

**PENGARUH DIAMETER *THROAT*
NOSEL KONVERGEN-DIVERGEN TERHADAP
POLA ALIRAN BAHAN BAKAR DAN BENTUK NYALA API
PADA PROSES PEMBAKARAN DIFUSI MINYAK TANAH**

SKRIPSI

KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

AGUS SETYAWAN
NIM. 0210623007-62

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN MESIN
MALANG
2007**

**PENGARUH DIAMETER *THROAT*
NOSEL KONVERGEN-DIVERGEN TERHADAP
POLA ALIRAN BAHAN BAKAR DAN BENTUK NYALA API
PADA PROSES PEMBAKARAN DIFUSI MINYAK TANAH**

SKRIPSI

KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

AGUS SETYAWAN
NIM. 0210623007-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Ir. Rudy Soenoko, M. Eng., Sc
NIP. 131 411 121

Ir. Moch. Choiri
NIP. 131 586 564

**PENGARUH DIAMETER *THROAT*
NOSEL KONVERGEN-DIVERGEN TERHADAP
POLA ALIRAN BAHAN BAKAR DAN BENTUK NYALA API
PADA PROSES PEMBAKARAN DIFUSI MINYAK TANAH**

Disusun Oleh :

AGUS SETYAWAN
NIM 0210623007 – 62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 1 Agustus 2007

DOSEN PENGUJI

Skripsi I

Ir. Marsoedi Wirohardjo, M.MT
NIP. 130 531 861

Skripsi II

Ir. Suharto, MT
NIP. 131 131 025

Komprehensif

Ir. Saifuddin Baedowie
NIP. 130 350 753

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr.Slamet Wahyudi, ST, MT.
NIP. 132 159 708

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga skripsi yang berjudul **“Pengaruh Diameter *Throat* Nosel Konvergen-Divergen Terhadap Pola Aliran Bahan Bakar Dan Bentuk Nyala Api Pada Proses Pembakaran Difusi Minyak Tanah”** dapat terselesaikan.

Penyusun mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu hingga terselesaikannya skripsi ini, terutama kepada:

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST, MT, selaku Ketua Jurusan Mesin.
2. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc selaku Sekretaris Jurusan Mesin.
3. Bapak Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.Sc, selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin sekaligus Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan dalam menyusun skripsi ini.
4. Bapak Ir. Moch. Choiri, selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan serta meluangkan waktu untuk berdiskusi bersama penulis dalam menyusun skripsi ini.
5. Bapak Chamim dan Ibu Ngatipah, kedua orang tua tercinta dari penulis yang telah memberikan banyak perhatian, kasih sayang dan dorongan semangat moril maupun materiil untuk selalu menuntut ilmu dan menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
6. Adik Arfaul Karimah dan Adik Fachri Adityawan, kedua orang adik tersayang dari penulis yang telah memberikan dorongan semangat untuk segera lulus kuliah.
7. Seluruh Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin.
8. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Teknik Mesin serta Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
9. Rekan-rekan mahasiswa Mesin Angkatan 2002 dan rekan sepenelitian (Anang Prayogo, Azamataufiq dan Budi Sunarto) yang telah memberikan banyak masukan.
10. Semua pihak yang telah memberikan dorongan, semangat serta doa dalam penyelesaian skripsi ini.

Tidak ada yang sempurna dalam setiap karya manusia, tapi justru itulah yang membuat manusia berpikir untuk menghasilkan karya yang lebih baik. Akhir kata semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Malang, Agustus 2007

Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK	vi
DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL	viii
RINGKASAN	x
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Penelitian-Penelitian Terdahulu	5
2.2. Bahan Bakar	6
2.2.1 Bahan Bakar Cair	8
2.2.2 Minyak Tanah	8
2.3. Pembakaran	9
2.3.1 Mekanisme Pembakaran	13
2.3.2 Reaksi Rantai Pada Proses Pembakaran	14
2.3.3 Batas Ketidakhayalan	14
2.4. Pola Aliran	14
2.4.1 Pola Aliran Laminer	14
2.4.2 Pola Aliran Transien	15
2.4.3 Pola Aliran Turbulen	15
2.5. Nyala Api Difusi	15
2.6. Atomisasi	19
2.7. Fluida	19
2.8. Nosel	20
2.9. Macam-Macam Pola Semprot	22

2.10. Hipotesis	23
BAB III. METODE PENELITIAN	24
3.1. Metode Penelitian	24
3.2. Variabel Yang Diukur	24
3.3. Alat-Alat Penelitian	25
3.4. Pelaksanaan Penelitian	27
3.5. Instalasi Alat Penelitian	28
3.6. Prosedur Pengambilan Data Pola Aliran Dan Bentuk Nyala Api	29
3.7 Rancangan Pengolahan Data Pola Aliran Bahan Bakar Dan Bentuk Nyala Api	29
3.8. Diagram Alir Penelitian	30
BAB IV. DATA DAN PEMBAHASAN	31
4.1. Data Hasil Penelitian	31
4.2. Perhitungan Data	31
4.2.1. Perhitungan Nilai Konstanta Kalibrasi Manometer Bahan Bakar	31
4.2.2. Perhitungan Nilai Konstanta Kalibrasi Manometer Udara	33
4.2.3. Perhitungan Debit Bahan Bakar	35
4.2.4. Perhitungan Debit Udara	36
4.3 Data Visualisasi Pola Aliran Bahan Bakar Dan Bentuk Nyala Api	37
4.3.1 Data Visualisasi Pola Aliran Bahan Bakar	37
4.3.1.1 Visualisasi Pola Aliran Bahan Bakar Dengan Debit Bahan Bakar Sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ Dan Debit Udara Sebesar $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ Untuk Jenis Nosel Konvergen-Divergen Dengan Diameter <i>Throat</i> 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm	37
4.3.1.2 Visualisasi Pola Aliran Bahan Bakar Dengan Debit Bahan Bakar Sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ Dan Variasi Debit Udara Untuk Jenis Nosel Konvergen-Divergen Dengan Diameter	

	<i>Throat</i> 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm	39
4.3.2	Data Visualisasi Bentuk Nyala Api	41
4.3.2.1	Visualisasi Bentuk Nyala Api Dengan Debit Bahan Bakar Sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ Dan Debit Udara Sebesar $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ Untuk Jenis Nosel Konvergen-Divergen Dengan Diameter <i>Throat</i> 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm	42
4.3.2.1	Visualisasi Bentuk Nyala Api Dengan Debit Bahan Bakar Sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ Dan Variasi Debit Udara Untuk Jenis Nosel Konvergen-Divergen Dengan Diameter <i>Throat</i> 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm	43
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN		46
5.1	Kesimpulan	46
5.2	Saran	47

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	<i>Requirements for Kerosines (IS:1459-1974)</i>	9
Tabel 2.2	Komposisi Udara Kering	10



DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Proses atomisasi dengan nilai Re dan We yang berbeda-beda.	5
Gambar 2.2.	Bentuk api pada pembakaran premiks	11
Gambar 2.3.	Bentuk api pada pembakaran difusi	12
Gambar 2.4.	Reaksi yang terjadi pada api	12
Gambar 2.5.	Perubahan aliran dan struktur api	13
Gambar 2.6.	Skema <i>lift off</i> pada api difusi <i>jet</i>	16
Gambar 2.7.	Gelombang pembakaran laminer dan turbulen	17
Gambar 2.8.	Skema diagram dari perambatan pembakaran stasioner dimensi	17
Gambar 2.9.	Jenis profil api	18
Gambar 2.10.	Bentuk api difusi	18
Gambar 2.11.	Deformasi elemen fluida	20
Gambar 2.12	Nosel Konvergen-Divergen	21
Gambar 2.13	Atomisasi pada nosel	22
Gambar 2.14	<i>Flat spray</i>	22
Gambar 2.15	<i>Hollow cone spray</i>	23
Gambar 2.16	<i>Solid cone spray</i>	23
Gambar 3.1.	Nosel konvergen-divergen dengan diameter <i>throat</i> 0.5 mm	24
Gambar 3.2.	Nosel konvergen-divergen dengan diameter <i>throat</i> 0.7 mm	24
Gambar 3.3	Nosel konvergen-divergen dengan diameter <i>throat</i> 1 mm	25
Gambar 3.4	Gambar instalasi penelitian	28
Gambar 3.5	Diagram alir penelitian	30
Gambar 4.1	Grafik hubungan antara debit bahan bakar ideal dan debit bahan bakar aktual	33
Gambar 4.2	Grafik hubungan antara debit udara ideal dan debit udara aktual	35
Gambar 4.3	Visualisasi pola aliran bahan bakar dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter <i>throat</i> nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm	37

- Gambar 4.4 Visualisasi pola aliran bahan bakar pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.5 mm 39
 (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- Gambar 4.5 Visualisasi pola aliran bahan bakar pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.7 mm 39
 (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- Gambar 4.6 Visualisasi pola aliran bahan bakar pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 1 mm 40
 (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- Gambar 4.7 Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm 42
- Gambar 4.8 Visualisasi api pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.5 mm 43
 (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- Gambar 4.9 Visualisasi bentuk nyala api pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.7 mm 44
 (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- Gambar 4.10 Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 1 mm 44
 (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

Besaran dasar	Satuan	Simbol
Energi Total Penguapan	Kj/Kg	Q
Kalor Laten	Kj/Kg	Δh_v
Temperatur Permukaan <i>Droplet</i>	$^{\circ}\text{C}$	T_s
Temperatur Awal <i>Droplet</i>	$^{\circ}\text{C}$	T_o
Konstanta Kalibrasi Bahan Bakar	-	C_b
Massa Jenis Minyak Tanah	Kg/m^3	ρ_{bb}
Massa Jenis Air Manometer	Kg/m^3	ρ_m
Diameter Saluran Bahan Bakar	m	d_1
Diameter Dalam Orifis	m	d_2
Beda Ketinggian Yang Ditunjukkan Manometer	m	Δh
Percepatan Gravitasi	m/s^2	g
Rasio Diameter Orifis dengan Saluran Bahan Bakar	-	β
Kecepatan Aliran Bahan Bakar Ideal Pada Orifis	mm/s	V_{bb2}
Kecepatan Aliran Bahan Bakar Ideal Pada Saluran	mm/s	V_{bb1}
Luas Penampang Saluran Udara	mm^2	A
Debit Bahan Bakar Ideal	m^3/s	$Q_{bbideal}$
Debit Bahan Bakar Aktual	m^3/s	$Q_{bbaktual}$
Konstanta Kalibrasi Udara	-	C_u
Massa Jenis Udara	Kg/m^3	ρ_u
Debit Bahan Bakar Dalam Saluran Bahan Bakar	m^3/s	Q_{sbb}
Debit Udara Dalam Saluran Udara	m^3/s	Q_{sud}
Kecepatan udara aktual pada <i>pitot tube</i>	m/s	$V_{udaktua11}$
Debit Udara Ideal	m^3/s	$Q_{udideal}$
Debit Udara Aktual	m^3/s	$Q_{udaktual}$

Kecepatan aliran udara ideal pada manometer orifis m/s V_{ud2}

Kecepatan aliran udara ideal pada saluran m/s V_{ud1}



RINGKASAN

Agus Setyawan, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Agustus 2007, ***Pengaruh Diameter Throat Nosel Konvergen-Divergen Terhadap Pola Aliran Bahan Bakar Dan Bentuk Nyala Api Pada Proses Pembakaran Difusi Minyak Tanah***. Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.Sc. Dan Ir. Moch Choiri.

Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil masih belum dapat terlepas dalam peradaban kehidupan manusia. Bahan bakar minyak tanah merupakan salah satu dari beberapa bahan bakar fosil yang masih sering digunakan. Pada penelitian ini jenis pembakaran yang dipakai adalah pembakaran difusi, yaitu proses pembakaran dimana bahan bakar dan udara tidak dicampur secara mekanik, melainkan bercampur sendiri secara alami. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh diameter *throat* nosel konvergen–divergen terhadap pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api pada proses pembakaran difusi minyak tanah.

Instalasi penelitian terdiri dari beberapa komponen utama yang meliputi tabung minyak tanah sebagai bahan bakar, *blower* sebagai penambah udara, *burner* sebagai tempat terjadinya reaksi pembakaran dan nosel konvergen-divergen sebagai alat untuk mengabutkan bahan bakar serta pemanas. Variabel bebas yang digunakan adalah ukuran diameter *throat* nosel konvergen divergen sebesar 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm. Pengambilan data visualisasi diambil dengan menggunakan *handycam*. Data visualisasi pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api yang dibahas adalah perbandingan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm dengan debit udara dan debit bahan bakar yang sama yaitu debit bahan bakar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk pola aliran bahan bakar dengan diameter *throat* yang kecil yaitu 0.5 mm menghasilkan pola aliran bahan bakar yang lebih tipis dan panjang, sedangkan dengan diameter *throat* yang paling besar yaitu 1 mm menghasilkan pola aliran bahan bakar tebal dan terdapat banyak olakan. Untuk bentuk nyala api dengan diameter *throat* yang kecil yaitu 0.5 mm menghasilkan bentuk nyala api yang panjang dan sempit serta memiliki *lift off* yang panjangnya sekitar 30 mm sedangkan diameter *throat* yang besar yaitu 1 mm memiliki bentuk yang lebar dan pendek.

Keywords : minyak tanah, pembakaran difusi, diameter *throat* nosel konvergen-divergen, *lift off*.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perkembangan peradaban manusia saat ini masih belum dapat melepaskan ketergantungan pada pemakaian bahan bakar fosil yang merupakan bahan bakar tidak dapat diperbarui. Bahan bakar fosil mempunyai tiga kelas umum antara lain batubara, minyak bumi dan gas alam. Penggunaan energi dari bahan bakar hidrokarbon menjadi tumpuan dan merupakan sumber energi terbesar didunia. Pemenuhan kebutuhan akan konsumsi bahan bakar terus meningkat setiap tahunnya sedangkan ketersediaan bahan bakar fosil terus menipis ditambah kebijakan harga bahan bakar fosil yang terus meningkat.

Proses pembakaran merupakan metode yang paling mudah digunakan untuk pengkonversian energi dari bahan bakar. Pembakaran mempunyai peranan yang sangat penting hampir dalam semua aspek kehidupan. Mulai dari alat-alat rumah tangga seperti penggunaan kompor untuk memasak sampai dalam bidang industri dan transportasi tidak lepas dari proses pembakaran. Proses pembakaran merupakan salah satu proses konversi energi, dimana proses ini merupakan reaksi kimia, yaitu reaksi oksidasi yang terjadi antara bahan bakar dengan udara (oksigen) yang berlangsung pada suhu tinggi, berjalan dengan cepat dan disertai dengan lepasnya sejumlah kalor atau cahaya (Turns, 1996:6). Pembakaran berfungsi untuk mengkonversi energi kimia bahan bakar menjadi energi termal yang dapat langsung digunakan atau dikonversikan menjadi energi lainnya. Sekarang ini banyak penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan efisiensi maupun mengamati fenomena yang terjadi dari proses pembakaran. Agar proses pembakaran itu berlangsung. Pembakaran dapat terjadi lebih sempurna apabila proses pengabutan atau pengabutan dan penguapan dari bahan bakar terjadi dengan baik.

Ada beberapa cara yang digunakan untuk dapat menciptakan efisiensi dari proses pembakaran, diantaranya yaitu dengan cara memperbaiki proses pengabutan (atomisasi). Apabila proses pengabutan (atomisasi) lebih baik maka proses penguapan dari bahan bakar lebih cepat terjadi, hal ini akan mengakibatkan proses pembakaran akan lebih mudah terjadi (pembakaran lebih sempurna) karena pendifusian antara bahan bakar dan udara dapat terjadi lebih sempurna. Hasil dari pembakaran sempurna akan meningkatkan efisiensi pembakaran sehingga dapat menghemat penggunaan bahan bakar dan temperatur yang dihasilkan akan lebih tinggi.

Sistem pengabutan tidak lepas dari sistem aliran fluida. Dalam bidang teknik mesin banyak sekali sistem yang berhubungan dengan sistem aliran fluida. Salah satu alat dalam sistem aliran fluida yang digunakan untuk proses pengabutan (atomisasi) adalah nosel. Nosel adalah alat yang berbentuk pipa atau tabung dengan diameter masuk dan keluar berbeda, digunakan untuk mengarahkan atau memodifikasi aliran zat cair atau gas. Aplikasi nosel dalam bidang teknik mesin umumnya digunakan untuk mengontrol rata-rata aliran, arah aliran dan mengubah tekanan menjadi kecepatan.

Dalam pembakaran, nosel digunakan sebagai alat yang digunakan untuk menghasilkan fluida dalam bentuk butiran halus (*droplet*) ukuran, kecepatan dan distribusi *droplet* dipengaruhi oleh jenis fluida dan desain (bentuk) nosel. Sehingga penggunaan nosel yang tepat pada pembakaran dapat meningkatkan efisiensi pembakaran.

Dalam penelitian ini bahan bakar yang digunakan adalah jenis *kerosene*. Pemakaian bahan bakar *kerosene* digunakan karena bahan bakar jenis ini mayoritas masyarakat rumah tangga masih menggunakannya, sehingga jika didapat metode peningkatan efisiensi pembakarannya maka sangat berguna bagi masyarakat. Dari latar belakang diatas, penulis mempunyai gagasan bagaimana cara meningkatkan efisiensi dari proses pembakaran, yaitu salah satunya dengan memodifikasi alat pembakaran yang menggunakan bahan bakar minyak tanah. Modifikasi yang dilakukan adalah memvariasikan diameter *throat* pada nosel konvergen-divergen. Semakin optimal diameter *throat* dari nosel konvergen-divergen maka tekanan pada sisi masuk nosel akan lebih tinggi dan debit dari bahan bakar akan turun. Diharapkan dengan menggunakan diameter *throat* yang semakin optimal maka akan dihasilkan proses atomisasi yang lebih baik. Sehingga proses pencampuran bahan bakar minyak secara difusi akan lebih mudah terjadi, hal ini mengakibatkan efisiensi pembakaran dan jumlah energi kalor yang dilepaskan akan lebih banyak.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pada latar belakang diatas maka dapat diambil suatu rumusan masalah sebagai berikut :

Bagaimana pengaruh diameter *throat* nosel konvergen-divergen terhadap pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api pada proses pembakaran difusi minyak tanah ?

1.3 Batasan Masalah

Mengingat luasnya obyek penelitian, maka untuk lebih memfokuskan arah pembahasan diperlukan batasan masalah sebagai berikut :

1. Bahan bakar minyak tanah yang digunakan adalah minyak tanah yang dijual dipasaran.
2. Kontruksi dari alat penelitian dan cara pembuatan nosel tidak diperhitungkan.
3. Tekanan dalam tabung konstan.
4. Kondisi udara lingkungan dianggap konstan.
5. Pemanasan awal tidak diperhitungkan.
6. Hanya membahas pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api..
7. Luas penampang masuk nosel dan panjang nosel konstan, dengan luas penampang masuk nosel 7.065 mm^2 dan panjang nosel 8 mm.
8. Pada penelitian ini digunakan diameter *throat* sebesar 0.5 mm, 0.7mm dan 1 mm.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh diameter *throat* nosel konvergen–divergen terhadap pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api pada proses pembakaran difusi minyak tanah.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Mampu menerapkan teori-teori yang telah didapat selama perkuliahan terutama masalah pembakaran.
2. Mengetahui pola aliran dan bentuk nyala api.
3. Memberikan informasi pada bidang perindustrian bagaimana cara meningkatkan efisiensi pembakaran khususnya industri yang menggunakan bahan bakar minyak.
4. Memberikan informasi kepada masyarakat cara meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar minyak tanah.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

BAB I Pendahuluan

Pada bab ini menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitin dan sistematika penulisan.

BAB II Landasan Teori

Pada bab ini dijelaskan tentang dasar-dasar teori yang digunakan pada saat penelitian

BAB III Metode Penelitian

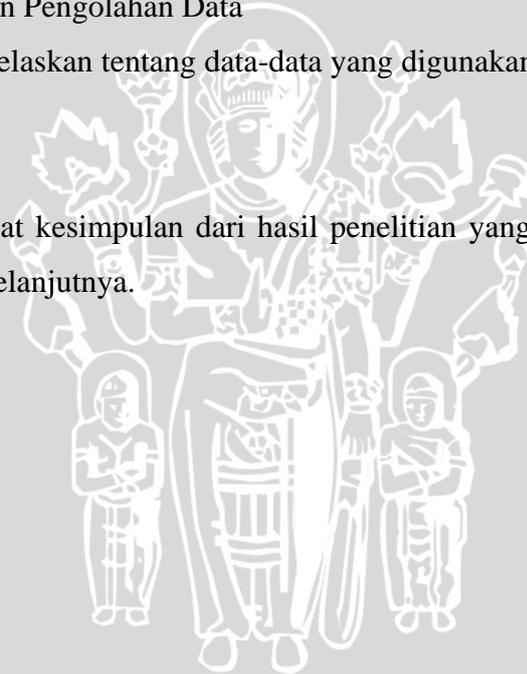
Pada bab ini menjelaskan tentang metode pengumpulan data, metode pengolahan data, waktu dan tempat penelitian serta diagram alir pemecahan masalah.

BAB IV Pengumpulan dan Pengolahan Data

Pada bab ini menjelaskan tentang data-data yang digunakan dan pengolahan data yang ada.

BAB V Penutup

Pada bab ini dibuat kesimpulan dari hasil penelitian yang dilakukan dan saran untuk penelitian selanjutnya.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian-penelitian Terdahulu

Slamet (2004) melakukan penelitian mengenai perbedaan aliran keluar nosel pada nosel *conic* dan *countur*. Dengan menggunakan fluida air yang dialirkan dengan pompa melalui pipa, nosel *conic* memiliki gradien penampang yang linear akan mengakibatkan perubahan aliran yang kecil. Semakin besar gradien penampang maka akan mengakibatkan perubahan aliran yang terjadi didalam nosel, sehingga akan menimbulkan banyak terjadi tumbukan antar partikel fluida. Nosel *conic* memiliki kapasitas alir aliran fluida keluar nosel lebih besar daripada nosel *countur*.

Kampen, J.V. dkk (1992) melakukan penelitian tentang proses atomisasi fluida *Newtonian* (air) menggunakan nosel dengan diameter keluar 0.7 mm dan 1 mm. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasaikan *ohnesorge numbers* tetapi pada daerah nilai Reynold dan Weber tertentu ($60 < Re < 30000$ dan $100 < We < 30000$). Nilai Re dan We dapat dijadikan acuan terjadinya perbedaan *breakup* fluida. Semakin besar nilai Re dan We maka atomisasi yang terjadi akan semakin baik, droplet yang terbentuk akan semakin kecil, sehingga hal ini akan memudahkan proses pendifusian dengan udara.

Pengertian *Ohnesorge numbers* (Oh) adalah sebuah angka tidak berdimensi yang menghubungkan antara kekentalan (*viscosity*) dan kekuatan tegangan permukaan (*surface tension force*). (http://en.wikipedia.org/wiki/Ohnesorge_number)

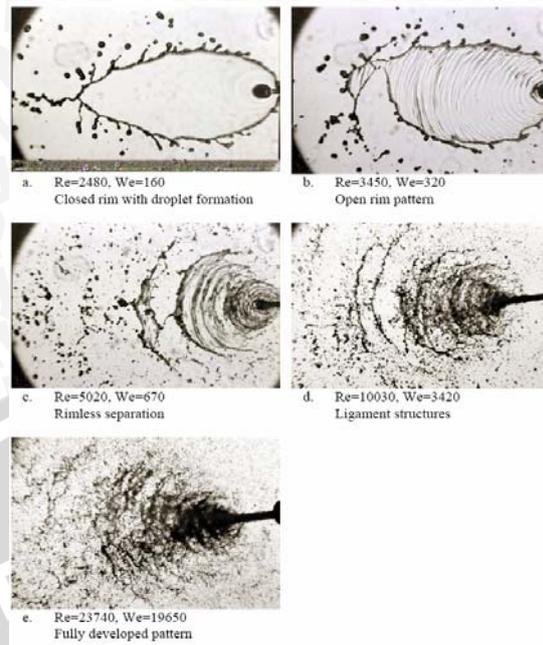
Ohnesorge numbers (Oh) dapat dituliskan seperti dibawah ini :

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma L}}$$

Dengan :

- μ adalah kekentalan cairan
- ρ adalah rapat jenis cairan
- σ adalah tegangan permukaan
- L adalah karakteristik skala panjang (jenis perbedaan diameter)

Ohnesorge numbers sering digunakan berhubungan dinamika fluida pada permukaan bebas seperti dispersi cairan pada gas dan teknologi penyemprotan.



Gambar 2.1 : Proses atomisasi dengan nilai Re dan We yang berbeda-beda.
 Sumber : Some Aspects of the Atomization Behavior of Newtonian and of Shear thinning Gelled non-Newtonian Fluids with an Impinging Jet Injector

2.2 Bahan Bakar

Pengertian bahan bakar ditinjau dari sudut teknis diartikan sebagai bahan yang apabila dibakar dapat meneruskan proses pembakaran tersebut dengan sendirinya, disertai pengeluaran kalor. Bahan bakar dibakar dengan tujuan memperoleh kalor untuk digunakan baik secara langsung maupun secara tak langsung sebagai contoh penggunaan kalor dari proses pembakaran secara langsung adalah untuk memasak di dapur-dapur rumah tangga dan untuk instalasi pemanas. Sedang contoh penggunaan secara tidak langsung adalah kalor diubah menjadi energi mekanik, misalnya pada motor bakar dan kalor diubah menjadi energi listrik, misalnya pada pembangkit listrik tenaga diesel, tenaga gas dan tenaga uap (Wahyudi, 2006). Bahan bakar yang biasa digunakan pada pengaplikasian diatas adalah bahan bakar fosil, karena bahan bakar fosil merupakan bahan bakar yang mudah dalam pengolahannya. Bahan bakar cair, padat dan gas merupakan bahan bakar fosil yang diperoleh dari pengeboran atau penambangan.

Semua bahan bakar fosil terjadi dari proses pengendapan dan pemadatan ikatan hidrat arang dalam perut bumi. Ikatan tersebut memiliki rumus umum kimia $C_x(H_2O)_y$ dihasilkan oleh tumbuh-tumbuhan dalam proses fotosintesis ketika tumbuh-tumbuhan mengubah energi matahari menjadi energi kimia. Setelah tumbuh-tumbuhan

mati, hidrat arang diubah oleh tekanan dan panas tanpa oksigen di dalam perut bumi menjadi ikatan hidrokarbon dengan rumus kimia C_nH_m . Tentunya proses ini berlangsung dalam jangka waktu yang lama (Wardana, 1996 : 3). Komposisi bahan bakar fosil dan bahan bakar organik umumnya tersusun dari unsur-unsur C (karbon), H (hidrogen), O (oksigen), N (nitrogen), S (belerang), P (fosfor) dan unsur-unsur lainnya dalam jumlah kecil, namun unsur-unsur kimia yang penting adalah C, H dan S. Unsur-unsur tersebut jika terbakar menghasilkan kalor dan disebut sebagai “bahan yang dapat terbakar” disingkat BDT. Unsur-unsur lain yang terkandung dalam bahan bakar namun tidak dapat terbakar adalah oksigen, nitrogen, air dan bahan mineral atau abu. Komponen-komponen ini disebut sebagai bahan yang tidak dapat terbakar disingkat dengan non-BDT.

Menurut asalnya bahan bakar dapat dibagi menjadi dua, yaitu bahan bakar primer (alam) dan bahan bakar sekunder (buatan). Bahan bakar primer dapat secara langsung digunakan, contohnya kayu, gas alam, dan lain-lain. Bahan bakar sekunder ini diolah dari bahan bakar primer, contohnya bensin, solar dan minyak tanah (*kerosene*). Menurut bentuknya ada tiga jenis bahan bakar yaitu bahan bakar cair, bahan bakar padat, bahan bakar gas (Wijayanti, 2003:5). Bahan bakar yang kita gunakan sehari-hari ada yang bisa diperbarui dan tidak bisa diperbarui.

Bahan bakar biomas merupakan bahan bakar yang bisa diperbarui. Bahan bakar biomas berasal dari tumbuh-tumbuhan yang tumbuh di darat maupun di air. Sedangkan yang termasuk bahan bakar biomas adalah kayu bakar, sampah, minyak yang berasal dari alam dan lain-lain. Contoh dari bahan bakar fosil adalah gas alam, minyak bumi dan batu bara.

Setiap bahan bakar mempunyai spesifikasi sendiri-sendiri. Spesifikasi bahan bakar bisa dinyatakan dengan nilai kalor, titik nyala, titik didih dan lain-lain. Salah satu spesifikasi bahan bakar yang penting adalah nilai kalor. Nilai kalor adalah kalor yang dihasilkan oleh pembakaran sempurna satu kilogram atau satu satuan berat bahan bakar padat atau cair atau satu meter kubik atau satu satuan volume bahan bakar gas, pada keadaan baku. Nilai kalor bahan bakar ada dua yaitu nilai kalor atas dan nilai kalor bawah. Nilai kalor atas adalah kalor yang dihasilkan oleh pembakaran sempurna satu satuan berat bahan bakar atau satu satuan volume bahan bakar pada kondisi *steady*, dimana air sebagai produk pembakaran berupa cairan atau berada pada fase cair. Nilai kalor bawah adalah kalor yang dihasilkan oleh pembakaran sempurna satu satuan berat

atau satu satuan volume bahan bakar pada kondisi *steady*, dimana air sebagai produk pembakaran berada pada fase gas.

2.2.1 Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair berasal dari minyak mentah dan dari pencairan batu bara. Kandungan bahan bakar cair adalah hidrokarbon. Hidrokarbon adalah senyawa yang mempunyai unsur karbon dan hidrogen. Perkiraan komposisi minyak bumi adalah karbon 80% sampai 89%, hidrogen 12% sampai 14%, nitrogen 0.3% sampai 1%, sulphur 0.3% sampai 3% dan oksigen 2% sampai 3% (Wijayanti, 2003:8).

Minyak bumi diolah dengan jalan destilasi. Tujuan utama dari proses pengolahan minyak bumi adalah untuk mendapatkan *gasoline* sebanyak mungkin dengan sifat-sifat bahan bakar yang diinginkan. Minyak bumi bila disuling akan menghasilkan beberapa macam fraksi seperti bensin, solar minyak tanah dan lain-lain. Minyak bumi merupakan campuran dari berbagai hidrokarbon yang termasuk dalam kelompok : paraffin, naphtena, olefin dan aromatic. Berdasarkan kegunaannya bahan bakar cair terbagi menjadi dua kelas, yaitu *light oil* biasanya dipakai untuk pembakaran motor bakar dan *heavy oil* biasanya dipakai untuk pembakaran pada industri. Dibandingkan bahan bakar yang lainnya bahan bakar cair memiliki keuntungan mudah dalam penyimpanannya, pendistribusian dan penyalaannya. Untuk proses penyalaan bahan bakar cair dibutuhkan nosel yang bertekanan agar bisa terjadi proses atomisasi atau pengkabutan. Agar terjadi pengkabutan sehingga terbentuk *droplet* yang baik maka diperlukan nosel yang bertekanan tinggi. Pengkabutan yang baik akan menghasilkan *droplet* dengan ukuran yang kecil-kecil sehingga mempunyai daerah pendifusian yang luas. Bila dipanaskan, bahan bakar cair akan menguap dan kemudian terbakar dalam bentuk gas. Pada penelitian ini menggunakan bahan bakar cair yaitu minyak tanah atau *kerosene*. Minyak tanah biasanya digunakan untuk dapur rumah tangga, bahan bakar kapal laut dan bahan bakar pada industri kecil.

2.2.2 Minyak tanah

Bahan bakar minyak tanah merupakan bahan bakar hidrokarbon yang berasal dari pengolahan minyak bumi. Pengolahan ini menggunakan proses destilasi yaitu penguapan kemudian dilakukan pengembunan kembali. Berbagai macam cairan mempunyai titik didih yang berbeda-beda. Melalui proses destilasi, pada titik didih yang berlainan dapat menghasilkan bensin, minyak tanah, solar, minyak pelumas dan residu.

Minyak tanah mempunyai sifat khusus seperti nomor karbon dari C_{11} sampai C_{13} serta mempunyai titik didih $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, HHV $44\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ serta LHV $42\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$. Untuk pembakaran *kerosene* maka AFR stoikiometri didapat dari persamaan reaksi seperti berikut



Rumus kimia	$C_{12}H_{26}$	O_2	N_2
Berat molekul	170	32	28
Massa molekul	170	592	1947.68

$$\text{AFR} = \frac{\text{massa molekul udara}}{\text{massa molekul bahan bakar}} = \frac{1947.68 + 592}{170} = 14.939 \quad (\text{Wijayanti, 2003})$$

Tabel 2.1. Requirements for Kerosines (IS:1459-1974)

Sl.No.	Characteristics	Requirement	Test Method IS:1448
1.	Acidity, inorganic	Nil	P:2
2.	Burning quality		P:5
	(a) Char value of oil consumed, mg/kg, Max.	20	
	(b) Bloom on glass chimney	Not darker than grey	
3.	Colour (Saybolt), Min.	10	P:14
4.	Cooper strip corrosion 8 h at $50\text{ }^{\circ}\text{C}$	Not worse than No.1	P:15
5.	Distillation :		
	(a) Recovery below $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, vol. %, Min.	20	
	(b) Final boiling point, $^{\circ}\text{C}$, Max.	300	
6.	Flash point (Abel), $^{\circ}\text{C}$, Min.	35	P:20
7.	Smoke point, mm, Min	18*	P:31
8.	Total sulphur, wt. %, Max.	0.25**	P:34

*21 (for defense), 20 (for railways).

**0.20 (for defense).

Sumber : Prasaad, Raam, Dr. 2000. *Petroleum Refining Technology*. India. Khanna Publishers.

2.3 Pembakaran

Pembakaran merupakan salah satu proses konversi energi, dimana proses ini merupakan reaksi kimia, yaitu reaksi oksidasi yang terjadi antara bahan bakar dengan udara (oksigen) yang berlangsung pada suhu tinggi, berjalan dengan cepat dan disertai dengan lepasnya sejumlah kalor atau cahaya (Turns, 1996:6). Agar proses pembakaran

itu terjadi maka ada tiga komponen utama yang terlibat yaitu: bahan bakar, udara pembakaran (oksigen) dan panas (titik nyala pembakaran). Reaksi pembakaran dapat terjadi jika terdapat bahan bakar, udara, oksigen dan suhu tinggi yang mencapai titik nyala bahan bakar. Reaksi pembakaran terjadi pada fase uap, kecuali pada pembakaran unsur karbon. Pada umumnya, bahan bakar pada reaksi pembakaran merupakan senyawa hidrokarbon yang tersusun oleh unsur-unsur karbon, hidrogen dan kadang-kadang tersusun oleh oksigen, nitrogen, belerang dan zat pengotor. Bahan bakar agar dapat terbakar harus bereaksi dengan udara. Pembakaran sempurna dari bahan bakar dan udara akan menghasilkan H_2O dan CO_2 , namun keadaan ini tidak akan pernah tercapai. Reaksi pembakaran sempurna biasanya digunakan untuk mempermudah dalam melakukan perhitungan pada proses pembakaran. Persamaan kesetimbangan kimia untuk pembakaran sempurna dari suatu reaktan tidak menghasilkan kelebihan udara pada produk pembakarannya dan biasa disebut dengan kondisi stoikiometris. Umumnya persamaan reaksi kimia bahan bakar hidrokarbon ditulis sebagai berikut :



Jumlah minimum udara yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna dari suatu bahan bakar disebut *theoretical air* atau udara teoritis. Tetapi pada kenyataannya sulit untuk mencapai pembakaran sempurna dengan udara teoritis. Sehingga kebanyakan suatu proses pembakaran disuplai dengan udara berlebih agar semua bahan bakar dapat bereaksi sempurna dengan udara, namun campuran yang terlalu kaya udara atau bahan bakar akan menyebabkan pembakaran menjadi tidak sempurna dan akan menurunkan temperatur hasil pembakaran.

Reaksi pembakaran menghasilkan sejumlah energi dalam bentuk kalor. Reaksi semacam ini disebut reaksi eksoterm. Reaksi eksoterm memiliki pengertian bahwa termodinamika sistem melepaskan energi dalam bentuk panas ke lingkungan. Jika ditinjau secara termodinamika reaksi eksoterm akan menyebabkan sistem melepaskan sejumlah entalpi keluar sistem melalui batas sistem. Oleh karena itu reaksi pembakaran secara lengkap dengan melibatkan pula perubahan energinya adalah :



(Wardana, 1995:21) (2.3)

Untuk memudahkan pembahasan reaksi pembakaran, bahan bakar dianggap bereaksi dengan oksigen dari udara. Udara memiliki komposisi sebagai berikut :

Tabel 2.2. Komposisi udara kering

Unsur / Senyawa	% Volume	% Berat	Berat molekul lb permole
O ₂	20.99	23.19	32
N ₂	78.03	75.47	28.016
Argon (Ar)	0.49	1.30	39.944
CO ₂	0.03	0.04	44.003
H ₂	0.01	0.00	2.016
Udara kering	100.00	100.00	28.016

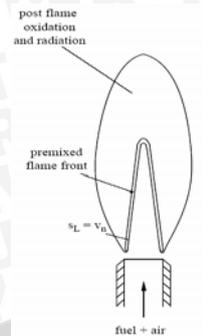
Sumber : Tjokroawidjojo, 1986 : 47

Karena reaktan pembakaran dapat melepaskan sejumlah energi panas, reaksi ini merupakan salah satu cara untuk mendapatkan kerja/usaha. Melalui reaksi pembakaran, akan terjadi konversi energi kimia yang dimiliki oleh bahan bakar menjadi energi panas. Pada umumnya reaksi pembakaran disertai dengan oleh timbulnya nyala api. Nyala api (*flame*) merupakan daerah tempat terjadinya reaksi pembakaran. Pada daerah ini bahan bakar dan oksigen terbakar lalu menghasilkan kalor sehingga suhu di daerah ini sangat tinggi. Nyala api dibatasi oleh permukaan nyala (*flame front*), yaitu permukaan yang membatasi gas yang terbakar dan gas yang tidak terbakar. Permukaan nyala merupakan daerah tempat reaksi dengan kecepatan oksidasi yang sangat tinggi. Jika bahan bakar telah melewati permukaan nyala, pembakaran secara praktis telah selesai. Titik nyala adalah titik temperatur terendah dimana bahan bakar dapat menyala. Hal ini berkaitan dengan keamanan dalam penyimpanan dan penanganan bahan bakar.

Pada semua proses pembakaran diusahakan terjadi pembakaran yang sempurna. Untuk memperoleh hal ini, ada syarat yang harus dipenuhi, yaitu ;

1. Bahan bakar menguap secara efisien.
2. Digunakan cukup udara pembakaran.
3. Terjadi campuran yang homogen antara bahan bakar dan udara.
4. Suhu pembakaran cukup tinggi.

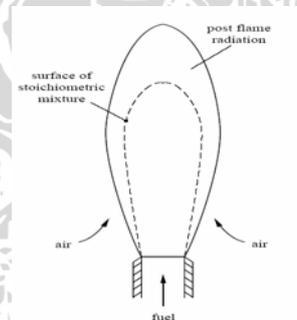
Dari sudut pandang aerodinamika pembakaran, ada dua jenis pembakaran yaitu pembakaran premiks dan pembakaran difusi. Pembakaran premiks adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan udara (oksigen) dicampur terlebih dahulu secara mekanik, kemudian dibakar, contoh pembakaran jenis ini dapat dilihat pada proses pembakaran motor bensin, las karbit dan pembakaran roket.



Gambar 2.2 : Bentuk api pada pembakaran premiks

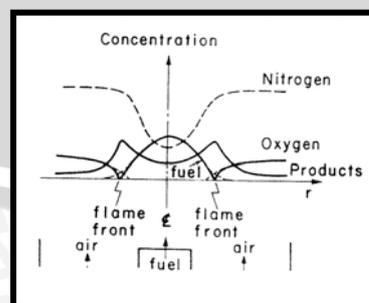
Sumber : *Fifteen Lectures on Laminar and Turbulent Combustion*

Pembakaran difusi adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan udara tidak dicampur secara mekanik, melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi. Jika pencampuran bahan bakar dan udara (oksigen) dengan proses difusi ini mencapai kondisi mendekati stoikiometrik, dan panas yang dilepas oleh api di daerah pencampuran tersebut sudah cukup maka pembakaran akan berlangsung. Proses pembakaran difusi dapat kita lihat pada pembakaran lilin, kompor minyak tanah, korek api dan kompor gas.



Gambar 2.3 : Bentuk api pada pembakaran difusi

Sumber : *Fifteen Lectures on Laminar and Turbulent Combustion*



Gambar 2.4 : Reaksi yang terjadi pada api

Sumber : Kuo Kenneth Kuan Yuan, 1986:348

2.3.1 Mekanisme pembakaran

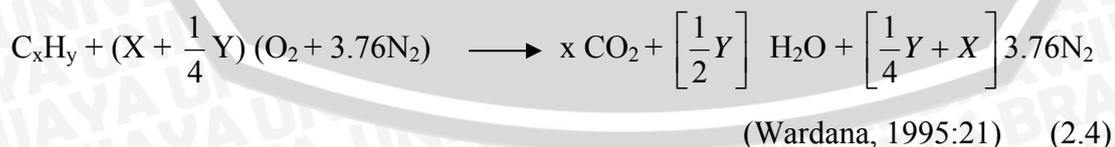
Proses pembakaran pada dasarnya adalah reaksi kimia yang terjadi antara bahan bakar dengan udara sebagai oksidator yang dibantu oleh sumber energi dari luar (energi aktivasi). Energi tersebut berfungsi sebagai pemutus ikatan-ikatan lemah bahan bakar menjadi radikal (ion) dan sangat reaktif. Ion-ion ini akan bereaksi dengan oksigen membentuk ikatan yang lebih kuat dengan kelebihan energi ikatan yang dilepas kedalam sistem yang biasanya menyebabkan kenaikan temperatur yang sangat tinggi.

Dalam suatu pembakaran ada dua hal yang pasti terjadi, kedua hal itu adalah :

1. Komposisi spesies campuran berubah terhadap waktu dan perubahan ini disebabkan oleh proses pada tingkat molekuler.
2. Ikatan-ikatan molekul yang lemah kemudian lepas digantikan oleh ikatan yang lebih kuat, kelebihan energi ikat dilepas kedalam sistem yang biasanya menyebabkan kenaikan temperatur.

Perpindahan panas yang terjadi pada zona pembakaran merupakan perpindahan panas secara radiasi. Pada zona pembakaran juga terjadi perpindahan panas konduksi (dengan dinding luar). Konduksi adalah suatu perpindahan energi dari partikel yang memiliki energi lebih rendah (tanpa diikuti dengan perpindahan partikel) sebagai hasil interaksi dari partikel-partikel tersebut. Sedangkan konveksi terjadi antara pipa saluran bahan bakar pada zona pembakaran maupun zona *preheating* dengan campuran udara dan bahan bakar yang telah menjadi *droplet*. Konveksi adalah perpindahan panas antara permukaan padat dan fluida cair maupun gas yang bergerak saling berbatasan dan melibatkan kombinasi antara konduksi dan gerakan fluida.

Campuran bahan bakar dapat berubah menjadi uap, hal ini disebabkan karena kalor yang dikandung zona *preheating* mampu menguapkan *droplet* bahan bakar. Perpindahan panas ke lingkungan akan menyebabkan hilangnya sebagian kalor hasil pembakaran. Reaksi pembakaran sempurna bahan bakar (C_xH_y) dapat dituliskan :



Dalam persamaan tersebut diatas digunakan jumlah udara minimum yang biasa disebut dengan udara teoritis. Akan tetapi dalam kondisi aktual pembakaran sangat sulit terjadi karena proses pembakaran berlangsung sangat kompleks. Pembakaran sempurna hanya terjadi apabila semua unsur-unsur C dan H dapat bercampur dengan O_2 dari udara, kemudian bereaksi membentuk H_2O dan CO_2 .

2.3.2 Reaksi rantai pada proses pembakaran

Pembakaran terjadi melalui serangkaian reaksi yang cepat dan berkelanjutan dikenal sebagai reaksi rantai. Pada dasarnya, reaksi rantai pada proses pembakaran hidrokarbon meliputi :

1. Proses pencampuran bahan bakar dan udara atau oksigen.
2. Pemutusan ikatan senyawa hidrokarbon menjadi radikal bebas yang tidak stabil.
3. Oksidasi radikal bebas sehingga membentuk produk pembakaran.

2.3.3 Batas ketidakhayalan

Untuk menimbulkan pembakaran yang sempurna, diperlukan udara pembakaran yang berlebih. Penggunaan udara pembakaran lebih banyak atau lebih sedikit daripada yang diperlukan, akan menyebabkan kecepatan pembakaran berkurang. Dengan demikian ada dua batas suatu pembakaran akan berlangsung dengan kecepatan tinggi. Ada dua batas terjadinya pembakaran yaitu ;

1. Lower Inflammability Limit (LIL)
2. Upper Inflammability Limit (UIL)

LIL adalah suatu batas tidak lagi terjadi pembakaran karena mol udara pembakaran terlalu banyak dibandingkan mol bahan bakar. Sedangkan UIL adalah suatu batas tidak lagi terjadinya pembakaran karena mol udara pembakaran terlalu sedikit dibandingkan dengan mol bahan bakar. Dengan demikian, keberadaan udara pembakaran, bahan bakar dan suhu pembakaran belum merupakan jaminan terjadinya pembakaran. Jika ketiga syarat itu ada tetapi dalam jumlah yang sangat tidak seimbang maka pembakaran tidak akan terjadi.

2.4 POLA ALIRAN

2.4.1 Aliran Laminer

Aliran Laminer adalah aliran yang bergerak dalam lapisan-lapisan, dimana perpindahan momentum dan massa terjadi secara molekuler dalam skala submikropis dan lapisan yang mempunyai kecepatan yang relatif tinggi menuju lapisan lain yang memiliki kecepatan lebih rendah. Pada aliran laminer partikel fluida bergerak secara berurutan mengikuti lintasan yang lancar dengan kecepatan yang tetap.

2.4.2 Aliran Transien

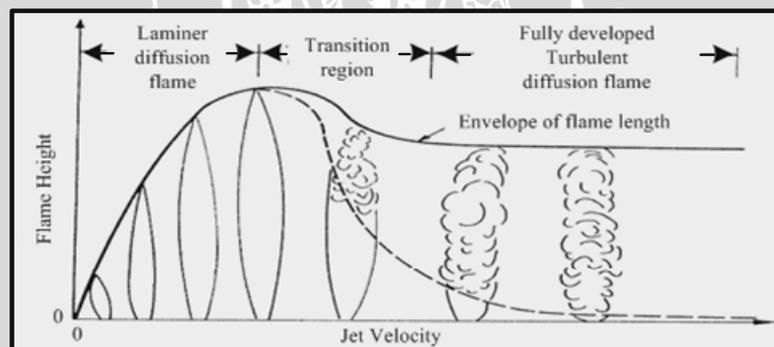
Aliran Transien adalah aliran yang kecepatannya merupakan fungsi waktu artinya aliran ini memiliki kecepatan yang berubah-ubah terhadap waktu.

2.4.3 Aliran Turbulen

Aliran turbulen atau aliran bergolak adalah suatu jenis aliran yang garis alir antar partikel fluidanya saling berpotongan (White, 1994 ; 290). Dalam aliran ini tidak ada lagi lapisan-lapisan fluida sehingga aliran fluida dapat dibayangkan sebagai bongkahan-bongkahan fluida yang bergerak secara acak sehingga proses perpindahan momentum dan massa terjadi secara makroskopis.

2.5 Nyala Api Difusi

Nyala api difusi terdiri dari api difusi laminar dan api difusi turbulen. Perubahan aliran api ini biasanya disebabkan oleh pemanjangan api dan peningkatan kecepatan aliran. Hal ini dapat diilustrasikan pada gambar 2.5 dibawah ini



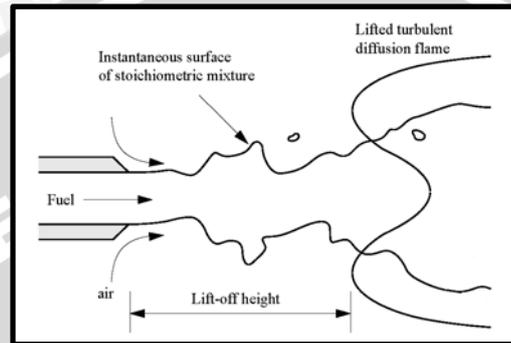
Gambar 2.5 : Perubahan aliran dan struktur api
Sumber : Kuo, 1986: 359

Nyala api (*flame*) adalah daerah tempat terjadinya reaksi pembakaran. Nyala api dibatasi oleh permukaan nyala (*flame front*), yaitu permukaan yang membatasi gas yang terbakar dan tidak terbakar. Pada proses pembakaran difusi, kestabilan nyala memegang peranan yang sangat penting. Api dikatakan stabil apabila terjadi api stasioner pada kedudukan tertentu saat kecepatan gas reaktan sama dengan kecepatan produk, dalam hal ini rambatan api.

Batas kestabilan api pada umumnya menjelaskan batas operasional dari sistem pembakaran. Pada penelitian ini terdapat dua kondisi aliran batas yang berhubungan dengan kestabilan api difusi, yaitu *lift off* dan *blow off*. Kondisi kritis kestabilan ini

sangat tergantung pada konfigurasi alirannya. Pada aliran *jet* bahan bakar berkecepatan rendah, kondisi api adalah laminer, kemudian bila kecepatan aliran ditingkatkan, aliran akan berada pada kondisi turbulen.

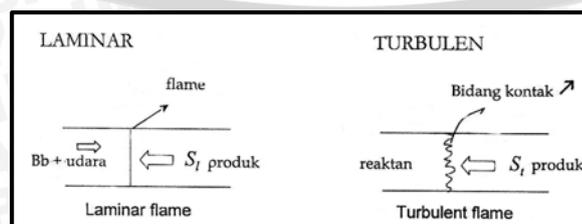
Kondisi *lift off* pada penelitian ini didefinisikan sebagai suatu kondisi api yang terjadi saat api mulai tidak menempel pada mulut nosel (Gambar 2.6). Hal ini terjadi karena kecepatan api lebih kecil dari kecepatan gas reaktan, sehingga api akan bergerak menjauhi mulut nosel.



Gambar 2.6 : Skema *lift off* pada api difusi *jet*
Sumber : Peters, 1997: 95

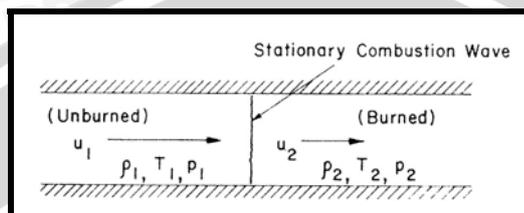
Panjang *lift off* adalah jarak antara mulut nosel dan pangkal api. Panjang *lift off* akan meningkat seiring dengan penambahan kecepatan *jet* bahan bakar sampai api mengalami *blow off* (kondisi api menjadi padam setelah mengalami *lift off*). *Blow off* dapat terjadi bila api difusi telah melewati batas kritis *lift off*. Baik *lift off* maupun *blow off* merupakan kondisi yang harus dihindari dalam proses pembakaran.

Pemasangan *tangential air jet inlets* pada aliran udara akan menghasilkan suatu aliran yang bersirkulasi, sehingga akan berpengaruh terhadap kecepatan gas reaktan. Hal ini akan merubah rambatan gelombang pembakaran stasioner dari laminer menjadi turbulen (Gambar 2.7), sehingga bidang kontak antar reaktan menjadi semakin luas, akibatnya batas *lift off* dan *blow off* akan mengalami peningkatan. Semakin besar aliran yang bersirkulasi, maka reaksi yang terjadi antara bahan bakar dan udara juga semakin baik, akibatnya luasan daerah kestabilan api juga akan semakin bertambah atau bisa dikatakan kestabilan api mengalami peningkatan.



Gambar 2.7 : Gelombang pembakaran laminer dan turbulen
Sumber : Hedman, 2002: 2

Nyala api (*flame*) adalah daerah tempat terjadinya reaksi pembakaran. Nyala api dibatasi oleh permukaan nyala (*flame front*) yaitu permukaan yang membatasi gas yang terbakar dan tidak terbakar. Pada proses pembakaran, kestabilan api memegang peranan yang sangat penting. Api dikatakan stabil apabila terjadi api stasioner pada kedudukan tertentu, dimana kecepatan gas reaktan sama dengan kecepatan produk, dalam hal ini rambatan api. Hal ini tentu saja akan mempengaruhi aliran udara yang terbentuk disekitar api tersebut seperti terlihat pada gambar 2.8.

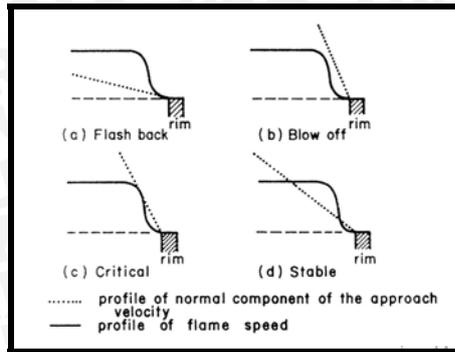


Gambar 2.8 : Skema diagram dari perambatan pembakaran stasioner dimensi
Sumber : Kuo, 1986 : 233

Jika kecepatan reaktan lebih kecil daripada kecepatan produk maka api akan bergerak ke mulut nosel dan kejadian ini disebut *flash back*. Jika kecepatan reaktan lebih besar daripada kecepatan produk maka api akan bergerak menjauh dari mulut nosel dan kejadian ini disebut *blow off*. *Flame stretch* atau pemanjangan api terjadi akibat efek *blow off* yaitu kecepatan reaktan yang lebih cepat dari kecepatan pembakaran dan juga akibat gradien kecepatan dalam aliran terlalu besar yang mengakibatkan hilang panas dan laju reaksi menurun.

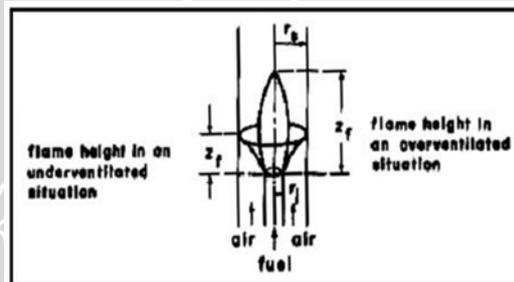
Kondisi pembakaran yang stabil akan terjadi jika garis kecepatan gas reaktan menyinggung garis kecepatan pembakaran di dua titik seperti ditunjukkan gambar 2.9 (d). Jika garis kecepatan reaktan tidak memotong garis kecepatan pembakaran, maka akan terjadi *blow off* yang ditunjukkan pada gambar 2.9 (b). Pada kondisi lain jika garis kecepatan gas reaktan memotong garis kecepatan pembakaran di dua titik, yaitu kondisi dimana kecepatan gas reaktan lebih rendah daripada kecepatan pembakaran, maka akan terjadi peristiwa *flash back* ditunjukkan pada gambar 2.9 (a). Peristiwa ini merupakan rambatan dengan kecepatan yang tinggi menuju mulut nosel.

Pada saat terjadi *blow off* telah dijelaskan bahwa api akan menjauhi nosel terlebih dahulu kemudian mati. Pada saat itu aliran udara yang terbentuk disekitar api akan berbeda karena api terbentuk di atas nosel, panas yang semakin hilang dan laju reaksi yang semakin menurun.



Gambar 2.9 : Jenis profil api
 Sumber : Kuo, 1986 : 324

Model umum yang digunakan untuk meneliti dan menganalisis nyala api difusi adalah dengan sistem pembakaran yang aliran bahan bakar dan udaranya sejajar dalam tabung pembakaran yang silindris dan koaksial. Model ini pertama kali diperkenalkan oleh Burke dan Schumann pada tahun 1979.



Gambar 2.10 : Bentuk api difusi
 Sumber : Kuo, 1986; 348

Model Burke dan Schumann dapat digunakan untuk menganalisis bentuk nyala api difusi sehingga dengan model tersebut dapat diklasifikasikan kedalam dua bentuk yaitu:

1. Nyala api menguncup ke sumbu tabung pembakaran
 Kondisi ini terjadi jika perbandingan diameter tabung pembakaran terhadap diameter nosel bahan bakar sedemikian rupa sehingga udara yang masuk ke tabung pembakaran lebih banyak daripada yang diperlukan untuk proses pembakaran sempurna (*overventilated*).
2. Nyala api melebar ke dinding tabung pembakaran
 Kondisi ini terjadi jika perbandingan diameter tabung pembakaran terhadap diameter nosel sedemikian rupa sehingga udara yang masuk ke tabung pembakaran lebih sedikit daripada yang diperlukan untuk proses pembakaran sempurna (*underventilated*).

2.6 Atomisasi

Ada beberapa cara untuk menyiapkan bahan bakar minyak untuk pembakaran, diantaranya dengan penguapan atau gasifikasi dan pengatoman atau pengabutan bahan bakar minyak tersebut ke dalam aliran udara. Teknik penguapan sangat cocok untuk bahan bakar minyak yang ringan. Atomisasi tetesan minyak dapat dilakukan dengan menggunakan udara atau uap bertekanan tinggi, atau selaput minyak itu dipisahkan dengan gaya sentrifugal. Pada pembakaran yang menggunakan bahan bakar cair, agar bahan bakar dapat terbakar maka perlu dilakukan penguapan. Sebelum dilakukan penguapan agar pembakaran mudah terjadi maka perlu dilakukan pengkabutan atau atomisasi. Pada proses pengkabutan bahan bakar cair mula-mula bahan bakar tersebut akan berbentuk *droplet*. Kemudian *droplet* tersebut akan menguap. Proses penguapan akan dimulai dari permukaan dan berdifusi ke permukaan nyala api. Oksigen akan bergerak dan berdifusi dari lingkungan sekeliling menuju ke permukaan nyala. Besarnya energi yang dibutuhkan untuk penguapan *droplet* akan diketahui dengan persamaan

$$Q = \Delta h_v + C_{liq} (T_s - T_o) \quad (\text{Kuo, 1986 : 373}) \quad (2.5)$$

Dengan :

Q = Energi total penguapan (kj/kg)

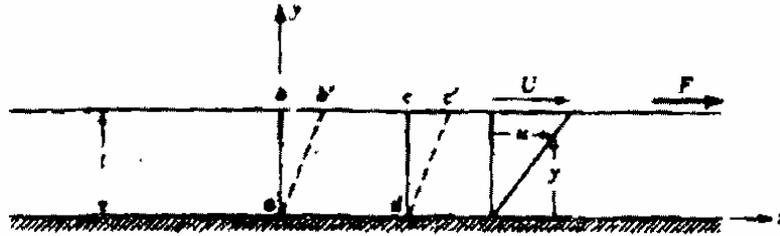
Δh_v = Kalor laten (kj/kg)

T_s = Temperatur permukaan *droplet* (°C)

T_o = Temperatur awal *droplet* (°C)

2.7 Fluida

Fluida adalah suatu zat alir apabila dikenakan tegangan geser akan bertambah secara terus menerus, betapapun tegangan geser tersebut sangat kecil fluida tersebut akan bergerak dan berubah bentuk secara terus menerus selama tegangan tersebut bekerja. Apabila suatu zat ditempatkan diantara pelat yang sejajar dengan jarak antara yang kecil. Pelat bawah terpasang tetap dan suatu gaya F dikenakan pada pelat atas yang menggerakkan tegangan geser $\frac{F}{A}$ pada suatu zat apapun yang terdapat antara pelat-pelat itu (Streeter .L.V and Wylie .B.E. 1994 : mekanika fluida).



Gambar 2.11 : Deformasi elemen fluida.

Sumber : Streeter.L.V, Wylie.E.B, 1993 : 4

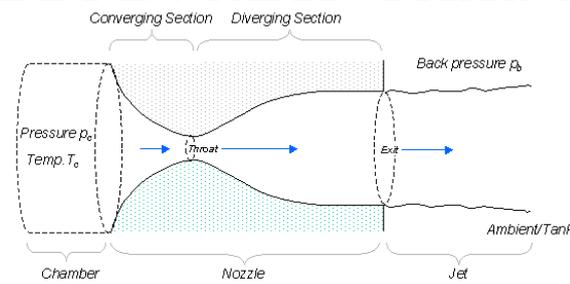
Apabila gaya-gaya F yang menyebabkan pelat atas bergerak dengan suatu kecepatan (bukan nol), betapapun sangat kecilnya gaya F dapat disimpulkan bahwa zat diantara pelat tersebut adalah suatu fluida yang mengalami pergerakan dengan kecepatan tertentu dan ditandai perubahan bentuk dari fluida tersebut disepanjang saluran

2.8 Nosel

Nosel adalah alat yang berbentuk pipa atau tabung dengan diameter masuk dan keluar berbeda, yang didalamnya energi kinetik fluida yang mengalir bertambah akibat penurunan tekanan dan digunakan untuk mengarahkan atau memodifikasi aliran zat cair atau gas. Umumnya nosel digunakan untuk mengontrol rata-rata aliran, arah aliran dan mengubah tekanan menjadi kecepatan.

Ada tiga jenis dari bentuk nosel, yaitu ;

1. Nosel konvergen yaitu nosel dengan diameter *inlet* lebih besar daripada diameter *outlet*. Nosel jenis konvergen ini biasanya dipakai untuk fluida dengan bilangan *mach* kurang atau sama dengan satu ($M \leq 1$).
Bentuk nosel konvergen dibagi menjadi dua yaitu *contour nozzle* dan *conical nozzle*.
2. Nosel divergen adalah nosel dengan diameter *inlet* lebih kecil daripada diameter *outlet*. Nosel ini biasanya sering dipakai pada fluida dengan yang mempunyai bilangan *mach* lebih dari satu ($M \geq 1$).
3. Nosel konvergen-divergen adalah gabungan antara nosel konvergen dan divergen dengan memiliki *throat*. Nosel ini sering dipakai pada penggunaan fluida yang memiliki bilangan *mach* kurang dari satu dan diharapkan setelah melewati *throat* memiliki nilai *mach* lebih dari satu.



Gambar 2.12 : Nosel Konvergen-Divergen

Sumber : www.answers.com

Nosel yang digunakan didalam pembakaran mempunyai karakteristik yang berbeda-beda. Nosel pada pembakaran digunakan untuk mengabutkan bahan bakar, sebelum bahan bakar tersebut dibakar. Untuk mengabutkan bahan bakar pada nosel diperlukan energi yang biasanya diberikan dalam bentuk energi tekanan. Energi tekanan ini tidak langsung memecah aliran minyak menjadi *droplet*, namun energi tersebut dirubah dahulu menjadi kecepatan. Setiap jenis nosel pembakaran mempunyai tekanan yang berbeda dan perbedaan distribusi dari *droplet* yang dihasilkan. Kenaikan tekanan akan menghasilkan *droplet* berukuran lebih kecil. Selain itu ukuran *droplet* semakin kecil apabila sudut semprot semakin lebar, viskositas bahan bakar rendah dan kecepatan aliran fluida tinggi. Aliran bahan bakar dari nosel biasanya terdistribusi dalam daerah berbentuk silinder sepanjang sumbu ruang bakar.

Dengan kenaikan tekanan menyebabkan kecepatan *droplet* menjadi bertambah. Kenaikan kecepatan menyebabkan penurunan tekanan pada daerah atomisasi. Karena tekanan mengalami penurunan sehingga lebih rendah dari pada udara yang mengalir pada ruang bakar, maka udara cenderung akan masuk menuju daerah pengkabutan dan udara tersebut akan bergabung dengan *droplet*. Dengan adanya fenomena diatas, maka *droplet* akan kehilangan kecepatan secara langsung dan udara akan berdifusi dengan *droplet*. Gambar atomisasi bahan bakar cair setelah keluar mulut nosel ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



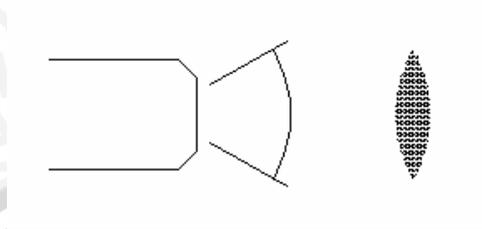
Gambar 2.13 : Atomisasi pada nosel

Sumber : *Fuel nozzle for oil burner*

2.9 Macam-macam pola semprot / *spray pattern* :

a. *Flat spray*

Pada pola penyemprotan ini *droplet* keluar dari nosel terdistribusi dalam bentuk seperti lembaran yang penampangnya berupa elips / oval.

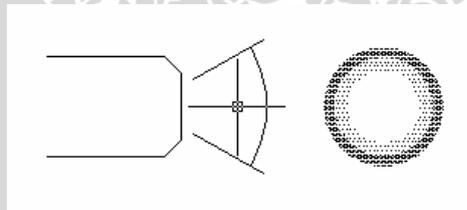


Gambar 2.14 : *Flat spray*.

Sumber : [Http://www.Delavan.co.uk/pdfs/zNozzleTechnology.pdf](http://www.Delavan.co.uk/pdfs/zNozzleTechnology.pdf).

b. *Hollow cone spray*

Pola semprotan dengan *droplet* terdistribusi dalam bentuk kerucut dan *droplet* terkonsentrasi pada sisi luar sedangkan pada sisi tengah hanya sedikit atau bahkan tidak ada sama sekali.

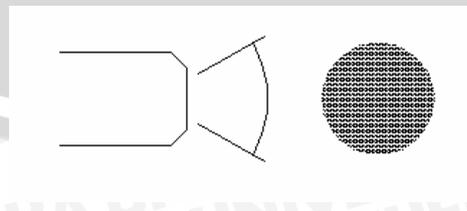


Gambar 2.15: *Hollow cone spray*.

Sumber : [Http://www.Delavan.co.uk/pdfs/zNozzleTechnology.pdf](http://www.Delavan.co.uk/pdfs/zNozzleTechnology.pdf).

c. *Solid cone spray*.

Pola semprotan dengan *droplet* terdistribusi dalam bentuk kerucut dan *droplet* terdistribusi secara merata pada seluruh luasan sudut semprot.



Gambar 2.16 : *Solid cone spray*.

Sumber : [Http://www.Delavan.co.uk/pdfs/zNozzleTechnology.pdf](http://www.Delavan.co.uk/pdfs/zNozzleTechnology.pdf).

2.10 Hipotesa

Dari uraian diatas dapat diambil suatu hipotesis bahwa semakin kecil ukuran diameter *throat* pada nosel konvergen-divergen maka kecepatan aliran bahan bakar yang keluar dari nosel akan lebih cepat bila dibandingkan dengan nosel konvergen-divergen yang memiliki diameter *throat* yang lebih besar untuk debit bahan bakar yang sama. Sehingga akan memiliki bentuk nyala api yang lebih sempit dibandingkan dengan nosel yang memiliki diameter *throat* yang lebih besar. Dengan bertambahnya debit bahan bakar maka bentuk nyala api akan semakin tinggi dan api akan lebih menjauhi mulut nosel. Dengan diameter *throat* yang semakin kecil pola aliran bahan bakar akan semakin menyempit dan lebih halus sedangkan pada diameter *throat* yang lebih besar pola aliran bahan bakar akan melebar dan lebih banyak terjadi olakan.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

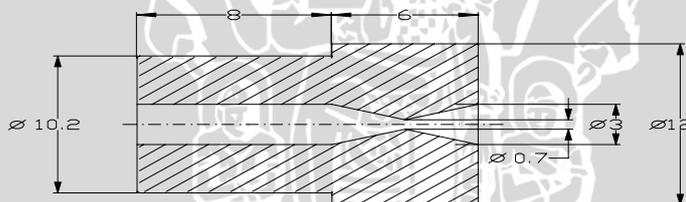
Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian eksperimental sungguhan (*true experimental research*). Pada penelitian ini dilakukan pengamatan secara langsung untuk mengetahui hubungan atau pengaruh dari sebab akibat suatu perlakuan tertentu. Obyek yang akan diamati pada penelitian ini pengaruh diameter *throat* pada nosel konvergen–divergen terhadap pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api pada proses pembakaran difusi minyak tanah.

3.2 Variabel yang Diukur

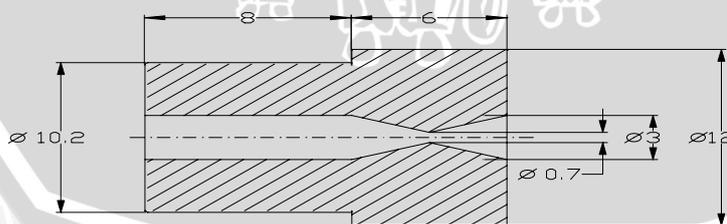
Pada penelitian ini ada dua variabel yang akan diukur yaitu :

1. Variabel bebas

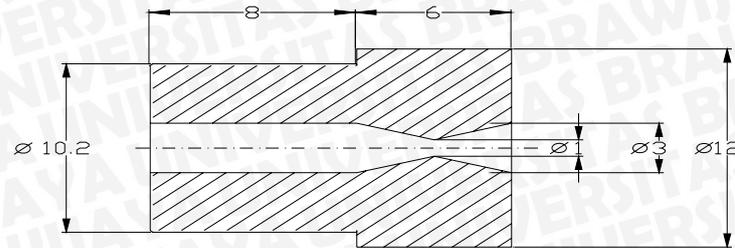
Variabel bebas adalah variabel yang tidak dipengaruhi oleh variabel lain. Besarnya variabel bebas bisa diubah-ubah atau konstan, sehingga didapat hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat. Pada penelitian ini variabel bebasnya ukuran diameter *throat* nosel konvergen divergen adalah sebesar 0.5 mm, 0.7mm dan 1mm



Gambar 3.1 : Nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.5 mm.



Gambar 3.2 : Nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.7 mm.



Gambar 3.3 : Nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 1 mm.

2. Variabel terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah dilakukan penelitian. Pada penelitian ini variabel terikatnya adalah pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api.

3. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang ditentukan sebelum penelitian. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah debit bahan bakar dan debit udara yang digunakan dalam proses pembakaran.

3.3 Alat-alat Penelitian

1. Tangki bahan bakar

Tangki bahan bakar ini digunakan untuk menampung bahan bakar. Tangki ini akan dihubungkan dengan kompresor untuk menjaga agar tekanan dalam tangki konstan. Sewaktu bahan bakar mengalir menuju nosel kapasitas tangki 2 liter.

2. Manometer

Manometer digunakan untuk mengetahui kecepatan udara dari blower.

Manometer yang digunakan memiliki spesifikasi :

- a. Bahan : selang plastis elastis
- b. Diameter : 5 mm
- c. Fluida Pengisi : minyak tanah
- d. Massa jenis fluida pengisi : 835 Kg/m^3

3. Nosel

Nosel digunakan untuk menyemburkan bahan bakar yang keluar dari tangki serta mendistribusikan ke dalam udara pembakaran. Nosel ini mempunyai diameter *throat* nosel konvergen divergen adalah sebesar 0.5 mm, 0.7mm dan 1mm

4. *Blower*

Penggunaan *blower* disini adalah untuk menyuplai udara ke ruang bakar agar berdifusi dengan bahan bakar. *Blower* yang digunakan adalah bertipe aksial dengan spesifikasi :

Ukuran	: 2"
Phase	: 1
Volt	: 220 V
Putaran Motor	: 3000-3500 Rpm
Arus	: 1 A
Model	: <i>electric blower</i>

5. Orifis

Peralatan ini digunakan untuk mengetahui beda tekanan yang mengalir melewati orifis dari blower sebelum masuk kenosel. Orifis yang digunakan memiliki spesifikasi :

- Bahan : plat aluminium 0.1 mm
- Diameter orifis udara : 2 mm
- Diameter orifis bahan bakar : 1.5 mm

6. Selang bahan bakar

Selang bahan bakar digunakan untuk mengalirkan bahan bakar yang berupa pipa tembaga dengan spesifikasi :

- Bahan : tembaga
- Diameter : 0.3 mm

7. Pipa Udara

Berfungsi sebagai saluran udara pembakaran yang dihasilkan *blower*. Pipa udara yang digunakan berdiameter 2 inchi.

8. *Handycam*

Handycam digunakan untuk merekam pola aliran dan bentuk nyala api.

Merk	: Sony
Buatan	: Jepang
Digital zoom	: 120 x

9. Pemanas bahan bakar

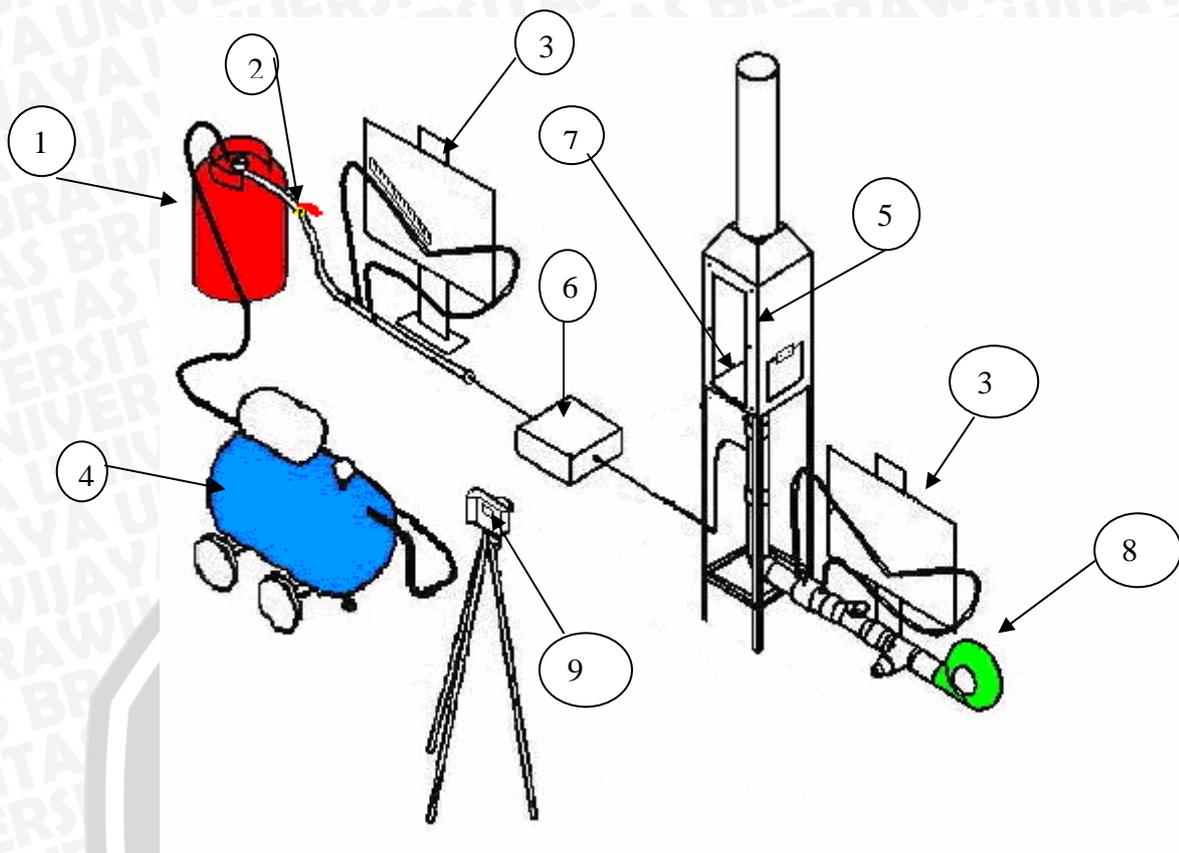
Pemanas bahan bakar digunakan untuk memanaskan bahan bakar sebelum melalui nosel sehingga bahan bakar bisa mengabut.

3.4 Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fluida Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya pada bulan Mei 2007



3.5 Instalasi Alat Penelitian



Gambar 3.4 Instalasi penelitian

Keterangan :

1. Tabung bahan bakar
2. Katup bahan bakar
3. Manometer
4. Kompresor
5. Ruang bakar
6. Pamanas bahan bakar
7. Nosel
8. Blower
9. *Handycam*

3.6 Prosedur pengambilan data pola aliran dan bentuk nyala api

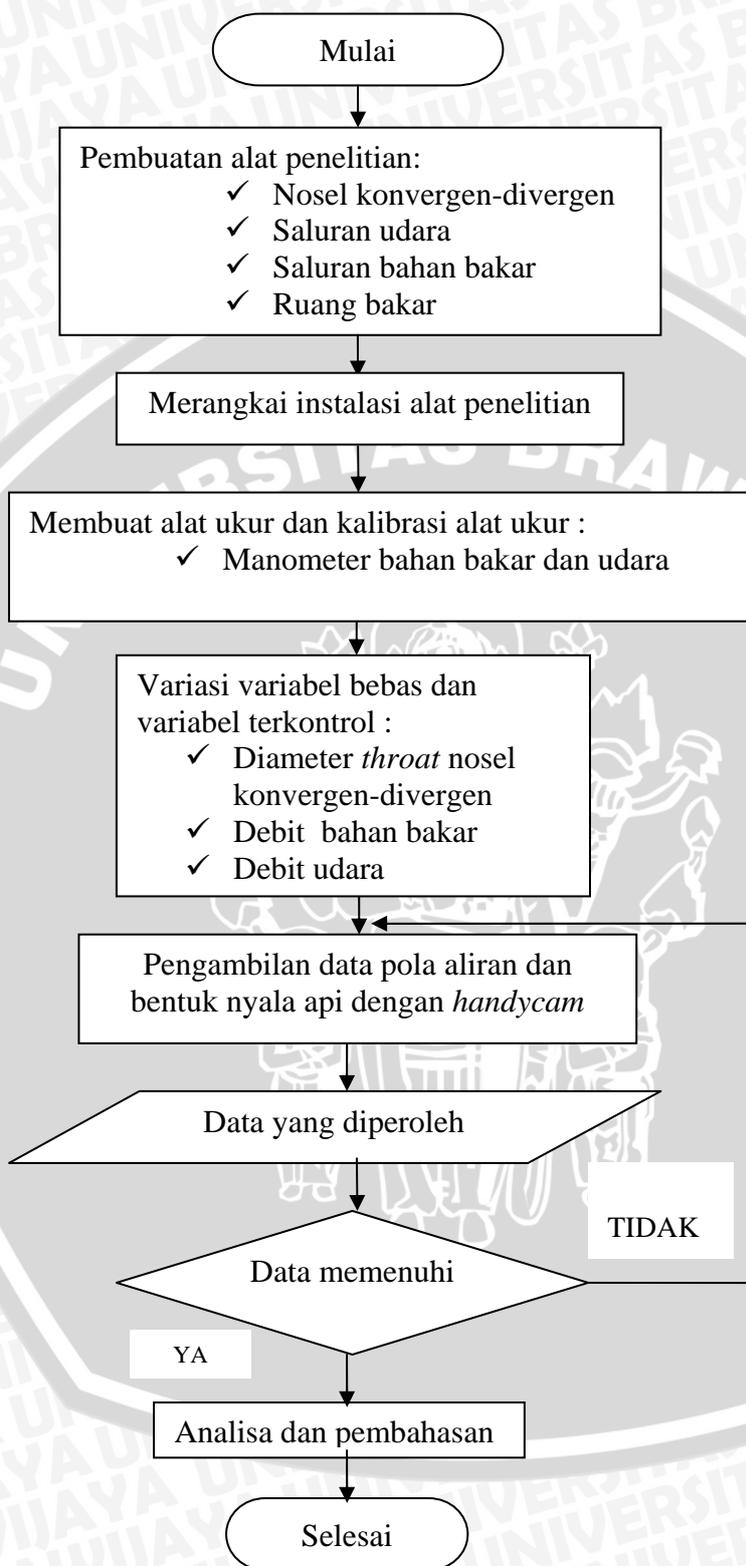
Untuk mendapatkan data tentang pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api, maka dilakukan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan peralatan yang diperlukan dalam penelitian dan menyusun dalam instalasi seperti pada gambar 3.4 diatas.
2. Memasang nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* ke ujung saluran bahan bakar dalam ruang bakar.
3. Mengatur bukaan penutup *blower* pada debit $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
4. Mengatur bukaan katup bahan bakar pada debit $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
5. Melakukan pemanasan awal bahan bakar pada saluran bahan bakar agar bahan bakar yang keluar dari nosel mencapai temperatur 160°C .
6. Menyalakan api pada kondisi bahan yang keluar nosel mencapai temperatur 160°C
7. Mengamati pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api dengan melakukan perekaman atau pemotretan dengan menggunakan *Handycam*.
8. Mengulangi langkah no 4 sampai no 7 untuk variasi debit bahan bakar $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $3.660 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $4.230 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
9. Mengulangi langkah no 3 sampai no 9 untuk variasi debit udara $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ dan $1.742 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
10. Mengulangi langkah no 2 sampai no 9 untuk nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.7 mm dan 1 mm.

3.7 Rancangan pengolahan data pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api

1. Menganalisa data gambar foto pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api

3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.5 Diagram alir penelitian

BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Data yang diperoleh dalam penelitian ini berupa visualisasi pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api yang pengambilan datanya menggunakan *handycam*. *Handycam* diletakkan pada depan ruang bakar dan diambil pada posisi yang aman untuk mengambil data bentuk nyala api dan pola aliran bahan bakar. Data tersebut diperoleh dengan memvariasikan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.5 mm, 0.7 mm dan 0.1 mm sebagai variabel bebas serta debit bahan bakar dan debit udara sebagai variabel terkontrol.

Data visualisasi pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api diambil pada pembakaran dengan variasi diameter *throat* nosel konvergen divergen yang digunakan untuk nosel bahan bakar. Diameter *throat* nosel divariasi sebesar 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm. Untuk setiap nosel debit bahan bakar divariasi sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $3.660 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan $4.230 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, debit udara divariasi sebesar $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ dan $1.724 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

4.2 Perhitungan Data

4.2.1 Perhitungan nilai konstanta kalibrasi manometer bahan bakar

Debit bahan bakar diukur dengan menggunakan orifis dan manometer V. Untuk menghitung debit dari bahan bakar maka perlu mencari perhitungan konstanta kalibrasi (C_b). " C_b " merupakan perbandingan antara debit bahan bakar yang mengalir aktual ($Q_{bb\text{aktual}}$) dengan debit bahan bakar ideal yang diperoleh berdasarkan perbedaan tekanan pada manometer. Debit bahan bakar ideal dihitung dengan data yang diketahui sebagai berikut :

Massa jenis minyak tanah (ρ_{bb})	= 835 kg/m^3
Massa jenis air manometer (ρ_m)	= 1000 kg/m^3
Diameter saluran bahan bakar (d_1)	= $7 \text{ mm} = 0.007 \text{ m}$
Diameter dalam orifis (d_2)	= $3.2 \text{ mm} = 0.0032 \text{ m}$
Beda ketinggian yang ditunjukkan manometer (Δh)	= $2 \text{ mm} = 0.002 \text{ m}$
Percepatan gravitasi (g)	= 9.81 m/s^2



Perhitungan :

- Rasio diameter orifis dengan saluran bahan bakar :

$$\beta = d_2/d_1 = 3.2/7 = 0.457$$

- Kecepatan aliran bahan bakar ideal pada orifis

$$\begin{aligned} V_{bb2} &= \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \Delta h)}{(\rho_{bb} \cdot (1 - \beta^4))}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot (1000 \cdot 9.81 \cdot 0.002)}{(835 \cdot (1 - 0.457^4))}} \\ &= 0.222 \text{ m/s} = 222 \text{ mm/s} \end{aligned}$$

- Kecepatan aliran bahan bakar ideal pada saluran

$$\begin{aligned} V_{bb1} &= \beta^2 \cdot V_{bb2} \\ &= 0.457^2 \cdot 222 \text{ mm/s} \\ &= 46.364 \text{ mm/s} \end{aligned}$$

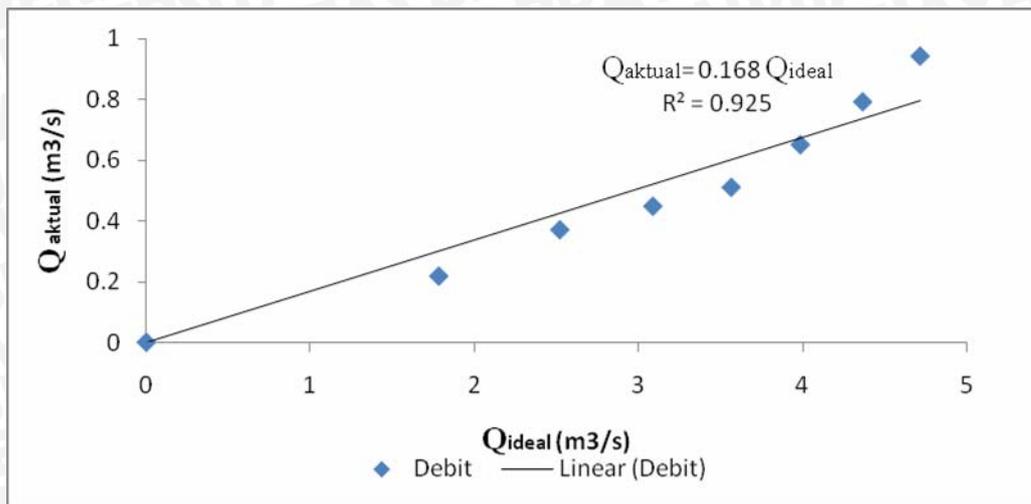
- Luas penampang saluran udara

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_1^2 \\ &= \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0.007^2 \\ &= 3.85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 38.5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Debit bahan bakar ideal

$$\begin{aligned} Q_{bbideal} &= V_{bb1} \cdot A \\ &= 46.364 \cdot 38.5 = 1785.032 \text{ mm}^3/\text{s} = 1.78032 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$Q_{bbaktual}$ diukur dengan menampung banyaknya volume yang mengalir tiap satuan waktu. Pengukuran debit bahan bakar secara aktual ini dilakukan pada saat kalibrasi manometer bahan bakar. Q_{aktual} pada Δh sebesar 2 mm = 0.22 ml/s. Debit bahan bakar ideal dan debit bahan bakar aktual yang diperoleh selama kalibrasi dapat dilihat pada lampiran 1 (Data debit bahan bakar aktual ($Q_{bbaktual}$) dan debit bahan bakar ideal ($Q_{bbideal}$)). Nilai tersebut kemudian dibuat grafik, dengan debit bahan bakar ideal sebagai absis dan debit bahan bakar aktual sebagai ordinat. Dari grafik dicari gradiennya, gradien tersebut merupakan nilai dari konstanta kalibrasi (C_b). Grafik dibawah ini merupakan hubungan antara debit bahan bakar ideal dan aktual. Dari Grafik didapatkan nilai konstanta kalibrasi (C_b) sebesar 0.168.



Gambar 4.1 Grafik hubungan antara debit bahan bakar ideal dan debit bahan bakar aktual.

4.2.2 Perhitungan nilai konstanta kalibrasi manometer udara

Debit udara diukur menggunakan orifis dan manometer miring. Untuk menghitung debit udara maka perlu mencari konstanta kalibrasi (C_u). C_u adalah perbandingan antara debit udara aktual ($Q_{udaktual}$) dengan debit udara ideal ($Q_{udideal}$). Debit udara ideal dihitung dengan data yang diketahui sebagai berikut :

Massa jenis udara (ρ_{ud})	= 1.29 kg/m ³
Diameter saluran udara (d_1)	= 0.027 m
Diameter orifis (d_2)	= 0.012 m
Beda ketinggian manometer pada manometer orifis (Δh)	= 0.005 m

Contoh perhitungan :

- Rasio diameter orifis dengan saluran bahan bakar :
 $\beta = d_2/d_1 = 0.012/0.0277 = 0.44$
- Kecepatan aliran udara ideal pada manometer orifis (V_{ud2})

$$\begin{aligned}
 V_{ud2} &= \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \Delta h)}{(\rho_{ud} \cdot (1 - \beta^4))}} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \cdot (835 \cdot 9.81 \cdot 0.005)}{(1.29 \cdot (1 - 0.44^4))}} \\
 &= 8.122 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

- Kecepatan aliran udara ideal pada saluran (V_{ud1})

$$V_{ud1} = \beta^2 \cdot V_{ud2}$$

$$= 0.44^2 \cdot 8.122$$

$$= 1.572 \text{ m/s}$$

- Luas penampang saluran udara

$$A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_1^2$$

$$= \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0.027^2$$

$$= 0.00057 \text{ m}^2$$

- Debit udara ideal (Q_{udideal})

$$Q_{\text{udideal}} = V_{\text{ud1}} \cdot A$$

$$= 1.572 \text{ m/s} \cdot 0.00057 \text{ m}^2$$

$$= 0.000896 \text{ m}^3/\text{s}$$

Debit udara aktual diperoleh dengan mengukur kecepatan menggunakan *pitot tube*. Pengukuran kecepatan udara menggunakan *pitot tube* diukur pada tiga titik, mulai dari tengah saluran sampai ketepi. Dari pengukuran tersebut mula-mula didapatkan data berupa beda ketinggian (Δh) pada manometer *pitot tube*, kemudian data tersebut dikonversikan menjadi kecepatan menggunakan rumus dibawah ini. Dari ketiga kecepatan tersebut kemudian dirata-rata untuk mendapatkan kecepatan rata-rata pada saluran. Dari kecepatan rata-rata ini maka akan didapatkan debit udara.

- Kecepatan udara aktual pada *pitot tube* dapat dihitung dengan persamaan

$$\Delta h_1 = 0.0000508 \text{ m}$$

$$V_{\text{udaktua11}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_{bb} \cdot g \cdot \Delta h_1)}{\rho_{ud}}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot (1000 \cdot 9.81 \cdot 0.0000508)}{1.29}}$$

$$= 0.879 \text{ m/s}$$

Dengan menggunakan persamaan seperti diatas maka didapatkan

$$\Delta h_2 = 0.0000254 \text{ m}$$

$$V_{\text{udaktua2}} = 0.622 \text{ m/s}$$

$$\Delta h_3 = 0.0000127 \text{ m}$$

$$V_{\text{udaktua3}} = 0.439 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{udaktua rata-rata}} = (V_{\text{udaktua11}} + V_{\text{udaktua2}} + V_{\text{udaktua3}}) / 3$$

$$= (0.879 \text{ m/s} + 0.622 \text{ m/s} + 0.439 \text{ m/s})/3$$

$$= 0.647 \text{ m/s}$$

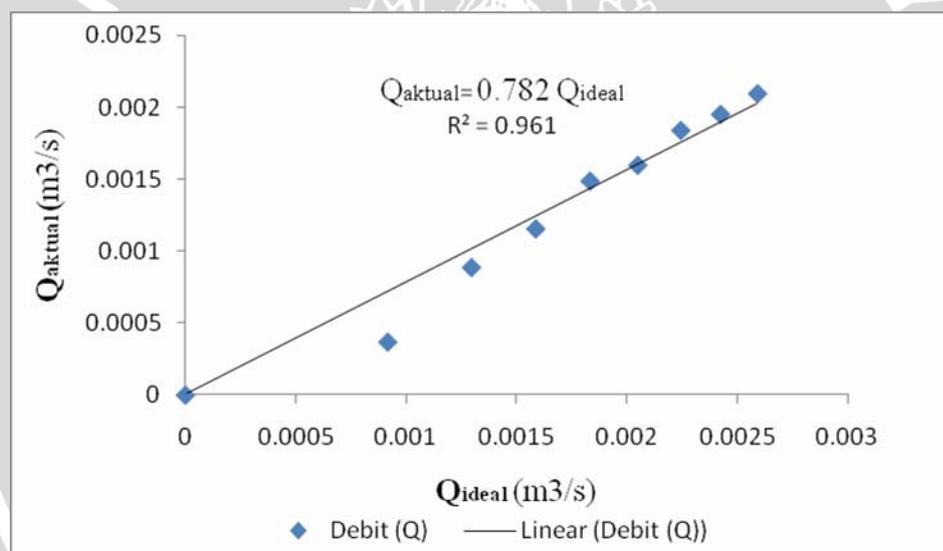
- Debit udara aktual

$$Q_{\text{udaktual}} = V_{\text{udaktual rata-rata}} \cdot A$$

$$= 0.647 \text{ m/s} \cdot 0.00057 \text{ m}^2$$

$$= 0.000383 \text{ m}^3/\text{s}$$

Debit udara aktual dan ideal yang diperoleh selama kalibrasi dapat dilihat pada lampiran 1. Untuk menghitung nilai konstanta kalibrasi (C_u) dibuat grafik hubungan linear antara nilai debit udara ideal dan aktual. Dari grafik tersebut didapatkan nilai gradien yang menyatakan nilai konstanta kalibrasi (C_u). Grafik hubungan debit udara ideal dan aktual dapat dilihat pada gambar dibawah ini. Dari grafik didapatkan nilai konstanta kalibrasi manometer saluran udara (C_u) sebesar 0.782.



Gambar 4.2 : Grafik hubungan antara debit udara ideal dan debit udara aktual.

4.2.3 Perhitungan debit bahan bakar

Debit bahan bakar diukur dengan menggunakan orifis dan manometer V. Data yang diketahui untuk perhitungan debit bahan bakar dapat dilihat pada bagian 4.21 :

Perhitungan :

- Rasio diameter orifis dan diameter saluran :

$$\beta = d_2/d_1 = 3.2/7 = 0.457$$

- Debit bahan bakar dalam saluran bahan bakar

$$\begin{aligned}
 Q_{sbb} &= C \cdot \beta^2 \cdot V \cdot A \\
 &= C \cdot \beta^2 \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \Delta h)}{(\rho_{bb} \cdot (1 - \beta^4))}} \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi d_1^2 \\
 &= 0.168 \cdot 0.457^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1000 \cdot 9,81 \cdot 0.001)}{(835 \cdot (1 - 0.457^4))}} \cdot \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 0.007^2 \\
 &= 2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

4.2.4 Perhitungan Debit Udara

Massa jenis udara (ρ_{ud})	= 1.29 kg/m ³
Diameter saluran udara (d_1)	= 0.027 m
Diameter orifis (d_2)	= 0.012 m
Beda ketinggian manometer pada manometer orifis (Δh)	= 0.005 m
Beda ketinggian manometer pada <i>pitot tube</i> (Δh)	= 0.000203 m

Contoh perhitungan :

- Rasio diameter orifis dengan saluran bahan bakar :

$$\beta = d_2/d_1 = 0.012/0.0277 = 0.44$$

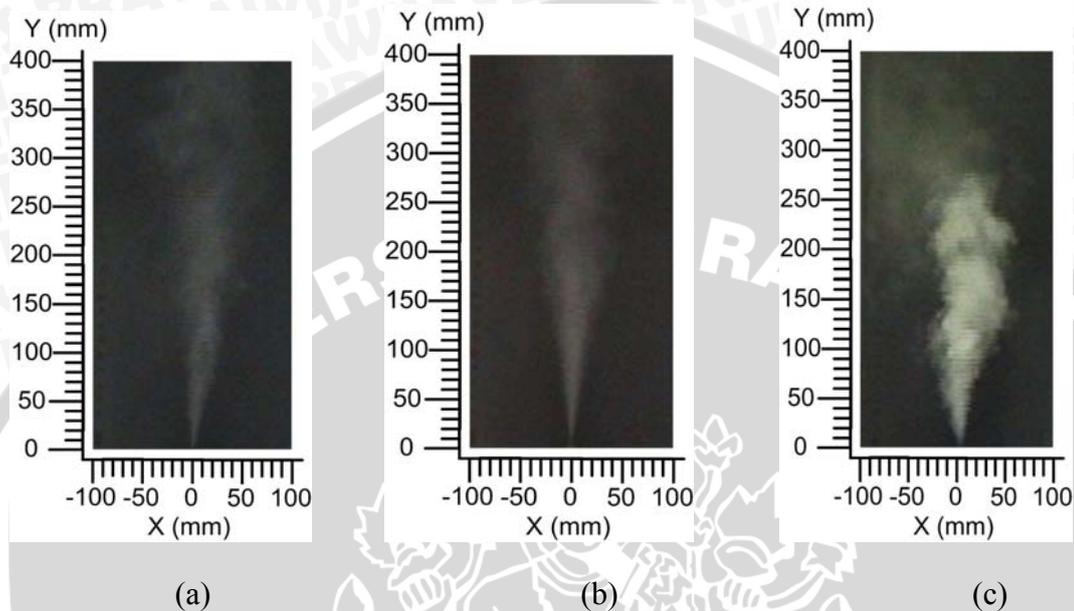
- Debit udara dalam saluran udara

$$\begin{aligned}
 Q_{sud} &= C \cdot \beta^2 \cdot V \cdot A \\
 &= C \cdot \beta^2 \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \Delta h)}{(\rho_{bb} \cdot (1 - \beta^4))}} \cdot \frac{1}{4} \pi d_1^2 \\
 &= 0.782 \cdot 0.44^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (835 \cdot 9.81 \cdot 0.006)}{(1.29 \cdot (1 - 0.44^4))}} \cdot \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 0.027^2 \\
 &= 7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

4.3 Data Visualisasi Pola Aliran Bahan Bakar dan Bentuk Nyala Api

4.3.1 Data visualisasi pola aliran bahan bakar

4.3.1.1 Visualisasi pola aliran bahan bakar dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ untuk jenis nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm.



Gambar 4.3 : Visualisasi pola aliran bahan bakar dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm

Pada gambar visualisasi diatas memperlihatkan untuk nosel 0.5 mm (gambar 4.3a) mempunyai pola aliran bahan bakar yang lebih tipis dan panjang hal ini dikarenakan dengan debit bahan bakar yang sama, nosel dengan diameter *throat* yang kecil yaitu 0.5 menghasilkan kecepatan aliran bahan bakar keluar nosel lebih cepat dan *droplet* yang terbentuk juga akan lebih kecil. Karena *droplet* yang terbentuk kecil-kecil maka menyebabkan bahan bakar akan bergerak keatas lebih cepat (pergerakannya cepat).

Nosel 0.7 mm (gambar 4.3b) memperlihatkan bahwa aliran bahan bakar terlihat lebih bagus karena perbandingan campuran komposisi debit bahan bakar dan debit udara tercampur lebih seimbang dan menghasilkan aliran bahan bakar yang diperlihatkan pada gambar visualisasi diatas.

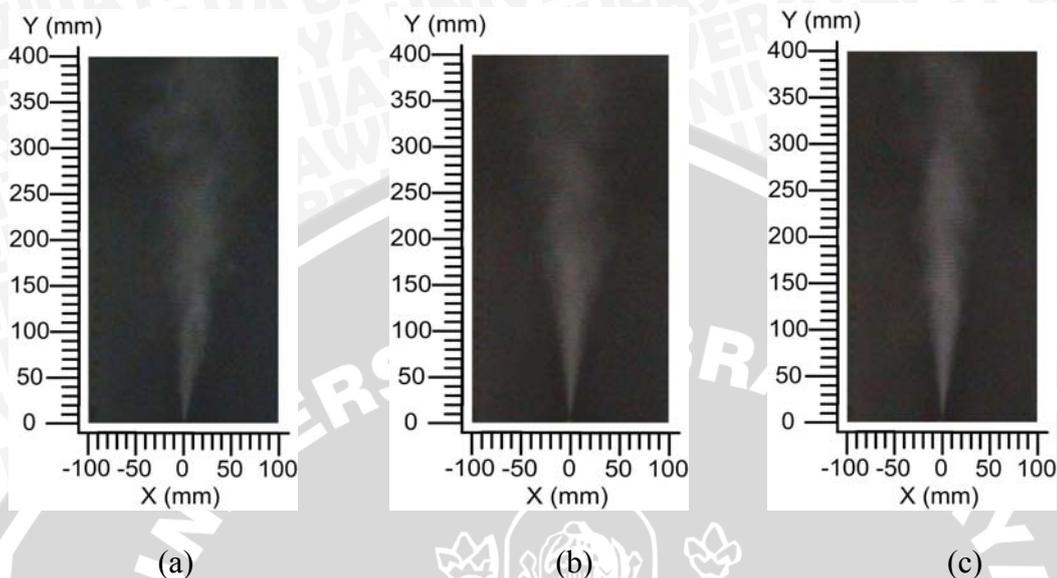
Nosel 1 mm (gambar 4.3c) memperlihatkan aliran udara bahan bakar yang terlihat sangat pekat serta lebih lebar dan terdapat banyak olakan dibandingkan antara

kedua nosel diatas sebagai pembandingnya (nosel 0.5 mm dan nosel 1mm) hal ini dikarenakan karena semakin besar diameter *throat* yang dipakai maka bahan bakar yang keluar juga akan semakin banyak. Nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 1 mm mempunyai diameter *throat* yang besar dan menghasilkan kecepatan bahan bakar lebih lambat dari kedua nosel sebelumnya yang ukuran diameter *throat*nya lebih kecil dan *droplet* yang terbentuk lebih besar mengakibatkan pola aliran lebih pendek tapi melebar dan mempunyai kepekatan yang sangat tinggi.

Secara keseluruhan dari perbandingan antar ketiga nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm pada debit bahan bakar sama yaitu sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara yang sama juga sebesar $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ terdapat kecenderungan perbedaan aliran bahan bakar yang cukup signifikan dikarenakan juga terdapat perbedaan luasan dari diameter *throat*. Ukuran diameter *throat* sangat mempengaruhi pola aliran yang terbentuk. Dengan ukuran luasan diameter *throat* berbeda, *droplet* yang keluar akan terdapat perbedaan seiring dengan nosel yang dipakai. *Droplet* yang lebih kecil dihasilkan oleh diameter *throat* yang kecil pula begitu juga sebaliknya. *Droplet* yang kecil akan menghambat udara masuk kesela-sela aliran bahan bakar sehingga kecenderungan aliran akan tipis dan memanjang serta sempit karena luasan diameter *throat* lebih kecil namun sebaliknya dengan diameter *throat* yang besar makan kecenderungan pola aliran akan tebal, banyak olakan dan pendek.

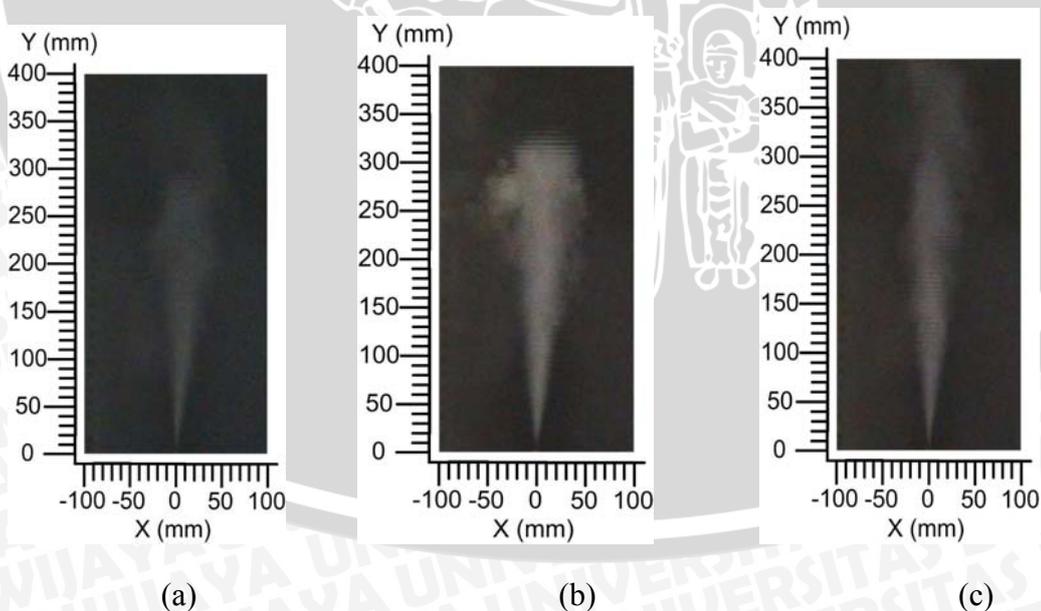


4.3.1.2 Visualisasi pola aliran bahan bakar dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara untuk jenis nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm.



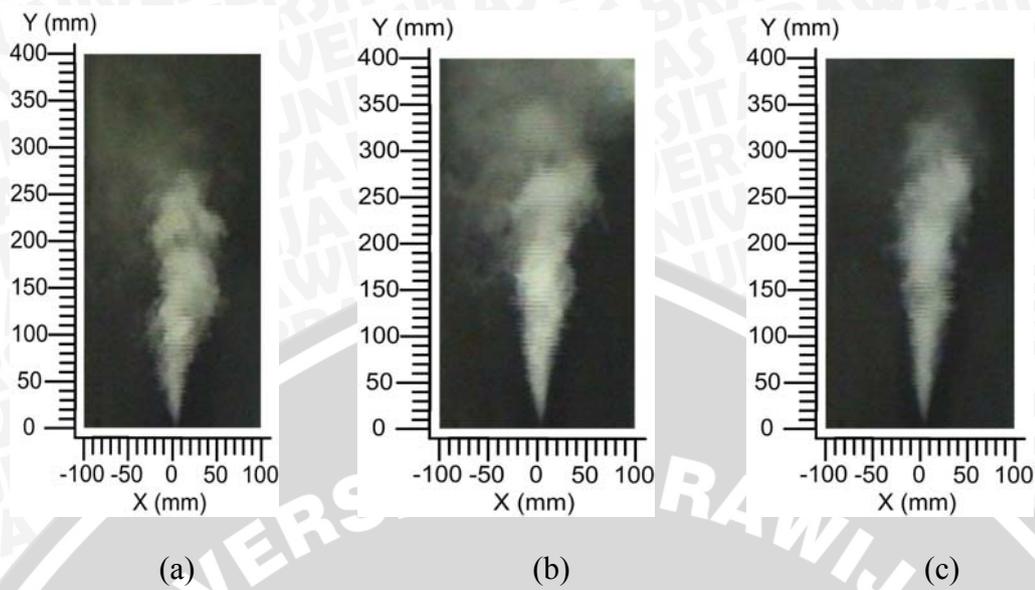
Gambar 4.4 : Visualisasi pola aliran bahan bakar pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.5 mm

(a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$



Gambar 4.5 : Visualisasi pola aliran bahan bakar pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.7 mm

(a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$



Gambar 4.6 : Visualisasi pola aliran bahan bakar pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 1 mm

(a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

Data gambar visualisasi 4.4, gambar 4.5 dan gambar 4.6 merupakan perbandingan antar nosel dengan debit bahan bakar yang sama sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara sebesar $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

Pada gambar visualisasi perbandingan antar nosel konvergen-divergen diameter *throat* 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm ini terdapat banyak perbedaan yang langsung dapat diketahui dari gambar diatas dimana perbedaan itu sangat mencolok jika dilihat dari lebar pola aliran bahan bakar, ketinggian pola aliran bahan bakar dan kepekatan pola aliran bahan bakar yang keluar dari nosel.

Nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.5 mm (gambar 4.4) memiliki bentuk pola aliran bahan bakar yang cenderung tipis, ketinggian dari pola aliran nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.5 mm lebih panjang namun untuk lebar pola alirannya sangat sempit, hal ini disebabkan untuk diameter *throat* 0.5 mm menghasilkan kecepatan aliran bahan bakar keluar nosel lebih cepat. Proses atomisasi pada nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.5 mm ini terjadi

dengan baik. *Droplet* yang dihasilkan berukuran kecil sehingga *droplet* bahan bakar akan lebih mudah untuk menguap dan akan memudahkan untuk berdifusi dengan udara.

Pada gambar 4.5 memperlihatkan visualisasi nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.7 mm. Pada data diatas menunjukkan bahwa pola aliran bahan bakar yang keluar dari nosel konvergen-divergen 0.7 mm ini memiliki bentuk pola aliran bahan bakar yang cenderung lebih bagus dan merata, mempunyai lebar pola aliran yang sedikit lebih lebar dari nosel konvergen-divergen 0.5 mm dan ketinggian dari pola aliran nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.7 mm hampir sama namun selisih dari ketinggian sedikit lebih pendek dari nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.5 mm namun untuk lebar pola alirannya lebih lebar dari nosel diameter 0.5 mm. Kecenderungan bahwa pola aliran bahan bakar pada nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.7 mm lebih merata karena pencampuran bahan bakar dan udara lebih sesuai pada debit bahan bakar dan debit udara yang sama.

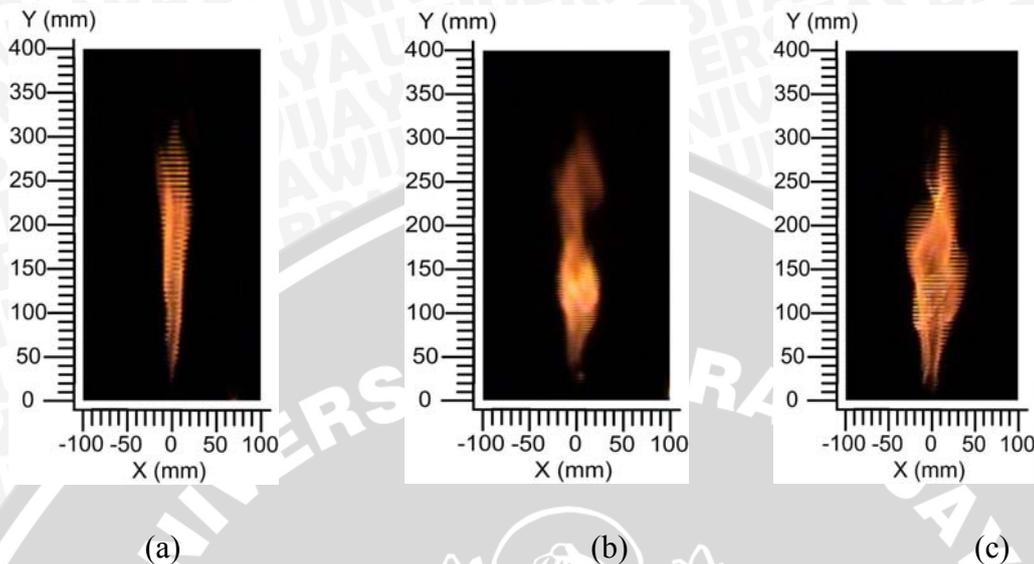
Gambar visualisasi nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 1mm ditunjukkan pada gambar 4.6. Pola aliran bahan bakar yang dihasilkan nosel dengan diameter 1 mm memiliki pola aliran bahan bakar yang lebar dan sangat pekat. Kecenderungan ini disebabkan karena diameter *throat* yang besar mempunyai *droplet* yang besar dan kecepatan bahan bakar yang lebih lambat dari pada kedua nosel pembanding.

Dari uraian mengenai gambar 4.4, gambar 4.5 dan gambar 4.6 dapat dijelaskan bahwa pola aliran bahan bakar juga mempengaruhi bentuk nyala api, dengan semakin tinggi kecepatan bahan bakar maka reaksi oksidasi yang terjadi antara bahan bakar dan udara tidak akan terjadi dengan sempurna. Semakin besar diameter *throat* nosel konvergen-divergen, bila debit bahan bakar dan debit udara diperbesar atau ditambah, maka akan mempengaruhi pola aliran yang terjadi. Pada nosel yang lebih besar penambahan debit bahan bakar dan debit udara akan menyebabkan terjadi banyak olakan karena *droplet* menjadi sangat besar.

4.3.2 Data Visualisasi Bentuk Nyala Api

Visualisasi api digunakan untuk mengetahui karakter api pada berbagai kondisi, sehingga dapat diketahui fenomena yang terjadi pada api difusi. Disamping itu analisis yang dilakukan terhadap karakteristik api menjadi lebih mudah

4.3.2.1 Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar untuk jenis nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm.



Gambar 4.7 : Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm

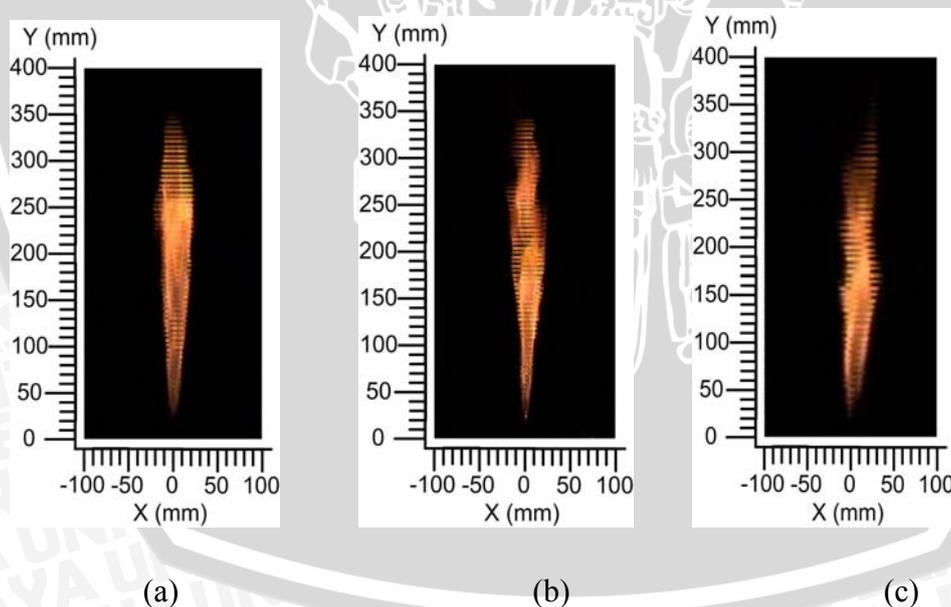
Pada gambar 4.7 diatas menunjukkan bahwa terdapat kecenderungan bahwa semakin besar diameter *throat* nosel konvergen maka akan terlihat bentuk nyala api yang semakin melebar dan ada penurunan ketinggian bentuk nyala api. Selain dari ukuran bentuk nyala api perbedaan juga dapat dilihat dari *lift off*.

Dilihat dari bentuk ukurannya terlihat bahwa pada nosel konvergen-divergen diameter *throat* 0.5 mm (gambar 4.7a) mempunyai bentuk nyala api yang panjang dan sempit. Sedangkan dengan memperhatikan gambar visualisasi api pada nosel konvergen-divergen diameter *throat* 1 mm (gambar 4.7c) maka akan terlihat bahwa bentuk nyala api yang terjadi adalah pendek dan lebar. Pada nosel konvergen-divergen diameter 0.7 mm (gambar 4.7b) memperlihatkan bahwa bentuk nyala api terlihat lebih bagus daripada kedua nosel pembandingan karena reaksi oksidasi yang terjadi lebih sempurna karena pencampuran bahan bakar dan udara lebih merata sehingga bentuk nyala api yang terlihat lebih bagus namun lebih pendek daripada nosel dengan diameter *throat* kecil.

Perbedaan lain yang dapat dilihat pada gambar 4.7 diatas adalah memperlihatkan

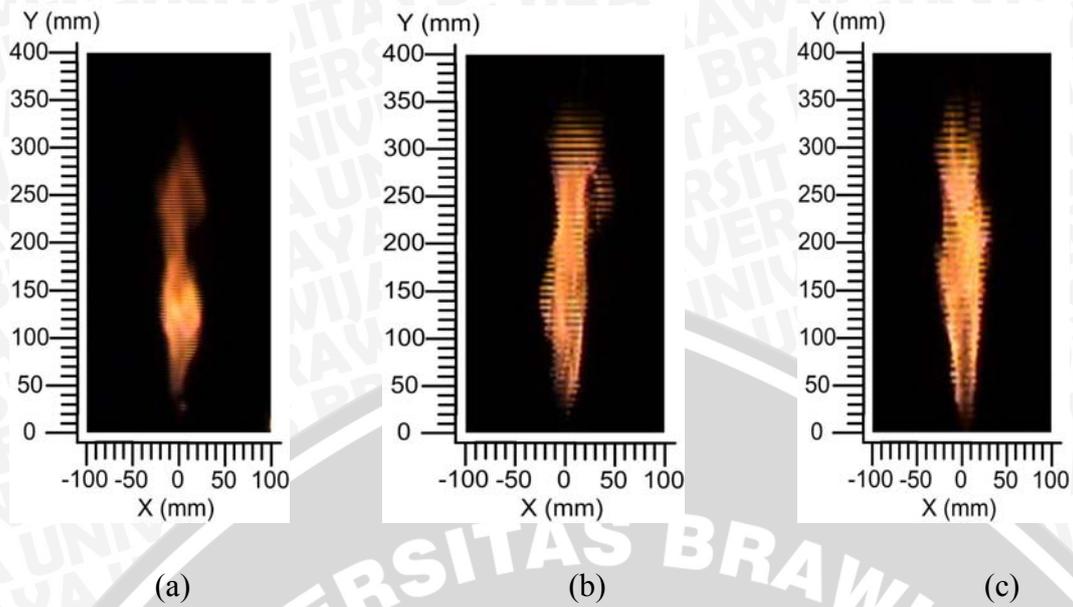
adanya *lift off*. Dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ yang nampak jelas mempengaruhi *lift off* adalah diameter *throat* dari nosel konvergen-divergen. Dari gambar 4.7 dapat dilihat bahwa ada diameter *throat* yang kecil yaitu 0.5 mm mempunyai *lift off* yang panjang dengan jarak dari sisi keluar nosel sebesar 30 mm. Penyebab dari panjangnya *lift off* dari nosel konvergen-divergen diameter *throat* 0.5 mm dikarenakan kecepatan aliran bahan bakar yang keluar dari nosel lebih cepat dan dengan diameter *throat* yang kecil bentuk nyala api akan terlihat lebih sempit. Alasan lain dari terjadinya fenomena *lift off* pada nosel konvergen-divergen 0.5 mm dengan jarak yang panjang disebabkan adanya proses oksidasi. Proses oksidasi antara bahan bakar dan udara tidak dapat terjadi pada sisi keluar nosel, reaksi oksidasi ini dapat terjadi saat kecepatan aliran bahan bakar tidak terlalu tinggi, dimana reaksi ini terjadi pada jarak 30mm dari sisi keluar nosel. Hal inilah yang menyebabkan nyala api pada debit bahan bakar yang lebih banyak mengalami *lift off* yang lebih tinggi daripada debit bahan bakar yang rendah.

4.3.2.2 Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara untuk jenis nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm.



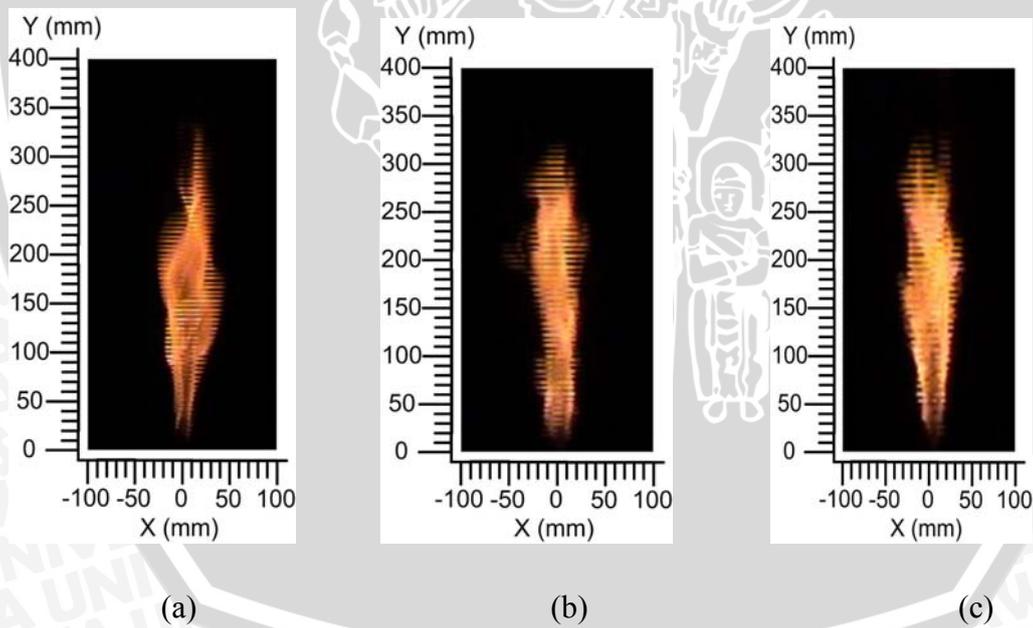
Gambar 4.8 : Visualisasi api pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.5 mm

(a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$



Gambar 4.9 : Visualisasi bentuk nyala api pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.7 mm

(a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$



Gambar 4.10 : Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 1 mm

(a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

Gambar 4.8, gambar 4.9 dan gambar 4.10 merupakan perbandingan antara nosel konvergen-divergen pada diameter *throat* 0.5 mm, 0.7 mm dan 1 mm dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dengan variasi debit udara sebesar $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ dan $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Dari gambar diatas sangat jelas terlihat bahwa nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* yang kecil yaitu 0.5 mm (gambar 4.8) mempunyai bentuk yang lebih sempit dan *lift off* yang panjang. Hal ini disebabkan karena pola aliran bahan bakar saat keluar nosel yang terjadi lebih tinggi, tetapi mempunyai lebar yang lebih sempit. Dengan kecepatan yang tinggi untuk nosel dengan diameter *throat* yang lebih kecil pada debit bahan bakar yang sama maka *lift off* dari api akan semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena kecepatan aliran bahan bakar didekat mulut nosel sangat tinggi. Karena aliran bahan bakar sangat tinggi ini juga akan menyebabkan pergerakan *droplet* yang semakin cepat maka *droplet* akan mudah bergerak keatas sehingga api akan cenderung lebih tinggi.



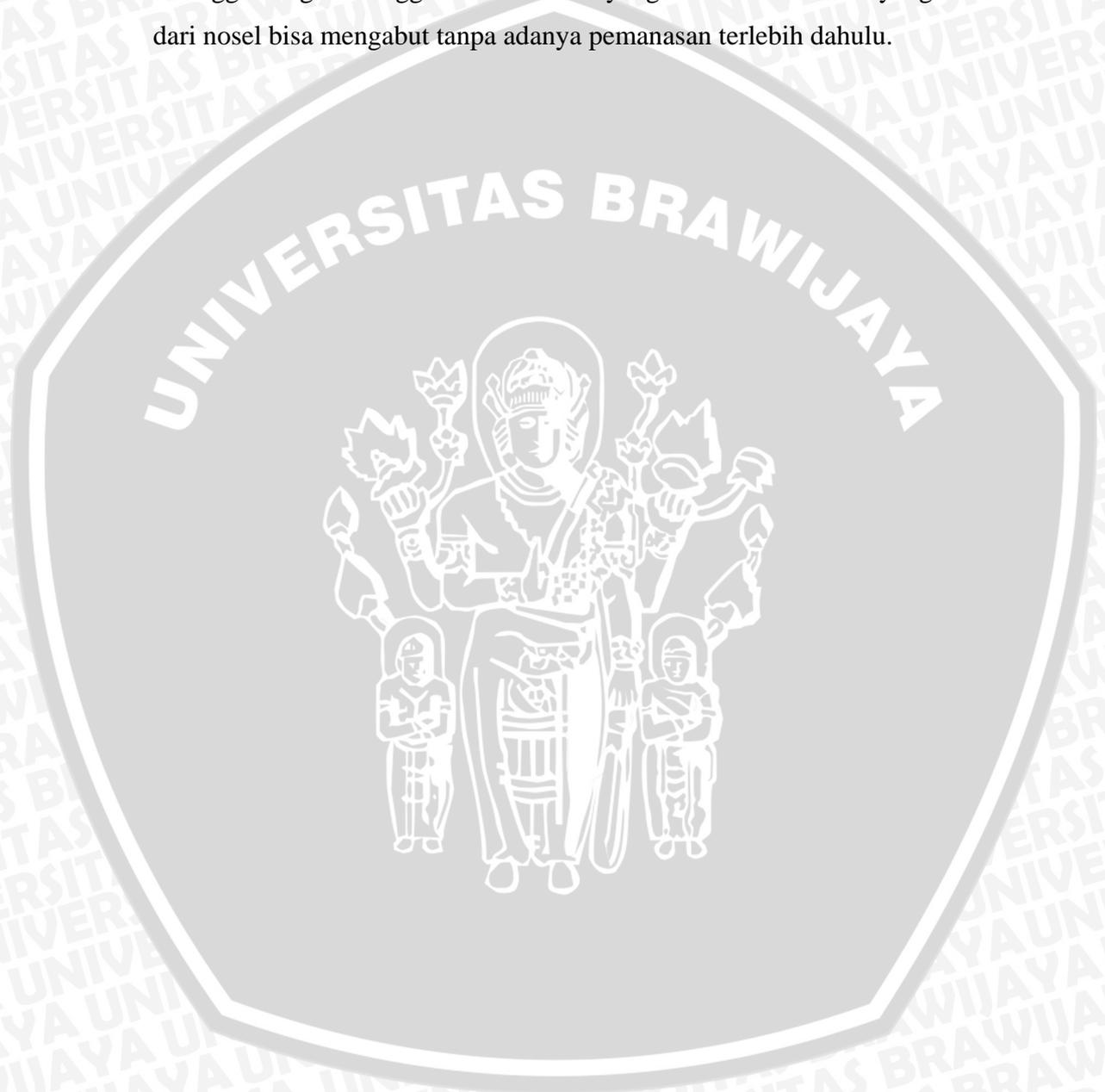
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Dengan ukuran luasan diameter *throat* berbeda, *droplet* yang keluar akan terdapat perbedaan seiring dengan nosel yang dipakai. *Droplet* yang lebih kecil dihasilkan oleh diameter *throat* yang kecil pula begitu juga sebaliknya. *Droplet* yang kecil akan menghambat udara masuk kesela-sela aliran bahan bakar sehingga kecenderungan aliran akan tipis dan memanjang serta sempit karena luasan diameter *throat* lebih kecil namun sebaliknya dengan diameter *throat* yang besar maka kecenderungan pola aliran akan tebal, banyak olakan dan pendek.
2. Nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* yang kecil 0.5 mm dibandingkan dengan diameter *throat* 0.7 mm dan 1 mm akan menghasilkan bentuk nyala api yang tipis serta memanjang dan mempunyai panjang *lift off* yang lebih tinggi.
3. Nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* yang kecil menghasilkan kecepatan bahan bakar yang semakin tinggi dibandingkan dengan nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* yang, lebih besar disebabkan karena adanya perbedaan luasan penampang diameter *throat* antara ketiga nosel.
4. Pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api sangat dipengaruhi oleh keseimbangan reaksi pembakaran dimana dengan diameter *throat* yang kecil akan mempunyai *lift off* yang panjang dari mulut nosel.
5. Pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api juga dipengaruhi oleh proses atomisasi. Proses atomisasi yang baik belum tentu menghasilkan pola aliran bahan bakar dan bentuk nyala api yang baik bila kecepatan reaksi pembakaran tidak seimbang, pada penelitian ini dimana dijelaskan dengan data gambar visualisasi terbukti bahwa keseimbangan reaksi pembakaran lebih dominan bila dibandingkan dengan atomisasi untuk diameter *throat* 0.7 mm memiliki pemerataan campuran bahan bakar dan udara yang lebih baik daripada nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.5 mm dan 1 mm .

5.2 Saran

1. Perlu adanya perbaikan pada alat pemanas dengan menggunakan suatu alat pemanas yang lebih terkontrol sehingga panas yang dihasilkan dari alat tersebut lebih stabil atau konstan.
2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut dengan menggunakan *swirly* nosel sehingga dengan menggunakan tekanan yang besar bahan bakar yang keluar dari nosel bisa mengabut tanpa adanya pemanasan terlebih dahulu.



DAFTAR PUSTAKA

- Borman, G.L., Raylan, K. W, 1998, Combustion Engineering, Ney York, Mc Gray Hill.
- Culp, W. Archie ; 1996 : Prinsip-prinsip Konversi Energi. Erlangga, Jakarta.
- Delgado, jorge, 2002, *A study of Breakup Legth in a two Dimensional Liquid Sheet with Co-flowing Gas*, Pennsylvania State University,
<http://www.forms.gradsach.psu.edu/equity/sroppers/2002/delgadojorge.pdf>.
- El-Wakil. M. M.; 1992: Instalasi Pembangkit Daya. Erlangga, Jakarta.
- Gamayel, A.; 2005 : pengaruh Sudut Kmiringan Nosel Terhadap Karakteristik Aliran Keluar Nosel. Skripsi, Malang : Universitas Brawijaya.
- Kampen, J.V. dkk (2006), *Some Aspects of the Atomization Behavior of Newtonian and of Shear thinning Gelled non-Newtonian Fluids with an Impinging Jet Injector*, German Aerospace Centre.
- Kuo K, 1986, *Principles of Combustion*, New York : Jonh Wiley & Sons, Inc.
- Olson, E. O, 2004, *Fuels Nozzles for Oil Burners*, South Carolina, Delavan Coltec Industries,
Http://www.Delavan.co.uk/pdfs/Fuel_Nozzles_For_Burners.pdf.
- Prasaad, Raam, Dr. 2000. *Petroleum Refining Technology*. India. Khanna Publishers.
- Peters, N, 1995, *Four Lectures on Laminer and Turbulent combustion*, Ercoftac Summer School, Aachen, Germany.
- Tratama, T.; 2005 : Pengaruh Variasi Bentuk Nosel Terhadap Karakteristik Aliran Keluar Nosel. Skripsi, Malang : Universitas Brawijaya.
- Turns, Stephen R., 1996, *An Introduction to Combustion*, New York : Mc Graw Hill, Inc.
- Wahyudi, S.; 2006, Diktat Kuliah Bahan Bakar dan Teknik Pembakaran, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.
- Wardana, I. N. G., 1995, Bahan Bakar dan Teknik Pembakaran, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.
- Wijayanti, W.; 2003 : Bahan Bakar dan Teknik Pembakaran, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.
- Wikipedia, the free encyclopedia
http://en.wikipedia.org/wiki/Ohnesorge_number
- www.pertamina.co.id
- www.answers.com



LAMPIRAN



Lampiran 1. Data debit bahan bakar aktual ($Q_{bbaktual}$) dan debit bahan bakar ideal ($Q_{bbideal}$)

Δ_h (mm)	$Q_{bbaktual}$ (ml/s)	$Q_{bbideal}$ (cm ³ /s)
0	0	0
2	0.217674406	1.78227
4	0.370058243	2.52
6	0.447744967	3.08716
8	0.509771074	3.56474
10	0.649918412	3.98551
12	0.791171302	4.3659
14	0.941530411	4.71571

Lampiran 2. Data debit udara aktual ($Q_{udaktual}$) dan debit bahan bakar ideal ($Q_{udideal}$)

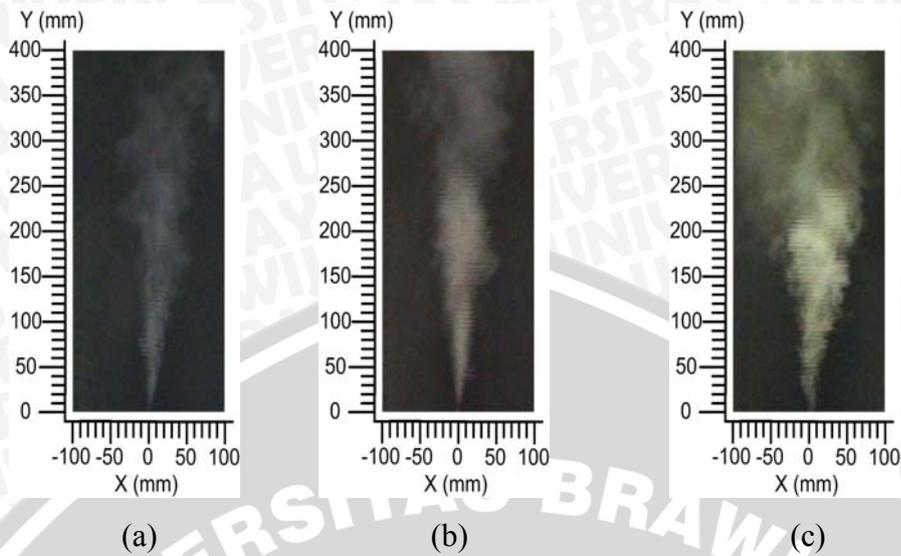
Tabel Δ_h , kecepatan aktual, debit aktual pada manometer *pitot tube*.

Δ_{h1} (m)	Δ_{h2} (m)	Δ_{h3} (m)	$V_{udaktual1}$ (m/s)	$V_{udaktual2}$ (m/s)	$V_{udaktual3}$ (m/s)	$V_{udaktualrata-rata}$ (m/s)	$Q_{udaktual}$ (m ³ /s)
0	0	0	0	0	0	0	0
5.08E-05	2.54E-05	1.27E-05	0.879	0.622	0.439	0.647	0.000368607
0.000203	0.000152	0.000127	1.758	1.522	1.39	1.557	0.000887351
0.000305	0.000254	0.000254	2.153	1.965	1.965	2.028	0.001155974
0.000483	0.000457	0.000406	2.709	2.637	2.486	2.611	0.001488157
0.000533	0.000508	0.000508	2.848	2.78	2.78	2.803	0.00159743
0.000711	0.000711	0.000635	3.289	3.289	3.108	3.229	0.001840248
0.000787	0.000762	0.000762	3.461	3.404	3.404	3.423	0.001951162
0.00094	0.000889	0.000838	3.781	3.677	3.57	3.676	0.002095377

Lampiran 3. Tabel kecepatan udara ideal dan debit udara ideal ($Q_{udideal}$)

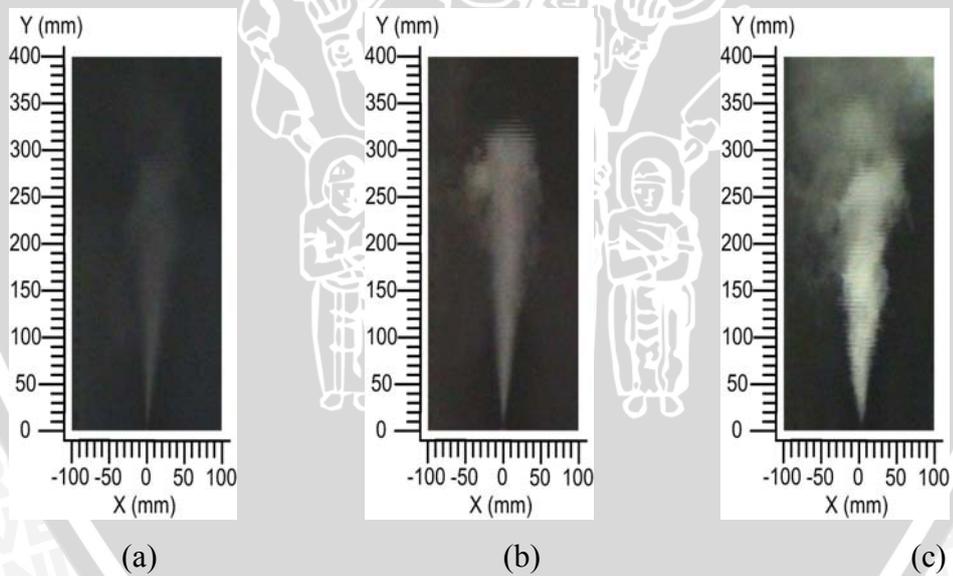
Δ_h manometer (m)	Kecepatan pada saluran (V_{ud1}) (m/s)	$Q_{udideal}$ (m ³ /s)
0	0	0
0.005	1.605684901	0.00091524
0.01	2.270781364	0.001294345
0.015	2.781127829	0.001585243
0.02	3.211369802	0.001830481
0.025	3.590420589	0.00204654
0.03	3.933108695	0.002241872
0.035	4.248242932	0.002421498
0.04	4.541562727	0.002588691

Lampiran 4.



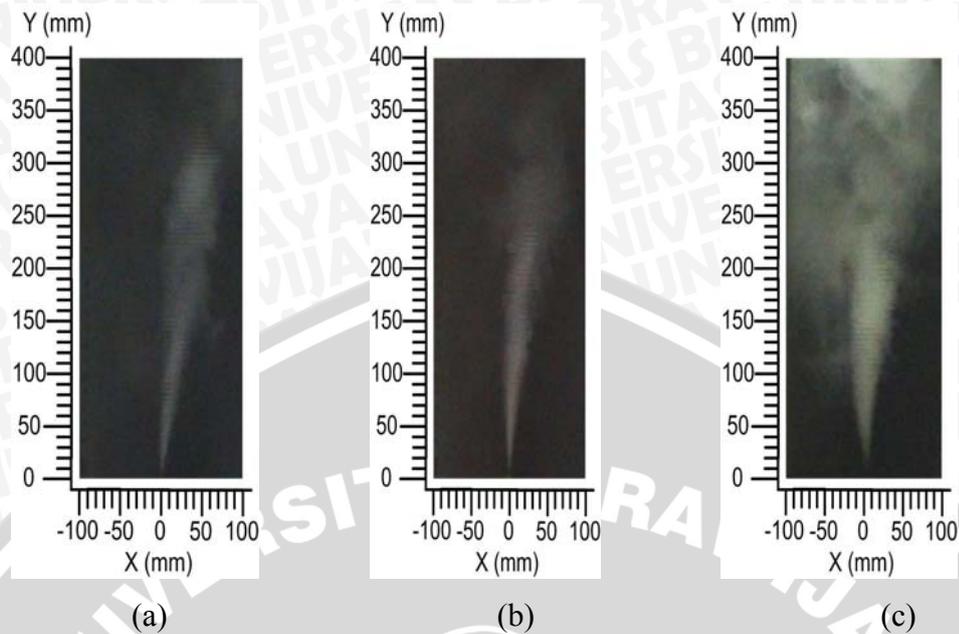
Visualisasi pola aliran bahan bakar dengan debit bahan bakar sebesar $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm.

Lampiran 5.



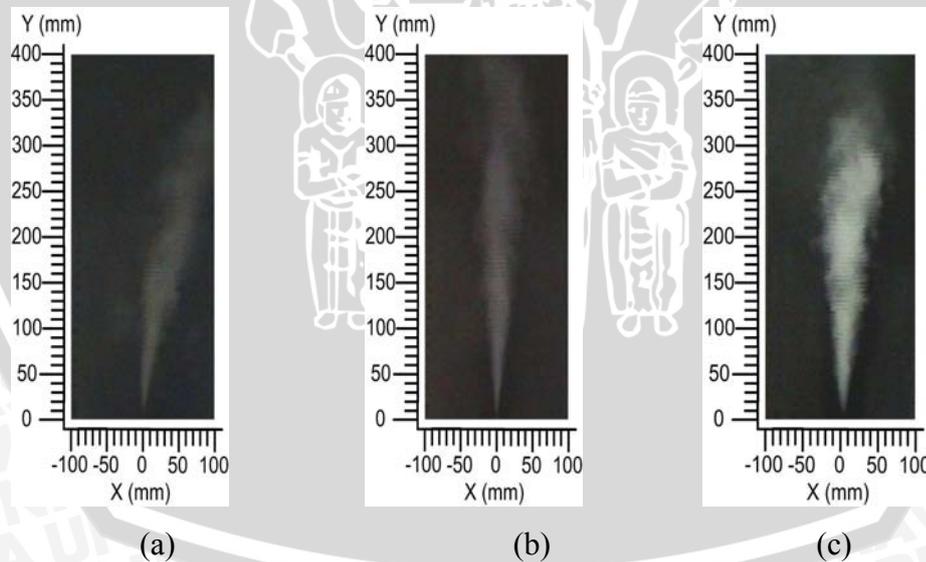
Visualisasi pola aliran bahan bakar dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm

Lampiran 6.



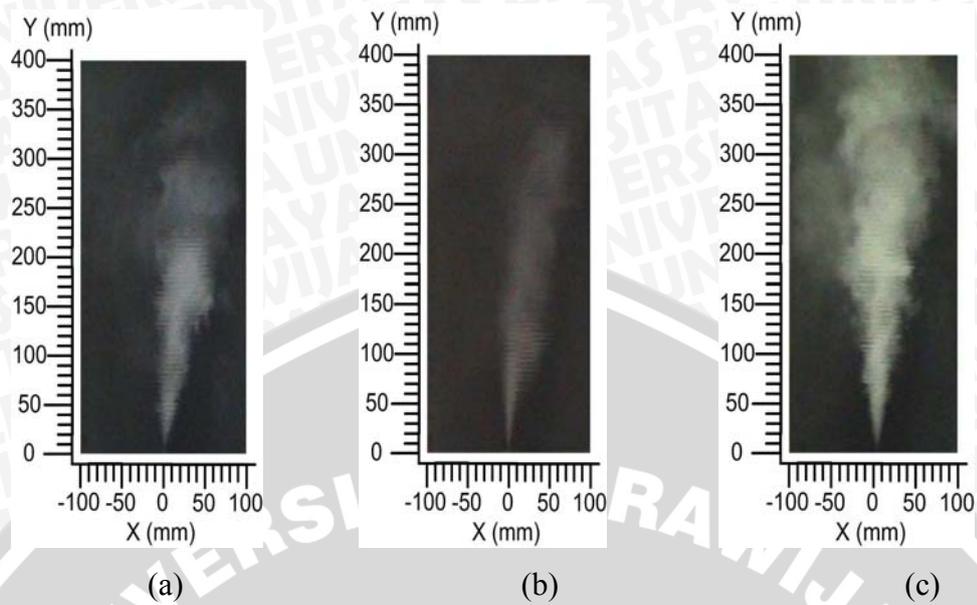
Visualisasi pola aliran bahan bakar dengan debit bahan bakar sebesar $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm

Lampiran 7.



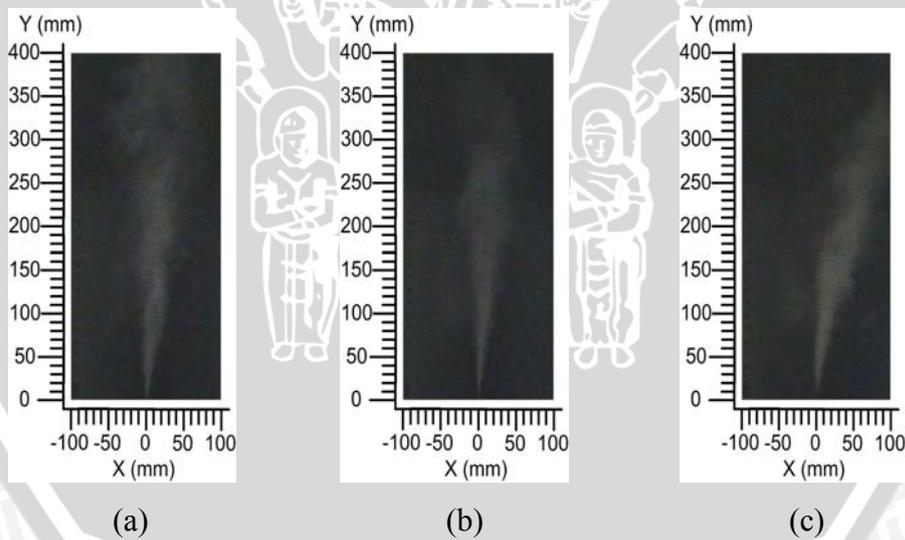
Visualisasi pola aliran bahan bakar dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm

Lampiran 8.



Visualisasi pola aliran bahan bakar dengan debit bahan bakar sebesar $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm

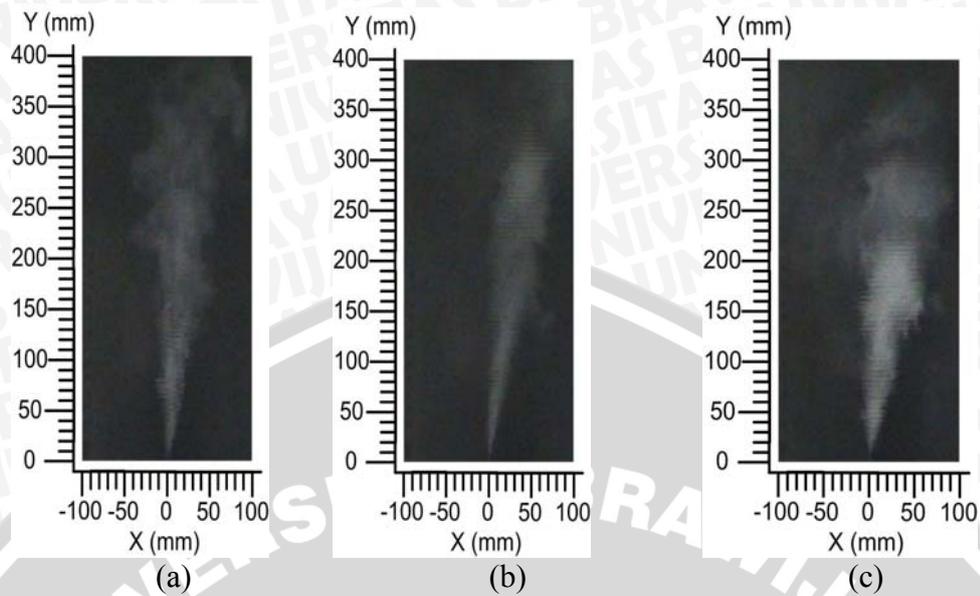
Lampiran 9.



Visualisasi pola aliran bahan bakar pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.5 mm

(a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

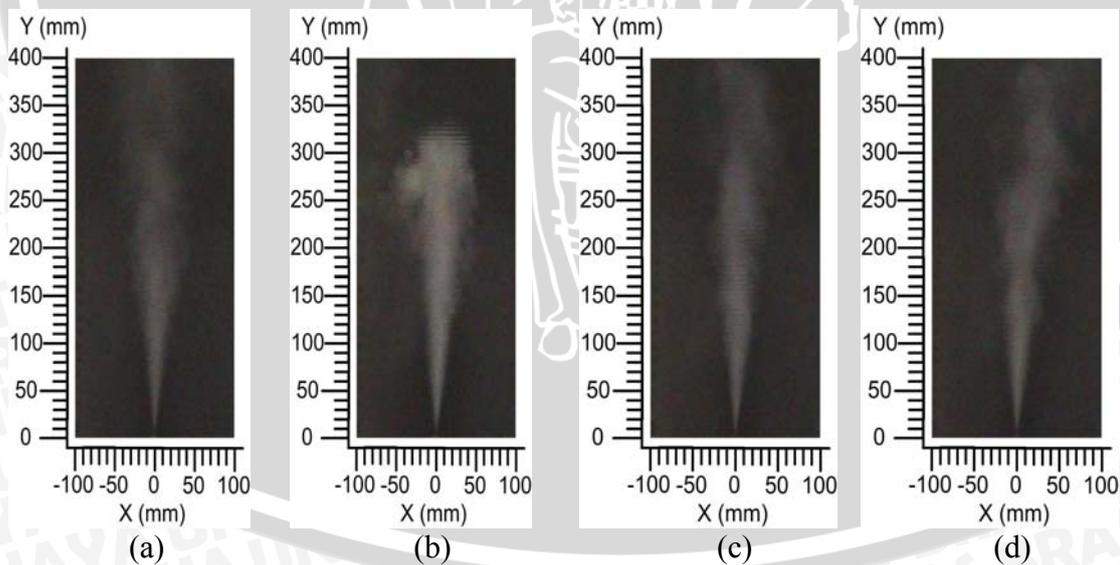
Lampiran 10.



Visualisasi pola aliran bahan bakar pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.5 mm

(a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

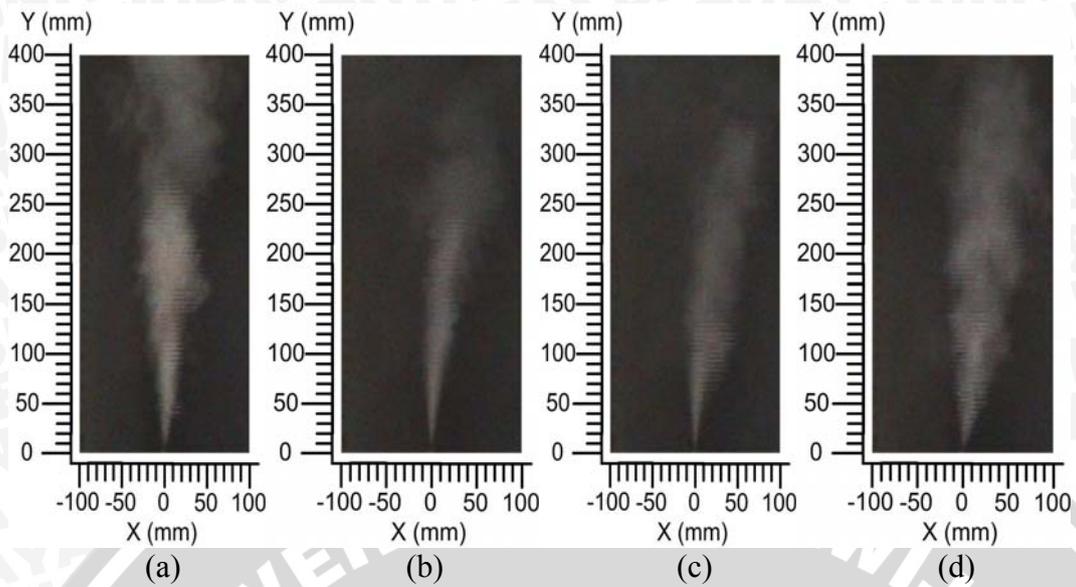
Lampiran 11.



Visualisasi pola aliran bahan bakar pada debit bahan bakar sebesar $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.7 mm

(a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
 (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

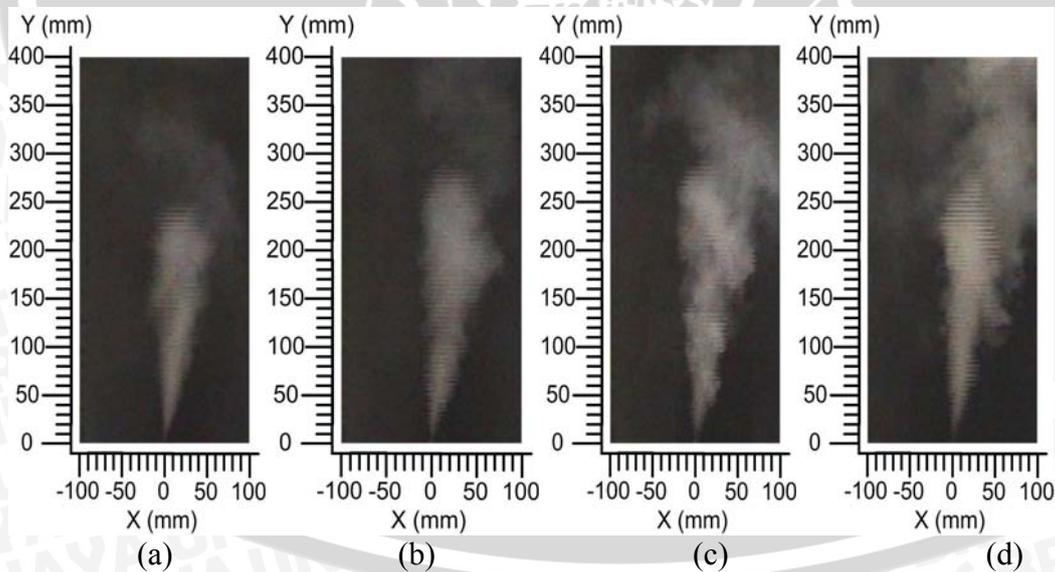
Lampiran 12



Visualisasi pola aliran bahan bakar pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.7 mm

- (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
- (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- (d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

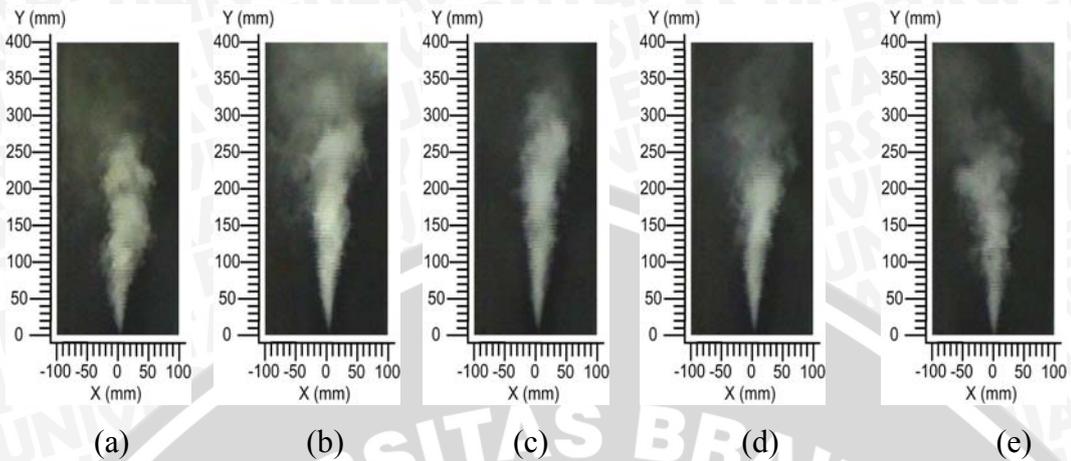
Lampiran 13.



Visualisasi pola aliran bahan bakar pada debit bahan bakar sebesar $3.660 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.7 mm

- (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
- (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- (d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

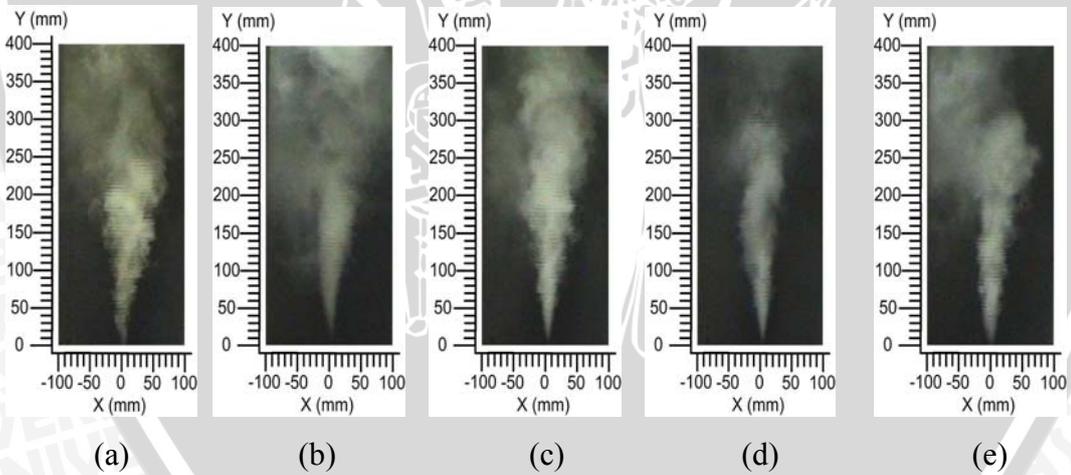
Lampiran 14



Visualisasi pola aliran bahan bakar dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen 1 mm dengan variasi debit udara

- (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
 (d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (e) $1.724 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

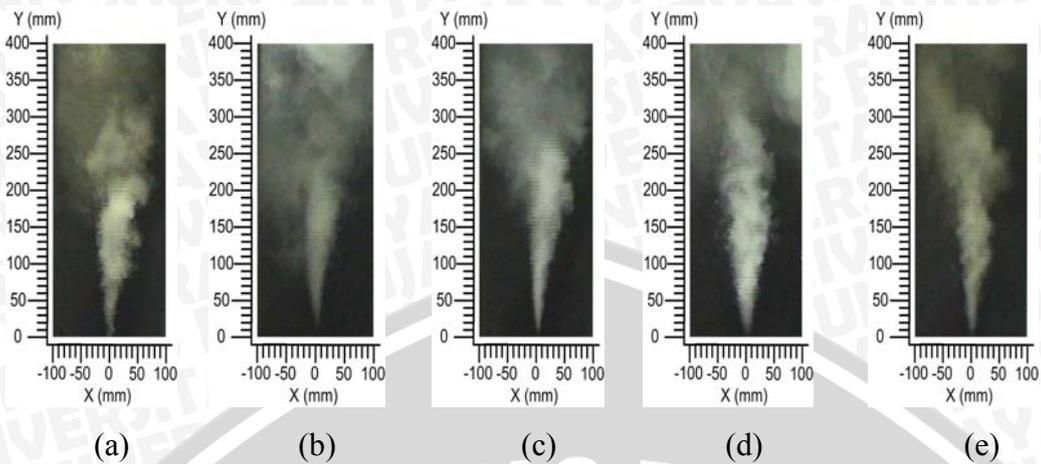
Lampiran 15.



Visualisasi pola aliran bahan bakar dengan debit bahan bakar sebesar $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen 1 mm dengan variasi debit udara

- (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
 (d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (e) $1.724 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

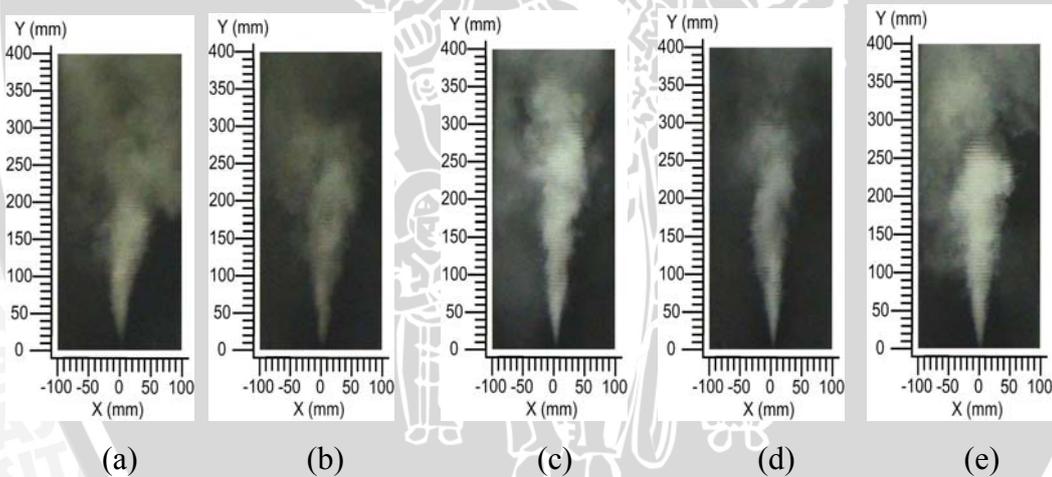
Lampiran 16.



Visualisasi pola aliran bahan bakar dengan debit bahan bakar sebesar $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen 1 mm dengan variasi debit udara

- (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
(d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (e) $1.724 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

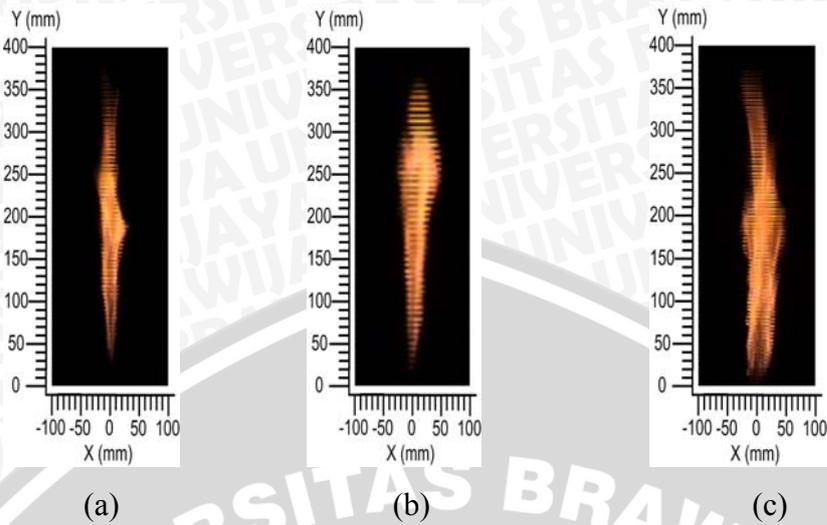
Lampiran 17.



Visualisasi pola aliran bahan bakar dengan debit bahan bakar sebesar $4.230 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen 1 mm dengan variasi debit udara

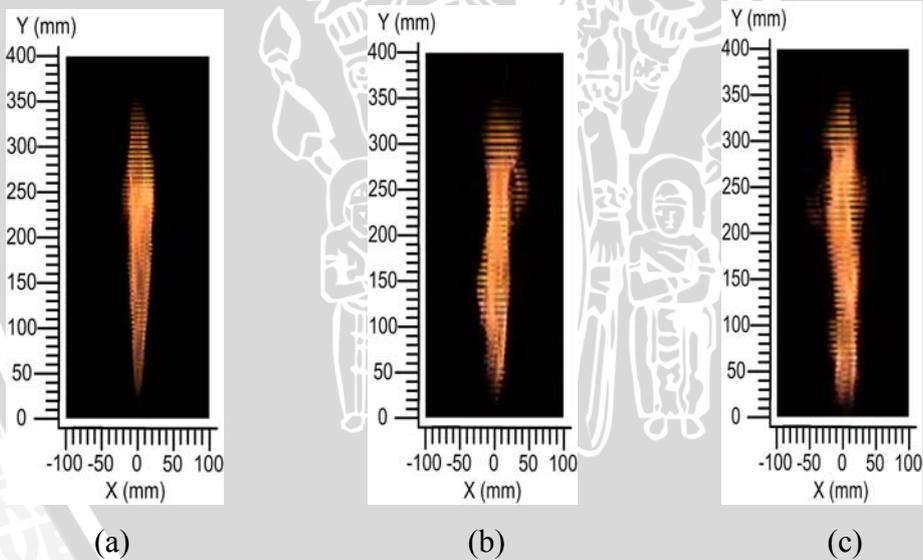
- (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
(d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (e) $1.724 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

Lampiran 18



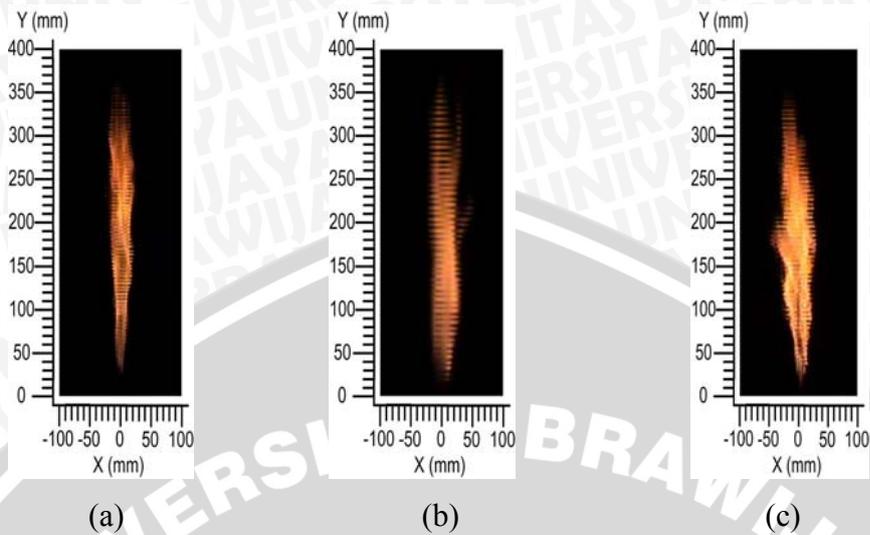
Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm

Lampiran 19.



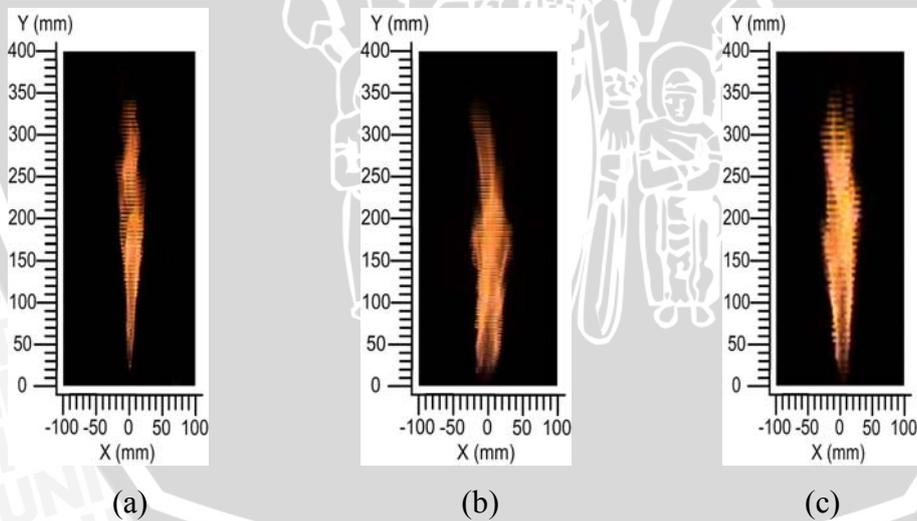
Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm

Lampiran 20.



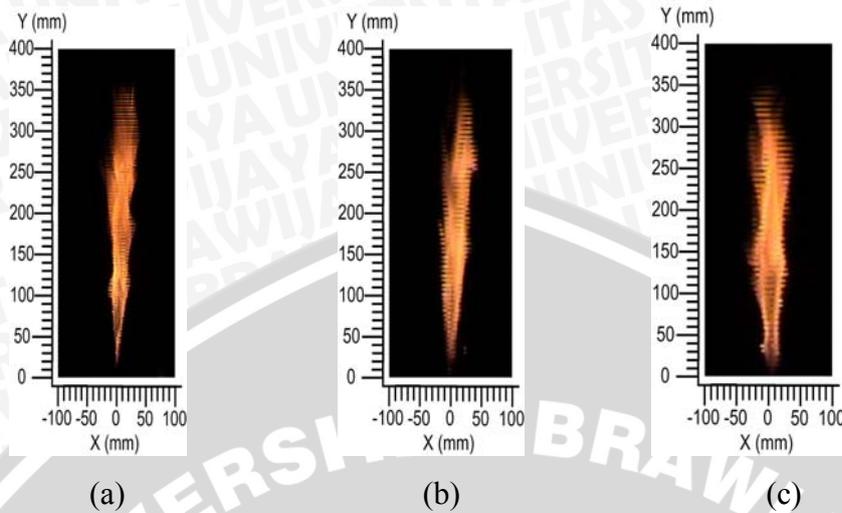
Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm

Lampiran 21.



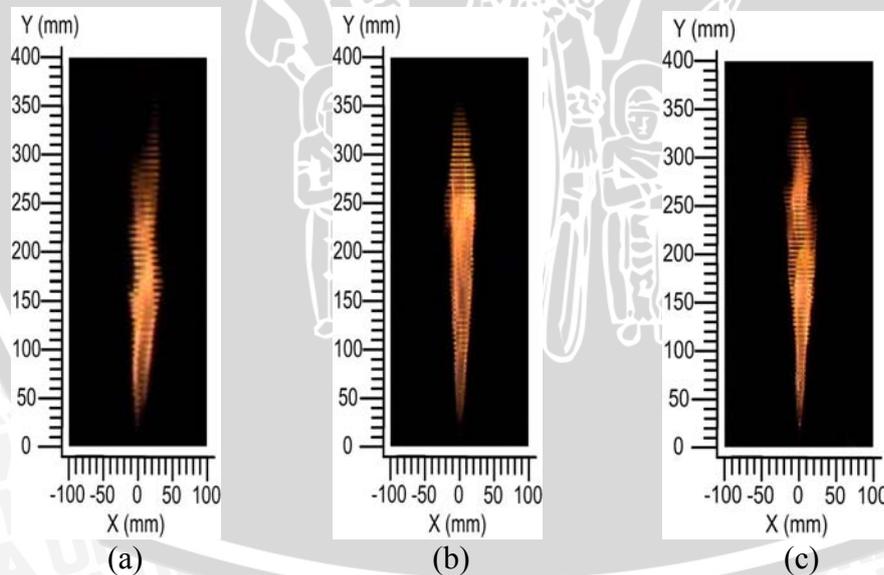
Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm

Lampiran 22.



Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara sebesar $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen (a) 0.5 mm, (b) 0.7 mm dan (c) 1 mm

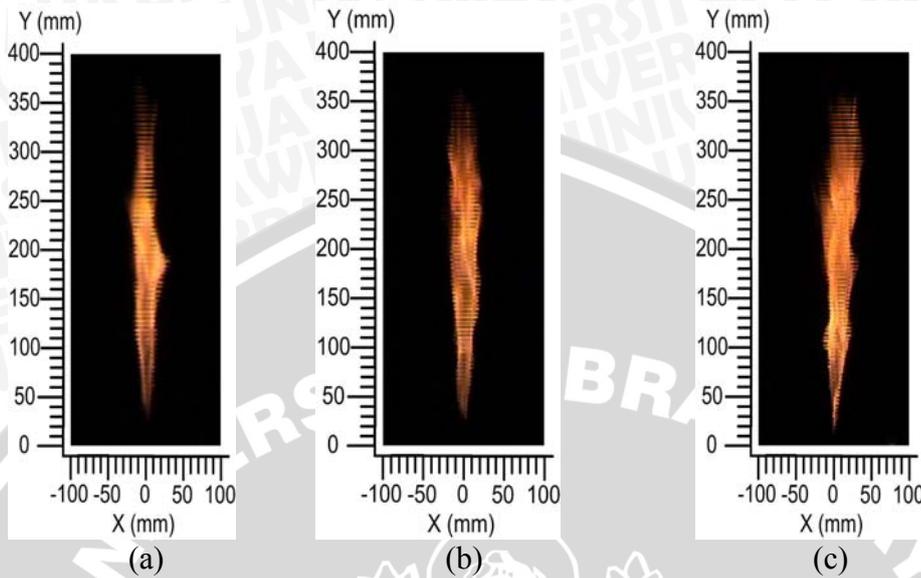
Lampiran 23.



Visualisasi api pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.5 mm

(a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

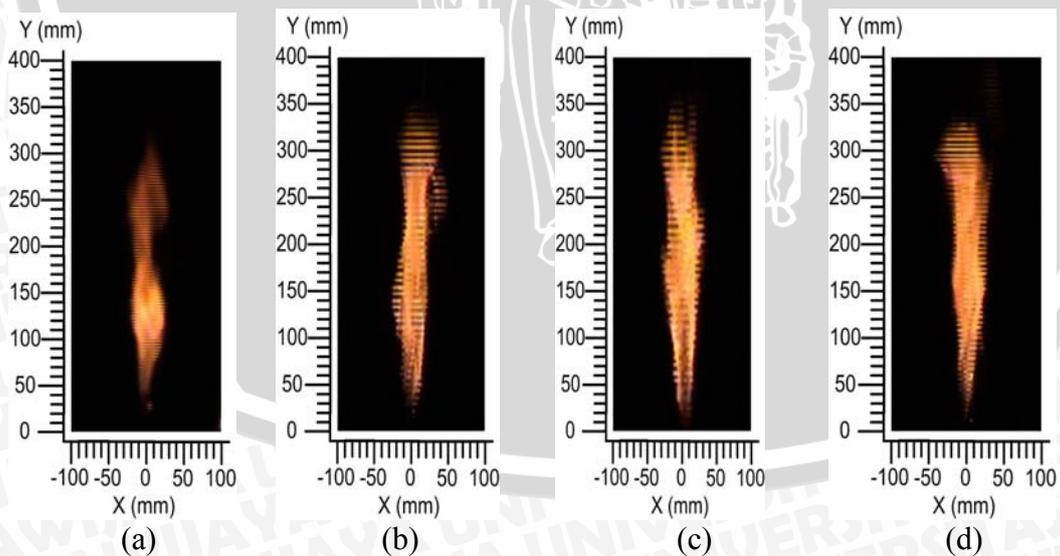
Lampiran 24.



Visualisasi api pada debit bahan bakar sebesar $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.5 mm

(a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

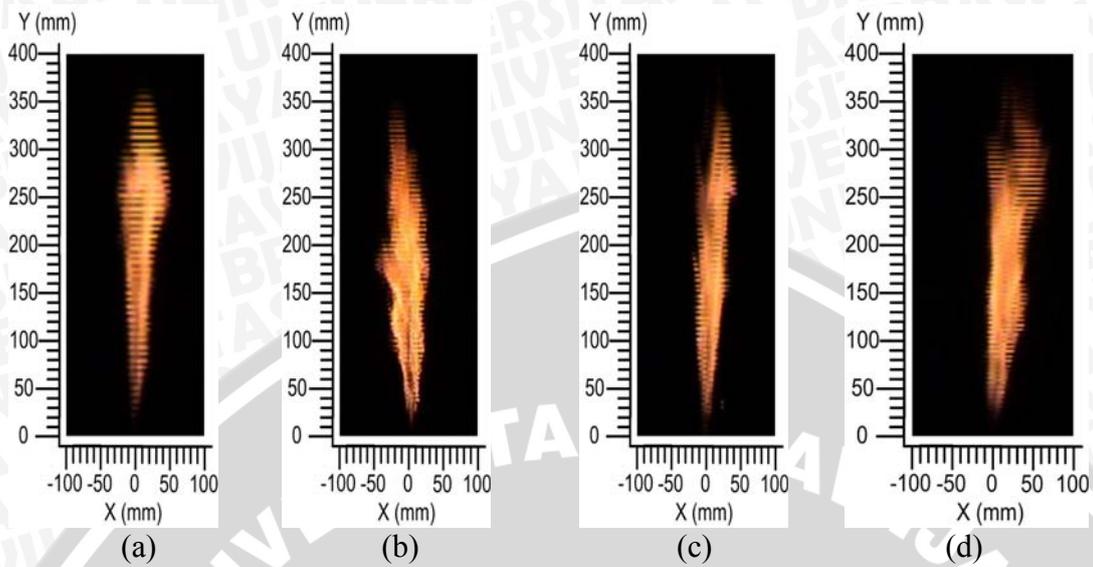
Lampiran 25.



Visualisasi api pada debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.7 mm

(a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
(c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

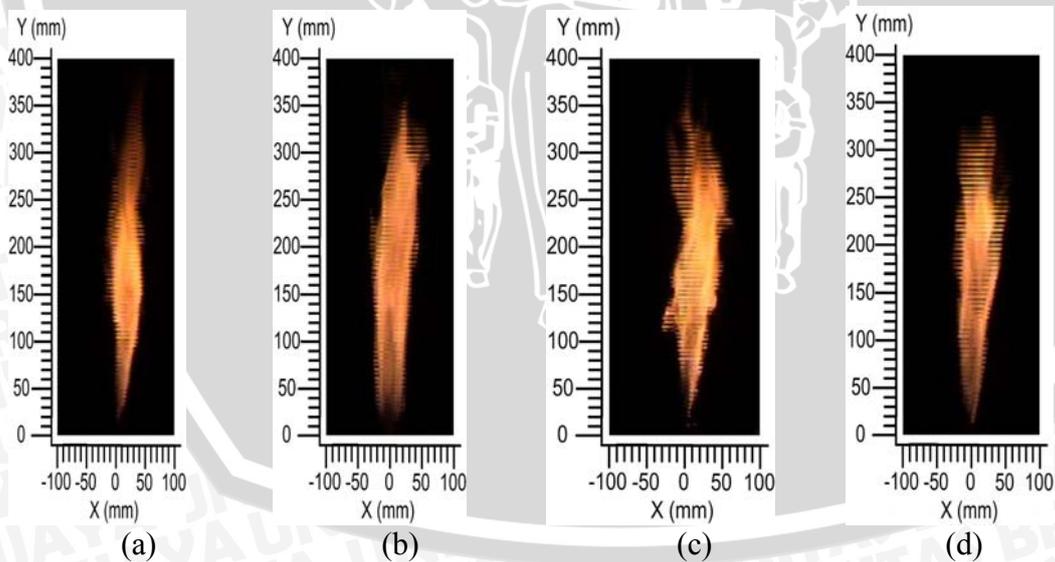
Lampiran 26.



Visualisasi api pada debit bahan bakar sebesar $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.7 mm

- (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
- (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- (d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

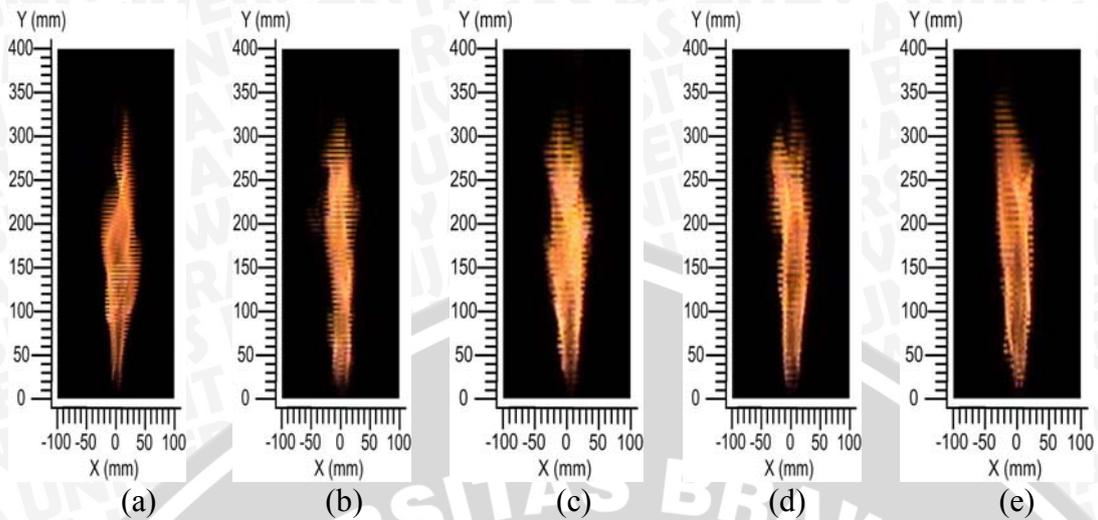
Lampiran 27.



Visualisasi api pada debit bahan bakar sebesar $3.660 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan variasi debit udara dengan menggunakan diameter *throat* nosel konvergen-divergen 0.7 mm

- (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
- (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- (d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

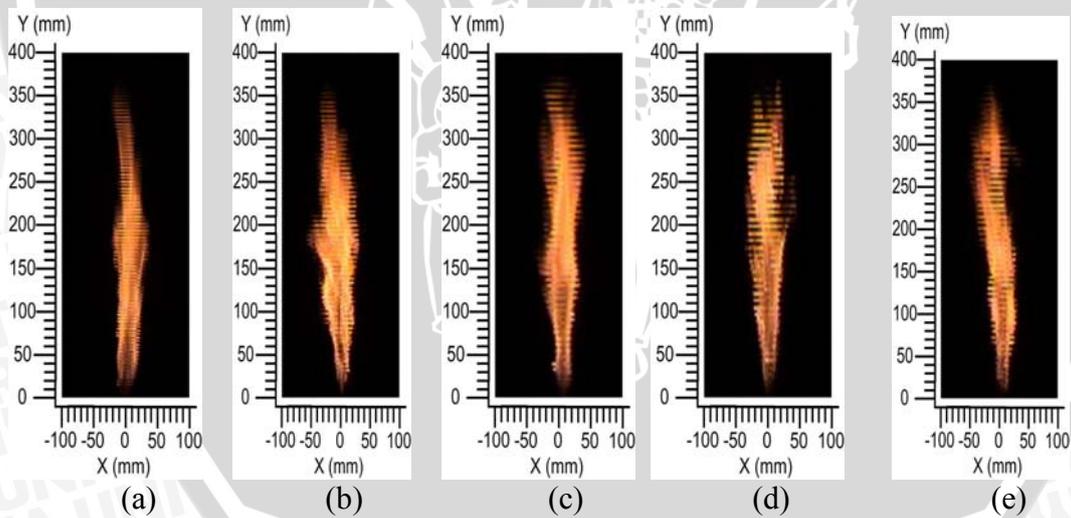
Lampiran 28.



Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen 1 mm dengan variasi debit udara

- (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
(d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (e) $1.724 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

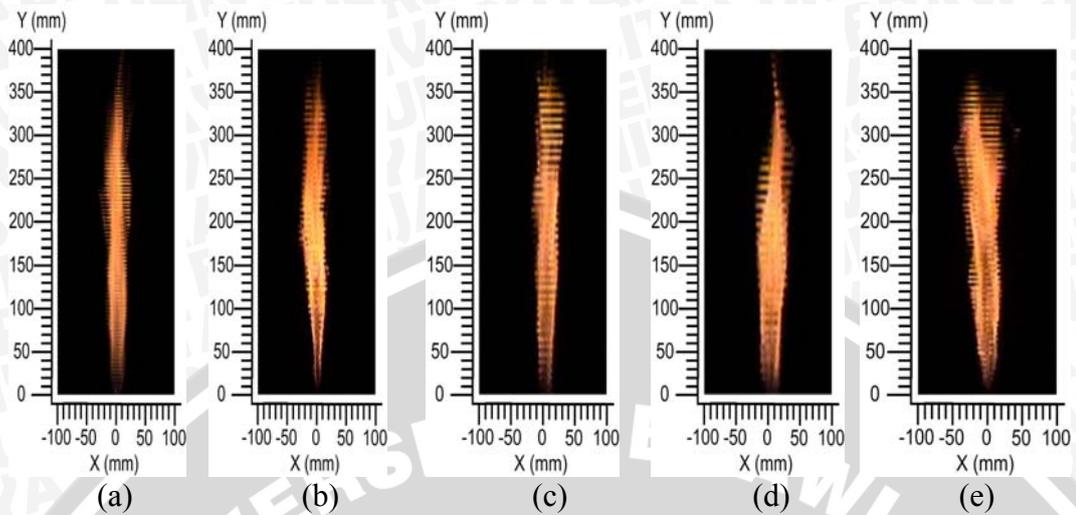
Lampiran 29.



Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $2.993 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen 1 mm dengan variasi debit udara

- (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
(d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (e) $1.724 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

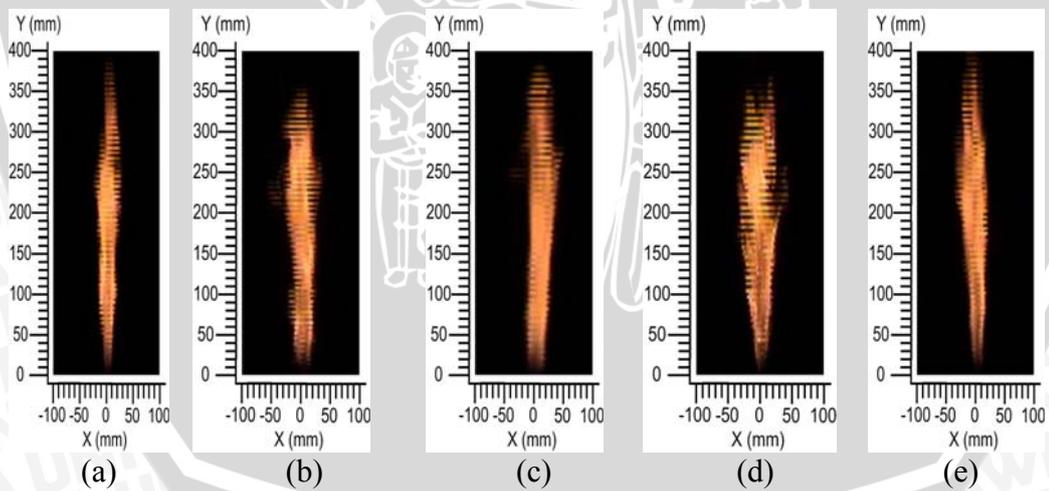
Lampiran 30.



Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $3.660 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen 1 mm dengan variasi debit udara

- (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
(d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (e) $1.724 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

Lampiran 31.



Visualisasi bentuk nyala api dengan debit bahan bakar sebesar $4.230 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ pada diameter *throat* nosel konvergen-divergen 1 mm dengan variasi debit udara

- (a) $7.715 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $1.090 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $1.335 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
(d) $1.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (e) $1.724 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$