

PENGARUH BENTUK NOSEL
TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR
PADA PROSES PEMBAKARAN DIFUSI MINYAK TANAH

SKRIPSI

Konsentrasi Konversi Energi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

AZAMATAUFIQ BUDIPRASOJO
NIM. 0210623020

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN MESIN
MALANG
2007

**PENGARUH BENTUK NOSEL
TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR
PADA PROSES PEMBAKARAN DIFUSI MINYAK TANAH**

SKRIPSI

Konsentrasi Konversi Energi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

AZAMATAUFIQ BUDIPRASOJO

NIM. 0210623020

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

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

Ir. Agustinus Ariseno
NIP. 131 653 470

**PENGARUH BENTUK NOSEL
TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR
PADA PROSES PEMBAKARAN DIFUSI MINYAK TANAH**

Disusun oleh :
AZAMATAUFIQ BUDIPRASOJO
NIM. 0210623020

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 01 Agustus 2007

DOSEN PENGUJI

SKRIPSI I

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

SKRIPSI II

Ir. Suharto, MT.
NIP. 131 131 025

KOMPREHENSIF

Ir. Saifuddin Baedowie
NIP. 130 350 753

Mengetahui :
Ketua Jurusan Mesin

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

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga skripsi yang berjudul “*Pengaruh Bentuk Nosel Terhadap Distribusi Temperatur Pada Proses Pembakaran Difusi Minyak Tanah*” dapat terselesaikan.

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

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT, selaku Ketua Jurusan Mesin.
2. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc. selaku Sekretaris Jurusan Mesin.
3. Bapak Dr. Ir. Rudy Soenoko, M. Eng. Sc, selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin sekaligus selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan serta meluangkan waktu untuk berdiskusi bersama penyusun dalam menyusun skripsi ini.
4. Bapak Ir. Agustinus Ariseno selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan pada penyusun dalam menyusun skripsi ini.
5. Seluruh Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin.
6. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Teknik Mesin serta Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Penyusun menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, untuk itu penyusun sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Tidak ada yang sempurna dalam setiap karya manusia, tapi justru itulah yang membuat manusia berpikir untuk menghasilkan karya yang lebih baik. Akhir kata semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Malang, Agustus 2007

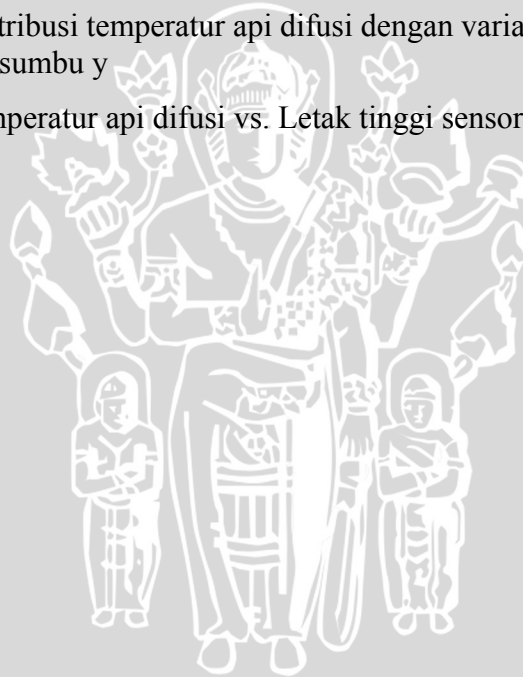
Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK	v
DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL	vi
RINGKASAN	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Penelitian Terdahulu	5
2.2. Pembakaran	6
2.3. Bahan Bakar	10
2.3.1. Bahan bakar cair	12
2.3.2. Minyak tanah	12
2.4. Mekanisme Pembakaran Bahan Bakar Cair	13
2.5. Temperatur Pembakaran	15
2.6. Atomisasi	16
2.7. Nosel	18
2.8. Hipotesa	20
BAB III METODE PENELITIAN	21
3.1. Metode Penelitian	21
3.2. Variabel yang Diukur	21
3.3. Pelaksanaan Penelitian	22
3.4. Alat-alat Penelitian	22
3.5. Instalasi Alat Penelitian	24
3.6. Prosedur Pengambilan Data	24

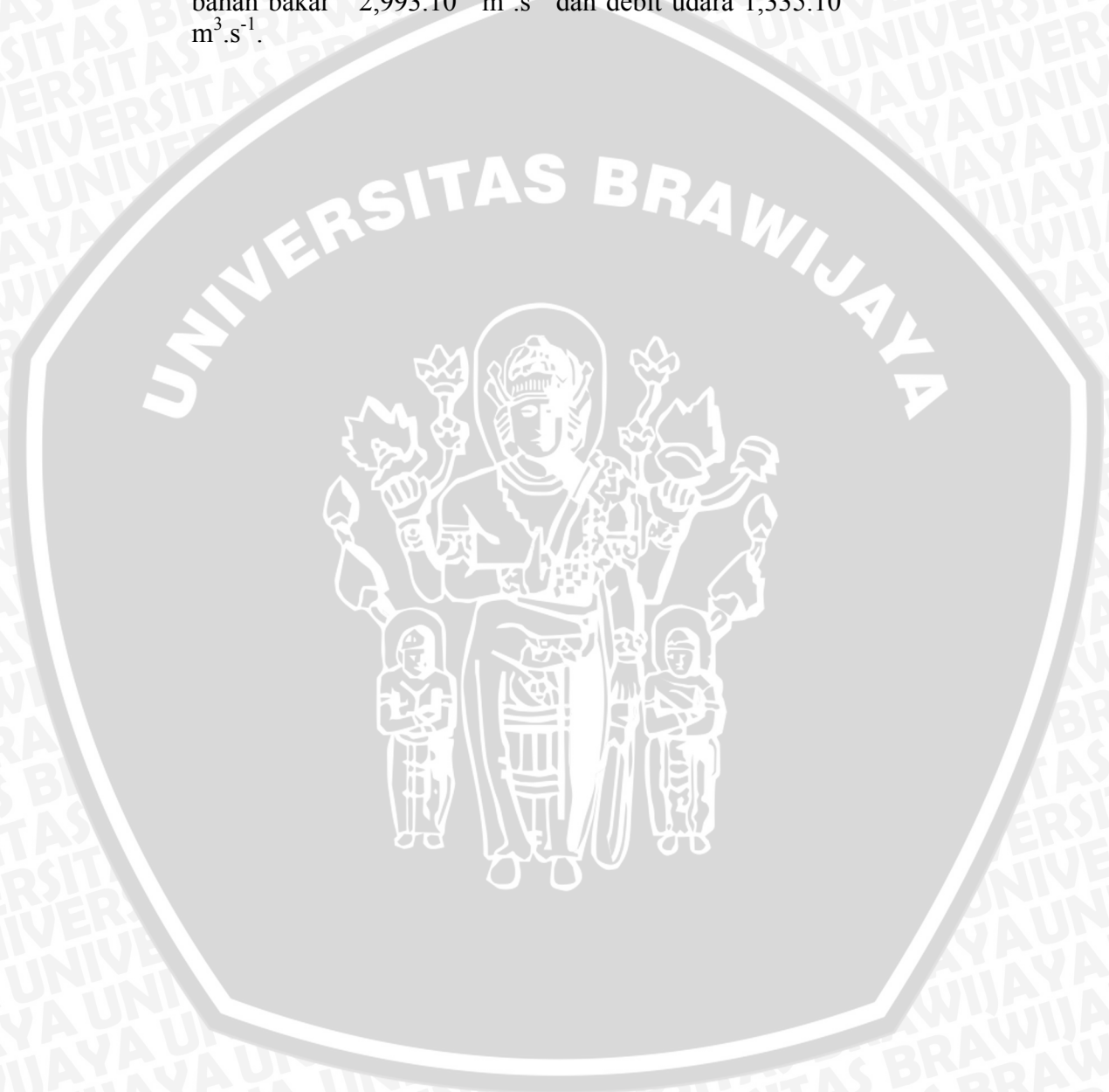


3.7. Rancangan Pengolahan Data	26
3.8. Rancangan Penelitian	27
BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN	28
4.1. Data Hasil Penelitian	28
4.2. Perhitungan Data	29
4.2.1. Perhitungan nilai konstanta kalibrasi manometer bahan bakar	29
4.2.2. Perhitungan nilai konstanta kalibrasi manometer udara	30
4.2.3. Perhitungan debit bahan bakar	33
4.2.4. Perhitungan debit udara	33
4.3. Pembahasan	34
4.3.1. Grafik distribusi temperatur dengan variasi nosel	34
4.3.2. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel pada arah sumbu y	40
4.3.3. Grafik temperatur api difusi vs. Letak tinggi sensor	41
BAB V PENUTUP	43
5.1 Kesimpulan	43
5.2 Saran	43
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Komposisi udara kering	8
Tabel 2.2	Sifat-sifat minyak tanah	13
Tabel 4.1	Data distribusi temperatur nosel konvergen dengan debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dan debit udara $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.	28



DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Proses atomisasi dengan nilai Re dan We yang berbeda-beda	5
Gambar 2.2.	Bentuk api pada pembakaran premiks	9
Gambar 2.3.	Bentuk api pada pembakaran difusi	10
Gambar 2.4.	Tingkat atomisasi pada nosel	17
Gambar 2.5.	Mekanisme pembentukan <i>droplet</i>	18
Gambar 2.6.	Atomisasi pada nosel	19
Gambar 2.7.	<i>Flat spray</i>	19
Gambar 2.8.	<i>Hollow cone spray</i>	20
Gambar 2.9.	<i>Solid cone spray</i>	20
Gambar 3.1.	Penampang nosel konvergen dengan diameter <i>throat</i> 0.5 mm	21
Gambar 3.2.	Penampang nosel konvergen divergen dengan diameter <i>throat</i> 0.5 mm	21
Gambar 3.3.	Instalasi penelitian	24
Gambar 3.4.	Letak titik pengukuran distribusi temperatur	25
Gambar 3.5.	Diagram alir penelitian	27
Gambar 4.1.	Grafik hubungan antara debit bahan bakar ideal dan debit bahan bakar aktual.	30
Gambar 4.2.	Grafik hubungan antara debit udara ideal dan debit udara aktual.	32
Gambar 4.3.	Grafik distribusi temperatur api difusi dengan debit udara sama	35
Gambar 4.4.	Grafik distribusi temperatur api difusi dengan debit bahan bakar sama	37
Gambar 4.5.	Grafik distribusi temperatur api difusi nosel konvergen debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dan debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.	40
Gambar 4.6.	Grafik distribusi temperatur api difusi nosel konvergen divergen debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dan debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.	40
Gambar 4.7.	Grafik temperatur api difusi vs. Letak tinggi sensor debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dan debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.	41

DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

Besaran dasar	Satuan	Simbol
Faktor kelebihan udara	–	λ
<i>Equivalece ratio</i>	–	Φ
Energi total penguapan	kJ.kg^{-1}	Q
Kalor laten	kJ.kg^{-1}	Δh_v
Kalor jenis bahan bakar	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$	C_{liq}
Temperatur permukaan droplet	°C	T_s
Temperatur permukaan droplet	°C	T_o
Densitas fluida	kg.m^{-3}	ρ
Kecepatan fluida	Ns.m^{-2}	μ
Diameter droplet	nm	d
Tegangan permukaan	N.m^{-2}	σ
Laju reaksi kimia	$\text{cm}^3.\text{mol}^{-1}.\text{s}^{-1}$	k_f
Energi aktivasi	cal.mol^{-1}	E_a
Konstanta gas universal	$\text{cal.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$	R_u
Temperatur	°K	T
Temperatur	°C	T
Bilangan Reynold	–	Re
Densitas udara	kg.m^{-3}	ρ
Jari-jari lingkaran luar	m	R
Jari-jari lingkaran dalam	m	r
<i>Phi</i>	–	π
Massa jenis minyak tanah	kg.m^{-3}	ρ_{bb}
Massa jenis udara	kg.m^{-3}	ρ_{ud}
Massa jenis manometer	kg.m^{-3}	ρ_m
Beda ketinggian pada manometer	mm	Δh
Percepatan grafitasi bumi	m.s^{-2}	g
Rasio diameter orifis dan diameter saluran	–	β
Diameter saluran bahan bakar	m	D_{bb}
Diameter saluran udara	m	D_{ud}



Diameter nosel bahan bakar	m	D_{nos}
Diameter dalam orifis bahan bakar	m	d_{bb}
Diameter dalam orifis udara	m	d_{ud}
Luas nosel bahan bakar	m^2	A_{nos}
Luas penampang bahan bakar	m^2	A_{bb}
Luas pipa udara	m^2	A_{ud}
Kecepatan aliran bahan bakar orifis	$m.s^{-1}$	V_{bb2}
Kecepatan aliran bahan bakar saluran	$m.s^{-1}$	V_{bb1}
Kecepatan aliran udara orifis	$m.s^{-1}$	V_{ud2}
Kecepatan aliran udara saluran	$m.s^{-1}$	V_{ud1}
Debit bahan bakar ideal	$m^3.s^{-1}$	$Q_{bb-ideal}$
Debit bahan bakar aktual	$m^3.s^{-1}$	$Q_{bb-aktual}$
Debit udara ideal	$m^3.s^{-1}$	$Q_{u-ideal}$
Debit udara aktual	$m^3.s^{-1}$	$Q_{u-aktual}$
Debit bahan bakar	$m^3.s^{-1}$	Q_{bb}
Debit udara	$m^3.s^{-1}$	Q_{ud}
Konstanta kalibrasi udara	–	C_u
Konstanta kalibrasi bahan bakar	–	C_b
<i>High Heating Value</i>	$kcal.m^{-3}$	HHV
<i>Lower Heating Value</i>	$kcal.m^{-3}$	LHV
Volume gas spesifik	$m^3.kg^{-1}$	v
Konstanta Boltzman	$W.m^{-2}.K^{-4}$	k



RINGKASAN

AZAMATAUFIQ BUDIPRASOJO, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2007, *Pengaruh Bentuk Nosel terhadap Distribusi Temperatur pada Proses Pembakaran Difusi Minyak Tanah*. Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.Sc dan Ir. Agustinus Ariseno.

Pembakaran difusi secara luas digunakan pada sistem pembakaran di industri. Ada beberapa cara yang digunakan untuk dapat mengefisienkan proses pembakaran, diantaranya yaitu dengan cara memperbaiki proses pengabutan (atomisasi). Sistem pengabutan tidak lepas dari sistem aliran fluida. Salah satu alat dalam sistem aliran fluida yang digunakan untuk proses pengabutan (atomisasi) adalah nosel. nosel digunakan sebagai alat yang digunakan untuk menghasilkan fluida dalam bentuk butiran halus (*droplet*). Ukuran, kecepatan dan distribusi *droplet* dipengaruhi oleh jenis fluida dan desain (bentuk) nosel. Penggunaan nosel yang tepat pada pembakaran dapat meningkatkan efisiensi pembakaran. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh bentuk nosel terhadap distribusi temperatur pada proses pembakaran difusi.

Instalasi penelitian terdiri dari beberapa komponen utama yang meliputi tabung minyak tanah sebagai catu bahan bakar, *blower* sebagai catu aliran udara aksial, *burner* sebagai tempat terjadinya reaksi pembakaran. Variabel bebas yang digunakan adalah jenis nosel konvergen dan konvergen-divergen yang berdimensi *throat* 0,5 mm, debit aliran udara aksial divariasikan $7,715 \cdot 10^{-4}$, $1,09 \cdot 10^{-3}$, $1,335 \cdot 10^{-3}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], dan debit aliran bahan bakar juga divariasikan $2,115 \cdot 10^{-7}$, $2,993 \cdot 10^{-7}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]. Pengambilan data temperatur dilakukan dengan menggunakan *thermocouples* yang dikuatkan oleh *Operational Amplifier*, selanjutnya data diubah dari data analog ke data digital dengan menggunakan *Analog to Digital Converter*. Data temperatur kemudian di-plot dalam bentuk grafik distribusi temperatur.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Nosel konvergen memiliki distribusi temperatur api yang lebih merata baik untuk arah vertikal maupun arah horisontal. Nosel konvergen divergen memiliki kemampuan untuk menghasilkan api dengan temperatur maksimal yang lebih tinggi dibandingkan nosel konvergen. Distribusi temperatur yang paling baik terjadi pada bagian tengah api sedangkan distribusi temperatur yang paling jelek terjadi pada bagian bawah api. Temperatur api yang paling tinggi terjadi pada bagian bawah api. Untuk mendapatkan temperatur yang tinggi maka penguapan bahan bakar harus baik, pemanasan terhadap bahan bakar yang baik akan memudahkan *droplet* untuk menguap.

Keywords : pembakaran, nosel, distribusi temperatur

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini manusia masih belum dapat melepaskan ketergantungan pada pemakaian bahan bakar fosil yang merupakan bahan bakar tidak dapat diperbaharui. Ada tiga kelas bahan bakar fosil yang umum adalah batubara, minyak bumi dan gas alam. Energi dari bahan bakar hidrokarbon menjadi tumpuan dan merupakan sumber energi terbesar di dunia. Konsumsi bahan bakar terus meningkat setiap tahunnya sedangkan ketersediaan bahan bakar fosil terus menipis ditambah kebijakan harga bahan bakar fosil yang terus meningkat.

Metode yang paling mudah digunakan untuk pengkonversian energi dari bahan bakar 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.

Akhir-akhir ini banyak dikembangkan program diversifikasi energi, yaitu pencarian terhadap sumber-sumber energi baru yang dapat diperbaharui seperti energi surya, biogas, biomassa, *fuel cell* dan lain sebagainya. Pada kenyataannya sampai dengan saat ini pemanfaatan energi dari suatu proses pembakaran masih sangat dominan, karena dengan proses pembakaran dapat menghasilkan densitas daya yang tinggi sehingga daya yang besar dapat diperoleh dengan alat yang relatif kecil dan alasan lain adalah energi pembakaran dapat diperoleh dengan cepat dan mudah dalam pengontrolan. Kemajuan dalam pembangkitan energi tidak mungkin terjadi tanpa keunggulan dalam suatu proses pembakaran.

Banyak penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan efisiensi maupun mengamati fenomena yang terjadi dari proses pembakaran. Pembakaran dapat terjadi lebih sempurna apabila proses pengabutan dan penguapan dari bahan bakar terjadi dengan baik.

Ada beberapa cara yang digunakan untuk dapat mengefisienkan proses pembakaran, diantaranya yaitu dengan cara memperbaiki proses pengabutan (atomisasi). Apabila proses pengabutan (atomisasi) lebih baik maka proses penguapan

dari bahan bakar minyak lebih cepat terjadi, hal ini mengakibatkan proses pembakaran akan lebih mudah terjadi (pembakaran lebih sempurna) karena pendifusian antara bahan bakar dan udara dapat terjadi lebih sempurna. Hasil dari pembakaran sempurna akan meningkatkan efisiensi pembakaran sehingga dapat menghemat penggunaan bahan bakar dan temperatur yang dihasilkan akan lebih tinggi.

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

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

Dalam penelitian ini bahan bakar yang digunakan adalah jenis minyak tanah. Pemakaian bahan bakar minyak tanah digunakan karena bahan bakar jenis ini mayoritas masyarakat rumah tangga masih menggunakannya, sehingga jika didapat metode peningkatan efisiensi pembakarannya maka sangat berguna bagi masyarakat. Nosel pembakaran minyak tanah yang jamak dipakai adalah nosel konvergen divergen. Pembuatan nosel konvergen divergen lebih rumit dan membutuhkan *cost* yang lebih besar dibandingkan dengan nosel konvergen. Nosel konvergen memiliki karakteristik yang bisa memperbaiki atomisasi yaitu tekanan masuk nosel tinggi dan kecepatan keluar nosel tinggi. Atomisasi yang baik merupakan salah satu faktor yang memperbaiki pembakaran.

Dengan karakteristik yang dimiliki nosel konvergen tersebut, ada kemungkinan bahwa nosel konvergen dapat digunakan untuk menggantikan nosel konvergen divergen. Penulis menggunakan fenomena distribusi temperatur untuk membandingkan kedua jenis nosel ini.

1.2. Rumusan Masalah

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

Bagaimana pengaruh bentuk nosel terhadap distribusi temperatur api difusi 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 *kerosene* yang dijual dipasaran.
2. Udara lingkungan sekitar diasumsikan memiliki kelembaban dan temperatur konstan.
3. Kontruksi dari alat penelitian dan cara pembuatan nosel tidak diperhitungkan.
4. Tekanan dalam tabung dianggap konstan.
5. Kondisi udara lingkungan dianggap konstan.
6. Pemanasan awal tidak diperhitungkan.
7. Hanya membahas distribusi temperatur
8. Luas penampang masuk nosel dan panjang nosel konstan, dengan luas penampang masuk nosel 7.065 mm^2 dan panjang nosel 8 mm.
9. Pada penelitian ini digunakan nosel konvergen dengan dimensi *throat* 0,5 mm dan nosel konvergen-divergen dengan dimensi *throat* 0,5 mm.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pemakaian nosel konvergen dan nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* yang sama, 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. Mengetahui distribusi temperatur pada pembakaran difusi minyak tanah.

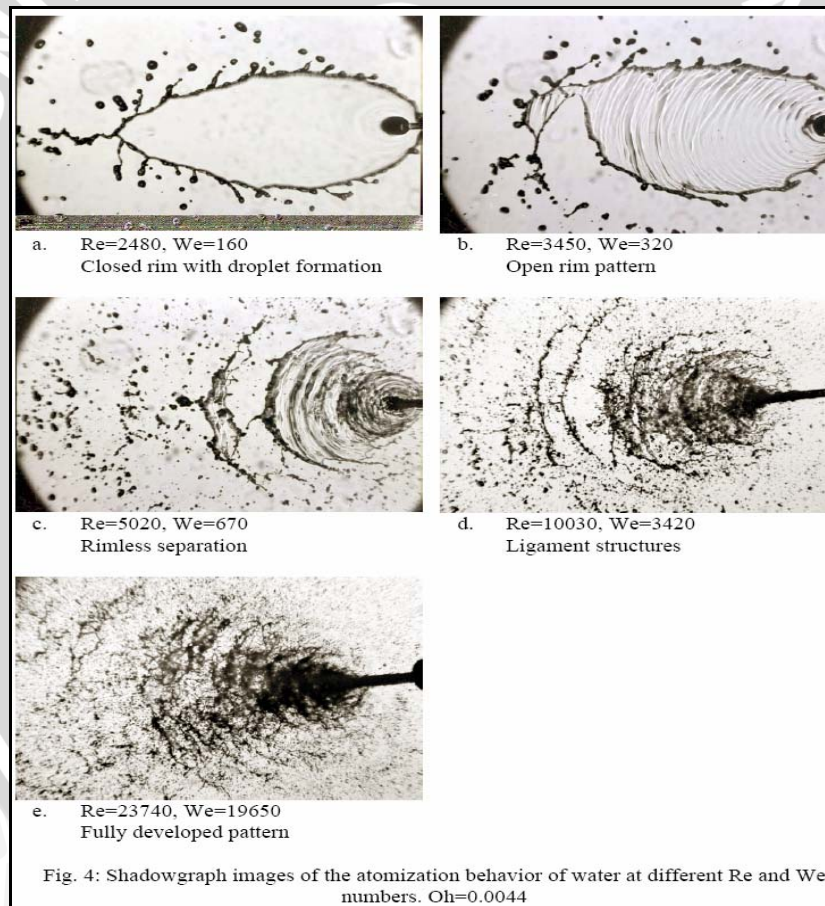
3. Memberikan informasi pada bidang perindustrian bagaimana cara meningkatkan efisiensi pembakaran khususnya industri yang menggunakan bahan bakar minyak.
4. Memberikan informasi cara meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar minyak tanah.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Kampen, J.V. dkk (1992) melakukan penelitian tentang proses atomisasi fluida *Newtonian* (air) menggunakan nosel dengan diameter keluar 0.7 mm dan 1 mm. Penelitian ini dilakukan dengan nilai Reynold dan Weber tertentu ($60 < Re < 30000$ dan $100 < We < 30000$). Nilai Re dan We dapat dijadikan acuan terjadinya perbedaan *break up* 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.



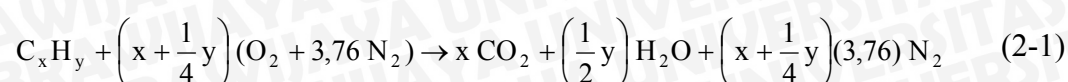
Gambar 2.1 : Proses atomisasi dengan nilai Re dan We yang berbeda-beda.

Sumber : *Some Aspects of the Atomization Behavior of Newtonian and of Shear thinning Gelled non-Newtonian Fluids with an Impinging Jet Injector*

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, sehingga akan menimbulkan banyak terjadi tumbukan antar partikel fluida, *losses* semakin besar dan kapasitas alir aliran fluida keluar nosel akan lebih kecil.

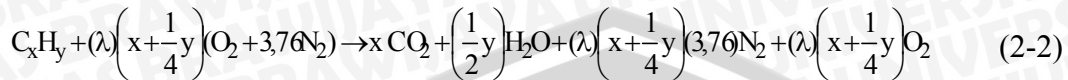
2.2. Pembakaran

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, oksigen 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. Pembakaran sempurna dari bahan bakar dan udara akan menghasilkan H_2O dan CO_2 , namun keadaan ini tidak akan pernah tercapai. Reaksi pembakaran sempurna biasanya digunakan untuk mempermudah dalam melakukan perhitungan pada proses pembakaran. Persamaan kesetimbangan kimia untuk pembakaran sempurna dari suatu reaktan tidak menghasilkan kelebihan udara pada produk pembakarannya dan biasa disebut dengan kondisi stoikiometris. Reaksi pembakaran sempurna antara bahan bakar (C_xH_y) dengan udara secara matematis dituliskan sebagai berikut (Wardana, 1995: 21):



Dalam persamaan tersebut digunakan jumlah udara teoritis. Akan tetapi, dalam kondisi aktual pembakaran sempurna hampir tidak pernah terjadi karena pembakaran berlangsung secara kompleks. Pembakaran tidak hanya tergantung pada model ruang

bakarnya tetapi juga tergantung kondisi dari bahan bakar, udara dan temperatur pembakarannya. Salah satu cara untuk memperbesar kemungkinan terjadinya pembakaran sempurna adalah dengan menggunakan jumlah udara berlebih (*excess air*). Apabila digunakan udara pembakaran sebanyak λ x jumlah udara teoritis, persamaan reaksinya akan menjadi:



dengan:

λ = faktor kelebihan udara

$\lambda = 1$, apabila dipergunakan udara teoritis

$\lambda > 1$, apabila dipergunakan udara berlebih

$\lambda < 1$, apabila kekurangan udara

Penggunaan udara berlebih tersebut memerlukan sebuah parameter untuk menyatakan banyaknya udara pembakaran tiap satuan kuantitas bahan bakar. Parameter tersebut adalah *air-to-fuel ratio* (AFR). AFR dapat dinyatakan dalam mol udara per mol bahan bakar atau massa udara per massa bahan bakar, seperti terlihat pada persamaan berikut:

$$(AFR)_{\text{teoritis}} = \left(\frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bahan bakar}}} \right)_{\text{teoritis}} = \left(\frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}} \right) \quad (\text{Turns, 1996: 19}) \quad (2-3)$$

Perbandingan antara $(AFR)_{\text{teoritis}}$ dengan AFR_{aktual} dinyatakan dengan *equivalence-ratio* (Φ), sebagai berikut:

$$\Phi = \frac{\left(\frac{A}{F} \right)_{\text{teoritis}}}{\left(\frac{A}{F} \right)_{\text{aktual}}} = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{Turns, 1996: 19}) \quad (2-4)$$

dengan:

$\Phi > 1$, apabila campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixtures*)

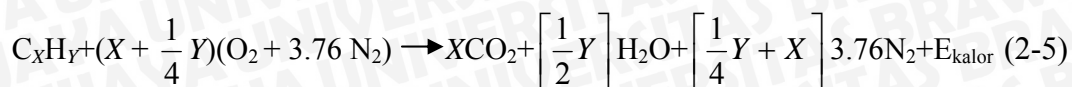
$\Phi < 1$, apabila campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixtures*)

$\Phi = 1$, apabila campuran stoikiometri

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 2.1 Komposisi udara kering

Unsur / senyawa	Persentase volume (%)	Persentase berat (%)	Berat molekul Lb per mole
Oksigen (O ₂)	20.99	23.19	32.00
Nitrogen (N ₂)	78.03	75.47	28.016
Argon (Ar)	0.94	1.30	39.944
Karbon dioksida (CO ₂)	0.03	0.04	44.003
Hidrogen (H ₂)	0.01	0.00	2.016
Udara kering	100.00	100.00	28.967

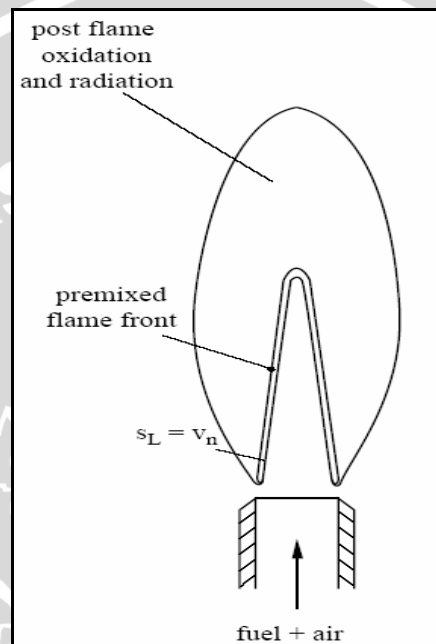
Sumber : Tjokroawidjojo, 1986 : 47

Karena reaktan 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.

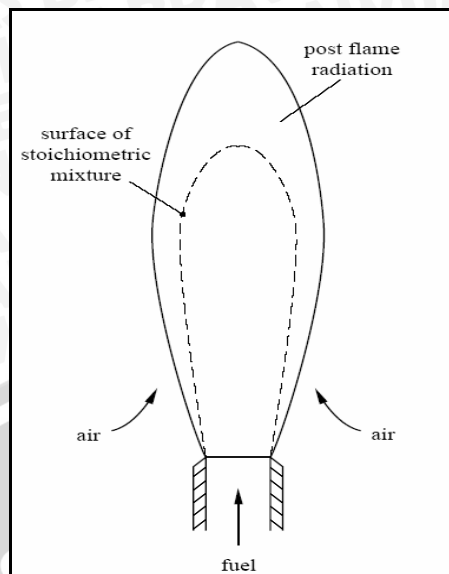
Dari sudut pandang aerodinamika pembakaran, ada dua jenis pembakaran yaitu pembakaran premiks dan pembakaran difusi. Pembakaran premiks adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan udara (oksigen) dicampur terlebih dahulu secara mekanik, kemudian dibakar, contoh pembakaran jenis ini dapat dilihat 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. 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 pemadatan ikatan hidrat arang dalam perut bumi. Ikatan tersebut memiliki rumus umum kimia $C_x(H_2O)_y$ dihasilkan oleh tumbuh-tumbuhan dalam proses fotosintesis ketika tumbuh-tumbuhan mengubah energi matahari menjadi energi kimia. Setelah tumbuh-tumbuhan mati, hidrat arang diubah oleh tekanan dan panas tanpa oksigen di dalam perut bumi menjadi ikatan hidrokarbon dengan rumus kimia C_nH_m . Tentunya proses ini berlangsung dalam jangka waktu yang lama (Wardana, 1996 : 3). Komposisi bahan bakar fosil dan

bahan bakar organik umumnya tersusun dari unsur-unsur C (karbon), H (hidrogen), O (oksigen), N (nitrogen), S (belerang), P (fosfor) dan unsur-unsur lainnya dalam jumlah kecil, namun unsur-unsur kimia yang penting adalah C, H dan S. Unsur-unsur tersebut jika terbakar menghasilkan kalor dan disebut sebagai “bahan yang dapat terbakar” disingkat BDT. Unsur-unsur lain yang terkandung dalam bahan bakar namun tidak dapat terbakar adalah oksigen, nitrogen, air dan bahan mineral atau abu. Komponen-komponen ini disebut sebagai bahan yang tidak dapat terbakar disingkat dengan non-BDT.

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

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.

2.3.1. 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 penyalannya. Untuk proses penyalan 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.

2.3.2. 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 berdasar titik didih yang berlainan dapat menghasilkan bensin, minyak tanah, solar, minyak pelumas dan residu. Minyak tanah mempunyai sifat khusus seperti nomor karbon dari C₁₁ sampai C₁₃ serta mempunyai titik didih antara 150 °C dan 300 °C, HHV 44 $\frac{MJ}{kg}$ serta LHV 42

$\frac{MJ}{kg}$. Untuk pembakaran minyak tanah, AFR stoikiometri didapat dari persamaan reaksi seperti berikut



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

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

Selain nilai kalor dan titik didih, sifat-sifat minyak tanah yang lainnya dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sifat-sifat minyak tanah

Physical Properties of kerosene	
Boiling point	150°C
Melting point	-20°C
Relative density (water = 1)	0.8
Solubility in water	insoluble
Relative vapour density (air = 1)	4.5
Flash point	37-65°C
Auto-ignition temperature	220°C
Explosive limits, vol% in air	0.7-5
Viscosity	$8.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ for at 20 °C.
Vapour pressure	0.7..1 kPa at 38 °C
HHV	46 MJ/kg
LHV	43 MJ/kg

Sumber : www.hpa.org.uk/Chemicals/compendium/Kerosene/properties.htm

2.4. 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 :

$$Q = \Delta h_v + C_{liq} (T_s - T_o) \quad (\text{Kuo, 1986 : 373}) \quad (2-7)$$

dimana :

Q = energi total penguapan (kJ/kg)

Δh_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 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)* [kcal.m⁻³]
2. *Upper Inflammability Limit (UIL)* [kcal.m⁻³]

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

2.5. Temperatur Pembakaran

Enthalpi 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

$$H_{\text{react}}(T_i, P) = H_{\text{prod}}(T_{\text{ad}}, P) \quad (\text{Turns : 1996, 32}) \quad (2-8)$$

$H_{\text{react}}(T_i, P)$ = 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.

2.6. 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. Karakteristik atomisasi dipengaruhi oleh tiga bilangan tak berdimensi : Re_j , We_j , 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.

1. *Jet Reynold number* : $Re_j = \left(\frac{\rho V}{\mu} \right) d_j$ (Borman : 1998, 291) (2-9)

$$2. \text{ Jet weber number : } We_j = \left(\frac{\rho_g V_j^2 d_j}{\sigma} \right) \quad (\text{Borman : 1998, 291}) \quad (2-10)$$

$$3. \text{ Ohnesorge numbe : } Oh = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma d_j}} \quad (\text{Borman : 1998, 291}) \quad (2-11)$$

Dimana :

ρ = Densitas fluida (kg.m^{-3})

V = Kecepatan fluida (m.s^{-1})

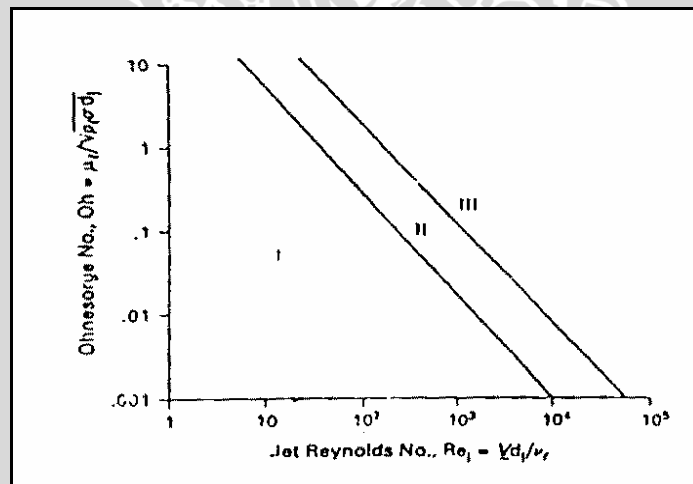
μ = Viskositas dinamik (Ns.m^{-2})

d = Diameter droplet (nm)

σ = Tegangan permukaan (N.m^{-2})

* Subskrip l, g dan j menyatakan *liquid*, *gas* dan *jet*.

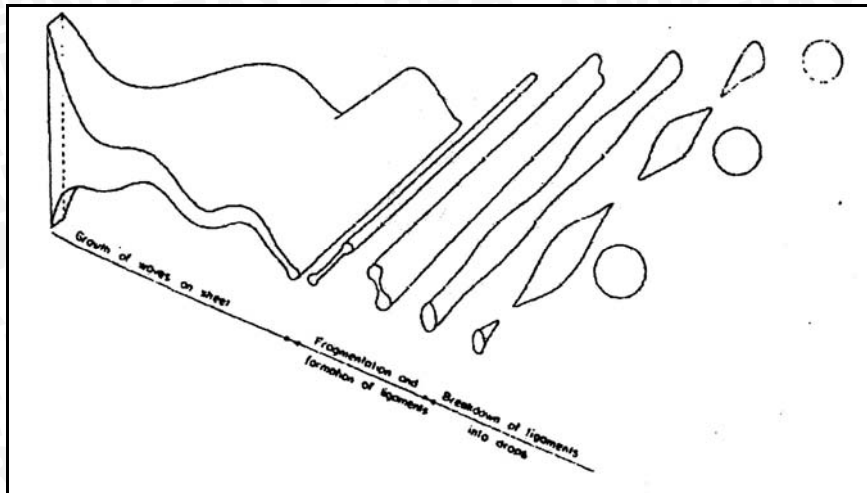
Tingkat atomisasi pada nosel digambarkan dengan grafik hubungan log Oh dengan log Re_j dibagi menjadi tiga zona. Tingkat atomisasi diplot pada grafik Log Oh Vs Log Re_j yang ditunjukkan pada gambar 2.4 dibawah ini :



Gambar 2.4 : 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.



Gambar 2.5 : Mekanisme pembentukan *droplet*.

Sumber : www.forms.gradsach.psu.edu/equity/sroppapers/2005/delgadojorge

2.7. Nosel

Nosel adalah alat yang berbentuk pipa atau tabung dengan diameter masuk dan keluar berbeda, yang didalamnya energi kinetik fluida yang mengalir bertambah akibat penurunan tekanan dan digunakan untuk mengarahkan atau memodifikasi aliran zat cair atau gas. 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 pada sisi masuk nosel menyebabkan kecepatan droplet menjadi bertambah. Kenaikan kecepatan keluar nosel menyebabkan penurunan tekanan pada daerah atomisasi. Karena tekanan di daerah atomisasi mengalami penurunan sehingga lebih rendah dari pada udara yang mengalir pada ruang bakar, maka udara cenderung akan masuk menuju daerah pengkabutan dan udara tersebut akan bergabung dengan *droplet*. Dengan adanya fenomena diatas, maka *droplet* akan kehilangan kecepatan secara langsung dan udara akan berdifusi dengan *droplet* Gambar atomisasi bahan bakar cair setelah keluar mulut nosel ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



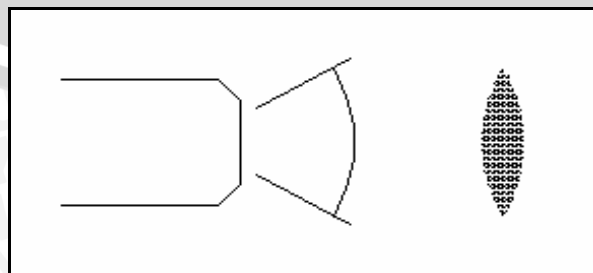
Gambar 2.6 : Atomisasi pada nosel

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.

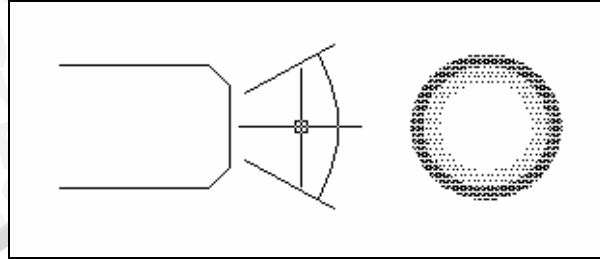


Gambar 2.7 : *Flat spray*.

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.

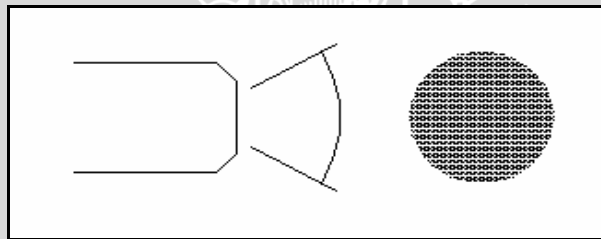


Gambar 2.8 : *Hollow cone spray*.

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 2.9 : *Solid cone spray*.

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

2.8. Hipotesa

Dari uraian diatas dapat diambil suatu hipotesis bahwa dengan pemakaian nosel konvergen akan menghasilkan distribusi temperatur yang lebih merata kearah horizontal dengan tingkat perubahan temperatur yang relatif rendah. Hal ini disebabkan droplet yang dihasilkan lebih menyebar saat keluar nosel. Sedangkan dengan pemakaian nosel konvergen-divergen akan dihasilkan distribusi temperatur yang kurang merata.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian

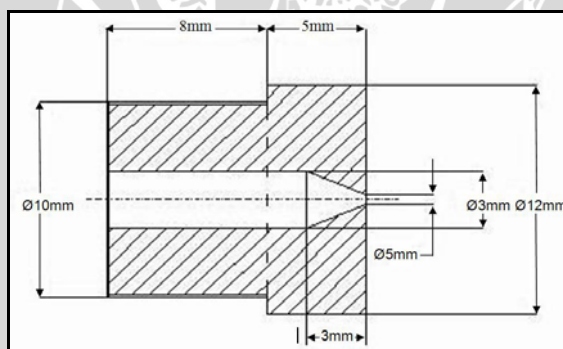
Penelitian ini menggunakan metode *experimental*. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan secara langsung untuk mengetahui hubungan atau pengaruh dari sebab akibat suatu perlakuan tertentu. Obyek yang akan diamati pada penelitian ini adalah pengaruh bentuk nosel terhadap distribusi temperatur pada pembakaran difusi minyak tanah.

3.2. Variabel yang Diukur

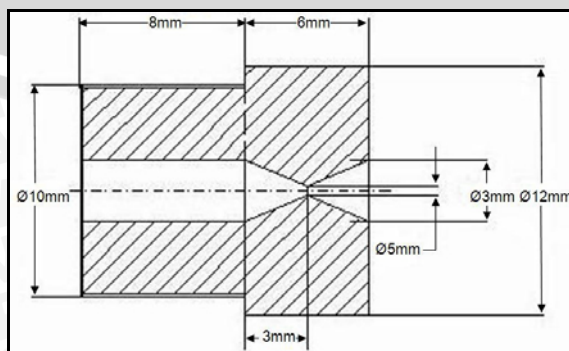
Pada penelitian ini ada tiga variabel yang akan diukur yaitu :

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 jenis nosel konvergen dan konvergen-divergen yang berdimensi *throat* sama.



Gambar 3.1 : Penampang nosel konvergen dengan diameter *throat* 0.5 mm



Gambar 3.2 : Penampang nosel konvergen-divergen dengan diameter *throat* 0.5 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 api.

3. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang ditentukan sebelum penelitian. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah debit bahan bakar sebesar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit udara sebesar $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

3.3. Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fluida Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Pada bulan Juni.

3.4. Alat-alat Penelitian

1. Kompresor

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

- a. Model : C-FC1-24 HP 0,5 LAKONI 125X
- b. Tegangan : 220 V
- c. 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 debit udara dari blower dan debit bahan bakar minyak tanah.

4. Nosel

Nosel digunakan untuk menyembrotkan bahan bakar dan mendistribusikan bahan bakar ke ruang 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 :

- a. Model : *electric blower*
- b. Ukuran : 2"
- c. Tegangan : 220 V
- d. Arus : 1 A
- e. Putaran : 3600 rpm

6. Termokopel

Termokopel ini digunakan untuk membaca perubahan temperatur dari api yang terbentuk.

Spesifikasi

- Jenis : Tipe K
Bahan : Nickel-Chromium vs. Nickel-Aluminum
Kemampuan : Max. temperatur 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.

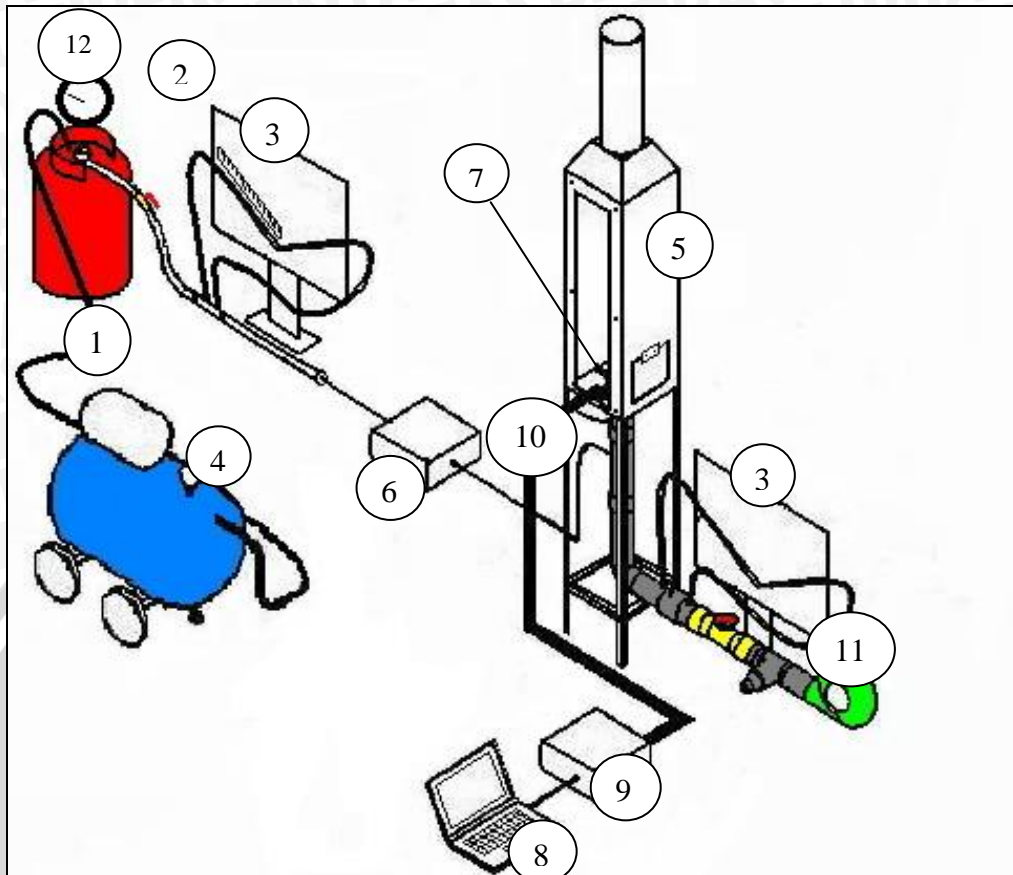
9. Komputer

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.

3.5. Instalasi Alat Penelitian



Gambar 3.3 Instalasi penelitian

Keterangan :

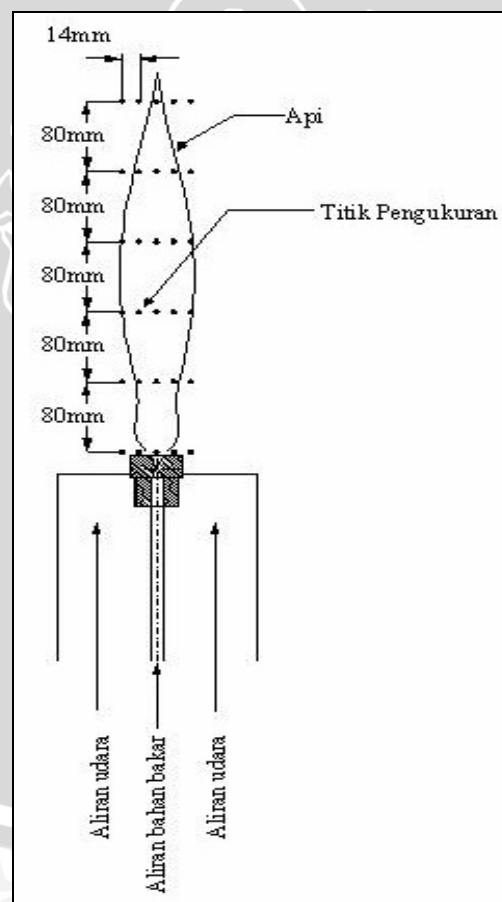
- | | |
|------------------------|--------------------|
| 1. Tabung bahan bakar | 7. Nosel |
| 2. Katup bahan bakar | 8. Komputer |
| 3. Manometer | 9. ADC |
| 4. Kompresor | 10. Termokopel |
| 5. Ruang bakar | 11. Blower |
| 6. Pamanas bahan bakar | 12. Pressure Gauge |

3.6. 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 diameter *throat* 0.5 mm, dengan diameter *throat* ke ujung saluran bahan bakar dalam ruang bakar.
3. Mengatur bukaan penutup blower pada debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4. Mengatur bukaan katup bahan bakar pada debit $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
5. Melakukan pemanasan awal bahan bakar pada saluran bahan bakar agar bahan bakar yang keluar dari nosel mencapai temperatur $160 \text{ }^\circ\text{C}$.
6. Menyalakan api pada kondisi bahan yang keluar nosel mencapai temperatur $160 \text{ }^\circ\text{C}$
7. Mengukur distribusi temperatur pada posisi yang telah ditentukan seperti pada gambar 3.4.
8. Mengulangi langkah no 4 sampai no 7, untuk variasi kecepatan bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
9. Mengulangi langkah no 3 sampai no 9 untuk variasi debit udara $1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dan $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
10. Mengulangi langkah no 2 sampai no 9 untuk nosel konvergen dengan diameter *throat* 0.5 mm.



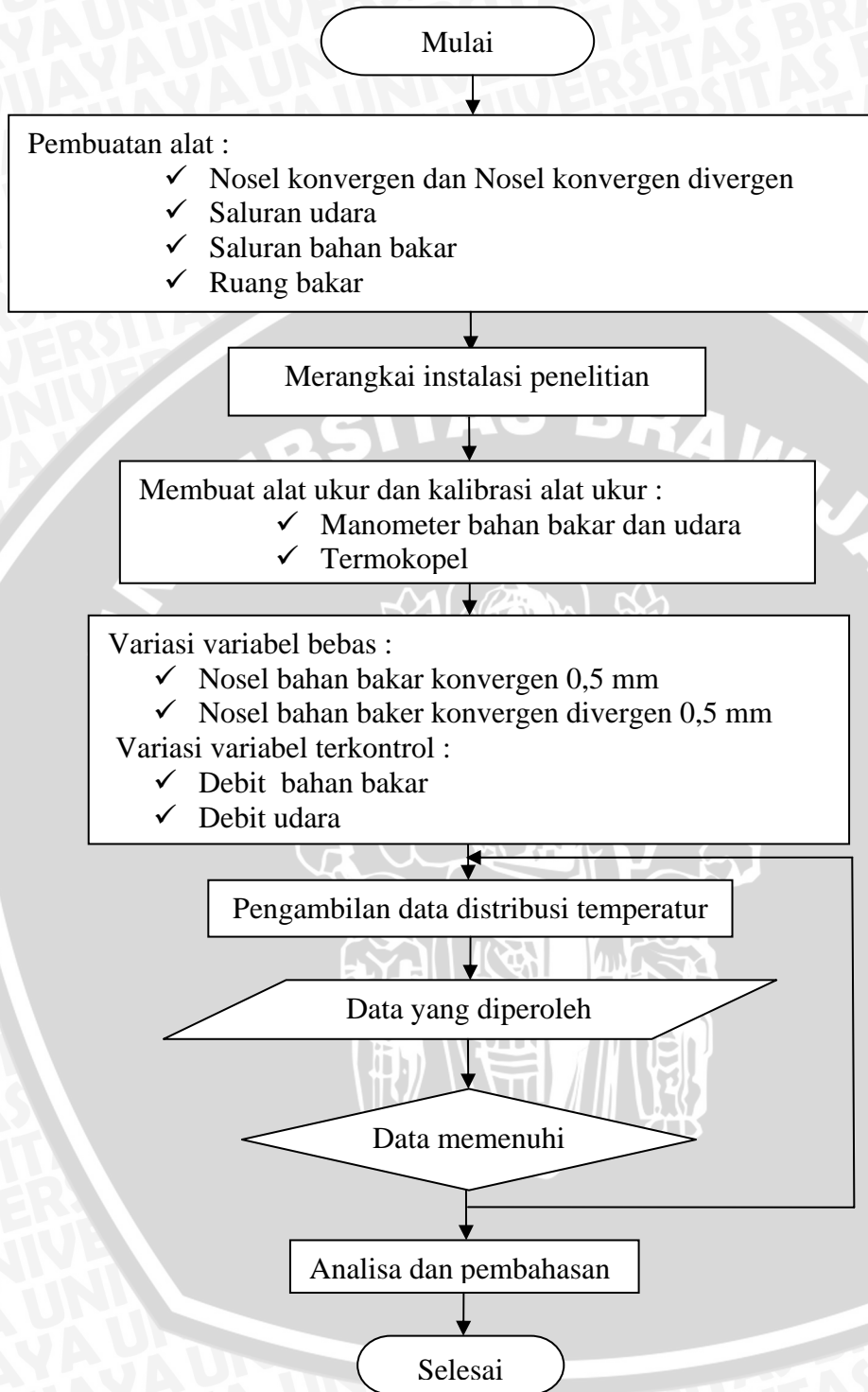
Gambar 3.4 Letak titik pengukuran distribusi temperatur

3.7. Rancangan Pengolahan Data

1. Membuat grafik hubungan temperatur, debit bahan bakar dan debit udar dari data-data yang diperoleh yang berkaitan dengan variasi jenis nosel bahan bakar.
2. Menganalisa garafik hubungan dari data yang diperoleh.



3.8. Rancangan Penelitian



Gambar 3.5 Diagram alir penelitian



BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Hasil Penelitian

Data yang diambil pada penelitian ini berupa distribusi temperatur 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 (sumbu y) dengan jarak 14 mm tiap sensornya. Titik pengambilan data distribusi temperatur secara vertikal (sumbu x) diperoleh dengan menggeser sensor termokopel ke arah vertikal keatas sepanjang 80 mm sampai mencapai ketinggian 400 mm.

Data distribusi temperatur diambil pada pembakaran dengan menggunakan 2 jenis nosel yaitu nosel konvergen dan nosel konvergen divergen dengan diameter 0,5 mm. Untuk setiap nosel debit bahan bakar divariasi sebesar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit udara divariasi sebesar $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Data temperatur pada setiap titik diambil selama dua puluh detik, dengan jumlah data 100. Data temperatur yang diperoleh pada satu titik untuk setiap pengambilan data (sebanyak 100 data) dirata-rata untuk menentukan temperatur pada titik tersebut. Dalam penelitian ini pengambilan data diulangi sebanyak dua kali. Dari dua kali pengambilan data diperoleh dua 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. ditampilkan dalam bentuk tabel berikut ini :

Tabel 4.1 Data distribusi temperatur nosel konvergen dengan debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dan debit udara $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Letak Sensor sumbu Y (mm)	Sumbu X (mm)				
	-28	-14	0	14	28
Distribusi Temperatur (°C) pada ketinggian 80	522.975	889.665	626.305	966.340	599.650
Distribusi temperatur (°C) pada ketinggian 160	728.520	775.845	808.450	792.750	725.425
Distribusi temperatur (°C) pada ketinggian 240	386.165	484.800	544.050	520.590	431.955
Distribusi temperatur (°C) pada ketinggian 320	408.725	454.530	487.740	458.375	401.760
Distribusi temperatur (°C) pada ketinggian 400	211.840	253.470	277.345	266.450	224.820

Data lengkap mengenai distribusi temperatur pada setiap nosel dengan variasi debit bahan bakar dan udara dapat dilihat pada lampiran 2 sampai dengan lampiran 13.

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 ($Q_{bb-ktual}$) dengan debit bahan bakar ideal yang diperoleh berdasarkan perbedaan tekanan pada manometer. Debit bahan bakar ideal dihitung dengan data yang diketahui sebagai berikut :

Massa jenis minyak tanah (ρ_{bb})	= 835 kg.m ⁻³
Massa jenis air manometer (ρ_m)	= 1000 kg.m ⁻³
Diameter saluran bahan bakar (D_{bb})	= 7 mm = 0,007 m
Diameter dalam orifis (d_{bb})	= 3,2 mm = 0,0032 m
Beda ketinggian yang ditunjukkan manometer (Δh)	= 2 mm = 0,002 m
Percepatan gravitasi (g)	= 9,81 m.s ⁻²

Perhitungan :

- Rasio diameter orifis dengan saluran bahan bakar :

$$\beta = d_{bb}/D_{bb} = 3,2/7 = 0,457$$

- Kecepatan aliran bahan bakar ideal pada orifis

$$\begin{aligned} V_{bb2} &= \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \Delta h)}{(\rho_{bb} \cdot (1 - \beta^4))}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot (1000 \cdot 9.81 \cdot 0,002)}{(835 \cdot (1 - 0.457^4))}} \\ &= 0,222 \text{ m.s}^{-1} \end{aligned}$$

- Kecepatan aliran bahan bakar ideal pada saluran

$$\begin{aligned} V_{bb1} &= \beta^2 V_{bb2} \\ &= 0,457^2 \cdot 0,222 \text{ m.s}^{-1} \\ &= 0,046364 \text{ m.s}^{-1} \end{aligned}$$

- Luas penampang saluran udara

$$\begin{aligned} A_{bb} &= \frac{1}{4} \pi D_{bb}^2 \\ &= \frac{1}{4} \pi (0,007 \text{ m})^2 \end{aligned}$$

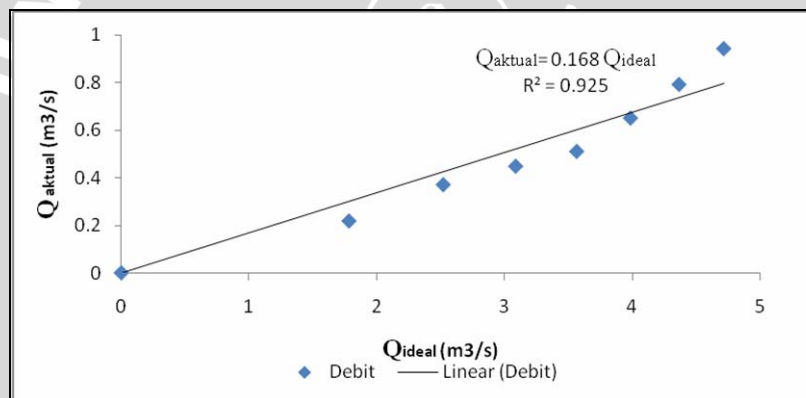
$$= 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

- Debit bahan bakar ideal

$$Q_{bb\text{-ideal}} = V_{bb1} \cdot A_{bb}$$

$$= 0.046364 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 1,785 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$Q_{bb\text{-ktual}}$ diukur dengan menampung banyaknya volume yang mengalir tiap satuan waktu. Pengukuran debit bahan bakar secara aktual ini dilakukan pada saat kalibrasi manometer bahan bakar. $Q_{bb\text{-aktual}}$ pada Δh sebesar 2 mm = $0,22 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Debit bahan bakar ideal dan debit bahan bakar 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 gradientnya, gradient 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 ($Q_{u\text{-ktual}}$) dengan debit udara ideal ($Q_{u\text{-deal}}$). Debit udara ideal dihitung dengan data yang diketahui sebagai berikut :

Dengan mengambil contoh data distribusi temperatur pada saat beda ketinggian manometer udara 0,005 m. Data yang diketahui :

Massa jenis udara (ρ_{ud})	= 1,29 kg.m ⁻³
Diameter saluran udara (D_{ud})	= 0,027 m
Diameter dalam orifis udara (d_{ud})	= 0,012 m
Beda ketinggian manometer pada manometer orifis (Δh)	= 0,005 m

Contoh perhitungan :

- Rasio diameter orifis dengan saluran bahan bakar :

$$\beta = d_{ud}/D_{ud} = 0,012/0,0277 = 0,44$$

- Kecepatan aliran udara ideal pada manometer orifis (V_2)

$$\begin{aligned} V_{ud2} &= \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_{bb} \cdot g \cdot \Delta h)}{\rho_{ud} \cdot (1 - \beta^4)}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot (835 \cdot 9.81 \cdot 0,005)}{(1,29 \cdot (1 - 0,44^4))}} \\ &= 8,122 \text{ m.s}^{-1} \end{aligned}$$

- Kecepatan aliran udara ideal pada saluran (V_1)

$$\begin{aligned} V_{ud1} &= \beta^2 \cdot V_{ud2} \\ &= 0,44^2 \cdot 8,122 \\ &= 1,572 \text{ m.s}^{-1} \end{aligned}$$

- Luas penampang saluran udara

$$\begin{aligned} A_{ud} &= \frac{1}{4} \pi D_{ud}^2 \\ &= \frac{1}{4} \pi 0,027^2 \\ &= 0,00057 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} Q_{u-ideal} &= V_{ud1} \cdot A_{ud} \\ &= 1,572 \text{ m/s} \cdot 0,00057 \text{ m}^2 \\ &= 0,000896 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

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

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

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

$$V_{aktual1} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_{bb} \cdot g \cdot \Delta h_1)}{\rho_{ud}}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot (1000 \cdot 9.81 \cdot 0,0000508)}{1,29}}$$

$$= 0.879 \text{ m.s}^{-1}$$

Dengan menggunakan persamaan seperti diatas maka didapatkan

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

$$V_{aktual2} = 0.622 \text{ m/s}$$

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

$$V_{aktual3} = 0.439 \text{ m.s}^{-1}$$

$$V_{ud-aktual} = (V_{aktual1} + V_{aktual2} + V_{aktual3}) / 3$$

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

$$= 0.647 \text{ m.s}^{-1}$$

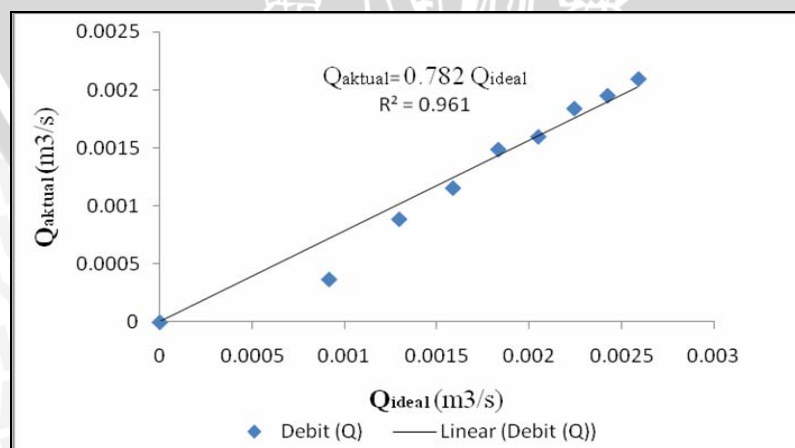
- Debit udara aktual

$$Q_{ud-ktual} = V_{ud-ktual} \cdot A_{ud}$$

$$= 0,647 \text{ m.s}^{-1} \cdot 0,00057 \text{ m}^2$$

$$= 0,000383 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

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 (ρ_{bb})	= 835 kg.m ⁻³
Massa jenis air manometer (ρ_m)	= 1000 kg.m ⁻³
Diameter saluran bahan bakar (D_{bb})	= 7 mm = 0,007 m
Diameter dalam orifis bahan bakar (d_{bb})	= 3,2 mm = 0,0032 m
Beda ketinggian yang ditunjukkan manometer (Δh)	= 1 mm = 0,001 m
Percepatan gravitasi (g)	= 9,81 m.s ⁻²

Perhitungan :

- Rasio diameter orifis dan diameter saluran :

$$\beta = d_{bb}/D_{bb} = 0,0032/0,007 = 0,457$$

- Debit bahan bakar dalam saluran bahan bakar

$$\begin{aligned} Q_{bb} &= C_b \cdot \beta^2 \cdot V_{bb2} \cdot A_{bb} \\ &= C_b \cdot \beta^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \Delta h)}{(\rho_{bb} \cdot (1 - \beta^4))}} \cdot \frac{1}{4} \pi D_{bb}^2 \\ &= 0,168 \cdot 0,457^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1000 \cdot 9,81 \cdot 0,001)}{(835 \cdot (1 - 0,457^4))}} \cdot \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 0,007^2 \\ &= 2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

4.2.4. Perhitungan debit udara

Massa jenis udara (ρ_{ud})	= 1,29 kg.m ⁻³
Diameter saluran udara (D_{ud})	= 0,027 m
Diameter dalam orifis udara (d_{ud})	= 0,012 m
Beda ketinggian manometer pada manometer orifis (Δh)	= 0,005 m
Beda ketinggian manometer pada <i>pitot tube</i> (Δh)	= 0,000203 m

Contoh perhitungan :

- Rasio diameter orifis dengan saluran bahan bakar :

$$\beta = d_{ud}/D_{ud} = 0,012/0,027 = 0,44$$

- Debit udara dalam saluran udara

$$\begin{aligned} Q_{ud} &= C_u \cdot \beta^2 \cdot V_{ud2} \cdot A_{ud} \\ &= C_u \cdot \beta^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \Delta h)}{(\rho_{ud} \cdot (1 - \beta^4))}} \cdot \frac{1}{4} \pi D_{ud}^2 \end{aligned}$$

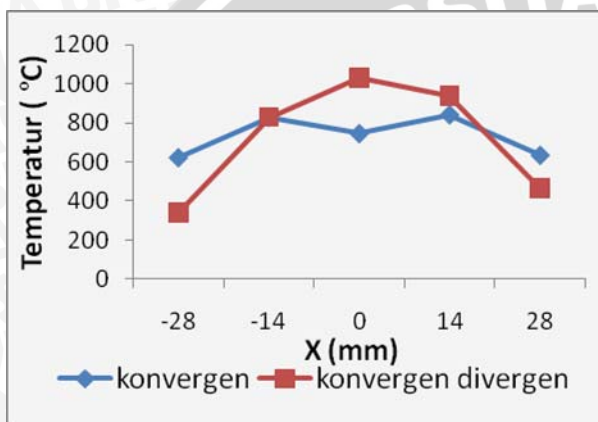
$$= 0,782 \cdot 0,44^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (835 \cdot 9,81 \cdot 0,006)}{(1,29 \cdot (1 - 0,44^4))}} \cdot \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 0,027^2$$

$$= 7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

4.3. Pembahasan

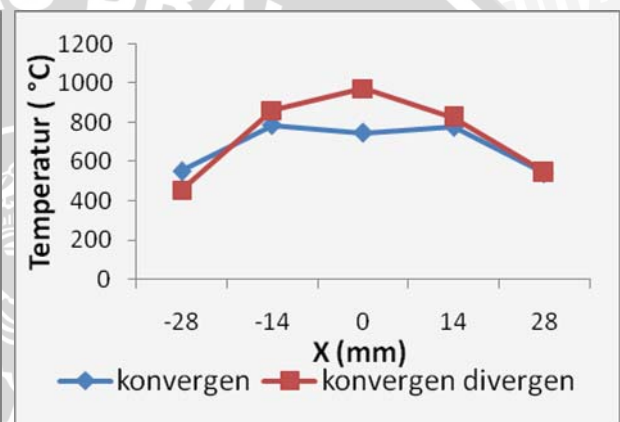
4.3.1. Grafik distribusi temperatur dengan variasi nosel

Data temperatur dari hasil percobaan diolah menjadi grafik untuk proses analisis. Grafik distribusi temperatur dengan variasi nosel dibuat dengan menerangkan hubungan antara distribusi temperatur dengan posisi peletakan sensor temperatur.



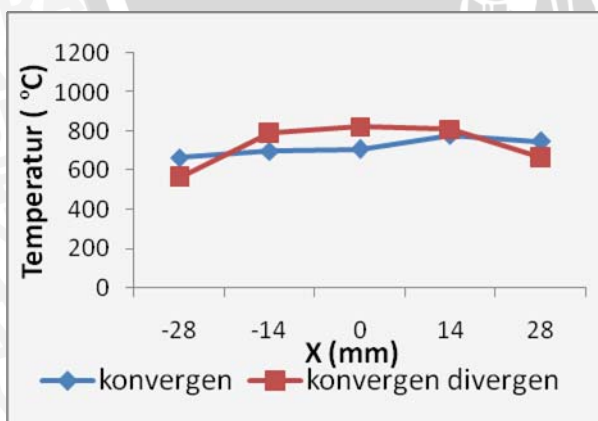
(a)

Y=80 mm

Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 

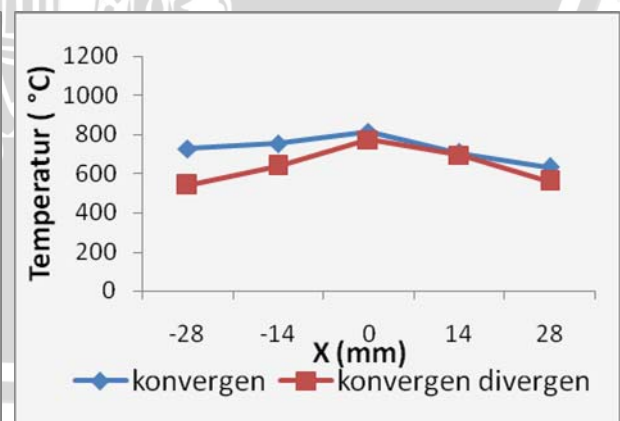
(b)

Y=80 mm

Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 

(c)

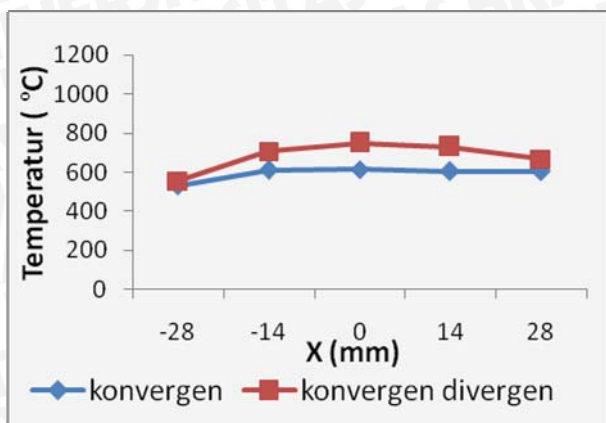
Y=160 mm

Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 

(d)

Y=160 mm

Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

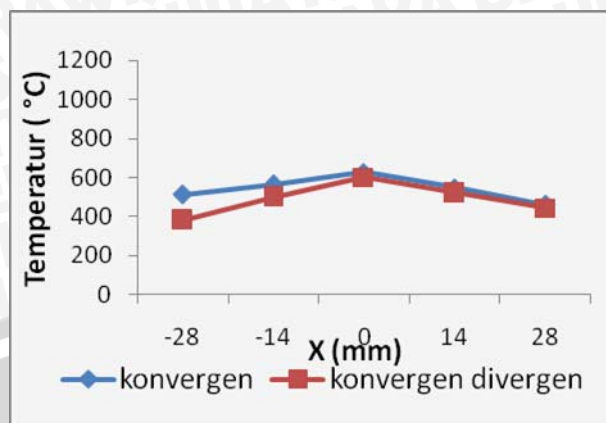


(e)

Y=240 mm

Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

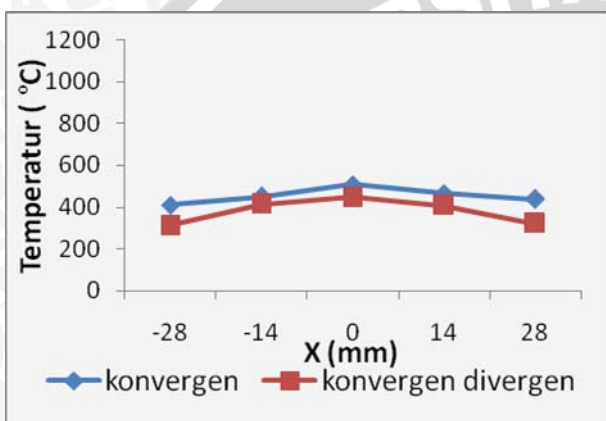


(f)

Y=240 mm

Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

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

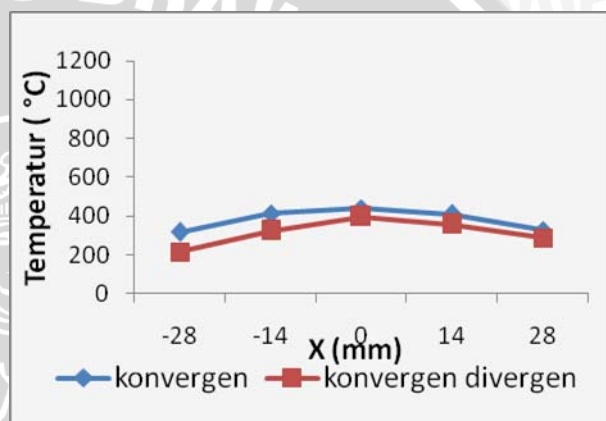


(g)

Y=320 mm

Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

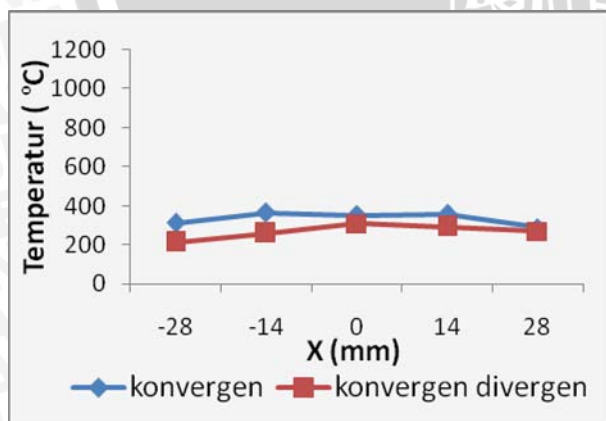


(h)

Y=320 mm

Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

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

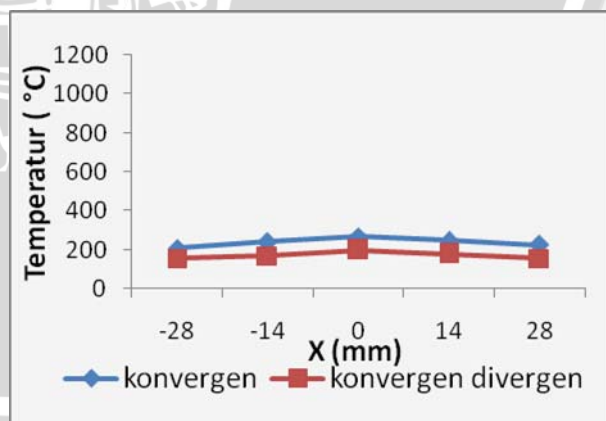


(i)

Y=400 mm

Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



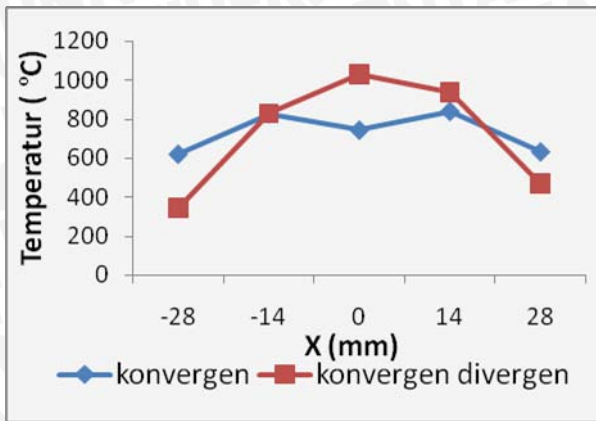
(j)

Y=400 mm

Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

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

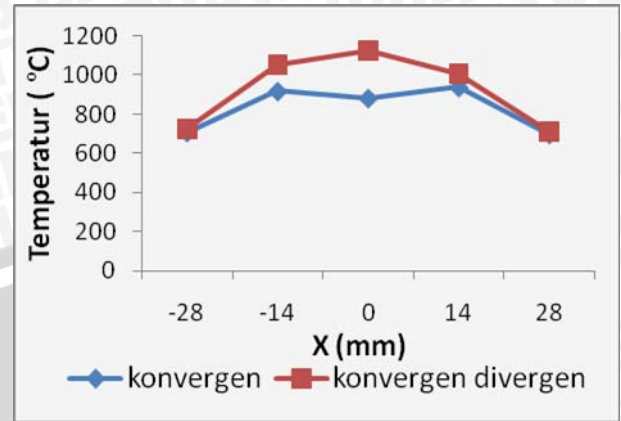
Gambar 4.3 Grafik distribusi temperatur api difusi dengan debit udara sama



(a)

Y=80 mm

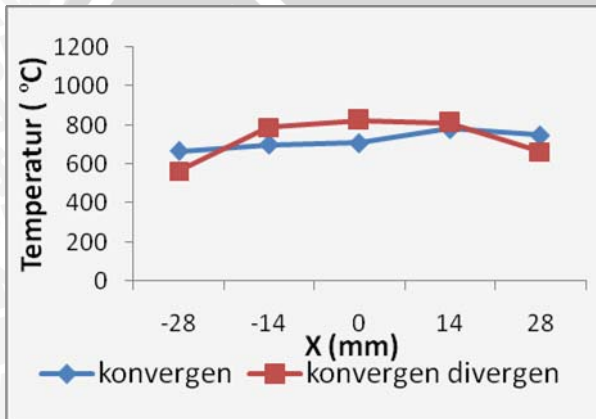
Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



(b)

Y=80 mm

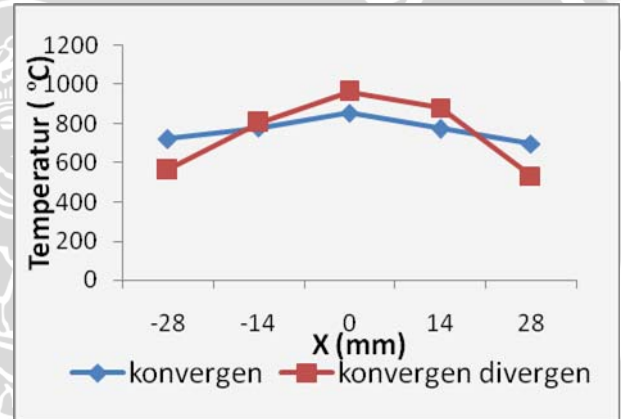
Debit udara $1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



(c)

Y=160 mm

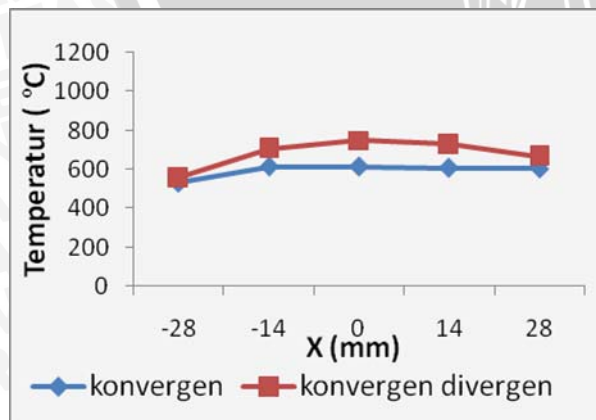
Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



(d)

Y=160 mm

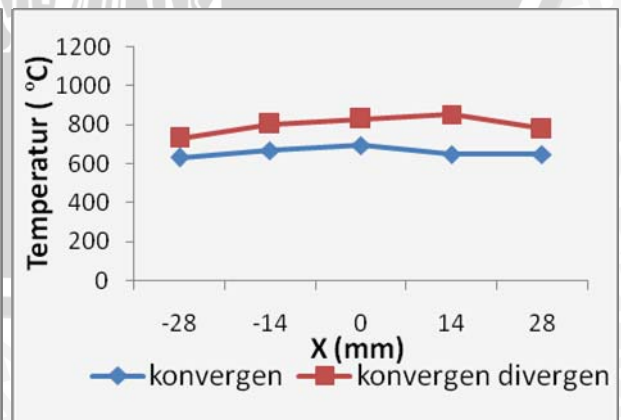
Debit udara $1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



(e)

Y=240 mm

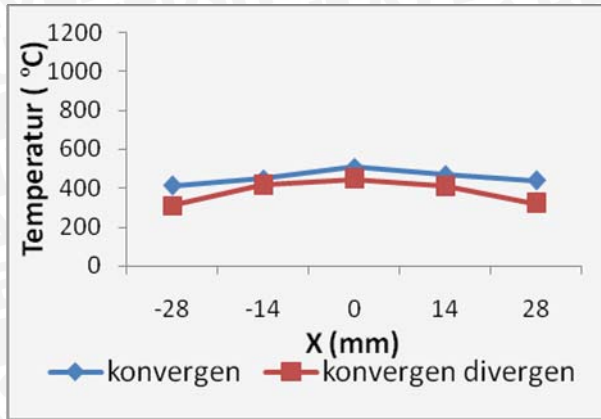
Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



(f)

Y=240 mm

Debit udara $1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

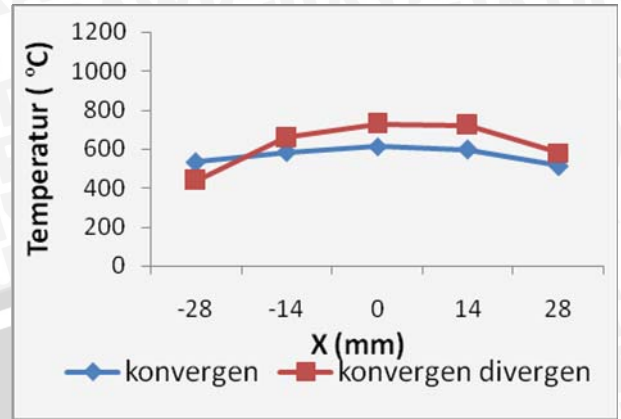


(g)

Y=320 mm

Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

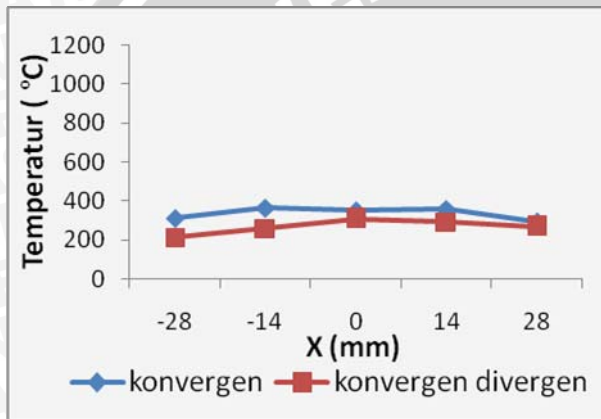


(h)

Y=320 mm

Debit udara $1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

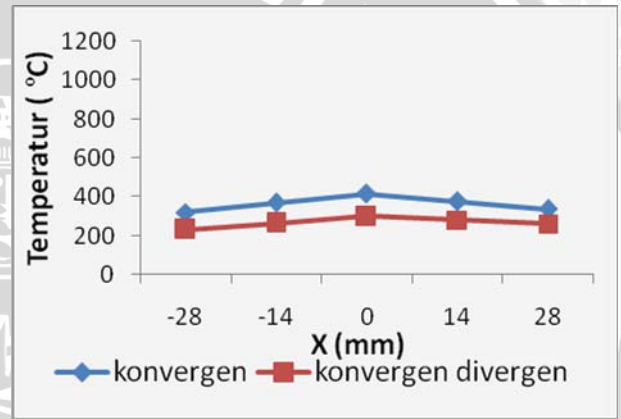


(i)

Y=400 mm

Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



(j)

Y=400 mm

Debit udara $1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Gambar 4.4 Grafik distribusi temperatur api difusi dengan debit bahan bakar sama

Dari grafik distribusi temperatur terlihat bahwa nosel konvergen memiliki distribusi temperatur yang cenderung lebih merata ke arah sumbu y pada setiap ketinggian, namun dengan temperatur yang lebih kecil dibandingkan dengan nosel konvergen divergen. Hal ini dikarenakan droplet yang dihasilkan oleh nosel konvergen lebih menyebar saat keluar nosel akibat tingginya kecepatan keluar nosel. Pada nosel konvergen kecepatan keluar nosel lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan keluar nosel pada nosel konvergen divergen. Tingginya kecepatan keluar nosel ini menyebabkan penurunan tekanan pada daerah atomisasi. Karena tekanan di daerah atomisasi 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 berdifusi dengan *droplet*.

Secara umum terlihat bahwa pada sumbu api ($x=0$ mm) cenderung memiliki temperatur yang paling tinggi. Hal ini dikarenakan pada jarak tersebut *jet* bahan bakar memiliki kecepatan yang paling tinggi, sehingga terdapat banyak aliran massa bahan bakar, akibatnya proses difusi antara bahan bakar dan udara dapat berlangsung secara maksimal. Pada $x = -28$ mm dan $x = 28$ mm, rata-rata dihasilkan temperatur yang rendah karena pada jarak tersebut merupakan jarak terjauh arah sumbu x dari nosel dan pada jarak ini sensor temperatur tidak terkena api, sehingga yang tercatat adalah radiasi panas dari api yang mengakibatkan peningkatan temperatur.

Pada ketinggian sensor $y = 80$ mm pada nosel konvergen, sensor tengah api ($x=0$) mencatat temperatur api yang lebih rendah dibandingkan sensor disebelahnya. Masih banyak terdapat *droplet* yang berukuran besar. *Droplet* yang berukuran besar akan perlu waktu yang lebih lama untuk berdifusi dengan udara dan berubah menjadi uap, sehingga *droplet* yang masih banyak berupa cairan tersebut akan menurunkan temperatur (penguapan dan pendifusiannya dengan udara belum sempurna).

Pada ketinggian sensor $y = 240$ mm (bagian tengah api pada sumbu y), kedua nosel sama-sama menunjukkan distribusi temperatur yang merata ke arah horisontal dengan tingkat perubahan temperatur yang relatif rendah. Hal ini menunjukkan bahwa pada posisi tersebut terjadi proses pencampuran bahan bakar dan udara yang paling baik, sehingga terjadi pembakaran yang merata pada hampir seluruh daerah pencampuran.

Pada ketinggian sensor $y = 400$ mm terlihat bahwa distribusi temperatur ke arah horisontal, untuk kedua nosel sama-sama memiliki kecenderungan yang sama yaitu temperatur terdistribusi secara merata ke arah horisontal dengan tingkat perubahan temperatur yang rendah. Hal ini dikarenakan jarak $y = 400$ mm merupakan jarak terjauh arah sumbu y dari nosel dan pada jarak ini sensor temperatur tidak terkena api, sehingga yang tercatat adalah radiasi panas dari api yang mengakibatkan peningkatan temperatur.

Dari grafik terlihat bahwa untuk nosel dengan debit udara sama dan debit bahan bakar yang berbeda, akan terjadi kecenderungan nosel dengan debit bahan bakar yang lebih banyak akan memiliki temperatur pembakaran yang lebih rendah dibandingkan dengan nosel dengan debit bahan bakar yang lebih sedikit. Hal ini dikarenakan pada luas penampang saluran bahan bakar yang sama, jika debit bahan bakar ditambah maka kecepatan bahan bakar akan bertambah, sesuai dengan persamaan $Q = A.v$, yang

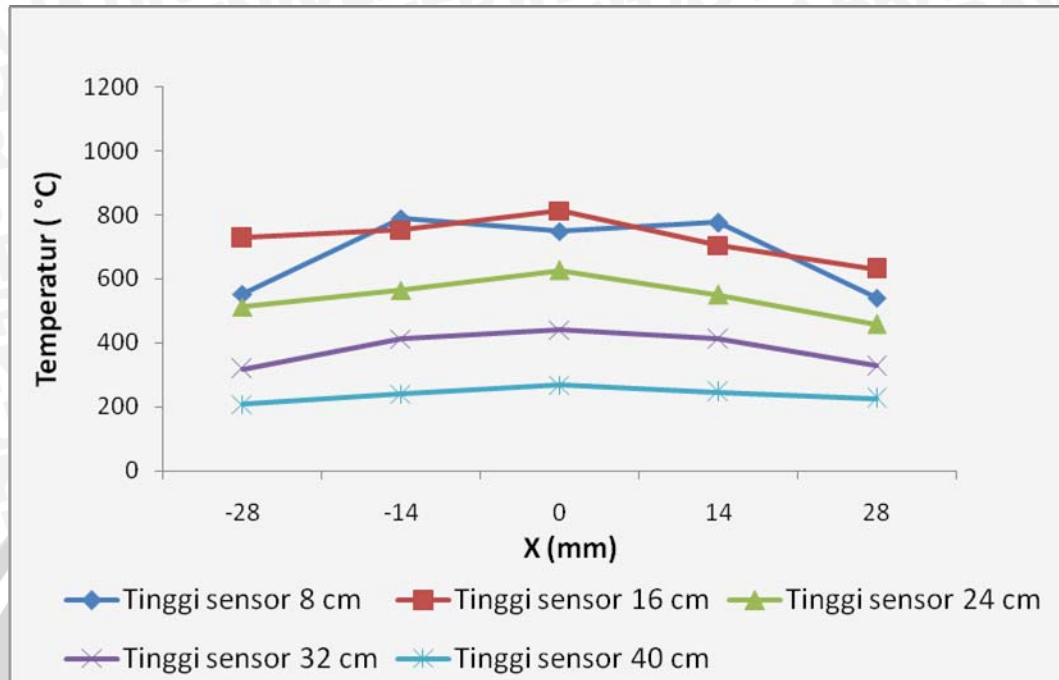
berimbang pada naiknya kecepatan *droplet*. Dengan kecepatan yang *droplet* tinggi, banyak *droplet* yang tidak sempat menguap dan berdifusi dengan udara dan akan menurunkan temperatur pembakaran. Sedangkan untuk nosel dengan debit bahan bakar yang lebih rendah akan mengeluarkan bahan bakar dengan kecepatan lebih rendah. 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.

Dari grafik terlihat bahwa untuk nosel dengan debit bahan bakar sama dan debit udara yang berbeda, akan terjadi kecenderungan nosel dengan debit udara yang lebih banyak akan memiliki temperatur pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan dengan nosel dengan debit udara yang lebih sedikit. Hal ini dikarenakan dengan banyaknya debit udara yang dihembuskan dari bawah api maka akan semakin banyak udara panas yang akan didorong keatas. Seperti yang terlihat dari grafik bahwa temperatur tertinggi pada arah sumbu y terdapat pada bagian $y = 8$ mm (bagian terbawah api) dan semakin keatas semakin merendah. Udara panas yang terdorong keatas akan melepaskan panasnya ke udara yang lebih dingin diatasnya. Efek ini membuat molekul-molekul bahan bakar mendapat tambahan pemanasan yang berimbang pada naiknya energi kinetik bahan bakar. Sesuai dengan rumus energi kinetik yaitu $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$ (Halliday,1978: 772), dengan k adalah *konstanta Boltzmann*, terlihat bahwa temperatur sebanding dengan energi kinetik molekul, jadi semakin tinggi energi kinetik dari molekul, maka temperatur juga akan semakin meningkat.

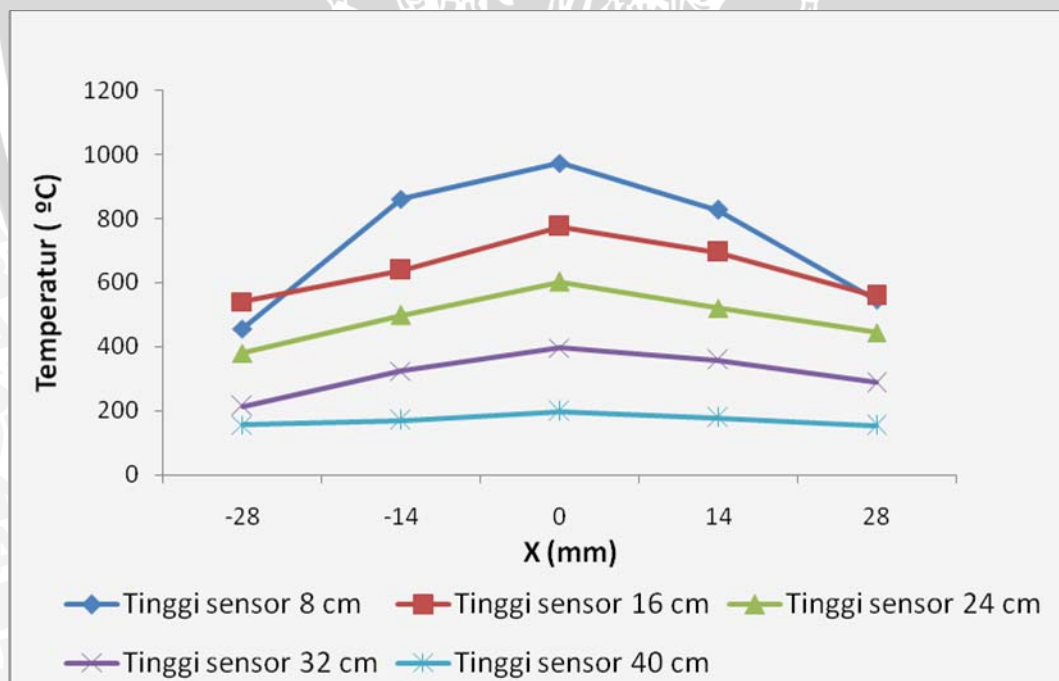
Temperatur yang tinggi dapat dicapai apabila proses atomisasi, keseimbangan antara aliran bahan bakar dan kecepatan pembakaran, pencampuran antara bahan bakar dan udara terjadi dengan baik. Sehingga apabila ketiga hal tersebut tidak memenuhi maka temperatur maksimum tidak bisa tercapai. Faktor keseimbangan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

Distribusi temperatur pada ruang bakar selengkapnya dapat dilihat pada lampiran 3.

4.3.2. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel pada arah sumbu y



Gambar 4.5 Grafik distribusi temperatur api difusi nosel konvergen debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dan debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



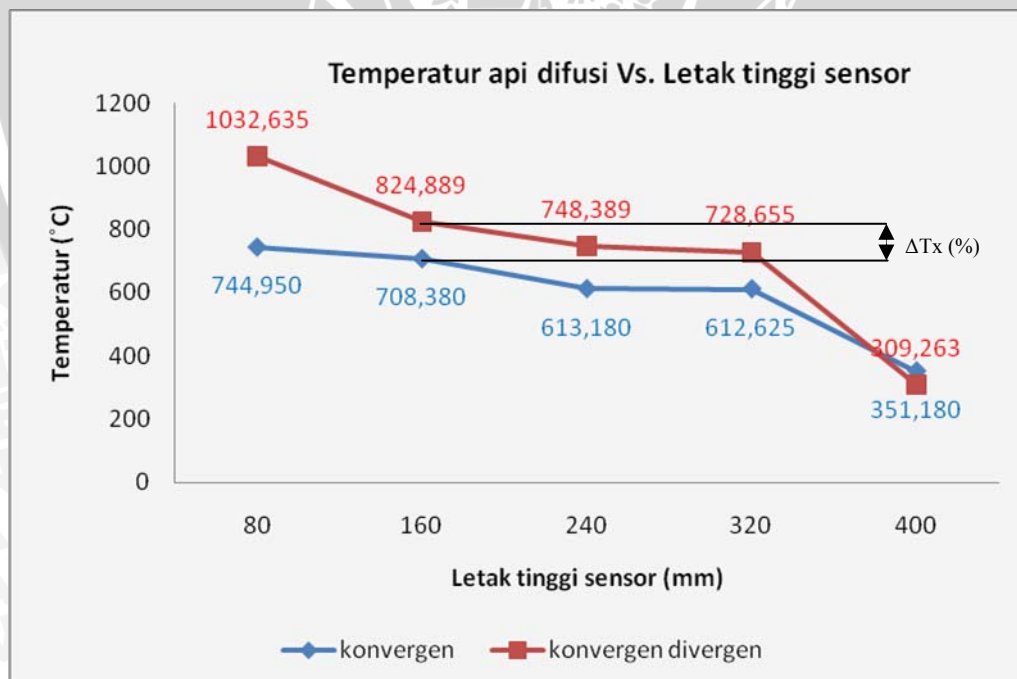
Gambar 4.6 Grafik distribusi temperatur api difusi nosel konvergen divergen debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dan debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Dari grafik diatas terlihat bahwa sensor yang mencatat temperatur paling tinggi adalah sensor pada $y = 80$ mm, kemudian diikuti oleh sensor pada $y = 160$ mm, $y = 240$ mm, $y = 320$ mm dan $y = 400$ mm. Hal ini dikarenakan pada $y = 80$ mm masih banyak terdapat cukup bahan bakar untuk dibakar.

Sedangkan pada $y = 400$ mm bahan bakar telah menipis, sehingga reaksi kimia pembakaran yang terjadi tidak menghasilkan kalor pembakaran yang tinggi.

Nosel konvergen divergen mempunyai *range* temperatur arah sumbu y yang lebih besar lebih besar dibandingkan nosel konvergen. Dari data terlihat bahwa nosel konvergen divergen mencatatkan temperatur tertinggi sebesar $973,26$ °C dan temperatur terendah sebesar $154,52$ °C, sedangkan untuk nosel konvergen mencatatkan temperatur tertinggi sebesar $913,53$ °C dan temperatur terendah sebesar $208,475$ °C. Walaupun nosel konvergen divergen mempunyai *range* temperatur arah sumbu y yang lebih besar, namun seperti distribusi temperatur ke arah sumbu x , nosel konvergen memiliki distribusi temperatur ke arah sumbu y , yang lebih merata. Hal ini terlihat dari tidak besarnya selisih suhu tertinggi dan terendah. Nosel konvergen divergen memiliki keunggulan pada tingginya temperatur maksimal yang dapat diraih.

4.3.3. Grafik temperatur api difusi vs. letak tinggi sensor



Gambar 4.7 Grafik temperatur api difusi nosel vs letak tinggi sensor debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dan debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Dari grafik diatas terlihat bahwa nosel konvergen divergen memiliki kinerja sistem pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan nosel konvergen.

Kinerja sistem pembakaran (ΔT_x) dihitung dengan persamaan :

$$\Delta T_x = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} \times 100\%$$

Untuk letak tinggi sensor 160 mm nilai kinerja sistem pembakaran (ΔT_x) adalah :

$$\Delta T_2 = \frac{824,889 \times 708,380}{824,889} \times 100\% = 14\%$$

Rendahnya temperatur pembakaran api difusi pada nosel konvergen akibat dari tingginya kecepatan *droplet* keluar. Dengan kecepatan *droplet* yang tinggi, banyak *droplet* yang tidak sempat menguap dan berdifusi dengan udara. Pada kondisi ini keseimbangan kecepatan reaktan (bahan bakar dan udara) dan kecepatan pembakaran susah terjadi dan akan berimbas turunnya temperatur pembakaran. Terjadinya keseimbangan reaktan dan kecepatan pembakaran akan menyebabkan pembakaran lebih sempurna. Pembakaran sempurna akan menghasilkan temperatur yang tinggi.

Untuk letak tinggi sensor 400 mm terjadi perbedaan fenomena. Nosel konvergen mencatatkan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan nosel konvergen divergen. Hal ini terjadi karena ada dua sebab yaitu

1. Pada jarak ini sensor panas sudah tidak terkena api sehingga yang tercatat adalah radiasi panas dari api yang mengakibatkan peningkatan temperatur.
2. Sesuai lampiran 14 terlihat bahwa api dari nosel konvergen mengalami gejala lift off yang lebih tinggi dibandingkan nosel konvergen divergen. Dengan lift off yang lebih tinggi lidah api bagian teratas akan semakin dekat dengan sensor teratas (sensor $y=400$ mm), sehingga temperatur yang terukur pun lebih tinggi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Nosel konvergen divergen memiliki kinerja sistem pembakaran 14% lebih tinggi dibandingkan nosel konvergen.
2. Nosel konvergen memiliki distribusi temperatur api yang lebih merata baik untuk arah vertikal maupun arah horisontal.
3. Nosel konvergen divergen memiliki kemampuan untuk menghasilkan api dengan temperatur maksimal yang lebih tinggi dibandingkan nosel konvergen.
4. Distribusi temperatur yang paling baik terjadi pada bagian tengah api sedangkan distribusi temperatur yang paling jelek terjadi pada bagian bawah api.
5. Temperatur api yang paling tinggi terjadi pada bagian bawah api.
6. Untuk mendapatkan temperatur yang tinggi maka penguapan bahan bakar harus baik, pemanasan terhadap bahan bakar yang baik akan memudahkan *droplet* untuk menguap.

5.2. Saran

1. Perlu adanya perbaikan pada alat pemanas dengan menggunakan suatu alat pemanas yang lebih terkontrol sehingga panas yang dihasilkan dari alat tersebut lebih stabil/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*, New York:Mc Gray Hill.
- Culp, W. Archie. 1996. *Prinsip-prinsip Konversi Energi*. Jakarta: Erlangga.
- Delgado, Jorge. 2002. *A study of Breakup Length in a two Dimensional Liquid Sheet with Co-flowing Gas*. Pennsylvania State University.
<http://www.forms.gradsach.psu.edu/equity/sroppers/2002/delgadojorge.pdf>.
- El-Wakil. M. M.; 1992: *Instalasi Pembangkit Daya*. Jakarta: Erlangga.
- Gamayel, A., 2005. "Pengaruh Sudut Kemiringan Nosel Terhadap Karakteristik Aliran Keluar Nosel". *Skripsi Tidak Diterbitkan*. Malang: Jurusan Teknik Mesin FT Unibraw, 2005.
- Holman, J.P., 1985, *Metode Pengukuran Teknik*, Jakarta: Erlangga.
- Kampen, J.V., et al., 2006. *Some Aspects of the Atomization Behavior of Newtonian and of Shear thinning Gelled non-Newtonian Fluids with an Impinging Jet Injector*. German. Aerospace Center.
- Kuo, Kenneth K., 1986. *Principles of Combustion*. New York: John 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.
- Peters N., 1995. *Four Lectures on Laminar and Turbulent combustion*. Germany. Ercoftac Summer School.
- Tjokroawidjojo, Soetiari. 1986, *Bahan Bakar dan Proses-Proses Kimia Pembakaran*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Tratama, T., 2005. "Pengaruh Variasi Bentuk Nosel Terhadap Karakteristik Aliran Keluar Nosel". *Skripsi Tidak Diterbitkan*. Malang: Jurusan Teknik Mesin FT Unibraw, 2005.
- Turns, Stephen R., 1996, *An Introduction to Combustion*. New York : McGraw-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 Teknologi Pembakaran*. Jurusan Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Brawijaya. Malang.
- Wijayanti, W., 2005, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*. Jurusan Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Brawijaya. Malang.
- [Www.hpa.org.uk/Chemicals/compendium/Kerosene/properties.htm](http://www.hpa.org.uk/Chemicals/compendium/Kerosene/properties.htm)

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN



Lampiran 1. Tabel Debit Udara dan Debit Bahan Bakar

1.1 Data debit bahan bakar aktual ($Q_{bb-aktual}$) dan debit bahan bakar ideal ($Q_{bb-ideal}$)

Δh (mm)	Q aktual ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Q ideal ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
0	0	0
2	0.217674406	1.78227
4	0.370058243	2.52
6	0.447744967	3.08716
8	0.509771074	3.56474
10	0.649918412	3.98551
12	0.791171302	4.3659
14	0.941530411	4.71571

1.2 Data kecepatan udara aktual dan debit aktual

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

Δh_1 (m)	Δh_2 (m)	Δh_3 (m)	V_1 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	V_2 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	V_3 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	V_{rata} ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Q aktual ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
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 ($Q_{ud-ideal}$)

Δh manometer (m)	Kecepatan pada saluran (V_1) ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Q ideal ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
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 distribusi temperatur nosel konvergen divergen massa alir bahan bakar $2,115.10^{-7} \text{ m}^3.s^{-1}$, massa alir udara $7,715.10^{-4} \text{ m}^3.s^{-1}$.

Sensor y=80 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	322.227	818.375	1017.635	956.221	479.689	
2	360.227	842.375	1047.635	924.221	457.689	
Rata ² temperatur (°C)	341.227	830.375	1032.635	940.221	468.689	

Sensor y=160 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	551.724	803.765	806.889	796.116	648.030	
2	575.724	775.765	842.889	824.116	682.030	
Rata ² temperatur (°C)	563.724	789.765	824.889	810.116	665.030	

Sensor y=240 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	537.789	726.822	729.389	702.722	656.096	
2	573.789	684.822	767.389	752.722	678.096	
Rata ² temperatur (°C)	555.789	705.822	748.389	727.722	667.096	

Sensor y=320 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	457.190	643.490	752.654	709.881	556.844	
2	417.191	673.491	704.656	733.882	604.844	
Rata ² temperatur (°C)	437.190	658.490	728.654	721.881	580.844	

Sensor y=400 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	203.076	244.037	291.263	281.379	281.707	
2	227.076	274.037	327.263	303.379	257.707	
Rata ² temperatur (°C)	215.076	259.037	309.263	292.379	269.707	

Letak Sensor	Sumbu X (mm)				
sumbu Y (mm)	-28	-14	0	14	28
Distribusi Temperatur (°C) pada Y = 80	341.227	830.375	1032.635	940.221	468.689
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 160	563.724	789.765	824.889	810.116	665.030
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 240	555.789	705.822	748.389	727.722	667.096
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 320	437.191	658.491	728.655	721.882	580.844
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 400	215.076	259.037	309.263	292.379	269.707

Lampiran 3. Data distribusi temperatur nosel konvergen massa alir bahan bakar $2,115.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, massa alir udara $7,715.10^{-4} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Sensor y=80 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	545.505	776.215	724.58	764.795	520.585	
2	559.505	800.215	772.58	786.795	560.585	
Rata ² temperatur (°C)	552.505	788.215	748.58	775.795	540.585	

Sensor y=160 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	653.065	682.960	679.380	750.785	711.890	
2	681.065	716.960	737.380	810.785	783.890	
Rata ² temperatur (°C)	667.065	699.960	708.380	780.785	747.890	

Sensor y=240 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	565.565	590.330	647.180	583.430	638.665	
2	497.565	634.330	579.180	627.430	570.665	
Rata ² temperatur (°C)	531.565	612.330	613.180	605.430	604.665	

Sensor y=320 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	517.990	572.170	591.625	582.535	493.355	
2	547.990	598.170	633.625	608.535	533.355	
Rata ² temperatur (°C)	532.990	585.170	612.625	595.535	513.355	

Sensor y=400 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	283.645	343.930	336.180	335.750	263.465	
2	339.645	385.930	366.180	383.750	319.465	
Rata ² temperatur (°C)	311.645	364.930	351.180	359.750	291.465	

Letak Sensor	Sumbu X (mm)				
sumbu Y (mm)	-28	-14	0	14	28
Distribusi Temperatur (°C) pada Y = 80	621.790	828.825	744.950	841.065	634.030
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 160	667.065	699.960	708.380	780.785	747.890
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 240	531.565	612.330	613.180	605.430	604.665
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 320	532.990	585.170	612.625	595.535	513.355
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 400	311.645	364.930	351.180	359.750	291.465

Lampiran 4. Data distribusi temperatur nosel konvergen divergen massa alir bahan bakar $2,993.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, massa alir udara $7,715.10^{-4} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Sensor y=80 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	436.653	849.318	958.263	841.859	557.202	
2	474.653	873.318	988.263	809.859	535.202	
Rata ² temperatur (°C)	455.653	861.318	973.263	825.859	546.202	

Sensor y=160 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	528.525	652.953	755.616	679.593	542.081	
2	552.525	624.953	791.616	707.593	576.081	
Rata ² temperatur (°C)	540.525	638.953	773.616	693.593	559.081	

Sensor y=240 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	362.222	519.925	583.152	495.965	432.404	
2	398.222	477.925	621.152	545.965	454.404	
Rata ² temperatur (°C)	380.222	498.925	602.152	520.965	443.404	

Sensor y=320 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	234.318	309.613	419.313	345.904	263.091	
2	194.318	339.613	371.313	369.904	311.091	
Rata ² temperatur (°C)	214.318	324.613	395.313	357.904	287.091	

Sensor y=400 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	143.798	153.945	178.778	167.015	166.520	
2	167.798	183.945	214.778	189.015	142.520	
Rata ² temperatur (°C)	155.798	168.945	196.778	178.015	154.520	

Letak Sensor	Sumbu X (mm)				
sumbu Y (mm)	-28	-14	0	14	28
Distribusi Temperatur (°C) pada Y = 80	455.653	861.318	973.263	825.859	546.202
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 160	540.525	638.953	773.616	693.593	559.081
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 240	380.222	498.925	602.152	520.965	443.404
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 320	214.318	324.613	395.313	357.904	287.091
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 400	155.798	168.945	196.778	178.015	154.520

Lampiran 5. Data distribusi temperatur nosel konvergen massa alir bahan bakar $2,993.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, massa alir udara $7,715.10^{-4} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Sensor y=80 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	545.505	776.215	724.58	764.795	520.585	
2	559.505	800.215	772.58	786.795	560.585	
Rata ² temperatur (°C)	552.505	788.215	748.58	775.795	540.585	

Sensor y=160 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	713.650	735.255	784.530	674.215	594.610	
2	741.650	769.255	842.530	734.215	666.610	
Rata ² temperatur (°C)	727.650	752.255	813.530	704.215	630.610	

Sensor y=240 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	546.630	541.775	661.345	527.705	492.560	
2	478.630	585.775	593.345	571.705	424.560	
Rata ² temperatur (°C)	512.630	563.775	627.345	549.705	458.560	

Sensor y=320 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	303.160	399.485	418.865	398.035	306.960	
2	333.160	425.485	460.865	424.035	346.960	
Rata ² temperatur (°C)	318.160	412.485	439.865	411.035	326.960	

Sensor y=400 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	180.4750	218.5550	252.4050	222.1200	197.0400	
2	236.4750	260.5550	282.4050	270.1200	253.0400	
Rata ² temperatur (°C)	208.4750	239.5550	267.4050	246.1200	225.0400	

Letak Sensor	Sumbu X (mm)				
sumbu Y (mm)	-28	-14	0	14	28
Distribusi Temperatur (°C) pada Y = 80	552.505	788.215	748.580	775.795	540.585
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 160	727.650	752.255	813.530	704.215	630.610
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 240	512.630	563.775	627.345	549.705	458.560
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 320	318.160	412.485	439.865	411.035	326.960
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 400	208.475	239.555	267.405	246.120	225.040

Lampiran 6. Data distribusi temperatur nosel konvergen divergen massa alir bahan bakar $2,115.10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, massa alir udara $1,090.10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Sensor y=80 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	706.868	1037.182	1109.187	1020.690	721.939	
2	744.868	1061.182	1139.187	988.690	699.939	
Rata ² temperatur (°C)	725.868	1049.182	1124.187	1004.690	710.939	

Sensor y=160 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	552.854	821.266	945.869	868.778	516.677	
2	576.854	793.266	981.869	896.778	550.677	
Rata ² temperatur (°C)	564.854	807.266	963.869	882.778	533.677	

Sensor y=240 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	711.826	824.109	809.707	829.197	768.101	
2	747.826	782.109	847.707	879.197	790.101	
Rata ² temperatur (°C)	729.826	803.109	828.707	854.197	779.101	

Sensor y=320 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	330.606	399.342	469.732	395.646	295.879	
2	290.606	429.342	421.732	419.646	343.879	
Rata ² temperatur (°C)	310.606	414.342	445.732	407.646	319.879	

Sensor y=400 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	217.939	249.103	281.308	269.424	272.960	
2	241.939	279.103	317.308	291.424	248.960	
Rata ² temperatur (°C)	229.939	264.103	299.308	280.424	260.960	

Letak Sensor sumbu Y (mm)	Sumbu X (mm)				
	-28	-14	0	14	28
Distribusi Temperatur (°C) pada Y = 80	725.868	1049.182	1124.187	1004.690	710.939
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 160	564.854	807.266	963.869	882.778	533.677
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 240	729.826	803.109	828.707	854.197	779.101
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 320	310.606	414.342	445.732	407.646	319.879
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 400	229.939	264.103	299.308	280.424	260.960

Lampiran 7. Data distribusi temperatur nosel konvergen massa alir bahan bakar $2,115.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, massa alir udara $1,090.10^{-3} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Sensor y=80 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	701.155	906.405	858.905	927.380	678.430	
2	715.155	930.405	906.905	949.380	718.430	
Rata ² temperatur (°C)	708.155	918.405	882.905	938.380	698.430	

Sensor y=160 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	708.565	762.790	826.710	745.200	661.975	
2	736.565	796.790	884.710	805.200	733.975	
Rata ² temperatur (°C)	722.565	779.790	855.710	775.200	697.975	

Sensor y=240 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	665.975	647.265	728.905	626.755	682.890	
2	597.975	691.265	660.905	670.755	614.890	
Rata ² temperatur (°C)	631.975	669.265	694.905	648.755	648.890	

Sensor y=320 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	395.905	435.980	487.610	453.715	418.740	
2	425.905	461.980	529.610	479.715	458.740	
Rata ² temperatur (°C)	410.905	448.980	508.610	466.715	438.740	

Sensor y=400 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	293.750	349.480	399.605	352.070	309.315	
2	349.750	391.480	429.605	400.070	365.315	
Rata ² temperatur (°C)	321.750	370.480	414.605	376.070	337.315	

Letak Sensor sumbu Y (mm)	Sumbu X (mm)				
	-28	-14	0	14	28
Distribusi Temperatur (°C) pada Y = 80	708.155	918.405	882.905	938.380	698.430
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 160	722.565	779.790	855.710	775.200	697.975
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 240	631.975	669.265	694.905	648.755	648.890
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 320	410.905	448.980	508.610	466.715	438.740
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 400	321.750	370.480	414.605	376.070	337.315

Lampiran 8. Data distribusi temperatur nosel konvergen divergen massa alir bahan bakar $2,993.10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, massa alir udara $1,090.10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Sensor y=80 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	901.447	1071.227	756.283	1033.571	919.051	
2	939.447	1095.227	786.283	1001.571	897.051	
Rata ² temperatur (°C)	920.447	1083.227	771.283	1017.571	908.051	

Sensor y=160 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	396.407	767.985	865.149	784.225	524.965	
2	420.407	739.985	901.149	812.225	558.965	
Rata ² temperatur (°C)	408.407	753.985	883.149	798.225	541.965	

Sensor y=240 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	338.717	730.318	771.667	731.389	637.222	
2	374.717	688.318	809.667	781.389	659.222	
Rata ² temperatur (°C)	356.717	709.318	790.667	756.389	648.222	

Sensor y=320 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	345.919	339.884	409.010	355.207	328.389	
2	305.919	369.884	361.010	379.207	376.389	
Rata ² temperatur (°C)	325.919	354.884	385.010	367.207	352.389	

Sensor y=400 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	271.182	274.991	310.116	292.449	247.636	
2	295.182	304.991	346.116	314.449	223.636	
Rata ² temperatur (°C)	283.182	289.991	328.116	303.449	235.636	

Letak Sensor	Sumbu X (mm)				
sumbu Y (mm)	-28	-14	0	14	28
Distribusi Temperatur (°C) pada Y = 80	920.447	1083.227	771.283	1017.571	908.051
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 160	408.407	753.985	883.149	798.225	541.965
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 240	356.717	709.318	790.667	756.389	648.222
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 320	325.919	354.884	385.010	367.207	352.389
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 400	283.182	289.991	328.116	303.449	235.636

Lampiran 9. Data distribusi temperatur nosel konvergen massa alir bahan bakar $2,993.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, massa alir udara $1,090.10^{-3} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Sensor y=80 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	709.825	926.195	819.805	946.695	751.955	
2	723.825	950.195	867.805	968.695	791.955	
Rata ² temperatur (°C)		716.825	938.195	843.805	957.695	771.955

Sensor y=160 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	646.855	716.350	726.120	773.375	634.880	
2	674.855	750.350	784.120	833.375	706.880	
Rata ² temperatur (°C)		660.855	733.350	755.120	803.375	670.880

Sensor y=240 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	536.245	572.285	681.115	574.430	533.440	
2	468.245	616.285	613.115	618.430	465.440	
Rata ² temperatur (°C)		502.245	594.285	647.115	596.430	499.440

Sensor y=320 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	397.900	450.400	469.450	446.960	399.560	
2	427.900	476.400	511.450	472.960	439.560	
Rata ² temperatur (°C)		412.900	463.400	490.450	459.960	419.560

Sensor y=400 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	295.615	379.450	406.245	365.605	293.090	
2	351.615	421.450	436.245	413.605	349.090	
Rata ² temperatur (°C)		323.615	400.450	421.245	389.605	321.090

Letak Sensor sumbu Y (mm)	Sumbu X (mm)				
	-28	-14	0	14	28
Distribusi Temperatur (°C) pada Y = 80	716.825	938.195	843.805	957.695	771.955
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 160	660.855	733.350	755.120	803.375	670.880
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 240	502.245	594.285	647.115	596.430	499.440
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 320	412.900	463.400	490.450	459.960	419.560
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 400	323.615	400.450	421.245	389.605	321.090

Lampiran 10. Data distribusi temperatur nosel konvergen divergen massa alir bahan bakar $2,115.10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, massa alir udara $1,335.10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Sensor y=80 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	797.933	1111.692	1059.702	1057.864	855.828	
2	835.933	1135.692	1089.702	1025.864	833.828	
Rata ² temperatur (°C)		816.933	1123.692	1074.702	1041.864	844.828

Sensor y=160 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	736.400	871.718	935.924	908.434	793.813	
2	760.400	843.718	971.924	936.434	827.813	
Rata ² temperatur (°C)		748.400	857.718	953.924	922.434	810.813

Sensor y=240 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	389.530	549.467	596.465	586.515	474.727	
2	425.530	507.467	634.465	636.515	496.727	
Rata ² temperatur (°C)		407.530	528.467	615.465	611.515	485.727

Sensor y=320 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	364.434	424.358	496.101	444.773	354.732	
2	324.434	454.358	448.101	468.773	402.732	
Rata ² temperatur (°C)		344.434	439.358	472.101	456.773	378.732

Sensor y=400 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	236.455	276.096	281.975	268.848	266.960	
2	260.455	306.096	317.975	290.848	242.960	
Rata ² temperatur (°C)		248.455	291.096	299.975	279.848	254.960

Letak Sensor sumbu Y (mm)	Sumbu X (mm)				
	-28	-14	0	14	28
Distribusi Temperatur (°C) pada Y = 80	816.933	1123.692	1074.702	1041.864	844.828
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 160	748.400	857.718	953.924	922.434	810.813
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 240	407.530	528.467	615.465	611.515	485.727
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 320	344.434	439.358	472.101	456.773	378.732
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 400	248.455	291.096	299.975	279.848	254.960

Lampiran 11. Data distribusi temperatur nosel konvergen massa alir bahan bakar $2,115.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, massa alir udara $1,335.10^{-3} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Sensor y=80 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	667.365	869.980	842.890	846.485	620.180	
2	681.365	893.980	890.890	868.485	660.180	
Rata ² temperatur (°C)	674.365	881.980	866.890	857.485	640.180	

Sensor y=160 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	623.415	697.580	712.605	687.945	624.780	
2	651.415	731.580	770.605	747.945	696.780	
Rata ² temperatur (°C)	637.415	714.580	741.605	717.945	660.780	

Sensor y=240 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	487.920	453.285	557.470	507.585	512.220	
2	419.920	497.285	489.470	551.585	444.220	
Rata ² temperatur (°C)	453.920	475.285	523.470	529.585	478.220	

Sensor y=320 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	396.470	432.920	441.825	453.690	422.340	
2	426.470	458.920	483.825	479.690	462.340	
Rata ² temperatur (°C)	411.470	445.920	462.825	466.690	442.340	

Sensor y=400 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	248.730	280.880	321.200	310.020	260.145	
2	304.730	322.880	351.200	358.020	316.145	
Rata ² temperatur (°C)	276.730	301.880	336.200	334.020	288.145	

Letak Sensor sumbu Y (mm)	Sumbu X (mm)				
	-28	-14	0	14	28
Distribusi Temperatur (°C) pada Y = 80	674.365	881.980	866.890	857.485	640.180
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 160	637.415	714.580	741.605	717.945	660.780
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 240	453.920	475.285	523.470	529.585	478.220
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 320	411.470	445.920	462.825	466.690	442.340
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 400	276.730	301.880	336.200	334.020	288.145

Lampiran 12. Data distribusi temperatur nosel konvergen divergen massa alir bahan bakar $2,993.10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, massa alir udara $1,335.10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Sensor y=80 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	664.424	981.992	913.434	1013.697	666.258	
2	702.424	1005.992	943.434	981.697	644.258	
Rata ² temperatur (°C)	683.424	993.992	928.434	997.697	655.258	

Sensor y=160 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	790.338	913.597	927.944	890.914	670.919	
2	814.338	885.597	963.944	918.914	704.919	
Rata ² temperatur (°C)	802.338	899.597	945.944	904.914	687.919	

Sensor y=240 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	439.637	508.657	572.030	536.891	460.621	
2	475.637	466.657	610.030	586.891	482.621	
Rata ² temperatur (°C)	457.637	487.657	591.030	561.891	471.621	

Sensor y=320 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	371.879	424.134	490.611	414.949	280.389	
2	331.879	454.134	442.611	438.949	328.389	
Rata ² temperatur (°C)	351.879	439.134	466.611	426.949	304.389	

Sensor y=400 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	161.005	170.872	205.611	195.157	191.490	
2	185.005	200.872	241.611	217.157	167.490	
Rata ² temperatur (°C)	173.005	185.872	223.611	206.157	179.490	

Letak Sensor	Sumbu X (mm)				
sumbu Y (mm)	-28	-14	0	14	28
Distribusi Temperatur (°C) pada Y = 80	683.424	993.992	928.434	997.697	655.258
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 160	802.338	899.597	945.944	904.914	687.919
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 240	457.637	487.657	591.030	561.891	471.621
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 320	351.879	439.134	466.611	426.949	304.389
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 400	173.005	185.872	223.611	206.157	179.490

Lampiran 13. Data distribusi temperatur nosel konvergen divergen massa alir bahan bakar $2,993.10^{-7} \text{ m}^3.s^{-1}$, massa alir udara $1,335.10^{-3} \text{ m}^3.s^{-1}$.

Sensor y=80 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	615.975	877.665	752.305	905.340	679.650	
2	629.975	901.665	800.305	927.340	719.650	
Rata ² temperatur (°C)		622.975	889.665	776.305	916.340	699.650

Sensor y=160 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	714.520	758.845	779.450	762.750	689.425	
2	742.520	792.845	837.450	822.750	761.425	
Rata ² temperatur (°C)		728.520	775.845	808.450	792.750	725.425

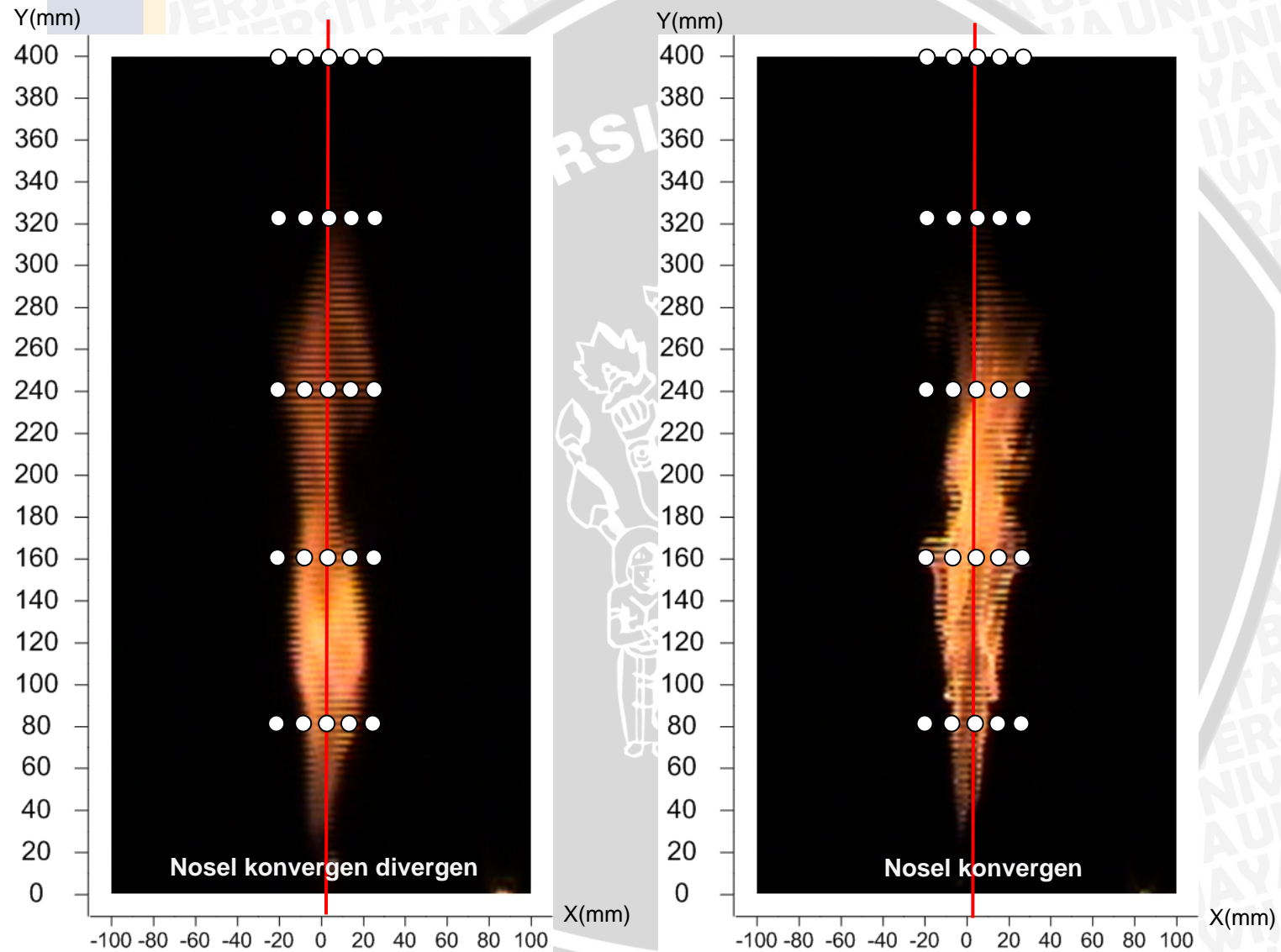
Sensor y=240 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	420.165	462.800	578.050	498.590	465.955	
2	352.165	506.800	510.050	542.590	397.955	
Rata ² temperatur (°C)		386.165	484.800	544.050	520.590	431.955

Sensor y=320 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	393.725	441.530	466.740	445.375	381.760	
2	423.725	467.530	508.740	471.375	421.760	
Rata ² temperatur (°C)		408.725	454.530	487.740	458.375	401.760

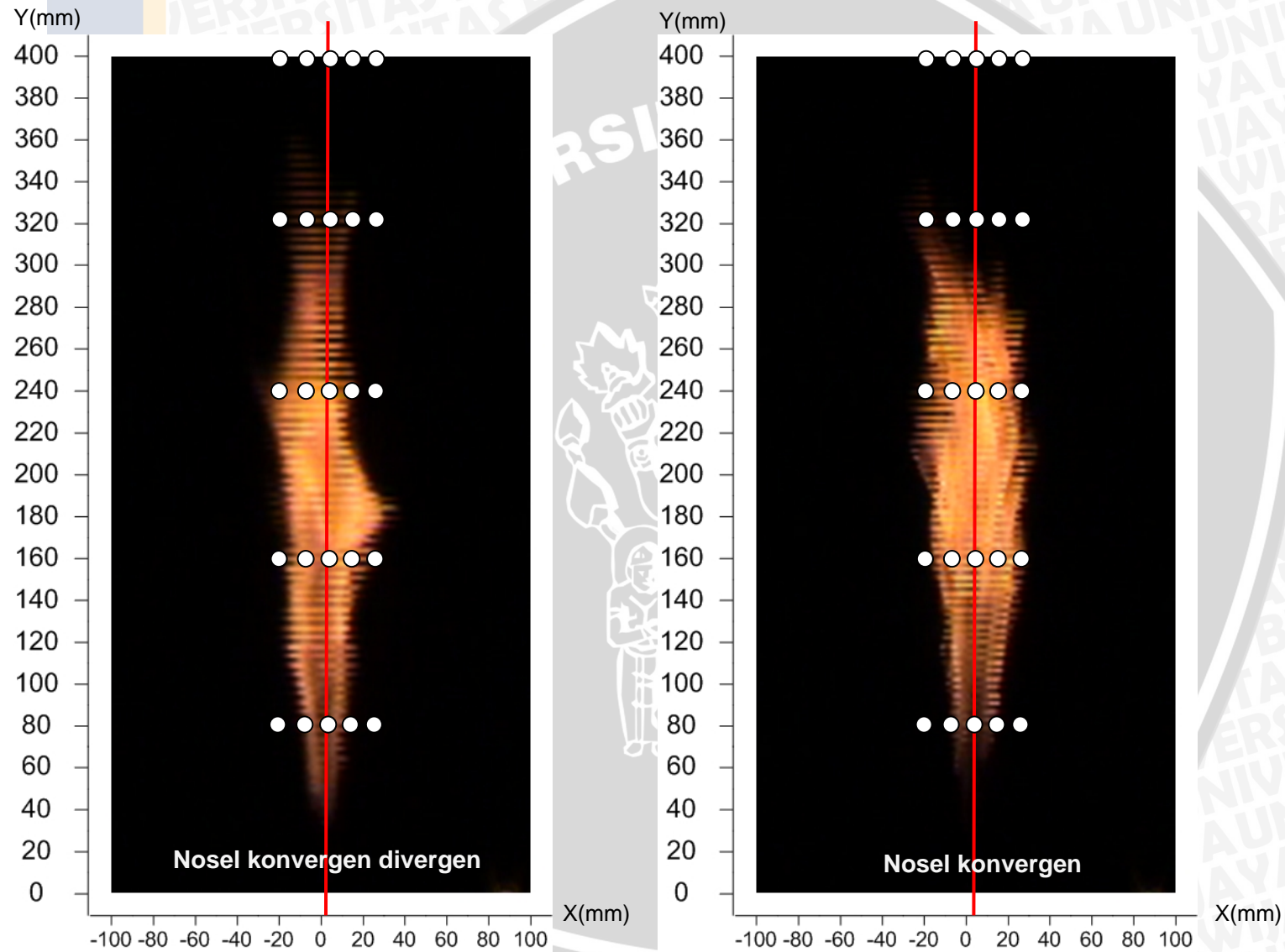
Sensor y=400 mm		JARAK SENSOR SUMBU X (mm)				
Data temperatur (°C)		-28	-14	0	14	28
1	183.840	232.470	262.345	242.450	196.820	
2	239.840	274.470	292.345	290.450	252.820	
Rata ² temperatur (°C)		211.840	253.470	277.345	266.450	224.820

Letak Sensor	Sumbu X (mm)				
sumbu Y (mm)	-28	-14	0	14	28
Distribusi Temperatur (°C) pada Y = 80	622.975	889.665	776.305	916.340	699.650
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 160	728.520	775.845	808.450	792.750	725.425
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 240	386.165	484.800	544.050	520.590	431.955
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 320	408.725	454.530	487.740	458.375	401.760
Distribusi temperatur (°C) pada Y = 400	211.840	253.470	277.345	266.450	224.820

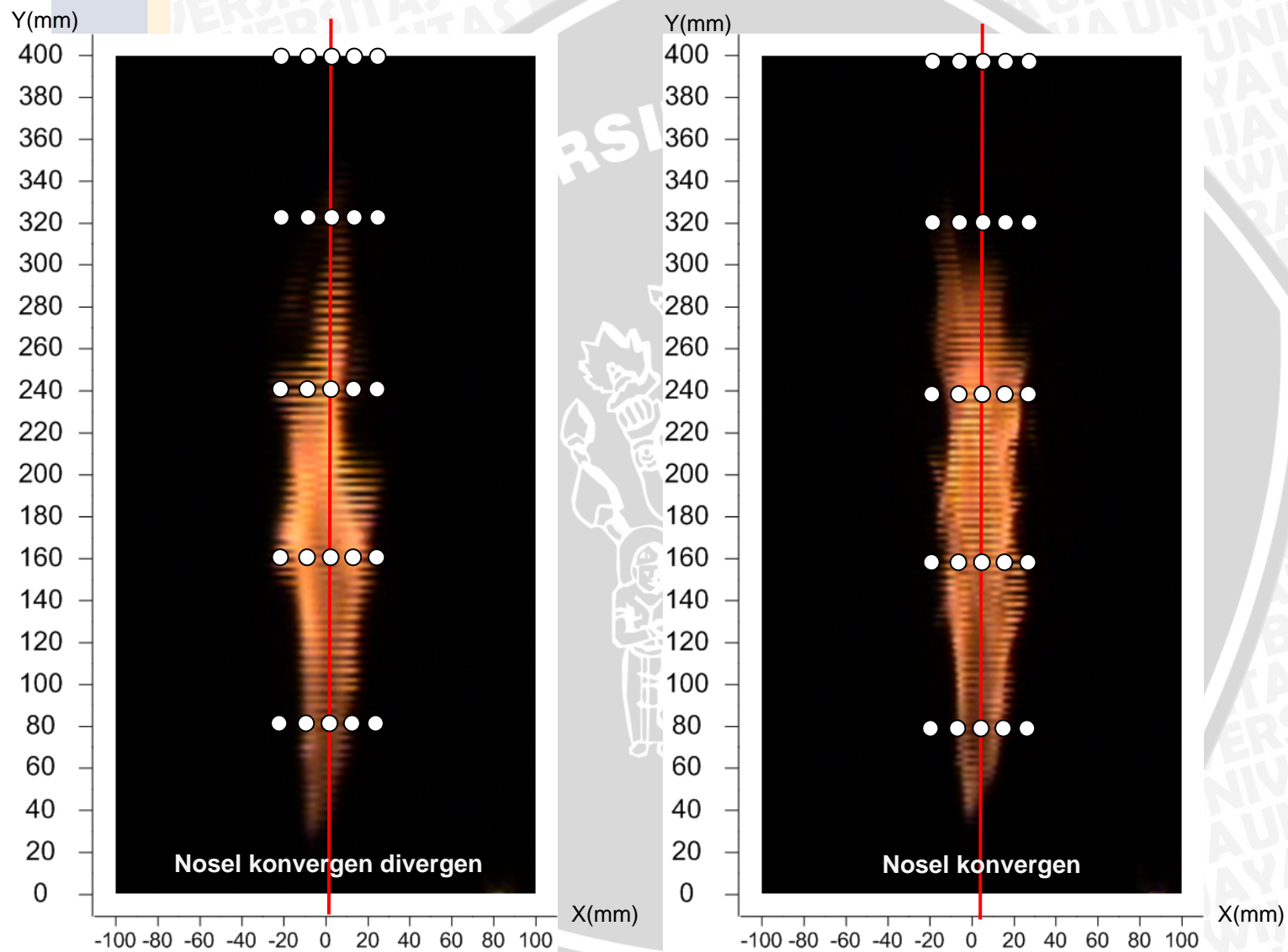
Lampiran 14. Visualisasi letak sensor: Massa alir bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ Massa alir udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



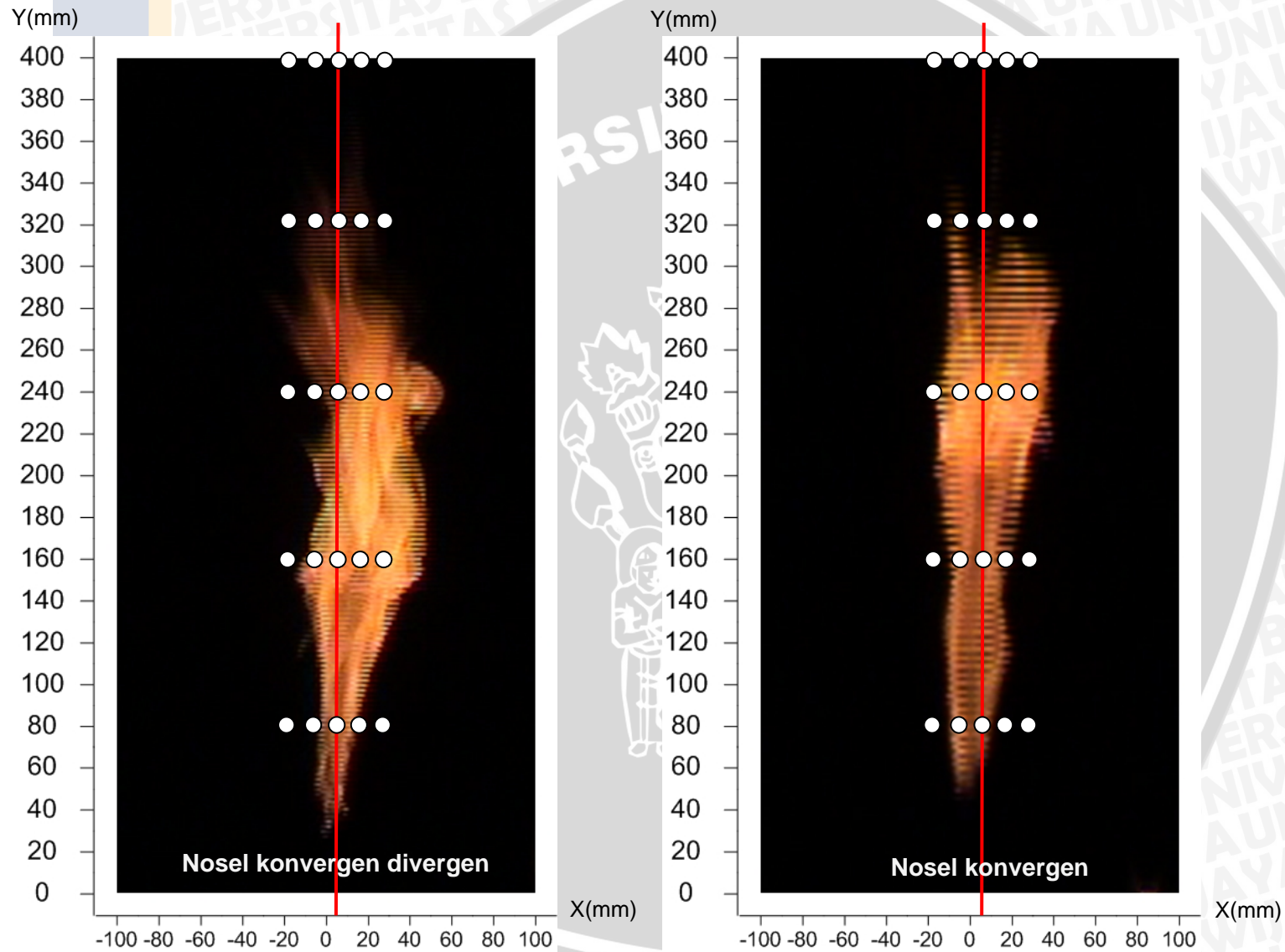
Lampiran 15. Visualisasi letak sensor: Massa alir bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, Massa alir udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



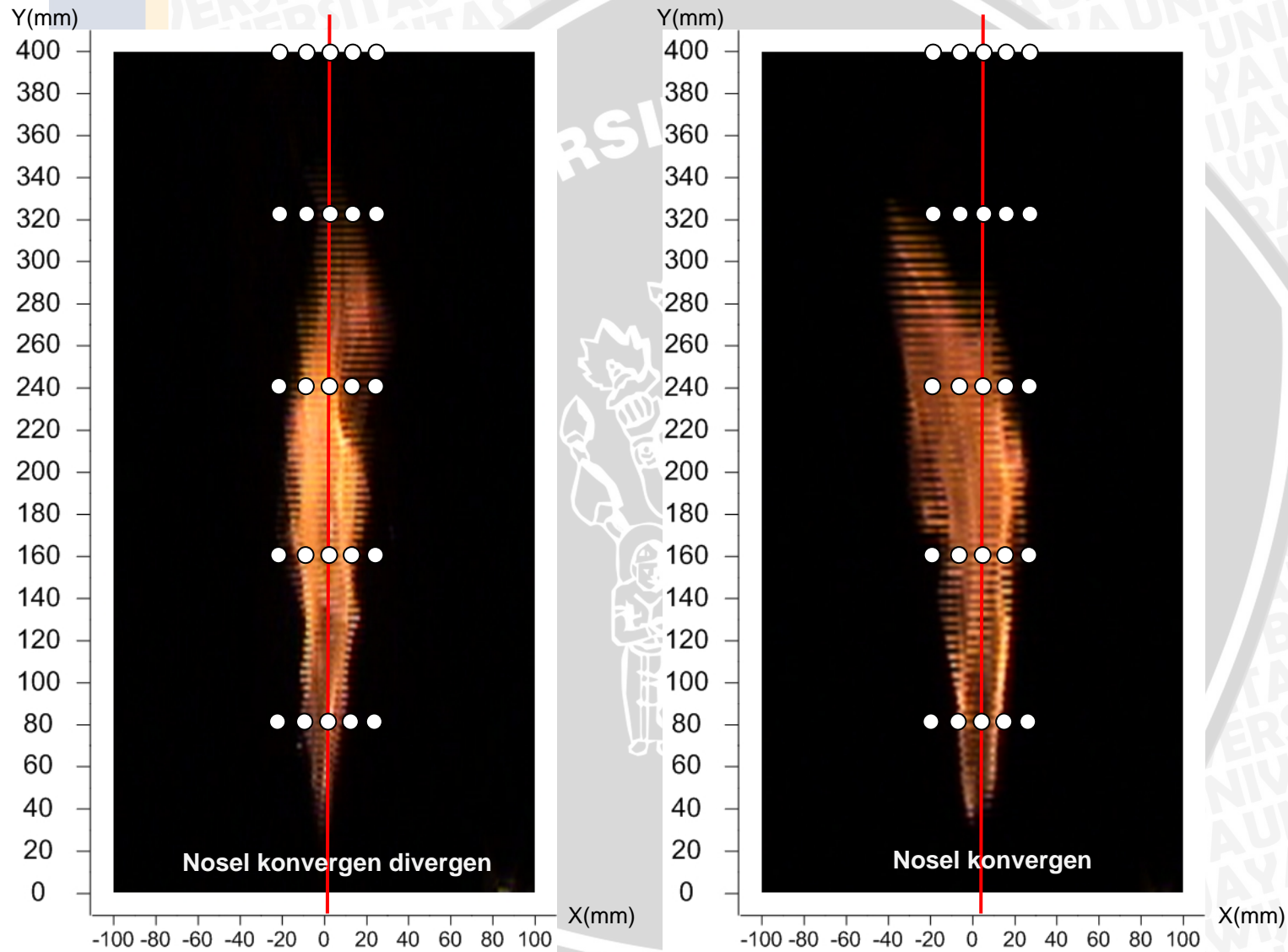
Lampiran 16. Visualisasi letak sensor: Massa alir bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, Massa alir udara $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



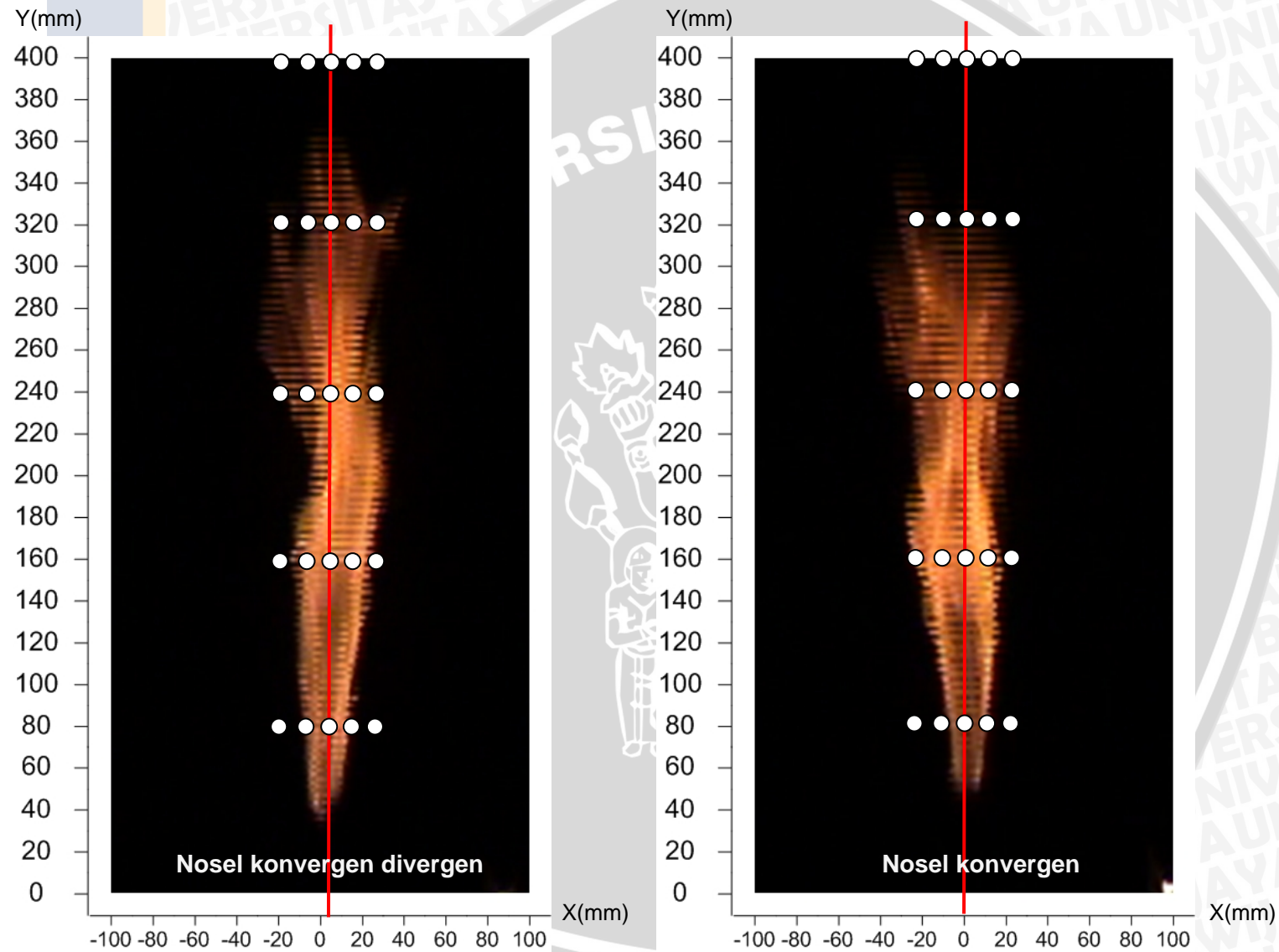
Lampiran 17. Visualisasi letak sensor: Massa alir bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, Massa alir udara $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Lampiran 18. Visualisasi letak sensor: Massa alir bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, Massa alir udara $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

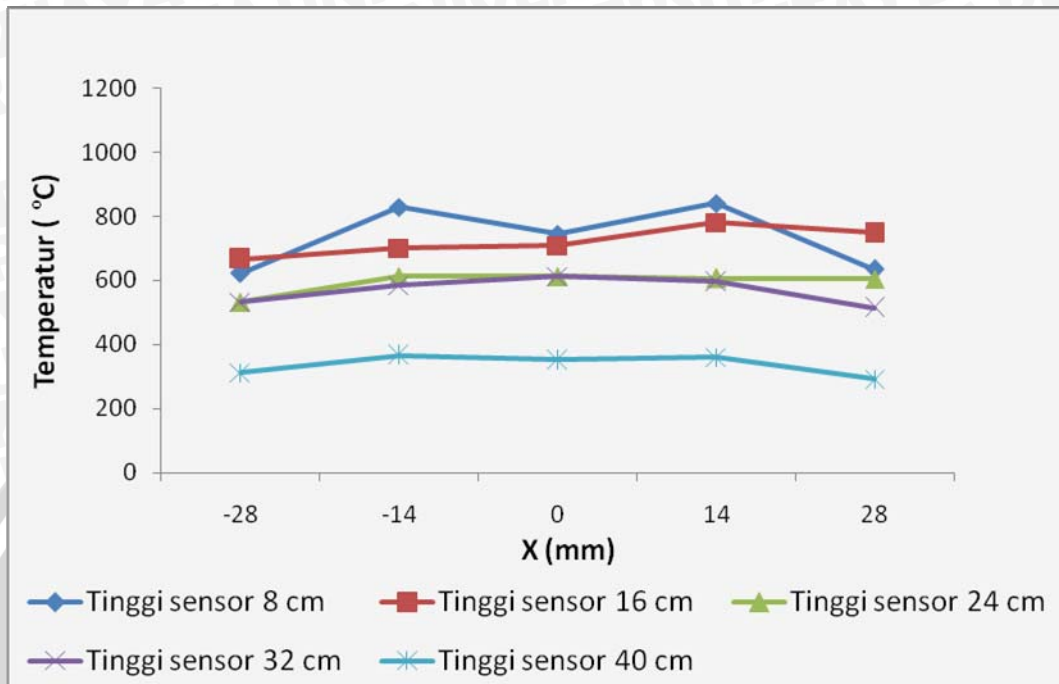


Lampiran 19. Visualisasi letak sensor: Massa alir bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, Massa alir udara $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

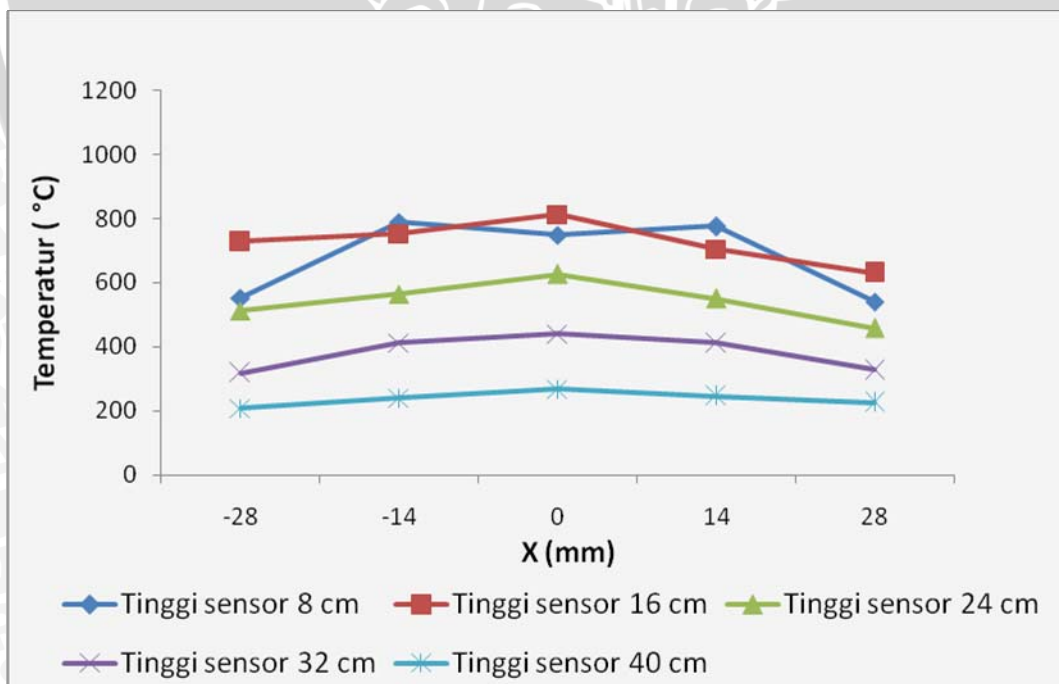


Lampiran 20. Grafik distribusi temperatur api difusi nosel konvergen pada tiap letak sensor y

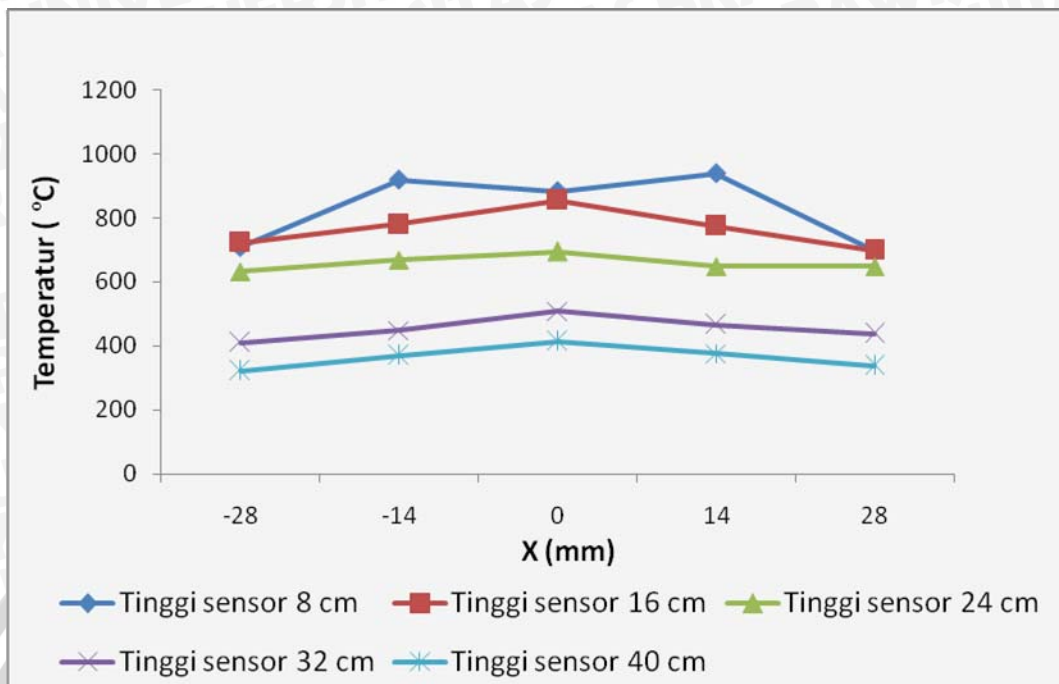
20.1. Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



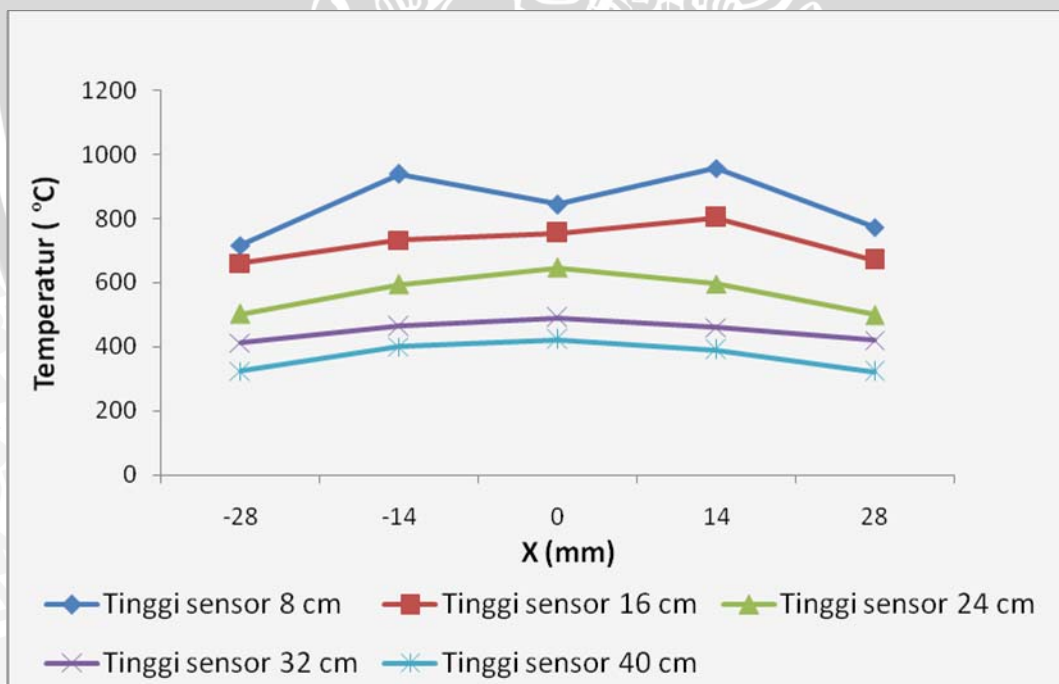
20.2. Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



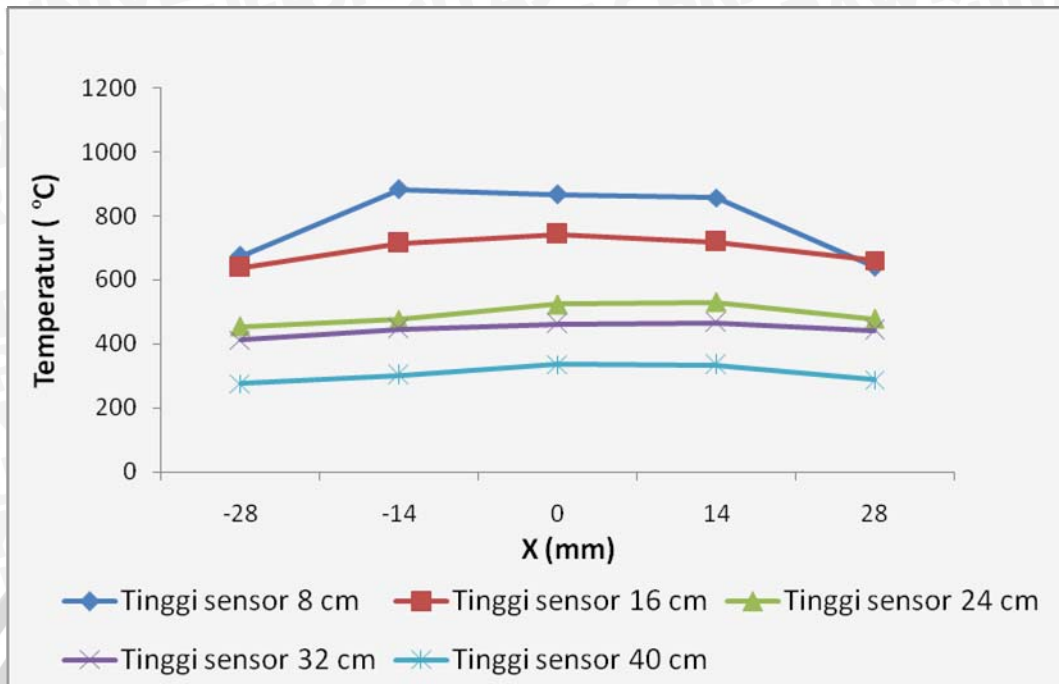
20.3. Debit udara $1,090.10^{-3} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,115.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$



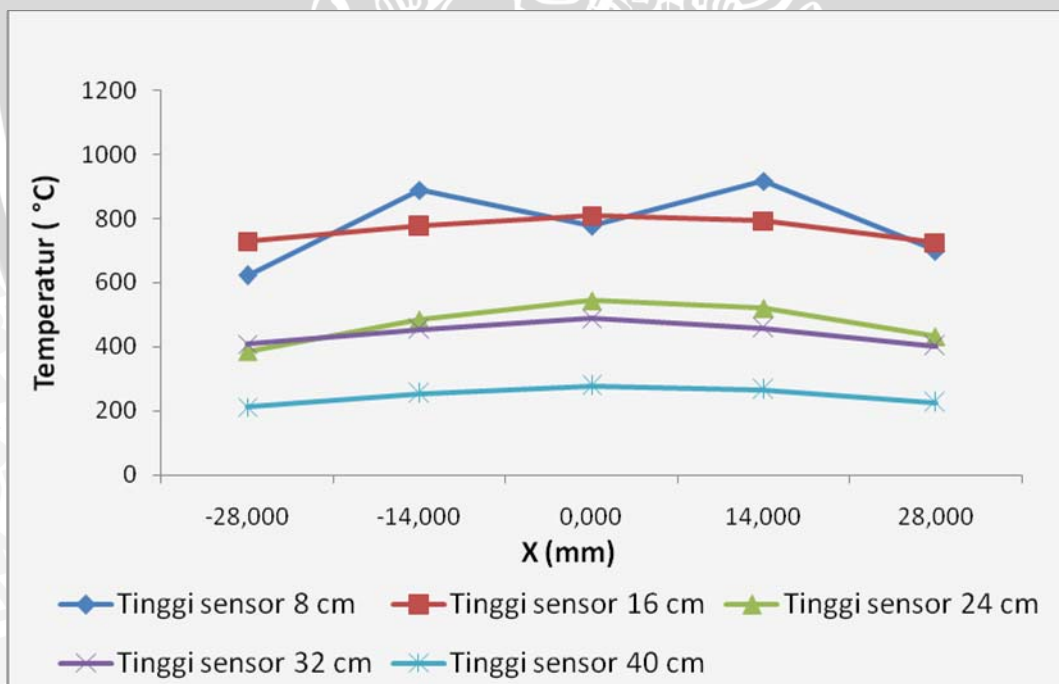
20.4. Debit udara $1,090.10^{-3} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,993.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$



20.5. Debit udara $1,335.10^{-3} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,115.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$

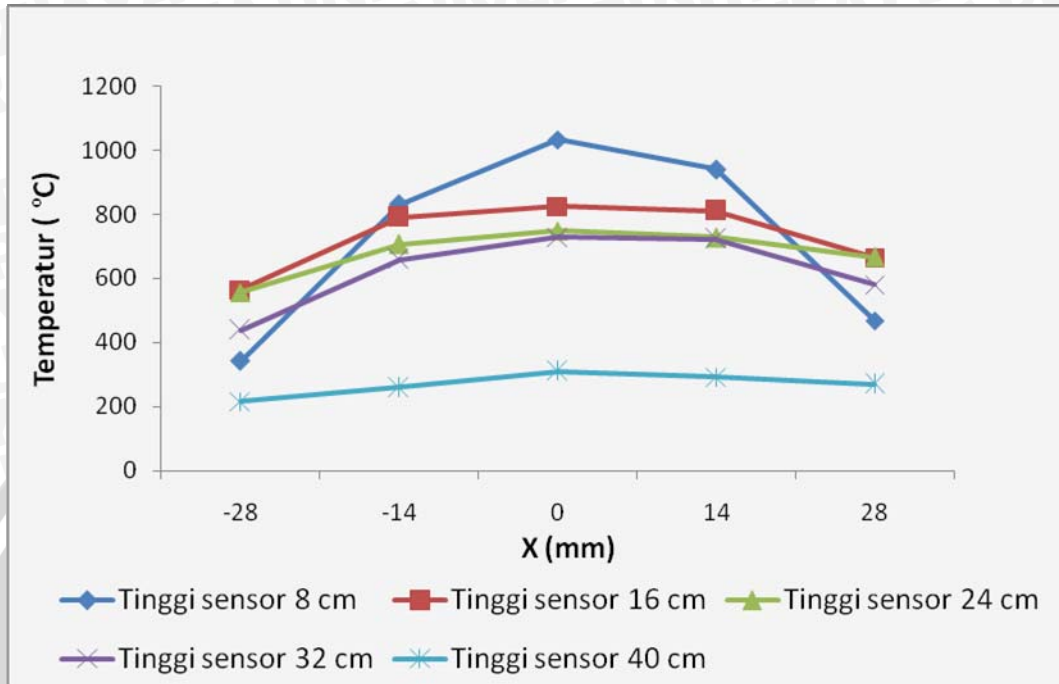


20.6. Debit udara $1,335.10^{-3} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,993.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$

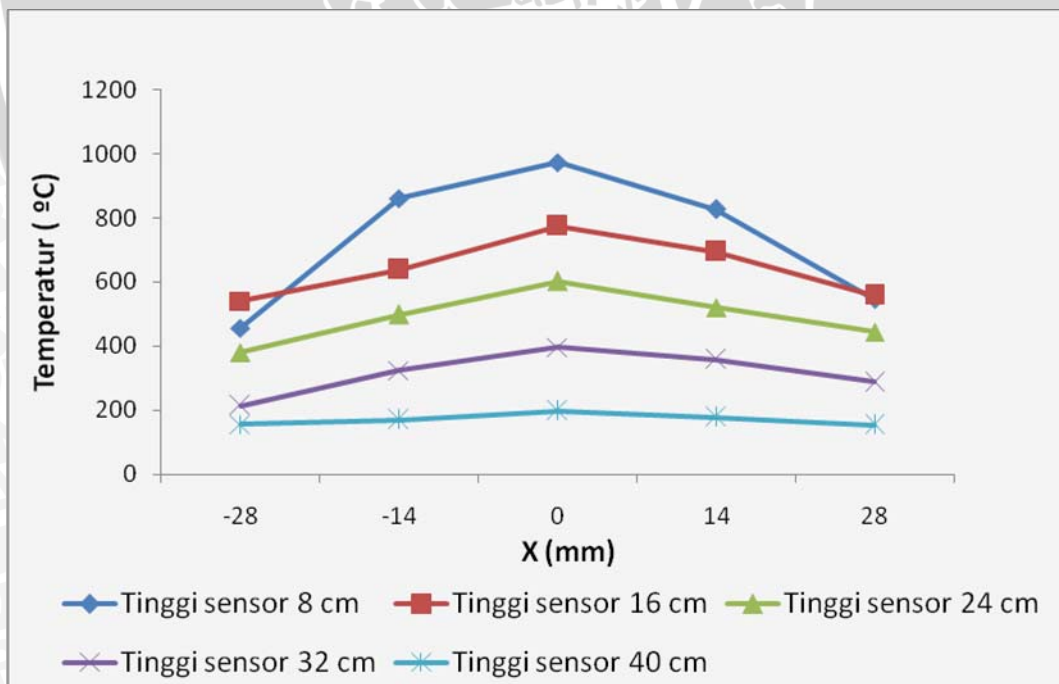


Lampiran 21. Grafik distribusi temperatur api difusi nosel konvergen divergen pada tiap letak sensor y

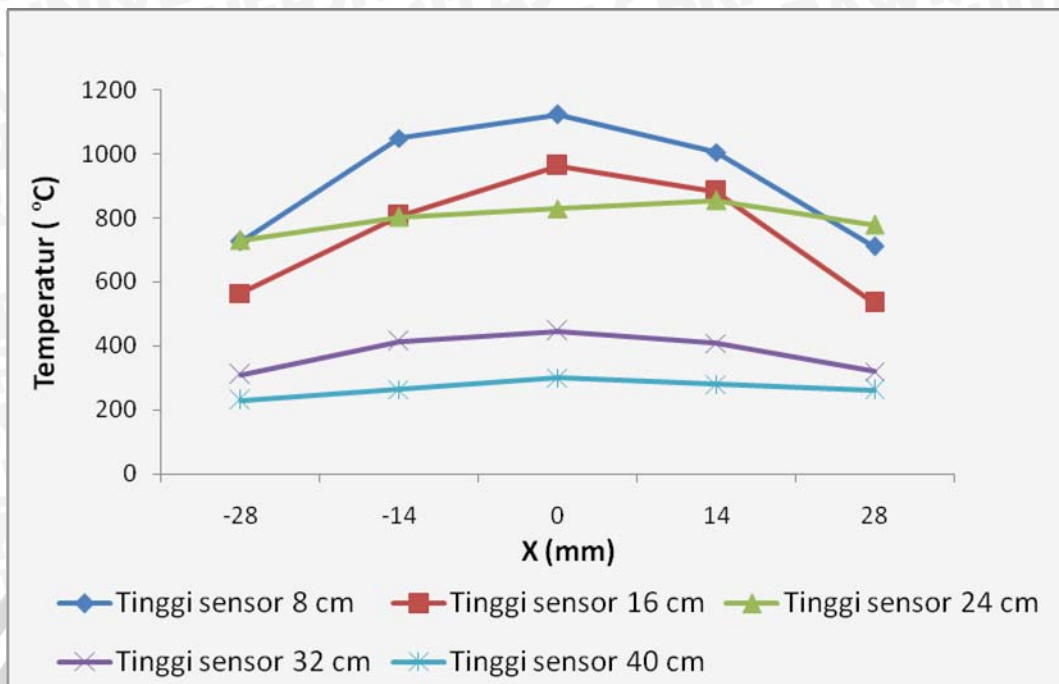
21.1. Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



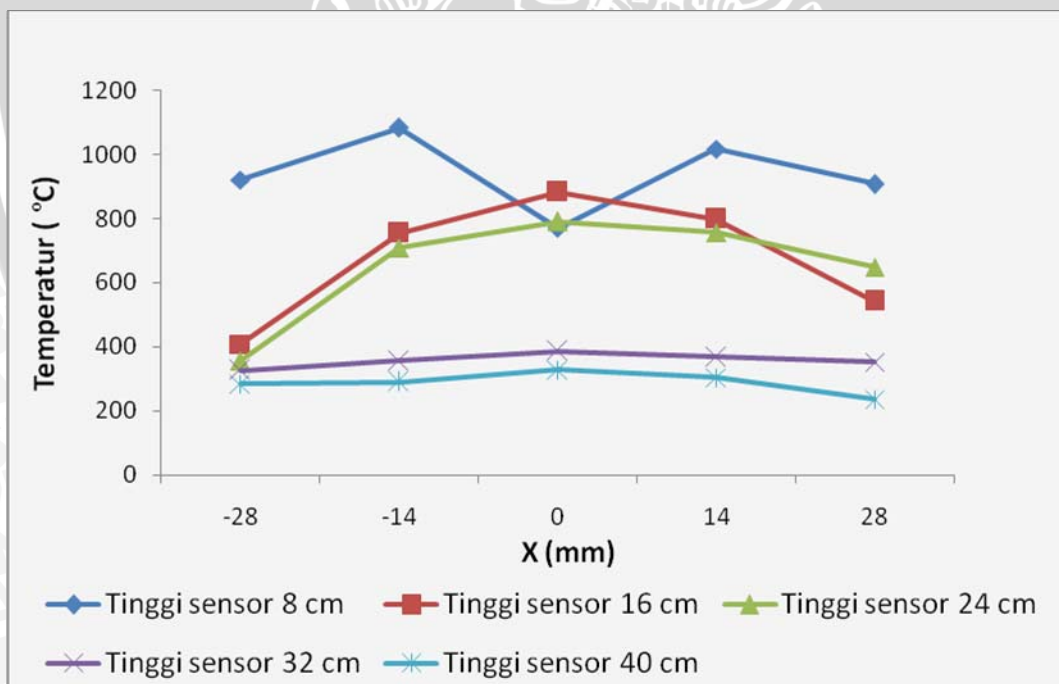
21.2. Debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



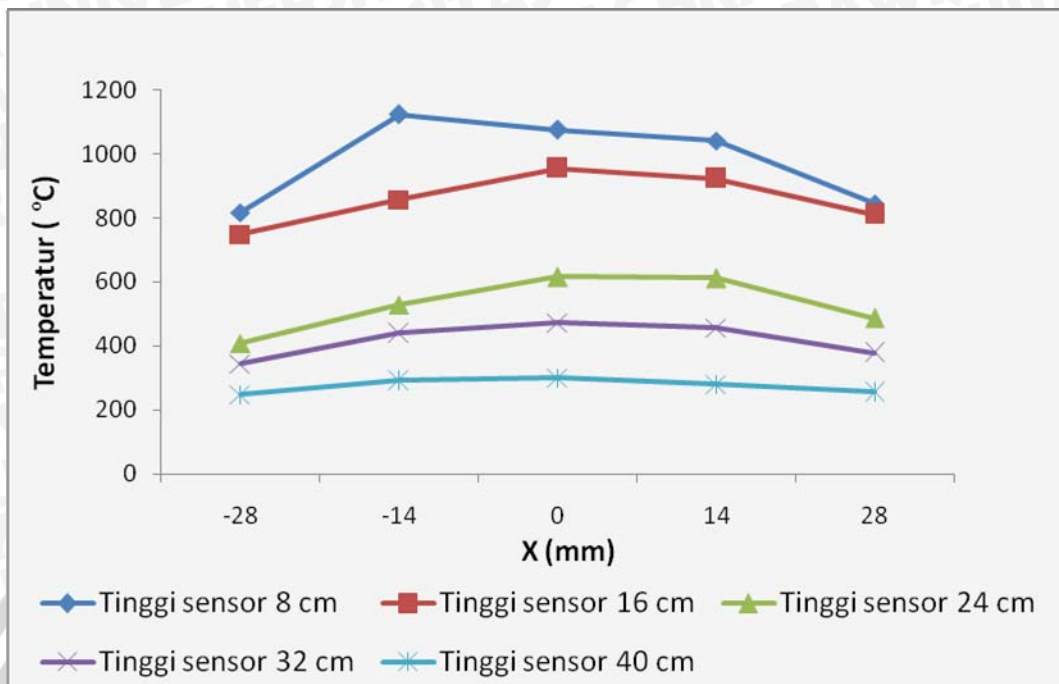
21.3. Debit udara $1,090.10^{-3} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,115.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$



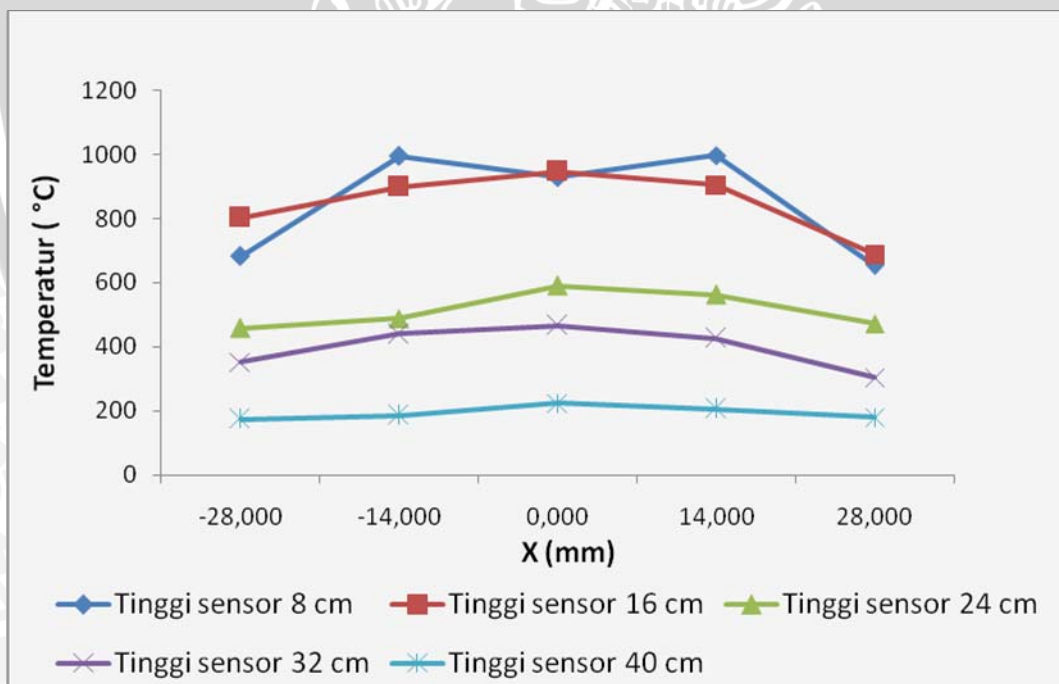
21.4. Debit udara $1,090.10^{-3} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,993.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$



21.5. Debit udara $1,335.10^{-3} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,115.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$

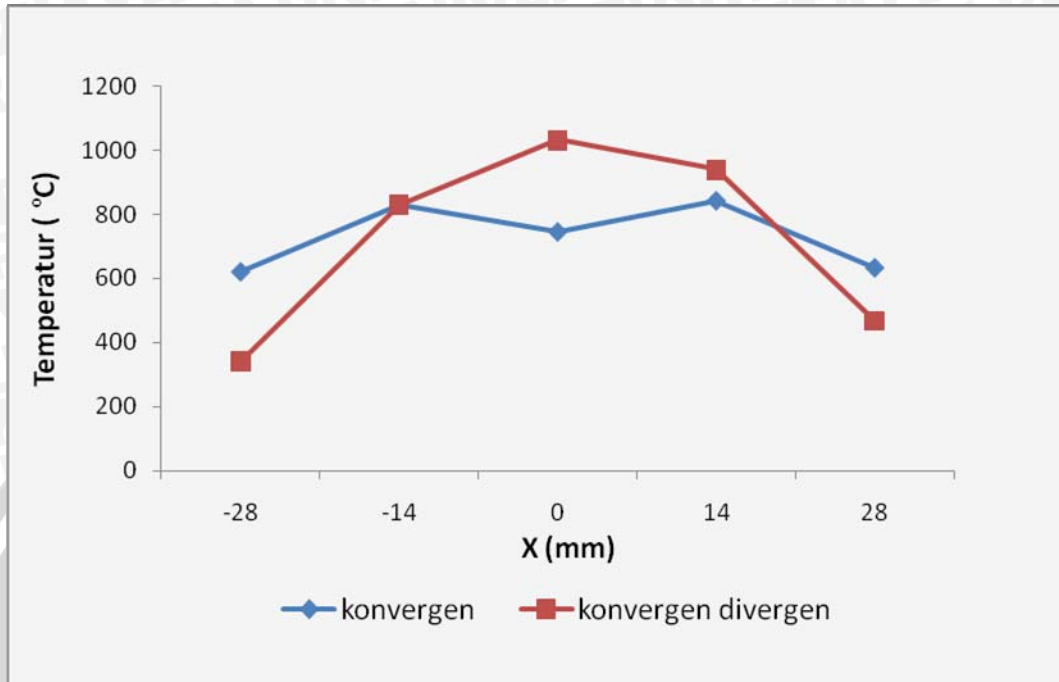


21.6. Debit udara $1,335.10^{-3} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,993.10^{-7} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$

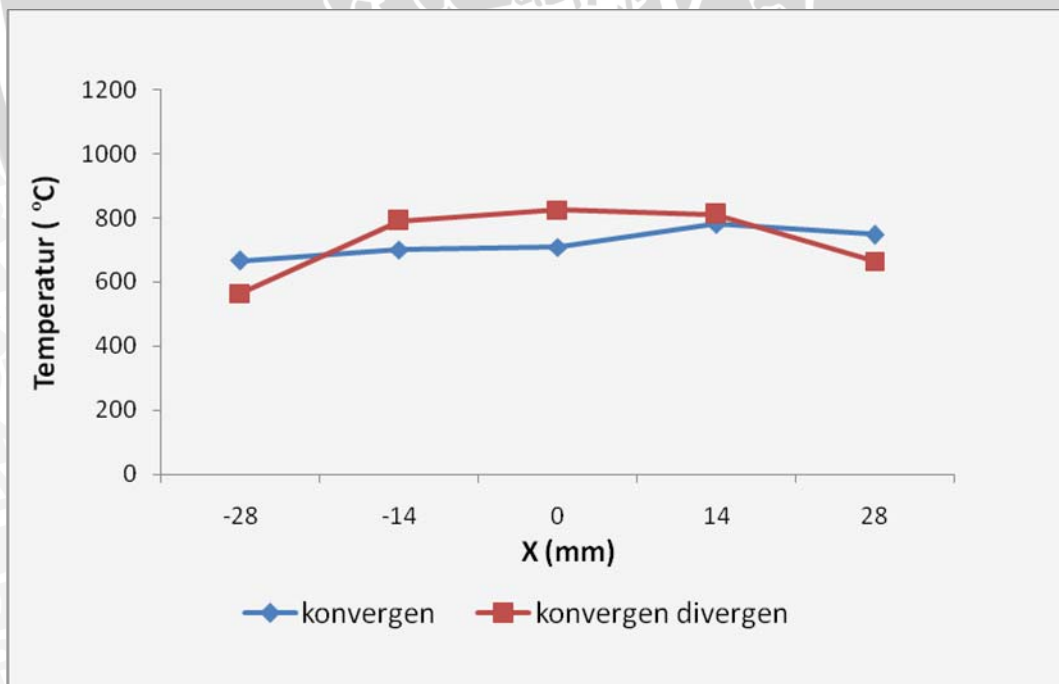


Lampiran 22. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

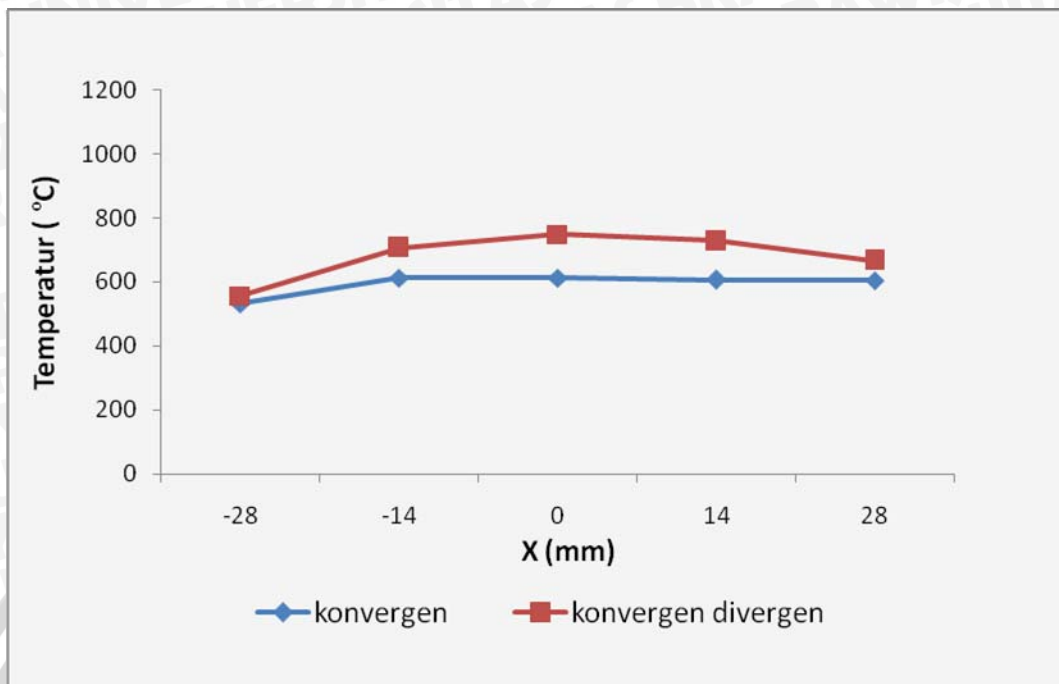
22.1. Letak sensor $y = 80 \text{ mm}$



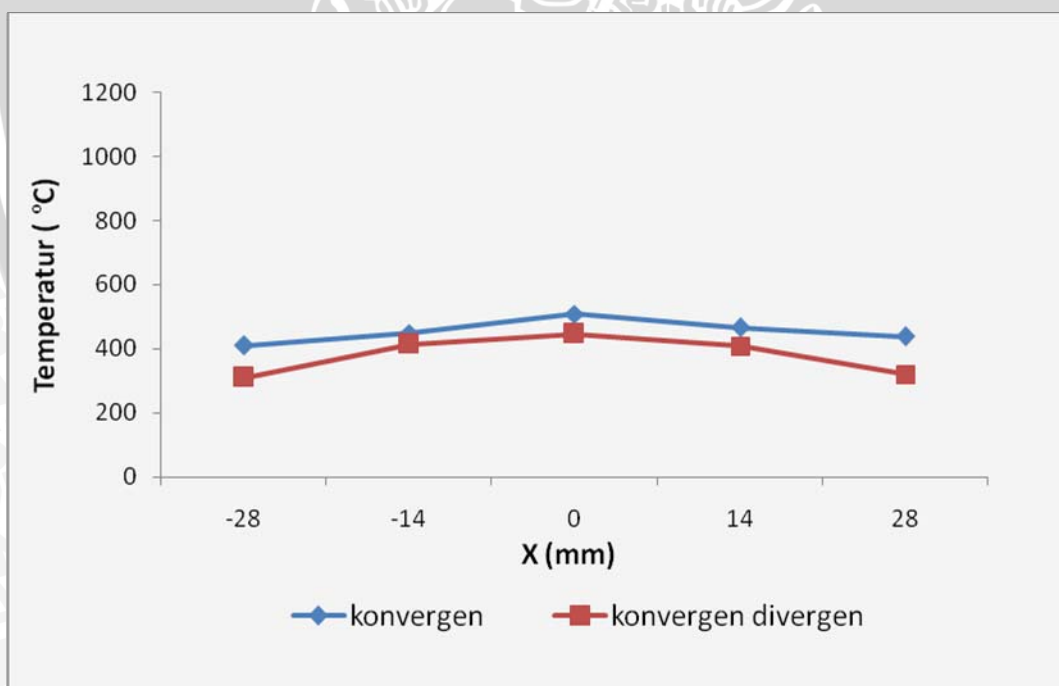
22.2. Letak sensor $y = 160 \text{ mm}$



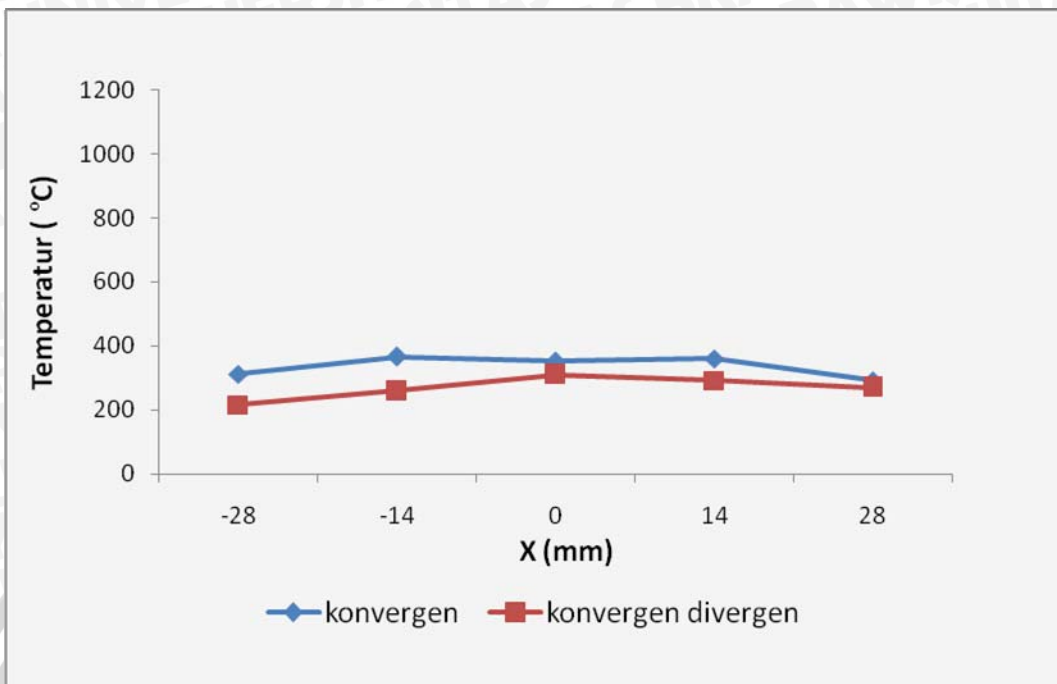
22.3. Letak sensor $y = 240$ mm



22.4. Letak sensor $y = 320$ mm

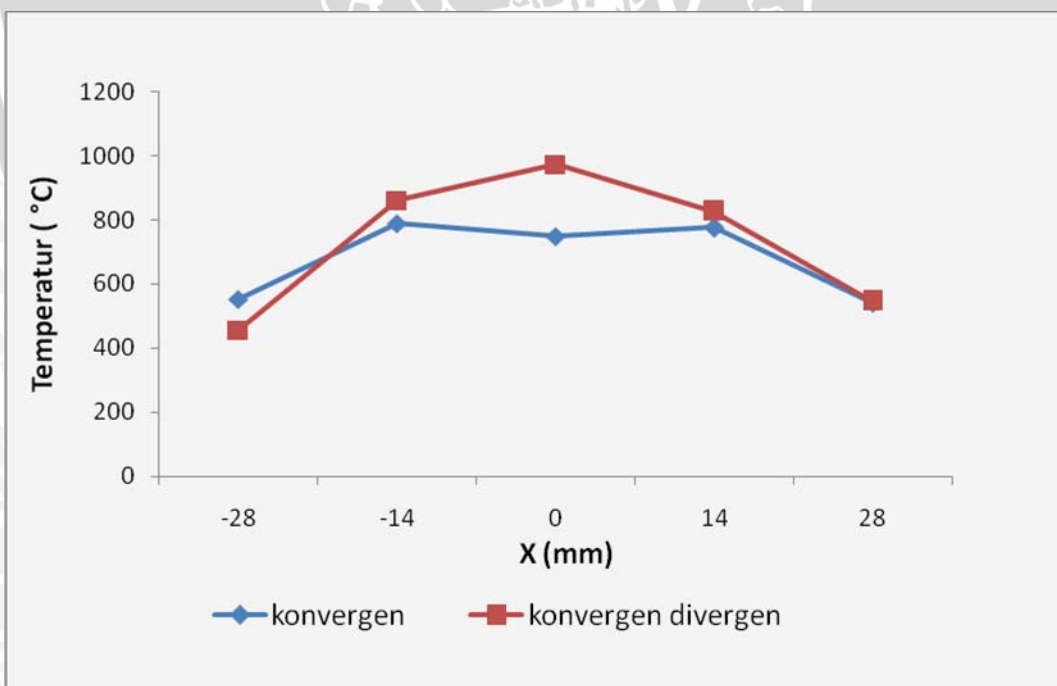


22.5. Letak sensor y = 400 mm

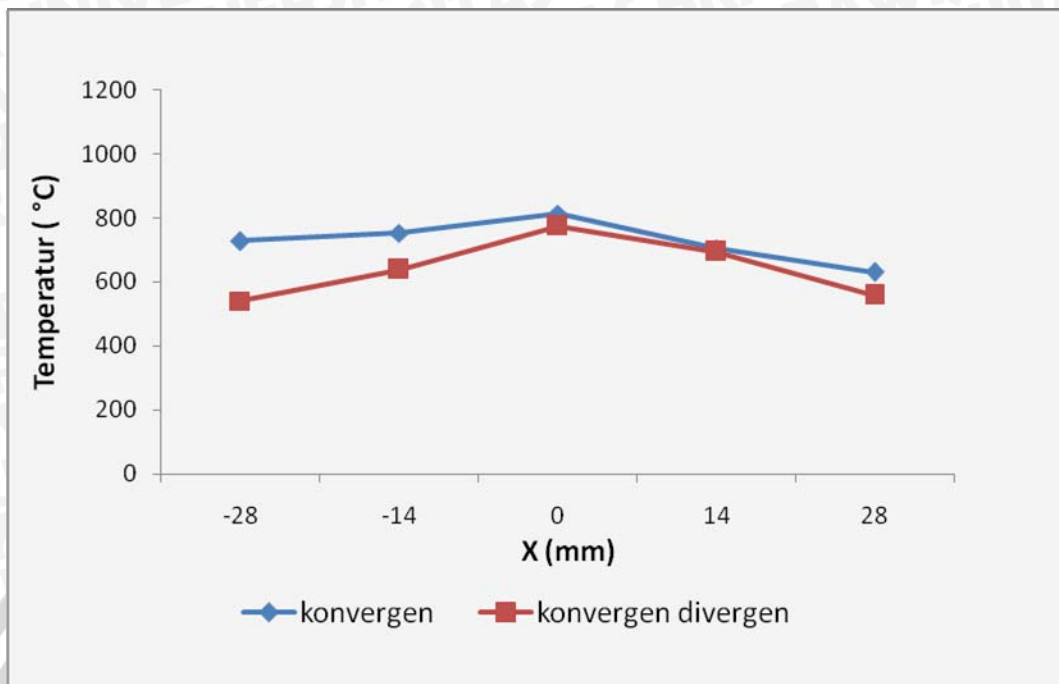


Lampiran 23. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel debit udara $7,715 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

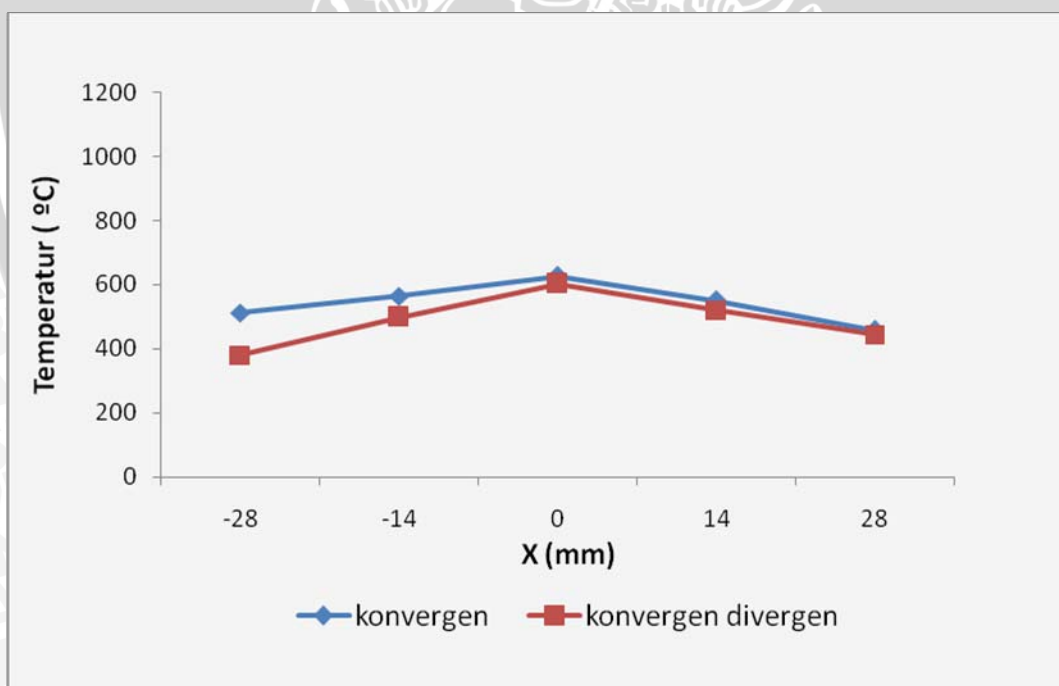
23.1. Letak sensor y = 80 mm



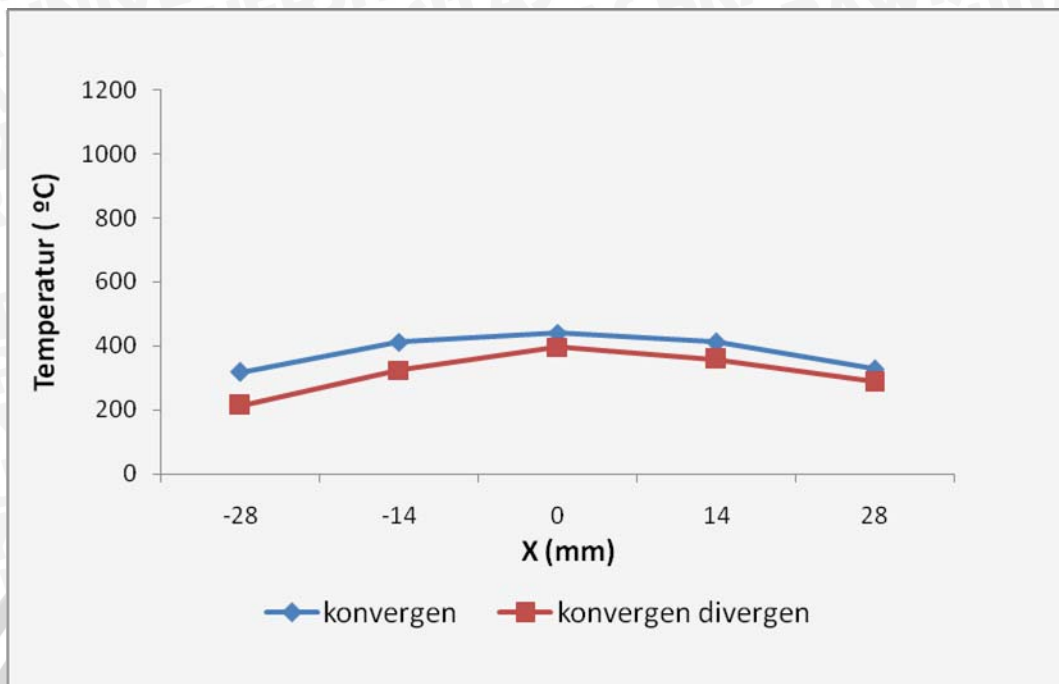
23.2. Letak sensor $y = 160$ mm



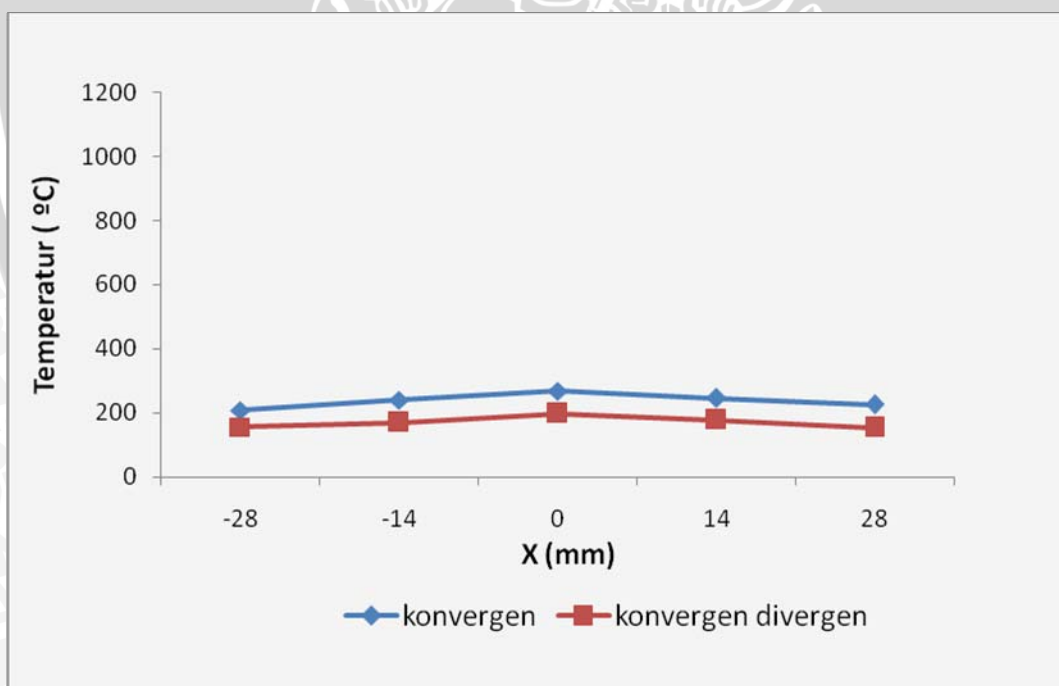
24.3. Letak sensor $y = 240$ mm



23.4. Letak sensor $y = 320$ mm

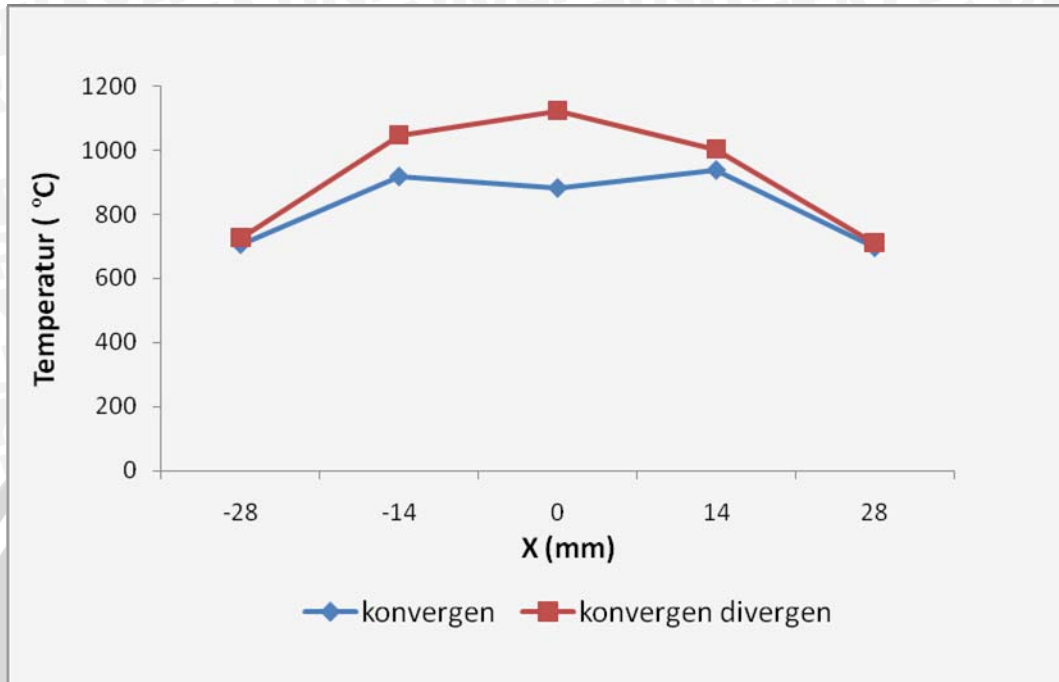


23.5. Letak sensor $y = 400$ mm

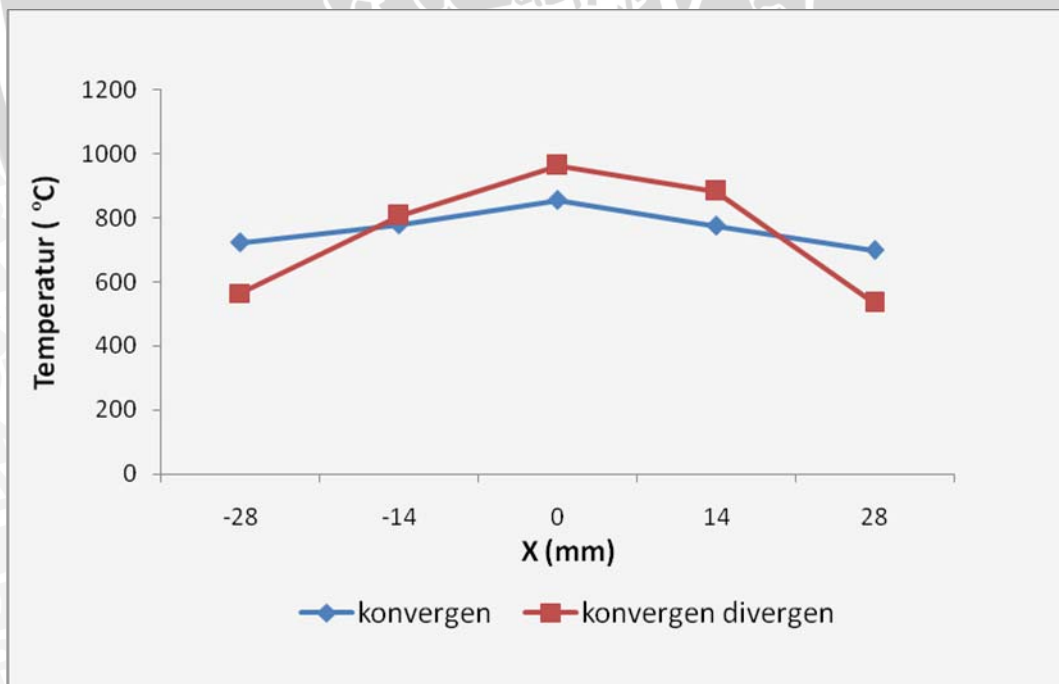


Lampiran 24. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel debit udara $1,090.10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,115.10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

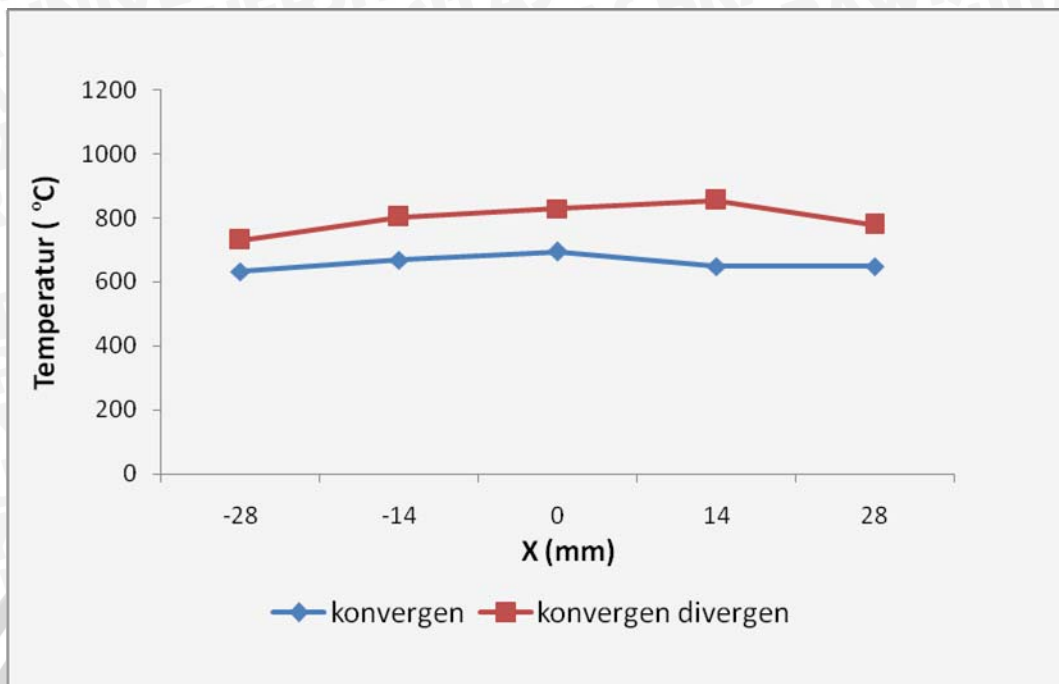
24.1. Letak sensor $y = 80 \text{ mm}$



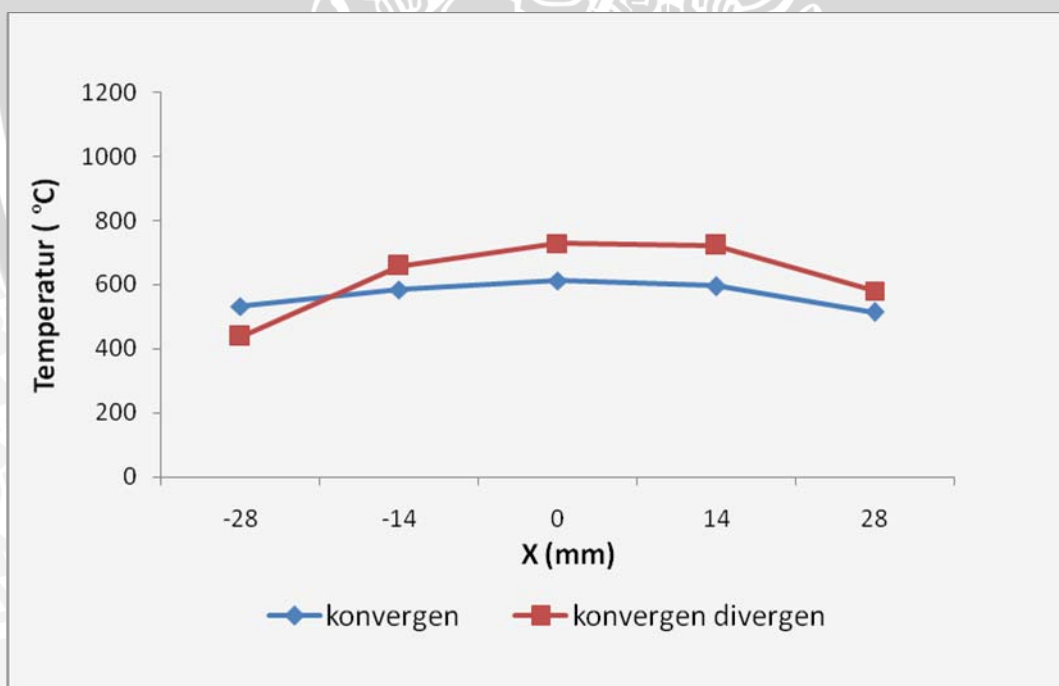
24.2. Letak sensor $y = 160 \text{ mm}$



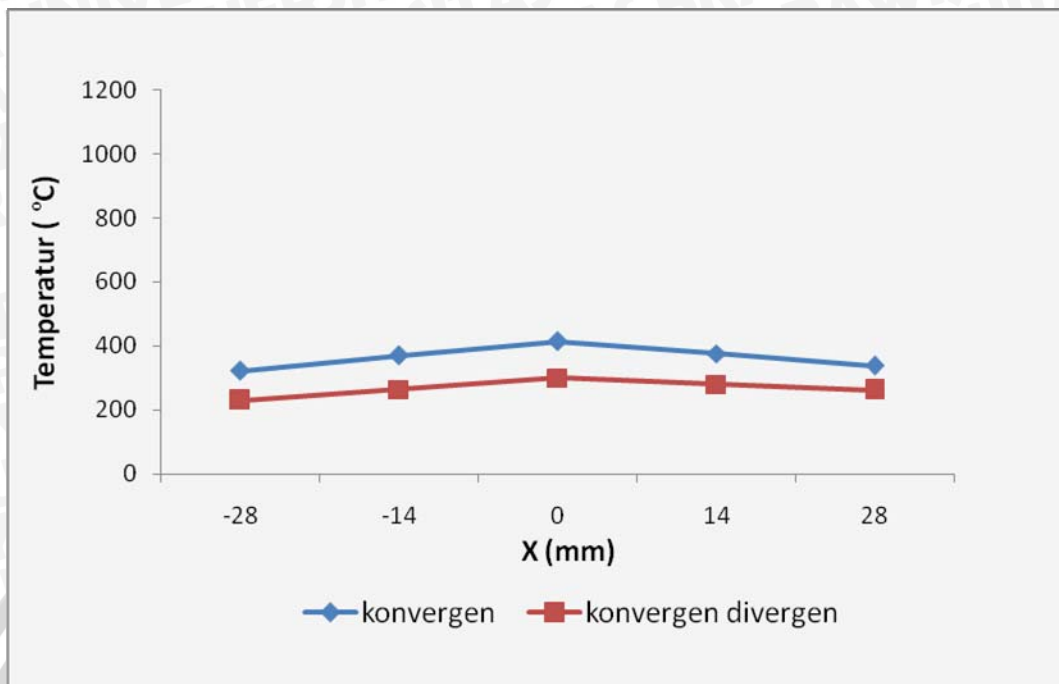
24.3. Letak sensor $y = 240$ mm



24.4. Letak sensor $y = 320$ mm

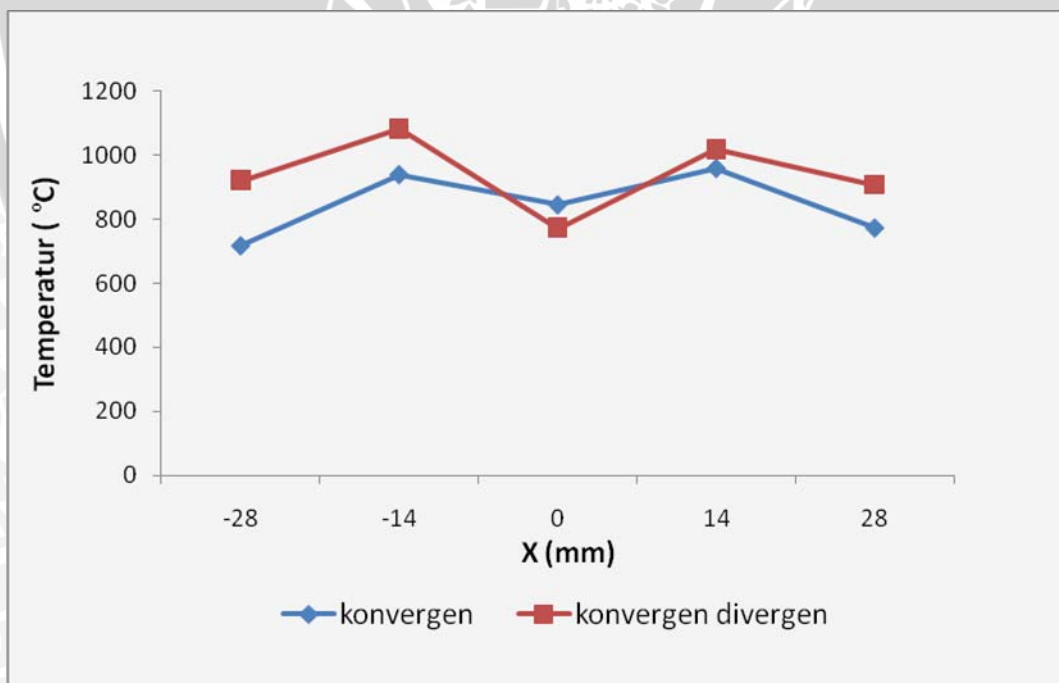


24.5. Letak sensor y = 400 mm

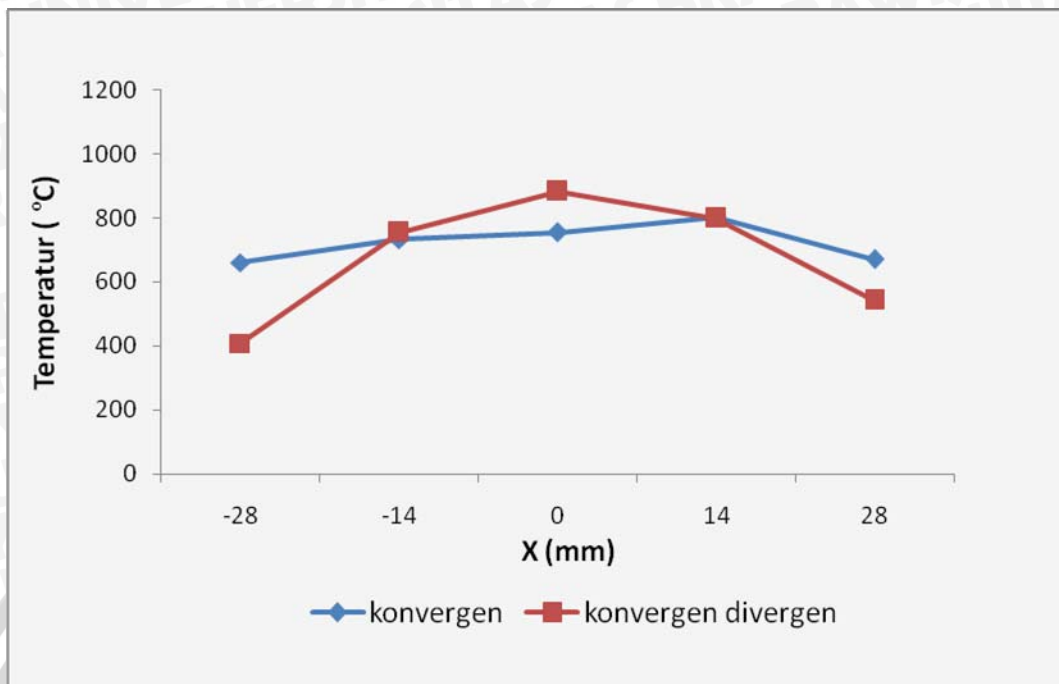


Lampiran 25. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel debit udara $1,090 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

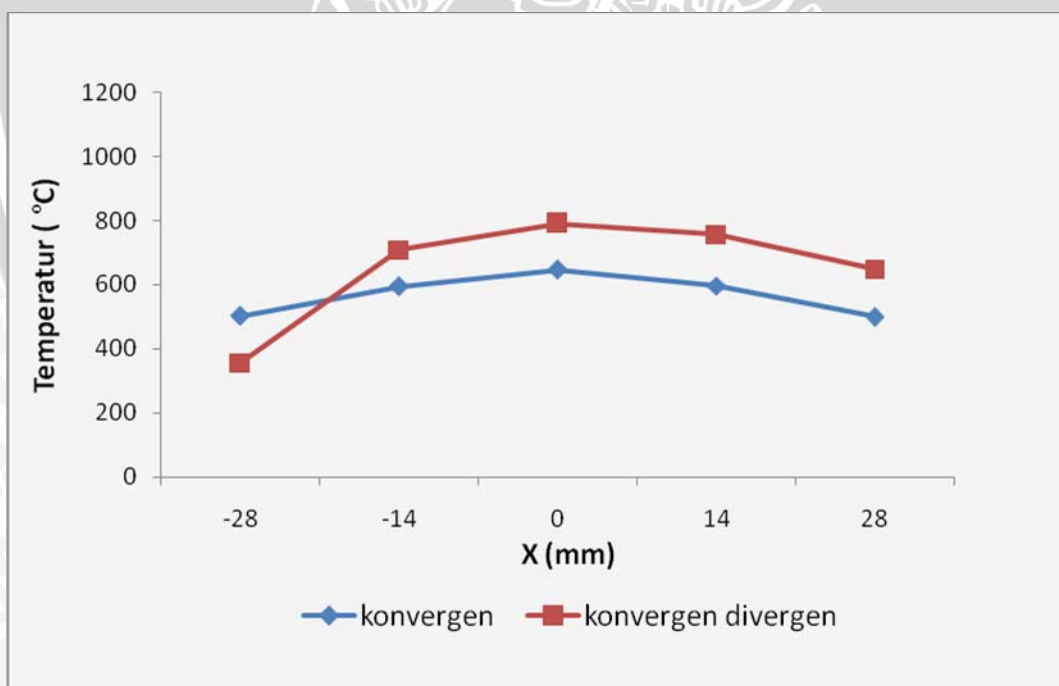
25.1. Letak sensor y = 80 mm



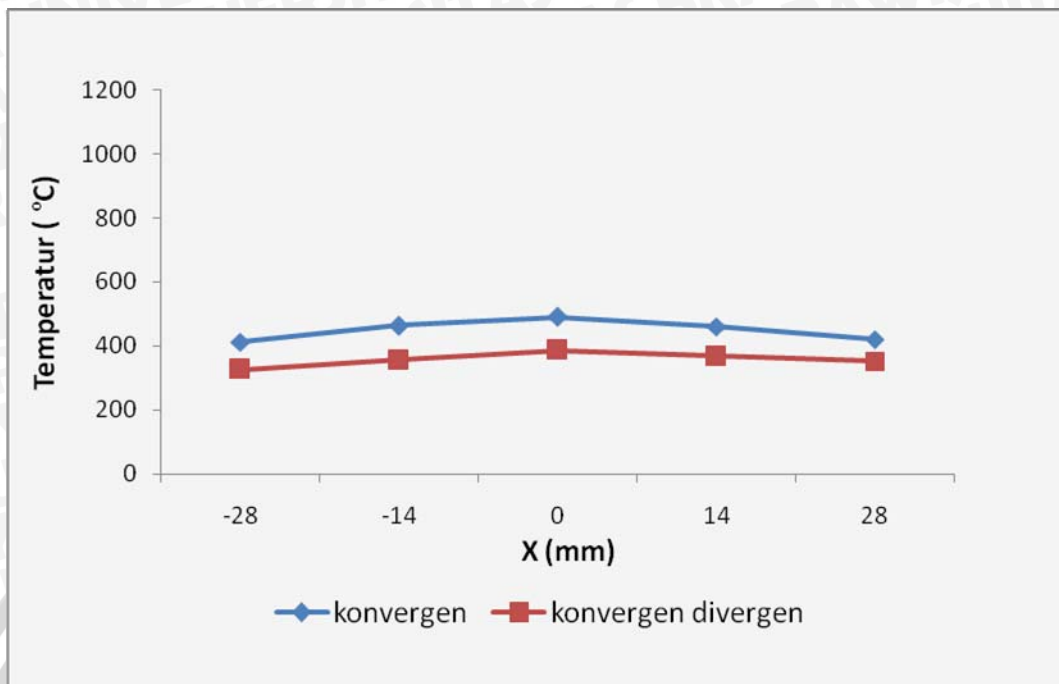
25.2. Letak sensor $y = 160$ mm



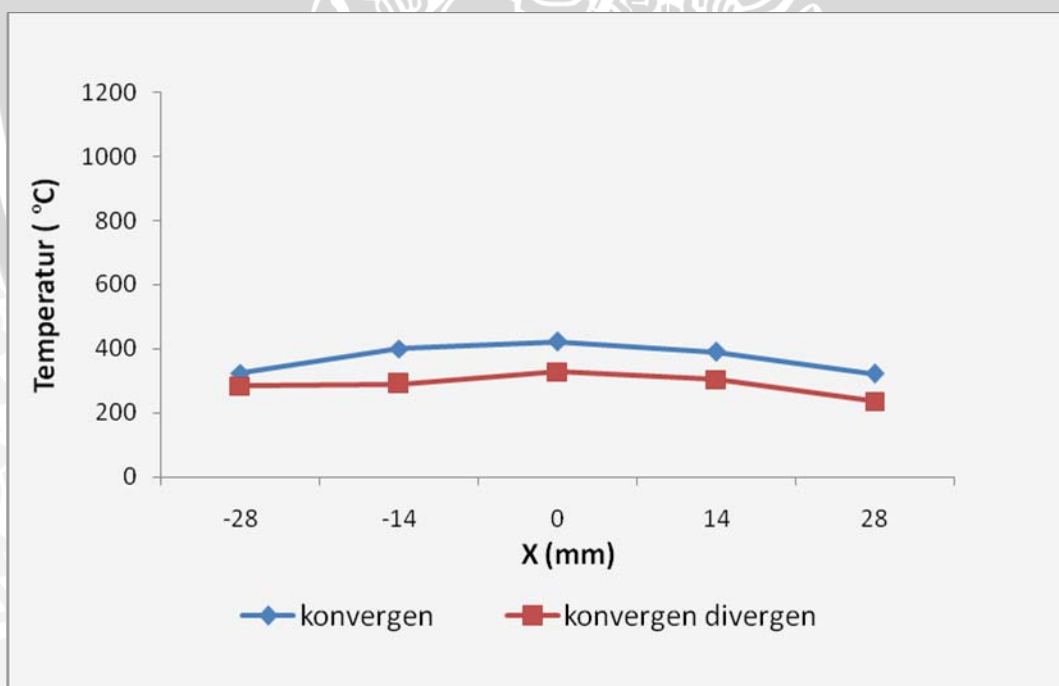
25.3. Letak sensor $y = 240$ mm



25.4. Letak sensor $y = 320$ mm

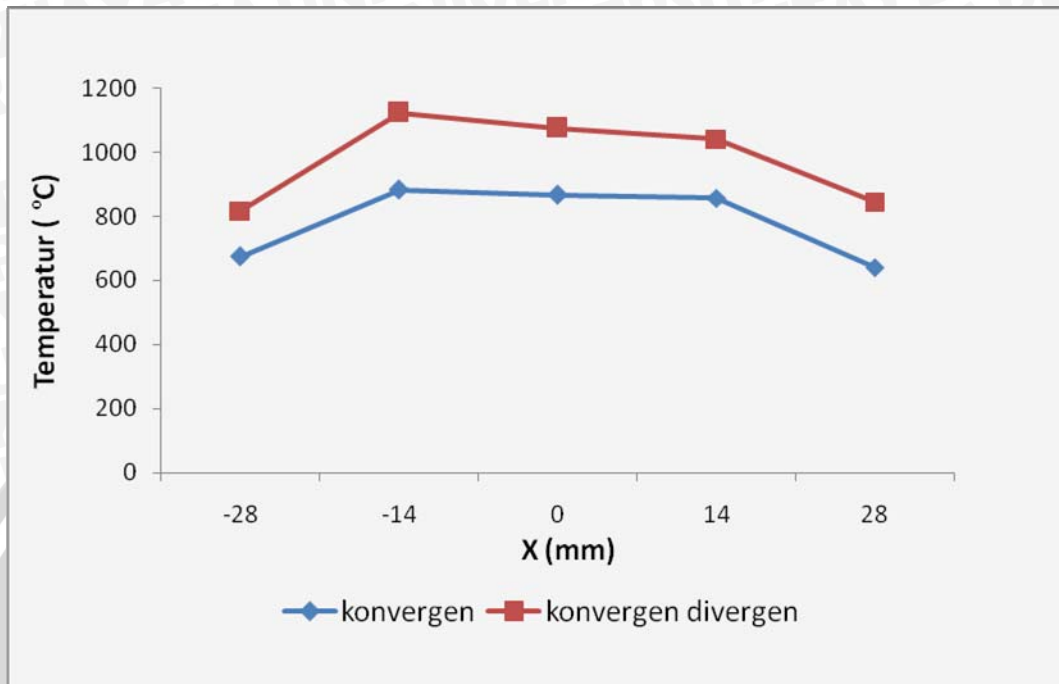


25.5. Letak sensor $y = 400$ mm

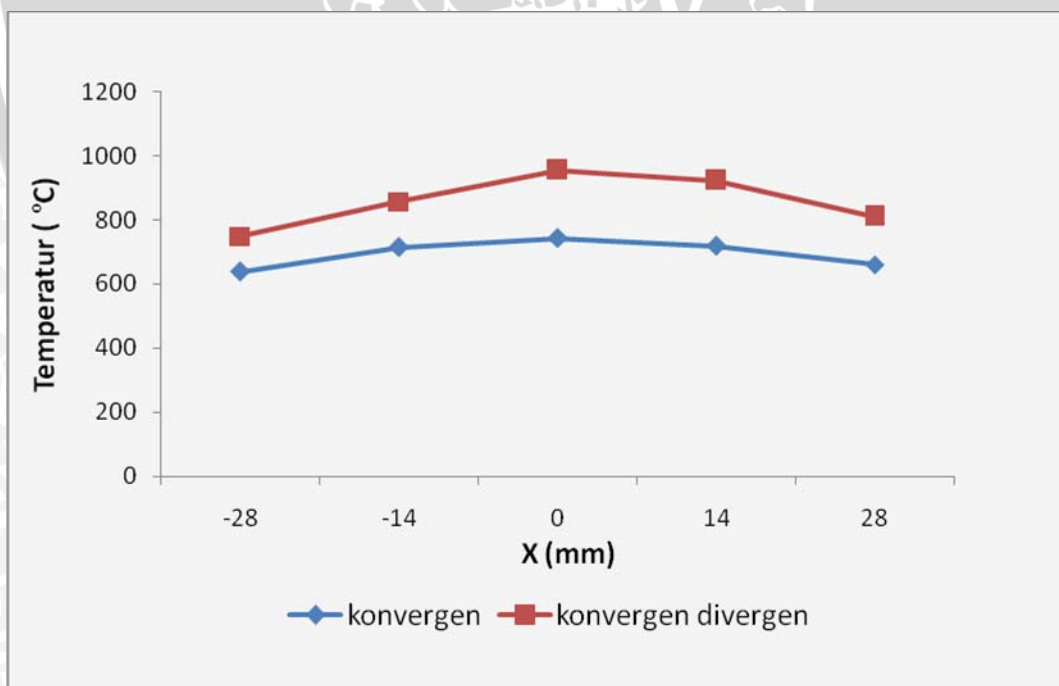


Lampiran 26. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel debit udara $1,335.10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,115.10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

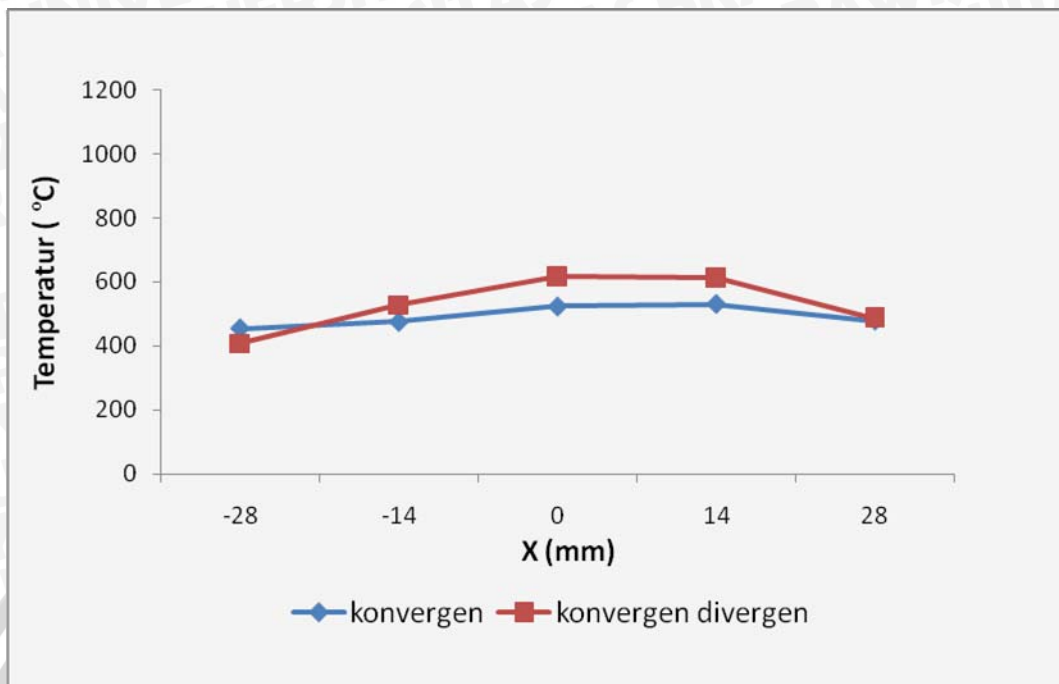
26.1. Letak sensor $y = 80 \text{ mm}$



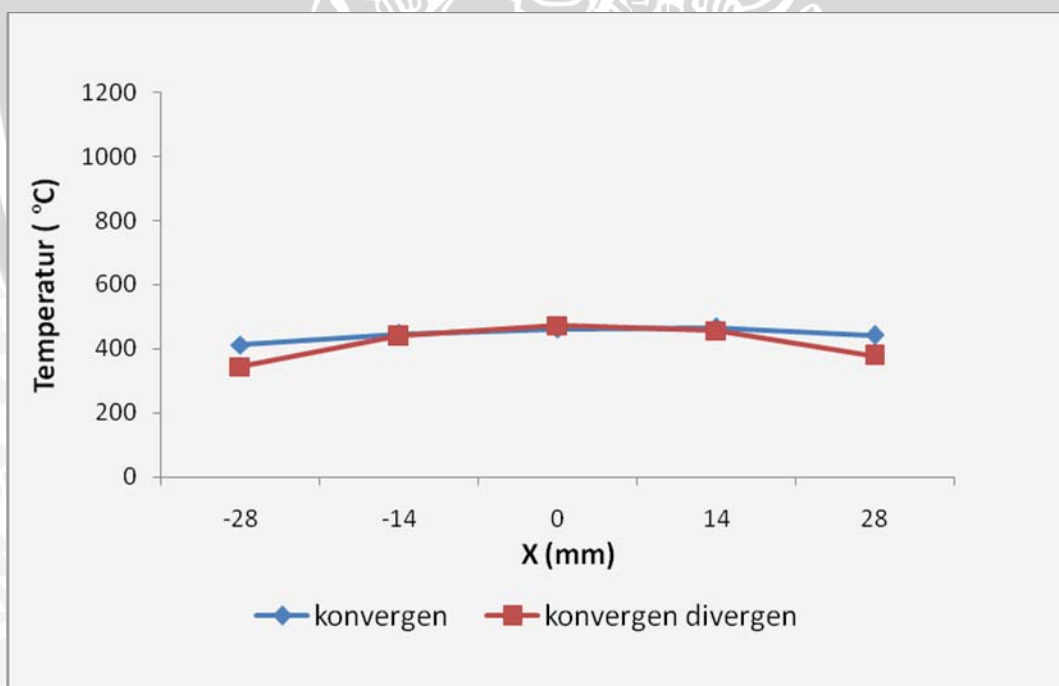
26.2. Letak sensor $y = 160 \text{ mm}$



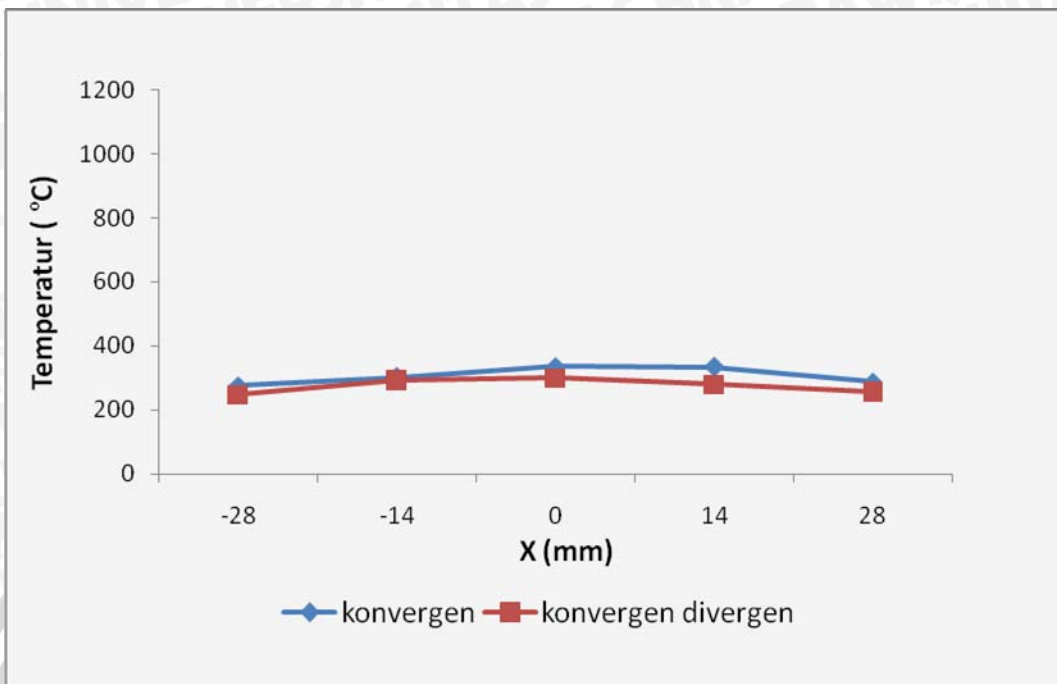
26.3. Letak sensor $y = 240$ mm



26.4. Letak sensor $y = 320$ mm

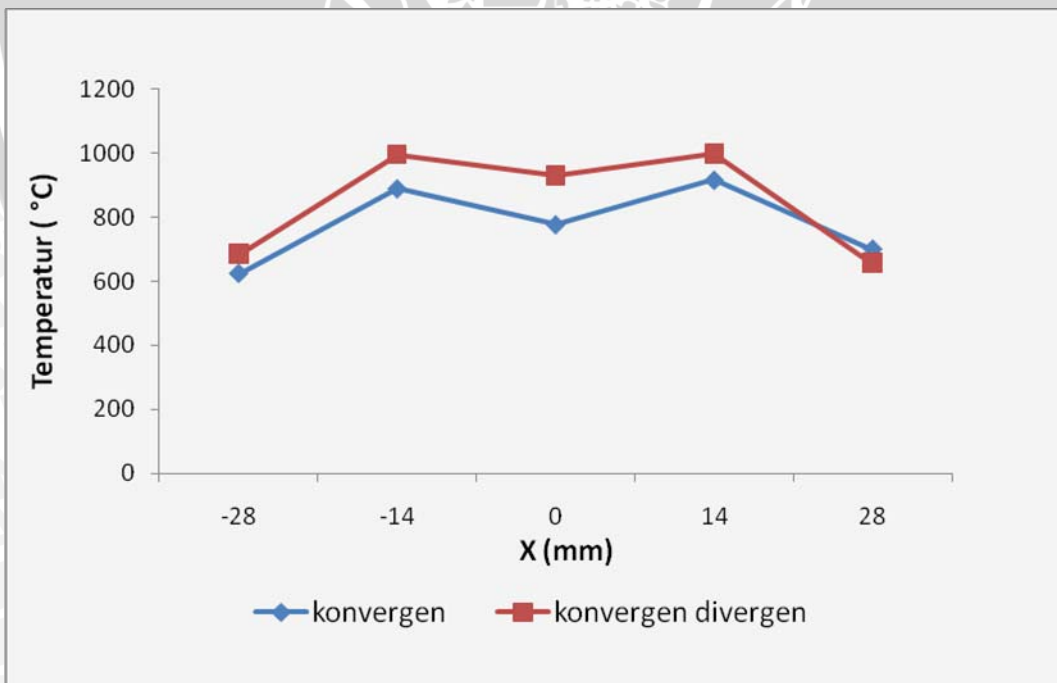


26.5. Letak sensor y = 400 mm

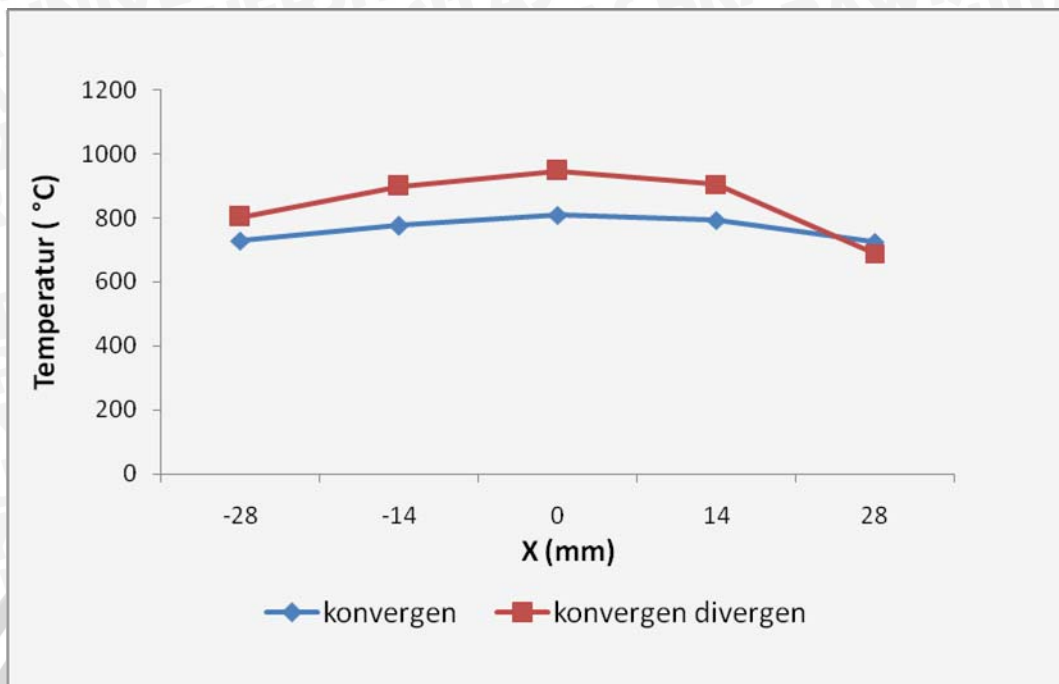


Lampiran 27. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel debit udara $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

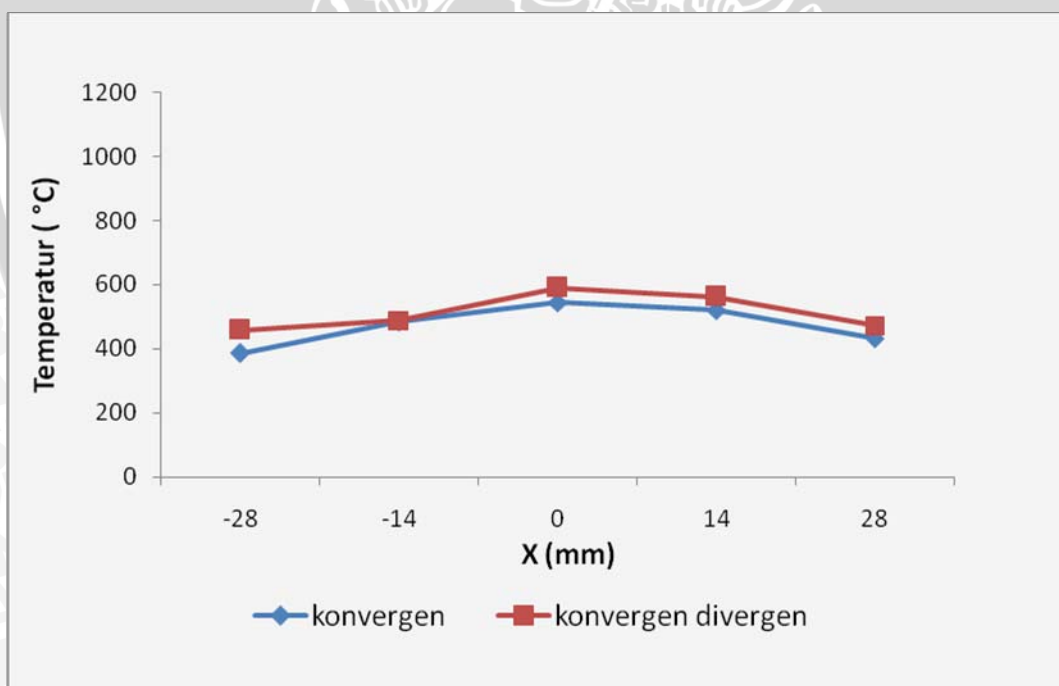
27.1. Letak sensor y = 80 mm



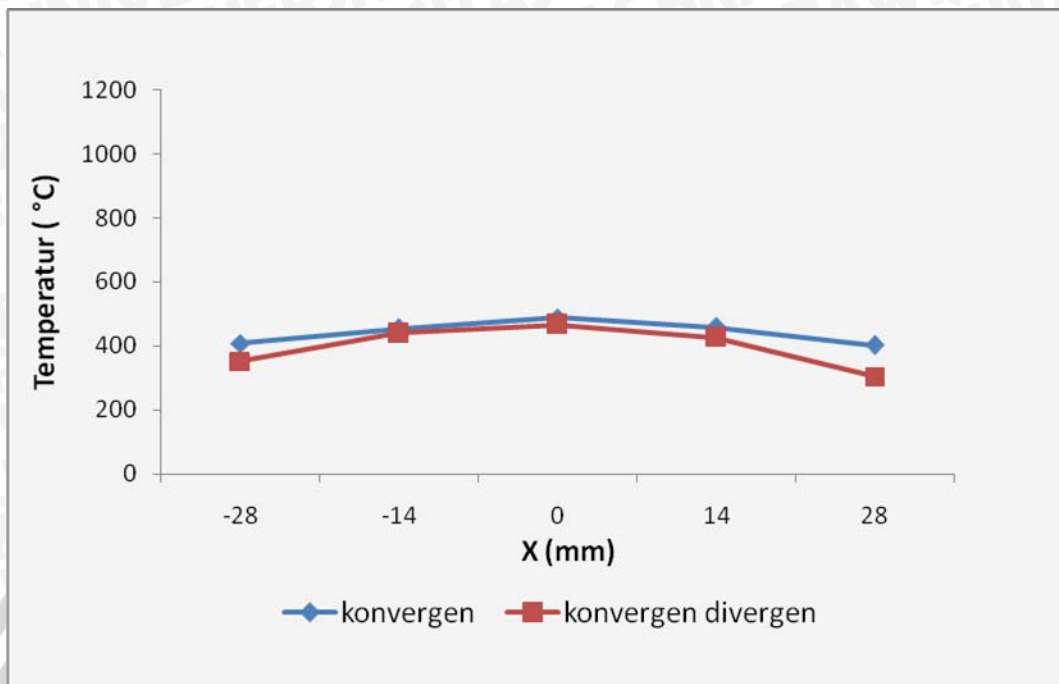
27.2. Letak sensor $y = 160$ mm



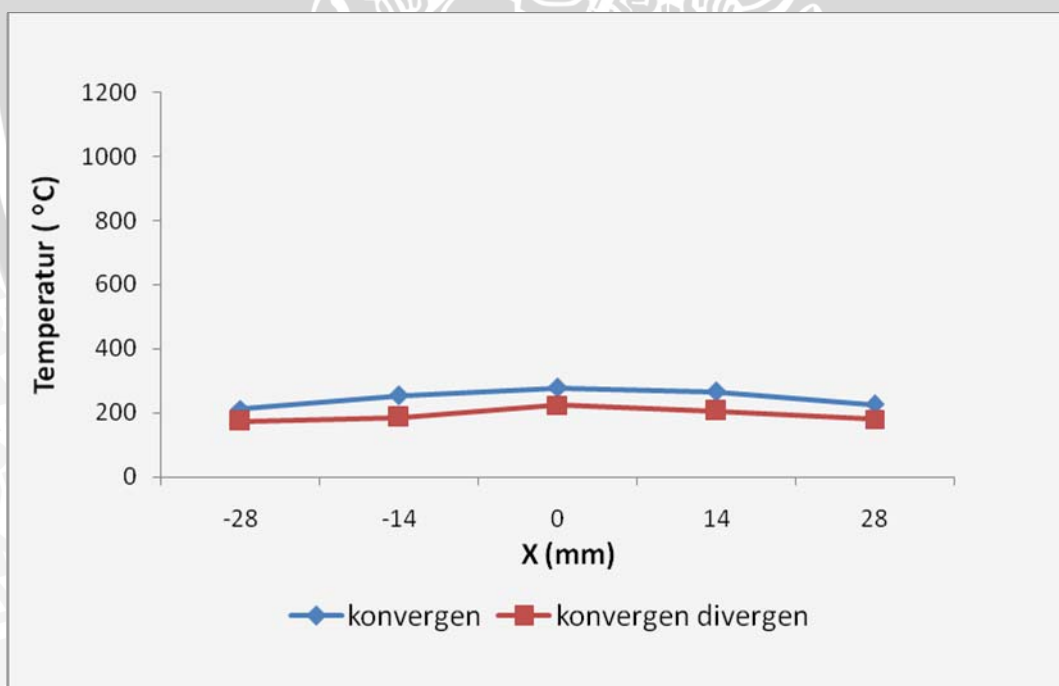
27.3. Letak sensor $y = 240$ mm



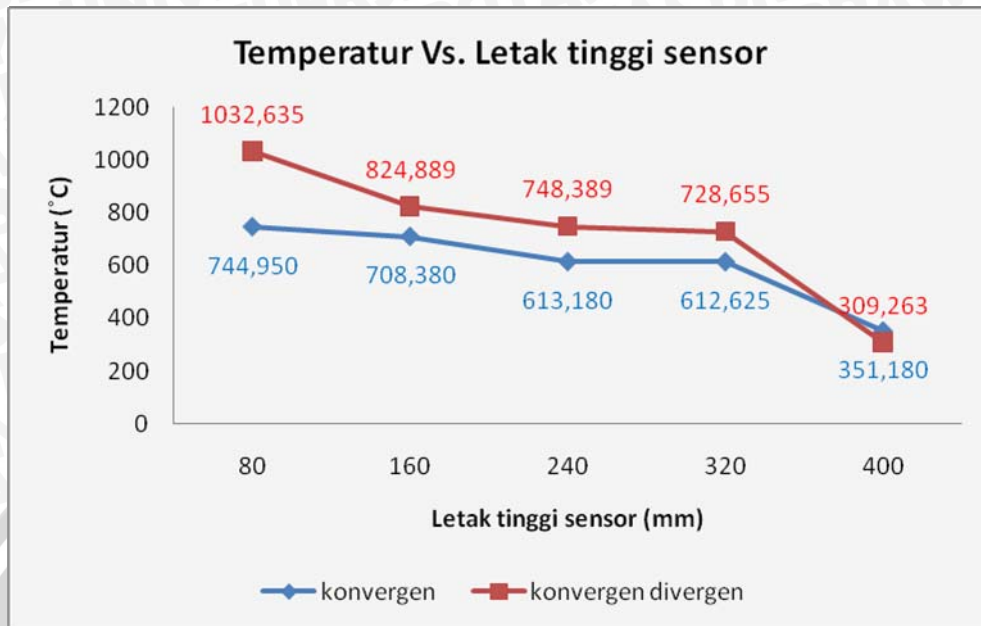
27.4. Letak sensor $y = 320$ mm



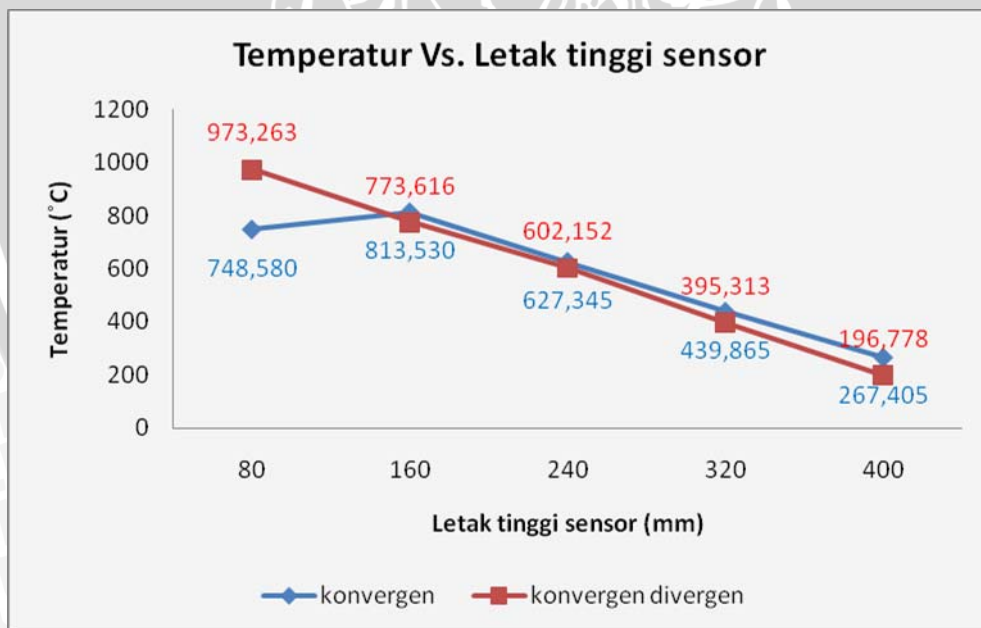
27.5. Letak sensor $y = 400$ mm



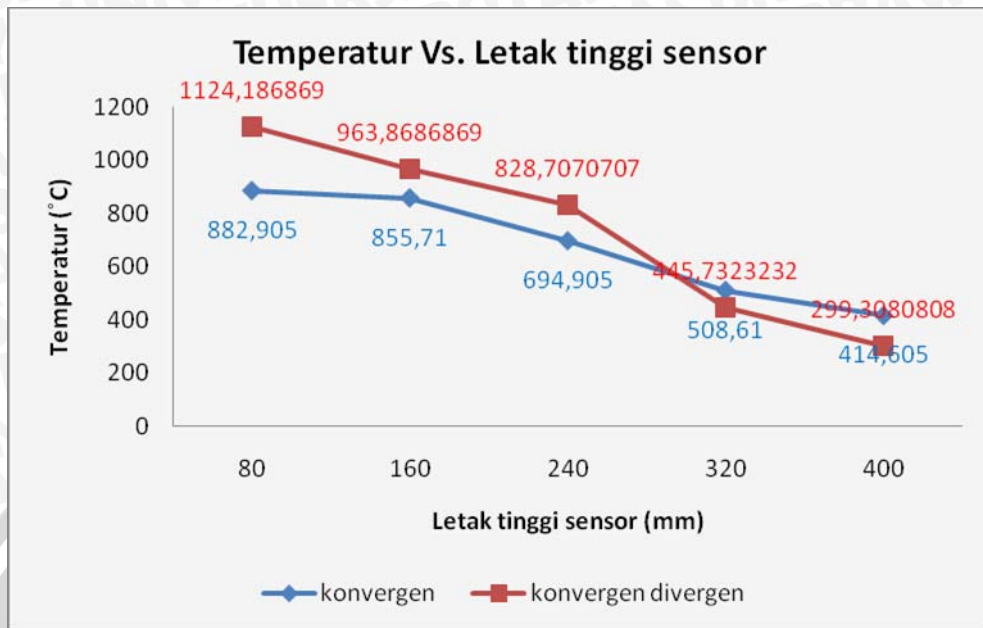
Lampiran 28. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel debit udara $7,715.10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,115.10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



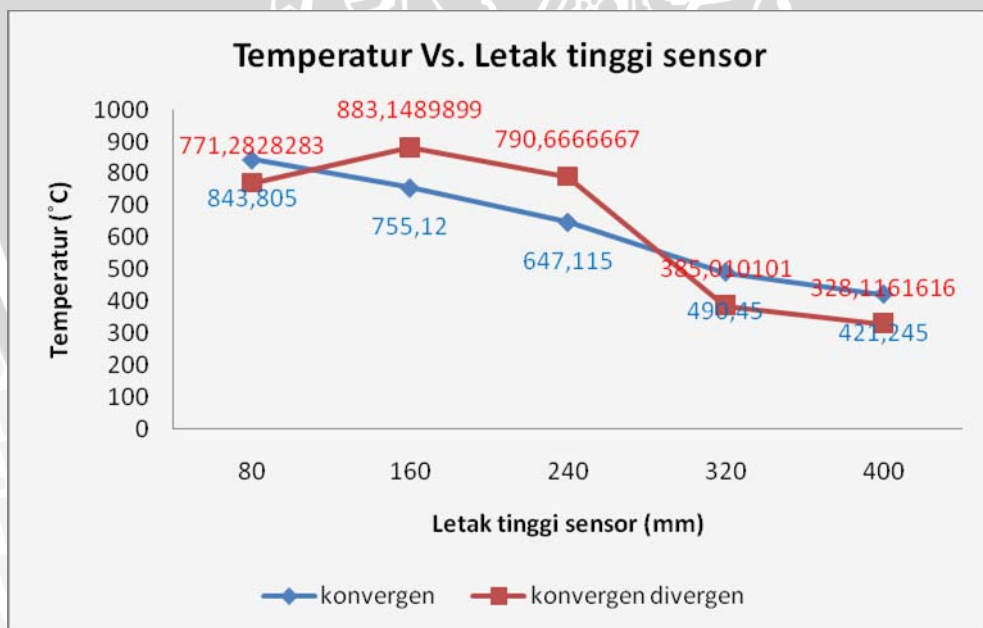
Lampiran 29. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel debit udara $7,715.10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,993.10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



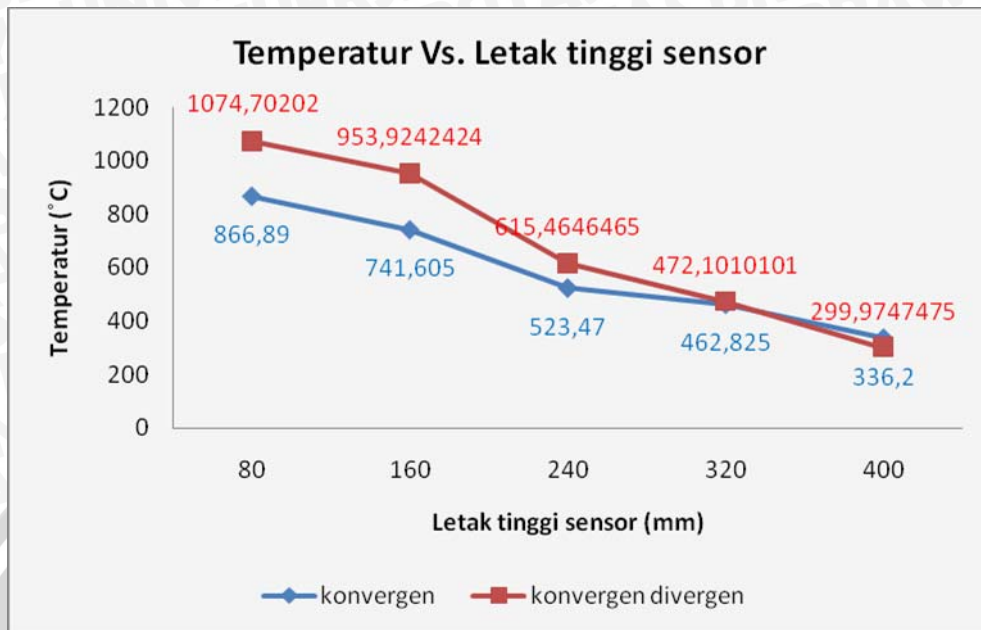
Lampiran 30. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel debit udara $1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Lampiran 31. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel debit udara $1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Lampiran 32. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel debit udara $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Lampiran 33. Grafik distribusi temperatur api difusi dengan variasi nosel debit udara $1,335 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debit bahan bakar $2,993 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

