

**PENGARUH VARIASI SUDUT ALUR SWIRL NOZZLE  
TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI**

**SKRIPSI  
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**Disusun Oleh :**

**BAGUS UJI WIDIHARTONO  
NIM. 0310620027-62**

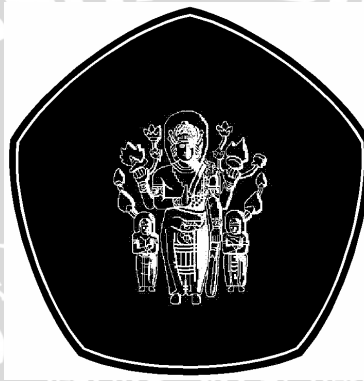
**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN MESIN  
MALANG  
2007**

**PENGARUH VARIASI SUDUT ALUR SWIRL NOZZLE  
TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI**

**SKRIPSI**

**KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**Disusun Oleh :**

**BAGUS UJI WIDIHARTONO  
NIM. 0310620027-62**

**Telah Diperiksa dan Disetujui oleh :**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Prof. Ir. H Sudjito, Ph.D.  
NIP. 130 809 065**

**Widya Wijayanti, ST., MT.  
NIP. 132 231 566**

# PENGARUH VARIASI SUDUT ALUR SWIRL NOZZLE TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI

Disusun oleh:

**Bagus Uji Widihartono**  
0310620027-62

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

Dosen Penguji

Skripsi 1

Skripsi 2

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

**Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met**  
NIP. 131 574 486

Komprehensif

**Ir. I Made Gunadiarta, MT.**  
NIP. 130 604 495

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Mesin

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

## KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulisan skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Dalam penulisan skripsi ini penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak, oleh sebab itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST, MT, selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc, CSE selaku Sekretaris Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Prof. Ir. Sudjito, Ph.D, dan Ibu Widya Wijayanti, ST, MT., selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan masukan pada penulis dalam menyusun skripsi ini.
4. Ir. Djoko Sutikno, M.Eng., selaku Dosen Wali yang telah memberikan banyak saran dan dorongan selama menjalani perkuliahan.
5. Ir. I Made Gunadiarta MT., selaku Kepala Laboratorium Mesin Pendingin.
6. Bapak, Ibu, dan Kakakku yang telah memberikan dorongan moral dan material sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
7. Ibu Lilis Yuliati, ST., MT., dan rekan-rekan peneliti atas saran dan kerja samanya selama penelitian.
8. Semua pihak yang secara langsung atau tidak langsung khususnya teman Mahasiswa Teknik Mesin angkatan 2003, anggota LPM SOLID, Asisten Laboratorium Mesin Pendingin dan Asisten CEL yang telah membantu dalam kelancaran terselesaikannya skripsi ini dengan baik.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan karena itu kritik dan saran penulis harapkan dalam kesempurnaan skripsi ini. Akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis pada khususnya dan bagi pembaca pada umumnya.

Malang, Juli 2007

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	iv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	vi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	vii
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1. Penelitian Sebelumnya.....	4
2.2. Pembakaran.....	5
2.3. Reaksi Kimia Pada Proses Pembakaran.....	5
2.4. Proses Pembakaran Gas.....	8
2.5. Pembakaran Difusi.....	10
2.6. Penyalaan dan Batas Ketidakhayalan ( <i>Limit of Inflammability</i> ).....	12
2.7. Aliran Turbulen.....	12
2.8. Kestabilan Api.....	14
2.9. <i>Swirl Nozzle</i> .....	16
2.10. Distribusi Temperatur Dengan Menggunakan <i>Swirl Nozzle</i> .....	17
2.11. LPG ( <i>Liquified Petroleum Gas</i> ).....	18
2.12. Distribusi Kecepatan Pada Aliran Berputar.....	20
2.13. Hipotesis.....	21

### BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian.....	22
3.2. Tempat Penelitian.....	22
3.3. Variabel Penelitian.....	22
3.4. Peralatan Penelitian.....	22
3.5. Instalasi Penelitian.....	25
3.6. Metode Pengambilan Data.....	25
3.7. Rencana Analisa Data.....	26
3.8. Diagram Alir Penelitian.....	28

### BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Penelitian.....	29
4.1.1. Data penelitian.....	29
4.1.2. Perhitungan data.....	29
4.1.3. Kalibrasi temperatur.....	31
4.1.4. Visualisasi api difusi.....	32
4.2 Pembahasan	
4.2.1. Distribusi temperatur api difusi.....	32
4.2.1.1 Distribusi temperatur berdasarkan variasi sudut alur <i>swirl</i> <i>nozzle</i> .....	33
4.2.1.2 Distribusi temperatur berdasarkan jarak aksial.....	36
4.2.2. Visualisasi api difusi.....	38
4.1.3. Fluktuasi temperatur api difusi.....	41

### BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan.....	43
5.2. Saran.....	43

### DAFTAR PUSTAKA

### LAMPIRAN

## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Hal.
Gambar 2.1.	: Reaksi yang terjadi pada api.....	7
Gambar 2.2.	: Difusi komponen A ke dalam komponen B.....	10
Gambar 2.3.	: Perubahan aliran dan struktur api.....	11
Gambar 2.4.	: Fluktuasi kecepatan rata-rata.....	13
Gambar 2.5.	: Efek <i>scale of turbulence</i> pada permukaan nyala.....	13
Gambar 2.6.	: Gambaran penampang permukaan nyala api turbulen..	14
Gambar 2.7.	: Skema diagram dari perambatan pembakaran stasioner satu dimensi.....	14 15
Gambar 2.8.	: Jenis profil api.....	15
Gambar 2.9.	: Bagian-bagian <i>swirl nozzle</i> .....	16
Gambar 2.10.	: Zona Resirkulasi akibat aliran <i>swirl</i> .....	17
Gambar 3.1.	: <i>Swirl nozzle</i> .....	23
Gambar 3.2.	: Skema instalasi penelitian.....	25
Gambar 3.3.	: Titik pengukuran distribusi temperatur api difusi.....	26
Gambar 3.4	: Diagram alir penelitian.....	28
Gambar 4.1.	: Hubungan antara tegangan (mV) dengan Temperatur (°C).....	31
Gambar 4.2.	: Grafik distribusi temperatur dengan variasi sudut alur <i>swirl nozzle</i> pada $V=2.495 \text{ m.s}^{-1}$ dan $U=0,217 \text{ m.s}^{-1}$ ...	33
Gambar 4.3.	: Grafik distribusi temperatur dengan variasi sudut alur <i>swirl nozzle</i> pada $V=3.695 \text{ m.s}^{-1}$ dan $U=0,217 \text{ m.s}^{-1}$ ...	33
Gambar 4.4.	: Grafik distribusi temperatur pada berbagai jarak aksial pada $V=2.495 \text{ m.s}^{-1}$ dan $U=0,217 \text{ m.s}^{-1}$ .....	36
Gambar 4.5.	: Grafik distribusi temperatur pada berbagai jarak aksial pada $V=3.695 \text{ m.s}^{-1}$ dan $U=0,217 \text{ m.s}^{-1}$ .....	36
Gambar 4.6.	: Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan sudut alur <i>swirl nozzle</i> ; $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 1,710 \text{ m.s}^{-1}$ .....	38
Gambar 4.7.	: Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan sudut alur <i>swirl nozzle</i> ; $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 2,495 \text{ m.s}^{-1}$ .....	39
Gambar 4.8.	: Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan sudut alur <i>swirl nozzle</i> ; $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 3,135 \text{ m.s}^{-1}$ .....	39

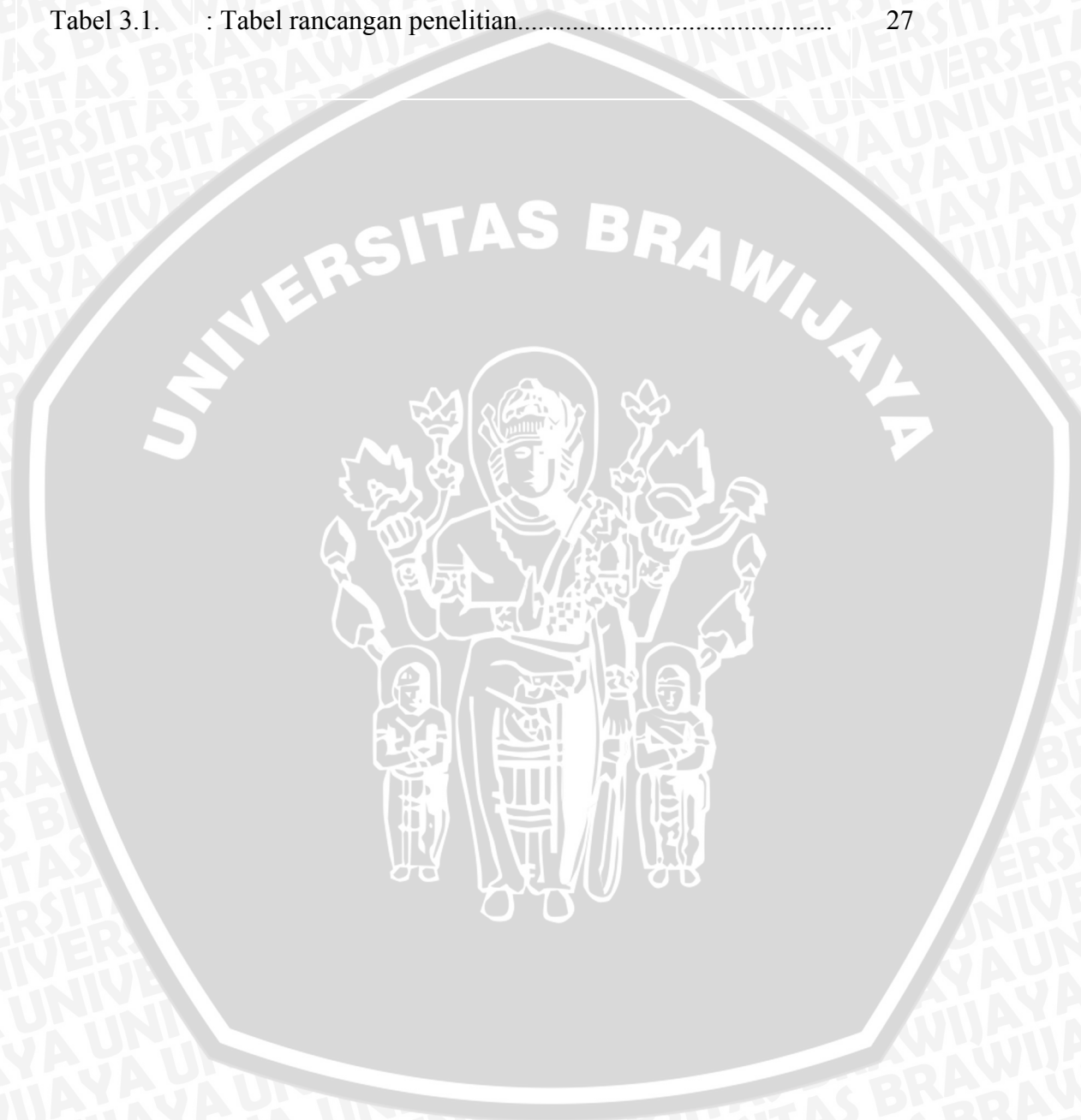
- Gambar 4.9. : Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan sudut alur *swirl nozzle*;  $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 3,695 \text{ m.s}^{-1}$ ..... 40
- Gambar 4.10. : Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan sudut alur *swirl nozzle*;  $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 4,204 \text{ m.s}^{-1}$ ..... 40





**DAFTAR TABEL**

No.	Judul	Hal.
Tabel 2.1.	: Komposisi udara kering .....	5
Tabel 2.2.	: Spesifikasi untuk <i>commercial propane</i> dan <i>n-butane</i> .....	19
Tabel 3.1.	: Tabel rancangan penelitian.....	27



## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1.	: Gambar bagian-bagian <i>swirl nozzle</i> .
Lampiran 2.	: Data distribusi temperatur api difusi pada <i>swirl nozzle</i> dengan sudut alur 30°.
Lampiran 3.	: Data distribusi temperatur api difusi pada <i>swirl nozzle</i> dengan sudut alur 60°.
Lampiran 4.	: Data distribusi temperatur api difusi pada <i>swirl nozzle</i> dengan sudut alur 90°.
Lampiran 5.	: Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur <i>swirl nozzle</i> 30°; $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 1.710 \text{ m.s}^{-1}$ .
Lampiran 6.	: Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur <i>swirl nozzle</i> 30°; $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 2.495 \text{ m.s}^{-1}$ .
Lampiran 7.	: Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur <i>swirl nozzle</i> 30°; $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 3.695 \text{ m.s}^{-1}$ .
Lampiran 8.	: Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur <i>swirl nozzle</i> 60°; $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 1.710 \text{ m.s}^{-1}$ .
Lampiran 9.	: Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur <i>swirl nozzle</i> 60°; $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 2.495 \text{ m.s}^{-1}$ .
Lampiran 10.	: Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur <i>swirl nozzle</i> 60°; $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 3.695 \text{ m.s}^{-1}$ .
Lampiran 11.	: Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur <i>swirl nozzle</i> 90°; $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 1.710 \text{ m.s}^{-1}$ .
Lampiran 12.	: Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur <i>swirl nozzle</i> 90°; $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 2.495 \text{ m.s}^{-1}$ .
Lampiran 13.	: Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur <i>swirl nozzle</i> 90°; $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 3.695 \text{ m.s}^{-1}$ .

## RINGKASAN

**Bagus Uji W., Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2007,**  
Pengaruh Variasi Sudut Alur *Swirl Nozzle* terhadap Distribusi Temperatur Api Difusi.  
Dosen Pembimbing : **Prof. Ir. Sudjito, Ph.D.** dan **Widya Wijayanti, ST, MT.**

Pembakaran difusi secara luas digunakan pada sistem pembakaran karena alasan keamanan dan kemudahan dalam pengontrolan. Oleh karena itu diperlukan suatu upaya untuk memperbaiki unjuk kerja dari proses pembakaran difusi. Salah satu caranya adalah dengan mengusahakan terjadi aliran *swirl* pada proses pembakaran difusi. Salah satu alat yang bisa mengakibatkan terjadinya aliran *swirl* tersebut adalah *swirl nozzle*. *Swirl nozzle* akan membentuk daerah resirkulasi pada aliran bahan bakar yang lebih luas, akibatnya campuran bahan bakar dan udara menjadi lebih homogen.

Dalam penelitian ini metode yang dipakai adalah metode eksperimental nyata (*true experimental research*) yaitu dengan melakukan pengamatan secara langsung untuk mengetahui pengaruh variasi sudut alur *swirl nozzle* terhadap distribusi temperatur api difusi. Pengambilan data temperatur dilakukan dengan menggunakan *thermocouples* yang kemudian dikuatkan oleh *Operational Amplifier*. Data yang diperoleh selanjutnya diubah dari data analog ke data digital dengan menggunakan *Analog to Digital Converter*, sehingga bisa terekam oleh komputer. Penelitian ini menggunakan variabel bebas berupa variasi sudut *swirl chamber* sebesar 30°, 60°, dan 90°, sedangkan variabel terikatnya adalah distribusi temperatur api difusi. Dalam penelitian ini pengambilan data untuk setiap variasi sudut alur *swirl nozzle* diamati pada kecepatan udara aksial 0,217 m.s<sup>-1</sup> dan kecepatan bahan bakar 1.710 m.s<sup>-1</sup>, 2.495 m.s<sup>-1</sup>, 3.135 m.s<sup>-1</sup>, 3.695 m.s<sup>-1</sup>, dan 4.204 m.s<sup>-1</sup>.

Dari pengujian diperoleh bahwa *swirl nozzle* dengan sudut alur 30° memiliki distribusi temperatur yang lebih merata pada arah horisontal dari *swirl nozzle* dengan sudut alur 60° dan 90°. Dengan pemasangan *swirl nozzle* bersudut alur 30°, fluktuasi temperatur yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan pemasangan *swirl nozzle* bersudut alur 60° dan 90°.

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Ilmu pengetahuan dan teknologi dalam bidang pembakaran saat ini memiliki kedudukan dan peran yang sangat penting dalam banyak aspek kehidupan. Rumah tangga, industri, dan transportasi, merupakan sektor terbesar dalam hal pemanfaatan pembakaran. Walaupun saat ini diversifikasi energi gencar dilakukan, tetapi tidak dapat disangkal bahwa penggunaan energi yang didapat dari proses pembakaran masih dominan. Hal ini tidak terlepas dari kelebihan yang bisa didapat bila menggunakan proses pembakaran. Proses pembakaran dapat menghasilkan densitas daya yang tinggi, sehingga daya yang besar dapat diperoleh dengan alat yang relatif kecil. Kelebihan lain adalah energi pembakaran dapat diperoleh dengan cepat dan mudah dalam pengontrolan.

Mengingat betapa pentingnya pembakaran dalam bidang rekayasa, maka telah dilakukan berbagai penelitian tentang teknologi pembakaran yang bertujuan untuk memperbaiki unjuk kerja dari proses pembakaran, baik itu dari segi efisiensi maupun hasil prosesnya. Hal ini dilakukan sebagai usaha untuk menemukan sesuatu yang baru ataupun penerapan penemuan-penemuan baru tersebut bagi kehidupan manusia. Mulai dari rekayasa proses, ruang bakar, maupun bahan bakar, dimana semuanya itu bertujuan sama yaitu menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna dengan karakteristik api yang maksimal, gas sisa yang minimal, dan yang lebih penting adalah penghematan bahan bakar minyak bumi serta pemakaian sumber energi alternatif.

Jenis pembakaran yang sering digunakan dalam industri adalah pembakaran difusi. Pembakaran difusi terjadi bila bahan bakar dan udara tidak bercampur lebih dulu secara mekanik melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi. Proses pembakaran difusi pada industri secara luas digunakan pada sistem pembakaran seperti turbin gas dan boiler, karena kemudahannya dalam mengontrol api hasil pembakaran dan alasan keamanan.

Dalam semua proses pembakaran, diusahakan terjadi pembakaran yang sempurna. Salah satu syarat agar pembakaran menjadi sempurna adalah terjadi campuran yang homogen antara bahan bakar dan udara. Kehomogenan campuran tersebut berpengaruh terhadap distribusi temperatur api difusi. Semakin homogen percampuran bahan bakar dan udara akan menyebabkan distribusi temperatur pada api

difusi semakin meningkat. Untuk meningkatkan distribusi temperatur, salah satu cara yang bisa digunakan adalah mengusahakan terjadi aliran *swirl* pada proses pembakaran difusi. Lilley (1997) menyatakan bahwa pengaruh angka *swirl* telah banyak diteliti dan hampir semuanya menyimpulkan bahwa aliran *swirl* akan menciptakan daerah resirkulasi sehingga akan menyebabkan pencampuran antara bahan bakar dan udara menjadi lebih homogen.

Salah satu alat yang bisa mengakibatkan terjadinya aliran *swirl* adalah *swirl nozzle*. Nosel tersebut merupakan salah satu jenis *spray nozzle* yang digunakan untuk memecah fluida yang disemurkan dengan membentuk pusaran atau *vorteks*, dan menjadikan fluida tersebut memiliki kecepatan ke arah tangensial. Pada sistem pembakaran, *swirl nozzle* digunakan untuk menginjeksikan bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar dalam bentuk yang menyebar.

Berdasarkan keterangan tersebut maka dilakukan suatu penelitian untuk memperoleh gambaran yang jelas mengenai pengaruh *swirl nozzle* terhadap distribusi temperatur pada nyala api difusi dalam proses pembakaran. Diharapkan dengan menggunakan *swirl nozzle*, bahan bakar yang keluar ke dalam ruang bakar memiliki kecepatan aksial yang lebih rendah dan kecepatan tangensial serta radial yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan *circular nozzle*. Selain itu diharapkan sudut *spray* bahan bakar menjadi lebih besar, sehingga dapat meningkatkan laju *mixing* bahan bakar dan udara, serta mengurangi kecepatan bahan bakar meninggalkan nosel, sehingga distribusi temperatur menjadi meningkat dan pembakaran akan menjadi lebih sempurna.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

Bagaimana pengaruh variasi sudut alur *swirl nozzle* terhadap distribusi temperatur api difusi?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bahan bakar yang digunakan adalah LPG produksi Pertamina.
2. Aliran fluida dalam instalasi bersifat *steady*.
3. Kondisi lingkungan dianggap konstan.
4. Tidak membahas reaksi kimia yang terjadi selama proses pembakaran.

5. Tidak membahas perhitungan konstruksi instalasi dari penelitian
6. Tidak membahas kerugian panas yang terjadi selama proses pembakaran.
7. Jenis nosel yang digunakan adalah *swirl nozzle* dengan sudut alur berjumlah 2.

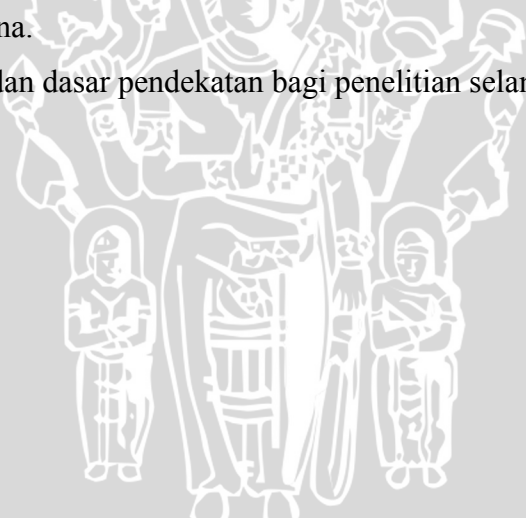
#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi sudut alur *swirl nozzle* terhadap distribusi temperatur api difusi.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang bisa didapatkan dari penelitian ini adalah :

1. Mampu menerapkan teori-teori yang telah didapat selama perkuliahan terutama mengenai teori pembakaran.
2. Sebagai bahan pertimbangan bagi dunia industri untuk menggunakan *swirl nozzle* untuk dapat meningkatkan efektifitas pembakaran.
3. Menghemat penggunaan sumber energi bahan bakar fosil dengan pembakaran yang lebih sempurna.
4. Sebagai referensi dan dasar pendekatan bagi penelitian selanjutnya.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian-penelitian Sebelumnya

Tangirala, et al (1987) dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa peningkatan daerah kestabilan api difusi diperoleh dengan memberikan *swirl* (komponen kecepatan tangensial) pada udara pembakaran.

Masri, A. R. (2004), telah melakukan penelitian *strongly swirling nonpremixed flame stabilized on new burner* dengan menggunakan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi  $15^\circ$  dan berjarak 150 mm dari *burner exit plane* yang menggunakan annulus berdiameter 60 mm. Bahan bakar yang digunakan adalah *Compressed Natural Gas* (CNG). Hasilnya menunjukkan bahwa aliran *swirl* yang dihasilkan akan menghasilkan gradien tekanan yang melawan arah aliran dan menyebabkan lapisan geser pada arah aksial dan tangensial, hal ini akan mengakibatkan adanya zone resirkulasi yang membawa kembali produk panas hasil pembakaran untuk kembali pada *burner exit plane* yang mengakibatkan nyala api menjadi stabil.

Phillips dan Birouk (2005) meneliti pengaruh bentuk nosel asimetri (dengan penampang berbentuk bujur sangkar, segi empat dan segitiga sama sisi) terhadap *blow off* api difusi pada pembakaran metana ( $\text{CH}_4$ ). Dari penelitian ini disimpulkan bahwa bentuk nosel tidak simetri mempunyai daerah kestabilan dan distribusi temperatur yang lebih tinggi bila dibandingkan nosel *circular*. Hal ini disebabkan oleh *spreading* (penyebaran) bahan bakar ke udara lebih besar sehingga mengakibatkan *mixing* (pencampuran) antara bahan bakar dan udara pembakaran yang lebih homogen.

Wiyono, E.S. (2005) melakukan penelitian dengan membuat konsep aliran yang di *swirl* adalah aliran dalam nosel. Dari konsep tersebut dianalisa pola aliran *swirl nozzle* dengan memvariasikan sudut alur *spray nozzle* yakni dengan sudut  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , dan  $90^\circ$ . fluida yang digunakan adalah air. Dari hasil penelitian didapatkan kesimpulan bahwa sudut *spray nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  lebih besar dibandingkan dengan sudut alur  $60^\circ$  dan  $90^\circ$ .

Hizbullah, Malik (2006) meneliti tentang pengaruh variasi sudut inklinasi *tangential air jet inlets* ( $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ ) terhadap kestabilan nyala dan distribusi temperatur pada api difusi *annulus jet*. Kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi *annulus jet* semakin meningkat seiring semakin besarnya sudut *tangential air jet*

*inlets*. Daerah kestabilan api dan distribusi temperatur paling merata diperoleh pada pemasangan *tangential air jet inlets* 60°.

## 2.2 Pembakaran

Pembakaran merupakan reaksi oksidasi yang terjadi antara bahan bakar dengan udara (oksigen) dengan bantuan energi dari luar (energi aktivasi) disertai timbulnya cahaya dan menghasilkan kalor (Turns, 1996: 6). Energi tersebut berfungsi sebagai pemutus ikatan-ikatan bahan bakar menjadi radikal (ion) dan sangat reaktif. Ion-ion akan bereaksi dengan oksigen membentuk ikatan yang lebih kuat dan kelebihan-kelebihan energi ikatan akan dilepas ke dalam sistem, sehingga menyebabkan kenaikan temperatur yang sangat tinggi.

Persamaan reaksi pembakaran secara umum dituliskan sebagai berikut (Wijayanti, 2003: 1):



Pemasangan *swirl nozzle* di saluran bahan bakar, akan menyebabkan terjadinya ketidakstabilan pada reaktan yang berpengaruh terhadap produk pembakaran. Produk pembakaran yang diamati dalam penelitian ini adalah distribusi temperatur api difusi.

## 2.3 Reaksi Kimia Pada Proses Pembakaran

Pembakaran ideal adalah pembakaran yang dapat menghasilkan produk pembakaran secara sempurna. Kondisi ini disebut dengan kondisi stoikiometri dimana produk pembakaran untuk senyawa hidrokarbon adalah CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, dan N<sub>2</sub> sebagai *inert* gas. Pembahasan akan dibatasi pada proses pembakaran antara bahan bakar hidrokarbon dan oksigen dari udara. Udara memiliki komposisi sebagai berikut:

Tabel 2.1 Komposisi udara kering

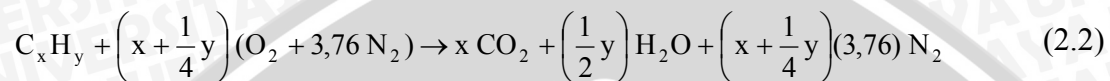
Unsur / senyawa	Persentase volume (%)	Persentase berat (%)	Berat molekul Lb per mole
Oksigen ( O <sub>2</sub> )	20.99	23.19	32.00
Nitrogen ( N <sub>2</sub> )	78.03	75.47	28.016
Argon ( Ar )	0.94	1.30	39.944
Karbon dioksida ( CO <sub>2</sub> )	0.03	0.04	44.003
Hidrogen ( H <sub>2</sub> )	0.01	0.00	2.016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

Sumber : Tjokroawidjojo, 1986 : 47

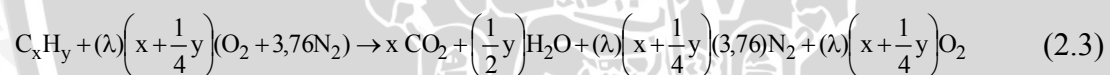


Untuk perhitungan dalam reaksi pembakaran, udara dianggap terdiri dari 21% volume  $O_2$  dan 79% volume  $N_2$ , sehingga untuk penggunaan 1 mol  $O_2$  akan melibatkan penggunaan  $\left(\frac{79,0}{21,0}\right) = 3,76$  mol  $N_2$ .

Untuk memenuhi pembakaran sempurna, semua C bereaksi menjadi  $CO_2$  dan semua  $H_2$  akan bereaksi menjadi  $H_2O$ . 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 minimum yang biasa disebut dengan “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  $\lambda$  x jumlah udara teoritis, persamaan reaksinya akan menjadi:



dengan:  $\lambda$  = 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 (Turns, 1996: 19):

$$(AFR)_{\text{teoritis}} = \left(\frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bahan bakar}}}\right)_{\text{teoritis}} = \left(\frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}}\right) \quad (2.4)$$

Pada pembakaran stoikiometri dengan bahan bakar LPG *Mix* 70% propana dan 30% butana nilai AFRnya adalah 15,567.

Perbandingan antara  $(AFR)_{\text{teoritis}}$  dengan  $AFR_{\text{aktual}}$  dinyatakan dengan *equivalence-ratio* ( $\Phi$ ), sebagai berikut (Turns, 1996: 19):

$$\Phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{teoritis}}}{\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{aktual}}} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.5)$$

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

Pada semua proses pembakaran, diusahakan terjadi pembakaran yang sempurna.

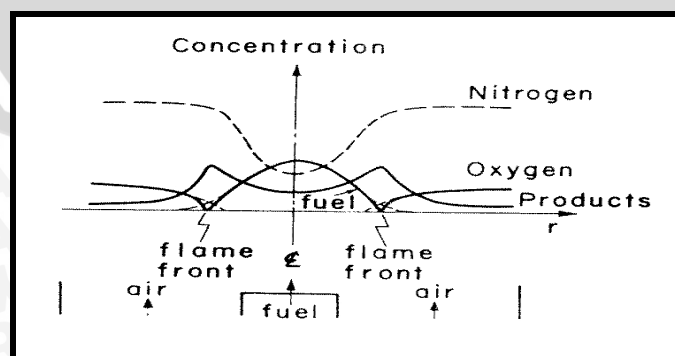
Untuk memperoleh hal ini, ada empat syarat yang harus dipenuhi, yaitu :

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

Apabila syarat-syarat diatas tidak terpenuhi, maka akan terjadi pembakaran yang tidak sempurna. Reaksi pembakaran yang tidak sempurna misalnya seperti dibawah ini:



Pada reaksi pembakaran di atas terlihat bahwa hasil pembakarannya tidak sempurna, dikarenakan pada reaksi pembakaran (2.6) menghasilkan CO dan pada reaksi pembakaran (2.7) masih tertinggal  $H_2$ . Pada proses pembakaran yang sempurna seluruh bahan bakar akan teroksidasi, seperti halnya reaksi pembakaran di bawah ini :



Gambar 2.1 : Reaksi yang terjadi pada api  
Sumber : Kuo Kenneth Kuan Yuan, 1986: 348

Pada gambar 2.1 menunjukkan bahwa bahan bakar dan oksigen sangat kecil mampu menembus dari batas nyala api dan hasil ini menunjukkan reaksi kimia diselesaikan pada daerah batas dan daerah permukaan api. Dimana diperkirakan sebagai permukaan adalah bahan bakar dan oksigen masuk dalam proporsi stoikiometri.

Untuk pembakaran pada beberapa jenis bahan bakar, oksidator yang umum dipakai adalah udara dengan 21 % O<sub>2</sub> dan 79 % N<sub>2</sub>. Persamaan reaksi kimia untuk pembakaran stoikiometri dari karbon dan udara dituliskan sebagai berikut :



Salah satu keuntungan dari proses pembakaran adalah dapat memperoleh energi yang cepat dengan adanya reaksi kimia pembakaran yang berlangsung sangat cepat. Oleh karena itu peningkatan kecepatan reaksi pembakaran merupakan faktor penting di dalam pembakaran. Hal-hal yang dilakukan untuk meningkatkan kecepatan reaksi pembakaran :

- a. Membuat aliran turbulen untuk pengadukan bahan bakar dan udara
- b. Memperluas daerah kontak reaksi antara bahan bakar dan udara
- c. Meningkatkan temperatur pembakaran

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

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

Radikal bebas diperlukan untuk menjaga agar proses pembakaran terus berjalan. Proses pembakaran pada dasarnya merupakan reaksi kimia dan penyebab terjadinya reaksi kimia adalah keinginan suatu atom untuk mencapai posisi stabil. Oleh karena itu, reaksi kimia diawali dari ketidakstabilan. Radikal bebas ini bekerja terus menerus, sehingga seluruh bahan bakar habis terbakar. Semakin banyak radikal bebas, maka reaksi kimia antara bahan bakar dan udara juga akan semakin cepat, sehingga pembakaran akan semakin mendekati sempurna.

#### 2.4 Proses Pembakaran Gas

Proses pembakaran gas terjadi lebih cepat daripada fase cair atau padat karena fase gas memiliki jarak antar atom yang lebih besar daripada kedua fase lainnya

sehingga percampuran antara bahan bakar dan udara dapat terjadi dengan lebih baik. Pembakaran terjadi pada fase uap (kecuali untuk unsur karbon). Fase uap pada dasarnya sama dengan fase gas, ditinjau dari jarak antar partikelnya. Fase cair dan fase padat harus lebih dahulu menjadi gas sebelum benar-benar terbakar, sedangkan bahan bakar pada fase gas tidak perlu lagi bertransformasi menjadi fase lainnya. Hal ini menjadi dasar bagi batasan masalah penelitian ini. Proses pembakaran pada bahan bakar gas dapat terjadi melalui salah satu atau kombinasi dari ketiga proses di bawah ini (Tjokroawidjojo, 1996: 39)

a. *Homogeneous combustion*

Pembakaran ini terjadi pada suhu rendah, sekitar 400 °C, dan seringkali pada pembakaran ini tidak menunjukkan adanya *flame front*. Kecepatan reaksinya terutama tergantung pada susunan campuran, tekanan, temperatur awal dari campuran dan tergantung pada faktor perpindahan panas dari atau ke sekelilingnya.

b. *Isopiestic flame propagation*

Merupakan salah satu bentuk pembakaran dimana nyala yang timbul pada reaksi pembakaran memberikan temperatur yang tinggi hingga pembakaran dapat berjalan dengan sendirinya. Pada pembakaran ini tidak terjadi kenaikan tekanan karena adanya kenaikan volume gas, sehingga dapat dikatakan bahwa gas melakukan ekspansi bebas.

c. *Pressure temperature flame propagation*

Pembakaran ini menimbulkan nyala yang membangkitkan suhu yang tinggi sehingga pembakaran dapat terjadi dengan sendirinya. Pada pembakaran ini tidak terjadi kenaikan volume karena adanya kenaikan tekanan gas.

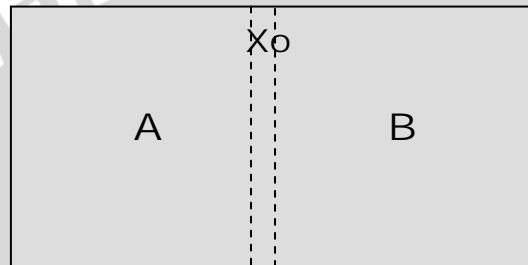
Pembakaran yang dapat diamati dengan adanya nyala merupakan pembakaran *isopiestic flame propagation* dan *pressure temperature flame propagation*. Pada kenyataannya, kedua jenis pembakaran yang menimbulkan nyala tersebut adalah pembakaran yang digunakan di dunia industri, sebab kedua jenis pembakaran itulah yang dapat memberikan atau membangkitkan suhu tinggi yang merupakan tujuan dari proses pembakaran di industri. Pembakaran homogen hanyalah pembakaran yang terkondisikan dan dapat dibuat di laboratorium, namun tidak untuk kepentingan komersil.

Proses pembakaran dengan menggunakan bahan bakar gas sering menggunakan peralatan yang disebut *gas burner*. Pada sistem pembakaran ini sering menggunakan peralatan tambahan yang disebut dengan *oxygen addition equipment*. Tujuan

digunakannya peralatan ini adalah untuk memperbaiki kinerja proses pembakaran. Dengan meningkatnya kinerja dari proses pembakaran maka konsumsi bahan bakar akan menurun, sehingga jika ditinjau dari segi ekonomis berarti kita mampu menekan biaya pembelian bahan bakar.

## 2.5 Pembakaran Difusi

Pembakaran difusi adalah pembakaran antara bahan bakar dan udara yang tidak bercampur lebih dulu secara mekanik, melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi. Pembakaran difusi tersebut dapat dilihat pada berbagai proses pembakaran seperti nyala lilin, api korek api, api dalam bencana kebakaran, pembakaran di industri, pembakaran di turbin gas dan lain sebagainya.



Gambar 2.2 : Difusi komponen A ke dalam komponen B  
Sumber : Holman, 1991: 533

Pada gambar 2.2 dimisalkan terdapat ruangan tertutup yang disekat oleh bidang yang khayal  $X_0$ . Bagian di sebelah kiri  $X_0$  berisi partikel gas A, sedangkan bagian di sebelah kanan  $X_0$  berisi partikel gas B pada tekanan yang sama, sehingga tidak ada potensial aliran. Sesaat setelah bidang  $X_0$  dibuka, partikel gas A bergerak secara ke dua arah, demikian pula partikel gas B, sehingga dalam ruangan tercapai keseimbangan konsentrasi pada gas A dan gas B. Laju difusi diberikan oleh hukum *Fick* tentang difusi, yang menyatakan bahwa fluks massa dari satu konstituen per satuan luas berbanding lurus dengan gradien suhu. Hal tersebut dapat dituliskan dalam persamaan matematis sebagai berikut (Holman, 1991: 533):

$$\frac{\dot{m}_A}{A} = -D \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad (2.11)$$

dengan :  $\dot{m}_A$  = fluks massa per satuan waktu ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )

$D$  = koefisien difusi (diffusion coefficient) ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )

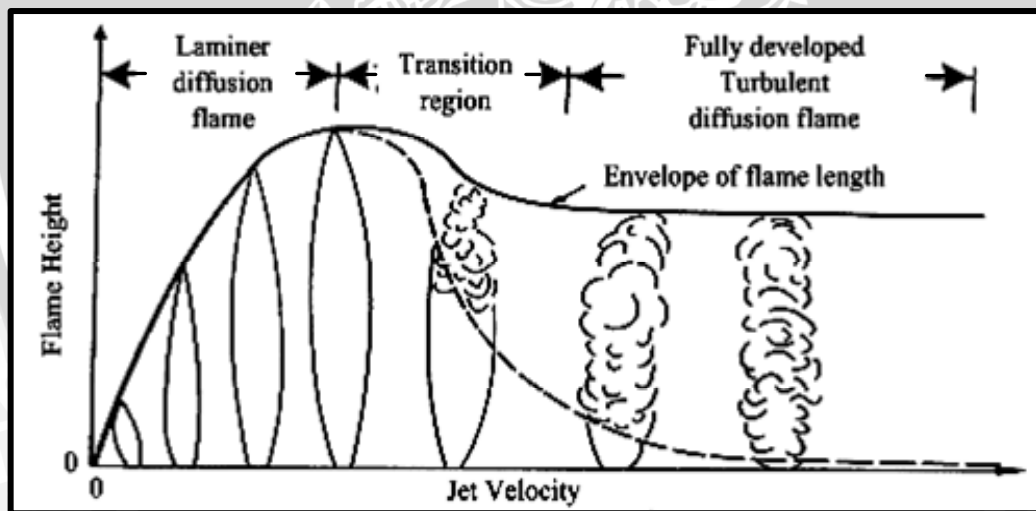
$C_A$  = konsentrasi komponen A persatuan volume ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

Sama seperti pada persamaan aliran panas, tanda minus menyatakan bahwa

partikel mengalir dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah.

Salah satu jenis api akibat dari pembakaran difusi adalah api difusi *jet*. Api difusi *jet* adalah api difusi yang terjadi karena aliran *jet* bahan bakar dari nosel ke dalam aliran udara pada *burner*. Nyala api difusi *jet* terdiri dari api difusi *jet* laminar dan api difusi *jet* turbulen.

Gambar 2.3 menjelaskan tentang perubahan aliran api difusi *jet* laminar ke api difusi *jet* turbulen. Perubahan aliran api tersebut disebabkan oleh pemanjangan api dan peningkatan kecepatan aliran (*jet*) bahan bakar. Peningkatan kecepatan bahan bakar mengakibatkan karakter api berubah. Pada kecepatan *jet* bahan bakar yang rendah, struktur api adalah laminar. Panjang api laminar tersebut akan meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan *jet* bahan bakarnya sampai pada suatu batas aliran api menjadi turbulen. Pada kondisi transisi terjadi perubahan dari aliran laminar menjadi turbulen. Panjang api laminar akan mengalami penurunan seiring dengan peningkatan kecepatan *jet* bahan bakar dan panjang api turbulen akan mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan kecepatan *jet* bahan bakarnya, kemudian panjang api total akan menurun karena kecepatan pengadukan api yang turbulen.



Gambar 2.3 : Perubahan aliran dan struktur api  
Sumber : Kuo, 1986: 359

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

## 2.6 Penyalaan dan Batas Ketidaknyaalaan (*Limit of Inflammability*)

Penyalaan adalah suatu proses transisi dari keadaan tidak reaktif ke keadaan reaktif dan untuk menimbulkan transisi ini diperlukan rangsangan dari luar untuk menimbulkan proses termokimia yang berjalan dengan sendirinya, yang kemudian diikuti oleh transisi yang terjadi dengan sangat cepat untuk menghasilkan proses pembakaran yang mandiri (Kuo, 1986: 734). Pembakaran mandiri adalah proses pembakaran yang dapat berlangsung terus-menerus selama bahan bakar dan udara pembakaran masih tersedia, tanpa memerlukan sebab-sebab eksternal apapun dan yang menjaga proses itu berlangsung adalah proses itu sendiri.

Penyalaan, sebagaimana proses lainnya memerlukan tingkat energi tertentu agar dapat berlangsung. Jika tingkat energi yang diperlukan tidak mencukupi, maka penyalaan tidak akan terjadi, sekalipun telah ada cukup bahan bakar dan udara pembakaran. Sebagai suatu proses transisi, penyalaan memiliki kondisi awal tanpa energi, yang berarti bahwa tingkat energi yang ada di lingkungan penyalaan masih belum cukup untuk menimbulkan penyalaan. Karena itu diperlukan tambahan energi dari luar, tambahan energi tersebut disebut energi aktivasi.

Penyalaan seperti pembakaran juga memerlukan syarat yang dikenal sebagai *3T rule of thumb ignition* (Kuo, 1986: 735):

1. Suhu (*temperature*)

Suhu harus cukup tinggi agar timbul reaksi kimia yang signifikan, berkaitan dengan energi aktivasi seperti dijelaskan pada awal bagian.

2. Waktu (*time*)

Waktu harus cukup lama agar panas masuk (yang berasal dari sebab eksternal) dapat diserap (melalui proses absorpsi) oleh reaktan sehingga proses termokimia dapat terjadi .

3. Turbulensi (*turbulence*)

Turbulensi harus cukup besar agar terjadi pembakaran yang baik antara bahan bakar dan udara pembakaran, agar panas dapat dipindahkan dari konstituen yang bereaksi ke konstituen yang belum bereaksi.

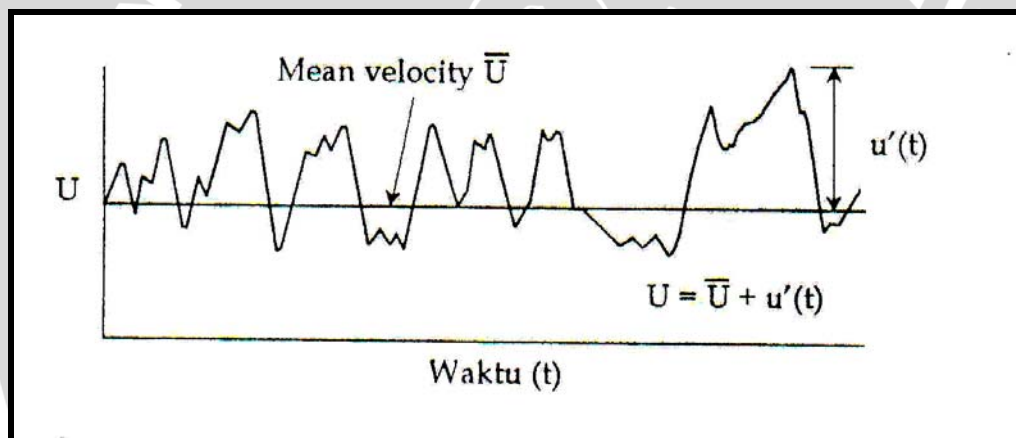
## 2.7 Aliran Turbulen

Turbulensi adalah suatu keadaan dimana partikel-partikel (massa-massa molar yang kecil) fluida bergerak dalam lintasan-lintasan yang sangat tidak teratur, yang mengakibatkan pertukaran momentum dari suatu bagian fluida ke bagian yang lainnya

dengan cara yang agak menyerupai perpindahan molekuler. Teori tentang aliran ini sangat sulit namun analisa secara data eksperimen dapat digunakan sebagai acuan tentang turbulensi.

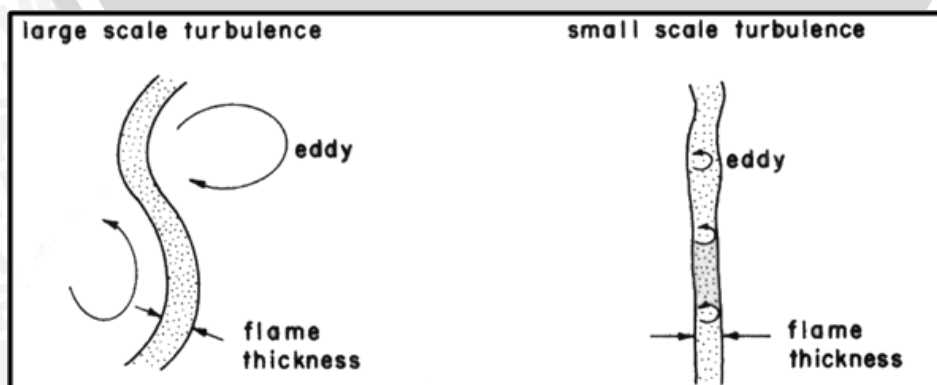
Kecepatan makroskopik fluida pada sistem turbulen seperti yang diukur pada anemometer kawat panas dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.4. Dari tersebut dapat dijelaskan bahwa pada aliran turbulen kecepatan partikel-partikel fluida sangat fluktuatif. Kecepatan yang fluktuatif tersebut disebabkan karena partikel-partikel fluida bergerak pada lintasan-lintasan yang sangat tidak teratur, akibatnya terjadi tumbukan dari masing-masing partikel fluida. Peningkatan turbulensi pada suatu aliran disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu:

1. Kecepatan aliran yang tinggi.
2. Gesekan partikel-partikel fluida
3. Adanya hambatan aliran.



Gambar 2.4 : Fluktuasi kecepatan rata-rata  
Sumber : Rathakrisnan, 1993: 56

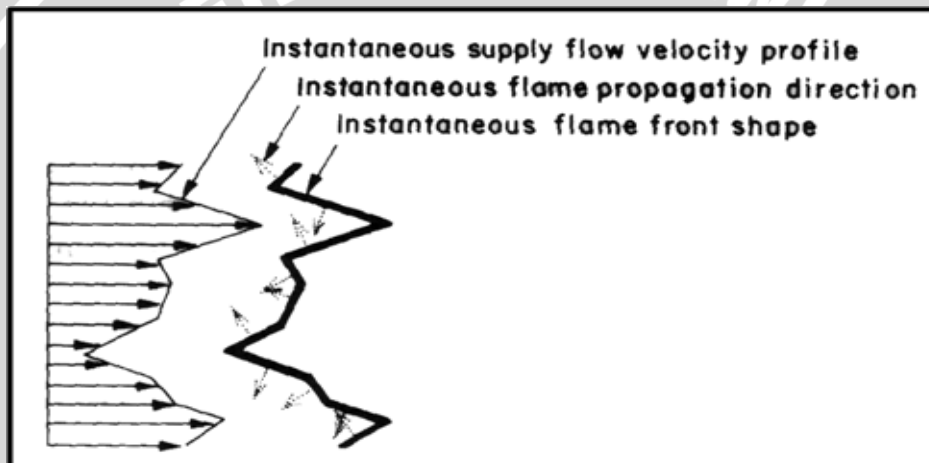
Kecepatan tangensial akan membagi aliran fluida menjadi skala (*scale*) yang lebih kecil, sehingga akan berpengaruh terhadap struktur permukaan nyala seperti ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut:



Gambar 2.5 : Efek *scale of turbulence* pada permukaan nyala  
Sumber : Kuo, 1986: 418



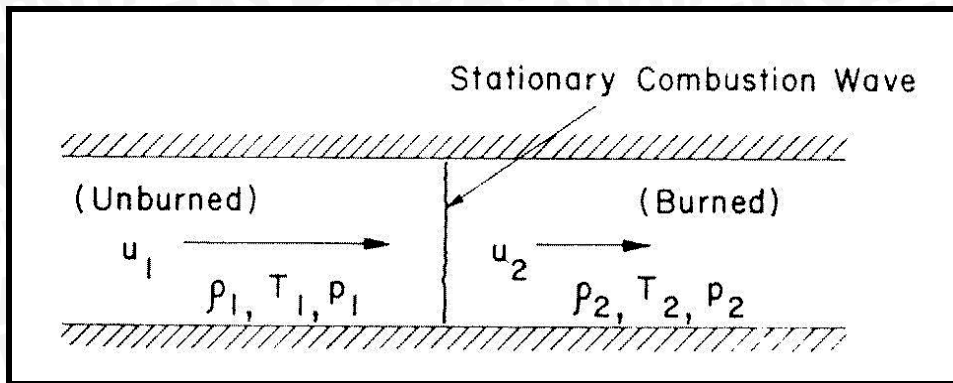
Pada  $2300 \leq Re \leq 6000$ , terjadi olakan-olakan kecil (*small eddies*), sehingga turbulensi terjadi pada skala yang baik (Kuo, 1986: 406). Pada *small eddies* ukuran pusaran (*eddy size*) lebih kecil dari ketebalan permukaan nyala (*flame front thickness*). Efek yang ditimbulkan adalah meningkatkan proses *transport* dalam gelombang pembakaran. Ketika  $Re \geq 6000$ , terjadi *large eddies* yang menyebabkan ketebalan permukaan nyala lebih besar dari pada saat kondisi laminar. *Large eddies* tidak meningkatkan difusivitas seperti yang terjadi pada *small eddies*, tetapi sebaliknya akan merubah permukaan nyala laminar yang *smooth* menjadi bentuk lipatan-lipatan pada permukaan nyala (Gambar 2.6). Hal ini akan meningkatkan daerah permukaan nyala untuk setiap unit penampang melintang pada *tube*, akibatnya terjadi peningkatan kecepatan pembakaran tanpa terjadi perubahan pada struktur api lokal.



Gambar 2.6 : Gambaran penampang permukaan nyala api turbulen  
Sumber : Kuo, 1986: 407

## 2.8 Kestabilan Api

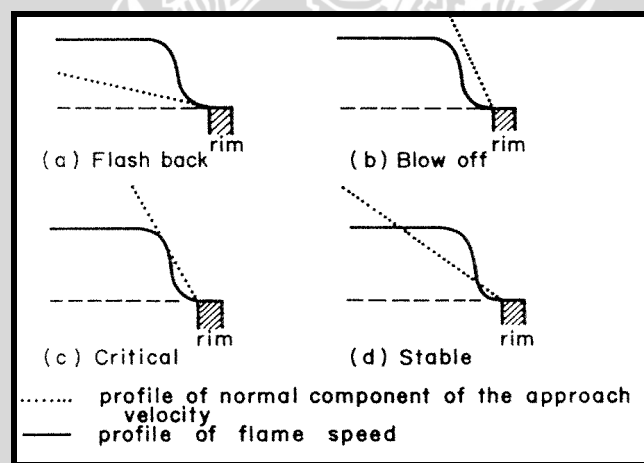
Nyala api (*flame*) adalah daerah tempat terjadinya reaksi pembakaran. Nyala api dibatasi oleh permukaan nyala (*flame front*) yaitu permukaan yang membatasi gas yang terbakar dan tidak terbakar. Pada proses pembakaran, kestabilan api memegang peranan yang sangat penting. Api dikatakan stabil apabila terjadi api stasioner pada kedudukan tertentu, dimana kecepatan gas reaktan sama dengan kecepatan produk, dalam hal ini rambatan api. Hal ini tentu saja akan mempengaruhi aliran udara yang terbentuk disekitar api tersebut seperti terlihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 : Skema diagram dari perambatan pembakaran stasioner satu dimensi

Sumber : Kuo, 1986 : 233

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



Gambar 2.8 : Jenis profil api

Sumber : Kuo, 1986 : 324

Kondisi pembakaran yang stabil akan terjadi jika garis kecepatan gas reaktan menyinggung garis kecepatan pembakaran di dua titik seperti ditunjukkan gambar 2.8 (d). Jika garis kecepatan reaktan tidak memotong garis kecepatan pembakaran, maka akan terjadi *blow off* yang ditunjukkan pada gambar 2.8 (b). Pada kondisi lain jika garis kecepatan gas reaktan memotong garis kecepatan pembakaran di dua titik, yaitu kondisi dimana kecepatan gas reaktan lebih rendah daripada kecepatan pembakaran, maka akan

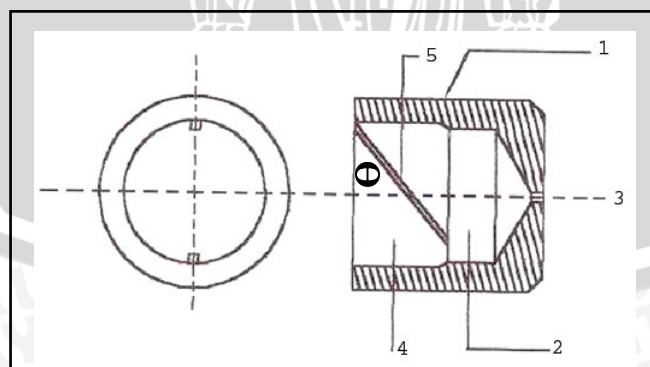
terjadi peristiwa *flash back* ditunjukkan pada gambar 2.8 (a). Peristiwa ini merupakan rambatan dengan kecepatan yang tinggi menuju mulut nosel.

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

## 2.9 Swirl Nozzle

Dalam pembakaran, nosel digunakan untuk mengalirkan bahan bakar ke ruang bakar. Pola aliran bahan bakar dalam ruang bakar ditentukan oleh model nosel. Pola aliran bahan bakar dalam ruang bakar menentukan proses pencampuran (*mixing*) antara bahan bakar dengan udara. Hal ini akan menentukan kesempurnaan dan kestabilan dalam proses pembakaran difusi. Karena itu perlu diperhatikan pemilihan nosel bahan bakar dalam pembakaran difusi.

Fungsi utama nosel adalah merubah energi tekanan fluida masuk nosel menjadi energi kinetik atau kecepatan fluida keluar nosel. Dalam pembakaran gas biasanya digunakan model nosel konvergen (*circular nozzle*). Aliran bahan bakar dari nosel terdistribusi dalam daerah berbentuk silinder sepanjang sumbu ruang bakar. *Swirl nozzle* mulai banyak digunakan dalam pembakaran bahan bakar cair, menggantikan pemakaian *circular nozzle*. Hal ini dikarenakan *swirl nozzle* bisa menghasilkan *spray* bahan bakar dengan *droplet* yang halus pada tekanan yang lebih rendah bila dibandingkan dengan *circular nozzle*. *Swirl nozzle* memiliki bagian-bagian utama yaitu alur/slot pada inti, *swirl chamber*, dan *orifice*, ditunjukkan pada gambar 2.9.



Keterangan:

1. casing, 2. swirl chamber, 3. orifice, 4. inti, 5. alur/slot dengan  $\theta$  adalah besar sudut alur

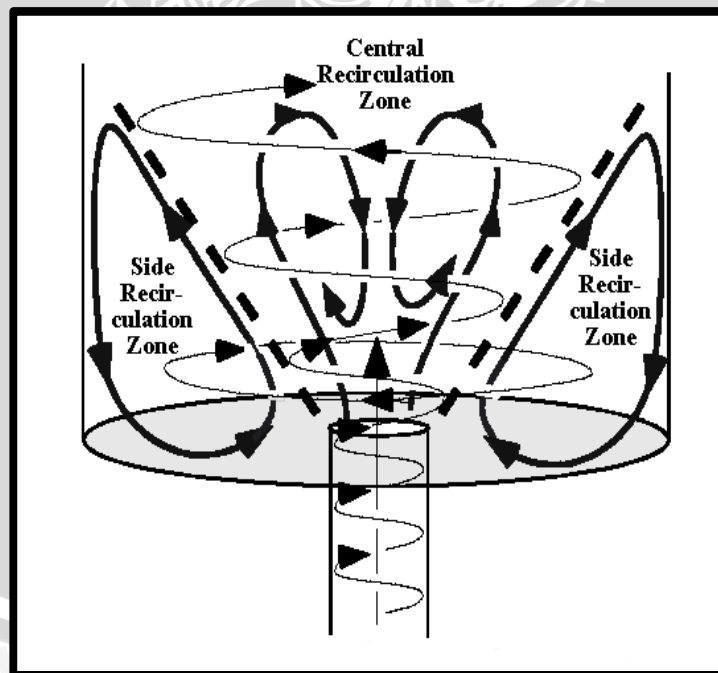
Gambar 2.9 : Bagian-bagian *swirl nozzle*

Sumber : Anonimous, 2001

## 2.10 Distribusi Temperatur Dengan Menggunakan *Swirl Nozzle*

Prinsip kestabilan dengan fluida berputar di saluran keluar *burner* dengan menggunakan *swirl nozzle* mirip dengan prinsip kestabilan dengan penghalang seperti pemakaian *swirling vanes* maupun *bluff body*. Ide dasarnya adalah menciptakan daerah *downstream* bertekanan rendah sepanjang sumbu *burner*. Daerah bertekanan rendah terbentuk dengan memaksakan pembakaran udara dan bahan bakar yang memungkinkan untuk berputar dengan arah tangensial di sekitar sumbu dalam kombinasinya dengan aliran aksial.

Pemasangan *swirl nozzle* pada saluran bahan bakar akan menyebabkan terjadinya aliran *swirl*. Aliran tersebut akan menyebabkan terjadinya zona resirkulasi yang ditimbulkan oleh aliran *swirl*, akibatnya ada perbedaan kecepatan dan arah gerakan bahan bakar yang menyebabkan adanya batas gesekan (*shear layer*) antara aliran resirkulasi dengan daerah utama, dimana pada permukaan gesekan tersebut terjadi perpindahan panas dari gas panas (campuran bahan bakar dan udara yang sedang terbakar) ke gas dingin (bahan bakar), sehingga bahan bakar akan mengalami pemanasan awal.



Gambar 2.10 : Zona Resirkulasi akibat aliran *swirl*

Sumber : Hedman, 2002: 3

Dengan adanya pemanasan awal berarti terjadi penambahan energi pada molekul-molekul bahan bakar, sehingga energi kinetik molekul-molekul akan meningkat. Akibatnya molekul-molekul yang bereaksi menjadi lebih aktif mengadakan tumbukan, sehingga pembakaran akan semakin baik seperti dinyatakan oleh Kuo (1986)

bahwa semakin tinggi temperatur awal maka kecepatan pembakaran juga akan meningkat.

Dengan variasi sudut alur *swirl nozzle* maka diharapkan akan didapatkan aliran bahan bakar yang berekspansi ke arah tangensial sehingga dapat meningkatkan intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi yang semakin besar dapat mengakibatkan kecepatan aksial yang menurun pada zona resirkulasi yang memungkinkan kecepatan reaksi dan kecepatan aliran dapat seimbang atau bahkan kecepatan reaksinya justru menjadi lebih besar. Akan tetapi hal ini bisa terjadi sebaliknya karena terlalu besar kecepatan tangensial yang ditimbulkan maka akan terjadi penurunan kecepatan aksial yang cukup besar, sehingga membawa aliran udara tangensial menuju ke arah keluar dan memungkinkan penurunan kecepatan reaksi pembakaran serta menurunkan proses difusi yang terjadi antara bahan bakar dan udara. Ketika pencampuran antara bahan bakar dan udara semakin baik atau homogen, maka distribusi temperatur akan semakin merata atau meningkat.

### 2.11 LPG (*Liquified Petroleum Gas*)

LPG merupakan salah satu jenis bahan bakar yang umum digunakan oleh masyarakat. LPG dihasilkan melalui proses pengolahan gas alam dan gas minyak bumi di instalasi pencairan dan pemisahan (*Gas Liquid Extraction Plant*). Proses produksi LPG diawali oleh pembersihan gas alam dari berbagai kotoran. Selanjutnya gas yang sudah bersih dikeringkan, lalu didinginkan sehingga menjadi cair. Gas yang sudah cair ini dipisahkan dengan proses *physico-chemical* di instalasi pemisahan berturut-turut mengeluarkan senyawa metana ( $\text{CH}_4$ ), ethana ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propana ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), butana ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) dan seterusnya. LPG merupakan suatu senyawa hidrokarbon dengan karbon yang rendah dan termasuk senyawa hidrokarbon jenuh (*alkane*). LPG bisa dibuat dari senyawa propana (*propane*), butane (*butane*) atau campuran keduanya dengan perbandingan tertentu. Berdasarkan penggunaannya, LPG dibedakan menjadi ([www.pertamina.com](http://www.pertamina.com), September 2006):

#### 1. LPG *Mix*

Merupakan campuran propana dan butana dengan komposisi 70% volume propana dan 30% volume butana dan ditambahkan zat odor yaitu *mercaptant*, yang berbau menyengat. Biasanya digunakan sebagai bahan bakar di rumah tangga.

## 2. LPG *Propane*

Terdiri dari 95% propana dan ditambahkan zat odor yaitu *mercaptant*, yang berbau menyengat.

## 3. LPG *Butane*

Terdiri dari 97.5% butana dan ditambahkan zat odor yaitu *mercaptant*, yang berbau menyengat. LPG propana dan LPG butana biasanya digunakan sebagai bahan bakar di industri.

Dalam penelitian ini bahan bakar yang digunakan adalah LPG (*Liquified Petroleum Gas*) Mix produksi Pertamina dengan komposisi 70 % volume propana dan 30% volume butana. Berikut spesifikasi untuk *commercial propane* dan *n-butane*:

Tabel 2.2 Spesifikasi untuk *commercial propane* dan *n-butane*

<i>Properties</i>		<i>propane</i>	<i>n - butane</i>
<i>High heating value</i>	(kcal.kg <sup>-1</sup> )	12.034	11.832
	(kcal.m <sup>-3</sup> )	24.290	31.990
<i>Low heating value</i>	(kcal.kg <sup>-1</sup> )	11.079	10.926
	(kcal.m <sup>-3</sup> )	22.370	29.540
<i>kg air /kg fuel</i>		15,63	15,42
<i>(NTP) m<sup>3</sup> air /kg fuel</i>		12,09	11,93
<i>(NTP) m<sup>3</sup> air / m<sup>3</sup> fuel</i>		24,41	32,25
<i>Maximum CO<sub>2</sub> in wet flue gas (% volume)</i>		11,56	11,90
<i>Maximum CO<sub>2</sub> in dry flue gas (% volume)</i>		13,64	13,99
<i>Temperature (°C) of adiabatic combustion instoichiometric air at (°C) and 1 bar</i>		1.994	1.996
<i>Temperature of autoignition (°C) in stoichiometric air</i>		480	420

Sumber: Monnot, 1985: 8

Dalam kondisi atmosfer, elpiji akan berbentuk gas. Volume elpiji dalam bentuk cair lebih kecil dibandingkan dalam bentuk gas untuk berat yang sama. Karena itu elpiji dipasarkan dalam bentuk cair dalam tabung-tabung logam bertekanan. Untuk memungkinkan terjadinya ekspansi panas (*thermal expansion*) dari cairan yang dikandungnya, tabung elpiji tidak diisi secara penuh, hanya sekitar 80-85% dari kapasitasnya. Rasio antara volume gas bila menguap dengan gas dalam keadaan cair bervariasi tergantung komposisi, tekanan dan temperatur, tetapi biasanya sekitar 250:1.

Tekanan di mana elpiji berbentuk cair, dinamakan tekanan uap-nya, juga bervariasi tergantung komposisi dan temperatur; sebagai contoh, dibutuhkan tekanan sekitar 220 kPa (2.2 bar) bagi butana murni pada 20 °C (68 °F) agar mencair, dan sekitar 2.2 MPa (22 bar) bagi propana murni pada 55°C (131 °F)

Sifat dari LPG adalah sebagai berikut :

1. Sangat mudah terbakar
2. Gas tidak beracun, tidak berwarna dan biasanya berbau menyengat
3. Gas dikirimkan sebagai cairan yang bertekanan di dalam tangki atau silinder.
4. Cairan dapat menguap jika dilepas dan menyebar dengan cepat.
5. Gas ini lebih berat dibanding udara sehingga akan banyak menempati daerah yang rendah.

### 2.12 Distribusi Kecepatan Dalam Aliran Berputar

Aliran berputar didefinisikan dengan perbandingan laju aliran berputar ( $G_\phi$ ) dengan laju aliran aksial ( $G_x$ ). Bentuk ini dijabarkan sebagai berikut (Monnot,1984: 93):

$$G_\phi = \int_0^{r_0} 2\pi\rho U W r^2 dr \quad (2.12)$$

dengan :  $G_\phi$  = laju aliran berputar ( $\text{kg.m}^2.\text{s}^{-2}$ )

$G_x$  = laju aliran aksial ( $\text{kg.m s}^{-2}$ )

$\rho$  = densitas udara ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

$r$  = jari titik  $r$  dari sumbu burner dan  $r_0$  jari-jari silinder burner.

$U$  = kecepatan aksial di titik  $r$  ( $\text{m.s}^{-1}$ )

$W$  = kecepatan tangensial di titik  $r$  ( $\text{m.s}^{-1}$ )

Selama variasi tekanan dalam burner kecil,  $\rho$  diasumsikan konstan sehingga :

$$G_\phi = 2\pi\rho \int_0^{r_0} U W r^2 dr \quad (2.13)$$

Penjelasan untuk aliran aksial ditulis:

$$G_x = \int_0^{r_0} 2\pi \rho U^2 r dr + 2\pi \int_0^{r_0} \frac{\partial p}{\partial x} r dr \quad (2.14)$$

sehingga:

$$G_x = 2\pi \rho \int_0^{r_0} U^2 r dr + 2\pi \int_0^{r_0} \frac{\partial p}{\partial x} r dr \quad (2.15)$$

Bentuk kedua dalam penjelasan di atas untuk  $G_x$  adalah tekanan, dan tidak begitu berpengaruh jika penurunan tekanan statik di sumbu aksis *burner* kecil. Percobaan menunjukkan bahwa  $\frac{\partial p}{\partial x}$  tidak hanya kecil tetapi kenyataannya *uniform* pada bidang yang tegak lurus pada sumbu *burner*. Untuk merubah perbandingan  $\frac{G_\phi}{G_x}$  menjadi suatu nilai tidak berdimensi,  $G_x$  dikalikan dengan panjangnya, sebagai contoh  $r_0 G_x$  dan nilai yang tidak berdimensi ini disebut sebagai angka *swirl* yang seringkali digunakan untuk menentukan intensitas gerakan berotasi. Angka *swirl* dirumuskan (Monnot, 1984: 93):

$$S = \frac{G_\phi}{r G_x} \quad (2.16)$$

Intensitas pembakaran untuk aliran yang bersirkulasi dipengaruhi oleh derajat dari *swirl* yang dipasang di dalam aliran. Derajat dari *swirl* tersebut ditunjukkan oleh *swirl number* (S), derajat *swirl* mengakibatkan terjadinya peningkatan ketebalan batas-batas *jet flow*. Lilley (1997) menyatakan bahwa semakin tinggi derajat *swirl*, maka tekanan ke arah radial akan menguat menjauhi mulut nosel, sehingga akan menggeser zona resirkulasi mendekati mulut nosel, akibatnya api akan mengalami penebalan ke arah radial dan pemendekan ke arah aksial.

### 2.13 Hipotesis

Sudut alur *swirl nozzle* yang semakin kecil menyebabkan bahan bakar memiliki kecepatan tangensial yang lebih besar, sehingga daerah resirkulasi pada aliran bahan bakar semakin meningkat, akibatnya campuran bahan bakar dan udara menjadi lebih homogen, dan distribusi temperatur pada api difusi akan semakin merata.



## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Metode Penelitian

Penelitian yang dilakukan menggunakan metode eksperimental nyata (*true experimental research*) yaitu dengan melakukan pengamatan secara langsung untuk mencari data sebab akibat melalui eksperimental guna mendapatkan data empiris. Dalam hal ini obyek penelitiannya adalah pengaruh variasi sudut alur *swirl nozzle* terhadap distribusi temperatur pada proses pembakaran difusi .

### 3.2 Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan di Laboratorium Motor Bakar, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.

### 3.3 Variabel Penelitian

#### 1. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang tidak dipengaruhi oleh variabel lain. Besar variabel bebas bisa diubah-ubah atau konstan, sehingga akan didapatkan hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat agar tujuan penelitian dapat tercapai.

Dalam penelitian ini variabel bebasnya adalah:

- Sudut alur *swirl nozzle* ( $\theta$ ) :  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  dan  $90^\circ$
- Kecepatan aliran bahan bakar ( $V$ ) :  $1.710 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $2.495 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $3.135 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $3.695 \text{ m.s}^{-1}$ , dan  $4.204 \text{ m.s}^{-1}$
- Kecepatan aliran udara aksial ( $U$ ) :  $0,217 \text{ m.s}^{-1}$

#### 2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Dalam penelitian ini variabel terikatnya adalah distribusi temperatur api difusi dengan memvariasikan kecepatan bahan bakar.

### 3.4 Peralatan Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

#### 1. Ruang Bakar

Ruang bakar yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk balok dengan

ukuran 35 cm x 35 cm x 80 cm. Di dalam ruang bakar terjadi proses pembakaran campuran udara dan bahan bakar.

2. Cerobong

Cerobong merupakan tempat keluarnya asap dari hasil proses pembakaran.

3. Tabung gas

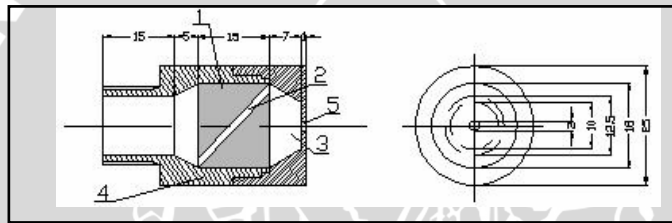
Tabung gas digunakan untuk menampung bahan bakar gas LPG.

4. *Manometer*

Digunakan untuk mengukur beda tekanan gas LPG dan beda tekanan udara yang mengalir melalui *orifice*.

5. *Swirl nozzle*

Berfungsi untuk menyemprotkan bahan bakar ke ruang bakar. Nosel yang digunakan berdiameter 2 mm. Variasi sudut alur yang digunakan adalah 30°, 60°, 90°.



Keterangan :

- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| 1. inti <i>swirl nozzle</i> | 4. casing pada <i>swirl nozzle</i>          |
| 2. alur pada inti           | 5. <i>orifice</i> pada <i>swirl chamber</i> |
| 3. <i>swirl chamber</i>     |   |

Gambar 3.1 *Swirl nozzle*

6. *Thermocouples*

Digunakan untuk mengukur temperatur pada api dan merupakan alat sensor temperatur. *Thermocouples* yang digunakan adalah tipe K yang mampu mengukur temperatur sampai dengan 1250 °C.

7. *Blower*

*Blower* digunakan untuk mensuplai udara pembakaran pada arah aksial.

*Blower* yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut :

- Model : *electric blower*
- Ukuran : 2"
- Tegangan : 220 V
- Arus : 1 A
- Putaran : 3600 rpm

8. Perangkat Sensor

Perangkat sensor terdiri dari :

a. *Operational Amplifier*

Digunakan untuk menguatkan sinyal yang dihasilkan oleh sensor.

b. *ADC (Analog to Digital Converter)*

ADC berfungsi untuk mengkonversikan sinyal tegangan dari sensor menjadi sinyal digital agar dapat di baca oleh komputer. Bahasa program yang digunakan adalah Borland Delphi 6.

9. Komputer

Digunakan untuk mengatur kerja dari ADC sekaligus untuk menyimpan data yang terbaca oleh ADC

10. *Stop valve* (kran)

Digunakan untuk mengatur kapasitas bahan bakar dan udara yang akan digunakan.

11. *Orifice*

Digunakan untuk mengetahui beda tekanan gas LPG dan beda tekanan udara yang mengalir melalui saluran.

12. Pipa udara

Berfungsi sebagai saluran udara pembakaran yang dihasilkan dari *blower*. Pipa udara yang digunakan untuk aliran udara aksial berdiameter 100 mm

13. Kamera digital

Digunakan untuk mengambil gambar nyala api. Kamera digital yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- a. *Merk* : *Olympus*
- b. *Model* : FE - 150
- c. *Resolution* : 5 *Mega pixels*
- d. *Optical zoom* : 3 x
- e. *File formats* : JPEG

14. Tripod

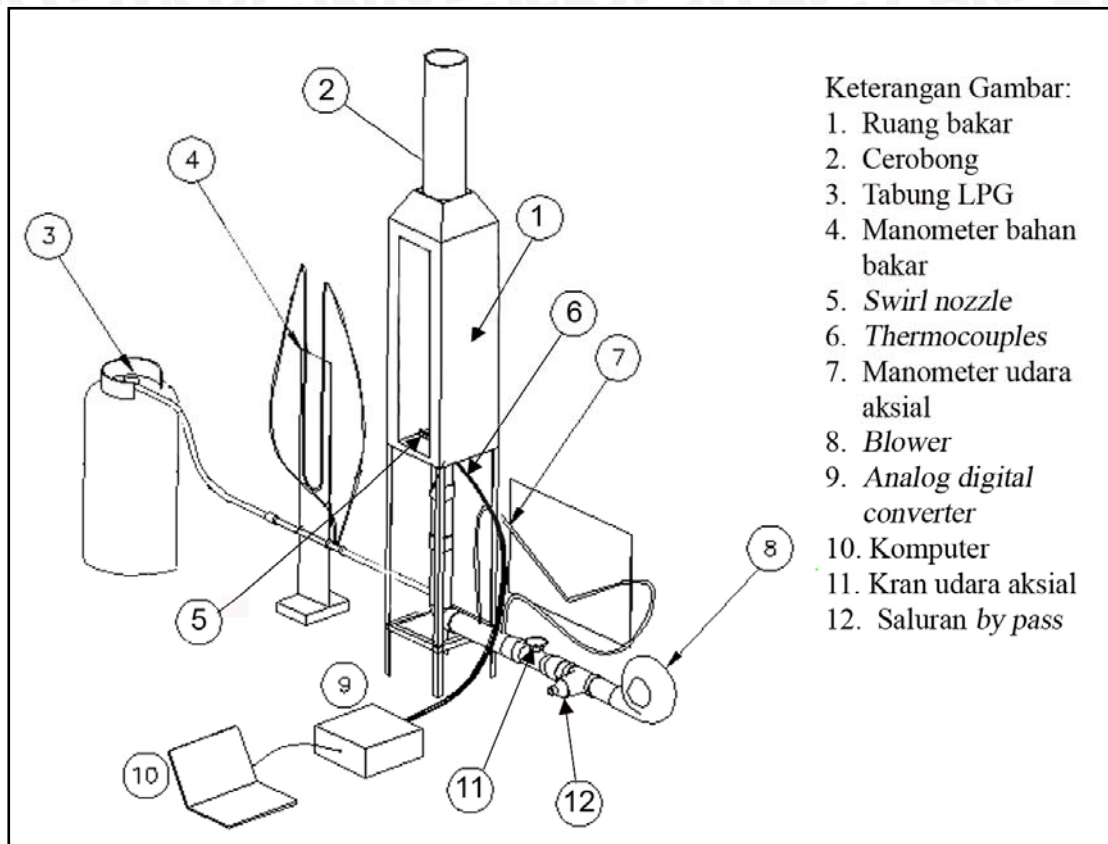
Digunakan sebagai tempat kamera ketika mengambil gambar agar gambar yang dihasilkan menjadi tajam dan jarak antara kamera dengan obyek tidak berubah.

15. Kaca pengamatan

Digunakan untuk melakukan pengamatan terhadap api difusi yang terjadi selama penelitian berlangsung. Kaca pengamatan tersebut berukuran 35 cm x 60 cm.

### 3.5 Instalasi Penelitian

Susunan alat yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah seperti gambar berikut ini:



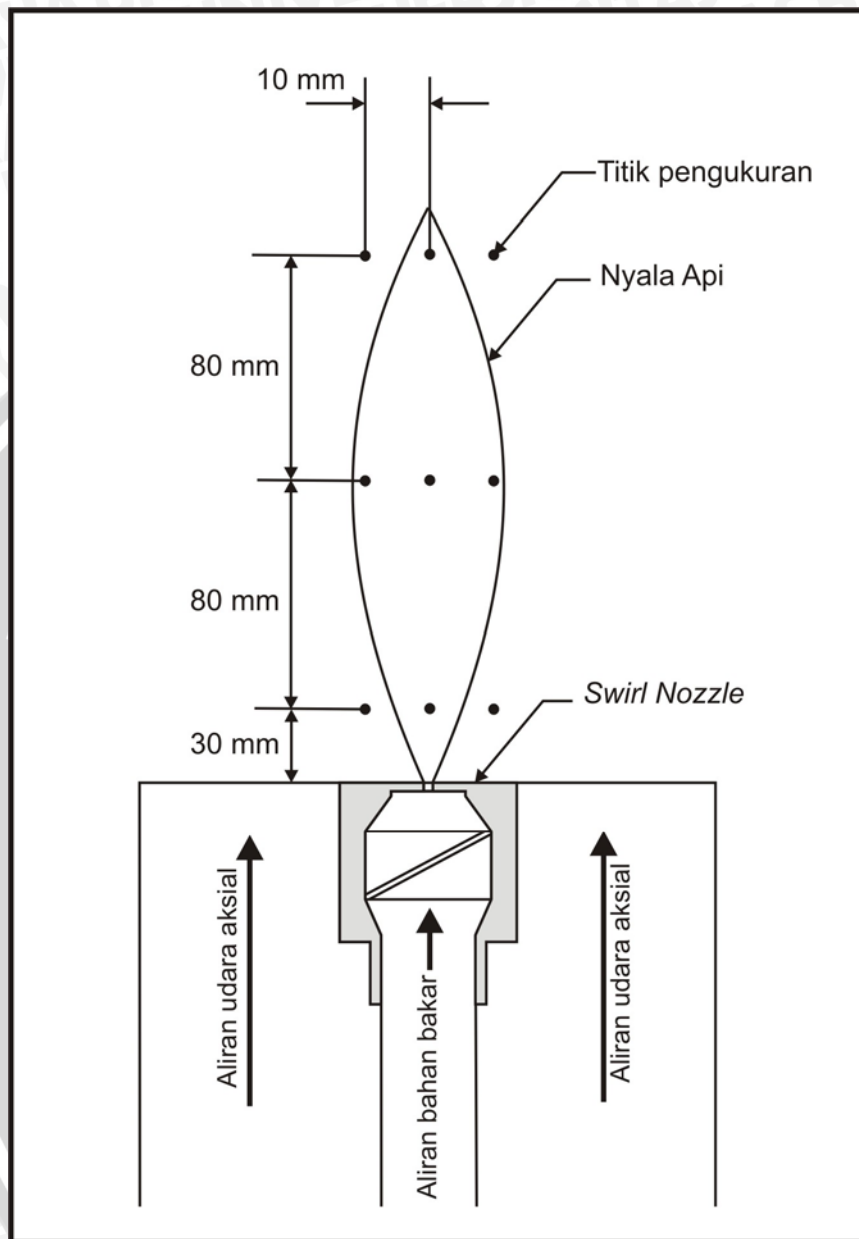
Gambar 3.2: Skema instalasi penelitian

### 3.6 Metode Pengambilan Data

Untuk mendapatkan data penelitian yang diinginkan, maka langkah-langkah yang dilakukan untuk mengetahui kestabilan api difusi adalah:

1. Mempersiapkan semua peralatan yang diperlukan.
2. Memasang nosel dengan sudut alur  $90^\circ$ .
3. Mengatur *blower* dengan bukaan *stop valve* pada kecepatan aliran  $0,217 \text{ m.s}^{-1}$ .
4. Membuka *stop valve* bahan bakar pada kecepatan aliran  $1.710 \text{ m.s}^{-1}$ .
5. Menyalakan api pada saat kondisi tersebut.
6. Mengambil data temperatur api difusi pada setiap titik pengukuran sesuai dengan gambar 3.3 dengan menggunakan *thermocouples* dan perangkat komputer. Data yang diambil sebanyak 300 data setiap titik pengukuran.
7. Mengulang langkah 3 dengan bukaan dengan variasi kecepatan aliran bahan bakar selanjutnya ( $2.495 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $3.135 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $3.695 \text{ m.s}^{-1}$ , dan  $4.204 \text{ m.s}^{-1}$ ).

8. Mengganti nosel dengan dengan variasi sudut alur berbeda ( $60^\circ$  dan  $30^\circ$ ) dan melakukan langkah yang sama dari langkah 3 sampai langkah 7.



Gambar 3.3: Titik pengukuran distribusi temperatur api difusi

### 3.7 Metode Analisa data

Data distribusi temperatur diperoleh dengan merata-rata 300 data yang didapat dari *thermocouples* pada setiap titik pengukuran yang posisinya sesuai dengan gambar 3.3. Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali dalam setiap titik pengukuran. Setelah itu data dilakukan rata-rata kembali. Data-data tersebut dicatat dalam tabel rancangan penelitian yang bentuknya adalah seperti berikut:

Tabel. 3.1 Tabel rancangan penelitian distribusi api difusi pada pemasangan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $\theta^\circ$ 

Kecepatan Bahan Bakar (V)	Y	X	Peletakan Sensor Pada Arah Horizontal					
			X = -10 mm		X = 0 mm		X = 10 mm	
V <sub>1</sub>	Y = 30 mm	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	
		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		
		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		
	Y = 110 mm	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	
		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		
		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		
	Y = 190 mm	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	
		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		
		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		
V <sub>2</sub>	Y = 30 mm	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	
		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		
		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		
	Y = 110 mm	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	
		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		
		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		
	Y = 190 mm	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	
		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		
		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	
V <sub>5</sub>	Y = 30 mm	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	
		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		
		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		
	Y = 110 mm	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	
		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		
		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		
	Y = 190 mm	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>rata-rata</sub>	
		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		
		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		T <sub>3</sub>		

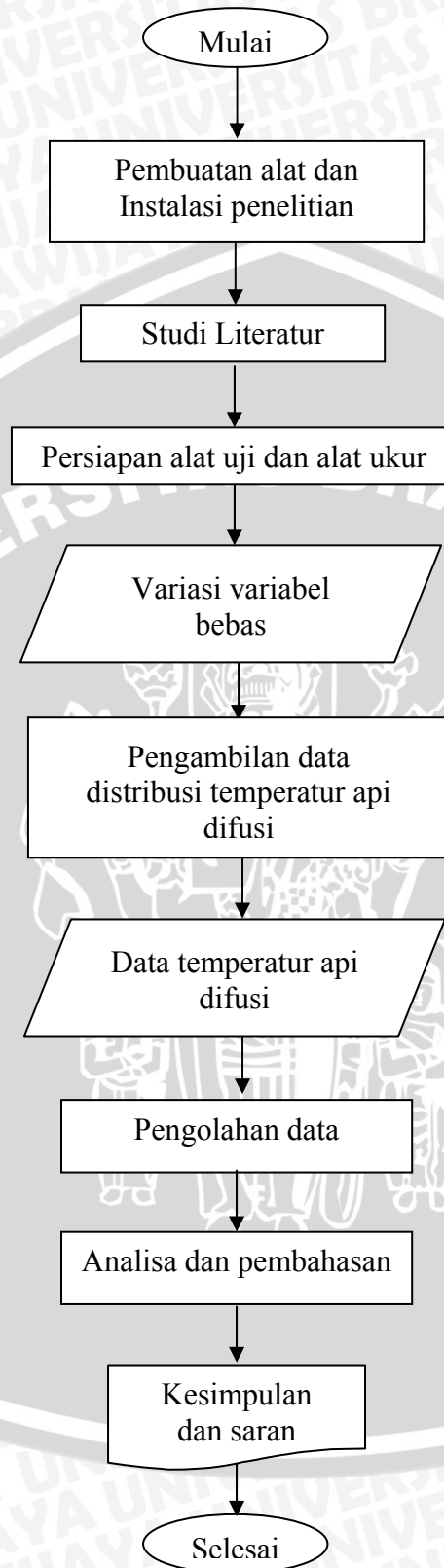
Keseluruhan data rata-rata, diperoleh dengan menggunakan menggunakan persamaan berikut (Hifni, 1993: 42):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (3.1)$$

dengan:  $\bar{X}$  = nilai rata-rata keseluruhan data       $X_i$  = data ke i  
 $n$  = jumlah data

Setelah diperoleh rata-ratanya maka dibuat grafik distribusi temperatur dengan menghubungkan rata-rata data temperatur dengan letak sensor pada arah horisontal. Selain itu, untuk mengetahui fluktuasi temperatur api difusi, dibuat grafik hubungan antara data temperatur dari satu titik pengukuran dengan lama waktu pengujian. Dari grafik-grafik tersebut dilakukan analisa dan pembahasan, kemudian ditarik kesimpulan.

### 3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.4: Diagram alir penelitian

## BAB IV PENGUMPULAN DATA, PENGOLAHAN DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Hasil Penelitian

Data yang diperoleh dalam penelitian ini berupa kecepatan aliran udara aksial diukur dengan manometer melalui *orifice* udara dan kecepatan aliran bahan bakar diukur dengan manometer melalui *orifice* bahan bakar. Dengan prinsip beda tekanan pada penampang saluran akibat melalui *orifice*, maka dapat kita tentukan kecepatan aliran dengan persamaan Bernoulli. Serta pada titik pengukuran dapat diperoleh data temperatur yang diukur dengan menggunakan *thermocouples*. Dari data temperatur akan diperoleh nilai temperatur rata-rata sehingga diketahui distribusi temperatur ke arah horisontal. Selain itu, data temperatur pada tiap titik pengamatan juga dapat diperoleh data fluktuasi temperatur.

#### 4.1.1 Data penelitian

Untuk tiap titik pengamatan diperoleh 300 data temperatur yang ditampilkan dalam grafik fluktuasi temperatur (lampiran 5 s/d lampiran 13). Dari data temperatur diambil nilai rata-ratanya, sehingga dapat diketahui distribusi temperatur ke arah horisontal. Data akhir temperatur yang diperoleh merupakan nilai rata-rata setelah dilakukan pengulangan pengambilan data sebanyak tiga kali, sehingga bisa mewakili keragaman data yang diperoleh (lampiran 2 s/d lampiran 4).

#### 4.1.2 Perhitungan data

Perhitungan untuk massa alir bahan bakar ( $\dot{m}_{\text{bahan bakar}}$ ) dan udara ( $\dot{m}_{\text{udara}}$ ).

Diketahui :  $\rho_{\text{bb}}$  = massa jenis bahan bakar ( $2,009 \text{ kg.m}^{-3}$ )

$\rho_{\text{ud}}$  = massa jenis udara ( $1,208 \text{ kg.m}^{-3}$ )

$\rho_{\text{m}}$  = massa jenis minyak tanah ( $835 \text{ kg.m}^{-3}$ )

$\rho_{\text{Hg}}$  = massa jenis raksa ( $13.600 \text{ kg.m}^{-3}$ )

$\Delta h$  = beda ketinggian pada manometer (mm)

$g$  = percepatan gravitasi bumi =  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$

$\beta$  = rasio diameter orifis dan diameter saluran

$D_{\text{bb}}$  = diameter pipa bahan bakar (0,01 m)

$D_{\text{ud}}$  = diameter pipa udara (0,1 m)



$$\begin{aligned}
 D_{\text{nos}} &= \text{diameter nosel bahan bakar (0,002 m)} \\
 d_{\text{bb}} &= \text{diameter dalam orifis bahan bakar (0,004 m)} \\
 d_{\text{ud}} &= \text{diameter dalam orifis udara (0,02 m)} \\
 A_{\text{nos}} &= \text{luas nosel bahan bakar (3,14} \cdot 10^{-6} \text{ m}^2) \\
 A_{\text{ud}} &= \text{luas pipa udara aksial (2,826} \cdot 10^{-3} \text{ m}^2)
 \end{aligned}$$

Contoh perhitungan data massa alir udara aksial dan massa alir bahan bakar

A. kecepatan udara aksial pada ketinggian ( $\Delta h$  minyak) = 10 mm

$$\dot{m}_{\text{udara}} = \rho_{\text{ud}} \cdot A_{\text{ud}} \cdot v, \text{ dengan } \Delta_h = 10 \text{ mm (minyak)}$$

$$v_{\text{ud}} = C \frac{d_{\text{ud}}^2}{D_{\text{ud}}^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \Delta h) / 1000}{\rho_{\text{ud}} \cdot (1 - \beta^4)}}$$

$$\beta = \frac{d_{\text{ud}}}{D_{\text{ud}}} = \frac{0,02 \text{ m}}{0,06 \text{ m}} = 0,333$$

$$v = (0,383) \frac{(0,02)^2}{(0,06)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (835 \cdot 9,81 \cdot 10) / 1000}{1,208 \cdot (1 - (0,333)^4)}} = 0,498$$

$$\dot{m}_{\text{udara}} = 1,208 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}] \cdot 2,826 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^2] \cdot 0,498 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Bila udara keluar pada diameter 0.1 m, maka kecepatan udaranya adalah:

$$v = \frac{1,7 \times 10^{-3}}{1,208 \times \left(\frac{3,14}{4} \times 0,1^2\right)} = 0,217 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

B. Massa alir bahan bakar

$$\dot{m}_{\text{bahan bakar}} = \rho_{\text{bb}} \cdot A_{\text{nos}} \cdot v, \text{ dengan } \Delta_h = 4 \text{ mm (Hg)}$$

$$v_{\text{nos}} = C \frac{d_{\text{bb}}^2}{D_{\text{nos}}^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_{\text{Hg}} \cdot g \cdot \Delta h) / 1000}{\rho_{\text{bb}} \cdot (1 - \beta^4)}}$$

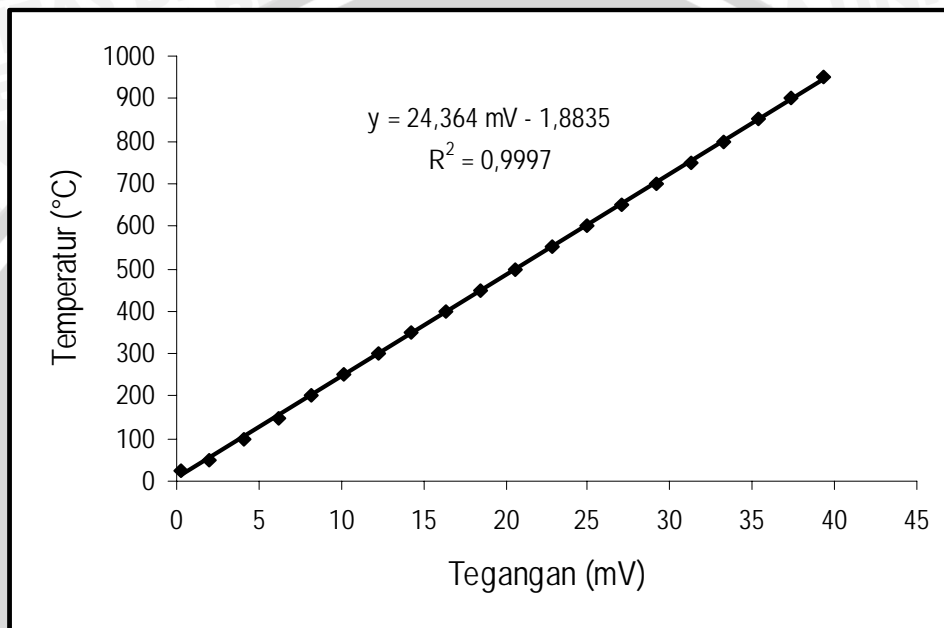
$$\beta = \frac{d_{\text{bb}}}{D_{\text{bb}}} = \frac{0,004 \text{ m}}{0,01 \text{ m}} = 0,4$$

$$v = (0,458) \frac{(0,004)^2}{(0,01)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (13600 \cdot 9,81 \cdot 4) / 1000}{2,009 \cdot (1 - (0,4)^4)}} = 1,710 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{bahan bakar}} = 2,009 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}] \cdot 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2] \cdot 1,710 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] = 1,07 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### 4.1.3 Kalibrasi temperatur

Kalibrasi temperatur dilakukan untuk mendapatkan persamaan yang menunjukkan korelasi antara tegangan (mV) yang dihasilkan *thermocouples* dengan temperatur (°C). Kalibrasi temperatur tersebut dilakukan dengan mengukur tegangan yang dihasilkan *thermocouples* menggunakan AVO meter dan pada saat yang sama temperatur pada api diukur menggunakan *thermo controller*. Grafik korelasi tersebut adalah seperti gambar 4.1 berikut:



Gambar 4.1 Hubungan antara tegangan (mV) dengan Temperatur (°C)

Persamaan yang diperoleh dari grafik pada gambar 4.1 adalah:

$$T = 24,364 V - 1,8835$$

Dari grafik dan persamaannya terlihat bahwa hubungan antara tegangan dan temperatur memiliki kecenderungan yang linier dengan koefisien korelasi ( $R^2$ ) = 0,9997.

Dari persamaan yang telah diperoleh tersebut kemudian dimasukkan ke bahasa program dalam database *Analog to Digital Converter* (ADC), dimana ADC ini berfungsi untuk mengkonversikan sinyal tegangan dari sensor analog menjadi sinyal digital agar dapat dibaca oleh komputer, sehingga untuk setiap pembacaan perubahan tegangan yang akan diubah menjadi tampilan temperatur dalam komputer diperoleh besaran suhu terukur yang sesuai dengan besarnya suhu yang terukur oleh *thermo controller*.

#### 4.1.4 Visualisasi api difusi

Visualisasi api digunakan untuk mengetahui karakter api pada berbagai kondisi, sehingga dapat diketahui fenomena yang terjadi pada api difusi pada tiap-tiap variasi penelitian yang dilakukan.

## 4.2 Pembahasan

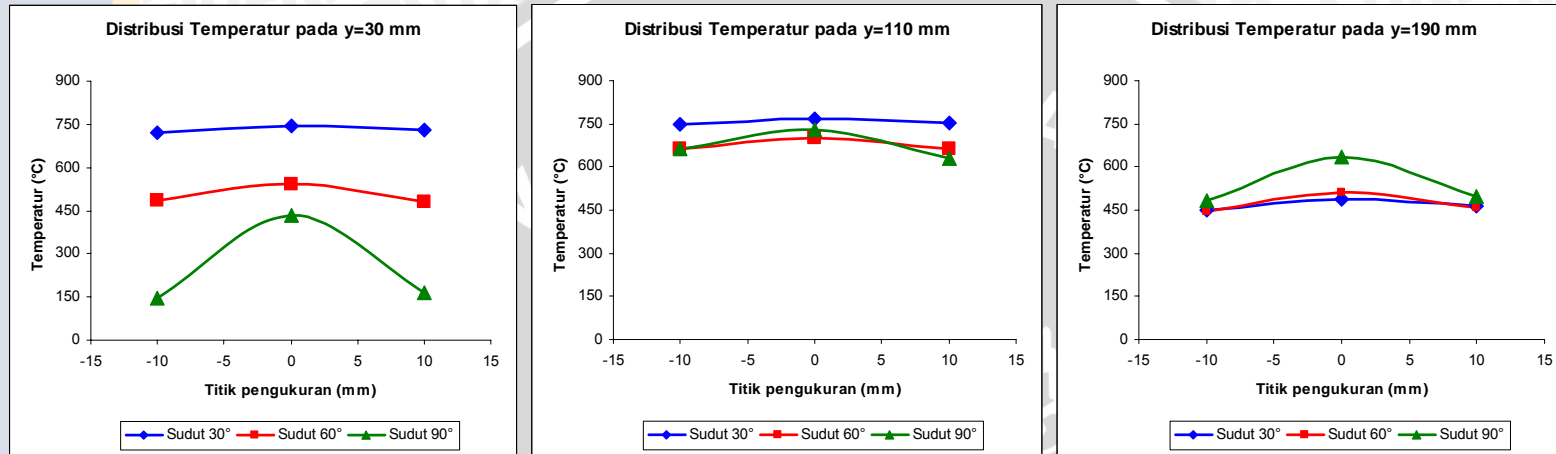
### 4.2.1 Distribusi temperatur api difusi

Data temperatur dari hasil percobaan diolah menjadi grafik untuk proses analisis. Grafik-grafik tersebut menunjukkan hubungan antara distribusi temperatur dengan posisi peletakan sensor temperatur pada arah horisontal.

Dalam hipotesis disebutkan bahwa apabila digunakan sudut alur *swirl nozzle* yang semakin kecil, maka akan diperoleh distribusi temperatur api difusi yang semakin merata. Semakin meratanya distribusi temperatur ini bisa dilihat dari bentuk garis yang menghubungkan antar titik. Titik dalam grafik tersebut menunjukkan tinggi temperatur rata-rata yang tercatat di titik pengukuran. Apabila garis yang menghubungkan antar titik pada arah horisontal semakin lurus, maka dapat diartikan bahwa distribusi temperatur akan semakin merata. Karena semakin lurus bentuk garis yang menghubungkan, berarti beda temperatur yang tercatat antar titik pengukuran api difusi semakin rendah. Beda temperatur yang rendah mengindikasikan bahwa distribusi temperatur pada api difusi semakin merata.

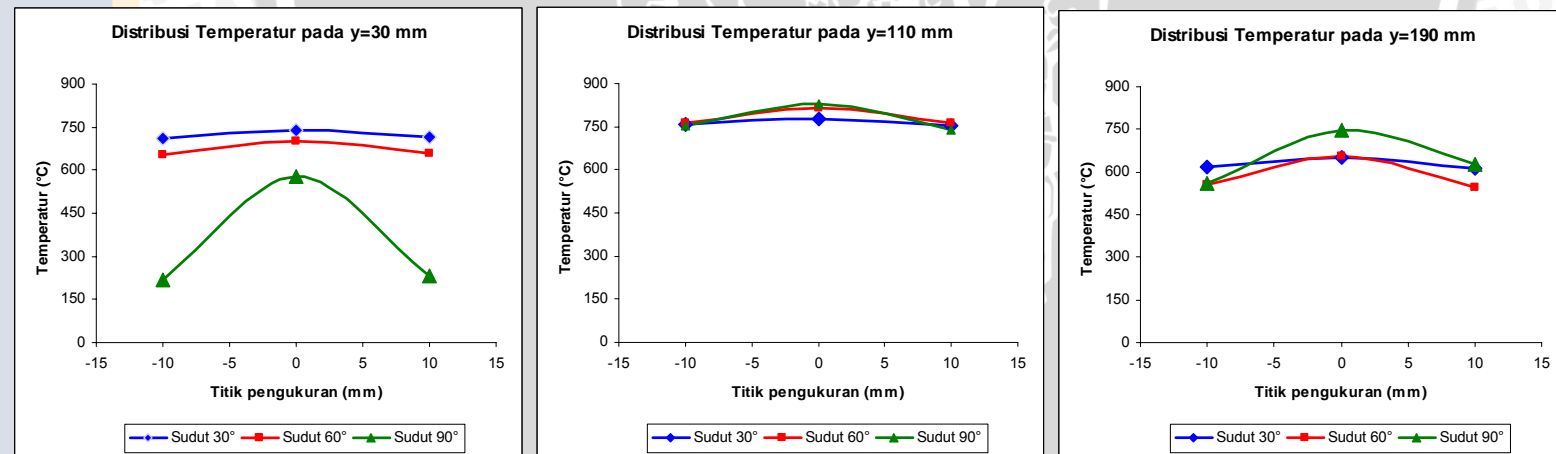
Untuk mengetahui kebenaran hipotesis, maka kita bisa melihat garfik distribusi temperatur berdasarkan variasi sudut alur *swirl nozzle* pada gambar 4.2 dan gambar 4.3. Apabila *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  memiliki distribusi temperatur yang lebih merata bila dibandingkan dengan  $60^\circ$ , dan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $60^\circ$  memiliki distribusi temperatur yang lebih merata dari *swirl nozzle* dengan sudut alur  $90^\circ$ , maka bisa diartikan bahwa hipotesis penelitian dapat diterima.

4.2.1.1 Distribusi temperatur berdasarkan variasi sudut alur *swirl nozzle*



(a) Posisi sensor pada y=30mm (b) Posisi sensor pada y=110 mm (c) Posisi sensor pada y=190 mm

Gambar 4.2 Grafik distribusi temperatur dengan variasi sudut alur *swirl nozzle* pada  $V=2,495 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $U=0,217 \text{ m.s}^{-1}$



(a) Posisi sensor pada y=30mm (b) Posisi sensor pada y=110 mm (c) Posisi sensor pada y=190 mm

Gambar 4.3 Grafik distribusi temperatur dengan variasi sudut alur *swirl nozzle* pada  $V=3,695 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $U=0,217 \text{ m.s}^{-1}$

Grafik pada gambar 4.2 dan 4.3 menampilkan hubungan antara distribusi temperatur dengan posisi peletakan sensor temperatur pada arah horisontal pada berbagai variasi pemasangan *swirl nozzle*, yaitu pemasangan *swirl nozzle* dengan variasi sudut alur  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , dan  $90^\circ$ . Sensor diletakkan pada sumbu  $y = 30$  mm,  $y = 110$  mm, dan  $y = 190$  mm. Kecepatan aliran udara aksial  $U = 0,217$  m.s<sup>-1</sup>, kecepatan aliran bahan bakar  $V = 2,495$  m.s<sup>-1</sup> untuk gambar 4.2 dan  $V = 3,695$  m.s<sup>-1</sup> untuk gambar 4.3. Sumbu horisontal merupakan posisi peletakan sensor pada sumbu  $x$ , sedangkan sumbu vertikal adalah temperatur rata-rata yang terukur pada sensor temperatur.

Terlihat pada gambar 4.2 (a) rata-rata temperatur pada pemasangan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  di  $x = 0$  mm dan  $y = 30$  mm tercatat  $746$  °C, sedangkan di  $x = 10$  mm dan  $x = -10$  mm pada ketinggian pemasangan sensor yang sama rata-rata temperatur yang tercatat adalah  $729$  °C dan  $720$  °C. Pada ketinggian peletakan sensor yang sama, *swirl nozzle* dengan sudut alur  $60^\circ$  rata-rata temperatur yang tercatat adalah  $543$  °C di  $x = 0$  mm,  $479$  °C di  $x = 10$  mm dan,  $484$  °C di  $x = -10$  mm. Sedangkan untuk *swirl nozzle* dengan sudut alur  $90^\circ$ , temperatur rata-rata yang tercatat adalah  $435$  °C di  $x = 0$  mm,  $164$  °C di  $x = 10$  mm dan  $146$  °C di  $x = -10$  mm.

Dari data tersebut dapat diketahui bahwa *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  memiliki distribusi temperatur paling merata bila dibandingkan dengan pemasangan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $60^\circ$  dan  $90^\circ$ . Hal ini dikarenakan beda temperatur rata-rata yang terukur antar titik pengukuran pada arah horisontal, memiliki beda temperatur yang lebih rendah bila dibandingkan dengan pemasangan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $60^\circ$  dan  $90^\circ$ . Sedangkan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $60^\circ$  memiliki distribusi temperatur yang lebih merata bila dibandingkan dengan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $90^\circ$ .

Kecenderungan yang sama terjadi ketika kecepatan bahan bakar ditingkatkan. Pada gambar 4.3 (a) rata-rata temperatur pada pemasangan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  di  $x = 0$  mm dan  $y = 30$  mm tercatat  $758$  °C, di  $x = 10$  mm dan  $x = -10$  mm, pada ketinggian pemasangan sensor yang sama rata-rata, temperatur yang tercatat adalah  $735$  °C dan  $732$  °C. Pada ketinggian peletakan sensor yang sama, *swirl nozzle* dengan sudut alur  $60^\circ$  rata-rata temperatur yang tercatat adalah  $700$  °C di  $x = 0$  mm,  $659$  °C di  $x = 10$  mm dan,  $652$  °C di  $x = -10$  mm. Sedangkan untuk *swirl nozzle* dengan sudut alur  $90^\circ$ , temperatur rata-rata yang tercatat adalah  $576$  °C di  $x = 0$  mm,  $233$  °C di  $x = 10$  mm dan  $217$  °C di  $x = -10$  mm. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  memiliki distribusi temperatur paling merata bila

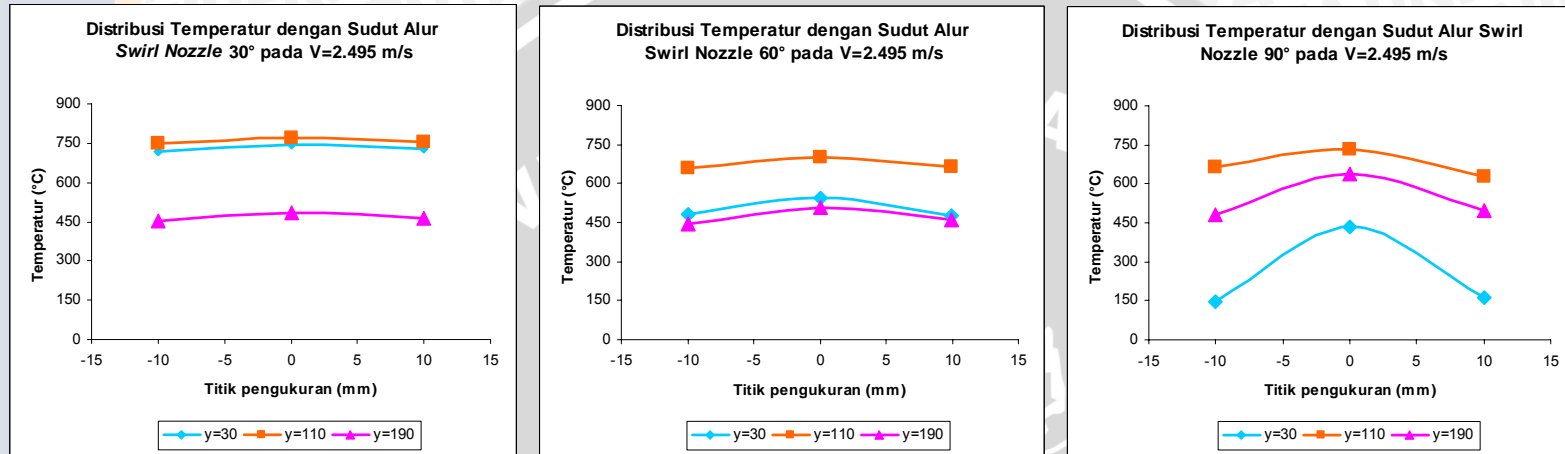
dibandingkan dengan pemasangan *swirl nozzle* dengan sudut alur 60° dan 90°. Sedangkan *swirl nozzle* dengan sudut alur 60° memiliki distribusi temperatur yang lebih merata dari pemasangan *swirl nozzle* dengan sudut alur 90°.

Secara keseluruhan dari grafik pada gambar 4.2 dan 4.3 dapat dilihat bahwa *swirl nozzle* dengan sudut alur 30° cenderung memiliki distribusi temperatur yang paling merata dengan perubahan temperatur yang lebih rendah ke arah horisontal. Sedangkan *swirl nozzle* dengan sudut alur 90° memiliki distribusi temperatur yang lebih tidak merata bila dibandingkan dengan kedua *swirl nozzle* lainnya. Hal ini dapat dijelaskan bahwa semakin kecil sudut alur *swirl nozzle* akan menyebabkan kecepatan tangensial bahan bakar yang keluar dari nosel akan semakin besar, sedangkan kecepatan aksialnya semakin kecil. Semakin besar kecepatan tangensial mengakibatkan daerah resirkulasi pada aliran bahan bakar menjadi meningkat. Selain itu kecepatan tangensial yang tinggi juga akan meningkatkan Intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi yang semakin besar dapat mengakibatkan kecepatan aksial menurun pada daerah resirkulasi, sehingga akan memberikan waktu yang cukup bagi bahan bakar dan udara untuk bercampur. Adanya waktu yang cukup untuk proses percampuran tersebut akan meningkatkan homogenitas campuran antara bahan bakar dan udara. Percampuran bahan bakar dan udara yang semakin homogen akan mengakibatkan distribusi temperatur akan menjadi lebih merata.

Ketika kecepatan aliran bahan bakar ditingkatkan maka tinggi temperatur pada setiap titik pengukuran juga meningkat (gambar 4.3). Hal ini terjadi karena kecepatan tangensial bahan bakar yang dihasilkan *swirl nozzle* akan mengakibatkan terjadinya batas gesekan (*shear layer*) yang lebih besar antara aliran resirkulasi dan daerah utama, sehingga banyak terjadi perpindahan panas antara gas panas (campuran bahan bakar dan udara yang sedang terbakar) ke gas dingin (bahan bakar). Adanya pemanasan awal mengakibatkan terjadi penambahan energi pada molekul-molekul bahan bakar, selanjutnya energi kinetik molekul-molekul akan meningkat.. Hal ini sesuai dengan rumus energi kinetik yaitu  $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$  (Halliday,1978: 772), dengan k adalah konstanta Boltzmann. Dari rumus tersebut terlihat bahwa temperatur sebanding dengan energi kinetik molekul.

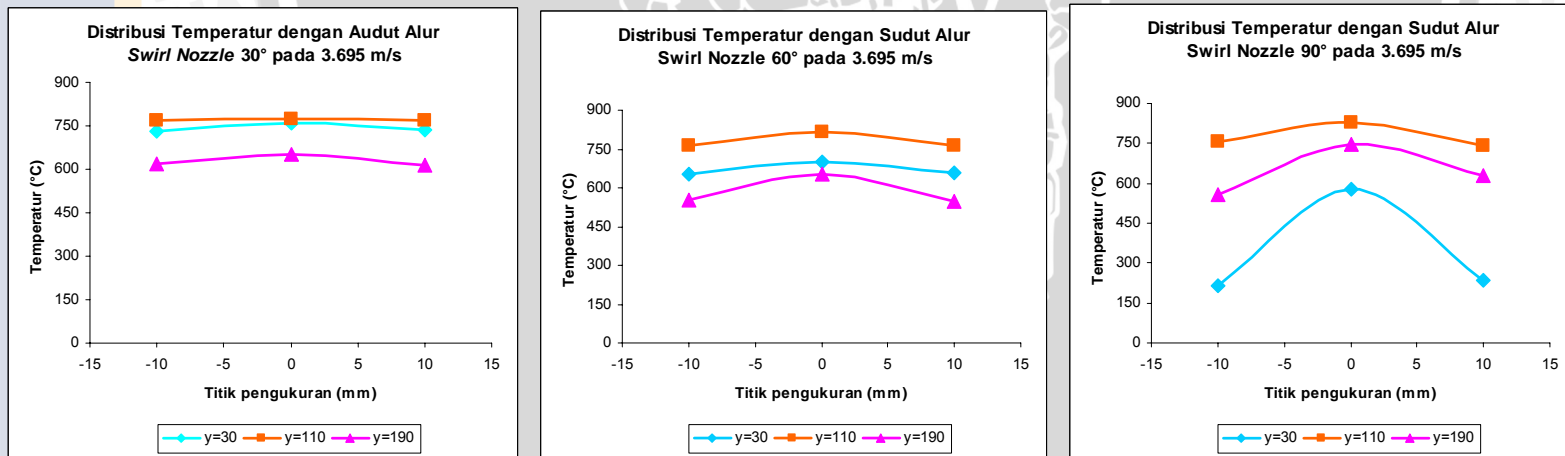
Sehingga dari analisa dan pembahasan grafik di atas dapat disimpulkan bahwa hipotesis penelitian dengan semakin kecilnya sudut alur *swirl nozzle* akan didapatkan distribusi temperatur yang lebih merata adalah dapat diterima.

4.2.1.2. Distribusi temperatur berdasarkan jarak aksial



(a) Swirl nozzle dengan sudut alur 30° (b) Swirl nozzle dengan sudut alur 60° (c) Swirl nozzle dengan sudut alur 90°

Gambar 4.4 Grafik distribusi temperatur pada berbagai jarak aksial pada  $V=2,495 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $U=0,217 \text{ m.s}^{-1}$



(a) Swirl nozzle dengan sudut alur 30° (b) Swirl nozzle dengan sudut alur 60° (c) Swirl nozzle dengan sudut alur 90°

Gambar 4.5 Grafik distribusi temperatur pada berbagai jarak aksial pada  $V=3,695 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $U=0,217 \text{ m.s}^{-1}$

Grafik pada gambar 4.4 dan 4.5 menampilkan hubungan antara distribusi temperatur dengan posisi peletakan sensor temperatur pada berbagai variasi jarak aksial, yaitu pada sumbu  $y = 30$  mm,  $y = 110$  mm, dan  $y = 190$  mm dengan berbagai variasi pemasangan *swirl nozzle* dengan variasi sudut alur  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , dan  $90^\circ$ . Kecepatan aliran udara aksial  $U = 0,217$  m.s<sup>-1</sup>, kecepatan aliran bahan bakar  $V = 2,495$  m.s<sup>-1</sup> untuk gambar 4.4 dan  $V = 3,695$  m.s<sup>-1</sup> untuk gambar 4.5. Sumbu horisontal merupakan posisi peletakan sensor pada sumbu x, sedangkan sumbu vertikal adalah temperatur rata-rata yang terukur pada sensor temperatur pada masing-masing variasi sudut *alur swirl nozzle*.

Pada gambar 4.4 (a), tampak bahwa *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  pada  $V = 2,495$  m.s<sup>-1</sup> memiliki temperatur yang terdistribusi merata ke arah horisontal. Tetapi pada arah vertikal, temperatur terdistribusi kurang merata. Hal ini dapat dilihat dari besar temperatur rata-rata di  $y = 190$  mm yang lebih rendah bila dibandingkan dengan temperatur rata-rata di  $y = 30$  mm dan  $y = 110$  mm. Kecepatan tangensial udara yang dihasilkan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  sangat besar, sehingga akan mengakibatkan kecepatan aksial menurun pada zona resirkulasi. Penurunan kecepatan aksial menyebabkan api akan mengalami pemendekan. Pemendekan pada dimensi api inilah yang mengakibatkan temperatur yang tercatat lebih rendah, karena temperatur yang terukur di  $y = 190$  mm adalah temperatur gas hasil pembakaran.

Tetapi dari grafik dalam gambar 4.5 (a), terlihat bahwa temperatur terdistribusi lebih merata pada arah aksial. Hal ini dapat dijelaskan ketika kecepatan bahan bakar ditingkatkan, maka massa alir bahan bakar yang keluar dari nosel juga semakin besar. Hal tersebut menyebabkan daerah resirkulasi akan semakin meluas ke arah tangensial maupun aksial. Perluasan daerah resirkulasi tersebut menyebabkan temperatur rata-rata yang terukur di  $y = 190$  mm pada *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  saat  $V = 3,695$  m.s<sup>-1</sup> meningkat pula, sehingga beda temperatur api pada setiap titik pengukuran pada arah aksial menjadi lebih rendah.

Terlihat dari semua grafik, pada posisi peletakan sensor untuk jarak  $y = 110$  mm cenderung memiliki temperatur yang paling tinggi dibandingkan dengan temperatur pada posisi peletakan sensor di  $y = 190$  mm dan  $y = 30$  mm. Hal ini berarti pada jarak tersebut ( $y = 110$  mm) terjadi resirkulasi yang lebih baik, sehingga transfer panas dari gas panas (campuran bahan bakar dan udara yang sedang terbakar) ke gas dingin (bahan bakar) akan lebih optimal dan pembakaran berlangsung lebih mendekati sempurna. Hal ini mengakibatkan temperatur yang dihasilkan juga menjadi lebih tinggi. Secara

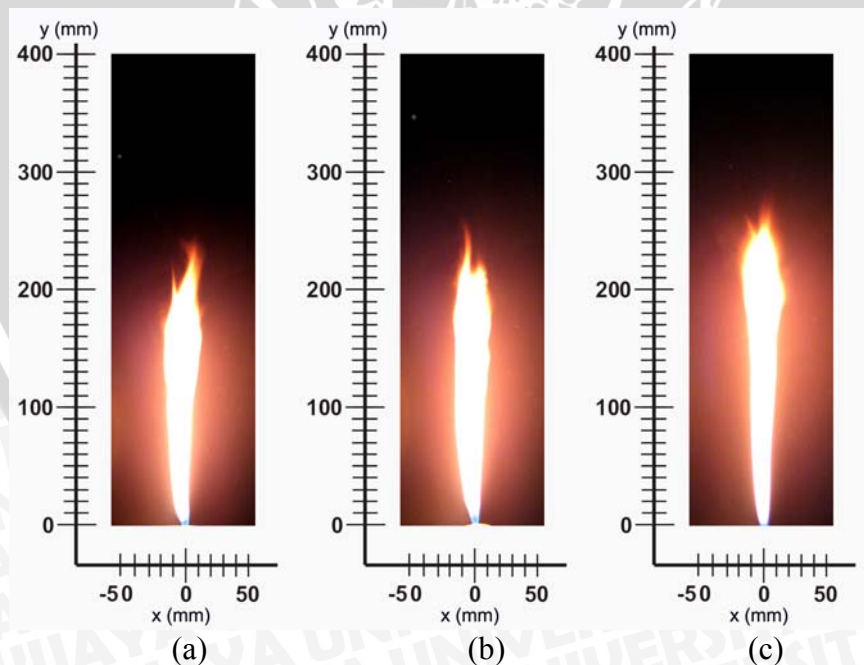


keseluruhan, temperatur tertinggi terjadi pada jarak  $y = 110$  mm.

Dari grafik pada gambar 4.4 terlihat dengan jelas bahwa dengan pemasangan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  didapatkan distribusi temperatur yang cenderung lebih merata pada arah horisontal dengan perubahan temperatur yang lebih rendah bila dibandingkan dengan pemasangan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $60^\circ$  dan  $90^\circ$ . Begitu juga ketika kecepatan bahan bakar dinaikkan (gambar 4.5). Seperti penjelasan sebelumnya, *swirl nozzle* bersudut alur  $30^\circ$  memiliki kecepatan tangensial yang lebih tinggi dibandingkan dengan kedua nosel yang lain. Kecepatan tangensial yang semakin besar yang akan mengakibatkan daerah resirkulasi dan intensitas turbulensi menjadi meningkat. Intensitas turbulensi yang semakin besar akan mengakibatkan kecepatan aksial menurun pada daerah resirkulasi, sehingga akan memberikan waktu yang cukup bagi bahan bakar dan udara untuk bercampur. Adanya waktu yang cukup untuk proses pencampuran tersebut akan meningkatkan homogenitas campuran antara bahan bakar dan udara, sehingga distribusi temperatur akan menjadi lebih merata.

#### 4.2.2 Visualisasi api difusi

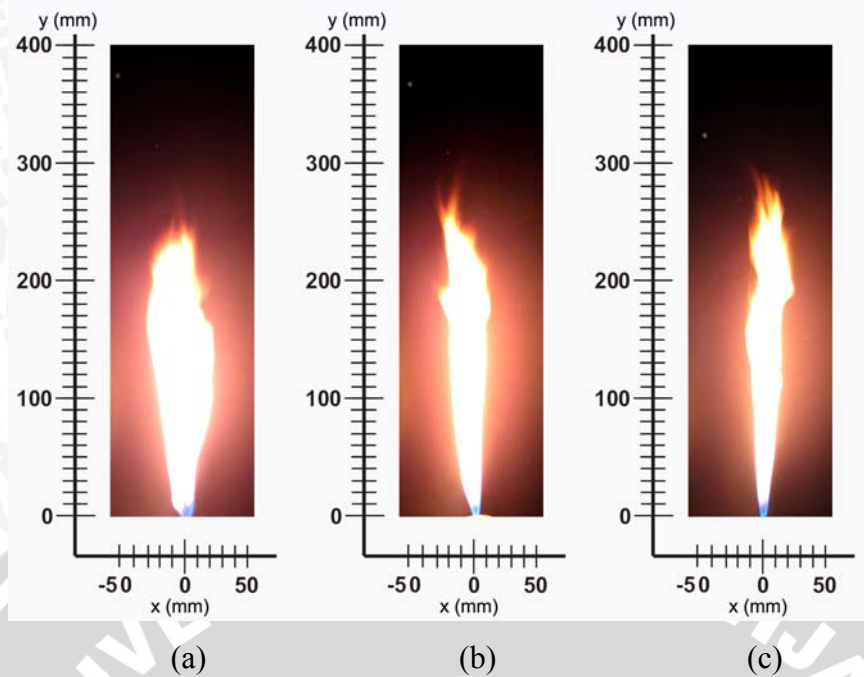
Dari penelitian yang telah dilakukan maka diperoleh visualisasi api difusi *annulus jet* sebagai berikut:



Gambar 4.6 Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan sudut alur *swirl nozzle*  
 $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 1,710 \text{ m.s}^{-1}$ .

(a) Sudut alur *swirl nozzle*  $30^\circ$   
 (b) Sudut alur *swirl nozzle*  $60^\circ$

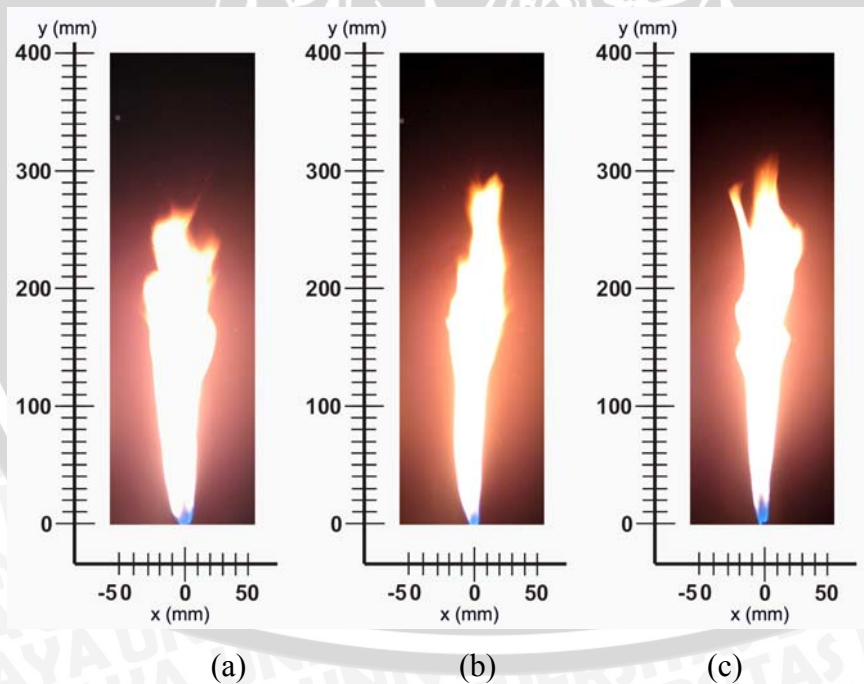
(c) Sudut alur *swirl nozzle*  $90^\circ$



Gambar 4.7 Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan sudut alur *swirl nozzle*

$$U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}, V = 2,495 \text{ m.s}^{-1}$$

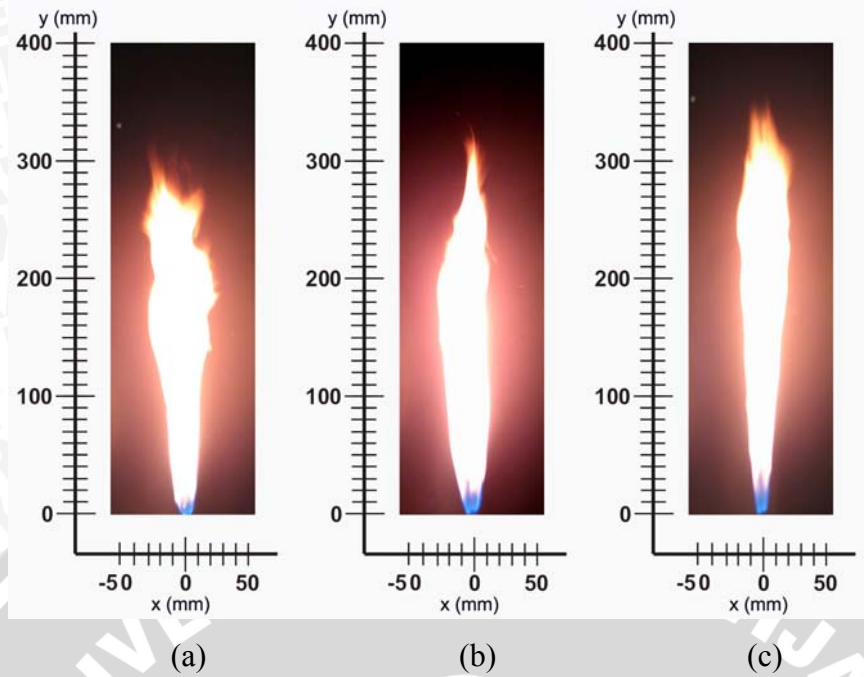
- (a) Sudut alur *swirl nozzle*  $30^{\circ}$
- (b) Sudut alur *swirl nozzle*  $60^{\circ}$
- (c) Sudut alur *swirl nozzle*  $90^{\circ}$



Gambar 4.8 Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan sudut alur *swirl nozzle*

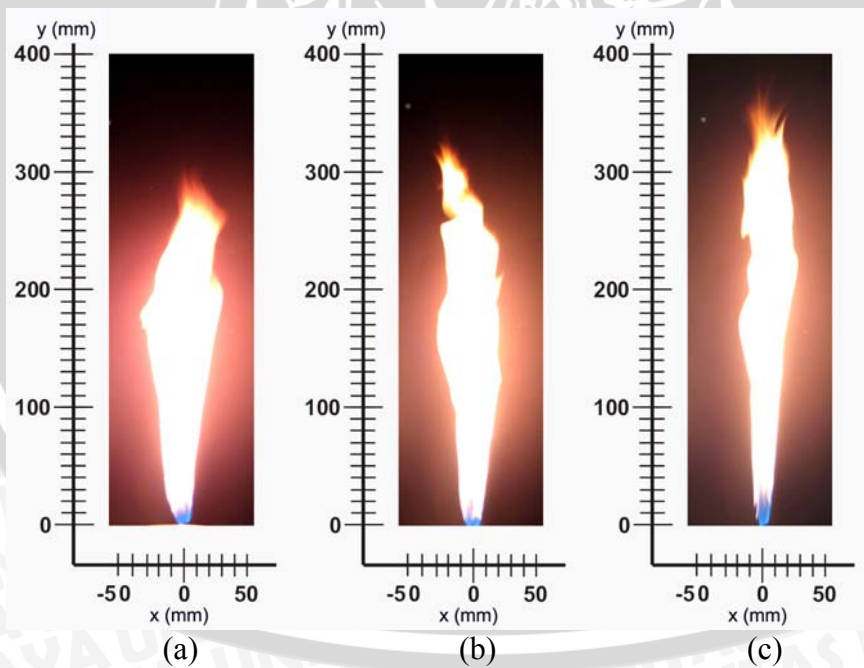
$$U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}, V = 3,135 \text{ m.s}^{-1}$$

- (a) Sudut alur *swirl nozzle*  $30^{\circ}$
- (b) Sudut alur *swirl nozzle*  $60^{\circ}$
- (c) Sudut alur *swirl nozzle*  $90^{\circ}$



Gambar 4.9 Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan sudut alur *swirl nozzle*  
 $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 3,695 \text{ m.s}^{-1}$ .

- (a) Sudut alur *swirl nozzle*  $30^{\circ}$
- (b) Sudut alur *swirl nozzle*  $60^{\circ}$
- (c) Sudut alur *swirl nozzle*  $90^{\circ}$



Gambar 4.10 Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan sudut alur *swirl nozzle*  
 $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 4,204 \text{ m.s}^{-1}$ .

- (a) Sudut alur *swirl nozzle*  $30^{\circ}$
- (b) Sudut alur *swirl nozzle*  $60^{\circ}$
- (c) Sudut alur *swirl nozzle*  $90^{\circ}$

Pada gambar-gambar di atas terlihat visualisasi api pada berbagai variasi sudut alur *swirl nozzle* dengan kecepatan aliran udara aksial yang sama, yaitu  $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ . Sedangkan kecepatan aliran bahan bakar divariasikan. Secara umum pada hampir semua kasus, warna api hampir seluruhnya didominasi warna kuning. Hal ini disebabkan oleh radiasi pembentukan jelaga yang hampir selalu terjadi pada pembakaran difusi.

Dari visualisasi api difusi tersebut juga terlihat bahwa semakin kecil sudut alur *swirl nozzle* yang digunakan maka api semakin pendek dan mengalami penebalan ke arah horisontal. Hal ini dikarenakan semakin kecil sudut alur *swirl nozzle* maka kecepatan tangensial bahan bakar juga semakin besar. Meningkatnya kecepatan tangensial bahan bakar ini menyebabkan kecepatan bahan bakar pada arah aksial menurun, sehingga api mengalami pemendekan pada arah aksial dan penebalan pada arah horisontal.

Pada bahan bakar yang rendah (gambar 4.6), api tampak berada pada kondisi seragam. Hal ini terjadi karena pada kecepatan bahan bakar yang rendah, hampir tidak ada pengaruh akibat dari pemasangan *swirl nozzle terhadap* pola aliran bahan bakar yang keluar dari nosel. Tetapi ketika kecepatan bahan bakar dinaikkan, maka pengaruh pemasangan *swirl nozzle* mulai terlihat. Semakin besar kecepatan bahan bakar maka pada *swirl nozzle* pada sudut alur  $30^\circ$ , api difusi cenderung semakin melebar ke arah horisontal. Bentuk api difusi ini berbeda pada sudut alur *swirl nozzle* yang lebih besar ( $60^\circ$  dan  $90^\circ$ ). Pada sudut alur *swirl nozzle* yang lebih besar, api terlihat semakin memanjang ke arah aksial. Hal ini dikarenakan pada *swirl nozzle* pada sudut alur yang lebih besar maka komponen kecepatan aksialnya akan membesar seiring dinaikkannya kecepatan bahan bakar. Kenaikan kecepatan bahan bakar ini juga menyebabkan massa alir bahan bakar juga bertambah. Hal ini mengakibatkan bahan bakar akan berdifusi dengan udara semakin jauh dari mulut nosel, sehingga semakin api akan terlihat semakin panjang menuju ke arah aksial.

#### 4.2.3 Fluktuasi temperatur api difusi

Lampiran 5 s/d Lampiran 13 menunjukkan fluktuasi temperatur dari data yang diperoleh. Pada pemasangan *tangential air jet inlets* untuk aliran udara tangensial yang rendah  $V = 1,710 \text{ m.s}^{-1}$  dengan pemasangan sensor di  $y = 30 \text{ mm}$  dan  $y = 110 \text{ mm}$ , temperatur cenderung tidak terlalu fluktuatif pada bagian sumbu api ( $x = 0 \text{ mm}$ ). Hal ini berarti bahwa pada daerah tersebut api memiliki kestabilan yang baik, sehingga

temperatur yang terukur berada disekitar nilai temperatur rata-rata data.

Pada posisi sensor temperatur yang paling jauh dari nosel bahan bakar  $y = 190$  mm api cenderung bergerak dengan tidak teratur, sehingga temperatur berfluktuasi semakin tinggi dari nilai rata-rata temperatur. Pada saat temperatur yang terukur berada di bawah temperatur rata-rata data berarti terdapat aliran udara masuk ke dalam api, sehingga temperatur udara yang lebih dominan terukur. Akan tetapi pada saat temperatur yang terukur berada di atas temperatur rata-rata data, berarti temperatur api yang lebih dominan terukur.

Pada kecepatan bahan bakar yang tinggi  $V = 3,695 \text{ m.s}^{-1}$ , pada pemasangan sensor di  $y = 30$  mm dan  $y = 110$  mm pada bagian tengah api cenderung tidak terlalu berfluktuasi. Hal ini berarti bahwa pada daerah tersebut api memiliki kestabilan yang baik. Sedangkan pada titik pengukuran  $x = 10$  mm dan  $x = -10$  mm terlihat temperatur api cenderung lebih berfluktuasi karena gerakan api cenderung tidak stabil dan teratur daripada bagian tengah api ( $x = 0$  mm).

Dari grafik fluktuasi temperatur juga dapat dilihat, bahwa *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  fluktuasi temperatur yang terjadi cenderung lebih kecil bila dibandingkan dengan fluktuasi temperatur yang terjadi pada *swirl nozzle* dengan sudut alur  $60^\circ$  dan  $90^\circ$ . Semakin kecil sudut alur *swirl nozzle*, maka pencampuran antara bahan bakar dan udara akan semakin homogen. Hal ini disebabkan karena *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  memiliki kecepatan pada arah tangensial, sehingga menyebabkan tersedianya lebih banyak waktu bagi bahan bakar untuk berdifusi dengan udara. Hal ini bisa dilihat pada *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  dengan kecepatan aliran bahan bakar  $V = 2,495 \text{ m.s}^{-1}$  (Lampiran 6). Fluktuasi temperatur yang terjadi mengindikasikan bahwa gerakan api cenderung stabil pada aliran baik di bagian tengah maupun bagian tepi api sehingga temperatur cenderung tidak fluktuatif atau temperatur yang terukur berada di sekitar nilai temperatur rata-rata data.

Begitu juga pada aliran bahan bakar yang lebih tinggi  $V = 3,695 \text{ m.s}^{-1}$  (Lampiran 7). Dari grafik fluktuasi tersebut juga terlihat bahwa pada *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  temperatur yang terukur cenderung tidak fluktuatif. Pada dasarnya dengan pemasangan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  akan didapatkan campuran bahan bakar dan udara yang lebih homogen dan merata daripada *swirl nozzle* dengan sudut alur  $60^\circ$  dan  $90^\circ$ . Secara keseluruhan, fluktuasi temperatur yang terjadi pada pemasangan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  semakin berkurang dibandingkan dengan pemasangan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $60^\circ$  dan  $90^\circ$ .

## BAB V PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

Dari analisis data yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan bahwa besar sudut alur *swirl nozzle* mempengaruhi distribusi temperatur api difusi. Semakin kecil sudut alur *swirl nozzle*, maka temperatur api difusi akan semakin terdistribusi secara merata ke arah horisontal. Distribusi temperatur yang paling merata ke arah horisontal pada api difusi, diperoleh pada sudut alur *swirl nozzle* sebesar  $30^\circ$ .

Dengan menggunakan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  akan didapatkan kecepatan tangensial yang lebih besar. Hal ini menyebabkan daerah resirkulasi api difusi dan intensitas turbulensi akan semakin meningkat, akibatnya kecepatan bahan bakar pada arah aksial akan menurun. Penurunan kecepatan pada arah aksial menyebabkan akan ada lebih banyak waktu bagi bahan bakar untuk bercampur dengan udara, sehingga campuran antara bahan bakar dan udara semakin homogen dan distribusi temperatur akan menjadi lebih merata.

### 5.2. Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh variasi kecepatan bahan bakar yang lebih banyak.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pengaruh variasi pemasangan *swirl nozzle* terhadap efektifitas pembakaran.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh pemasangan *swirl nozzle* terhadap karakteristik pola aliran fluidanya.
4. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh pemasangan *swirl nozzle* terhadap distribusi temperatur dengan diameter nosel yang bervariasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Culp, Archie W., 1996, *Prinsip-prinsip Konversi Energi*, Jakarta: Erlangga.
- Elbe, G. V. dan Lewis, Benard, 1961, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, : Academic Press.
- Hedman, Paul O., Flores, D. V. dan Fletcher T. H., 2002, *Observation of Flames Behavior in A Laboratory*, Amsterdam, The Netherlands.
- Hifni, mohammad, 1990, *Metode Statistika*, Malang: Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Hizbullah, M., 2006, Pengaruh Variasi Sudut Inklinasi *Tangential Air Jet Inlet* terhadap Kestabilan Nyala dan Distribusi Temperatur Pada Api Difusi *Annulus Jet*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.
- Holman, J.P., 1985, *Metode Pengukuran Teknik*, Jakarta: Erlangga.
- Kuo K., 1986, *Principles of Combustion*, New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Lilley, David G., 1977, *Swirl Flow in Combustion: A Review*, AIAA.
- Masri, A.R., et al., 2000, *Strongly Swirling Nonpremixed Flame Stabilized on New Burner Journal of Combustion*.
- Milton, Brian E., 1995, *Thermodynamics, Combustion and Engines*, London :Chapman & Hall.
- Monnot, G., et al., 1985, *Principles of Turbulent Fired Heat*, Texas: Gulf Publishing Company.
- Peters, N, 1997, *Four Lectures on Turbulent Combustion*, Ercoftac Summer School, Aachen, Germany.
- Potter, C. P., David, C. W. dan Midhat, Hondzo, 1997, *Mechanics of fluids*, Singapore: Prentice – Hall, Inc.
- Takahashi, F., et al., 1996, *Structure of Turbulent Hydrogen Jet Diffusion Flames With or Without Swirl*, Journal of Heat Transfer, ASME.
- Turns, Stephen R., 1996, *An Introduction to Combustion*, New York : McGraw-Hill, Inc
- Wardana, I. N. G., 1995, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.
- Widodo I, A. S., 2004, *Pengaruh Posisi dan Sudut Kemiringan Swirl Terhadap Kestabilan Pancaran Api Difusi Double Concentric*, Malang: Jurnal Ilmu-ilmu Teknik Vol. 16 No. 2, Lembaga Penelitian Universitas Brawijaya.
- Wijayanti I, W., 2005, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Jurusan Mesin,

Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.

Wiyono E.S, 2005, Pengaruh Variasi Sudut Alur terhadap Karakteristik *Spray* pada *Swirl Nozzle*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.  
[www.pertamina.com/pertamina.php?irwcontents=webpage&menu=40202&page\\_id=45](http://www.pertamina.com/pertamina.php?irwcontents=webpage&menu=40202&page_id=45)



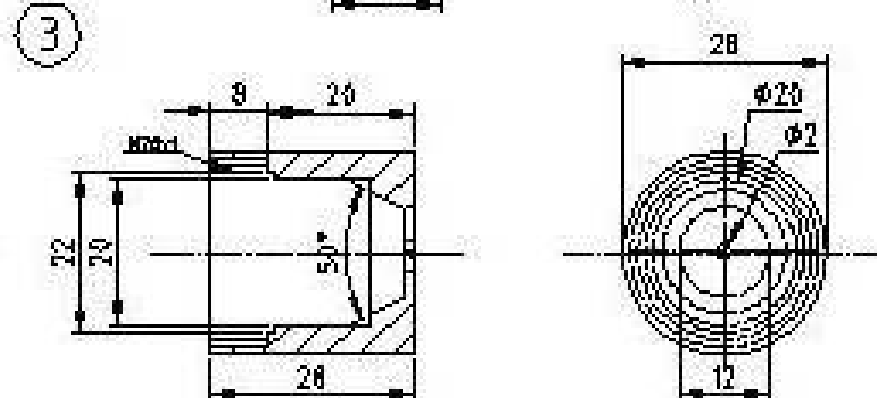
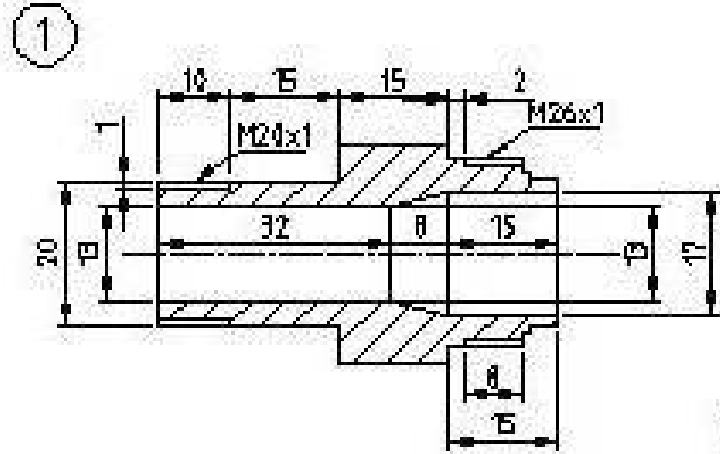
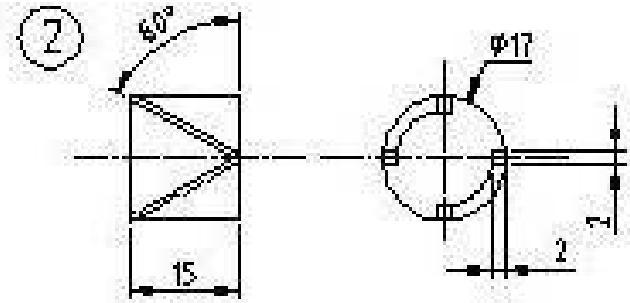
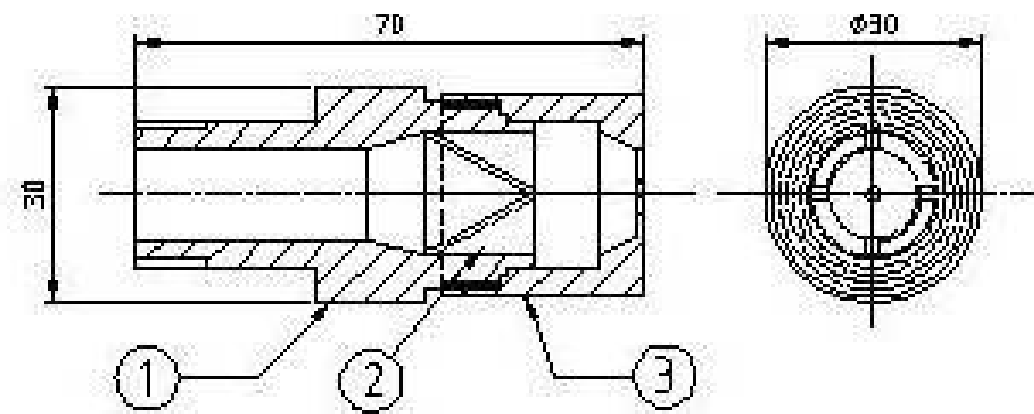




**LAMPIRAN**

Lampiran I. Bagian-bagian Swirl Nozzle

NO.	NAMA BAGIAN	BAHAN	JUMLAH	CATATAN
1	NECK	Al	1	
2	INTI SWIRL NOZZLE	Al	1	
3	PENUTUP	Al	1	



	SKALA : 1:1	DIGAMBAR : BAGUS UJI W.	PERINGATAN :
	SATUAN : mm	NIM : 0310620027	
	TANGGAL : 31-JULI-07	DIPERIKSA : Prof. Ir. H. Sudjito, Ph.D.	
JURUSAN MESIN FT-UNIBRAW	SWIRL NOZZLE		01 A4

Lampiran 2. Data distribusi temperatur api difusi pada *swirl nozzle* dengan sudut alur 30°

$$U=0,217 \text{ m.s}^{-1} \text{ dan } V=1,710 \text{ m.s}^{-1}$$

Rata-rata data di y=30 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	640	679	635
Rata-rata Data 2	642	672	639
Rata-rata Data 3	632	665	642
Rata-rata Data	638	672	639

$$U=0,217 \text{ m.s}^{-1} \text{ dan } V=2,495 \text{ m.s}^{-1}$$

Rata-rata data di y=30 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	732	746	741
Rata-rata Data 2	716	755	731
Rata-rata Data 3	712	737	716
Rata-rata Data	720	746	729

Rata-rata data di y=110 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	650	710	660
Rata-rata Data 2	638	680	643
Rata-rata Data 3	637	673	634
Rata-rata Data	641	688	646

Rata-rata data di y=110 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	754	767	758
Rata-rata Data 2	747	772	745
Rata-rata Data 3	741	768	752
Rata-rata Data	747	769	752

Rata-rata data di y=190 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	303	298	317
Rata-rata Data 2	306	306	319
Rata-rata Data 3	286	343	295
Rata-rata Data	298	315	311

Rata-rata data di y=190 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	453	487	475
Rata-rata Data 2	447	471	460
Rata-rata Data 3	452	499	460
Rata-rata Data	451	486	465

$$U=0,217 \text{ m.s}^{-1} \text{ dan } V=3,135 \text{ m.s}^{-1}$$

Rata-rata data di y=30 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	726	739	729
Rata-rata Data 2	724	736	733
Rata-rata Data 3	727	733	731
Rata-rata Data	726	736	731

$$U=0,217 \text{ m.s}^{-1} \text{ dan } V=3,695 \text{ m.s}^{-1}$$

Rata-rata data di y=30 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	734	760	734
Rata-rata Data 2	731	760	734
Rata-rata Data 3	731	755	735
Rata-rata Data	732	758	735

Rata-rata data di y=110 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	763	779	758
Rata-rata Data 2	743	770	760
Rata-rata Data 3	768	760	770
Rata-rata Data	758	770	763

Rata-rata data di y=110 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	763	785	751
Rata-rata Data 2	747	773	753
Rata-rata Data 3	757	769	760
Rata-rata Data	756	776	755

Rata-rata data di y=190 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	488	524	486
Rata-rata Data 2	523	643	546
Rata-rata Data 3	464	534	502
Rata-rata Data	492	567	511

Rata-rata data di y=190 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	639	645	609
Rata-rata Data 2	602	644	599
Rata-rata Data 3	613	671	627
Rata-rata Data	618	653	612

Lampiran 3. Data distribusi temperatur api difusi pada *swirl nozzle* dengan sudut alur 60°

$$U=0,217 \text{ m.s}^{-1} \text{ dan } V=1,710 \text{ m.s}^{-1}$$

Rata-rata data di y=30 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	195	573	191
Rata-rata Data 2	190	564	173
Rata-rata Data 3	185	557	198
Rata-rata Data	190	565	188

$$U=0,217 \text{ m.s}^{-1} \text{ dan } V=2,495 \text{ m.s}^{-1}$$

Rata-rata data di y=30 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	478	543	480
Rata-rata Data 2	484	542	494
Rata-rata Data 3	488	543	462
Rata-rata Data	484	543	479

Rata-rata data di y=110 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	638	751	679
Rata-rata Data 2	642	739	649
Rata-rata Data 3	645	736	668
Rata-rata Data	642	742	665

Rata-rata data di y=110 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	666	706	672
Rata-rata Data 2	649	695	658
Rata-rata Data 3	668	708	664
Rata-rata Data	661	703	664

Rata-rata data di y=190 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	352	416	306
Rata-rata Data 2	314	377	289
Rata-rata Data 3	296	381	304
Rata-rata Data	321	391	300

Rata-rata data di y=190 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	449	490	442
Rata-rata Data 2	443	517	459
Rata-rata Data 3	443	521	473
Rata-rata Data	445	509	458

$$U=0,217 \text{ m.s}^{-1} \text{ dan } V=3,135 \text{ m.s}^{-1}$$

Rata-rata data di y=30 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	585	632	569
Rata-rata Data 2	571	633	586
Rata-rata Data 3	590	631	567
Rata-rata Data	582	632	574

$$U=0,217 \text{ m.s}^{-1} \text{ dan } V=3,695 \text{ m.s}^{-1}$$

Rata-rata data di y=30 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	656	698	662
Rata-rata Data 2	649	699	663
Rata-rata Data 3	650	705	653
Rata-rata Data	652	700	659

Rata-rata data di y=110 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	713	765	713
Rata-rata Data 2	695	750	709
Rata-rata Data 3	755	745	728
Rata-rata Data	721	754	717

Rata-rata data di y=110 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	756	805	767
Rata-rata Data 2	778	819	759
Rata-rata Data 3	756	817	768
Rata-rata Data	763	813	765

Rata-rata data di y=190 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	554	653	515
Rata-rata Data 2	521	639	534
Rata-rata Data 3	591	672	588
Rata-rata Data	555	655	546

Rata-rata data di y=190 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	554	653	515
Rata-rata Data 2	521	639	534
Rata-rata Data 3	591	672	588
Rata-rata Data	555	655	546

Lampiran 4. Data distribusi temperatur api difusi pada *swirl nozzle* dengan sudut alur 90°

$$U=0,217 \text{ m.s}^{-1} \text{ dan } V=1,710 \text{ m.s}^{-1}$$

Rata-rata data di y=30 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	76	358	80
Rata-rata Data 2	63	361	68
Rata-rata Data 3	67	343	66
Rata-rata Data	69	354	71

$$U=0,217 \text{ m.s}^{-1} \text{ dan } V=2,495 \text{ m.s}^{-1}$$

Rata-rata data di y=30 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	146	452	159
Rata-rata Data 2	153	414	165
Rata-rata Data 3	140	437	168
Rata-rata Data	146	435	164

Rata-rata data di y=110 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	614	720	629
Rata-rata Data 2	627	708	639
Rata-rata Data 3	629	704	643
Rata-rata Data	623	711	637

Rata-rata data di y=110 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	696	739	590
Rata-rata Data 2	644	731	634
Rata-rata Data 3	650	724	666
Rata-rata Data	663	731	630

Rata-rata data di y=190 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	398	481	409
Rata-rata Data 2	406	480	371
Rata-rata Data 3	372	463	378
Rata-rata Data	392	474	386

Rata-rata data di y=190 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	497	661	513
Rata-rata Data 2	473	628	490
Rata-rata Data 3	477	620	493
Rata-rata Data	482	637	499

$$U=0,217 \text{ m.s}^{-1} \text{ dan } V=3,135 \text{ m.s}^{-1}$$

Rata-rata data di y=30 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	110	484	130
Rata-rata Data 2	114	487	113
Rata-rata Data 3	114	482	120
Rata-rata Data	113	484	121

$$U=0,217 \text{ m.s}^{-1} \text{ dan } V=3,695 \text{ m.s}^{-1}$$

Rata-rata data di y=30 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	223	584	223
Rata-rata Data 2	208	581	242
Rata-rata Data 3	220	564	235
Rata-rata Data	217	576	233

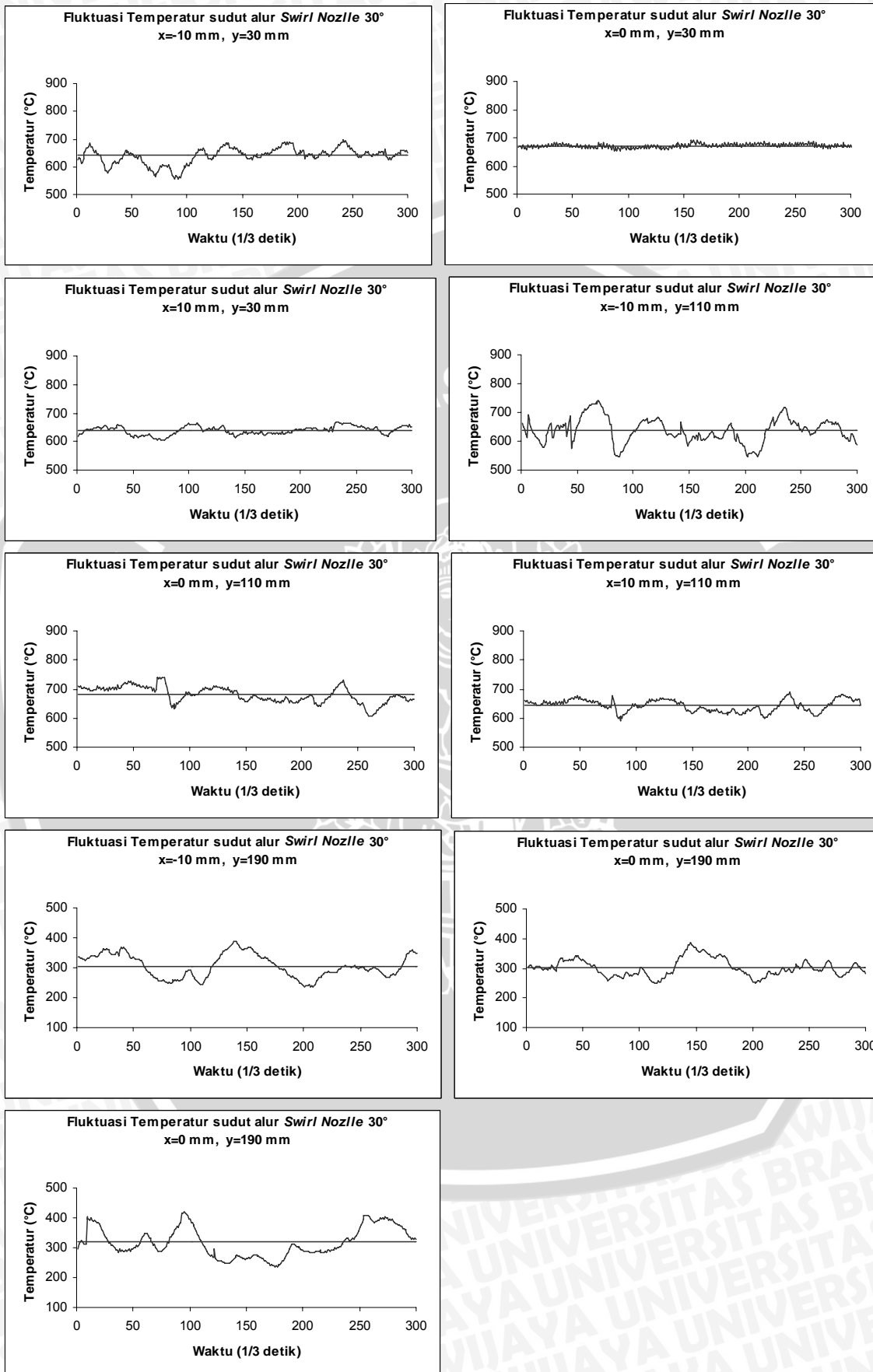
Rata-rata data di y=110 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	705	770	706
Rata-rata Data 2	718	758	713
Rata-rata Data 3	720	754	705
Rata-rata Data	714	761	708

Rata-rata data di y=110 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	749	816	727
Rata-rata Data 2	746	836	750
Rata-rata Data 3	768	833	739
Rata-rata Data	754	829	739

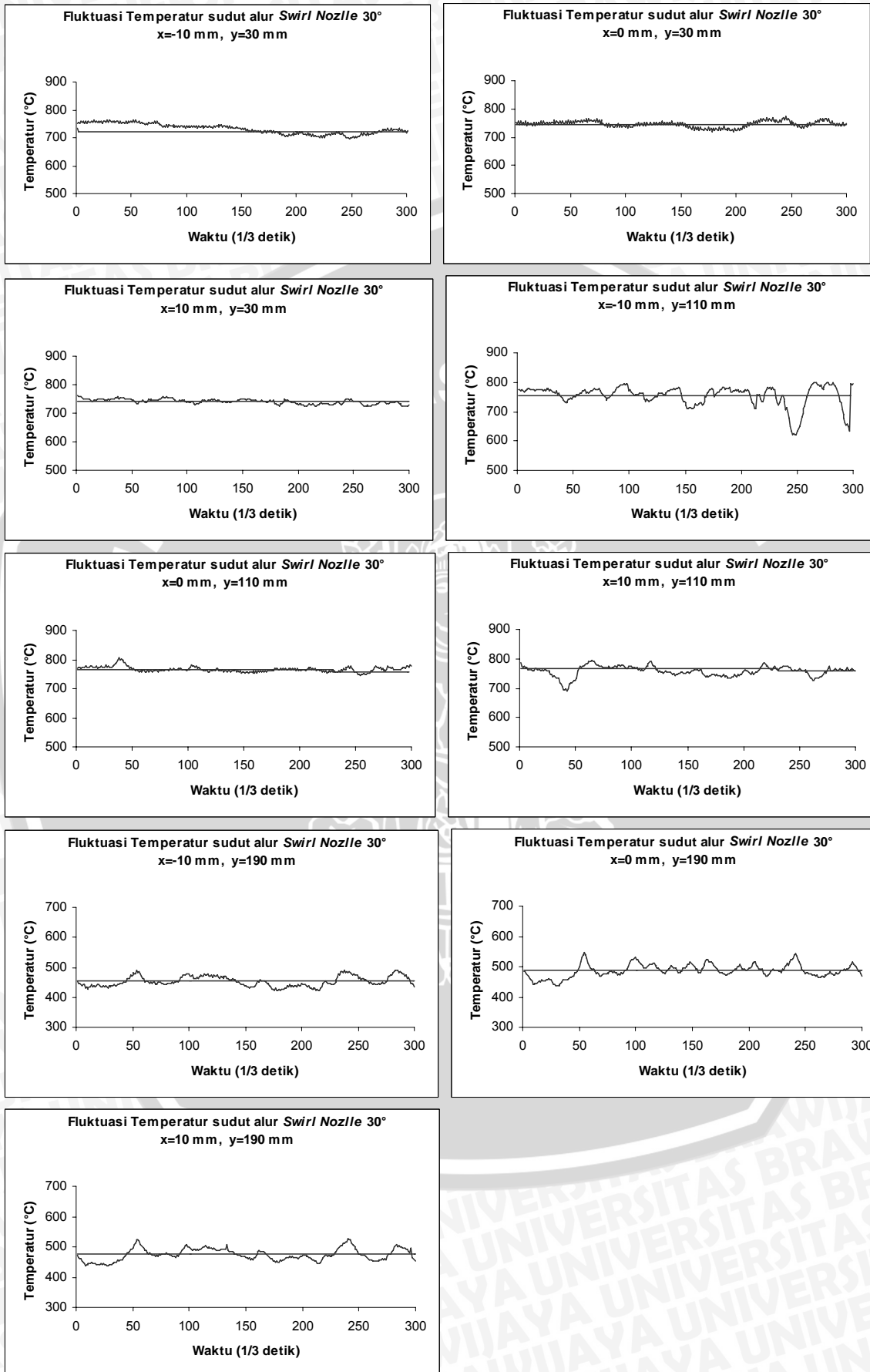
Rata-rata data di y=190 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	436	654	444
Rata-rata Data 2	441	659	435
Rata-rata Data 3	436	655	474
Rata-rata Data	438	656	451

Rata-rata data di y=190 mm	Titik peletakan sensor		
	-10 mm	0 mm	10 mm
Rata-rata Data 1	540	738	633
Rata-rata Data 2	577	778	634
Rata-rata Data 3	559	724	619
Rata-rata Data	559	747	628

Lampiran 5. Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur *swirl nozzle* 30°  
 $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 1,710 \text{ m.s}^{-1}$ .

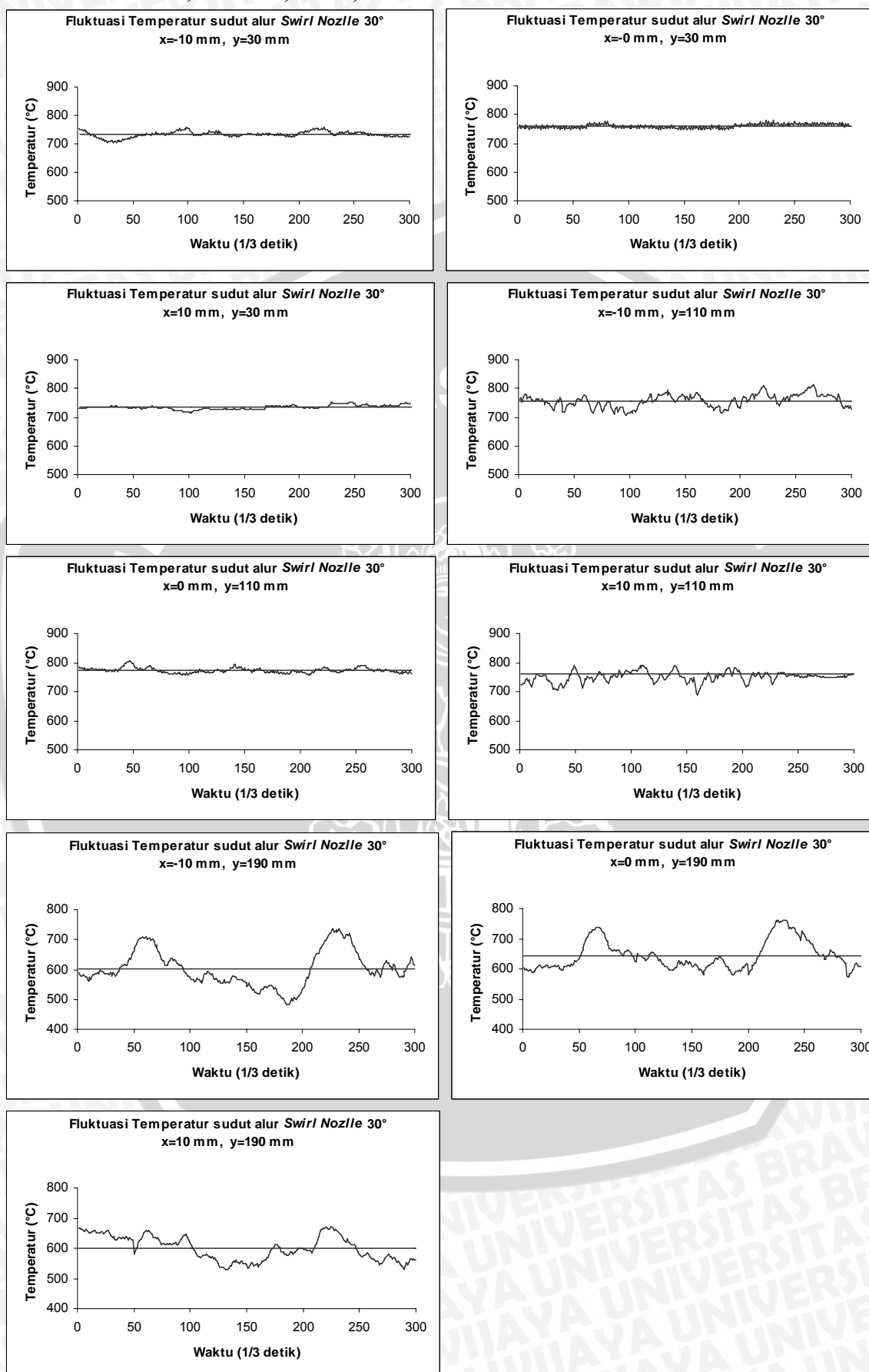


Lampiran 6. Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur *swirl nozzle* 30°  
 $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 2,495 \text{ m.s}^{-1}$ .



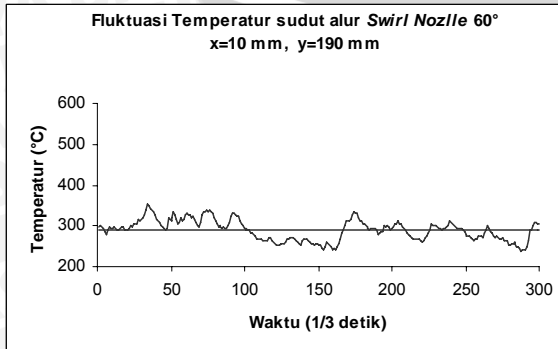
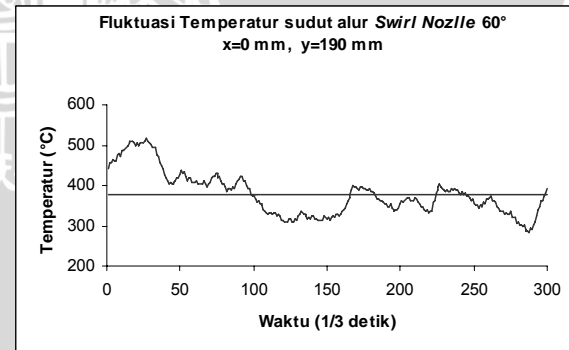
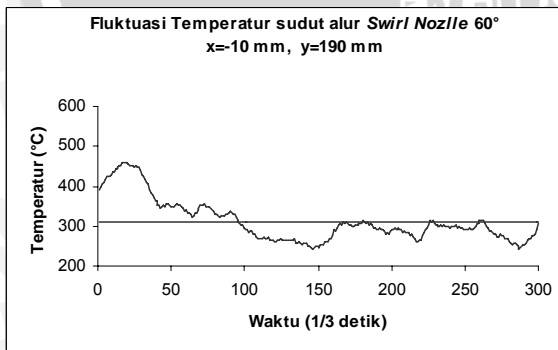
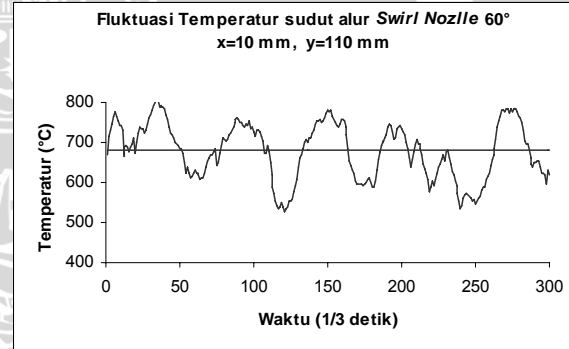
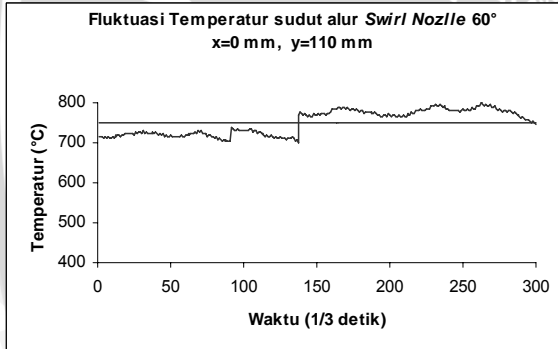
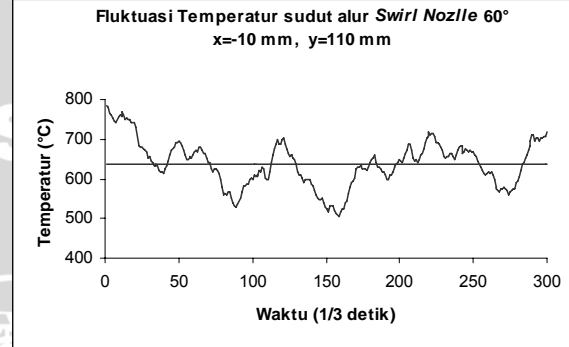
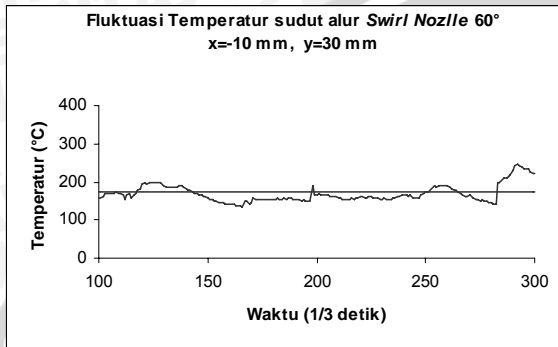
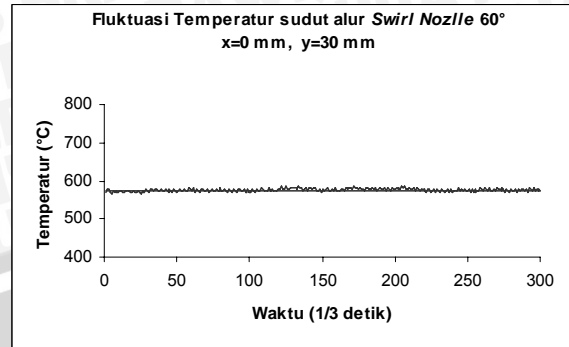
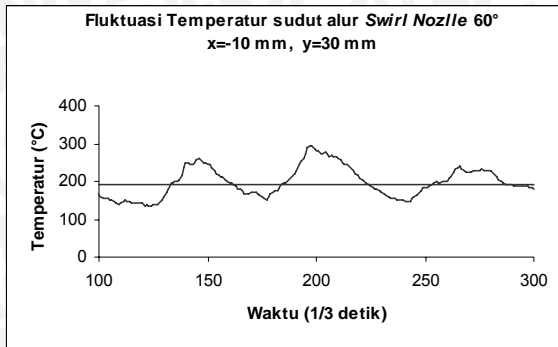
Lampiran 7. Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur *swirl nozzle* 30°

$$U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}, V = 3,695 \text{ m.s}^{-1}$$

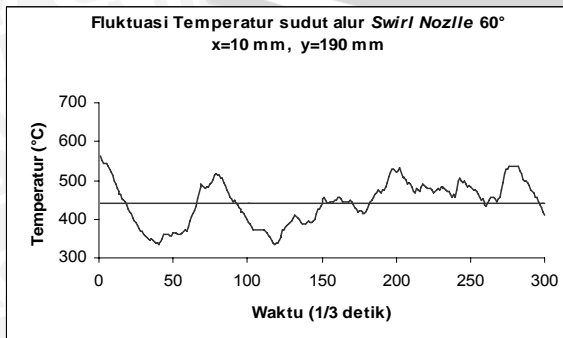
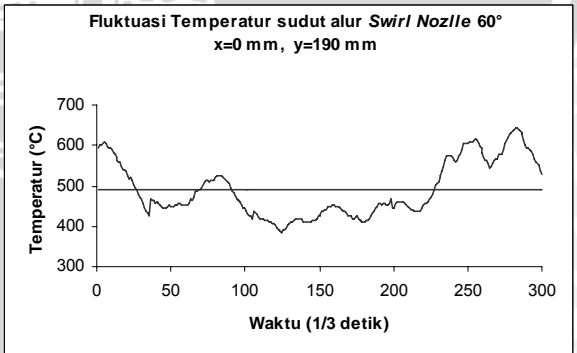
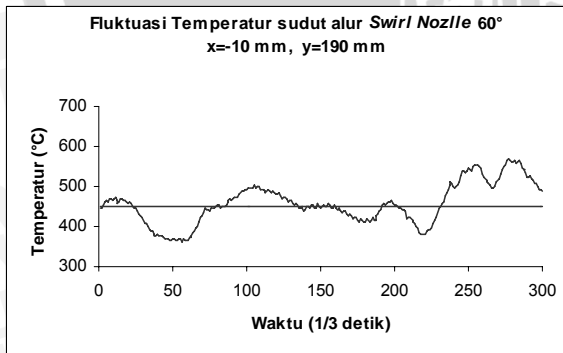
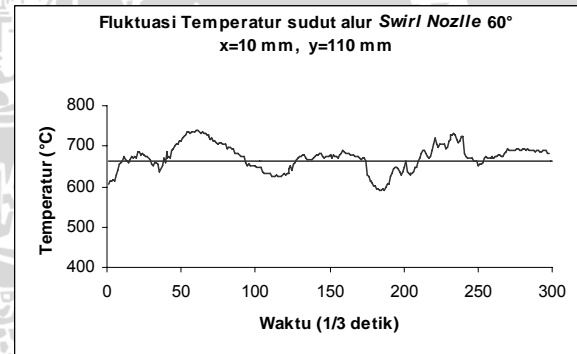
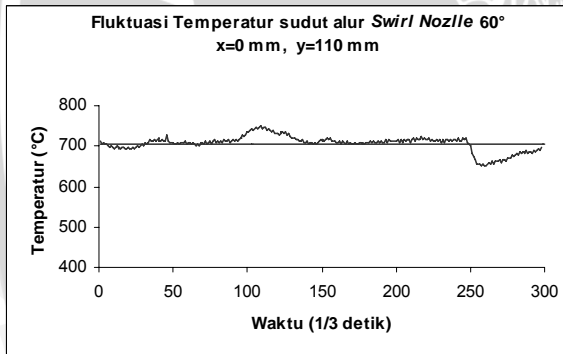
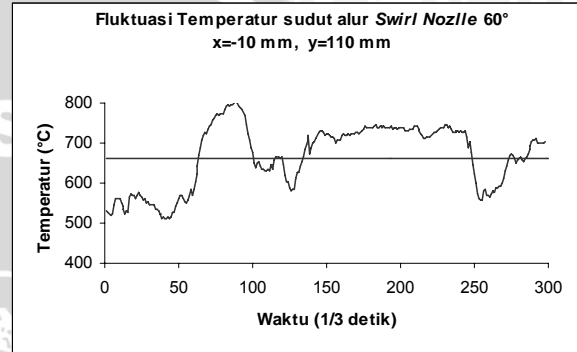
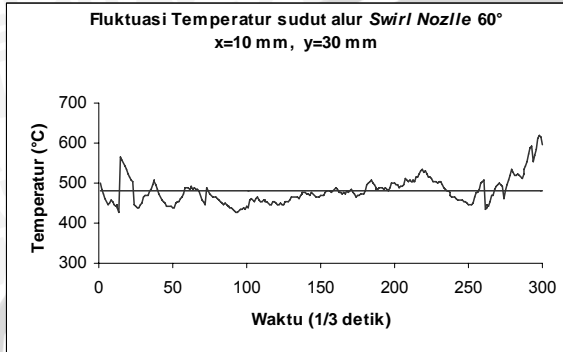
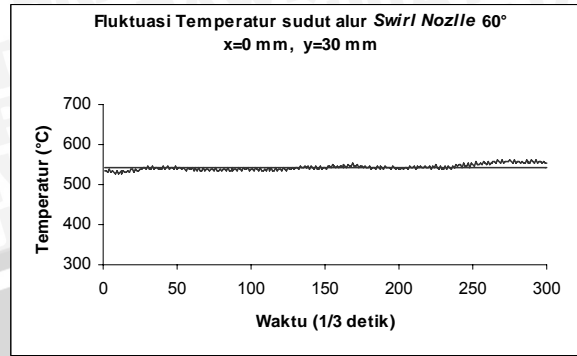
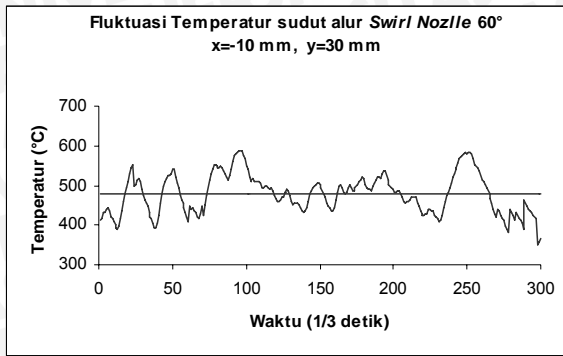




Lampiran 8. Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur *swirl nozzle* 60°  
 $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 1,710 \text{ m.s}^{-1}$ .

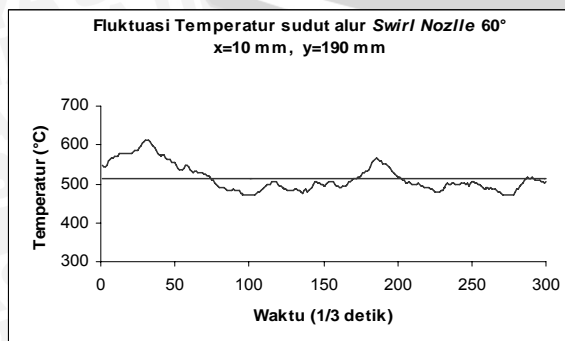
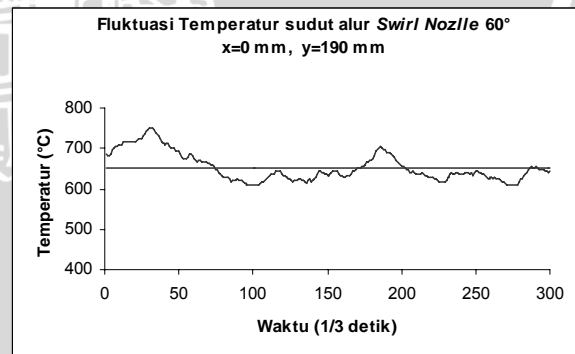
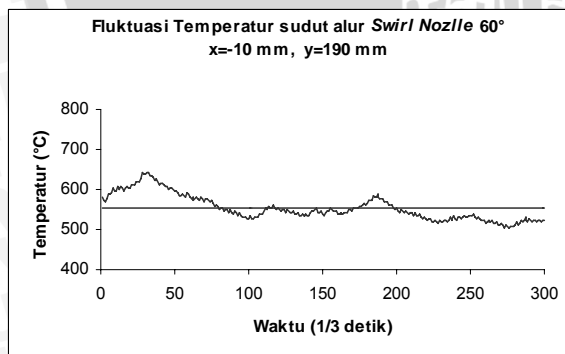
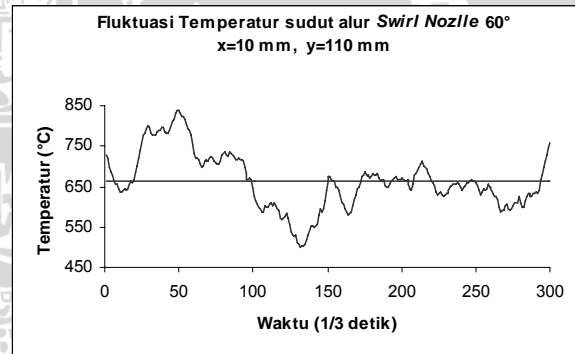
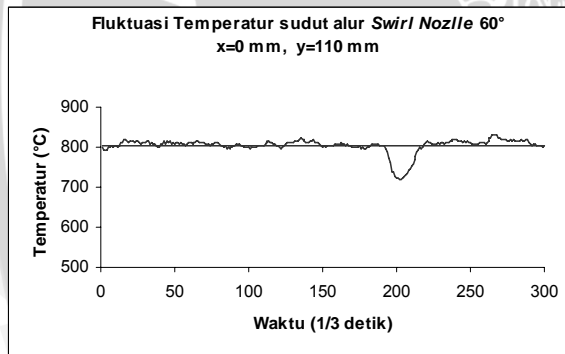
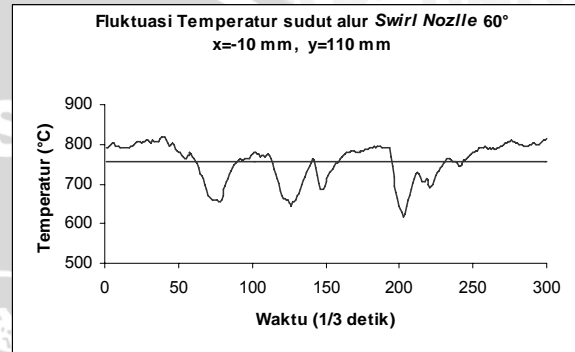
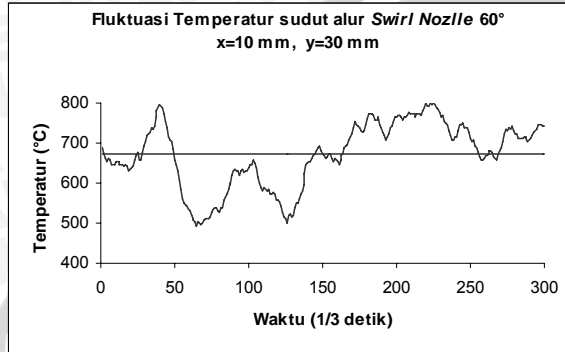
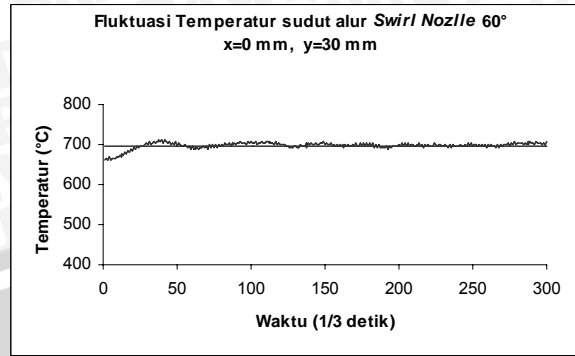
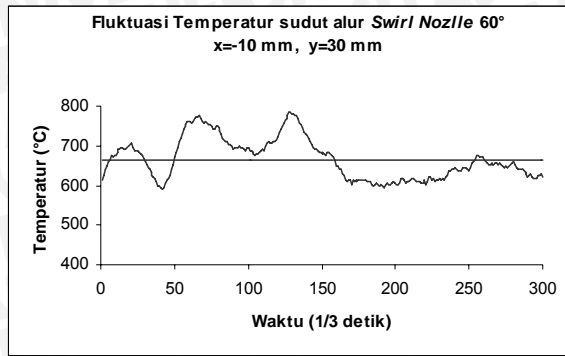


Lampiran 9. Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur *swirl nozzle* 60°  
 $U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 2,495 \text{ m.s}^{-1}$ .



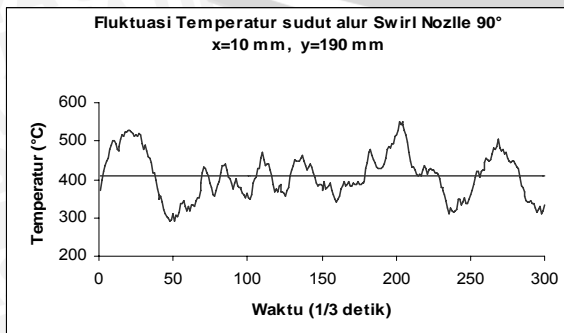
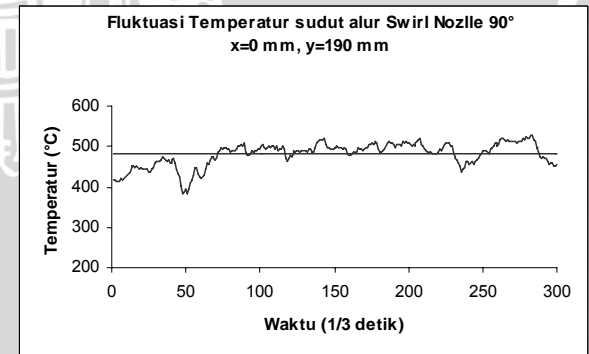
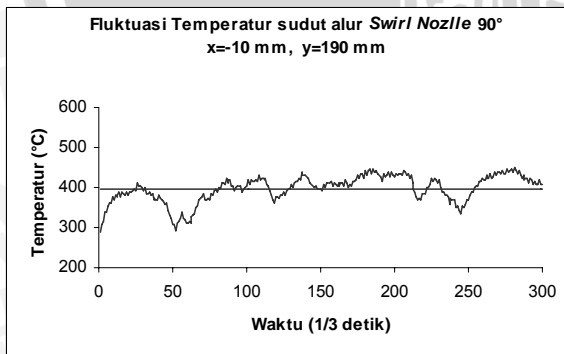
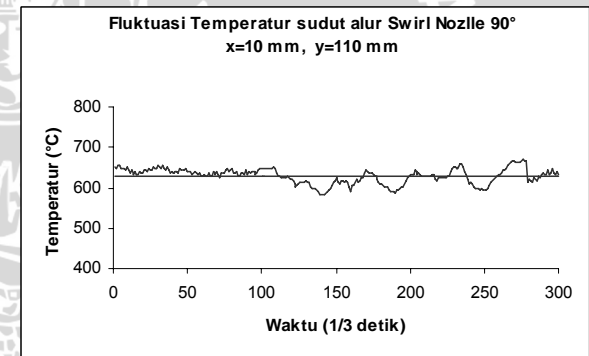
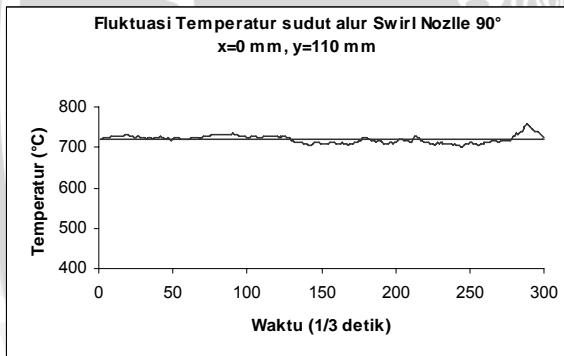
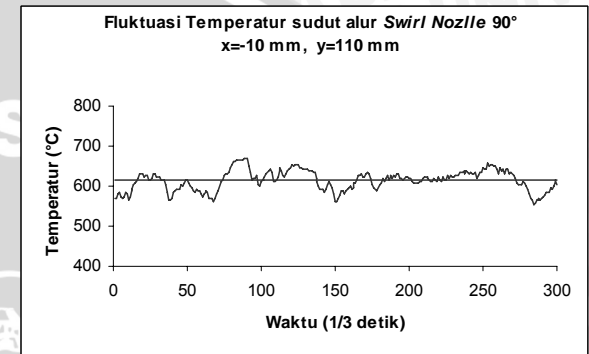
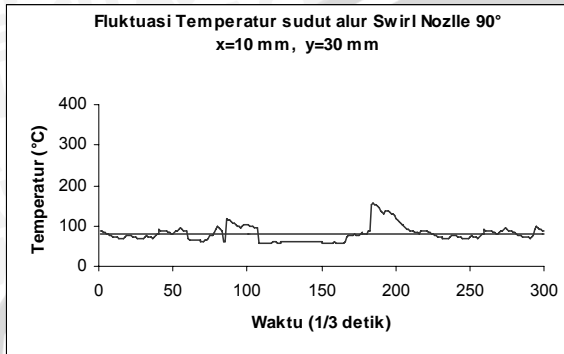
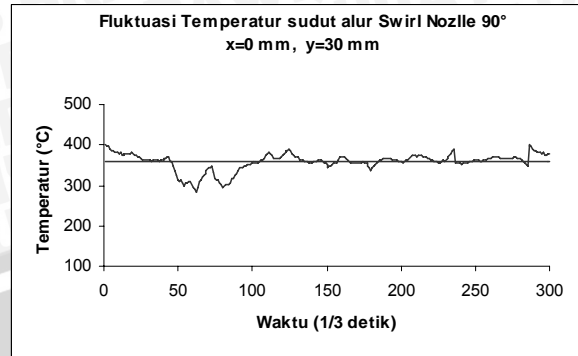
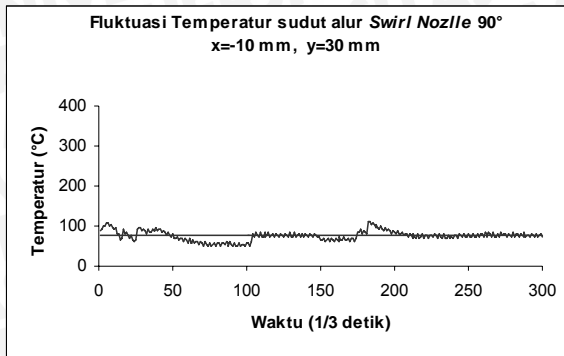
Lampiran 10. Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur *swirl nozzle* 60°

$$U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}, V = 3,695 \text{ m.s}^{-1}.$$



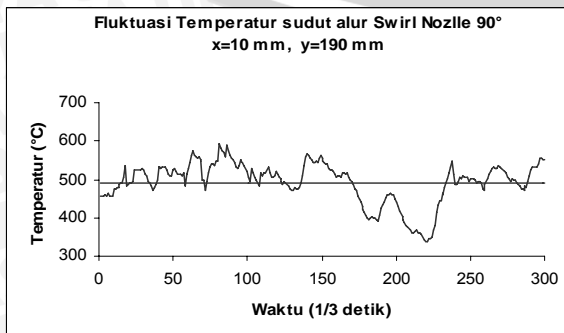
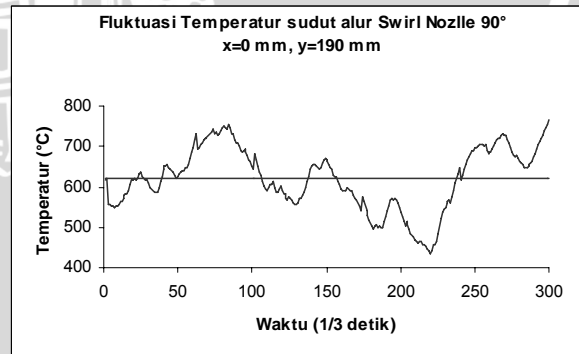
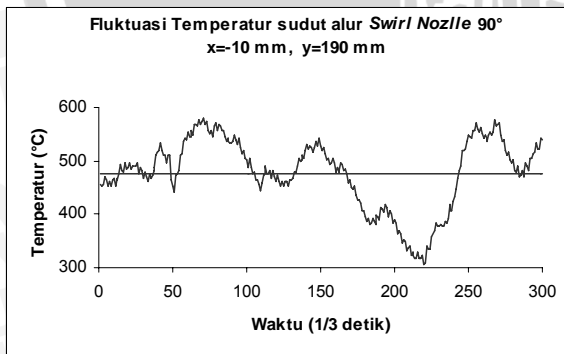
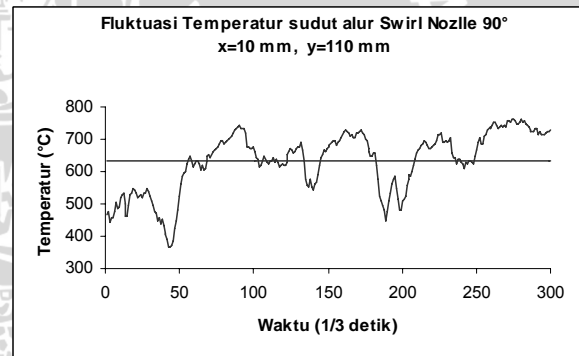
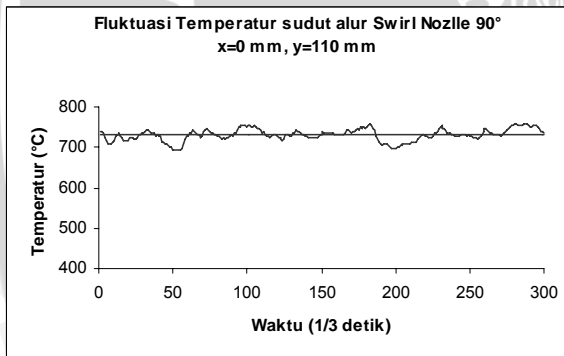
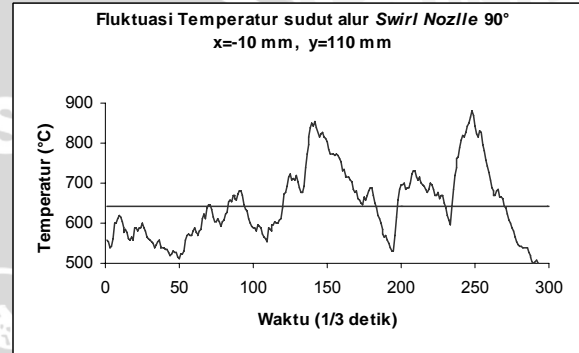
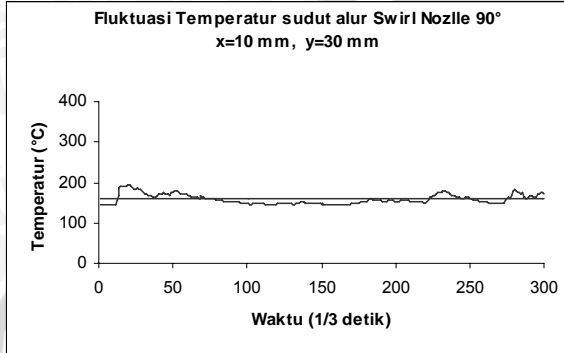
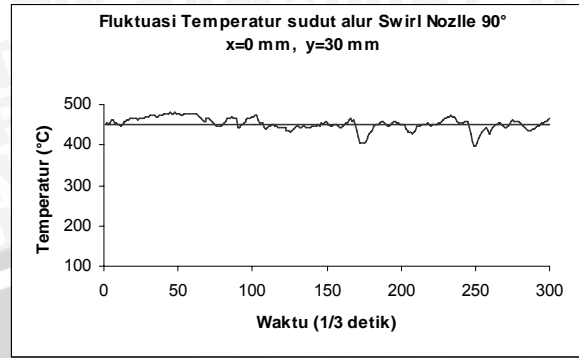
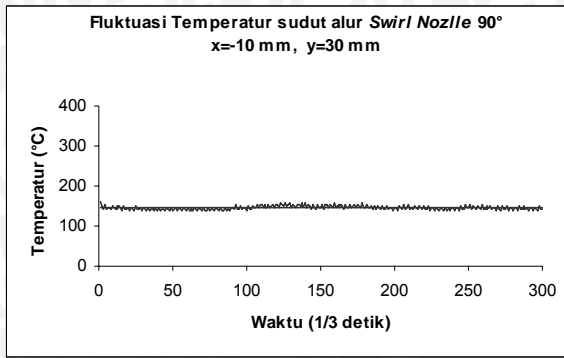
Lampiran 11. Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur *swirl nozzle* 90°

$$U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}, V = 1,710 \text{ m.s}^{-1}$$



Lampiran 12. Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur *swirl nozzle* 90°

$$U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}, V = 2,495 \text{ m.s}^{-1}.$$



Lampiran 13. Fluktuasi temperatur api difusi dengan sudut alur *swirl nozzle* 90°

$$U = 0,217 \text{ m.s}^{-1}, V = 3,695 \text{ m.s}^{-1}$$

