,053397036	100	0,284	0,010325657	0,093673878
5	250	0,082667188	152	0,061247097	120	0,3152	0,012669984	0,115386298
6	300	0,090672111	182	0,069266499	140	0,3448	0,015242534	0,138075408
7	350	0,096053939	203	0,07463918	165	0,37955	0,01710567	0,167309196
8	400	0,100733157	223	0,079571576	190	0,4118	0,018812851	0,196949329

QN2/Qf 60/40

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	12,8	0,018739379	35	0,17155	0,002442374	0,034179308
2	100	0,052646254	26,9	0,023441874	50	0,199	0,005138598	0,045992601
3	150	0,065357158	41	0,028054933	70	0,2342	0,007919469	0,063702372
4	200	0,074628374	53	0,031910492	100	0,284	0,010325657	0,093673878
5	250	0,082667188	64,6	0,035575955	120	0,3152	0,012669984	0,115386298
6	300	0,090672111	77,2	0,039488821	140	0,3448	0,015242534	0,138075408
7	350	0,096053939	86,3	0,042270363	160	0,3728	0,01710567	0,161411186
8	400	0,100733157	94,6	0,044774889	185	0,40555	0,018812851	0,19101639

**Data Nosel 18.5 mm
(lanjutan)**

Parameter:

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

QN2/Qf 50/50

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	56	0,010946935	40	0,1808	0,002442374	0,037964586
2	100	0,052646254	99,6	0,016174246	55	0,20795	0,005138598	0,050222655
3	150	0,065357158	140	0,020747296	80	0,2512	0,007919469	0,073286012
4	200	0,074628374	170	0,023974714	100	0,284	0,010325657	0,093673878
5	250	0,082667188	207	0,027757521	125	0,32275	0,012669984	0,120980207
6	300	0,090672111	241	0,031041121	140	0,3448	0,015242534	0,138075408
7	350	0,096053939	266	0,033337917	160	0,3728	0,01710567	0,161411186
8	400	0,100733157	288	0,035276645	180	0,3992	0,018812851	0,185081447

QN2/Qf 40/60

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	31,1	0,007825605	35	0,17155	0,002442374	0,034179308
2	100	0,052646254	53,5	0,010638014	60	0,2168	0,005138598	0,054588402
3	150	0,065357158	74,2	0,01316584	80	0,2512	0,007919469	0,073286012
4	200	0,074628374	91,1	0,015178951	105	0,29195	0,010325657	0,0989917
5	250	0,082667188	107	0,017031357	140	0,3448	0,012669984	0,138075408
6	300	0,090672111	124	0,018967318	155	0,36595	0,015242534	0,155533994
7	350	0,096053939	136	0,020306129	190	0,4118	0,01710567	0,196949329
8	400	0,100733157	147	0,021513198	210	0,4358	0,018812851	0,220574993

Data Nosel 18.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

Non Co-Flow

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369			63,2	0,22241152	0,002442374	0,057450839
2	100	0,052646254			88	0,264512	0,005138598	0,081259207
3	150	0,065357158			108,4	0,29729888	0,007919469	0,102652225
4	200	0,074628374			135,6	0,33842528	0,010325657	0,133017082
5	250	0,082667188			149,2	0,35787872	0,012669984	0,148748835
6	300	0,090672111			170	0,3862	0,015242534	0,173223321
7	350	0,096053939			206,8	0,43206752	0,01710567	0,216812872
8	400	0,100733157			234,4	0,46291328	0,018812851	0,248874902

QN2/Qf 80/20

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	87,6	0,042664685	40	0,1808	0,002442374	0,037964586
2	100	0,052646254	180	0,068744468	60	0,2168	0,005138598	0,054588402
3	150	0,065357158	274	0,091334715	80	0,2512	0,007919469	0,073286012
4	200	0,074628374	355	0,107612397	95	0,27595	0,010325657	0,088438755
5	250	0,082667188	433	0,120497619	125	0,32275	0,012669984	0,120980207
6	300	0,090672111	519	0,13153199	135	0,33755	0,015242534	0,132329919
7	350	0,096053939	581	0,137423044	160	0,3728	0,01710567	0,161411186
8	400	0,100733157	638	0,141313313	180	0,3992	0,018812851	0,185081447

Data Nosel 18.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

QN2/Qf 70/30

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	30,9	0,024759631	35	0,17155	0,002442374	0,034179308
2	100	0,052646254	63,4	0,035199576	60	0,2168	0,005138598	0,054588402
3	150	0,065357158	96,3	0,045284041	85	0,25955	0,007919469	0,078239108
4	200	0,074628374	124	0,053397036	105	0,29195	0,010325657	0,0989917
5	250	0,082667188	152	0,061247097	130	0,3302	0,012669984	0,126629811
6	300	0,090672111	182	0,069266499	150	0,359	0,015242534	0,149682393
7	350	0,096053939	203	0,07463918	170	0,3862	0,01710567	0,173223321
8	400	0,100733157	223	0,079571576	200	0,424	0,018812851	0,208791846

QN2/Qf 60/40

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	12,8	0,018739379	40	0,1808	0,002442374	0,037964586
2	100	0,052646254	26,9	0,023441874	60	0,2168	0,005138598	0,054588402
3	150	0,065357158	41	0,028054933	80	0,2512	0,007919469	0,073286012
4	200	0,074628374	53	0,031910492	105	0,29195	0,010325657	0,0989917
5	250	0,082667188	64,6	0,035575955	130	0,3302	0,012669984	0,126629811
6	300	0,090672111	77,2	0,039488821	150	0,359	0,015242534	0,149682393
7	350	0,096053939	86,3	0,042270363	170	0,3862	0,01710567	0,173223321
8	400	0,100733157	94,6	0,044774889	190	0,4118	0,018812851	0,196949329

Data Nosel 18.5 mm (lanjutan)

Parameter:

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

QN2/Qf 50/50

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	56	0,026682476	45	0,18995	0,002442374	0,041904476
2	100	0,052646254	99,6	0,039423531	60	0,2168	0,005138598	0,054588402
3	150	0,065357158	140	0,050569848	85	0,25955	0,007919469	0,078239108
4	200	0,074628374	170	0,058436307	110	0,2998	0,010325657	0,104386678
5	250	0,082667188	207	0,06765643	130	0,3302	0,012669984	0,126629811
6	300	0,090672111	241	0,075659766	150	0,359	0,015242534	0,149682393
7	350	0,096053939	266	0,081257876	170	0,3862	0,01710567	0,173223321
8	400	0,100733157	288	0,085983235	190	0,4118	0,018812851	0,196949329

QN2/Qf 40/60

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,036295369	31,1	0,01907452	40	0,1808	0,002442374	0,037964586
2	100	0,052646254	53,5	0,025929509	70	0,2342	0,005138598	0,063702372
3	150	0,065357158	74,2	0,032090843	90	0,2678	0,007919469	0,083291938
4	200	0,074628374	91,1	0,0369976	110	0,2998	0,010325657	0,104386678
5	250	0,082667188	107	0,041512648	150	0,359	0,012669984	0,149682393
6	300	0,090672111	124	0,046231347	160	0,3728	0,015242534	0,161411186
7	350	0,096053939	136	0,049494552	195	0,41795	0,01710567	0,20287591
8	400	0,100733157	147	0,052436649	215	0,44155	0,018812851	0,22643398

Data Nosel 8.5 mm

Parameter:

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

ρ prop.	1,854 kg/m ³
ρ udara	1,161 kg/m ³

Non Co-Flow

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044			36	0,881928	0,054805404	0,903333433
2	100	0,249386579			95,2	1,47875872	0,115307057	2,539665147
3	150	0,30959844			155,2	2,03359072	0,177708114	4,802959499
4	200	0,353516414			220,4	2,57936688	0,231701527	7,726949249
5	250	0,391596472			293,6	3,12119328	0,284306815	11,31418168
6	300	0,429515984			329,6	3,36014688	0,3420333	13,11288781
7	350	0,455009836			377,6	3,65052768	0,383840945	15,47722561
8	400	0,477175403			450,4	4,02937888	0,422149061	18,85636748

QN2/Qf 80/20

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	87,6	0,103994504	32,5	0,84510625	0,054805404	0,829477192
2	100	0,249386579	180	0,167564376	55	1,078825	0,115307057	1,35171093
3	150	0,30959844	274	0,222628632	90	1,4283	0,177708114	2,36930349
4	200	0,353516414	355	0,262306034	155	2,031825	0,231701527	4,794622521
5	250	0,391596472	433	0,293714381	180	2,2482	0,284306815	5,870183923
6	300	0,429515984	519	0,320611438	225	2,615625	0,3420333	7,945711295
7	350	0,455009836	581	0,334971506	275	2,990625	0,383840945	10,38737333
8	400	0,477175403	638	0,344454657	300	3,165	0,422149061	11,63400512

Data Nozel 8.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

L/d	2,7
d. Nozel (mm)	8,5
h. BP (mm)	300
V.G	2d

QN2/Qf 70/30

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	30,9	0,060350746	35	0,871425	0,054805404	0,88194571
2	100	0,249386579	63,4	0,085798216	45	0,975825	0,115307057	1,105925068
3	150	0,30959844	96,3	0,110379217	65	1,180425	0,177708114	1,618298454
4	200	0,353516414	124	0,130154754	105	1,572825	0,231701527	2,873046327
5	250	0,391596472	152	0,149289401	160	2,0758	0,284306815	5,004409466
6	300	0,429515984	182	0,168836836	220	2,5762	0,3420333	7,707986999
7	350	0,455009836	203	0,181932854	370	3,6067	0,383840945	15,10782207
8	400	0,477175403	223	0,193955678	500	4,245	0,422149061	20,92845704

QN2/Qf 60/40

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	12,8	0,045676333	30	0,8187	0,054805404	0,778451218
2	100	0,249386579	26,9	0,057138704	50	1,0275	0,115307057	1,226155309
3	150	0,30959844	41	0,068383075	60	1,1298	0,177708114	1,482466754
4	200	0,353516414	53	0,077781038	97,5	1,50095625	0,231701527	2,616482828
5	250	0,391596472	64,6	0,086715643	140	1,8978	0,284306815	4,182950317
6	300	0,429515984	77,2	0,096253298	240	2,7318	0,3420333	8,667216062
7	350	0,455009836	86,3	0,103033339	437,5	3,96765625	0,383840945	18,28310271
8	400	0,477175403	94,6	0,109138154	490	4,2043	0,422149061	20,52906724

Data Nozel 8.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

L/d	2,7
d. Nozel (mm)	8,5
h. BP (mm)	300
V.G	2d

QN2/Qf 50/50

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	56	0,026682476	32,5	0,84510625	0,054805404	0,829477192
2	100	0,249386579	99,6	0,039423531	50	1,0275	0,115307057	1,226155309
3	150	0,30959844	140	0,050569848	75	1,280625	0,177708114	1,904696454
4	200	0,353516414	170	0,058436307	85	1,379425	0,231701527	2,209927402
5	250	0,391596472	207	0,06765643	100	1,525	0,284306815	2,700980875
6	300	0,429515984	241	0,075659766	250	2,8075	0,3420333	9,154220129
7	350	0,455009836	266	0,081257876	270	2,9547	0,383840945	10,13931478
8	400	0,477175403	288	0,085983235	300	3,165	0,422149061	11,63400512

QN2/Qf 40/60

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	31,1	0,01907452	35	0,871425	0,054805404	0,88194571
2	100	0,249386579	53,5	0,025929509	55	1,078825	0,115307057	1,35171093
3	150	0,30959844	74,2	0,032090843	75	1,280625	0,177708114	1,904696454
4	200	0,353516414	91,1	0,0369976	90	1,4283	0,231701527	2,36930349
5	250	0,391596472	107	0,041512648	140	1,8978	0,284306815	4,182950317
6	300	0,429515984	124	0,046231347	260	2,8818	0,3420333	9,645161318
7	350	0,455009836	136	0,049494552	320	3,2982	0,383840945	12,63385233
8	400	0,477175403	147	0,052436649	580	4,5202	0,422149061	23,72996642

Data Nosel 8.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

Non Co-Flow

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044			56,4	1,09313328	0,054805404	1,387803743
2	100	0,249386579			109,6	1,61651488	0,115307057	3,034877983
3	150	0,30959844			180	2,2482	0,177708114	5,870183923
4	200	0,353516414			245,2	2,77133872	0,231701527	8,919921675
5	250	0,391596472			307,2	3,21359712	0,284306815	11,99401757
6	300	0,429515984			363,2	3,56680032	0,3420333	14,77540574
7	350	0,455009836			417,6	3,86787168	0,383840945	17,37504495
8	400	0,477175403			466,4	4,10269728	0,422149061	19,54882994

QN2/Qf 80/20

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	87,6	0,103994504	35	0,871425	0,054805404	0,88194571
2	100	0,249386579	180	0,167564376	70	1,2307	0,115307057	1,75908256
3	150	0,30959844	274	0,222628632	100	1,525	0,177708114	2,700980875
4	200	0,353516414	355	0,262306034	170	2,1627	0,231701527	5,432182876
5	250	0,391596472	433	0,293714381	220	2,5762	0,284306815	7,707986999
6	300	0,429515984	519	0,320611438	250	2,8075	0,3420333	9,154220129
7	350	0,455009836	581	0,334971506	350	3,4875	0,383840945	14,12570897
8	400	0,477175403	638	0,344454657	380	3,6642	0,422149061	15,59337641

Data Nosel 8.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

QN2/Qf 70/30

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	30,9	0,060350746	35	0,871425	0,054805404	0,88194571
2	100	0,249386579	63,4	0,085798216	50	1,0275	0,115307057	1,226155309
3	150	0,30959844	96,3	0,110379217	80	1,3302	0,177708114	2,055018371
4	200	0,353516414	124	0,130154754	120	1,7142	0,231701527	3,412752577
5	250	0,391596472	152	0,149289401	170	2,1627	0,284306815	5,432182876
6	300	0,429515984	182	0,168836836	237,5	2,71265625	0,3420333	8,546166465
7	350	0,455009836	203	0,181932854	380	3,6642	0,383840945	15,59337641
8	400	0,477175403	223	0,193955678	515	4,303425	0,422149061	21,50850866

QN2/Qf 60/40

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	12,8	0,045676333	30	0,8187	0,054805404	0,778451218
2	100	0,249386579	26,9	0,057138704	60	1,1298	0,115307057	1,482466754
3	150	0,30959844	41	0,068383075	70	1,2307	0,177708114	1,75908256
4	200	0,353516414	53	0,077781038	100	1,525	0,231701527	2,700980875
5	250	0,391596472	64,6	0,086715643	160	2,0758	0,284306815	5,004409466
6	300	0,429515984	77,2	0,096253298	250	2,8075	0,3420333	9,154220129
7	350	0,455009836	86,3	0,103033339	440	3,9798	0,383840945	18,39519166
8	400	0,477175403	94,6	0,109138154	550	4,4275	0,422149061	22,76664111

Data Nosel 8.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

QN2/Qf 50/50

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	56	0,026682476	30	0,8187	0,054805404	0,778451218
2	100	0,249386579	99,6	0,039423531	55	1,078825	0,115307057	1,35171093
3	150	0,30959844	140	0,050569848	80	1,3302	0,177708114	2,055018371
4	200	0,353516414	170	0,058436307	130	1,8067	0,231701527	3,791001103
5	250	0,391596472	207	0,06765643	170	2,1627	0,284306815	5,432182876
6	300	0,429515984	241	0,075659766	310	3,2323	0,3420333	12,13403229
7	350	0,455009836	266	0,081257876	350	3,4875	0,383840945	14,12570897
8	400	0,477175403	288	0,085983235	510	4,2843	0,422149061	21,31776005

QN2/Qf 40/60

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	31,1	0,01907452	35	0,871425	0,054805404	0,88194571
2	100	0,249386579	53,5	0,025929509	60	1,1298	0,115307057	1,482466754
3	150	0,30959844	74,2	0,032090843	80	1,3302	0,177708114	2,055018371
4	200	0,353516414	91,1	0,0369976	110	1,6203	0,231701527	3,049107145
5	250	0,391596472	107	0,041512648	185	2,290425	0,284306815	6,092758615
6	300	0,429515984	124	0,046231347	270	2,9547	0,3420333	10,13931478
7	350	0,455009836	136	0,049494552	340	3,4258	0,383840945	13,63031309
8	400	0,477175403	147	0,052436649	600	4,575	0,422149061	24,30882788

Data Nosel 8.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

L/d	2,16
d. Nosel (mm)	8,5
h. BP (mm)	300
V.G	2d

Non Co-Flow

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044			72,8	1,25870112	0,054805404	1,840039131
2	100	0,249386579			138,8	1,88694192	0,115307057	4,135222549
3	150	0,30959844			220	2,5762	0,177708114	7,707986999
4	200	0,353516414			279,2	3,02053152	0,231701527	10,59616142
5	250	0,391596472			330,4	3,36525088	0,284306815	13,15275452
6	300	0,429515984			383,6	3,68455728	0,3420333	15,76712267
7	350	0,455009836			446,8	4,01238832	0,383840945	18,6976806
8	400	0,477175403			494,4	4,22238048	0,422149061	20,70601632

QN2/Qf 80/20

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	87,6	0,103994504	35	0,871425	0,054805404	0,88194571
2	100	0,249386579	180	0,167564376	80	1,3302	0,115307057	2,055018371
3	150	0,30959844	274	0,222628632	150	1,9875	0,177708114	4,587711469
4	200	0,353516414	355	0,262306034	250	2,8075	0,231701527	9,154220129
5	250	0,391596472	433	0,293714381	300	3,165	0,284306815	11,63400512
6	300	0,429515984	519	0,320611438	360	3,5478	0,3420333	14,61840805
7	350	0,455009836	581	0,334971506	410	3,8283	0,383840945	17,02134007
8	400	0,477175403	638	0,344454657	500	4,245	0,422149061	20,92845704

**Data Nosel 8.5 mm
(lanjutan)**

Parameter:

L/d	2,16
d. Nosel (mm)	8,5
h. BP (mm)	300
V.G	2d

QN2/Qf 70/30

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	30,9	0,060350746	37,5	0,89765625	0,054805404	0,935840724
2	100	0,249386579	63,4	0,085798216	60	1,1298	0,115307057	1,482466754
3	150	0,30959844	96,3	0,110379217	100	1,525	0,177708114	2,700980875
4	200	0,353516414	124	0,130154754	180	2,2482	0,231701527	5,870183923
5	250	0,391596472	152	0,149289401	230	2,6547	0,284306815	8,184887629
6	300	0,429515984	182	0,168836836	300	3,165	0,3420333	11,63400512
7	350	0,455009836	203	0,181932854	430	3,9307	0,383840945	17,94409745
8	400	0,477175403	223	0,193955678	540	4,3938	0,422149061	22,42138266

QN2/Qf 60/40

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	12,8	0,045676333	30	0,8187	0,054805404	0,778451218
2	100	0,249386579	26,9	0,057138704	60	1,1298	0,115307057	1,482466754
3	150	0,30959844	41	0,068383075	90	1,4283	0,177708114	2,36930349
4	200	0,353516414	53	0,077781038	115	1,667425	0,231701527	3,22904754
5	250	0,391596472	64,6	0,086715643	180	2,2482	0,284306815	5,870183923
6	300	0,429515984	77,2	0,096253298	270	2,9547	0,3420333	10,13931478
7	350	0,455009836	86,3	0,103033339	480	4,1622	0,383840945	20,11998773
8	400	0,477175403	94,6	0,109138154	570	4,4907	0,422149061	23,42124127

**Data Nosel 8.5 mm
(lanjutan)**

Parameter:

L/d	2,16
d. Nosel (mm)	8,5
h. BP (mm)	300
V.G	2d

QN2/Qf 50/50

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	56	0,026682476	35	0,871425	0,054805404	0,88194571
2	100	0,249386579	99,6	0,039423531	60	1,1298	0,115307057	1,482466754
3	150	0,30959844	140	0,050569848	85	1,379425	0,177708114	2,209927402
4	200	0,353516414	170	0,058436307	140	1,8978	0,231701527	4,182950317
5	250	0,391596472	207	0,06765643	250	2,8075	0,284306815	9,154220129
6	300	0,429515984	241	0,075659766	320	3,2982	0,3420333	12,63385233
7	350	0,455009836	266	0,081257876	450	4,0275	0,383840945	18,83878631
8	400	0,477175403	288	0,085983235	550	4,4275	0,422149061	22,76664111

QN2/Qf 40/60

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,171932044	31,1	0,01907452	40	0,9238	0,054805404	0,991146239
2	100	0,249386579	53,5	0,025929509	65	1,180425	0,115307057	1,618298454
3	150	0,30959844	74,2	0,032090843	90	1,4283	0,177708114	2,36930349
4	200	0,353516414	91,1	0,0369976	130	1,8067	0,231701527	3,791001103
5	250	0,391596472	107	0,041512648	200	2,415	0,284306815	6,773546115
6	300	0,429515984	124	0,046231347	300	3,165	0,3420333	11,63400512
7	350	0,455009836	136	0,049494552	360	3,5478	0,383840945	14,61840805
8	400	0,477175403	147	0,052436649	620	4,6242	0,422149061	24,83447826

Data Nosel 5.5 mm

Parameter:

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

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

Non Co-Flow

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761			150	4,783	0,312642726	26,56945116
2	100	0,595642325			190	5,591	0,657780252	36,30452895
3	150	0,739454125			210	5,971	1,013753115	41,40720954
4	200	0,844349121			230	6,335	1,321763762	46,60956612
5	250	0,935300664			240	6,511	1,621855714	49,23537073
6	300	1,025868755			350	8,183	1,951162028	77,76907332
7	350	1,08675903			380	8,555	2,18965778	85,00057224
8	400	1,13969993			400	8,783	2,408190134	89,59166076

QN2/Qf 80/20

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	87,6	0,103994504	150	4,783	0,312642726	26,56945116
2	100	0,595642325	180	0,167564376	170	5,195	0,657780252	31,34389224
3	150	0,739454125	274	0,222628632	190	5,591	1,013753115	36,30452895
4	200	0,844349121	355	0,262306034	200	5,783	1,321763762	38,84080356
5	250	0,935300664	433	0,293714381	210	5,971	1,621855714	41,40720954
6	300	1,025868755	519	0,320611438	220	6,155	1,951162028	43,99850664
7	350	1,08675903	581	0,334971506	220	6,155	2,18965778	43,99850664
8	400	1,13969993	638	0,344454657	220	6,155	2,408190134	43,99850664

Data Nosel 5.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

QN2/Qf 70/30

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	30,9	0,060350746	170	5,195	0,312642726	31,34389224
2	100	0,595642325	63,4	0,085798216	190	5,591	0,657780252	36,30452895
3	150	0,739454125	96,3	0,110379217	220	6,155	1,013753115	43,99850664
4	200	0,844349121	124	0,130154754	230	6,335	1,321763762	46,60956612
5	250	0,935300664	152	0,149289401	240	6,511	1,621855714	49,23537073
6	300	1,025868755	182	0,168836836	250	6,683	1,951162028	51,87101472
7	350	1,08675903	203	0,181932854	250	6,683	2,18965778	51,87101472
8	400	1,13969993	223	0,193955678	250	6,683	2,408190134	51,87101472

QN2/Qf 60/40

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	12,8	0,045676333	160	4,991	0,312642726	28,93056807
2	100	0,595642325	26,9	0,057138704	200	5,783	0,657780252	38,84080356
3	150	0,739454125	41	0,068383075	230	6,335	1,013753115	46,60956612
4	200	0,844349121	53	0,077781038	240	6,511	1,321763762	49,23537073
5	250	0,935300664	64,6	0,086715643	250	6,683	1,621855714	51,87101472
6	300	1,025868755	77,2	0,096253298	270	7,015	1,951162028	57,15275532
7	350	1,08675903	86,3	0,103033339	290	7,331	2,18965778	62,41777175
8	400	1,13969993	94,6	0,109138154	310	7,631	2,408190134	67,63083179

Data Nosel 5.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

QN2/Qf 50/50

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	56	0,026682476	140	4,571	0,312642726	24,26633922
2	100	0,595642325	99,6	0,039423531	180	5,395	0,657780252	33,80373744
3	150	0,739454125	140	0,050569848	190	5,591	1,013753115	36,30452895
4	200	0,844349121	170	0,058436307	200	5,783	1,321763762	38,84080356
5	250	0,935300664	207	0,06765643	210	5,971	1,621855714	41,40720954
6	300	1,025868755	241	0,075659766	320	7,775	1,951162028	70,20735588
7	350	1,08675903	266	0,081257876	350	8,183	2,18965778	77,76907332
8	400	1,13969993	288	0,085983235	410	8,891	2,408190134	91,80853179

QN2/Qf 40/60

No.	h. prop. (mm)	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	31,1	0,01907452	150	4,783	0,312642726	26,56945116
2	100	0,595642325	53,5	0,025929509	180	5,395	0,657780252	33,80373744
3	150	0,739454125	74,2	0,032090843	190	5,591	1,013753115	36,30452895
4	200	0,844349121	91,1	0,0369976	220	6,155	1,321763762	43,99850664
5	250	0,935300664	107	0,041512648	240	6,511	1,621855714	49,23537073
6	300	1,025868755	124	0,046231347	260	6,851	1,951162028	54,51170384
7	350	1,08675903	136	0,049494552	270	7,015	2,18965778	57,15275532
8	400	1,13969993	147	0,052436649	280	7,175	2,408190134	59,78959788

Data Nosel 5.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

Non Co-Flow

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761			150	4,783	0,312642726	26,56945116
2	100	0,595642325			200	5,783	0,657780252	38,84080356
3	150	0,739454125			220	6,155	1,013753115	43,99850664
4	200	0,844349121			250	6,683	1,321763762	51,87101472
5	250	0,935300664			320	7,775	1,621855714	70,20735588
6	300	1,025868755			360	8,311	1,951162028	80,22105817
7	350	1,08675903			390	8,671	2,18965778	87,3213003
8	400	1,13969993			420	8,995	2,408190134	93,96890304

QN2/Qf 80/20

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	87,6	0,103994504	150	4,783	0,312642726	26,56945116
2	100	0,595642325	180	0,167564376	180	5,395	0,657780252	33,80373744
3	150	0,739454125	274	0,222628632	200	5,783	1,013753115	38,84080356
4	200	0,844349121	355	0,262306034	210	5,971	1,321763762	41,40720954
5	250	0,935300664	433	0,293714381	220	6,155	1,621855714	43,99850664
6	300	1,025868755	519	0,320611438	230	6,335	1,951162028	46,60956612
7	350	1,08675903	581	0,334971506	240	6,511	2,18965778	49,23537073
8	400	1,13969993	638	0,344454657	270	7,015	2,408190134	57,15275532

**Data Nosel 5.5 mm
(lanjutan)**

Parameter:

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

QN2/Qf 70/30

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	30,9	0,060350746	170	5,195	0,312642726	31,34389224
2	100	0,595642325	63,4	0,085798216	200	5,783	0,657780252	38,84080356
3	150	0,739454125	96,3	0,110379217	230	6,335	1,013753115	46,60956612
4	200	0,844349121	124	0,130154754	240	6,511	1,321763762	49,23537073
5	250	0,935300664	152	0,149289401	250	6,683	1,621855714	51,87101472
6	300	1,025868755	182	0,168836836	260	6,851	1,951162028	54,51170384
7	350	1,08675903	203	0,181932854	270	7,015	2,18965778	57,15275532
8	400	1,13969993	223	0,193955678	280	7,175	2,408190134	59,78959788

QN2/Qf 60/40

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	12,8	0,045676333	170	5,195	0,312642726	31,34389224
2	100	0,595642325	26,9	0,057138704	220	6,155	0,657780252	43,99850664
3	150	0,739454125	41	0,068383075	240	6,511	1,013753115	49,23537073
4	200	0,844349121	53	0,077781038	250	6,683	1,321763762	51,87101472
5	250	0,935300664	64,6	0,086715643	260	6,851	1,621855714	54,51170384
6	300	1,025868755	77,2	0,096253298	280	7,175	1,951162028	59,78959788
7	350	1,08675903	86,3	0,103033339	320	7,775	2,18965778	70,20735588
8	400	1,13969993	94,6	0,109138154	350	8,183	2,408190134	77,76907332

**Data Nosel 5.5 mm
(lanjutan)**

Parameter:

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

QN2/Qf 50/50

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	56	0,026682476	140	4,571	0,312642726	24,26633922
2	100	0,595642325	99,6	0,039423531	180	5,395	0,657780252	33,80373744
3	150	0,739454125	140	0,050569848	200	5,783	1,013753115	38,84080356
4	200	0,844349121	170	0,058436307	220	6,155	1,321763762	43,99850664
5	250	0,935300664	207	0,06765643	240	6,511	1,621855714	49,23537073
6	300	1,025868755	241	0,075659766	330	7,915	1,951162028	72,75848712
7	350	1,08675903	266	0,081257876	360	8,311	2,18965778	80,22105817
8	400	1,13969993	288	0,085983235	420	8,995	2,408190134	93,96890304

QN2/Qf 40/60

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	31,1	0,01907452	150	4,783	0,312642726	26,56945116
2	100	0,595642325	53,5	0,025929509	190	5,591	0,657780252	36,30452895
3	150	0,739454125	74,2	0,032090843	230	6,335	1,013753115	46,60956612
4	200	0,844349121	91,1	0,0369976	240	6,511	1,321763762	49,23537073
5	250	0,935300664	107	0,041512648	260	6,851	1,621855714	54,51170384
6	300	1,025868755	124	0,046231347	270	7,015	1,951162028	57,15275532
7	350	1,08675903	136	0,049494552	280	7,175	2,18965778	59,78959788
8	400	1,13969993	147	0,052436649	310	7,631	2,408190134	67,63083179

Data Nosel 5.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

Non Co-Flow

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761			150	4,783	0,312642726	26,56945116
2	100	0,595642325			230	6,335	0,657780252	46,60956612
3	150	0,739454125			240	6,511	1,013753115	49,23537073
4	200	0,844349121			340	8,051	1,321763762	75,2803232
5	250	0,935300664			400	8,783	1,621855714	89,59166076
6	300	1,025868755			440	9,191	1,951162028	98,10866223
7	350	1,08675903			470	9,455	2,18965778	103,8257048
8	400	1,13969993			500	9,683	2,408190134	108,8934319

QN2/Qf 80/20

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	87,6	0,103994504	150	4,783	0,312642726	26,56945116
2	100	0,595642325	180	0,167564376	190	5,591	0,657780252	36,30452895
3	150	0,739454125	274	0,222628632	210	5,971	1,013753115	41,40720954
4	200	0,844349121	355	0,262306034	220	6,155	1,321763762	43,99850664
5	250	0,935300664	433	0,293714381	230	6,335	1,621855714	46,60956612
6	300	1,025868755	519	0,320611438	260	6,851	1,951162028	54,51170384
7	350	1,08675903	581	0,334971506	280	7,175	2,18965778	59,78959788
8	400	1,13969993	638	0,344454657	350	8,183	2,408190134	77,76907332

Data Nosel 5.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

QN2/Qf 70/30

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	30,9	0,060350746	170	5,195	0,312642726	31,34389224
2	100	0,595642325	63,4	0,085798216	210	5,971	0,657780252	41,40720954
3	150	0,739454125	96,3	0,110379217	240	6,511	1,013753115	49,23537073
4	200	0,844349121	124	0,130154754	250	6,683	1,321763762	51,87101472
5	250	0,935300664	152	0,149289401	260	6,851	1,621855714	54,51170384
6	300	1,025868755	182	0,168836836	280	7,175	1,951162028	59,78959788
7	350	1,08675903	203	0,181932854	350	8,183	2,18965778	77,76907332
8	400	1,13969993	223	0,193955678	380	8,555	2,408190134	85,00057224

QN2/Qf 60/40

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	12,8	0,045676333	180	5,395	0,312642726	33,80373744
2	100	0,595642325	26,9	0,057138704	230	6,335	0,657780252	46,60956612
3	150	0,739454125	41	0,068383075	250	6,683	1,013753115	51,87101472
4	200	0,844349121	53	0,077781038	260	6,851	1,321763762	54,51170384
5	250	0,935300664	64,6	0,086715643	280	7,175	1,621855714	59,78959788
6	300	1,025868755	77,2	0,096253298	320	7,775	1,951162028	70,20735588
7	350	1,08675903	86,3	0,103033339	400	8,783	2,18965778	89,59166076
8	400	1,13969993	94,6	0,109138154	420	8,995	2,408190134	93,96890304

Data Nosel 5.5 mm
(lanjutan)

Parameter:

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

QN2/Qf 50/50

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	56	0,026682476	150	4,783	0,312642726	26,56945116
2	100	0,595642325	99,6	0,039423531	210	5,971	0,657780252	41,40720954
3	150	0,739454125	140	0,050569848	220	6,155	1,013753115	43,99850664
4	200	0,844349121	170	0,058436307	250	6,683	1,321763762	51,87101472
5	250	0,935300664	207	0,06765643	270	7,015	1,621855714	57,15275532
6	300	1,025868755	241	0,073659766	360	8,311	1,951162028	80,22105817
7	350	1,08675903	266	0,081257876	420	8,995	2,18965778	93,96890304
8	400	1,13969993	288	0,085983235	450	9,283	2,408190134	100,082587

QN2/Qf 40/60

No.	h. prop.	v.prop. (m/s)	h.N2 (mm)	v.N2 (m/s)	h.udara (mm)	v.udara (m/s)	τ prop. (kg/ms ²)	τ udara (kg/ms ²)
1	50	0,41064761	31,1	0,01907452	160	4,991	0,312642726	28,93056807
2	100	0,595642325	53,5	0,025929509	200	5,783	0,657780252	38,84080356
3	150	0,739454125	74,2	0,032090843	240	6,511	1,013753115	49,23537073
4	200	0,844349121	91,1	0,0369976	270	7,015	1,321763762	57,15275532
5	250	0,935300664	107	0,041512648	290	7,331	1,621855714	62,41777175
6	300	1,025868755	124	0,046231347	380	8,555	1,951162028	85,00057224
7	350	1,08675903	136	0,049494552	440	9,191	2,18965778	98,10866223
8	400	1,13969993	147	0,052436649	460	9,371	2,408190134	101,9890855