

**PENGARUH DIAMETER *THROAT* NOSEL KONVERGEN  
DIVERGEN TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA  
PROSES PEMBAKARAN DIFUSI MINYAK TANAH**

**SKRIPSI**

**KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**Disusun oleh :**

**ANANG PRAYOGO  
NIM. 0210623010 - 62**

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

**PENGARUH DIAMETER *THROAT* NOSEL KONVERGEN  
DIVERGEN TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA  
PROSES PEMBAKARAN DIFUSI MINYAK TANAH**

**SKRIPSI**

**KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :  
**ANANG PRAYOGO**  
NIM. 0210623010 - 62

Telah Diperiksa dan Disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

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

**Lilis Yuliati ST., MT.**  
NIP. 132 258 191

**PENGARUH DIAMETER *THROAT* NOSEL KONVERGEN  
DIVERGEN TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA  
PROSES PEMBAKARAN DIFUSI MINYAK TANAH**

Disusun oleh :

**ANANG PRAYOGO  
NIM. 0210623010 – 62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada  
tanggal 31 Juli 2007

**DOSEN PENGUJI**

**Skripsi I**

**Prof. Ir. I.N.G. Wardana, M.Eng., Ph.D.  
NIP. 131 286 308**

**Skripsi II**

**Ir. Bambang Indrayadi, M.MT  
NIP. 131 653 469**

**Komprehensif**

**Ir. Djoko Sutikno, M.Eng.  
NIP. 131 276 249**

**Mengetahui  
Ketua Jurusan Teknik Mesin**

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



## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulisan laporan skripsi ini dapat terselesaikan. Laporan skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Atas terselesainya laporan skripsi ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

- Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya yang telah diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan ini.
- Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M. Sc, CSE. selaku Sekretaris Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Bapak Dr. Ir. Rudy Soenoko, M. Eng. Sc selaku dosen pembimbing I dan ketua kelompok konsentrasi konversi energi, Ibu Lilis Yuliati ST., MT, selaku dosen pembimbing II, atas segala petunjuk dan bimbingannya.
- Kedua orang tuaku (Alm. Bapak dan Ibu) dan kakak-kakakku atas kasih sayang dan dukungannya.
- Bapak dan ibu dosen yang telah memberikan banyak ilmu dan bimbingannya kepada saya.
- Bapak Ir. Agustinus Ariseno selaku dosen wali.
- Teman-teman dan semua pihak yang telah memberikan dorongan dan bantuan sehingga dapat tersusunnya laporan skripsi ini.

Walaupun jauh dari kesempurnaan, semoga laporan ini dapat bermanfaat dan memberikan informasi bagi semua pihak yang memerlukannya. Akhir kata saran dan kritik yang membangun dari pembaca sangat penulis harapkan demi kesempurnaan skripsi ini.

Malang, Juli 2007

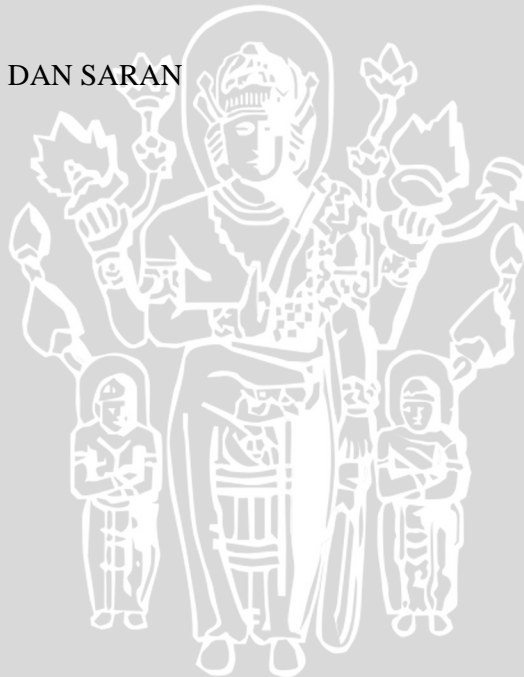
Penulis

**DAFTAR ISI**

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vi
RINGKASAN	vii
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
<b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>4</b>
2.1 Penelitian-penelitian Terdahulu	4
2.2 Bahan Bakar	5
2.2.1 Bahan bakar cair	7
2.2.2 Minyak tanah	8
2.3 Pembakaran	9
2.3.1 Mekanisme pembakaran bahan bakar cair	12
2.3.2 Temperatur pembakaran	14
2.4 Atomisasi	15
2.5 Nosel	17
2.6 Hipotesa	19
<b>BAB III. METODE PENELITIAN</b>	<b>20</b>
3.1 Metode Penelitian	20
3.2 Variabel Penelitian	21
3.3 Pelaksanaan Penelitian	21
3.4 Alat-alat Penelitian	21
3.5 Rancangan Pengolahan Data	25
3.6 Diagram Alir Penelitian	26



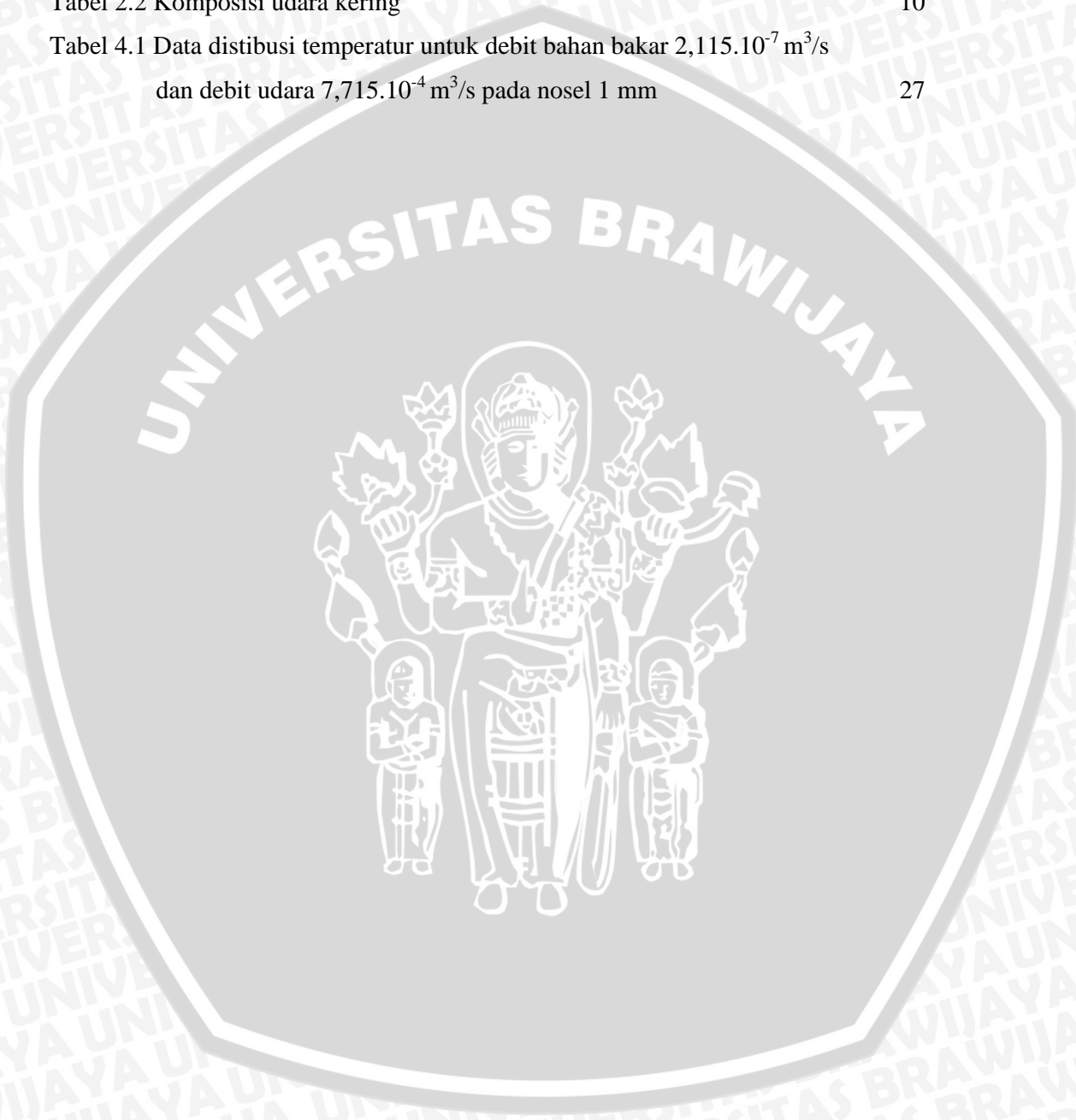
<b>BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>27</b>
4.1 Data Hasil Penelitian	27
4.2 Perhitungan Data	28
4.2.1 Perhitungan nilai konstanta kalibrasi manometer bahan bakar	28
4.2.2 Perhitungan nilai konstanta kalibrasi manometer udara	29
4.2.3 Perhitungan debit bahan bakar	32
4.2.4 Perhitungan debit udara	33
4.3 Pembahasan	34
4.3.1 Distribusi temperatur pada ruang bakar dengan variasi diameter <i>throat</i> nosel konvergen divergen	34
4.3.2 Distribusi temperatur pada ruang bakar disetiap titik pengambilan data	38
 <b>BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN</b>	 <b>42</b>
5.1 Kesimpulan	42
5.2 Saran	42
 <b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
 <b>LAMPIRAN</b>	 <b>43</b>





**DAFTAR TABEL**

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1	<i>Requirements for Kerosene</i>	8
Tabel 2.2	Komposisi udara kering	10
Tabel 4.1	Data distribusi temperatur untuk debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ pada nosel 1 mm	27



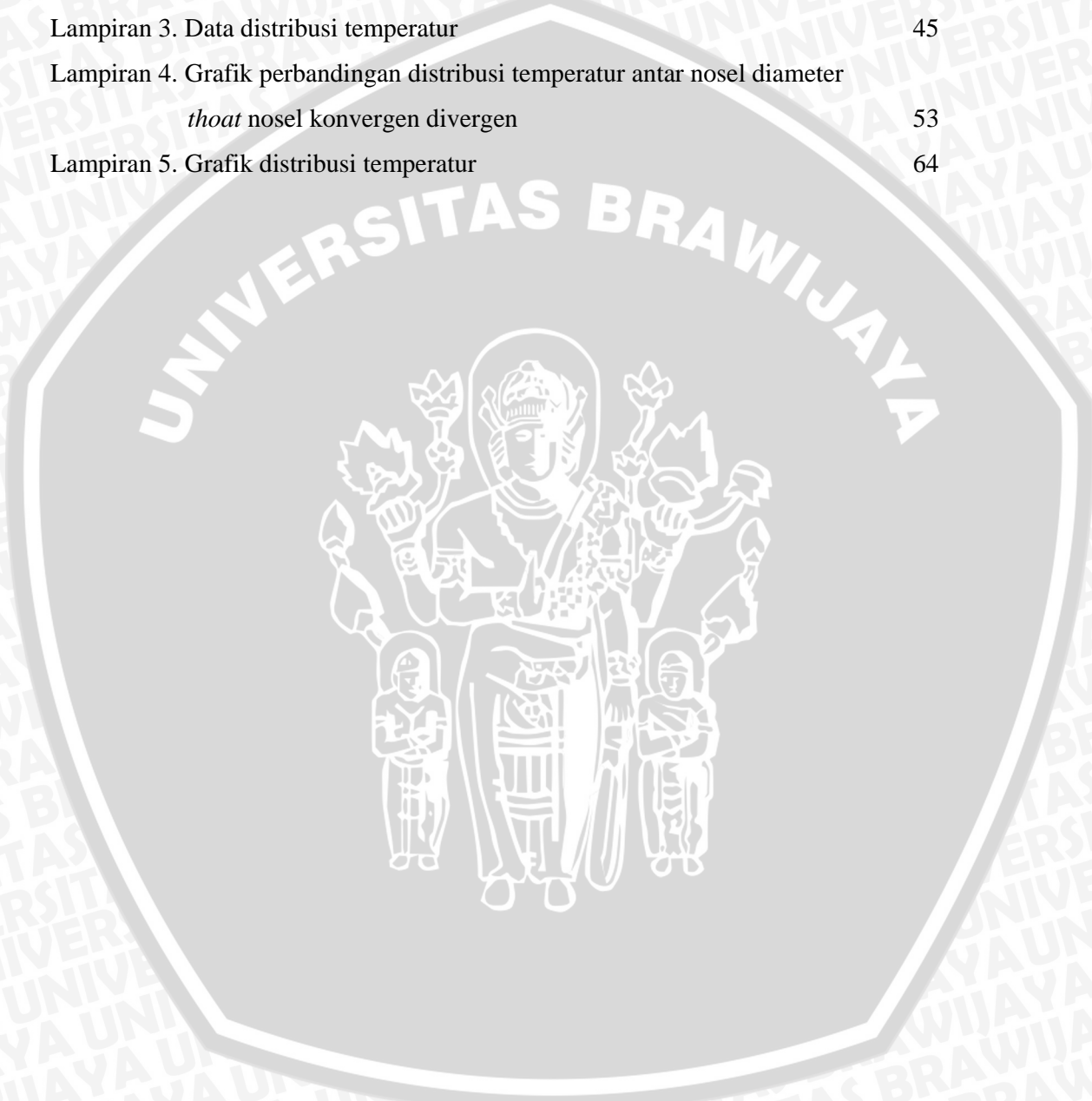
## DAFTAR GAMBAR

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	11
Gambar 2.4	Skema <i>lift off</i> pada api difusi jet	14
Gambar 2.5	Mekanisme pembentukan <i>droplet</i>	16
Gambar 2.6	Tingkat atomisasi pada nosel	17
Gambar 2.7	Atomisasi pada nosel	18
Gambar 2.8	<i>Flat spray</i>	18
Gambar 2.9	<i>Hollow cone spray</i>	18
Gambar 2.10	<i>Solid cone spray</i>	19
Gambar 3.1	Nosel konvergen divergen dengan diameter <i>throat</i> 0,5 mm	20
Gambar 3.2	Nosel konvergen divergen dengan diameter <i>throat</i> 0,7 mm	20
Gambar 3.3	Nosel konvergen divergen dengan diameter <i>throat</i> 1 mm	21
Gambar 3.4	Instalasi alat penelitian	23
Gambar 3.5	Letak titik pengambilan data distribusi temperatur pada ruang bakar	25
Gambar 3.6	Diagram alir penelitian	26



**DAFTAR LAMPIRAN**

No	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Data-data kalibrasi alat ukur	43
Lampiran 2.	Data debit bahan bakar dan debit udara aktual	44
Lampiran 3.	Data distribusi temperatur	45
Lampiran 4.	Grafik perbandingan distribusi temperatur antar nosel diameter <i>throat</i> nosel konvergen divergen	53
Lampiran 5.	Grafik distribusi temperatur	64



## RINGKASAN

**Anang Prayogo, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2007, Pengaruh Diameter *Throat* Nosel Konvergen Divergen terhadap Distribusi Temperatur pada Proses Pembakaran Difusi Minyak Tanah. Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Rudy Soenoko, M. Eng. Sc. dan Lilis Yuliati ST., MT.**

Bahan bakar fosil merupakan bahan bakar yang tidak dapat diperbarui. Harga bahan bakar fosil khususnya bahan bakar minyak semakin lama semakin tinggi. Maka dari itu perlu adanya upaya penghematan bahan bakar. Penghematan bahan bakar dapat dicapai dengan atomisasi bahan bakar yang baik dan mengatur keseimbangan laju aliran reaktan dan laju pembakaran. Apabila proses atomisasi baik dan terjadi keseimbangan laju aliran reaktan dan laju pembakaran maka pembakarannya lebih sempurna dan temperatur yang dihasilkan tinggi.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi diameter *throat* nosel konvergen divergen terhadap distribusi temperatur pada proses pembakaran difusi minyak tanah. Penelitian ini menggunakan metode *experimental*. Variabel bebasnya adalah diameter *throat* yang divariasi sebesar 0,5 mm, 0,7 mm dan 1 mm, sedangkan variabel terikatnya adalah distribusi temperatur. Debit bahan bakar dan debit udara sebagai variabel terkontrol. Untuk debit bahan bakar divariasi sebesar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan  $4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udaranya divariasi sebesar  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  dan  $1,724 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Distribusi temperatur pada ruang bakar diukur mulai dari ketinggian 8 cm dari mulut nosel sampai ketinggian 40 cm. Sensor panas yang digunakan sebanyak 5 buah dipasang horisontal, antar sensor berjarak 1,4 cm.

Dari hasil penelitian didapatkan nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 0,5 mm dan 0,7 mm memiliki distribusi temperatur yang cenderung lebih merata daripada nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 1 mm pada debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . Hal ini disebabkan nosel dengan diameter *throat* yang lebih kecil, pada debit bahan bakar proses atomisasinya terjadi lebih baik bila dibandingkan dengan nosel konvergen divergen yang memiliki diameter *throat* yang lebih besar. Tetapi pada debit tersebut semakin kecil diameter *throat* yang lebih kecil akan memiliki temperatur yang lebih rendah.

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Saat ini manusia masih belum dapat melepaskan ketergantungan pada pemakaian bahan bakar fosil yang merupakan bahan bakar tak bisa diperbarui. Salah satu jenis dari bahan bakar fosil yang banyak digunakan adalah minyak tanah (*kerosene*). Konsumsi bahan bakar minyak tanah terus meningkat setiap tahunnya sedangkan ketersediaan bahan bakar minyak tanah terus menipis ditambah kebijakan harga minyak yang terus meningkat. Maka perlu adanya upaya untuk melakukan penghematan dan peningkatan efisiensi dari penggunaan bahan bakar minyak tanah.

Metode yang paling mudah digunakan untuk pengkonversian energi dari bahan bakar minyak adalah dengan proses pembakaran. Pembakaran merupakan salah satu proses konversi energi, dimana proses ini merupakan reaksi kimia yang sangat cepat antara bahan bakar dan oksigen disertai timbulnya cahaya dan kalor. Energi kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran ini dapat dimanfaatkan secara langsung atau dikonversikan lagi menjadi energi dalam bentuk yang lain. Pembakaran dapat terjadi lebih sempurna apabila proses pengkabutan dan proses pendifusian dari bahan bakar terjadi dengan baik. Pembakaran yang sempurna akan menghasilkan temperatur yang tinggi.

Ada beberapa cara yang digunakan untuk meningkatkan temperatur pembakaran, diantaranya dengan cara memperbaiki pengkabutan (atomisasi) dan memperbaiki proses pendifusian antara bahan bakar dan udara agar dapat bercampur secara homogen. Apabila proses pengkabutan (atomisasi) lebih baik maka proses penguapan dari bahan bakar minyak lebih cepat terjadi, hal ini akan mengakibatkan proses pembakaran lebih mudah terjadi (pembakaran lebih sempurna) karena pendifusian antara bahan bakar dan udara dapat terjadi lebih baik. Hasil dari pembakaran sempurna akan meningkatkan temperatur pembakaran sehingga kita dapat menghemat penggunaan bahan bakar.

Sistem pengkabutan tidak lepas dari sistem aliran fluida. Dalam bidang teknik mesin banyak sekali sistem yang berhubungan dengan sistem aliran fluida. Alat dalam sistem aliran fluida yang digunakan untuk proses pengkabutan (atomisasi) adalah nosel. Nosel adalah alat yang digunakan untuk merubah energi tekanan menjadi energi



kecepatan. Aplikasi nosel dalam bidang teknik mesin salah satunya sebagai alat pembakaran. Dalam pembakaran, nosel digunakan sebagai alat yang digunakan untuk menghasilkan fluida dalam bentuk butiran halus (*droplet*). Ukuran, kecepatan dan distribusi *droplet* akan mempengaruhi tingkat kesempurnaan pembakaran. Ukuran, kecepatan dan distribusi *droplet* dipengaruhi oleh jenis fluida dan desain (bentuk) nosel. Sehingga penggunaan nosel yang tepat pada pembakaran dapat menaikkan temperatur hasil pembakaran.

Dalam penelitian ini bahan bakar yang digunakan adalah jenis minyak tanah. Pemakaian bahan bakar minyak tanah ini digunakan karena bahan bakar jenis ini harganya relatif murah dan mayoritas masyarakat masih menggunakannya sebagai bahan bakar domestik, sehingga jika didapat metode peningkatan temperatur hasil pembakarannya maka sangat berguna bagi masyarakat. Dari latar belakang diatas penulis mempunyai gagasan bagaimana cara meningkatkan temperatur dari hasil 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 kecil diameter *throat* dari nosel konvergen divergen maka tekanan pada sisi masuk nosel akan lebih tinggi untuk mengalirkan debit bahan bakar yang sama. Diharapkan dengan menggunakan dimensi *throat* yang tepat maka akan dihasilkan proses pendifusian dari bahan bakar dan udara yang lebih baik. Sehingga proses pencampuran bahan bakar minyak secara difusi akan lebih mudah terjadi, hal ini mengakibatkan jumlah energi kalor yang dilepaskan akan lebih banyak, sehingga temperatur pembakaran akan lebih tinggi.

## 1.2 Rumusan Masalah

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

Bagaimana pengaruh variasi diameter *throat* nosel konvergen divergen terhadap distribusi temperatur 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 untuk satu jenis nosel yang memiliki ukuran *throat* yang sama.
4. Kondisi udara lingkungan dianggap konstan.
5. Hanya membahas distribusi temperatur.
6. Luas penampang masuk nosel dan panjang nosel konstan, dengan luas penampang masuk nosel  $7,065 \text{ mm}^2$  dan panjang nosel 6 mm.
7. Pengukuran distribusi temperatur pada ruang bakar dimulai dari 8 cm dari mulut nosel sampai ketinggian 40 cm, untuk distribusi kearah horisontal dimulai dari titik 0 tepat diatas mulut nosel sampai 1,4 cm dan 2,8 cm searah sumbu X positif dan X negatif.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi diameter *throat* nosel konvergen divergen terhadap distribusi temperatur pada proses pembakaran difusi minyak tanah.

### 1.5 Manfaat Penelitian

1. Mampu menerapkan teori-teori yang telah didapat selama perkuliahan terutama masalah pembakaran.
2. Memberikan informasi pada bidang perindustrian bagaimana cara meningkatkan temperatur pembakaran khususnya industri yang menggunakan bahan bakar minyak.
3. Memberikan informasi kepada masyarakat cara meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar minyak tanah.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian-penelitian Terdahulu

Tratama (2005) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi bentuk nosel *conic* dan *contour* terhadap karakteristik aliran keluar nosel. Nosel *conic* dan *contour* memiliki dimensi ukuran yang sama yaitu diameter sisi masuk nosel 23 mm, diameter sisi keluar nosel 5 mm, panjang nosel 24,73 mm dan sudut kemiringan nosel 20°. Fluida air dialirkan dengan pompa melalui pipa sebelum masuk nosel. Nosel *conic* memiliki gradien penampang yang linear akan mengakibatkan perubahan aliran yang kecil, sedangkan pada nosel *contour* memiliki gradien penampang yang parabolik, sehingga pada bagian tertentu terdapat gradien penampang yang lebih besar bila dibandingkan nosel *conic*. Semakin besar gradien penampang maka akan mengakibatkan perubahan arah aliran yang terjadi didalam nosel semakin besar, sehingga akan menimbulkan banyak terjadi tumbukan antar partikel fluida, *losses* semakin besar dan kapasitas alir aliran fluida keluar nosel akan lebih kecil.

Gamayel (2005) melakukan penelitian mengenai pengaruh sudut kemiringan nosel (10°, 15° dan 20°) terhadap karakteristik aliran keluar nosel. Nosel yang dipakai penelitian memiliki diameter sisi masuk 23 mm dan keluar 5 mm namun memiliki ukuran panjang yang berbeda. Nosel dengan sudut kemiringan 10° panjangnya 51.04 mm, 15° panjangnya 33,59 mm dan 20° panjangnya 24,73 mm. Fluida air dialirkan dengan pompa melalui pipa dengan tekanan masuk nosel yang sama, nosel dengan sudut kemiringan 20° memiliki *losses* yang paling besar, karena nosel dengan sudut kemiringan 20° memiliki lintasan yang pendek dan perubahan arah aliran yang besar sehingga fluida yang mengalir mengalami tumbukan yang lebih banyak daripada nosel dengan sudut kemiringan 10° dan 15°. Semakin besar sudut nosel maka semakin besar perubahan aliran dan gesekan antar partikel fluida, sehingga menimbulkan *pressure drop* yang semakin besar.

Kampen dkk (2006) melakukan penelitian tentang proses atomisasi fluida *newtonian* (air) menggunakan nosel dengan diameter keluar 0,7 mm dan 1 mm. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan nilai Reynold dan Weber pada nilai 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. Gambar proses atomisasi dengan variasi nilai  $Re$  dan  $We$  yang berbeda-beda dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

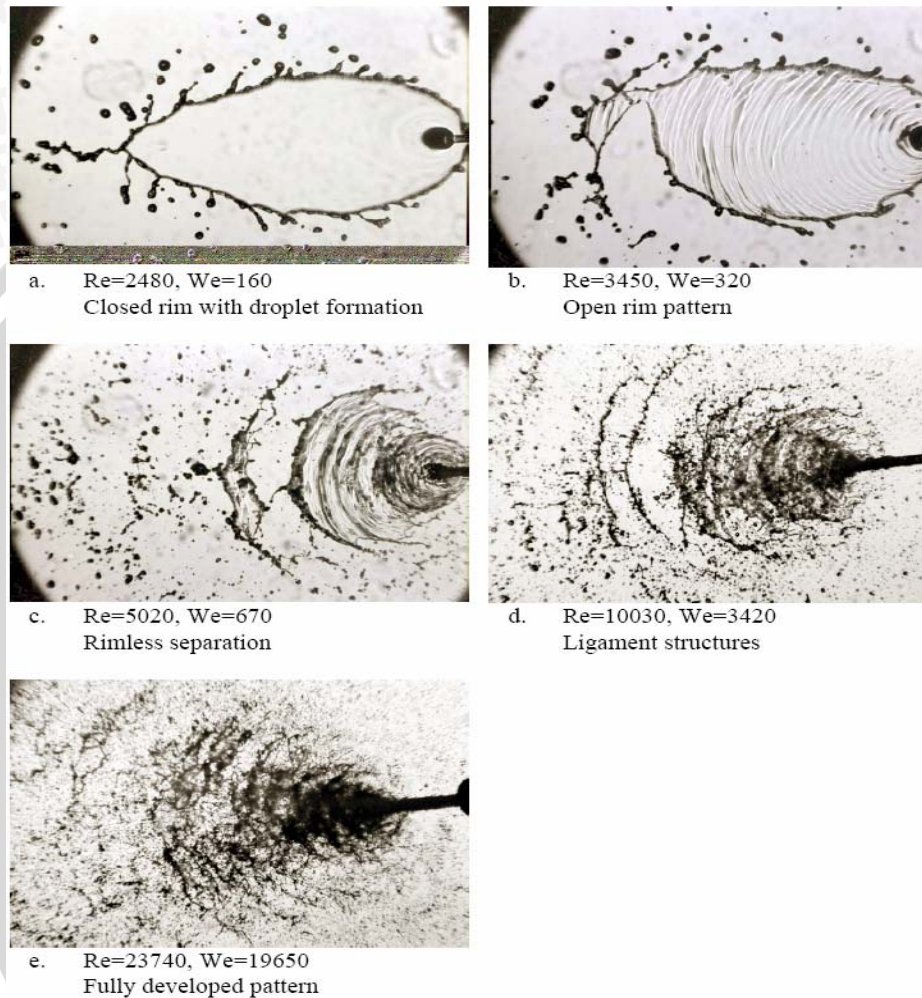


Fig. 4: Shadowgraph images of the atomization behavior of water at different  $Re$  and  $We$  numbers.  $Oh=0.0044$

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*.  
<http://www.lowenstein.com/pdf/spray06manuscriptfinal>.

## 2.2 Bahan Bakar

Ditinjau dari sudut teknis bahan bakar 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, 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 pepadatan 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. Unsur-unsur lain yang terkandung dalam bahan bakar namun tidak dapat terbakar adalah nitrogen, air dan bahan mineral atau abu. Komponen-komponen ini disebut sebagai bahan yang tidak dapat terbakar.

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 dan bahan bakar gas (Wijayanti, 2003).

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. Bahan bakar nuklir dan fosil adalah bahan bakar



yang tidak bisa diperbarui. Contoh dari bahan bakar nuklir adalah uranium dan plutonium. 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%.

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 aromatik. Berdasarkan kegunaannya bahan bakar cair terbagi menjadi dua kelas, yaitu *light oil* biasanya dipakai untuk bahan 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 kami 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 ini, 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 antara  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , HHV  $44\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  serta LHV  $42\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ .

Untuk pembakaran minyak tanah, AFR stoikiometri didapat dari persamaan reaksi seperti berikut :



Rumus kimia	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$
Berat molekul	170	32	28
Massa molekul	170	592	1947,68

$$\text{AFR} = \frac{\text{massa molekul udara}}{\text{massa molekul bahan bakar}} = \frac{1947,68 + 592}{170} = 14,9393$$

Selain nilai kalor dan titik didih, sifat-sifat minyak tanah dapat dilihat pada tabel 2.1.

Table 2.1 Requirements for Kerosene ( 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 adalah suatu reaksi kimia, yaitu reaksi oksidasi yang berlangsung pada suhu tinggi, berjalan sangat cepat dan disertai lepasnya sejumlah kalor atau cahaya (Turns 1996 ; 6). Reaksi pembakaran dapat terjadi jika terdapat bahan bakar, udara dan suhu tinggi yang mencapai titik nyala bahan bakar. Reaksi pembakaran terjadi pada fase uap, kecuali 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. Reaksi pembakaran sempurna dari bahan bakar dan udara akan menghasilkan H<sub>2</sub>O dan CO<sub>2</sub>, 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 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 eksoterem. Reaksi eksoterem memiliki pengertian bahwa termodinamika sistem melepaskan energi dalam bentuk panas ke lingkungan. Jika ditinjau secara termodinamika reaksi eksoterem akan menyebabkan sistem melepaskan sejumlah enthalpi keluar sistem melalui batas sistem. Oleh karena itu reaksi pembakaran secara lengkap dengan melibatkan pula perubahan energinya adalah ;



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 <sub>2</sub>	20,99	23,19	32
N <sub>2</sub>	78,03	75,47	28,016
Argon (Ar)	0,49	1,30	39,944
CO <sub>2</sub>	0,03	0,04	44,003
H <sub>2</sub>	0,01	0,00	2,016
Udara kering	100,00	100,00	28,016

Sumber : Milton, 1993 : 273

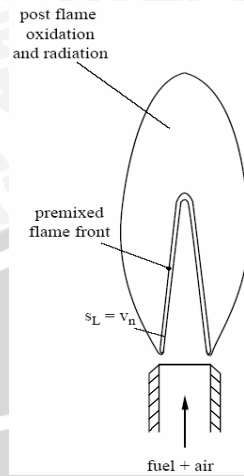
Karena reaksi pembakaran dapat melepaskan sejumlah energi panas, reaksi ini merupakan salah satu cara untuk mendapatkan kalor. Melalui reaksi pembakaran, akan terjadi konversi energi kimia yang dimiliki oleh bahan bakar menjadi energi panas. Pada umumnya reaksi pembakaran disertai dengan timbulnya nyala 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.
5. Perlu adanya pemantik sebagai energi aktivasi agar terjadi reaksi pembakaran.

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. Bentuk api pada pembakaran premiks dapat dilihat pada gambar 2.2.

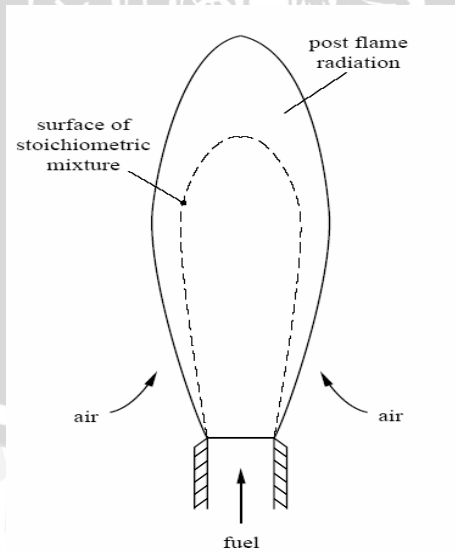




Gambar 2.2 Bentuk api pada pembakaran premiks

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 stoikhiometrik 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. Bentuk api pada pembakaran difusi dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 : Bentuk api pada pembakaran difusi

Sumber : *Fifteen Lectures on Laminar and Turbulent Combustion*

### 2.3.1 Mekanisme pembakaran bahan bakar cair

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. Atomisasi pada penelitian ini menggunakan nosel yang bertekanan dan pemanasan awal bahan bakar.

Pada pembakaran yang menggunakan bahan bakar cair, agar bahan bakar dapat terbakar maka perlu dilakukan penguapan. Agar penguapan mudah terjadi maka perlu dilakukan pengkabutan atau atomisasi. Atomisasi yang baik akan menghasilkan permukaan kontak antara bahan bakar dan udara semakin luas. Dengan semakin luasnya permukaan kontak antara bahan bakar dan udara maka penguapan mudah terjadi. Pada proses pengkabutan bahan bakar cair, mula-mula bahan bakar tersebut akan berbentuk *droplet*, kemudian *droplet* tersebut akan menguap ke udara secara difusi. Uap dari penguapan bahan bakar cair akan menyala apabila mencapai titik nyalanya. 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 :

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

dimana :

$Q$  = energi total penguapan (kJ/kg)

$\Delta h_v$  = kalor laten (kJ/kg)

$C_{liq}$  = kalor jenis bahan bakar (kJ/kg.°C)

$T_s$  = temperatur permukaan *droplet* (°C)

$T_o$  = temperatur awal *droplet* (°C)

Proses atomisasi sangat penting dalam proses pembakaran bahan bakar cair, proses atomisasi yang baik akan mengurangi kehilangan kadar karbon pada proses pembakaran, sehingga akan mengurangi penumpukan jelaga dan penumpukan endapan pada permukaan perpindahan panas. Proses atomisasi yang baik akan menurunkan kebutuhan udara berlebih sehingga temperatur hasil pembakaran akan meningkat dan bahan bakar yang digunakan akan lebih sedikit.

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) yang 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.

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 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.

Untuk menimbulkan pembakaran yang lebih 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 atau terjadi yaitu ;

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

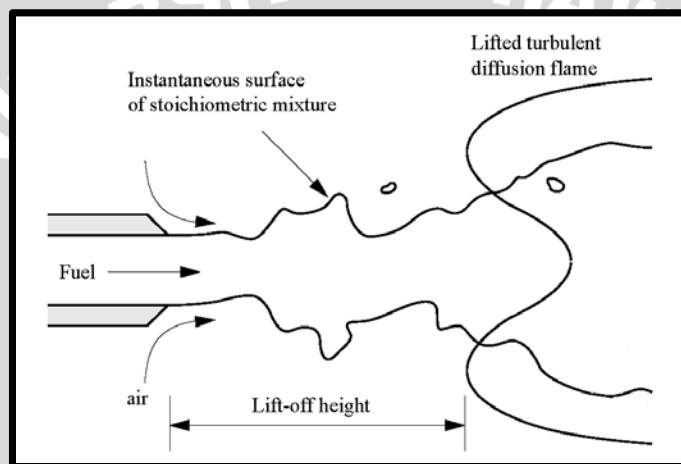
LIL adalah suatu batas tidak lagi terjadi pembakaran karena mol udara pembakaran terlalu banyak dibandingkan mol bahan bakar. Sedangkan UIL adalah suatu batas tidak lagi terjadinya pembakaran karena mol udara pembakaran terlalu sedikit dibandingkan dengan mol bahan bakar. Dengan demikian, keberadaan 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.

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 pembakaran, 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 laminar, kemudian bila kecepatan aliran ditingkatkan, aliran akan berada pada kondisi turbulen.

Kondisi *lift off* didefinisikan sebagai suatu kondisi api yang terjadi saat api mulai tidak menempel pada mulut nosel (Gambar 2.4). Hal ini terjadi karena kecepatan api lebih kecil dari kecepatan gas reaktan, sehingga api akan bergerak menjauhi mulut nosel.



Gambar 2.4 : Skema *lift off* pada api difusi *jet*  
Sumber : Peters, 1997: 95

*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.

### 2.3.2 Temperatur pembakaran

Entalpi pembakaran bahan bakar didefinisikan sebagai panas yang dilepaskan bila satu mol bahan bakar direaksikan dengan oksigen pada pembakaran sempurna sehingga temperatur produk dapat kembali ke temperatur reaktan dan proses berlangsung pada tekanan konstan. Kalor pembakaran merupakan selisih enthalpi zat hasil reaksi pembakaran (produk) dengan enthalpi zat pereaksi (reaktan) ( $\Delta Q = H_p - H_R$ ) yang mana suhu pembakarannya diukur pada keadaan fase gas. Suhu pembakaran merupakan suatu nilai yang terukur alat pengukur suhu dari hasil pembakaran bahan bakar. Temperatur pembakaran adiabatik adalah temperatur maksimum yang dihasilkan

oleh produk pembakaran bila reaksi pembakaran berlangsung secara sempurna dan semua panas yang dilepaskan digunakan sebagai panas produk (Wijayanti : 2003, 45). Perhitungan temperatur pembakaran adiabatik berguna untuk memberi batas kemampuan material-material yang akan digunakan sebagai ruang bakar dan temperatur maksimum yang dapat dicapai oleh suatu bahan bakar bila dibakar. Suatu pembakaran lazim menggunakan udara lebihan untuk memastikan terjadinya pembakaran sempurna. Udara lebihan akan menurunkan temperatur pembakaran adiabatik, karena energi yang diperlukan digunakan untuk menaikkan temperatur udara yang tidak bereaksi.

Temperatur pembakaran adiabatik ada dua yaitu temperatur pembakaran pembakaran adiabatik pada tekanan konstan dan pada volume konstan. Pada pembakaran adiabatik tekanan konstan enthalpi reaktan diindikasikan pada temperatur 25°C dan tekanan 1 atm. Persamaan ini dapat dituliskan

$$H_{\text{react}}(T_i, P) = H_{\text{prod}}(T_{\text{ad}}, P) \quad (\text{Turns : 1996, 32})$$

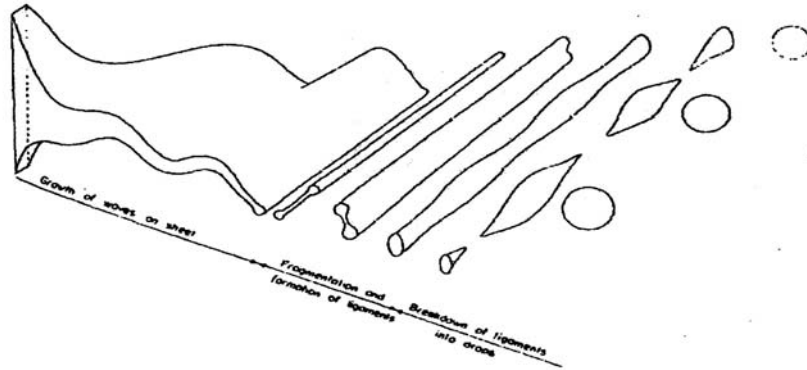
$H_{\text{react}}(T_i, P)$  = Temperatur reaktan pada temperatur dan tekanan atmosfer.

$H_{\text{prod}}(T_{\text{ad}}, P)$  = Temperatur produk yang terjadi bila pembakarannya sempurna pada tekanan konstan dan adiabatik (tidak ada kalor keluar sistem).

Bila pembakaran yang terjadi bukan pembakaran sempurna dan sebagian kalor hasil pembakaran hilang ke lingkungan, temperatur yang terukur disebut sebagai temperatur pembakaran.

## 2.4 Atomisasi

Atomisasi adalah proses pemecahan fluida cair menjadi butiran-butiran kecil (*droplet*). Proses atomisasi menghasilkan aliran fluida cair dalam bentuk *spray* (semprotan). Atomisasi fluida cair dapat dilakukan dengan cara mengalirkan fluida bertekanan tinggi melewati nosel. Untuk memecah aliran fluida menjadi *droplet* diperlukan energi. Dalam nosel energi biasanya berbentuk energi tekanan. Energi tekanan dikonversikan menjadi energi kecepatan dengan mengalirkan fluida nosel. Fluida keluar dari mulut nosel dengan kecepatan tinggi. Fluida keluar dari nosel dalam bentuk lembaran-lembaran. Selanjutnya muncul gangguan dari lingkungan sekitar pada aliran fluida sehingga berbentuk *ligamen* atau batang, selanjutnya *ligamen* hancur dengan mekanisme *brake-up* dan berbentuk *droplet*.

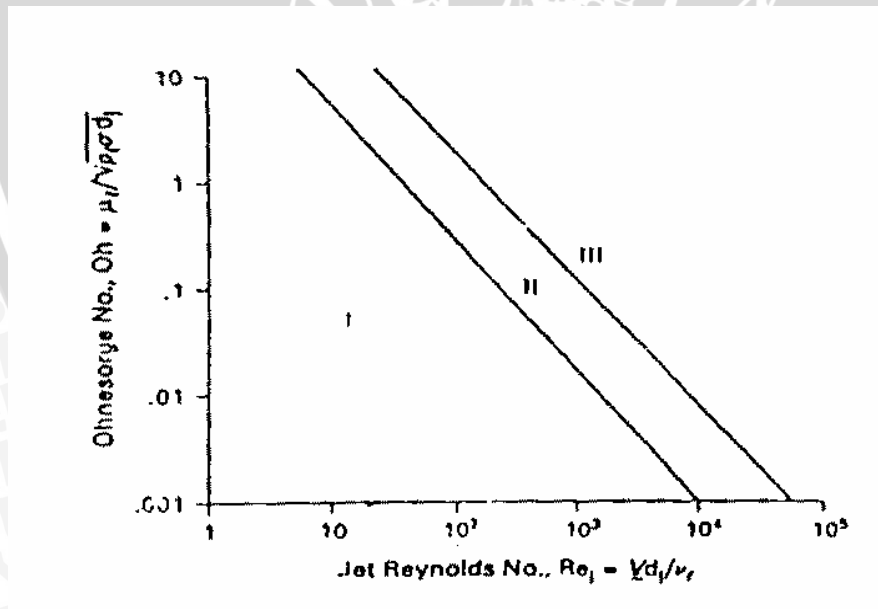


Gambar 2.5 : Mekanisme pembentukan *droplet*.

Sumber : [www.forms.gradsach.psu.edu/equity/sroppapers/2005/delgadojorge](http://www.forms.gradsach.psu.edu/equity/sroppapers/2005/delgadojorge).

Karakteristik atomisasi dipengaruhi oleh tiga bilangan tak berdimensi :  $Re_j$ ,  $We_j$  dan  $Oh$ . Bilangan Reynolds merupakan parameter tak berdimensi yang menunjukkan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya viskos dari suatu fluida. Bilangan Weber merupakan parameter tak berdimensi yang menyatakan perbandingan antara gaya dinamik terhadap gaya tegangan permukaan suatu fluida.

Tingkat atomisasi pada nosel digambarkan dengan grafik hubungan  $\log Oh$  dengan  $\log Re_j$  dibagi menjadi tiga zona. Tingkat atomisasi diplot pada grafik  $\log Oh$  Vs  $\log Re_j$  yang ditunjukkan pada gambar 2.6 dibawah ini :



Gambar 2.6 : Tingkat atomisasi pada nosel

Sumber : Borman, 1998 : 292.

Dari grafik diatas, terlihat bahwa proses pembentukan *spray* dibagi menjadi tiga daerah pada grafik  $\log Oh$  Vs  $\log Re_j$ . Pada daerah I pembentukan *droplet* dipengaruhi oleh



efek tegangan permukaan pada jet. *Break up* pada daerah II disebabkan oleh pengaruh udara luar. Dalam daerah III mekanisme *break up* dipengaruhi oleh kombinasi udara lingkungan dan turbulensi aliran.

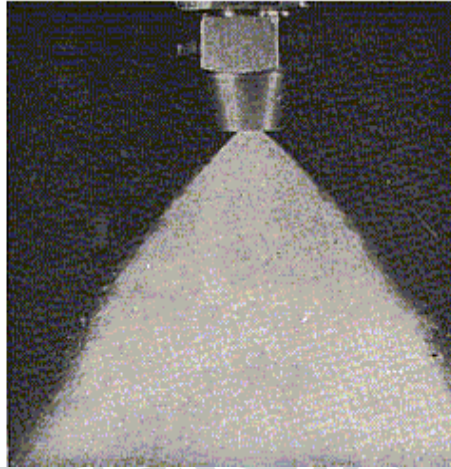
## 2.5 Nosel

Nosel digunakan untuk mengkonversikan tekanan menjadi energi kecepatan. Ada tiga jenis dari nosel, yaitu :

1. Nosel konvergen yaitu nosel dengan diameter *inlet* lebih besar daripada diameter *outlet*. Bentuk nosel konvergen dibagi menjadi dua yaitu *contour* nosel dan *conical* nosel.
2. Nosel divergen adalah nosel dengan diameter *inlet* lebih kecil daripada diameter *outlet*.
3. Nosel konvergen divergen adalah gabungan antara nosel konvergen dan divergen dengan memiliki *throat*.

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 nosel ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



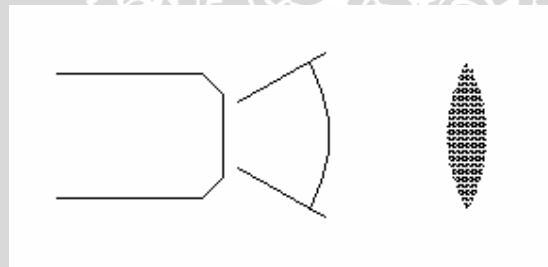
Gambar 2.7 : Atomisasi pada nosel

Sumber : *Fuel nozzle for oil burner*

Macam-macam pola semprot/spray pattern :

1. *Flat spray*

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

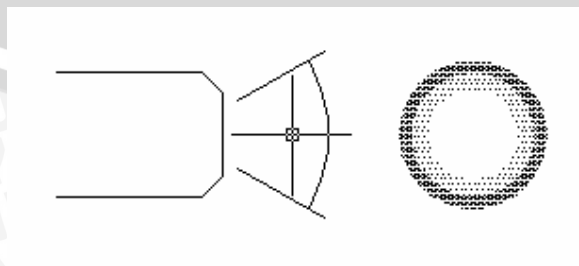


Gambar 2.8 : *Flat spray*.

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

2. *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.

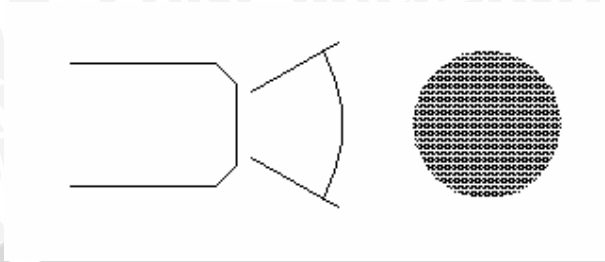


Gambar 2.9 : *Hollow cone spray*.

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

### 3. *Solid cone spray.*

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

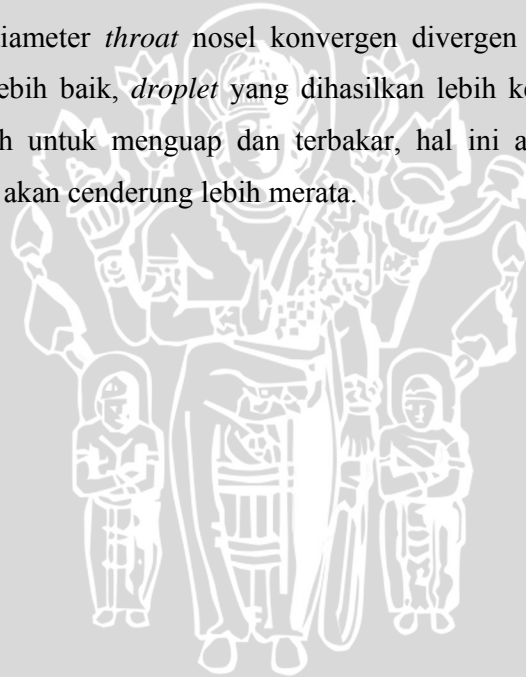


Gambar 2.10 : *Solid cone spray.*

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

## 2.6 Hipotesa

Semakin kecil diameter *throat* nosel konvergen divergen akan menghasilkan proses atomisasi yang lebih baik, *droplet* yang dihasilkan lebih kecil sehingga bahan bakar akan lebih mudah untuk menguap dan terbakar, hal ini akan mengakibatkan distribusi temperaturnya akan cenderung lebih merata.





### BAB III METODE PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

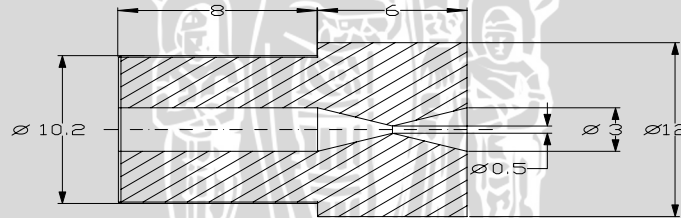
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental nyata (*true experimental research*). Pada penelitian ini dilakukan pengamatan secara langsung untuk mengetahui hubungan atau pengaruh dari sebab akibat suatu perlakuan tertentu. Obyek yang akan diamati pada penelitian ini adalah pengaruh diameter *throat* nosel konvergen divergen terhadap distribusi temperatur pada proses pembakaran difusi minyak tanah.

#### 3.2 Variabel Penelitian

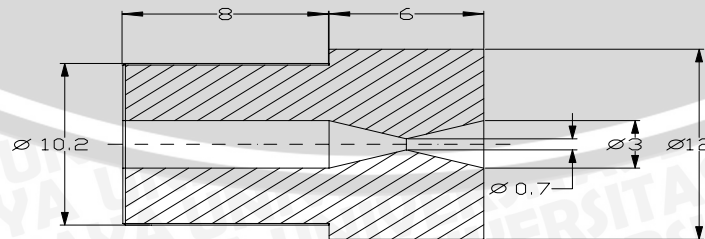
Pada penelitian ini ada tiga variabel yang akan diukur yaitu :

##### 1. Variabel bebas

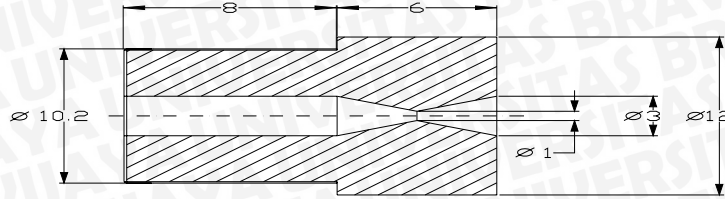
Variabel bebas adalah variabel yang tidak dipengaruhi oleh variabel lain. Besarnya variabel bebas bisa diubah-ubah atau konstan, sehingga didapat hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat. Pada penelitian ini variabel bebasnya adalah ukuran *throat* nosel konvergen divergen, divariasikan dengan ukuran diameter *throat* 0,5 mm, 0,7 mm dan 1 mm.



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 distribusi temperatur.

## 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 Pelaksanaan Penelitian

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

### 3.4 Alat-alat Penelitian

#### 1. Kompresor

Kompresor digunakan untuk memberikan tekanan didalam tangki bahan bakar sesuai dengan tekanan yang diinginkan, dengan spesifikasi :

Model : C-FC1-24 HP 0,5 LAKONI 125X

Tegangan : 220 V

Tekanan : 240 Psi

#### 2. Tangki bahan bakar

Tangki bahan bakar ini digunakan untuk menampung bahan bakar dengan kapasitas lima liter. Tangki ini akan dihubungkan dengan kompresor untuk memberikan tekanan dalam tangki agar fluida minyak tanah dapat mengalir menuju nosel.

#### 3. Manometer

Manometer digunakan untuk mengukur beda tekanan pada *orifice* saluran udara dan bahan bakar untuk mengetahui kecepatan udara dari blower dan debit bahan bakar minyak tanah.

#### 4. Nosel

Nosel digunakan untuk menyemprotkan bahan bakar, mendistribusikan bahan bakar ke ruang bakar, atomisasi bahan bakar dan mengatur kecepatan bahan bakar.

#### 5. Blower

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

Model	: <i>electric blower</i>
Ukuran	: 2"
Tegangan	: 220 V
Arus	: 1 A
Putaran	: 3600 rpm

#### 6. Termokopel

Termokopel ini digunakan untuk membaca temperatur api pada ruang bakar dan gas hasil pembakaran.

Spesifikasi

Jenis	: tipe K
Bahan	: nickel-chromium vs. nickel-aluminum
Kemampuan	: max. temperature 1250 °C

#### 7. Operational Amplifier (OP-Amp)

Alat ini digunakan untuk menguatkan tegangan yang ditimbulkan termokopel agar terbaca ADC.

#### 8. Analog to Digital Converter (ADC)

Alat ini digunakan untuk mengubah sinyal analog keluar dari OP-Apm menjadi sinyal digital sehingga dapat terbaca oleh komputer.

#### 9. Komputer

Komputer digunakan untuk membaca dan merekam sinyal dari rangkaian termokopel yang telah dikonversikan oleh ADC.

#### 10. Pemanas bahan bakar

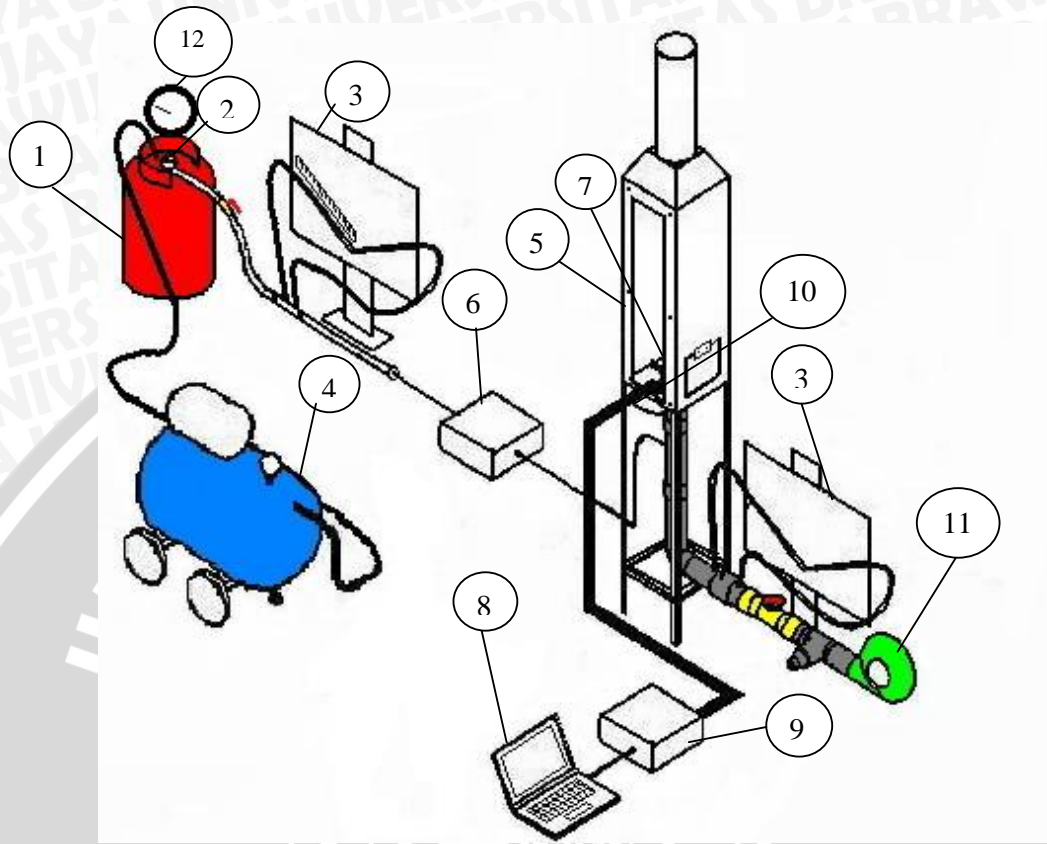
Pemanas bahan bakar digunakan untuk memanaskan bahan bakar sebelum melalui nosel sehingga bahan bakar bisa mengabut.

#### 11. Pressure gauge

Untuk mengetahui besarnya tekanan dalam tabung bahan bakar



► Instalasi Alat Penelitian



Gambar 3.4 Instalasi alat penelitian

Keterangan :

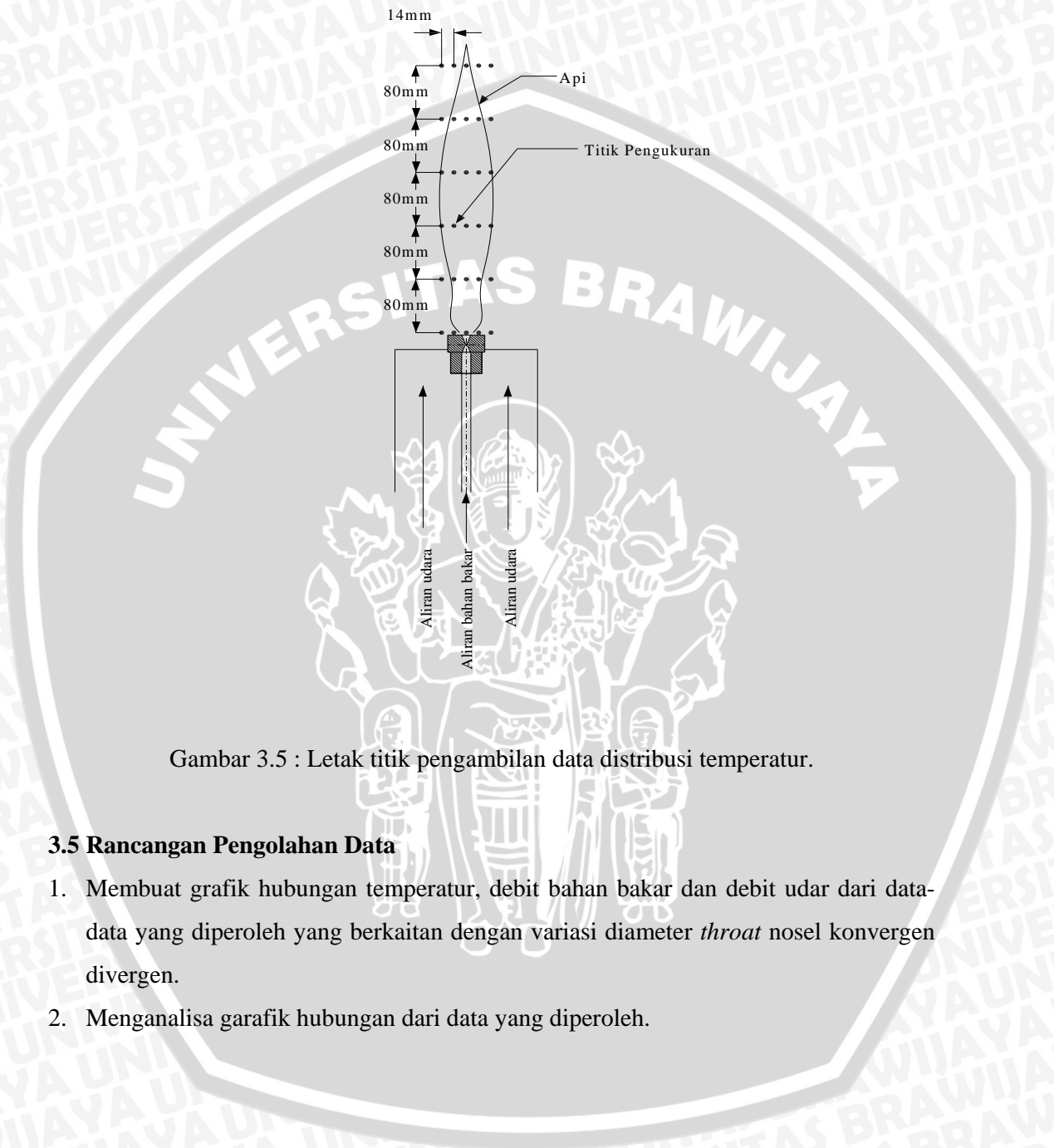
- 1. Tabung bahan bakar
- 2. Katup bahan bakar
- 3. Manometer
- 4. Kompresor
- 5. Ruang bakar
- 6. Pamanas bahan bakar

- 7. Nosel
- 8. Komputer
- 9. ADC
- 10. Termokopel
- 11. Blower
- 12. *Pressure Gauge*

➤ **Prosedur pengambilan data**

Untuk mendapatkan data distribusi temperatur, 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* 0,5 mm pada ujung saluran bahan bakar dalam ruang bakar.
3. Mengatur bukaan blower sehingga menghasilkan debit udara sebesar  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .
4. Mengatur bukaan katup bahan bakar pada debit  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ .
5. Melakukan pemanasan awal bahan bakar pada saluran bahan bakar agar bahan bakar yang keluar dari nosel mencapai temperatur  $160^\circ\text{C}$ .
6. Menyalakan api pada kondisi bahan yang keluar nosel mencapai temperatur  $160^\circ\text{C}$ .
7. Mengukur distribusi temperatur pada posisi yang telah ditentukan seperti pada gambar 3.5.
8. Mengulangi langkah no 4 sampai no 7, pada variasi debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan  $4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ .
9. Mengulangi langkah no 3 sampai no 9 pada variasi debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  dan  $1,724 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .
10. mengulangi langkah no 2 sampai no 9 untuk nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 0,7 mm dan 1 mm.



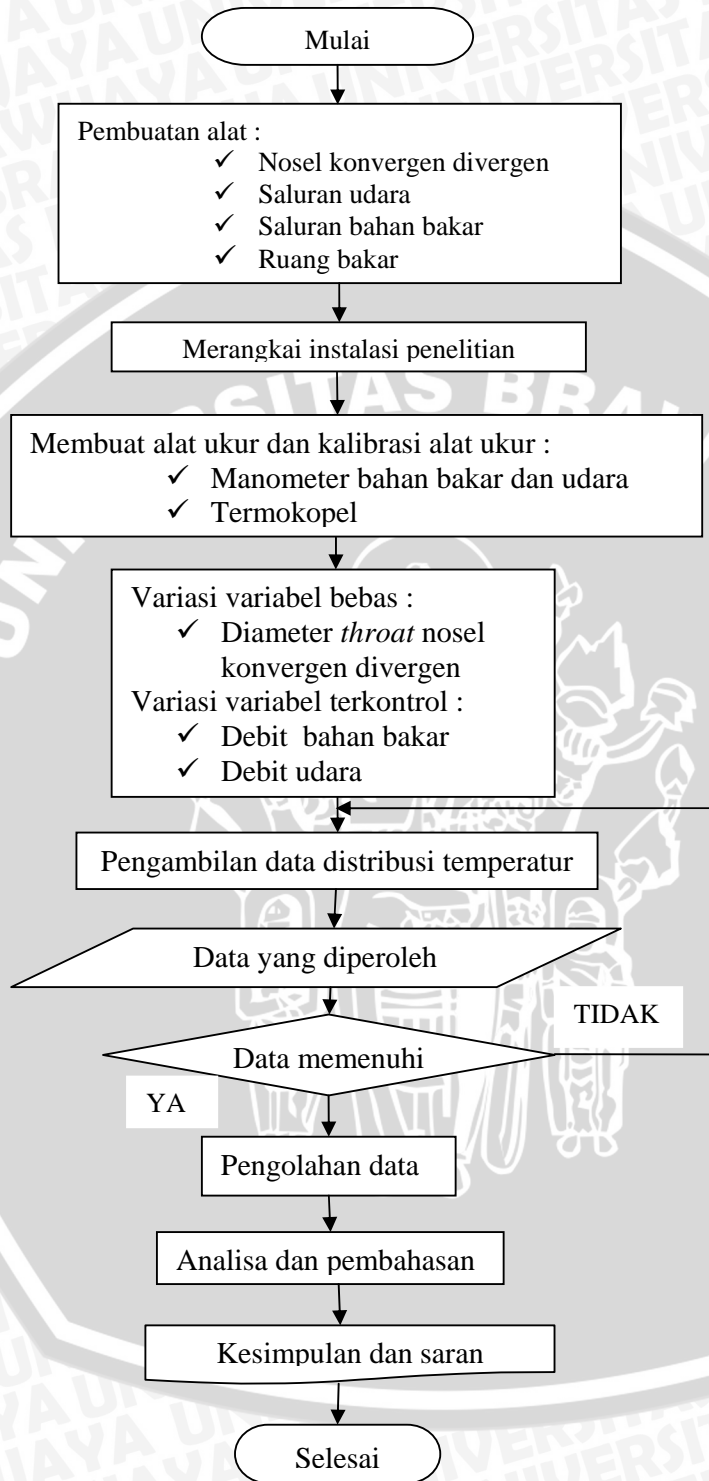
Gambar 3.5 : Letak titik pengambilan data distribusi temperatur.

### 3.5 Rancangan Pengolahan Data

1. Membuat grafik hubungan temperatur, debit bahan bakar dan debit udar dari data-data yang diperoleh yang berkaitan dengan variasi diameter *throat* nosel konvergen divergen.
2. Menganalisa grafik hubungan dari data yang diperoleh.



3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.6 : Diagram alir penelitian

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Data Hasil Penelitian

Data penelitian ini berupa distribusi temperatur pada ruang bakar yang diukur menggunakan sensor panas yaitu termokopel. Termokopel tersebut dihubungkan dengan ADC (*Analog to Digital Converter*) untuk memperoleh data digital pada komputer. Jumlah termokopel sebanyak 5 buah dipasang secara horisontal dengan jarak 1,4 cm tiap sensornya. Titik pengambilan data distribusi temperatur secara vertikal diperoleh dengan menggeser sensor termokopel ke arah vertikal ke atas sepanjang 8 cm sampai mencapai ketinggian 40 cm.

Data distribusi temperatur diambil pada pembakaran dengan variasi diameter *throat* nosel konvergen divergen yang digunakan untuk nosel bahan bakar. Diameter *throat* nosel divariasikan sebesar 0,5 mm, 0,7 mm dan 1 mm. Untuk setiap nosel debit bahan bakar divariasikan sebesar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $3,66 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan  $4,23 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara divariasikan sebesar  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  dan  $1,724 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Data temperatur pada setiap titik diambil selama 20 detik, dengan jumlah data 100. Data temperatur yang diperoleh pada satu titik untuk setiap pengambilan data, dirata-rata untuk menentukan temperatur pada titik tersebut. Dalam penelitian ini pengambilan data diulangi sebanyak tiga kali untuk memastikan data diperoleh dengan tepat. Dari tiga kali pengambilan data diperoleh tiga data temperatur rata-rata pada suatu titik. Data yang sudah dirata-rata tersebut dirata-rata lagi untuk mendapatkan data temperatur pada suatu titik. Data yang diperoleh ditabelkan sebagai berikut.

Tabel 4.1 Data distribusi temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) dengan debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  diameter *throat* nosel konvergen divergen sebesar 0,5 mm

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	665,653	921,318	973,263	905,859	576,202
Tinggi 16 cm	555,885	847,878	923,616	877,763	638,076
Tinggi 24 cm	380,222	498,925	602,152	600,965	503,404
Tinggi 32 cm	304,318	414,613	485,313	477,904	407,091
Tinggi 40 cm	155,798	168,945	196,778	178,015	154,52

X : Posisi sensor pada arah horisontal (cm)

Y : Posisi sensor pada arah vertikal (cm)

Data lengkap mengenai distribusi temperatur pada setiap nosel dengan variasi debit bahan bakar dan udara dapat dilihat pada lampiran 3.

## 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 constanta kalibrasi ( $C_b$ ). " $C_b$ " merupakan perbandingan antara debit bahan bakar yang mengalir aktual ( $Q_{aktual}$ ) 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 ( $\rho_{bb}$ )	= 835 kg.m <sup>-3</sup>
Massa jenis air manometer ( $\rho_m$ )	= 1000 kg.m <sup>-3</sup>
Diameter saluran bahan bakar ( $d_1$ )	= 7 mm= 0,007 m
Diameter dalam orifis ( $d_2$ )	= 3,2 mm=0,0032 m
Beda ketinggian yang ditunjukkan manometer ( $\Delta h$ )	= 2 mm=0,002 m
Percepatan gravitasi (g)	= 9,81 m.s <sup>-2</sup>

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

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \Delta h)}{\rho_{bb} \cdot (1 - \beta^4)}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot (1000 \cdot 9,81 \cdot 0,002)}{835 \cdot (1 - 0,457^4)}}$$

$$= 0,222 \text{ m/s} = 222 \text{ mm/s}$$

- Kecepatan aliran bahan bakar ideal pada saluran

$$V_1 = \beta^2 V_2$$

$$= 0,457^2 \cdot 222 \text{ mm/s}$$

$$= 46,364 \text{ mm/s}$$



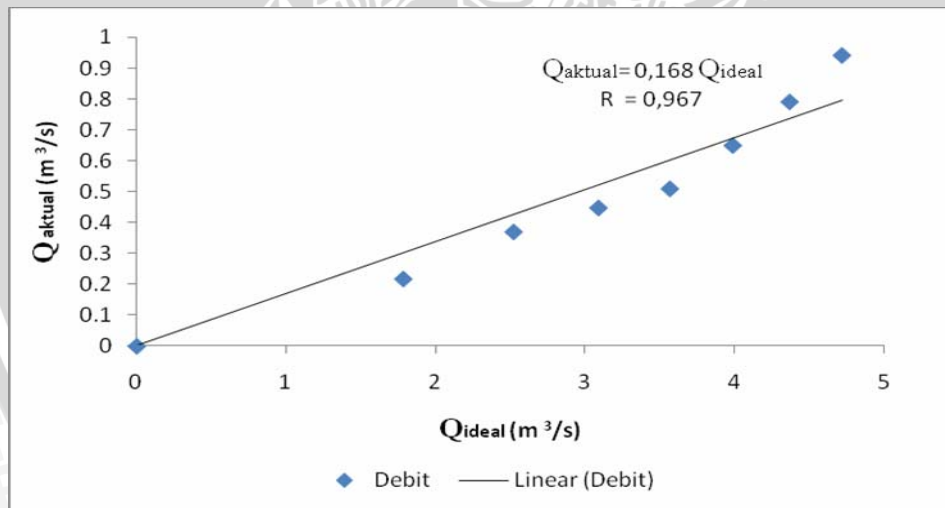
- Luas penampang saluran udara

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{4} \pi d_1^2 \\ &= \frac{1}{4} \pi 0,007^2 \\ &= 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 38,5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Debit bahan bakar ideal

$$\begin{aligned} Q_{\text{ideal}} &= V \cdot A \\ &= 46,364 \cdot 38,5 = 1785,014 \text{ mm}^3/\text{s} = 1,78014 \text{ cm}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$Q_{\text{aktual}}$  diukur dengan menampung banyaknya volume yang mengalir tiap satuan waktu. Pengukuran debit bahan bakar secara aktual ini dilakukan pada saat kalibrasi manometer bahan bakar.  $Q_{\text{aktual}}$  pada  $\Delta h$  sebesar 2 mm = 0,22 ml/s. Debit bahan bakar ideal ( $Q_{\text{ideal}}$ ) dan debit bahan bakar aktual ( $Q_{\text{aktual}}$ ) yang diperoleh selama kalibrasi dapat dilihat pada tabel 1.1 pada lampiran 1. Nilai tersebut kemudian dibuat grafik, dengan debit bahan bakar ideal sebagai absis dan debit bahan bakar ideal 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 ( $Q_{\text{aktual}}$ ) dengan debit udara ideal ( $Q_{\text{ideal}}$ ). Debit udara ideal dihitung dengan data yang diketahui sebagai berikut :

Dengan mengambil contoh data pada saat beda ketinggian manometer udara 0,005 m.

Data yang diketahui :

Massa jenis udara ( $\rho_{ud}$ )	= 1,29 kg.m <sup>-3</sup>
Diameter saluran udara ( $d_1$ )	= 0,027 m
Diameter orifis ( $d_2$ )	= 0,012 m
Beda ketinggian manometer pada manometer orifis ( $\Delta h$ )	= 0,005 m

Contoh perhitungan :

- Rasio diameter orifis dengan saluran bahan bakar :

$$\beta = d_2/d_1 = 0,012/0,027 = 0,44$$

- Kecepatan aliran udara ideal pada orifis ( $V_2$ )

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_{bb} \cdot g \cdot \Delta h)}{\rho_{ud} \cdot (1 - \beta^4)}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot (835 \cdot 9,81 \cdot 0,005)}{1,29 \cdot (1 - 0,44^4)}}$$

$$= 8,122 \text{ m/s}$$

- Kecepatan aliran udara ideal pada saluran ( $V_1$ )

$$V_1 = \beta^2 \cdot V_2$$

$$= 0,44^2 \cdot 8,122$$

$$= 1,572 \text{ m/s}$$

- Luas penampang saluran udara

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

$$= \frac{1}{4} \pi \cdot 0,027^2$$

$$= 0,00057 \text{ m}^2$$

- Debit udara ideal ( $Q_{ideal}$ )

$$Q_{ideal} = V_1 \cdot A$$

$$= 1,572 \text{ m/s} \cdot 0,00057 \text{ m}^2$$

$$= 0,000896 \text{ m}^3/\text{s}$$

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 ( $\Delta h$ ) 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

$$\Delta h_1 = 0,0000508 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} V_{aktual1} &= \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \Delta h_1)}{\rho_{ud}}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot (1000 \cdot 9,81 \cdot 0,0000508)}{1,29}} \\ &= 0,879 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan seperti diatas maka didapatkan

$$\Delta h_2 = 0,0000254 \text{ m}$$

$$V_{aktual2} = 0,622 \text{ m/s}$$

$$\Delta h_3 = 0,0000127 \text{ m}$$

$$V_{aktual3} = 0,439 \text{ m/s}$$

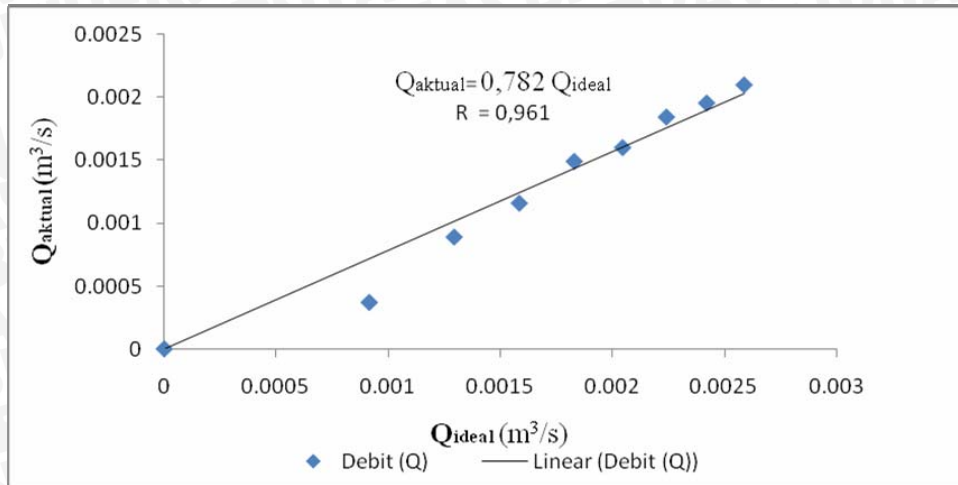
$$\begin{aligned} V_{aktual \text{ rata-rata}} &= (V_{aktual1} + V_{aktual2} + V_{aktual3}) / 3 \\ &= (0,879 \text{ m/s} + 0,622 \text{ m/s} + 0,439 \text{ m/s}) / 3 \\ &= 0,647 \text{ m/s} \end{aligned}$$

- Debit udara aktual

$$\begin{aligned} Q_{aktual} &= V_{aktual} \cdot A \\ &= 0,647 \text{ m/s} \cdot 0,00057 \text{ m}^2 \\ &= 0,000369 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

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 gradient 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 sebagai berikut :

Massa jenis minyak tanah ( $\rho_{bb}$ )	= 835 kg.m <sup>-3</sup>
Massa jenis air manometer ( $\rho_m$ )	= 1000 kg.m <sup>-3</sup>
Diameter saluran bahan bakar ( $d_1$ )	= 7 mm= 0,007 m
Diameter dalam orifis ( $d_2$ )	= 3,2 mm=0,0032 m
Beda ketinggian yang ditunjukkan manometer ( $\Delta h$ )	= 1 mm=0,001 m
Percepatan gravitasi ( $g$ )	= 9,81 m/s <sup>2</sup>

Contoh perhitungan :

- Rasio diameter orifis dan diameter saluran :

$$\beta = d_2/d_1 = 3,2/7 = 0,457$$

- Debit bahan bakar dalam saluran bahan bakar

$$\begin{aligned}
 Q &= C \cdot \beta^2 \cdot V \cdot A \\
 &= C \cdot (d_2/d_1)^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \Delta h)}{(\rho_{bb} \cdot (1 - \beta^4))}} \cdot \frac{1}{4} \pi d_1^2 \\
 &= 0,168 \cdot 0,457^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1000 \cdot 9,81 \cdot 0,001)}{(835 \cdot (1 - 0,457^4))}} \cdot \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 0,007^2 \\
 &= 2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Data lengkap mengenai debit bahan bakar selama penelitian dapat dilihat pada lampiran

2.

#### 4.2.4 Perhitungan debit udara

Debit udara diukur dengan menggunakan orifis dan manometer V.

Data yang diketahui sebagai berikut :

Massa jenis udara ( $\rho_{ud}$ )	= 1,29 kg.m <sup>-3</sup>
Diameter saluran udara ( $d_1$ )	= 0,027 m
Diameter orifis ( $d_2$ )	= 0,012 m
Beda ketinggian manometer pada manometer orifis ( $\Delta h$ )	= 0,005 m
Beda ketinggian manometer pada <i>pitot tube</i> ( $\Delta h$ )	= 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

$$Q = C \cdot \beta^2 \cdot V \cdot A$$

$$= C \cdot \beta^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \Delta h)}{(\rho_{bb} \cdot (1 - \beta^4))}} \cdot \frac{1}{4} \pi d_1^2$$

$$= 0,782 \cdot 0,44^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (835 \cdot 9,81 \cdot 0,006)}{(1,29 \cdot (1 - 0,44^4))}} \cdot \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 0,027^2$$

$$= 7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

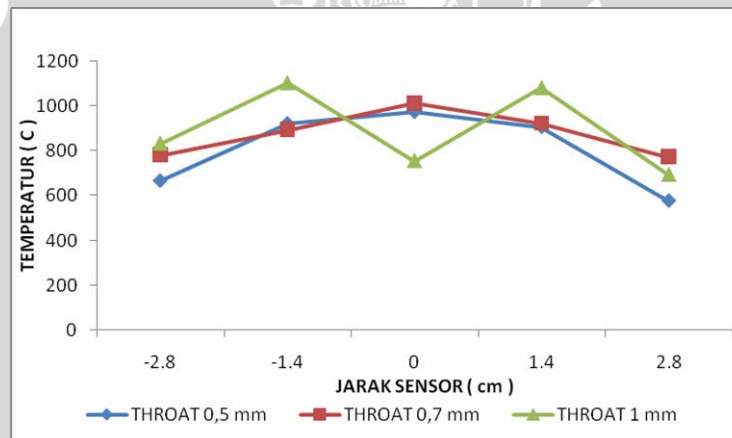
Data lengkap mengenai debit udara selama penelitian dapat dilihat pada lampiran 2.

### 4.3 Pembahasan

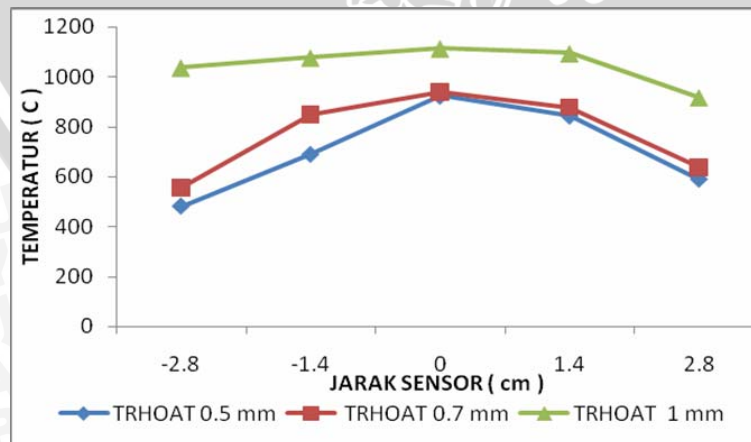
#### 4.3.1 Distribusi temperatur pada ruang bakar dengan variasi diameter *throat* nosel konvergen divergen

Distribusi temperatur pada ruang bakar dengan variasi diameter *throat* nosel konvergen divergen untuk debit bahan bakar  $2,993.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan debit udara  $7,715.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  kearah vertikal dapat dilihat pada gambar 4.3 sampai gambar 4.7. Distribusi temperatur kearah vertikal diukur mulai dari jarak 8 cm dari mulut nosel sampai ketinggian 40 cm. Kearah horisontal distribusi temperatur diukur mulai titik tepat ditengah mulut nosel yang dinyatakan pada grafik dengan titik 0. Jarak pengukuran 1,4 cm dan 2,8 cm dari titik 0 kearah sumbu X positif dan sumbu X negatif.

Grafik distribusi temperatur pada ruang bakar dengan variasi diameter *throat* nosel konvergen divergen untuk debit bahan bakar  $2,993.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan debit udara  $7,715.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  kearah vertikal dapat dilihat pada gambar 4.3 sampai gambar 4.7.

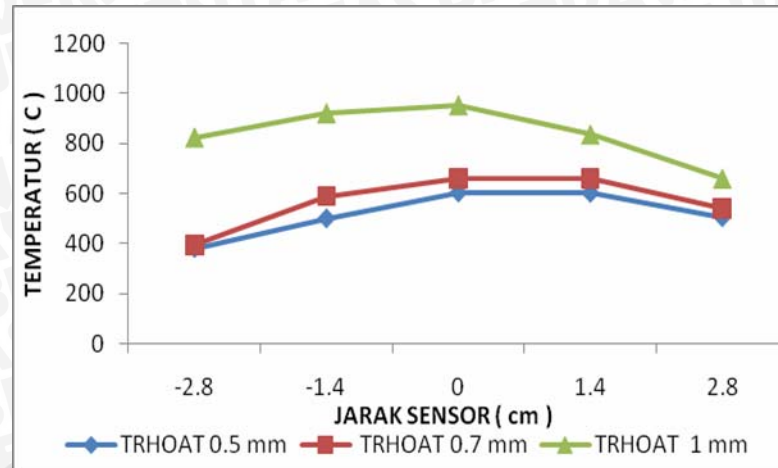


Gambar 4.3 : Grafik distribusi temperatur pada ketinggian 8 cm

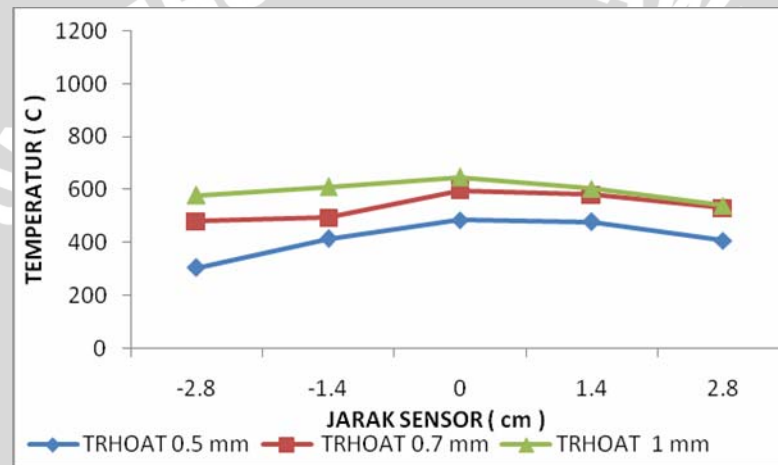


Gambar 4.4 : Grafik distribusi temperatur pada ketinggian 16 cm

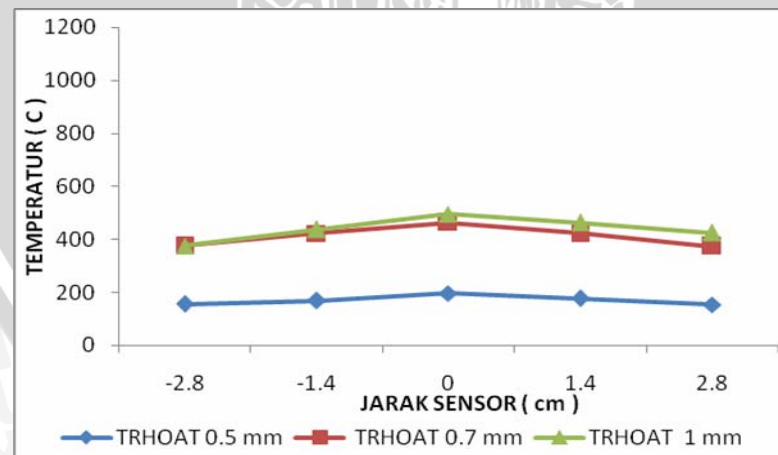




Gambar 4.5 : Grafik distribusi temperatur pada ketinggian 24 cm



Gambar 4.6 : Grafik distribusi temperatur pada ketinggian 32 cm



Gambar 4.7 : Grafik distribusi temperatur pada ketinggian 40 cm

Dari grafik distribusi temperatur pada debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  terlihat bahwa nosel dengan diameter *throat* yang lebih besar memiliki temperatur yang cenderung lebih tinggi pada setiap ketinggian. Pada

ketinggian sensor 8 cm nosel dengan diameter *throat* 1 mm temperaturnya cenderung lebih tinggi bila dibandingkan dengan nosel yang memiliki ukuran *throat* 0,5 mm dan 0,7 mm. Tetapi di bagian tengah temperaturnya mengalami penurunan bahkan lebih rendah daripada temperatur yang dimiliki nosel dengan diameter *throat* 0,5 mm dan 0,7 mm. Hal ini disebabkan nosel dengan diameter 1 mm pada debit bahan bakar yang mengalir sama akan memiliki kecepatan aliran bahan bakar yang lebih rendah. Apabila kecepatan aliran bahan bakar yang keluar dari nosel rendah maka *droplet* yang terbentuk akan berukuran lebih besar. *Droplet* yang berukuran besar akan perlu waktu yang lebih lama untuk berubah menjadi uap dan berdifusi dengan udara, sehingga *droplet* yang masih banyak berupa cairan tersebut akan menurunkan temperatur (penguapan dan pendifusiannya dengan udara belum sempurna).

Distribusi temperatur nosel dengan diameter *throat* 0,7 mm lebih merata bila dibandingkan dengan nosel dengan diameter *throat* 0,5 mm dan 1 mm. Hal ini disebabkan nosel dengan diameter *throat* 0,7 mm memiliki atomisasi yang lebih baik bila dibandingkan dengan nosel dengan diameter *throat* 1 mm dan kecepatan aliran bahan bakar yang tidak terlalu tinggi bila dibandingkan dengan nosel dengan diameter *throat* 0,5 mm. Sehingga distribusi temperatur nosel dengan diameter *throat* 0,7 mm lebih merata.

Nosel 1 mm memiliki temperatur yang lebih tinggi pada ketinggian 16 cm, 24 cm, 32 cm dan 40 cm. Pada ketinggian tersebut *droplet* sudah menguap lebih sempurna dan bahan bakar dapat berdifusi dengan udara dengan baik. Selain itu nosel dengan diameter yang lebih besar akan memiliki kecepatan aliran bahan bakar keluar nosel yang lebih kecil dibandingkan dengan *throat* yang lebih kecil. Dengan kecepatan aliran bahan bakar yang rendah akan terjadi keseimbangan antara reaktan (bahan bakar dan udara) dengan kecepatan pembakaran. Terjadinya keseimbangan reaktan (bahan bakar dan udara) dan kecepatan pembakaran akan menyebabkan pembakaran lebih sempurna. Pembakaran sempurna akan menghasilkan temperatur yang tinggi.

Api merupakan tempat terjadinya reaksi antara bahan bakar dan udara. Pada daerah tersebut temperaturnya sangat tinggi bila dibandingkan dengan daerah diluar api. Daerah api juga merupakan tempat pemanasan lanjut dari *droplet* agar *droplet* tersebut dapat menguap dan berdifusi dengan udara. Karena kecepatan aliran bahan bakar dari nosel dengan diameter *throat* yang lebih besar rendah, maka *droplet* akan keluar dari mulut nosel dengan kecepatan yang lebih rendah daripada nosel yang memiliki *throat* yang lebih kecil. Dengan kecepatan yang lebih rendah tersebut *droplet* akan



mendapatkan cukup waktu untuk mendapatkan pemanasan di daerah reaktan atau api. Sehingga bahan bakar akan mudah menguap dengan adanya pemanasan dari api. Untuk nosel dengan diameter *throat* yang lebih kecil karena memiliki kecepatan aliran bahan bakar yang lebih tinggi maka *droplet* akan bergerak lebih cepat. Dengan kecepatan yang tinggi, waktu pemanasan *droplet* pada daerah api akan kurang. *Droplet* tersebut akan lebih cepat meninggalkan daerah reaksi (api) sehingga pembakarannya kurang sempurna dan temperaturnya akan turun. Selain itu apabila bahan bakar yang berupa *droplet* kurang mendapatkan pemanasan maka bahan bakar tersebut banyak yang tidak terbakar. Karena bahan bakar tersebut belum menguap secara sempurna.

Hembusan gas panas dari daerah reaksi (api) dibawahnya juga mempengaruhi temperatur di atasnya, bila temperatur dibawahnya sudah tinggi maka temperatur di atasnya juga akan tinggi. Pemanasan mula terhadap *droplet* juga dipengaruhi oleh temperatur dibawahnya, apabila temperatur dibawahnya tinggi maka pemanasan terhadap *droplet* akan semakin baik, sehingga akan memudahkan *droplet* untuk menguap dan berdifusi dengan udara.

Pada debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  dan  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  nosel dengan diameter *throat* yang lebih kecil akan memiliki distribusi temperatur yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan nosel yang memiliki diameter *throat* yang lebih besar, fenomena ini dapat dilihat pada lampiran 4. Nosel dengan diameter *throat* yang lebih kecil, proses atomisasi yang terjadi lebih baik (*droplet* yang terbentuk lebih kecil) sehingga bahan bakar dapat menguap dengan mudah atau baik. Selain itu dengan debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  kecepatan dari aliran bahan bakar yang keluar dari nosel belum terlalu tinggi. Dengan kecepatan yang belum terlalu tinggi ini, maka akan terjadi keseimbangan antara reaktan (bahan bakar dan udara) dan kecepatan pembakaran. *Droplet* hasil dari proses atomisasi yang lebih kecil akan mudah untuk menguap. Bahan bakar terbakar bila berada pada fase uap, apabila *droplet* yang terbentuk dari proses atomisasi lebih kecil maka akan memudahkan bahan bakar tersebut untuk menguap. Apabila bahan bakar mudah menguap dengan disertai keseimbangan kecepatan pembakaran maka temperatur yang tinggi dapat dicapai. Namun pada debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  distribusi temperatur nosel dengan diameter *throat* 0,5 mm akan cenderung turun lebih rendah daripada nosel dengan diameter *throat* 1 mm. Dengan debit udara sebesar  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  maka kecepatan udara akan tinggi. Kecepatan yang tinggi ini akan menghembus ke daerah reaktan, sehingga daerah reaktan temperaturnya akan cenderung

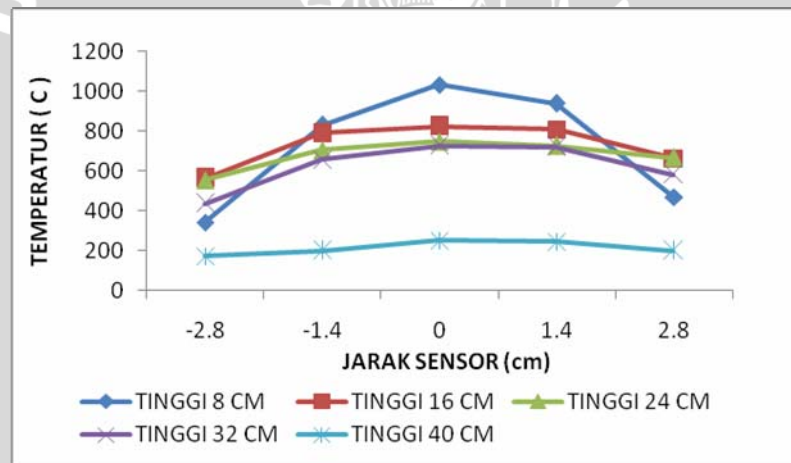


turun. Selain itu dengan debit udara yang berlebih maka temperatur hasil proses pembakaran akan terserap oleh udara berlebih tersebut.

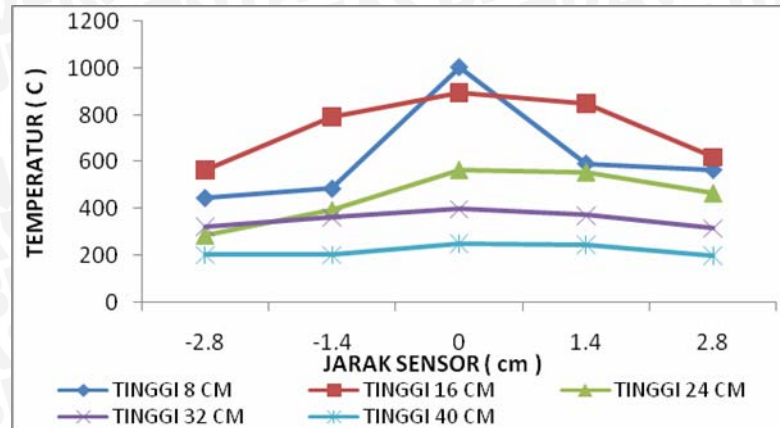
Temperatur yang tinggi dapat dicapai apabila proses atomisasi, keseimbangan antara aliran bahan bakar dan kecepatan pembakaran, pencampuran antara bahan bakar dan udara terjadi dengan baik. Sehingga apabila ketiga hal tersebut tidak memenuhi maka temperatur maksimum tidak bisa tercapai. Faktor keseimbangan laju aliran reaktan sangat berpengaruh terhadap temperatur. Temperatur yang tinggi dapat tercapai bila terjadi keseimbangan kecepatan aliran reaktan (bahan bakar dan udara) dan kecepatan rambat api.

**4.3.2 Distribusi temperatur pada ruang bakar disetiap titik pengambilan data**

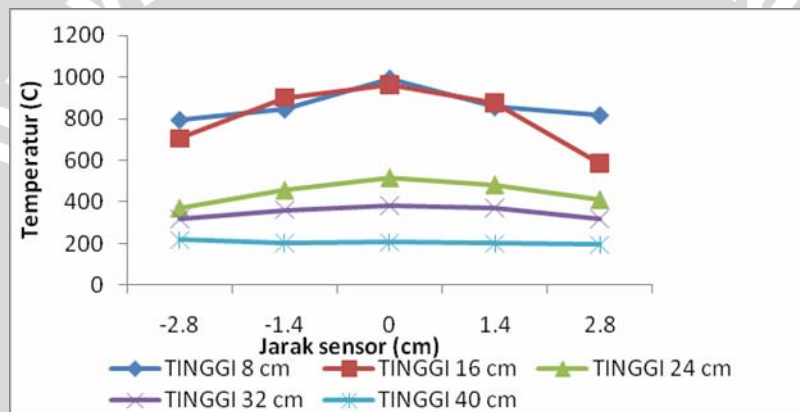
Grafik distribusi temperatur pada ruang bakar disetiap titik pengambilan data dengan debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  dapat dilihat pada gambar 4.8 sampai gambar 4.10.



Gambar 4.8 : Grafik distribusi temperatur nosel konvergen divergen dengan diameter throat 0,5 mm.



Gambar 4.9 : Grafik distribusi temperatur nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 0,7 mm.



Gambar 4.10 : Grafik distribusi temperatur nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 1 mm.

Pada debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  distribusi temperatur nosel dengan diameter *throat* 1 mm lebih merata. Disetiap titik pengambilan data distribusi temperaturnya cenderung lebih merata, hal ini disebabkan bahan bakar dari proses atomisasi memiliki kecepatan yang lebih rendah sehingga kecepatan reaktan hampir sama didaerah reaksi.

Nosel dengan *throat* 0,5 memiliki temperatur yang hampir sama disetiap titik pengambilan data (nilai temperaturnya berdekatan) untuk debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . Dengan debit tersebut laju aliran bahan bakar belum terlalu tinggi. Proses atomisasi pada nosel ini juga terjadi dengan baik. *Droplet* yang dihasilkan berukuran kecil sehingga *droplet* bahan bakar akan lebih mudah untuk menguap dan akan memudahkan untuk berdifusi dengan udara. Sehingga pada setiap

titik temperaturnya cenderung memiliki nilai yang hampir sama. Pada debit tersebut kecepatan laju aliran bahan bakar belum terlalu tinggi, sehingga terjadi keseimbangan laju reaktan (bahan bakar dan udara) dan kecepatan pembakaran. Selain itu dengan kecepatan laju bahan bakar yang keluar dari nosel belum terlalu tinggi, maka bahan bakar atau *droplet* masih mendapatkan pemanasan mula dengan baik. Apabila *droplet* mendapatkan pemanasan mula yang lebih baik akan memudahkan *droplet* untuk menguap. Proses penguapan yang lebih baik akan memudahkan bahan bakar berdifusi dengan udara. Apabila proses pendifusian bahan bakar dan udara lebih baik akan didapatkan campuran reaktan yang lebih homogen. Sehingga dari campuran yang lebih homogen ini akan terjadi proses pembakaran yang lebih sempurna.

Temperatur nosel dengan diameter *throat* 0,7 mm mempunyai nilai yang selisihnya lebih banyak pada debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  bila dibandingkan dengan nosel dengan diameter *throat* 0,5 mm. Pada setiap titik pengambilan data, nilai temperaturnya memiliki selisih yang tinggi. Hal ini disebabkan *droplet* dari proses atomisasi lebih besar sehingga perlu waktu untuk menguap dan kemudian berdifusi dengan udara. Begitu juga nosel dengan diameter *throat* 1 mm, selisih temperaturnya juga banyak pada debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  dan debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ . Di setiap ketinggian pengambilan data memiliki temperatur yang berbeda jauh (selisihnya lebih banyak bila dibandingkan dengan nosel dengan diameter *throat* yang lebih kecil). *Droplet* yang dihasilkan dari proses atomisasi memiliki ukuran yang lebih besar, sehingga *droplet* memerlukan waktu yang lebih lama untuk menguap. Bahan bakar terbakar pada fase uap, apabila waktu yang dibutuhkan penguapan bahan bakar lebih lama maka pendifusian bahan bakar dan udara akan kurang baik.

Pada debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  dan bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  nosel dengan diameter *throat* 1 mm temperaturnya cenderung lebih tinggi. Hal ini disebabkan terjadi keseimbangan antara laju aliran reaktan dan proses pembakaran, serta pada debit bahan bakar dan udara tersebut campurannya lebih homogen. Sehingga temperatur yang dihasilkan akan lebih tinggi. Temperatur yang tinggi dapat dicapai apabila terjadi keseimbangan laju aliran bahan bakar dan proses atomisasi yang baik.

Untuk nosel dengan diameter *throat* 1 mm, distribusi temperatur pada ketinggian 8 cm tidak berbeda jauh pada arah horisontal bila dibandingkan dengan distribusi temperatur pada nosel dengan diameter *throat* 0,5 mm dan 0,7 mm. Nosel dengan diameter *throat* yang lebih besar akan memiliki daerah reaksi yang lebih luas atau lebar



pada daerah pangkalnya. Sehingga distribusi temperaturnya kearah horisontal akan cenderung memiliki selisih yang lebih sedikit. Untuk nosel dengan diameter *throat* 1 mm kecenderungan selisih temperatur kearah horisontal tidak begitu tampak. Daerah reaksi pada ketinggian 8 cm lebih lebar bila dibandingkan nosel dengan diameter *throat* yang lebih kecil.

Nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 0,5 mm tidak bisa mencapai debit bahan bakar  $3,660.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan  $4,230.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ . Karena kecepatan bahan bakar pada debit tersebut akan lebih tinggi maka laju aliran bahan bakar dan laju pembakaran kurang seimbang (kecepatan laju aliran bahan bakar lebih tinggi dari kecepatan pembakaran) dan cepat terjadi *blow off*. Pada nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 1 mm debit bahan bakar bisa mencapai  $4,230.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  karena kecepatan aliran bahan bakarnya lebih rendah. Sehingga bahan bakar lebih mudah berdifusi dengan udara dan terjadi keseimbangan kecepatan aliran bahan bakar dan kecepatan pembakaran. Keadaan ini akan menyebabkan api menjadi lebih stabil. Namun pada ketinggian api 8 cm distribusi temperaturnya cenderung turun. Bahan bakar belum terbakar seluruhnya pada ketinggian tersebut. *Droplet* yang terbentuk dari proses atomisasi lebih besar sehingga perlu waktu yang lebih lama untuk menguap.

Debit bahan bakar maksimum untuk nosel dengan diameter *throat* 1 mm sebesar  $4,230.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , diameter *throat* 0,7 mm sebesar  $3,660.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  sedangkan diameter *throat* 0,5 mm sebesar  $2,993.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ . Hal ini disebabkan, pada nosel dengan diameter *throat* yang lebih kecil, kecepatan aliran bahan bakar keluar nosel lebih tinggi daripada nosel dengan diameter *throat* yang lebih besar, untuk debit bahan bakar yang sama. Sehingga nosel dengan diameter *throat* yang lebih kecil apabila debit bahan bakar ditambah maka akan terjadi ketidakseimbangan antara laju reaktan dan laju pembakaran. Keadaan ini akan mengakibatkan *blow off*.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian tentang pengaruh diameter *throat* nosel konvergen divergen terhadap distribusi temperatur pada proses pembakaran difusi minyak tanah didapatkan kesimpulan bahwa :

Nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 0,5 mm dan 0,7 mm memiliki distribusi temperatur yang lebih merata bila dibandingkan nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 1 mm untuk debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ . Akan tetapi semakin kecil diameter *throat* nosel konvergen divergen temperaturnya cenderung lebih rendah bila dibandingkan dengan diameter *throat* yang lebih besar.

### 5.2 Saran

Karena pada penelitian masih perlu banyak penyempurnaan disarankan adanya penelitian lebih lanjut.

1. Perlu adanya perbaikan pada alat pemanas dengan menggunakan suatu alat pemanas yang lebih terkontrol sehingga panas yang dihasilkan dari alat tersebut lebih 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/sroppapers/2002/delgadojorge.pdf>.
- El-Wakil. M. M.; 1992: *Instalasi Pembangkit Daya*. Erlangga, Jakarta.
- Gamayel, A.; 2005 : *Pengaruh Sudut Kemiringan 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](Http://www.Delavan.co.uk/pdfs/Fuel_Nozzles_For_Burners.pdf).
- Peters, N, 1995, *Four Lectures on Laminer and Turbulent combustion*, Ercoftac Summer School, Aachen, Germany.
- Prasaad, Raam, Dr. 2000. *Petroleum Refining Technology*. India. Khanna Publishers.
- 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.



### Lampiran 1. Data Debit Udara Dan Bahan Bakar Untuk Kalibrasi Manometer

1.1 Tabel debit bahan bakar aktual ( $Q_{\text{aktual}}$ ) dan debit bahan bakar ideal ( $Q_{\text{ideal}}$ )

Tabel  $\Delta h$ , debit bahan bakar aktual dan debit bahan bakar ideal.

$\Delta h$ (mm)	$Q_{\text{aktual}}$ (ml/s)	$Q_{\text{ideal}}$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )
0	0	0
2	0,217674406	1,78014
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

Tabel  $\Delta h$ , kecepatan aktual, debit aktual pada *pitot tube*.

$\Delta h_1$ (m)	$\Delta h_2$ (m)	$\Delta h_3$ (m)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$V_3$ (m/s)	$V_{\text{rata}}$ (m/s)	$Q_{\text{aktual}}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
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

Tabel kecepatan udara ideal dan debit udara ideal ( $Q_{\text{ideal}}$ )

$\Delta h$ manometer (m)	Kecepatan pada saluran ( $V_1$ ) (m/s)	$Q_{\text{ideal}}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
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

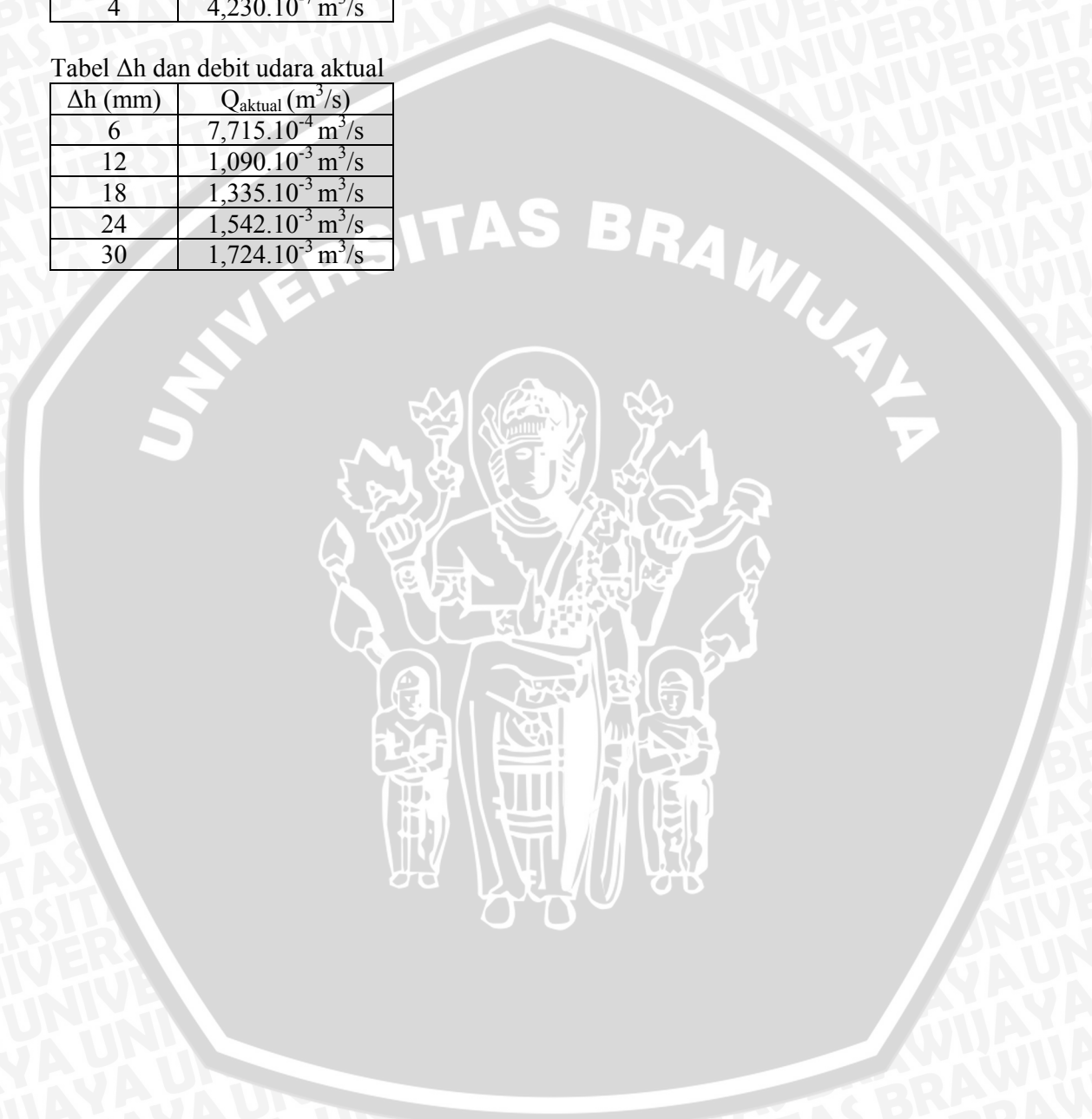
**Lampiran 2. Data Debit Bahan Bakar Dan Debit Udara Aktual**

Tabel  $\Delta h$  dan debit bahan bakar aktual

$\Delta h$ (mm)	$Q_{\text{aktual}}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
1	$2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
2	$2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
3	$3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
4	$4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$

Tabel  $\Delta h$  dan debit udara aktual

$\Delta h$ (mm)	$Q_{\text{aktual}}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
6	$7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
12	$1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
18	$1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
24	$1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
30	$1,724 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$



### Lampiran 3. Data Distribusi Temperatur

Data tabel dibawah ini merupakan data distribusi temperatur ruang bakar dari nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 0,5 mm, 0,7 mm dan 1 mm. Nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 0,5 mm tidak bisa mencapai debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  dan  $4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  dan  $1,724 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 3.1 Data distribusi temperatur pada nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 0,5 mm

##### 3.1.1 Debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	341,23	830,37	1032,6	940,22	468,689
Tinggi 16 cm	563,72	789,77	824,89	810,12	665,03
Tinggi 24cm	555,79	705,82	748,39	727,72	667,096
Tinggi 32 cm	437,19	658,49	728,65	721,88	580,844
Tinggi 40 cm	172,28	198,06	252,17	245,13	198,263

##### 3.1.2 Debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	725,8677	1049,182	1024,187	1004,69	710,9394
Tinggi 16 cm	314,8535	757,2656	893,8687	832,7778	433,6768
Tinggi 24 cm	679,8261	753,109	758,7071	804,197	729,101
Tinggi 32 cm	310,6061	414,3423	445,7323	407,6465	319,8788
Tinggi 40 cm	142,0556	166,3889	190,5859	188,1717	169,5303

##### 3.1.3 Debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	816,9334	1103,692	1074,702	1041,864	844,8283
Tinggi 16 cm	748,4003	857,7176	953,9242	922,4343	810,8131
Tinggi 24 cm	407,5303	528,4671	615,4646	611,5152	485,7273
Tinggi 32 cm	344,4343	439,3579	472,101	456,7727	378,7323
Tinggi 40 cm	248,4545	291,0962	299,9747	279,8485	254,9596

##### 3.1.4 Debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	665,653	921,318	973,263	905,859	576,202
Tinggi 16 cm	555,885	847,878	923,616	877,763	638,076
Tinggi 24 cm	380,222	498,925	602,152	600,965	503,404
Tinggi 32 cm	304,318	414,613	485,313	477,904	407,091
Tinggi 40 cm	155,798	168,945	196,778	178,015	154,52



3.1.5 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	920,4471	1083,227	771,2828	1017,571	908,0505
Tinggi 16 cm	408,4066	753,9847	883,149	798,2247	541,9646
Tinggi 24 cm	356,7172	709,3183	790,6667	756,3889	648,2222
Tinggi 32 cm	325,9192	354,8842	385,0101	367,2071	352,3889
Tinggi 40 cm	283,1818	289,9906	328,1162	303,4495	235,6364

3.1.6 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	683,4237	993,9922	928,4343	997,697	655,2576
Tinggi 16 cm	802,3375	899,5974	945,9444	904,9141	687,9192
Tinggi 24 cm	457,6367	487,6568	591,0303	561,8914	471,6212
Tinggi 32 cm	351,8788	439,1339	466,6111	426,9495	304,3889
Tinggi 40 cm	173,0051	185,8718	223,6111	206,1566	179,4899

3.2 Data distribusi temperatur pada nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 0,7 mm.

3.2.1 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	447,848	487,323	1004,29	594,157	567,298
Tinggi 16 cm	563,724	789,765	894,021	847,862	618,373
Tinggi 24 cm	286,727	393,414	564,434	555,045	465,404
Tinggi 32 cm	325,773	352,514	399,359	356,364	303,263
Tinggi 40 cm	202,177	202,914	252,167	245,126	198,263

3.2.2 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	311,367	765,039	1003,67	850,771	364,071
Tinggi 16 cm	380,758	590,298	886,657	801,106	510,561
Tinggi 24 cm	259,665	357,216	392,554	385,461	346,519
Tinggi 32 cm	310,606	414,342	445,732	407,646	319,879
Tinggi 40 cm	229,939	264,103	299,308	280,424	260,96

3.2.3 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	609,039	802,109	1051,48	806,471	622,461
Tinggi 16 cm	399,236	661,687	878,569	803,364	554,212
Tinggi 24 cm	307,53	428,467	615,465	611,515	485,727
Tinggi 32 cm	284,432	332,183	375,624	358,962	325,177
Tinggi 40 cm	206,96	230,439	299,975	275,591	225,894

3.2.4 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	670,398	848,54	959,003	909,141	801,259
Tinggi 16 cm	553,801	411,056	846,076	622,985	722,596
Tinggi 24 cm	444,642	237,409	645,963	381,228	515,778
Tinggi 32 cm	183,687	177,519	254,024	190,522	237,421
Tinggi 40 cm	253,369	180,758	263,672	216,414	232,818

3.2.5 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	779,313	892,033	1011,1	921,316	770,616
Tinggi 16 cm	555,885	847,878	939,448	877,763	638,076
Tinggi 24 cm	394,328	590,853	662,354	662,242	540,939
Tinggi 32 cm	481,424	494,889	596,737	581,939	530,51
Tinggi 40 cm	375,333	422,839	463,97	422,429	373,318

3.2.6 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	577,101	780,623	986,687	803,037	509,256
Tinggi 16 cm	408,407	753,985	883,149	798,225	541,965
Tinggi 24 cm	373,561	474,962	563,121	547,884	502,763
Tinggi 32 cm	295,995	369,298	411,975	400,449	319,111
Tinggi 40 cm	298,924	326,861	363,687	345,369	322,652

3.2.7 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	564.367	844.49	955.202	820.239	493.047
Tinggi 16 cm	564.79	844.203	999.237	902.457	580.758
Tinggi 24 cm	655.106	747.587	790.717	754.296	604.572
Tinggi 32 cm	430.929	477.94	501.53	483.429	418.212
Tinggi 40 cm	342.439	383.963	419.889	386.879	382.409

3.2.8 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	486,5017	869,138	1039,29	961,852	589,02
Tinggi 16 cm	475,0177	487,521	837,449	578,101	574,869
Tinggi 24 cm	515,2054	294,343	732,609	414,717	588,054
Tinggi 32 cm	291,404	311,199	371,159	265,588	341,54
Tinggi 40 cm	455,4478	185,249	512,168	314,704	462,498



3.2.9 Debit bahan bakar  $3,660.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	461,0859	969,291	1044,18	970,591	313,783
Tinggi 16 cm	494,6061	812,685	969,707	839,057	567,69
Tinggi 24 cm	403,2778	581,251	631,03	580,621	398,076
Tinggi 32 cm	469,0505	560,573	613,215	621,845	533,064
Tinggi 40 cm	620,0697	593,54	680,399	591,882	510,743

3.2.10 Debit bahan bakar  $3,660.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	441,515	632,485	1007,34	787,571	672,985
Tinggi 16 cm	520,448	826,743	1070,91	959,758	654,286
Tinggi 24 cm	377,706	474,032	714,995	692,705	574,562
Tinggi 32 cm	407,773	507,395	539,51	527,914	480,495
Tinggi 40 cm	266,657	254,444	344,354	321,848	308,253

3.2.11 Debit bahan bakar  $3,660.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	460,321	651,939	1010,79	790,109	609,116
Tinggi 16 cm	599,85	798,667	993,447	931,664	687,566
Tinggi 24 cm	420,552	569,407	691,455	641,061	531,111
Tinggi 32 cm	400,623	417,193	466,192	424,609	347,347
Tinggi 40 cm	410,836	463,208	534,833	486,914	460,934

3.2.12 Debit bahan bakar  $3,660.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	641.833	1031.86	1083.62	1005.43	546.545
Tinggi 16 cm	515.983	476.558	1039.37	686.568	722.043
Tinggi 24 cm	702.96	500.501	1011.22	528.944	736.914
Tinggi 32 cm	393.172	434.455	484.148	340.572	424.626
tinggi 40 cm	518.119	368.848	594.429	358.808	544.073

3.3 Data distribusi temperatur pada nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 1 mm.

3.3.1 Debit bahan bakar  $2,115.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	793,934	845,076	989,623	855,369	816,015
Tinggi 16 cm	704,975	900,736	963,146	875,793	665,03
Tinggi 24 cm	370,854	455,892	514,798	482,232	411,808
Tinggi 32 cm	321,061	352,514	384,51	356,364	303,263
Tinggi 40 cm	172,278	198,059	207,591	200,975	195,338



3.3.2 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	630,576	693,637	845,374	670,532	600,384
Tinggi 16 cm	435,449	584,646	748,217	579,025	530,672
Tinggi 24 cm	259,665	357,216	392,554	355,687	275,525
Tinggi 32 cm	197,965	315,692	347,924	340,53	266,485
Tinggi 40 cm	143,5	158,694	163,237	156,934	147,788

3.3.3 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	932,245	913,007	989,623	948,508	927,126
Tinggi 16 cm	826,449	898,189	991,162	944,126	916,742
Tinggi 24 cm	731,106	735,347	813,535	731,841	671,274
Tinggi 32 cm	545,53	602,994	682,212	681,742	614,03
Tinggi 40 cm	135,318	151,704	163,889	156,96	138,919

3.3.4 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	937,236	1079,99	1052,65	1065,91	680,185
Tinggi 16 cm	737,985	773,282	881,268	714,737	431,146
Tinggi 24 cm	465,328	482,866	544,273	491,146	395,359
Tinggi 32 cm	447,97	456,447	530,97	482,879	396,485
Tinggi 40 cm	125,934	135,93	144,01	149,727	140,747

3.3.5 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,724 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	964,148	1158,4	1090,24	1169,22	894,852
Tinggi 16 cm	660,221	813,475	931,929	825,776	669,991
Tinggi 24 cm	373,884	460,732	506,798	451,586	352,535
Tinggi 32 cm	350,864	353,6	384,505	340,263	296,707
Tinggi 40 cm	173,5	178,197	191,136	194,798	182,061

3.3.6 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	832,308	1101,65	754,648	1079,95	692,838
Tinggi 16 cm	1035,39	1075,65	1112,54	1092,76	915,773
Tinggi 24 cm	825,197	922,147	953,949	836,672	661,323
Tinggi 32 cm	679,015	611,396	648,237	603,066	540,636
Tinggi 40 cm	376,667	438,841	463	463,601	426,303

3.3.7 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	568,053	972,811	1044,38	1074,33	641,558
Tinggi 16 cm	972,811	991,817	1058,14	1031,56	874,333
Tinggi 24 cm	774,742	956,456	994,742	955,364	807,369
Tinggi 32 cm	499,273	621,398	653,545	670,475	598,667
Tinggi 40 cm	390	416,43	431,99	417,581	368,561

3.3.8 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	991,572	1022,37	872,32	1056,21	1012,88
Tinggi 16 cm	994,237	1000,27	1051,92	1010,76	868,995
Tinggi 24 cm	961,96	965,39	973,212	960,808	790,899
Tinggi 32 cm	441,884	571,44	626,066	623,975	574,758
Tinggi 40 cm	474,03	484,04	527,881	459,293	402,843

3.3.9 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	764,68	633,439	232,165	648,609	799,882
Tinggi 16 cm	938,646	992,607	1002,68	944,333	620,338
Tinggi 24 cm	890,146	892,839	991,753	942,232	761,04
Tinggi 32 cm	570,641	617,208	632,03	607,015	534,015
Tinggi 40 cm	311,192	324,627	363,742	353,884	315,54

3.3.10 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,724 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	794,347	694,841	348,145	791,576	887,949
Tinggi 16 cm	916,106	1006,97	1053,26	976,015	781,606
Tinggi 24 cm	632,091	714,959	853,394	838,581	730,652
Tinggi 32 cm	556,758	628,423	649,268	624,854	549,803
Tinggi 40 cm	365,379	389,379	380,823	347,283	299,667

3.3.11 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	898,015	711,627	649,539	734,579	1122,49
Tinggi 16 cm	1031,52	1033,65	1040,61	953,227	875,278
Tinggi 24 cm	997,429	1000,45	1024,36	1023,67	853,869
Tinggi 32 cm	628,98	732,324	823,525	822,758	760,788
Tinggi 40 cm	674,03	691,536	707,02	689,955	624,692



3.3.12 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	901,914	891,384	1014,59	666,591	697,303
Tinggi 16 cm	1048,21	1056,49	1086,77	1110,22	876,636
Tinggi 24 cm	863,182	932,578	1005,28	909,273	742,859
Tinggi 32 cm	842,601	900,011	983,051	918,369	775,364
Tinggi 40 cm	593,086	633,333	668,697	626,934	557,389

3.3.13 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	951,987	995,33	968,253	1126,73	988,731
Tinggi 16 cm	944,975	960,525	1019,92	975,273	909,354
Tinggi 24 cm	959,101	1004,62	1056,78	1057,7	969,288
Tinggi 32 cm	728,949	761,949	795,389	748,015	641,601
Tinggi 40 cm	667,242	718,823	725,343	684,409	589,949

3.3.14 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	1075,82	1086,69	1095,99	1171,12	882,902
Tinggi 16 cm	1017,04	1098,69	1109,38	1067,21	831,586
Tinggi 24 cm	773,389	922,778	961,763	937,556	774,258
Tinggi 32 cm	590,02	679,757	711,747	681,429	617,141
Tinggi 40 cm	666,939	632,675	663,399	618,242	541,687

3.3.15 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,724 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	1036,49	908,664	842,591	887,616	987,69
Tinggi 16 cm	889,247	999,879	978,889	1019,94	941,247
Tinggi 24 cm	840,869	987,788	1002,66	975,96	811,561
Tinggi 32 cm	668,455	742,454	828,707	796,52	701,288
Tinggi 40 cm	624,843	650,675	684,859	647,561	555,111

3.3.16 Debit bahan bakar  $4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	855,436	543,768	262,436	602,232	1040,38
Tinggi 16 cm	1087,48	1090,43	1109,05	1042,29	941,01
Tinggi 24 cm	825,566	989,899	1049,39	1014,15	859,803
Tinggi 32 cm	925,03	930,894	990,97	918,313	791,727
Tinggi 40 cm	715,323	719,882	725,323	681,146	609,46



3.3.17 Debit bahan bakar  $4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	798,407	651,124	528,121	617,894	650,992
Tinggi 16 cm	1048,41	1138,9	1060,93	1130,24	1022,81
Tinggi 24 cm	944,712	972,9	982,298	963,848	838,581
Tinggi 32 cm	815,803	892,277	962,126	950,727	859,955
Tinggi 40 cm	727,212	730,081	736,884	724,5	647,071

3.3.18 Debit bahan bakar  $4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	886,859	833,383	544,965	943,364	922,248
Tinggi 16 cm	1005,79	1012,31	1024,87	995,051	791,056
Tinggi 24 cm	969,687	1032,87	1024,36	1029,58	948,914
Tinggi 32 cm	920,702	898,353	986,98	928,318	762,591
Tinggi 40 cm	844,591	776,788	898,273	758,146	660,586

3.3.19 Debit bahan bakar  $4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	687,954	1007,28	826,904	1008,83	637,735
Tinggi 16 cm	828,878	923,984	886,377	911,662	808,432
Tinggi 24 cm	921,025	970,646	994,237	964,116	805,045
Tinggi 32 cm	894,333	989,99	1033,55	994,924	861,328
Tinggi 40 cm	463,218	467,789	479,29	443,975	379,088

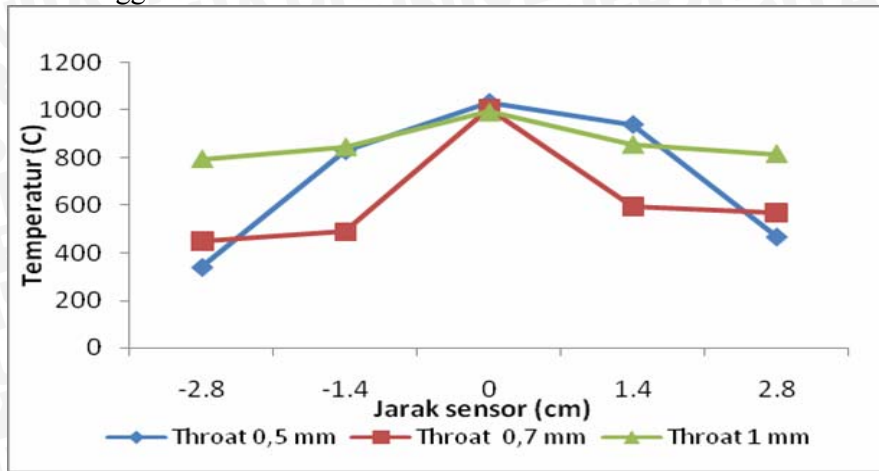
3.3.20 Debit bahan bakar  $4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,724 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Y \ X	-2,8	-1,4	0	1,4	2,8
Tinggi 8 cm	633,773	980,537	773,083	924,755	520,561
Tinggi 16 cm	107,71	1084,38	1052,98	1078,6	1052,98
Tinggi 24 cm	982,14	1065,64	1012,61	1034,73	790,545
Tinggi 32 cm	861,28	1048,49	1072,81	1013,86	849,561
Tinggi 40 cm	867,09	872,635	892,672	816,662	686,116

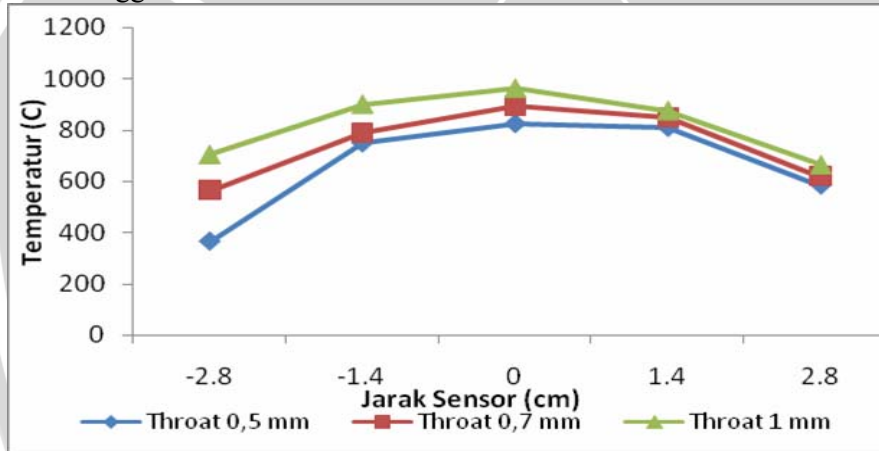
**Lampiran 4. Grafik perbandingan distribusi temperatur antar diameter throat nosel konvergen divergen.**

4.1 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

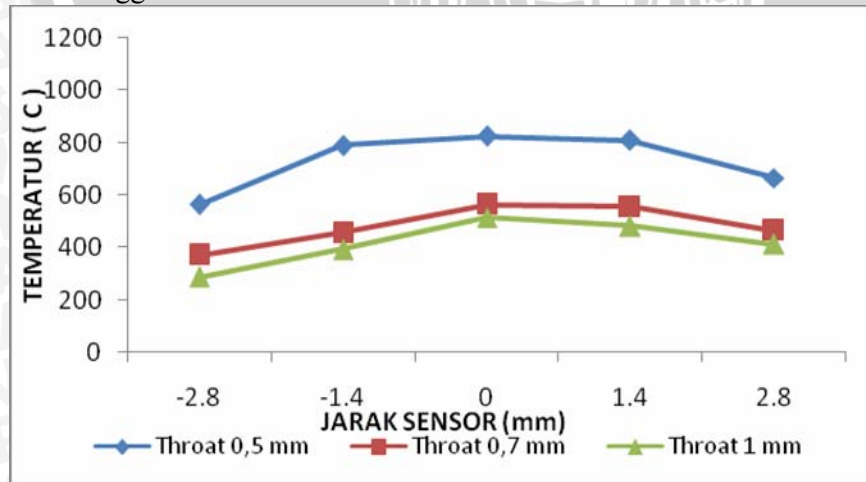
4.1.1 Tinggi 8 cm



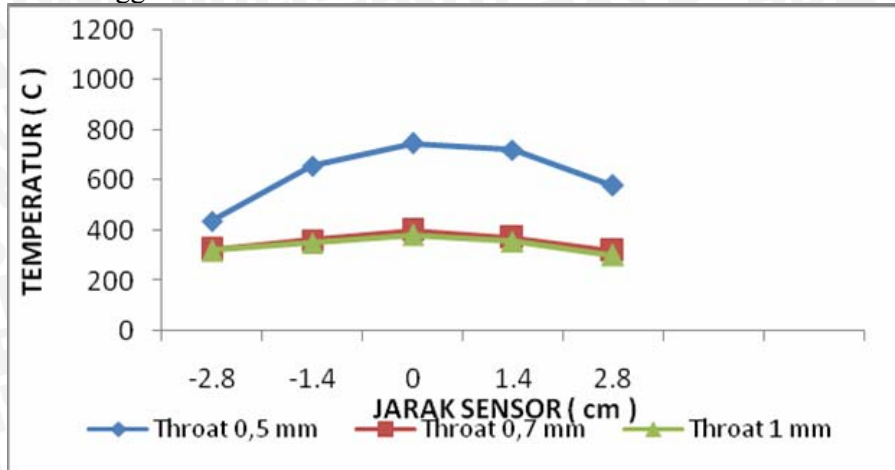
4.1.2 Tinggi 16 cm



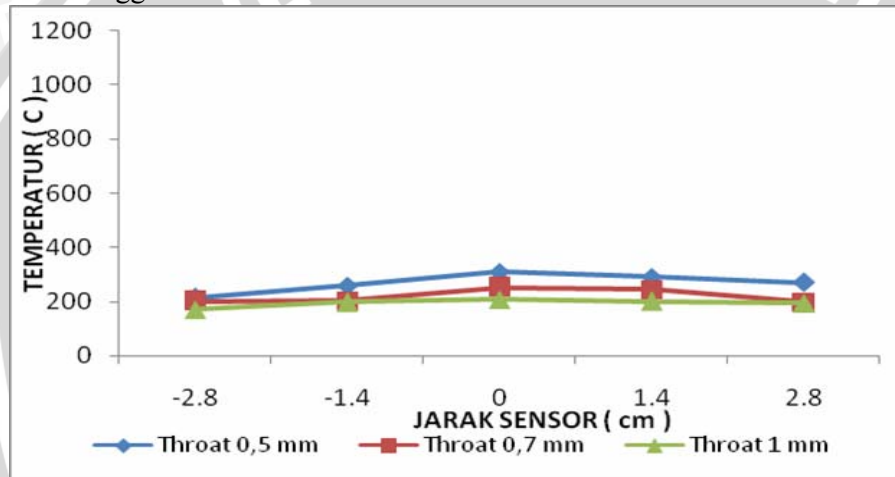
4.1.3 Tinggi 24 cm



4.1.4 Tinggi 32 cm

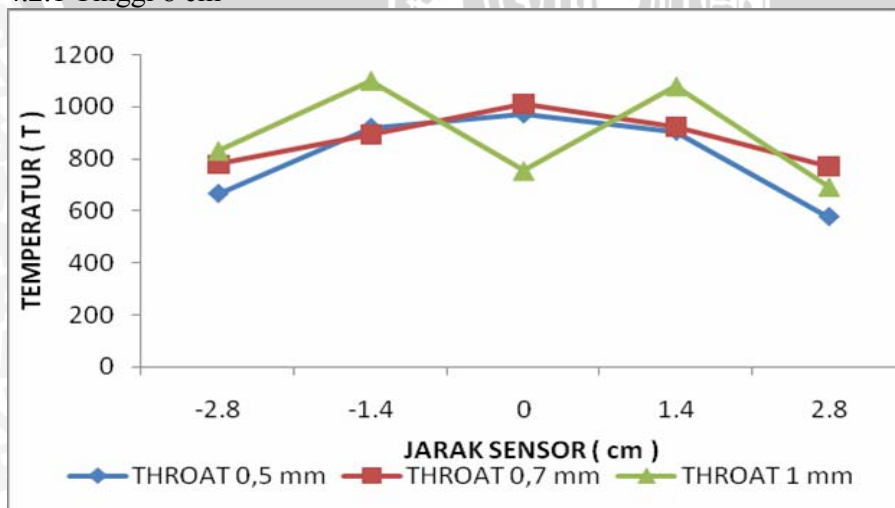


4.1.5 Tinggi 40 cm



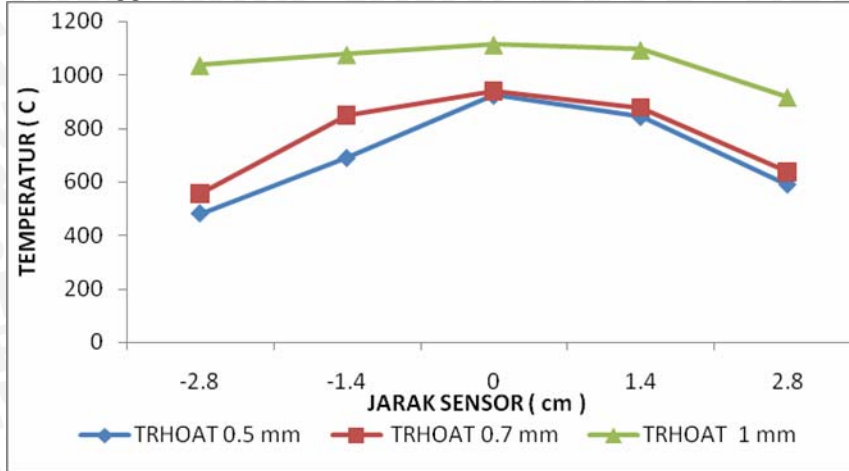
4.2 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

4.2.1 Tinggi 8 cm

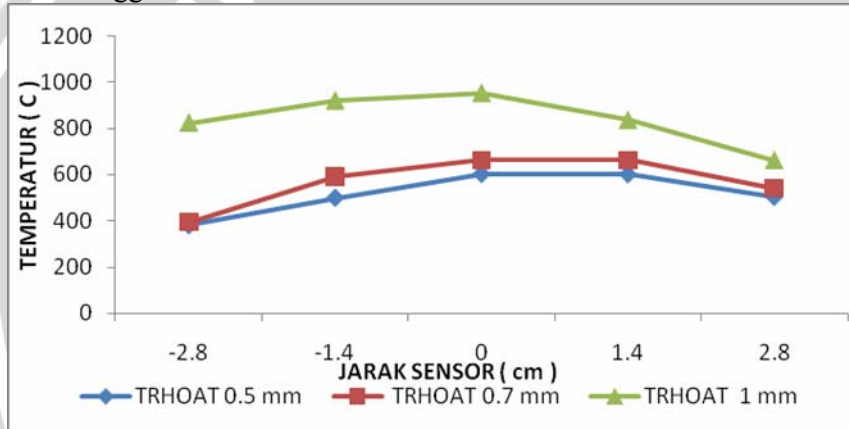




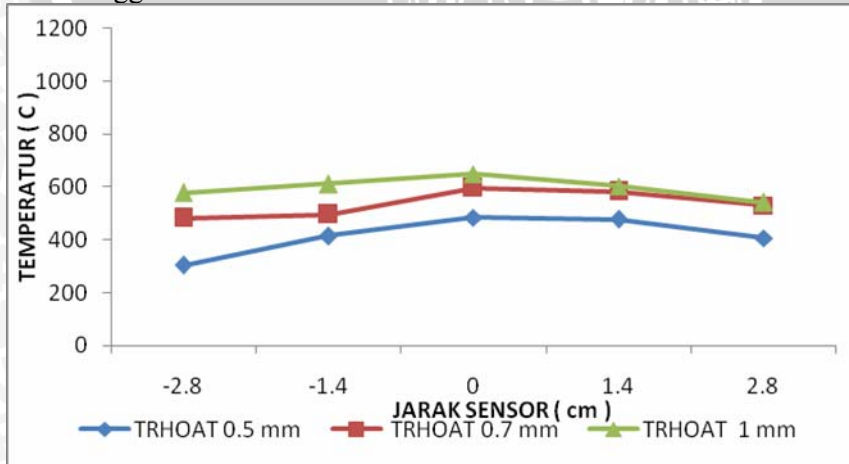
4.2.2 Tinggi 16 cm



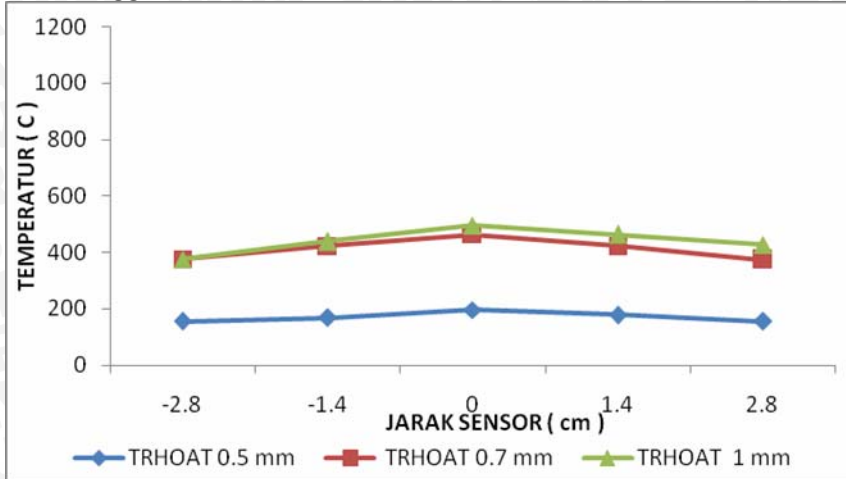
4.2.3 Tinggi 24 cm



4.2.4 Tinggi 32 cm

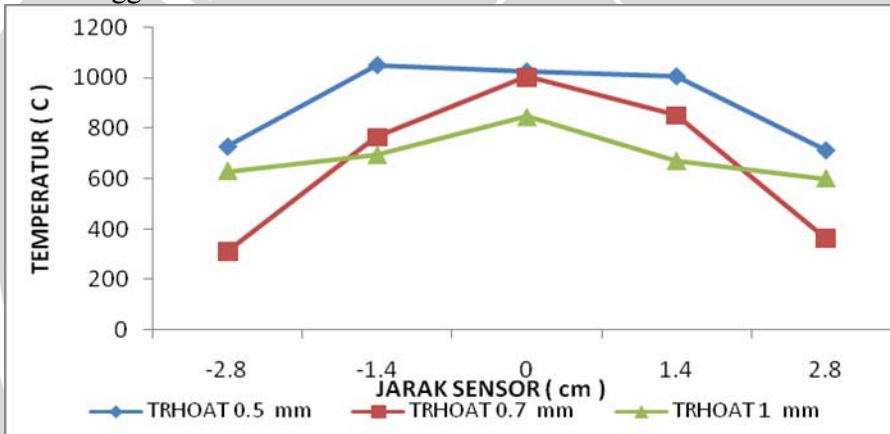


4.2.5 Tinggi 40 cm

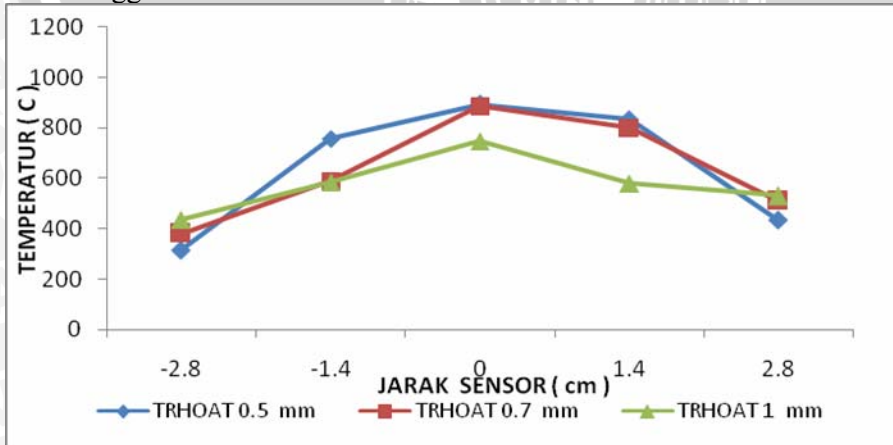


4.3 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

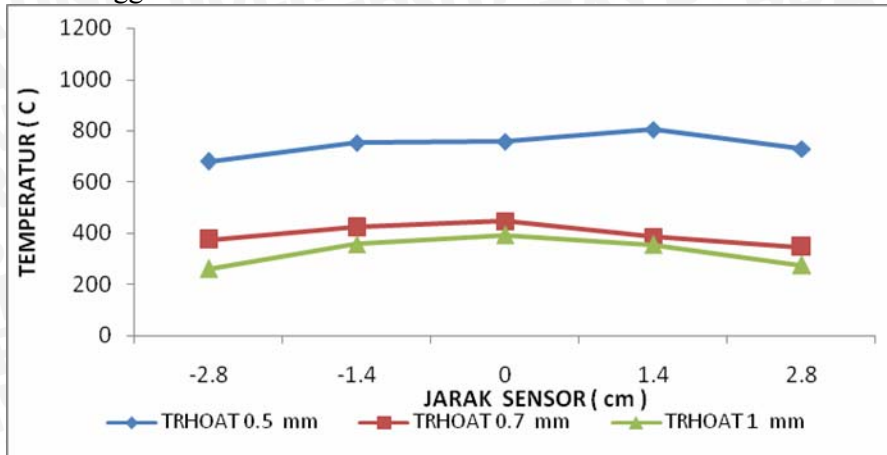
4.3.1 Tinggi 8 cm



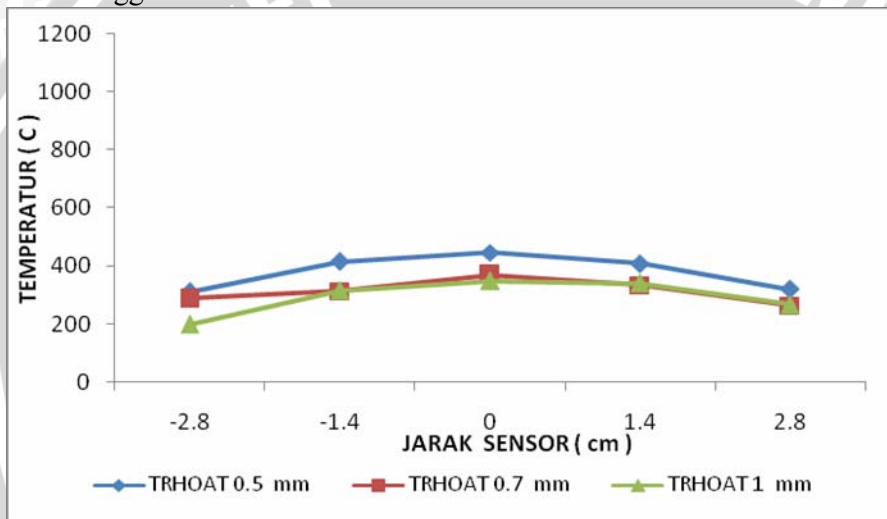
4.3.2 Tinggi 16 cm



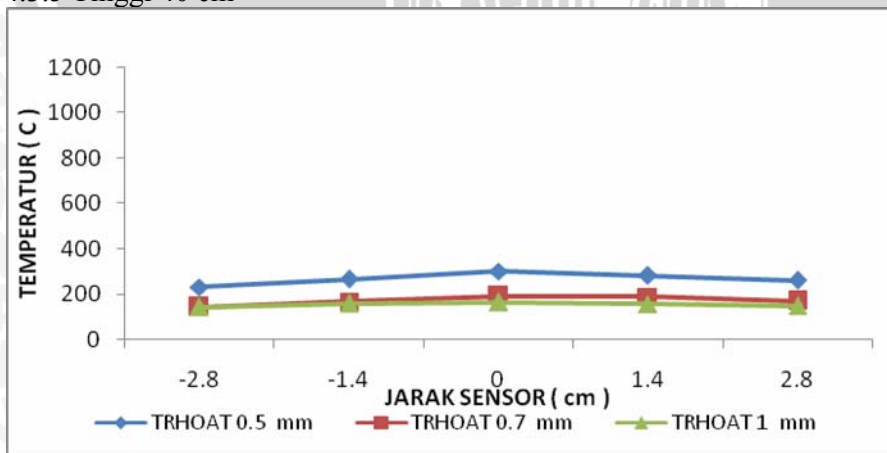
4.3.3 Tinggi 24 cm



4.3.4 Tinggi 32 cm



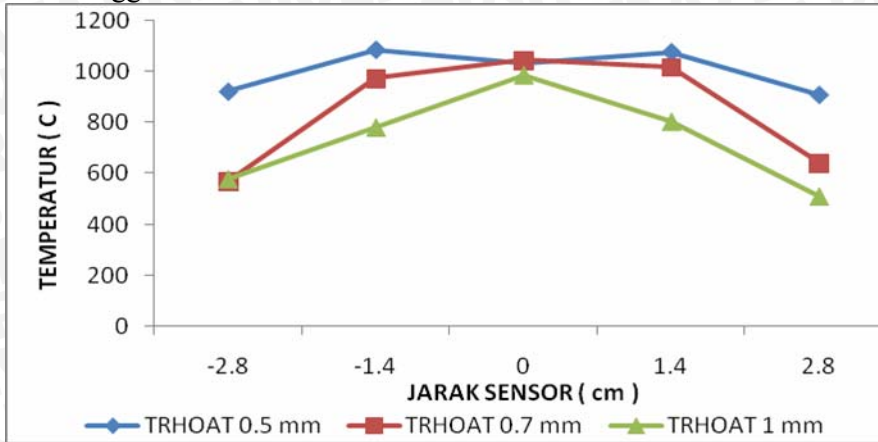
4.3.5 Tinggi 40 cm



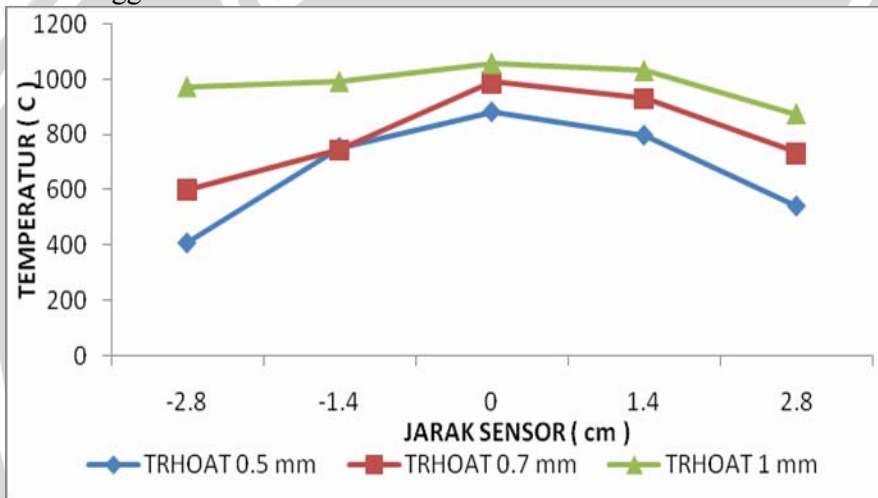


4.4 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

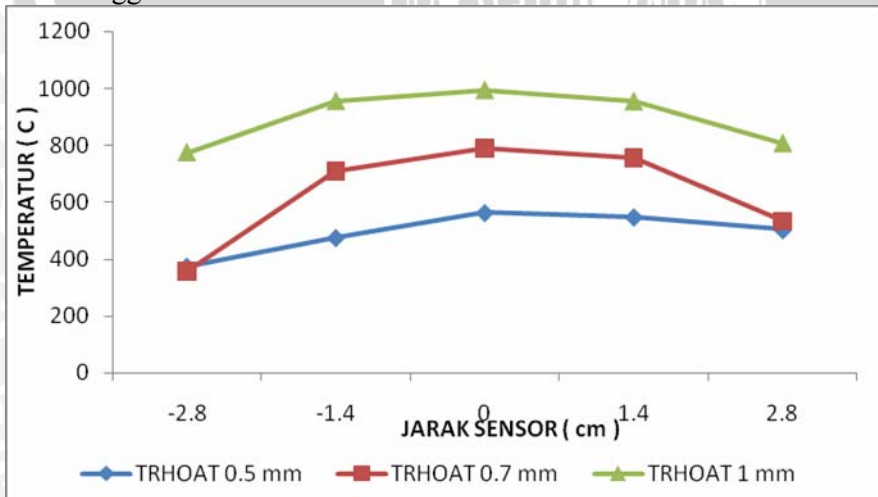
4.4.1 Tinggi 8 cm



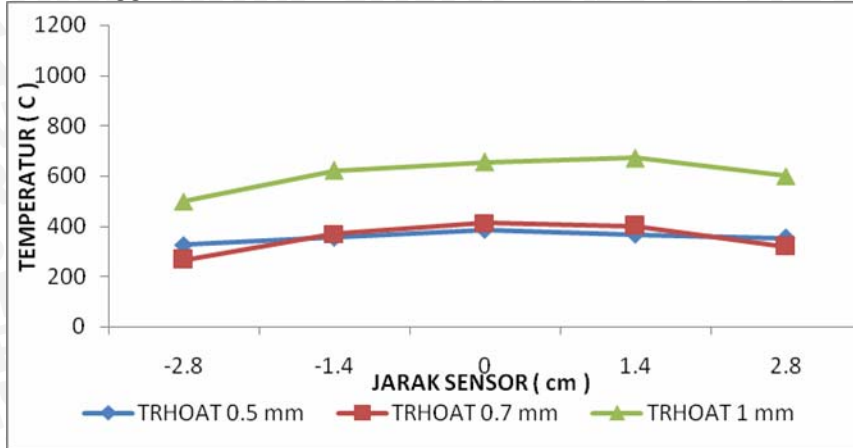
4.4.2 Tinggi 16 cm



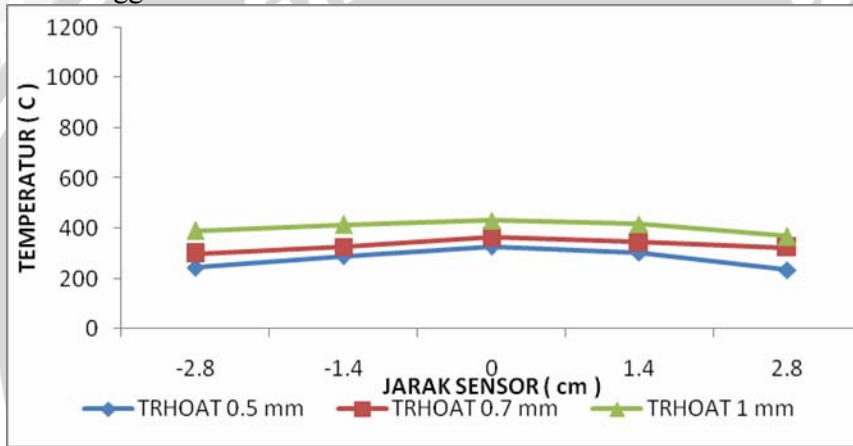
4.4.3 Tinggi 24 cm



4.4.4 Tinggi 32 cm

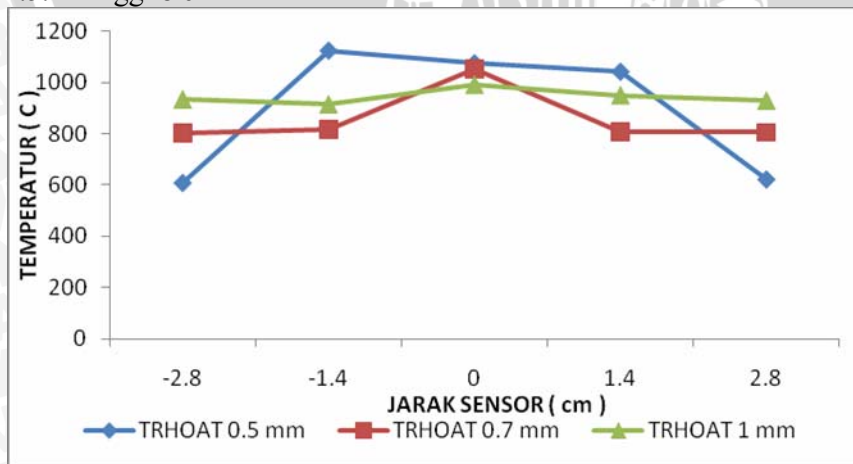


4.4.5 Tinggi 40 cm

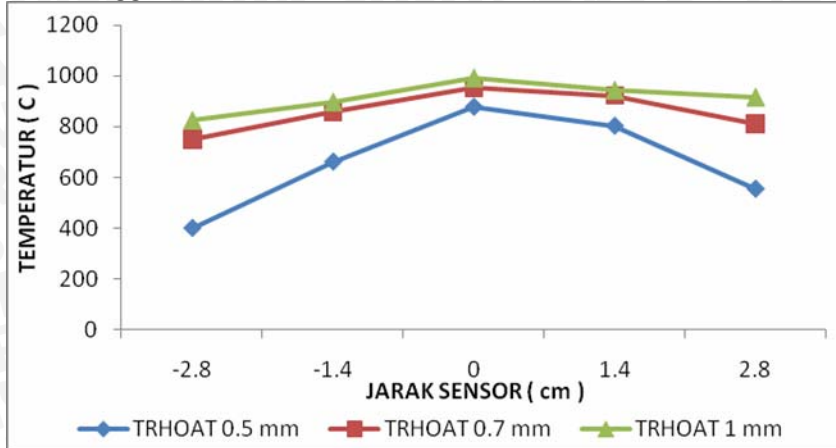


4.5 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

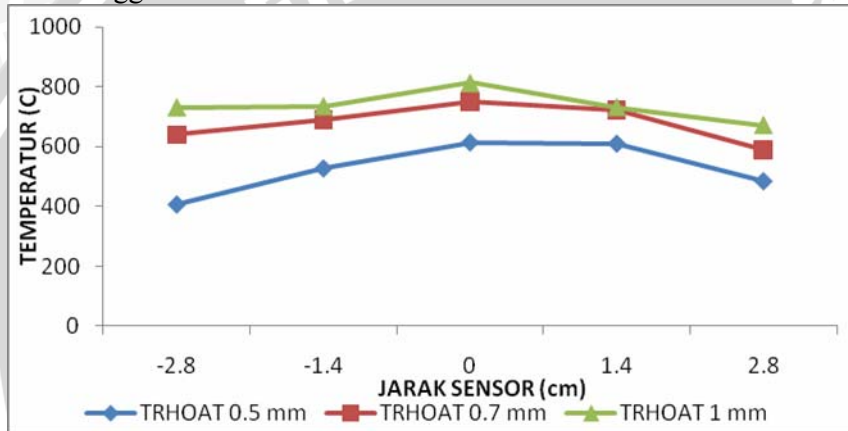
4.5.1 Tinggi 8 cm



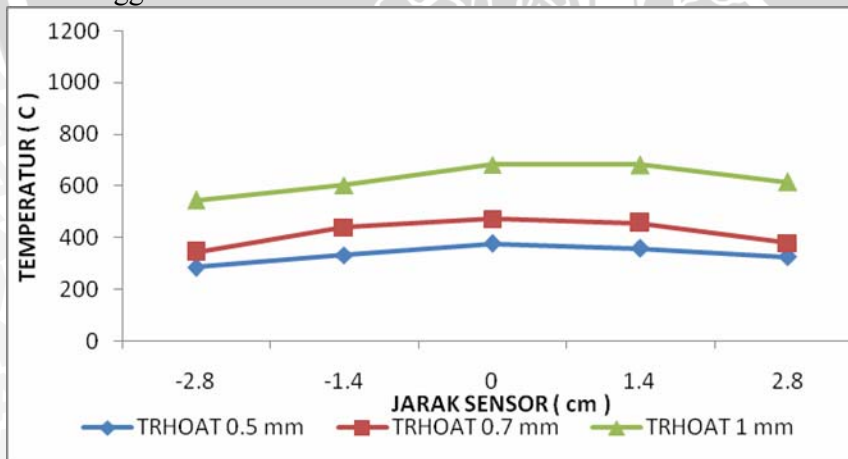
4.5.2 Tinggi 16 cm



4.5.3 Tinggi 24 cm

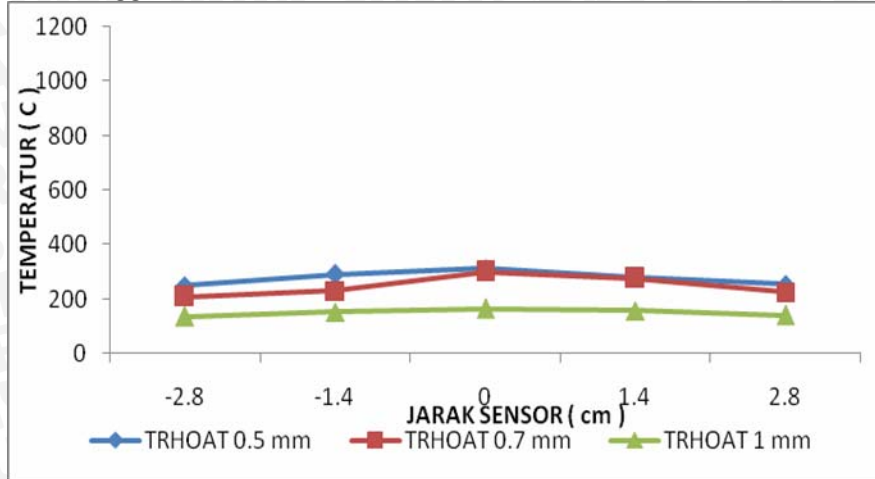


4.5.4 Tinggi 32 cm



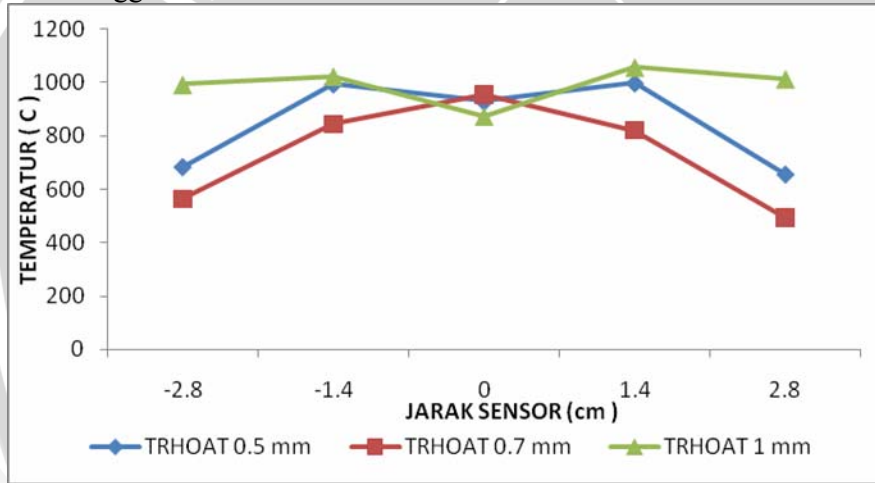


4.5.5 Tinggi 40 cm

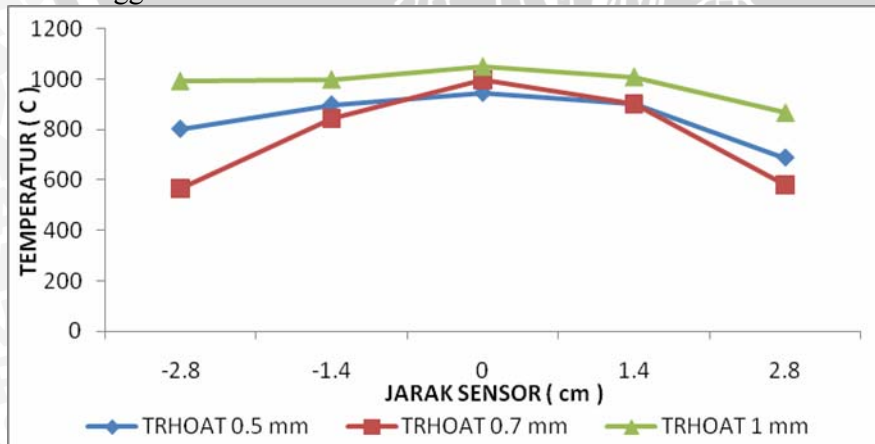


4.6 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

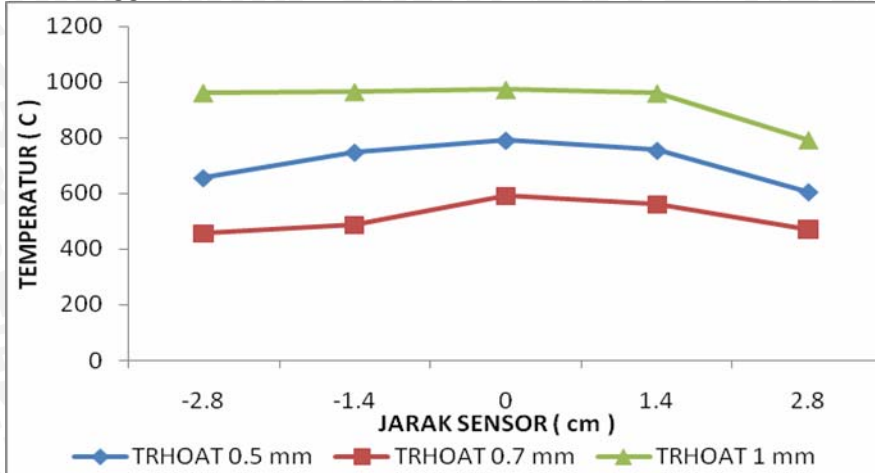
4.6.1 Tinggi 8 cm



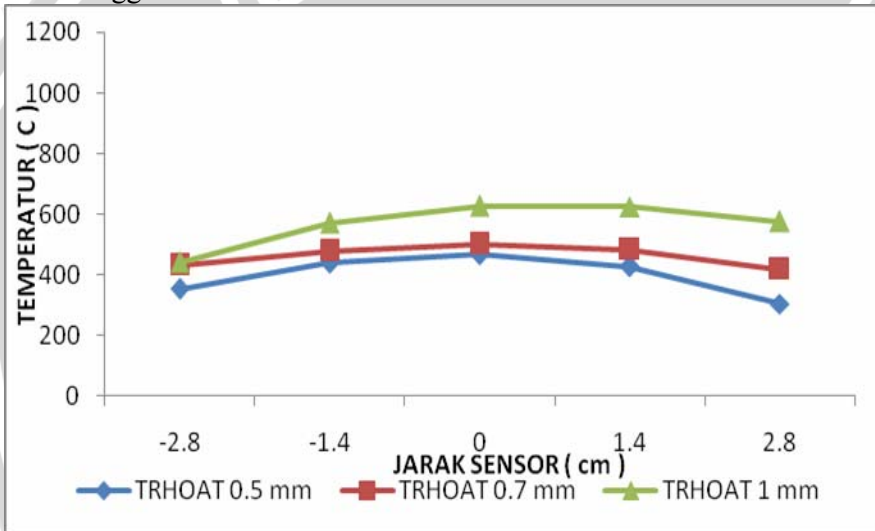
4.6.2 Tinggi 16 cm



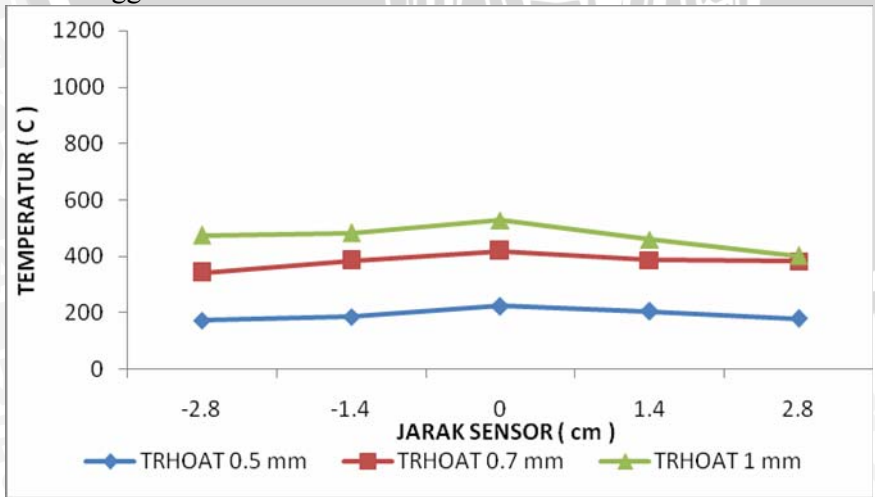
4.6.3 Tinggi 24 cm



4.6.4 Tinggi 32 cm



4.6.5 Tinggi 40 cm

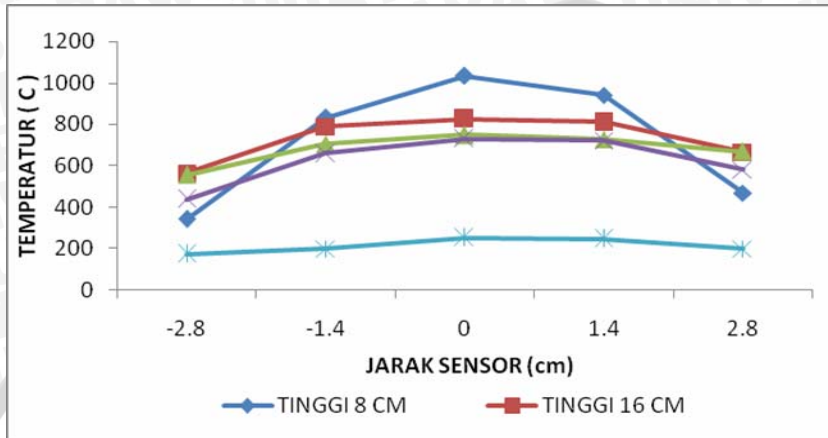


**Lampiran 5. Grafik Distribusi Temperatur**

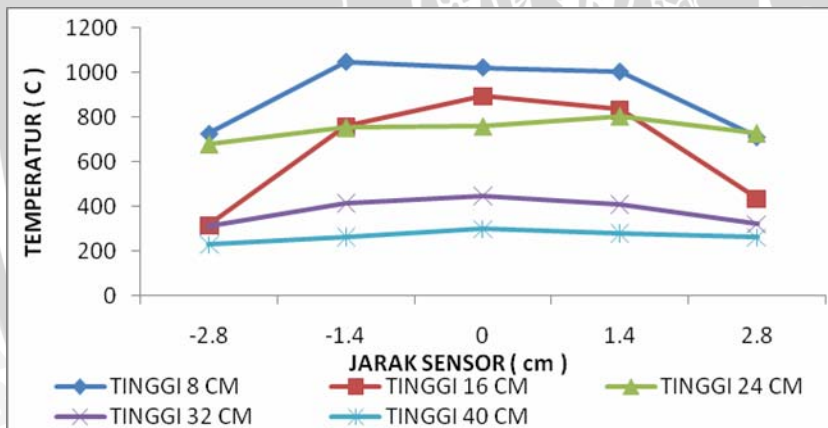
3. Grafik hubungan distribusi temperatur dan jarak sensor pada setiap titik pengambilan data

3.4 Grafik distribusi temperatur pada nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 0,0005 m

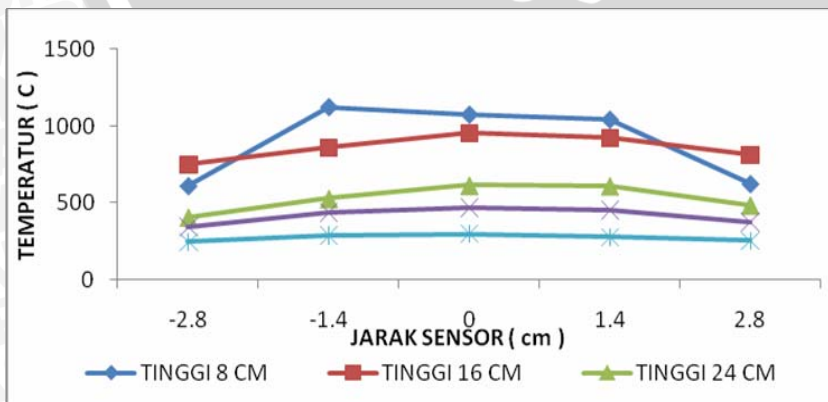
3.4.1 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ .



3.4.2 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ .

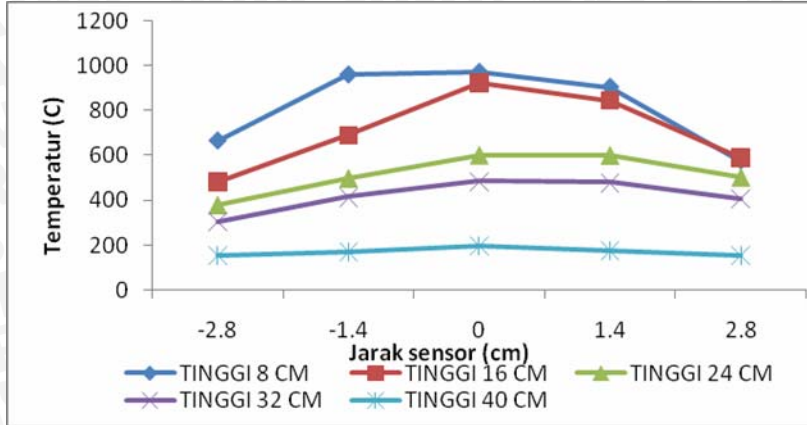


3.4.3 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ .

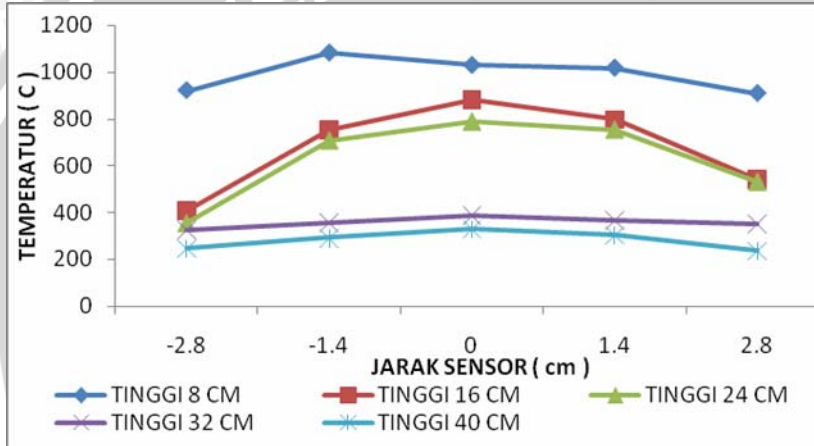




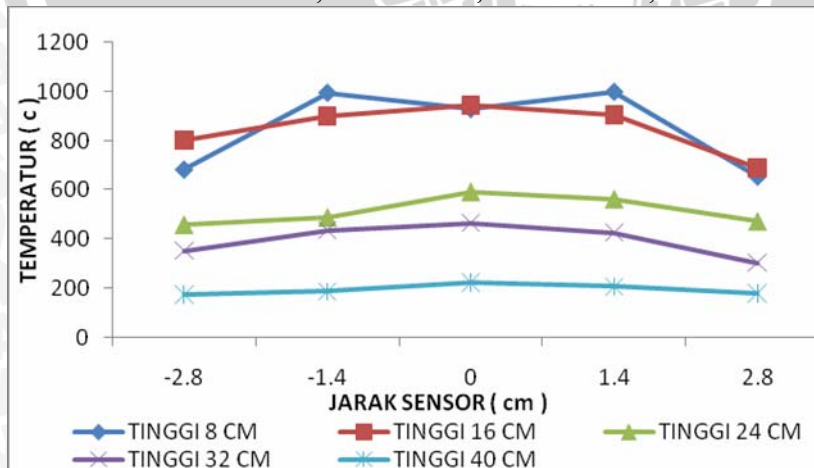
3.4.4 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .



3.1.5 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

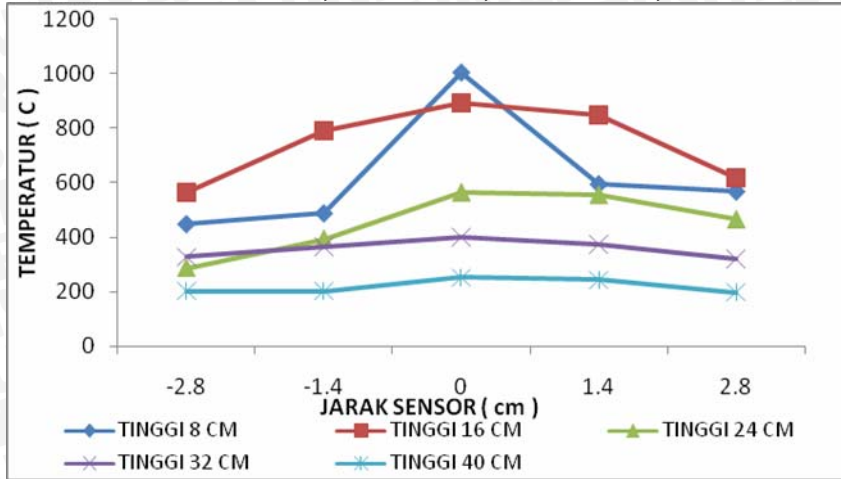


3.1.6 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

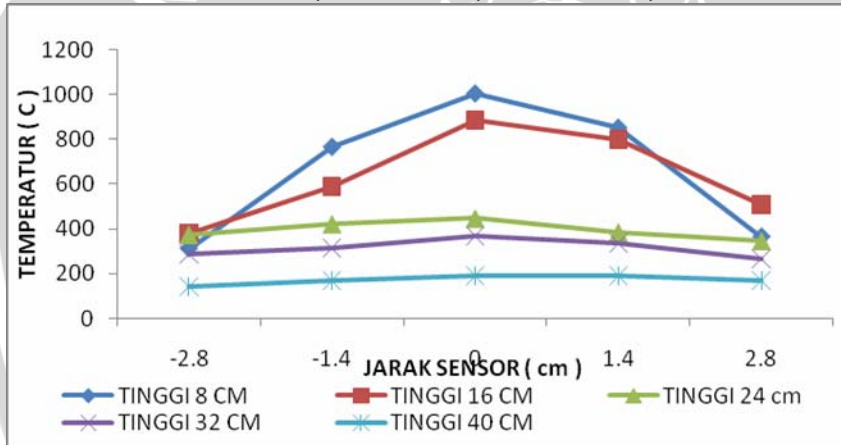


3.5 Grafik distribusi temperatur pada nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 0,0007 m

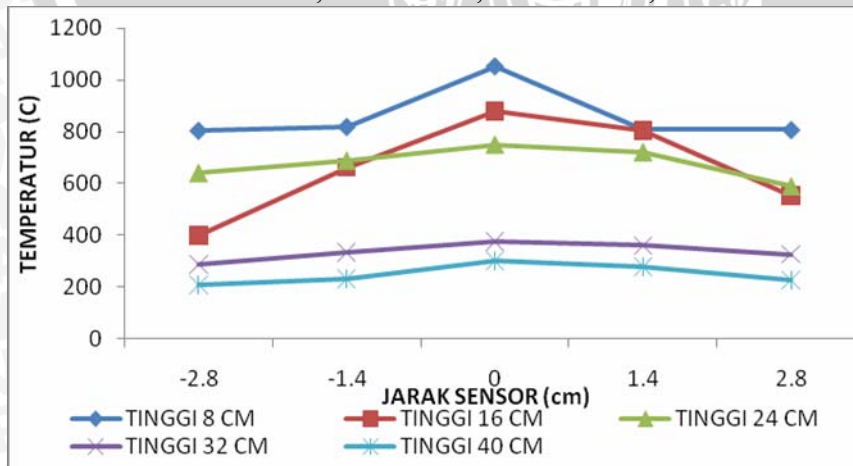
3.2.1 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ .



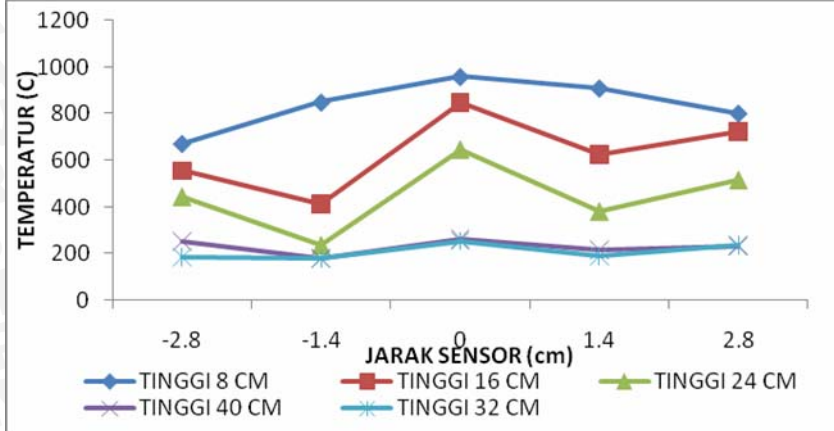
3.2.2 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



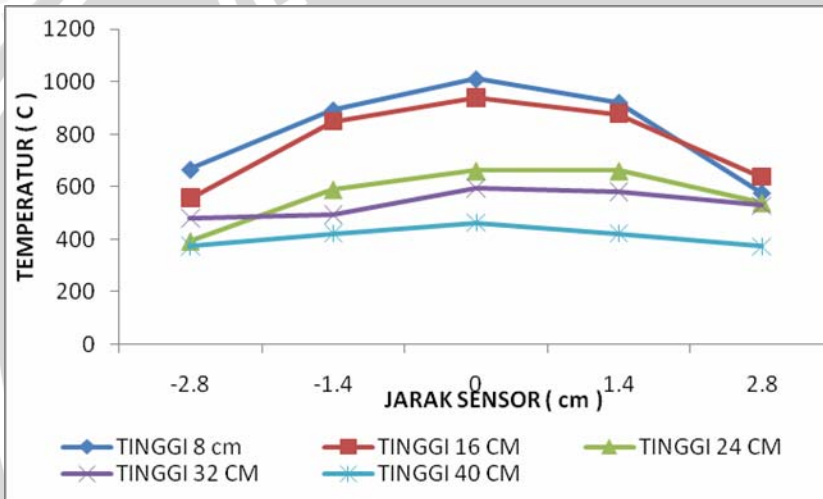
3.2.3 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



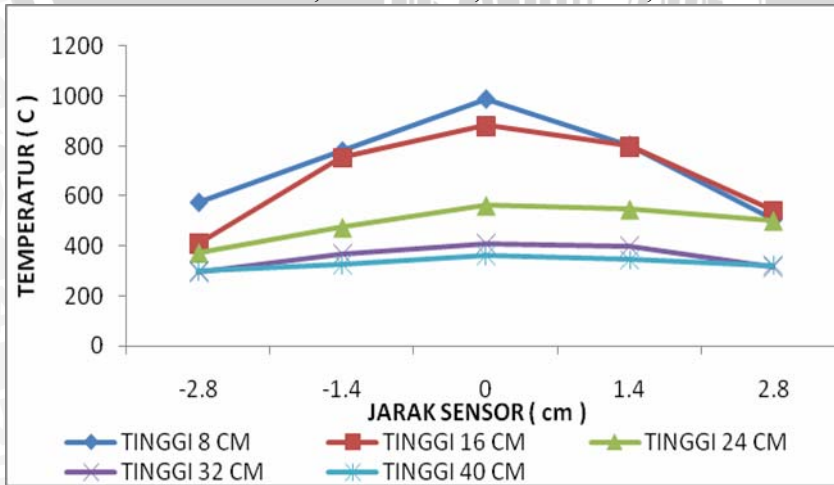
3.2.4 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



3.2.5 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

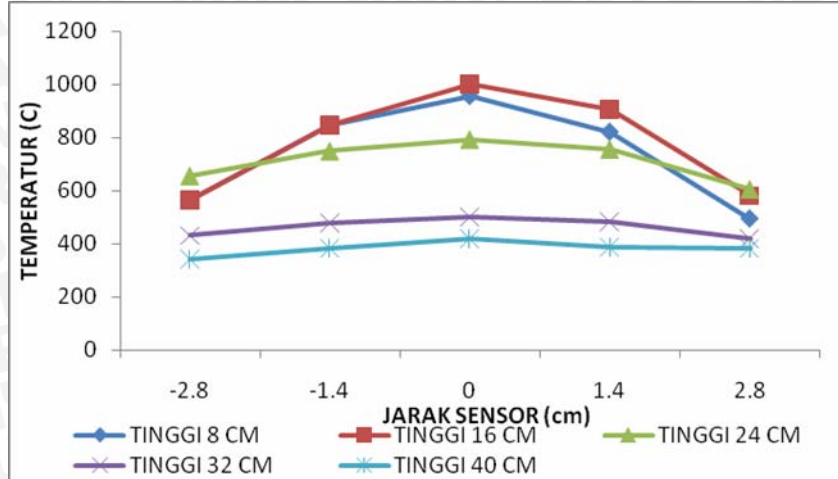


3.2.6 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

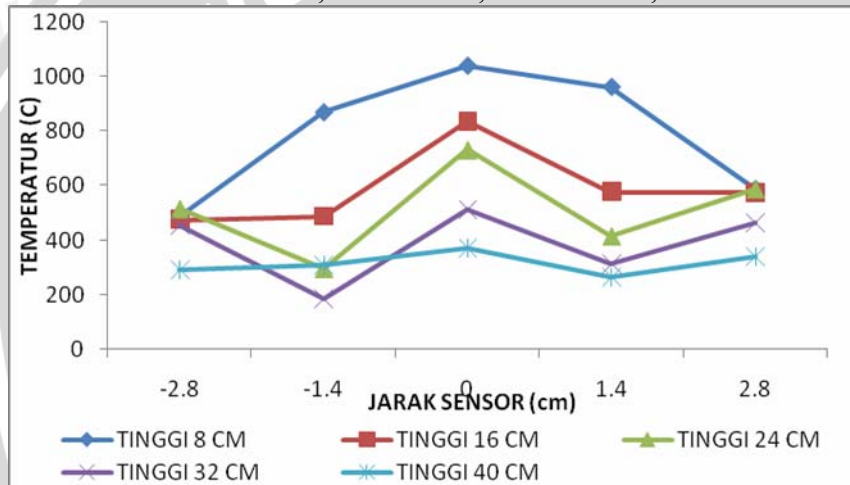




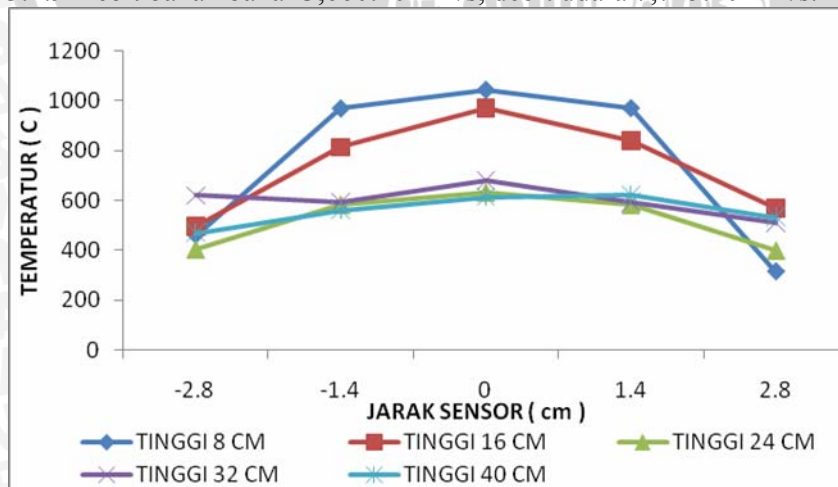
3.2.7 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



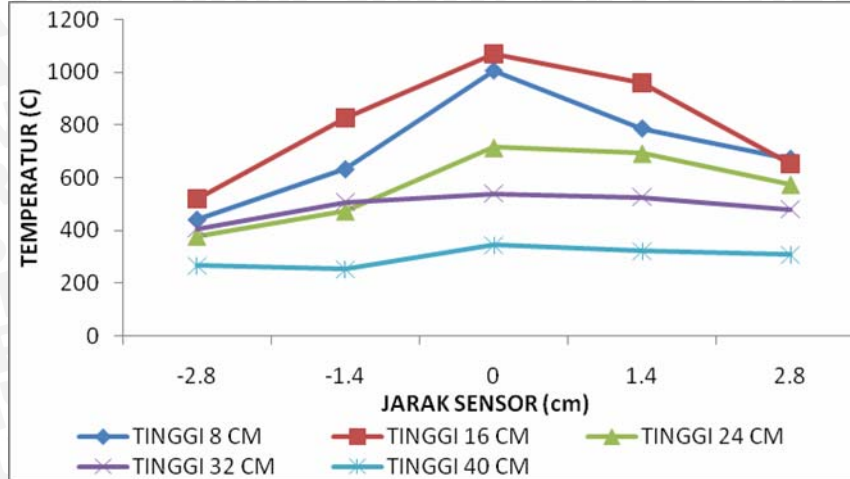
3.2.8 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



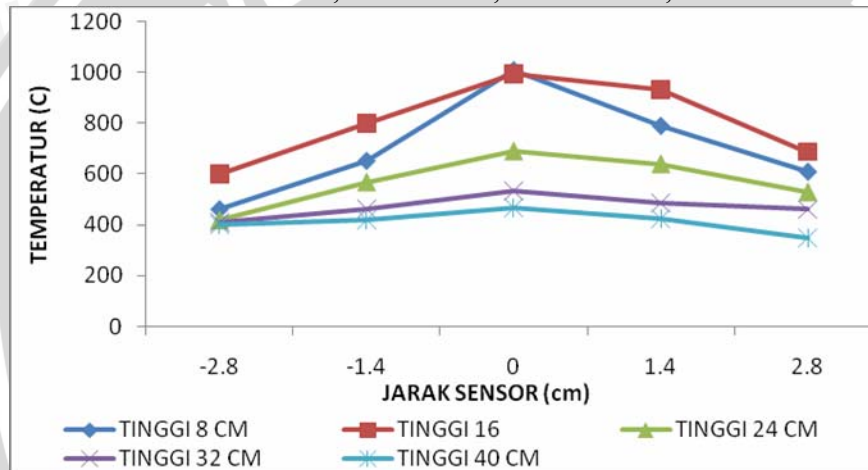
3.2.9 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .



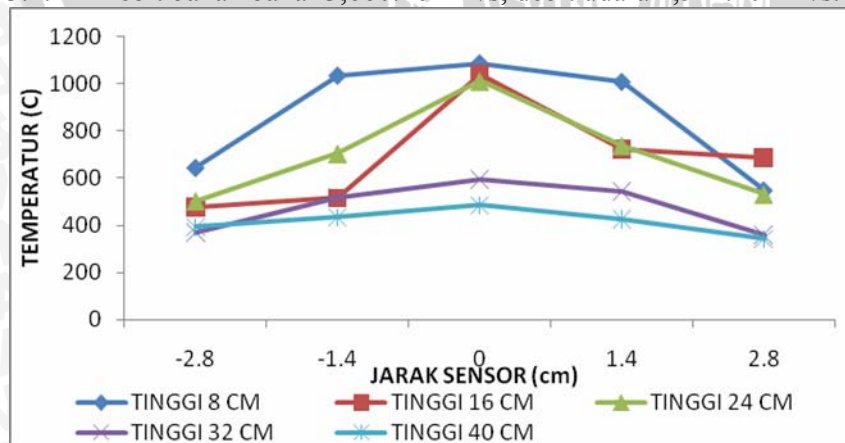
3.2.10 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



3.2.11 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

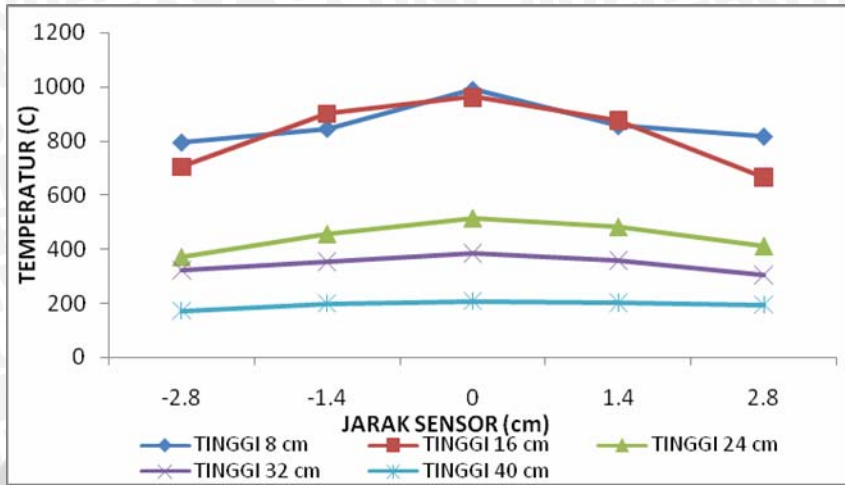


3.1.12 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

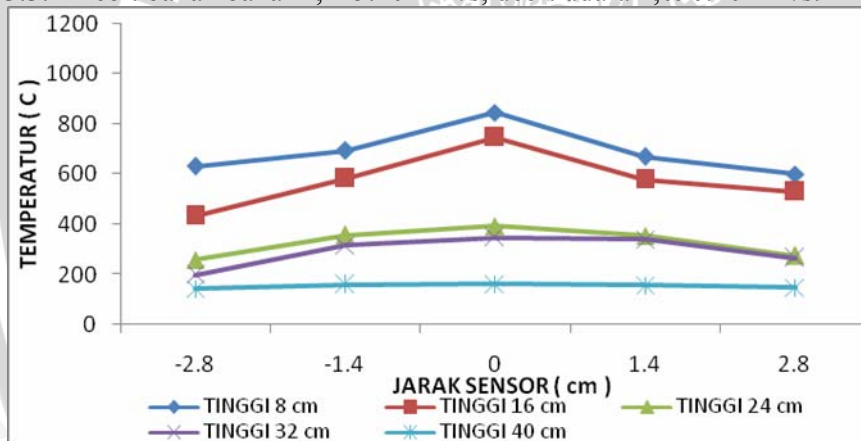


3.1 Grafik distribusi temperatur pada nosel konvergen divergen dengan diameter *throat* 0,001m.

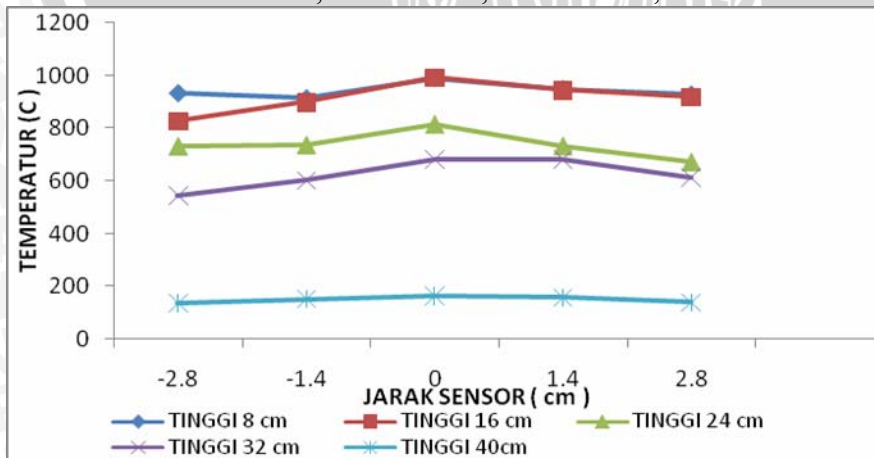
3.3.1 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .



3.3.2 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

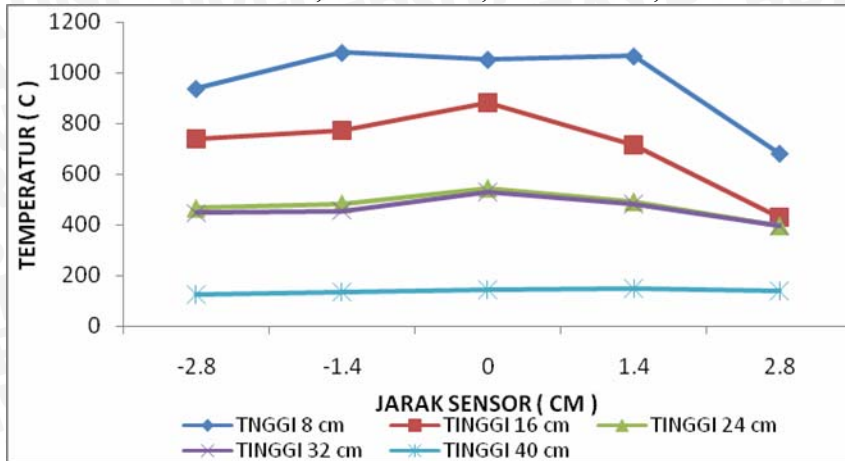


3.3.3 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

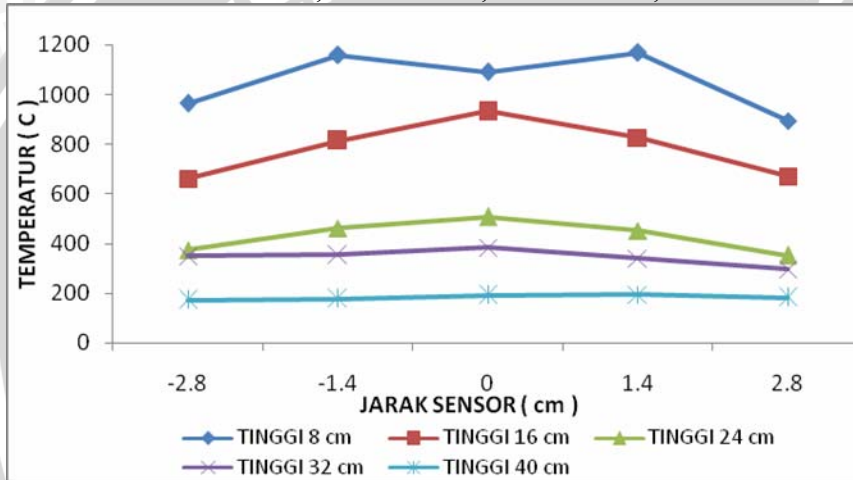




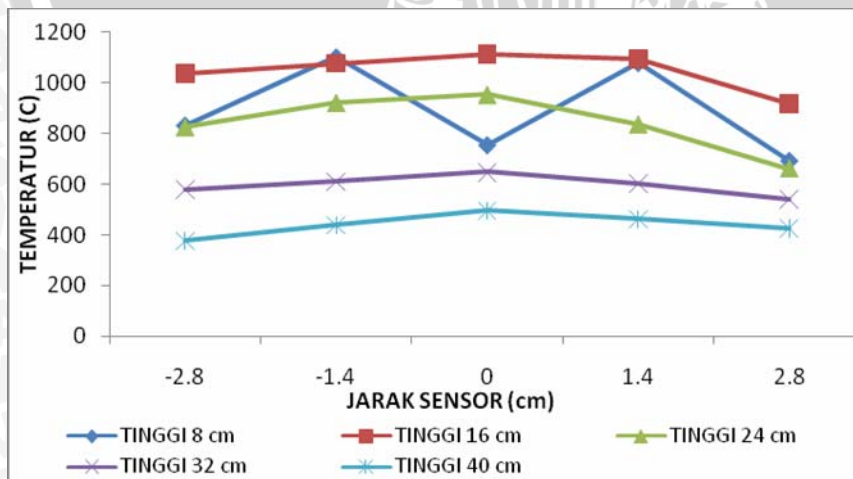
3.3.4 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



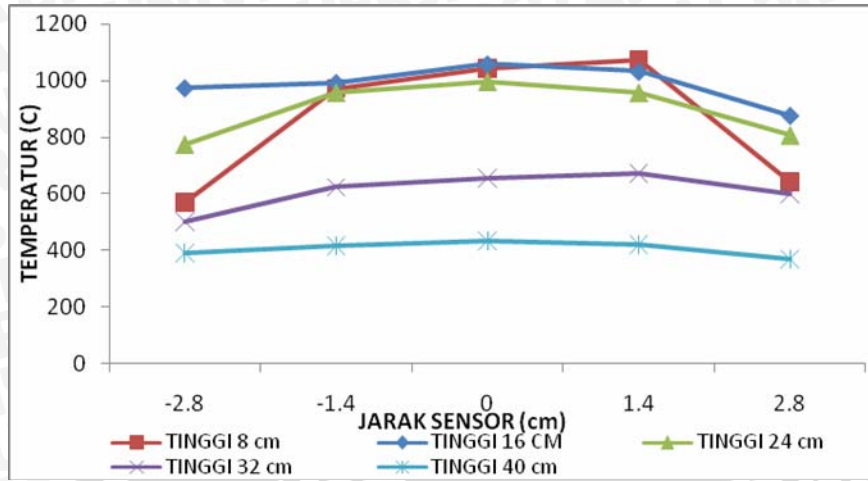
3.3.5 Debit bahan bakar  $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,724 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



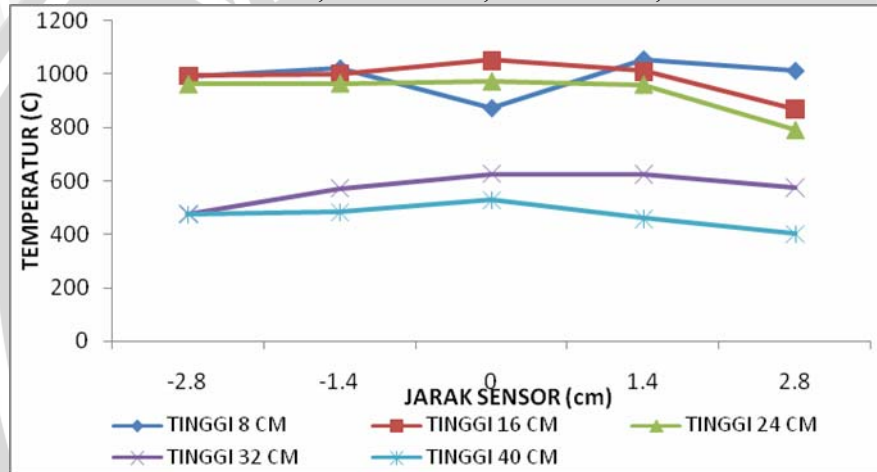
3.3.6 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .



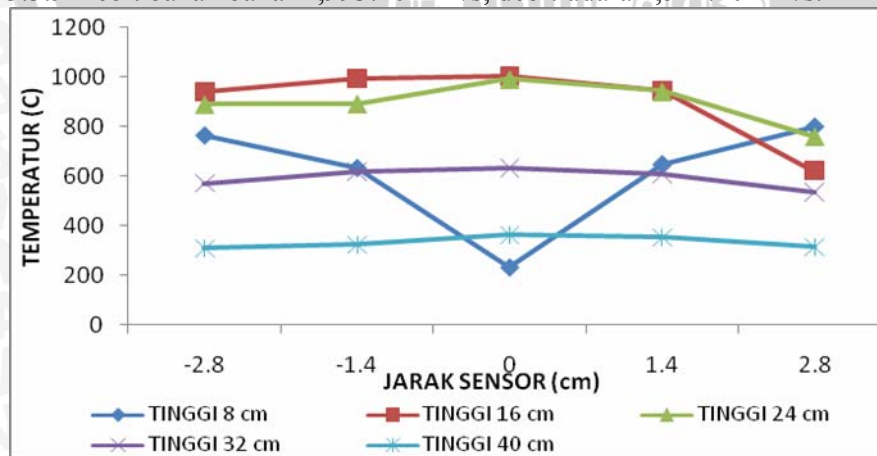
3.3.7 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



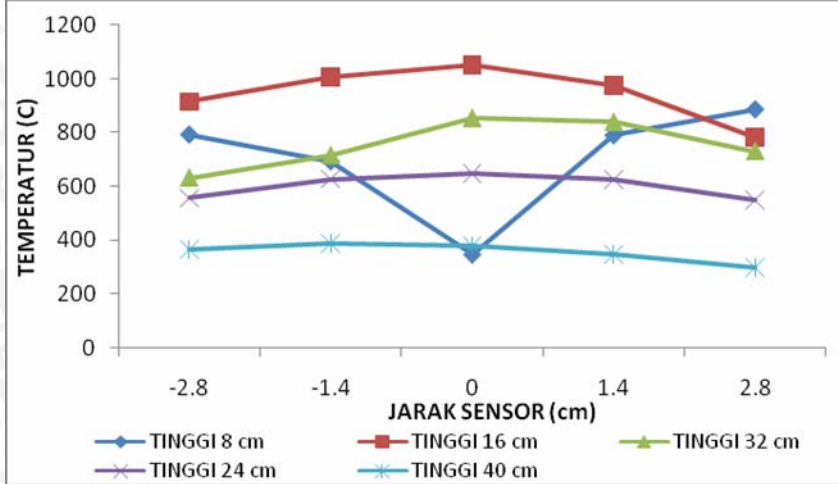
3.3.8 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



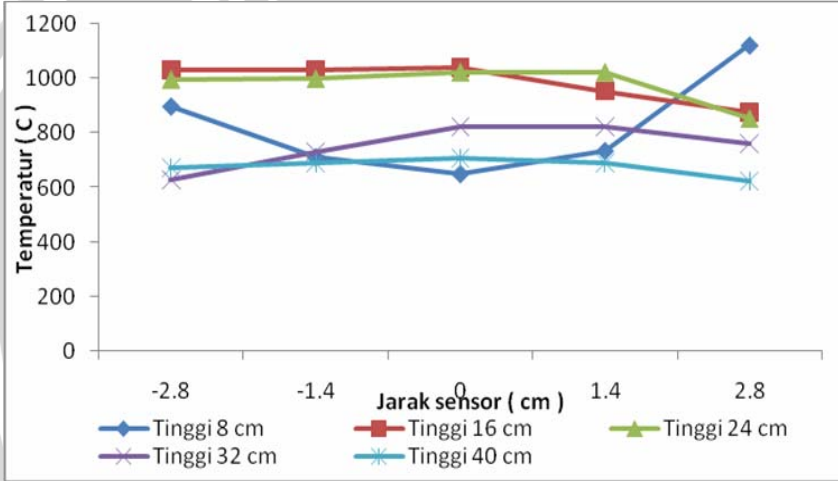
3.3.9 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



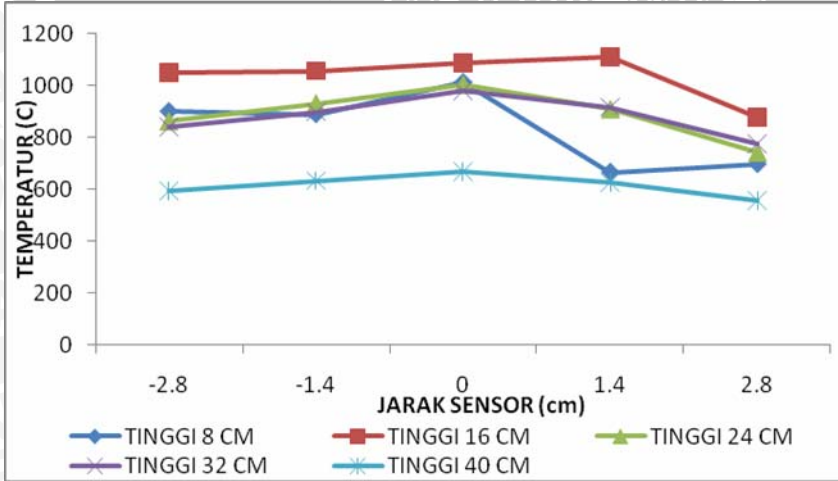
3.3.10 Debit bahan bakar  $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,724 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



3.3.11 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

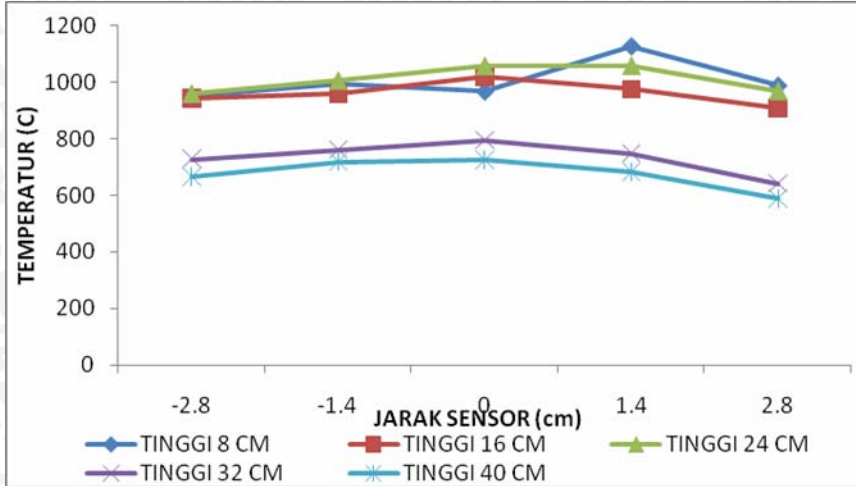


3.3.12 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

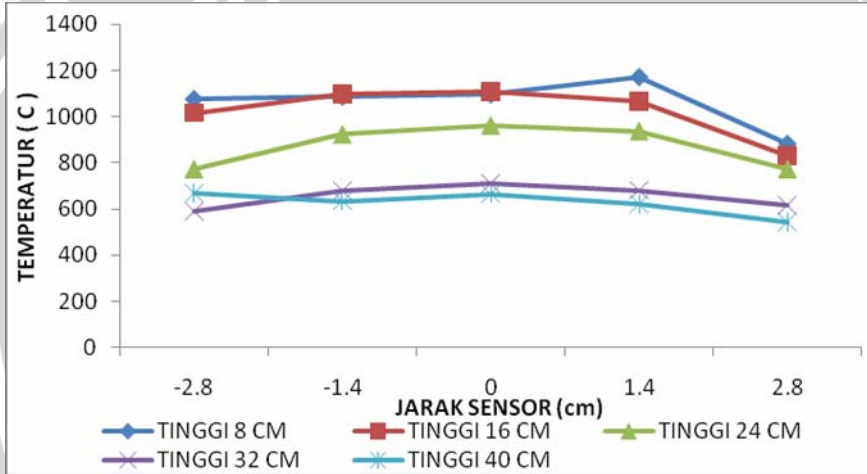




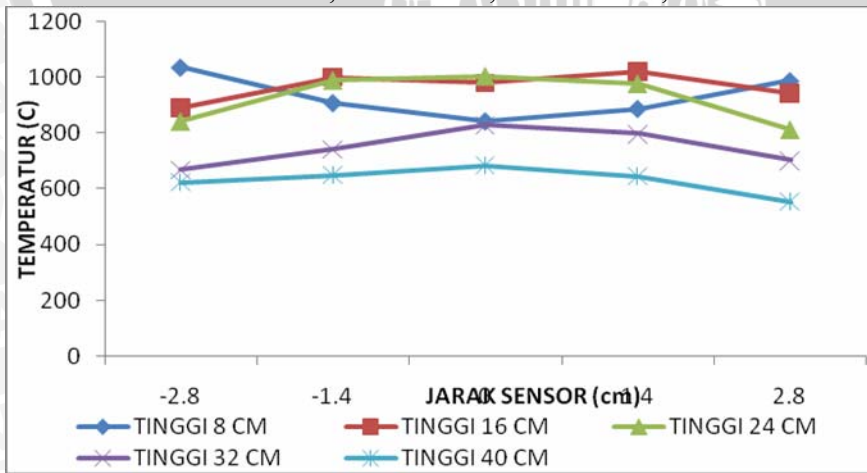
3.3.13 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ .



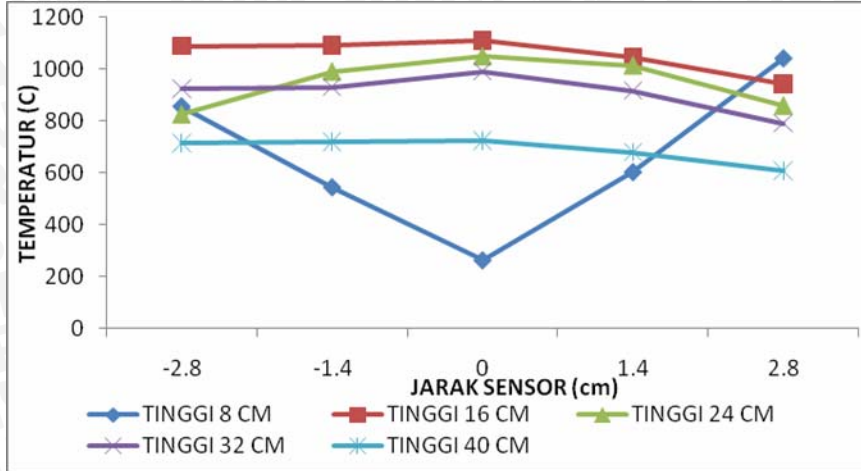
3.3.14 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ .



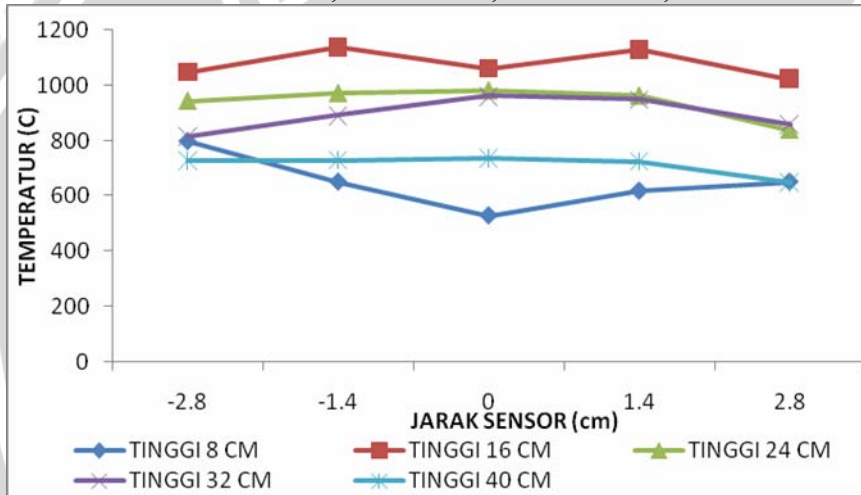
3.3.15 Debit bahan bakar  $3,660 \cdot 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,724 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ .



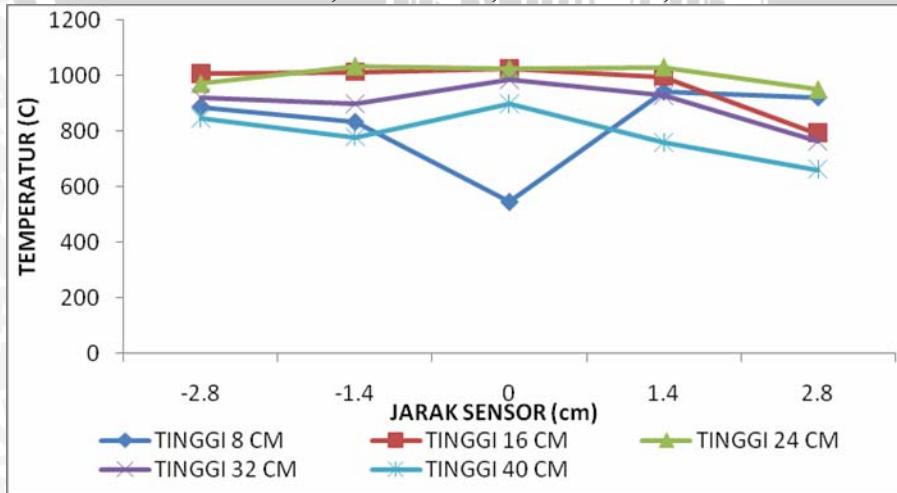
3.3.16 Debit bahan bakar  $4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .



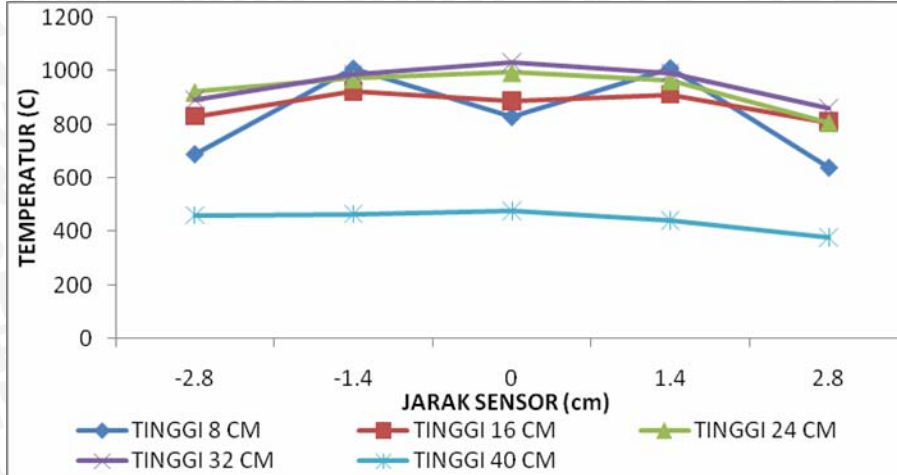
3.3.17 Debit bahan bakar  $4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



3.3.18 Debit bahan bakar  $4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



3.3.19 Debit bahan bakar  $4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



3.3.20 Debit bahan bakar  $4,230 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udara  $1,724 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

